

ISSN 0910-7851

伝熱研究

Journal of The Heat Transfer Society of Japan

1993
January
Vol. 32
No. 124

日本伝熱学会30周年記念特集号I
日本伝熱学会論文集創刊号

ISSN 0918-9963

THERMAL SCIENCE AND ENGINEERING

Vol. 1
No. 1

日 本 伝 熱 学 会
The Heat Transfer Society of Japan

日本伝熱学会第31期（平成4年度）役員

会 長		藤 江 邦 男 (新明和工)
副 会 長	(無 任 所) (事務担当)	伊 藤 猛 宏 (九 大) 井 上 晃 (東 工 大)
理 事	工 藤 彦 (北 大) 望 月 貞 成 (東京農工大) 滝 本 昭 (金 沢 大) 加 藤 泰 生 (山 口 大) 小 熊 正 人 (石 播 重 工) 池 崎 英 二 (新 日 鐵) 吉 田 駿 (九 大) (「伝熱研究」編集委員長) 前 田 昌 信 (慶 大) (第30回日本伝熱シンポジウム準備委員長)	山 川 紀 夫 (岩 手 大) 長 野 靖 尚 (名 工 大) 坂 口 忠 司 (神 戸 大) 本 田 博 司 (九 大) 高 島 啓 行 (住 友 金 属)
監 事	二 階 勳 (鹿 島 建 設)	飯 田 嘉 宏 (横 国 大)
評 議 員	窪 田 英 樹 (室 蘭 工 大) 菅 原 征 洋 (秋 田 大) 三 浦 隆 利 (東 北 大) 菱 田 公 一 (慶 大) 吉 田 英 生 (東 工 大) 山 下 博 史 (名 大) 竹 内 正 紀 (福 井 大) 片 岡 勳 (京 都 大) 森 幸 治 (阪 人) 鈴 木 洋 (広 島 大)	馬 場 弘 (北 見 工 大) 円 山 重 直 (東 北 大) 田 中 忠 良 (電 総 研) 飛 原 英 治 (東 大) 西 村 誠 (岐 阜 大) 青 木 和 夫 (長 岡 技 科 大) 東 恒 雄 (大 阪 市 立 大) 千 田 衛 (同 志 社 大) 稲 葉 英 男 (岡 山 大) 伊 藤 昭 彦 (大 分 大)

「Thermal Science and Engineering」

チーフエディター

小 竹 進 (東 大)

伝 熱 研 究

日 次

日本伝熱学会30周年記念特集号 I

<会長挨拶>

創立30周年記念特集の発行に当たって …………… 第31期会長 藤江邦男(新 明 和)… 1

<日本伝熱学会の歴史>

日本伝熱学会の活動に関する資料 …… 第31期副会長(事務担当)井上 晃(東 工 大)… 2

<創立30周年を祝って>

日本伝熱学会と日本学術会議との関わり

…………… 第15期会長 西川兼康(九州電力, 九大名誉教授)… 15

伝熱学の30年の発展と今後の展望 …… 第17期会長 森 康夫(東工大名誉教授)… 17

エネルギー・環境問題と日本伝熱学会の使命

…………… 第18期会長 甲藤好郎(日大, 東大名誉教授)… 19

Heat Transfer in Japan …………… R.J.Goldstein(ミネソタ大学, 米国)…21

In Honour of the 30th Anniversary of the Heat Transfer Society of Japan

…………… J.H.Whitelaw(インペリアルカレッジ, 英国)…23

<伝熱研究の進展 I>

熱伝導・接触熱抵抗研究の進展 …………… 岡田昌志・松本浩二(青山学院大)… 25

壁面剪断乱流の構造と輸送機構 …………… 笠木伸英(東 大)… 37

対流熱伝達における伝熱促進 …………… 鈴木健二郎・稲岡恭二(京 大)… 51

密閉空間内自然対流研究の進展 …………… 尾添紘之・岩本光生・平野博之(九 大)… 65

自然対流乱流境界層の乱れの生成と熱輸送のメカニズム

75

…………… 長野靖尚・辻 俊博(名 工 大)… 75

金属の凝固伝熱研究の進展 …………… 大中逸雄(阪 大)… 85

沸騰研究の過去, 現在, 未来 …………… 庄司正弘(東 大)… 93

管内・管外凝縮のメカニズムと促進 …………… 本田博司(九 大)… 105

燃焼の中の伝熱 …………… 高城敏美(阪 大)… 116

ふく射伝熱研究のニーズとふく射物性研究のシーズ …………… 牧野俊郎(京 大)… 123

〈国際伝熱会議委員会報告〉

国際伝熱会議アセンブリ委員会に出席して	平田 賢(芝浦工大)...	133
---------------------------	---------------	-----

〈地方研究グループ活動報告〉

東北グループ・秋季伝熱セミナー	山川紀夫(岩手大)...	135
北陸信越地方グループ「1992秋季伝熱セミナー(新潟)報告」...	滝本 昭(金沢大)...	137
東海研究グループ企画 賢島伝熱セミナー 「熱流体計測の基礎と最前線」報告	加藤征三(三重大)...	139
伝熱学会東海地区 「若手研究者発表会およびイブニング・トーク」	長野靖尚(名工大)...	141
中四国研究グループ活動報告 山口地方(宇部)特別講演会及び見学会開催の報告	加藤泰生(山口大)...	143
九州研究グループ 特別講演会及び講演会	本田博司(九大)...	145

〈お知らせ〉

「財政基盤強化のための募金事業」に対するご協力をお願い	会長 藤江邦男、実行委員会委員長 棚澤一郎...	149
第30回日本伝熱シンポジウム		155
第10回国際伝熱会議論文募集		159
Heat Transfer Japanese Research, Editor 交代のお知らせ		160
“分子およびミクロスケールでの熱・物質移動現象”に関する 日米セミナーへの参加のご案内		161
関西研究グループ講演会開催通知		162
混相流シンポジウム'93(第12回)参加募集要項		163
事務局からの連絡		165
入会申込み・変更届用紙		

Journal of The Heat Transfer Society of Japan

Vol.32, No.124, January, 1993

CONTENTS

Special Issue (Part I): The 30th Anniversary of The Heat Transfer Society of Japan

<President's Address>

In Publishing the 30th Anniversary Memorial Special Issue

..... Kunio Fujie (Shinmaywa) 1

<History of the HTSJ>

Summary of Past and Present Activities of The Heat Transfer Society of Japan

..... Akira Inoue (Tokyo Inst. of Tech.) 2

<In Honor of the 30th Anniversary of the HTSJ>

Relations between The Heat Transfer Society of Japan and The Science Council of Japan

... Kaneyasu Nishikawa (Kyushu Electric Power Co., Prof. Emeritus, Kyushu Univ.) ... 15

Thirty-Year History and Future Development of Heat Transfer

..... Yasuo Mori (Prof. Emeritus, Tokyo Inst. of Tech.) 17

An Essay to Celebrate the 30th Anniversary of the Establishment of HTSJ:

The Energy and Environmental Problems and the Society

..... Yoshiro Katto (Nihon Univ., Prof. Emeritus, Univ. of Tokyo) 19

Heat Transfer in Japan R.J.Goldstein (Univ. of Minnesota, U.S.A.) 21

In Honour of the 30th Anniversary of the Heat Transfer Society of Japan

..... J.H.White law (Imperial College, England) 23

<Progress and Prospects in Heat Transfer Researches. Part I>

Progress in Heat Conduction and Contact Conductance Heat Transfer

..... Masashi Okada, Koji Matsumoto (Aoyama Gakuin Univ.) 25

Structure and Transport Mechanism of Turbulent Wall Shear Flow

..... Nobuhide Kasagi (Univ. of Tokyo) 37

Enhancement of Convective Heat Transfer... Kenjiro Suzuki, Kyoji Inaoka (Kyoto Univ.) 51

Literature Survey on Natural Convection in an Enclosure

..... Hiroyuki Ozoe, Mitsuo Iwamoto, Hiroyuki Hirano (Kyushu Univ.) ... 65

Turbulence Structure and Heat Transfer in a Natural Convection Boundary Layer

..... Yasutaka Nagano, Toshihiro Tsuji (Nagoya Inst. of Tech.) 75

Progress of Solidification Heat Transfer Research of Metals and Alloys Itsuo Ohnaka (Osaka Univ.)	85
Progress and Prospects in Boiling Phenomena Masahiro Shoji (Univ. of Tokyo).....	93
Condensation Inside and Outside Tubes: Mechanism and Its Enhancement Hiroshi Honda (Kyushu Univ.)	105
Heat Transfer in Combustion Processes Toshimi Takagi (Osaka Univ.)	116
Present Status in Thermal Radiation Characteristics Study Toshiro Makino (Kyoto Univ.)	123
<Future International Heat Transfer Conferences>	
Report on the Assembly for International Heat Transfer Conferences Masaru Hirata (Shibaura Inst. of Tech.)	133
<Reports on the Local Group Activities>	135
<Announcements>	149

〈会長挨拶〉

創立30周年記念特集の発行に当たって

会長 藤江 邦男

日本伝熱学会はその前身であります、伝熱研究会の創立から、本年度で30周年を迎え、ここに学会誌「伝熱研究」に記念行事の一端として、30周年記念特集号を発刊することに致しました。

本学会が諸先輩先生方の御努力によって、昭和30年代からの我が国の経済発展に伴い、機械設備、原子力、石油化学、電子・情報機器、宇宙分野などの研究開発は急速に進展し、その中核の科学技術の一つとして、伝熱学が大きくクローズアップされてきました。このような背景の下に、伝熱工学の研究開発の進展に、情熱と期待を持つ同学の十が、互に語り、昭和35年4月研究会設立の発起人会を開き、一年近い月日をかけて、組織、運営方針などを検討し、昭和36年11月22日に第一回総会が開かれ、現在の日本伝熱学会の誕生を見たのであります。「伝熱研究」誌は翌年に発刊されており、初代会長小林明先生は“「伝熱研究」の発刊にあたり”の文章の中で、伝熱研究会の創立の趣旨として、2つの点をあげております。

その一つは「伝熱工学の世界的進運に対して、我が国もこれに参加し、貢献する責任があり、全世界からもそれを期待されている。」ことを言われております。もう一点は「伝熱工学は非常に多方面で応用対象を持つところが特色であり、その進歩もまた多方面からの寄与によって、初めて可能となり、個々の学会や協会などの局限された、範囲に止まるようでは不十分である。ここに総合的研究連絡機関の結成が切実に要望されて、わが日本伝熱研究会が発足した。」と理由を述べられています。このお言葉から当時、すでに今日の伝熱工学を取り巻く状況を予測されており、30年後の今日においても、このお言葉は伝熱学会の基本的行動方針であると思えます。

本誌発刊に際しましては、海外からは伝熱分野の研究で著名なR.J.Goldstein、J.H.White-law先生のお二方と、創立当時からご指導頂いております先輩三先生の貴重な原稿を頂き、記念特集号の巻頭を飾ることができましたことは大変喜ばしく、心から感謝申し上げます。

特集として、現役第一線でご活躍の先生方には、現在の伝熱研究の進展について、ご考察して頂きましたので、会員各位の今後のご研究の糧になるものと思えますので、研究開発のご参考にして頂ければ大変幸に存じます。

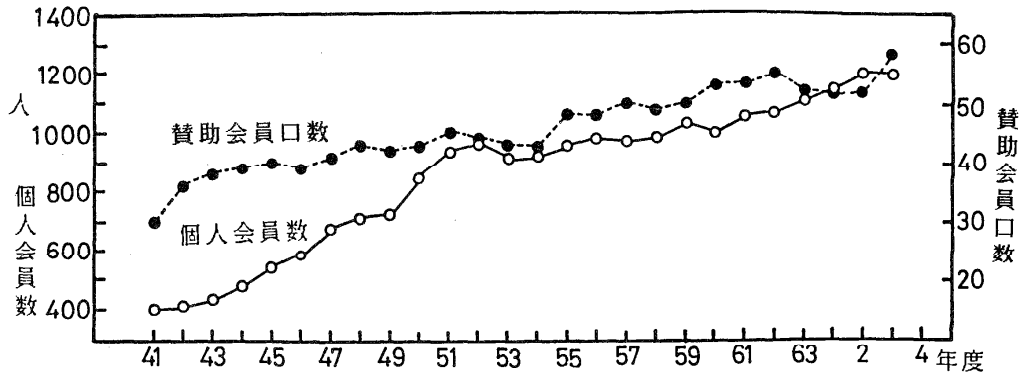
諸先輩先生方のこれまでのご指導、ご活躍によって、本学会は順調に発展してきましたが、再三に渡る会費値上げにも拘らず、残念ながら運営資金の面からは、必ずしも十分とは言えないのが現状であります。今後の学会法人化並びに学会活性化を推進するために、会員皆さんの日頃の学会を愛するお気持ちの現われとして、学会の将来のために、一層のご支援、ご協力をお願い申し上げます。

＜日本伝熱学会の歴史＞

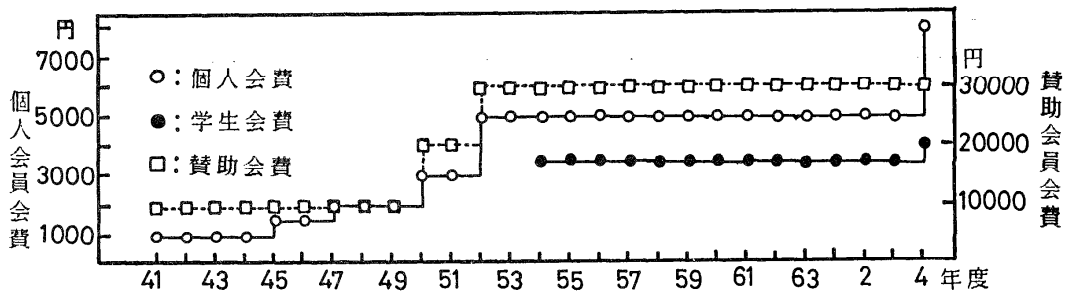
日本伝熱学会の活動に関する資料

(1) 会員数の変遷

年 度	個人会員数	維持会員数
昭和 37年 4月	170 名	3 社
昭和 38年 3月	292	20
昭和 39年 3月	312	24
昭和 40年 3月	347	28
昭和 41年 3月	383	32
昭和 42年 3月	414	30
昭和 43年 3月	437	36
昭和 44年 3月	478	38
昭和 45年 3月	535	39
昭和 46年 3月	579	40
昭和 47年 3月	670	39
昭和 48年 3月	705	41
昭和 49年 3月	720	43
昭和 50年 3月	824	42
昭和 51年 3月	936	35社 (43□)
昭和 52年 3月	978	35社 (45□)
昭和 53年 3月	913	34社 (44□)
昭和 54年 3月	920	33社 (43□)
昭和 55年 3月	正 910 学 48	32社 (43□)
昭和 56年 3月	正 903 学 73	33社 (48□)
昭和 57年 3月	正 910 学 70	31社 (48□)
昭和 58年 3月	正 910 学 76	33社 (50□)
昭和 59年 3月	正 950 学 86	31社 (49□)
昭和 60年 3月	正 942 学 61	31社 (50□)
昭和 61年 3月	正 991 学 64	32社 (53□)
昭和 62年 3月	正 996 学 75	32社 (53□)
昭和 63年 3月	正1019 学 91	38社 (55□)
平成 元年 3月	正1055 学 98	39社 (52□)
平成 2年 3月	正1083 学125	39社 (52□)
平成 3年 3月	正1081 学115	40社 (52□)
平成 4年 3月	正1159 学129	47社 (61□)



(2) 会費の変遷



③ 伝熱学会（研究会） 役員数の変遷

期	会 長	副 会 長	連絡幹事	幹 事	監 査	備 考	
1	1	1	4	12	2	昭和36年11月22日 日本伝熱研究会 発足	
2	1	1	4	14	2		
3	1	1	4	14	2		
4	1	1	5	17	2	第4期幹事会にて東海 グループ発足 *年度途中で21に変更	
5	1	1	5	20*	2		
6	1	2	6	17	2	関東グループ連絡幹事が 置かれた	
7	1	2	6	13	2		
8	1	2	6	14	2		
9	1	2	6	14	2		
10	1	2	7	15	2		中国・四国グループ発足
11~16	1	2	7	23	2		
17	1	2	8	23	2	北陸・信越グループ発足	
18~30	1	2	8	23	2		
	会 長	副 会 長	理 事	評議員	監 事	*第30期より研究会が 学会に名称変更 *第31期より新会則 (定款)による役員 の名称・定数変更	
31	1	2	13	20	2		

(4) 歴代会長・副会長

創立：昭和36年11月22日

期(年) 会長	副会長 (無任所, 事務担当)
1 (37) 小林 明 (トヨタ中研)	橘 藤雄 (東大)
2 (38) 抜山 四郎	橘 藤雄 (東大)
3 (39) 矢木 栄 (東大)	内田 秀雄 (東大)
4 (40) 棚沢 泰 (東北大)	内田 秀雄 (東大)
5 (41) 西脇 仁一 (東大)	甲藤 好郎 (東大)
6 (42) 菅原 菅雄 (京大)	水科 篤郎 (京大) 甲藤 好郎 (東大)
7 (43) 山県 清 (宇部高専)	佐藤 俊 (京大) 植田 辰洋 (東大)
8 (44) 坪内 為雄 (東北学大)	西川 兼康 (九大) 植田 辰洋 (東大)
9 (45) 橘 藤雄 (東大)	一色 尚次 (東工大) 国井 大蔵 (東大)
10 (46) 斎藤 武 (北大)	小笠原光信 (阪大) 国井 大蔵 (東大)
11 (47) 小笠原光信 (阪大)	頼実 正弘 (広大) 平田 賢 (東大)
12 (48) 内田 秀雄 (東大)	前田 四郎 (東北大) 平田 賢 (東大)
13 (49) 水科 篤郎 (京大)	牧 忠 (名大) 平田 賢 (東大)
14 (50) 杉山 幸男 (名大)	甲藤 好郎 (東大) 一色 尚次 (東工大)
15 (51) 西川 兼康 (九大)	泉 亮太郎 (名大) 一色 尚次 (東工大)
16 (52) 佐藤 俊 (京大)	武山 斌郎 (東北大) 片山 功蔵 (東工大)
17 (53) 森 康夫 (東工大)	長谷川 修 (九大) 片山 功蔵 (東工大)
18 (54) 甲藤 好郎 (東大)	岐美 格 (京大) 棚沢 一郎 (東大)
19 (55) 国井 大蔵 (東大)	関 信弘 (北大) 棚沢 一郎 (東大)
20 (56) 小林 清志 (静大)	山家 譲二 (石播) 秋山 守 (東大)
21 (57) 青木 成文 (東工大)	大谷 茂盛 (東北大) 秋山 守 (東大)
22 (58) 植田 辰洋 (東大)	松本 隆一 (神大) 斎藤 孝基 (東大)
23 (59) 武山 斌郎 (東北大)	藤井 哲 (九大) 斎藤 孝基 (東大)
24 (60) 岐美 格 (京大)	平田 賢 (東大) 小竹 進 (東大)
25 (61) 長谷川 修 (九大)	堀 雅夫 (動燃) 小竹 進 (東大)
26 (62) 大谷 茂盛 (東北大)	石黒 亮二 (北大) 越後 亮三 (東工大)
27 (63) 平田 賢 (東大)	藤掛 賢司 (豊田中研) 越後 亮三 (東工大)
28 (1) 藤井 哲 (九大)	相原 利雄 (東北大学) 黒崎 晏夫 (東工大)
29 (2) 石黒 亮二 (北大)	鈴木健二郎 (京大) 黒崎 晏夫 (東工大)
30 (3) 小竹 進 (東大)	架谷 昌信 (名大) 井上 晃 (東工大)
31 (4) 藤江 邦男 (新明和工業株)	伊藤 猛宏 (九大) 井上 晃 (東工大)

(5) 日本伝熱学会(研究会)並びに地方研究グループ発足年度に関して

日本伝熱研究会発会式：昭和36年11月22日 10:00~14:00 学生会分館

昭和37年 第1期より

北海道 — 第1回研究会 昭和38年 6月17日
東北 — 第1回研究会 昭和37年 5月26日 第1回懇談会 37 2/17
関西 — 第1回研究会 昭和37年 1月19日 (研究会発足以前に35.10/14)
関東 — 第1回研究会 昭和37年 4月28日 (以前にも数回の研究会合)
九州 — 第1回研究会 昭和37年 1月 1日~2日

昭和40年 第4期より

東海 — 第1回研究会 昭和40年10月 2日

昭和46年 第10期より

中国・四国 — 第1回研究会 昭和46年 7月21日

昭和53年 第17期より

北陸・信越 — 第1回研究会 昭和53年 7月 7日

(6) 会則について

- ・ 昭和36年11月22日 発会式において会則を定める
- ・ 昭和42年 5月18日 第5期総会にて、「副会長1→2」と決定
- ・ 昭和54年 5月31日 第17期総会にて、「学生会員」を加え、会員を4種とした
- ・ 平成 3年 5月30日 第30期総会にて、「日本伝熱研究会」を「日本伝熱学会」に名称変更
- ・ 平成 4年 5月28日 第31期総会にて、従来の「会則」に代わり「定款」が承認された
- ・ 細則は、会費値上げ及び学生会員設置のためそのつと変更されてきた。

(7) 歴代「伝熱研究」編集委員長

1期	内 田	秀 雄	11期	千 葉	徳 男
2期	森 康	夫 盛	12期	大 谷	茂 盛
3期	水 科	篤 郎	13期	菱 田	幹 男
4期	青 木	成 文	14期	三 石	信 雄
5期	武 山	斌 郎	15期	吉 信	宏 夫
6期	高 浜	平七郎	16期	棚 沢	一 郎
7期	藤 井	哲 一	17期	棚 沢	一 郎
8期	石 黒	亮 二	18期	福 迫	尚 一
9期	片 山	功 蔵	19期	河 村	一 治
10期	松 本	隆 一	20期	井 村	一 定

21期 永 井 伸 樹
 22期 架 谷 昌 信
 23期 宮 武 昌 修
 24期 荻 野 文 丸
 25期 黒 崎 晏 夫
 26期 谷 口 博
 27期 宮 本 政 英
 28期 服 部 照 賢
 29期 太 田 秀 和
 30期 藤 田 秀 臣

31期 吉 田 駿

(8) 日本伝熱シンポジウム

回数	期 間 (室数, 日数, 開催地)	会 場 (準備委員長)	発表件数	参加者数
1	昭和39年 5月26~27日 (1室, 2日, 京都)	京都会館 (水科 篤郎)	29	235
2	昭和40年 5月21~22日 (1室, 2日, 東京)	日本都市センター (内田 秀雄)	38	233
3	昭和41年 5月19~21日 (1室, 3日, 仙台)	宮城県民会館 (坪内 為雄)	52	~170
4	昭和42年 5月18~19日 (2室, 2日, 名古屋)	愛知県産業貿易館 (杉山 幸男)	52	297
5	昭和43年 5月16~17日 (2室, 2日, 福岡)	天神ビル (西川 兼康)	71	~250
6	昭和44年 5月29~30日 (3室, 2日, 札幌)	日本生命ビル講堂 (齊藤 武)	71	~220
7	昭和45年 5月21~23日 (2室, 3日, 東京)	学会館本館 (一色 尚次)	78	≥300
8	昭和46年 5月20~22日 (3室, 3日, 大阪)	大阪科学技術センター (小笠原 光信)	106	385
9	昭和47年 5月25~27日 (4室, 3日, 広島)	中国新聞社ビル (頼実 正弘)	118	~370
10	昭和48年 5月30~6/1日 (3室, 3日, 仙台)	宮城県民会館 (前田 四郎)	111	363
11	昭和49年 5月29~31日 (3室, 3日, 名古屋)	愛知県中小企業 セタ (牧 忠)	135	398

12	昭和50年 5月14～16日 (3室, 3日, 福岡)	電気ビル本館 (長谷川 修)	154	437
13	昭和51年 5月26～28日 (4室, 3日, 神戸)	兵庫県民会館他 (赤川 浩爾)	173	505
14	昭和52年 5月31～6/2日 (4室, 3日, 東京)	日本都市センター (植田 辰洋)	151	～500
15	昭和53年 5月30～6/1日 (4室, 3日, 札幌)	北海道厚生年金会館 (関 信弘)	160	379
16	昭和54年 5月30～6/1日 (4室, 3日, 広島)	新八丁堀会館 (頼実 正弘)	168	501
17	昭和55年 5月28～30日 (4室, 3日, 金沢)	ホリデイ・イン金沢 (平井 英二)	195	558
18	昭和56年 6月23～25日 (4室, 3日, 仙台)	ホテル白萩 (武山 郎)	186	490
19	昭和57年 5月26～28日 (4室, 3日, 名古屋)	愛知県厚生年金会館 (高浜 平七郎)	180	567
20	昭和58年 6月 1～ 3日 (4室, 3日, 福岡)	福岡サンパレス (藤井 哲)	193	559
21	昭和59年 5月30～6/1日 (4室, 3日, 京都)	京都国際会館 (岐美 格)	224	670
22	昭和60年 5月20～22日 (4室, 3日, 東京)	日本都市センター (片山 功藏)	198	677
23	昭和61年 5月27～29日 (5室, 3日, 札幌)	北大 学術交流会館 (石黒 亮二)	249	499
24	昭和62年 5月27～29日 (5室, 3日, 松山)	愛媛県民文化会館 (二神 浩三)	232	615
25	昭和63年 6月 1～ 3日 (5室, 3日, 金沢)	石川厚生年金会館 (林 勇二郎)	296	746
26	平成 元年 5月31～6/2日 (5室, 3日, 仙台)	宮城第一ホテル (永井 伸樹)	280	739
27	平成 2年 5月30～6/1日 (6室, 3日, 名古屋)	愛知県厚生年金会館 (架谷 昌信)	351	982

28	平成 3年 5月29～31日 (5室, 3日, 福岡)	福岡リーセントホテル (伊藤 猛宏)	303	802
29	平成 4年 5月27～29日 (7室, 3日, 大阪)	大阪国際交流センター (高城 敏美)	427	1046
30	平成 5年 5月26～28日 予 定	横浜開港記念会館 (前田 昌信)		

(9) 伝熱セミナー

回数	日 (開催地)	程	会 場 (準備委員長)	参加者数
1	昭和42年 (東京)	7月29～30日	八王子セミナーハウス (平田 賢)	92
2	昭和43年 (長野)	7月26～28日	軽井沢グリーンホテル (一色 尚次)	～70
3	昭和44年 (東京)	8月 8～10日	八王子セミナーハウス (小茂鳥 和生)	83
4	昭和45年 (静岡)	7月28～30日	館山寺遠鉄ホテル別館 (杉山 幸男)	95
5	昭和46年 (茨城)	8月11～13日	東海クラブ講堂 (山崎 弥三郎)	～45
6	昭和47年 (兵庫)	7月24～26日	神戸市六甲保養所行雲荘 (赤川 浩爾)	60
7	昭和48年 (群馬)	7月23～25日	赤城天望荘 (青木 成文)	61
8	昭和50年 (北海道)	1月 8～10日	定山溪青巒荘 (斉藤 武)	65
9	昭和50年 (長野)	8月31～9/2日	慶應義塾立科山荘 (小茂鳥 和生)	70
10	昭和51年 (石川)	7月28～30日	金沢郵便貯金会館 (泉 亮太郎)	70

11	昭和52年 8月 4～6日 (宮城)	東北大学川渡共同セミナー (弓削 達雄)	114
12	昭和53年 9月 22～24日 (京都)	京都農林年金会館 (岐美 格)	83
13	昭和54年 7月 10～12日 (福岡)	志賀島国民休暇村 (藤井 哲)	106
14	昭和55年 8月 16～18日 (徳島)	徳島勤労総合福祉センター鳴門ハイツ (浦川 和馬)	108
15	昭和56年 7月 22～24日 (北海道)	支笏湖畔国民休暇村 (水野 忠治)	82
16	昭和57年 7月 14～16日 (茨城)	筑波研修センター (安達 勤)	89
17	昭和58年 7月 15～17日 (和歌山)	高野町公民館他 (勝田 勝太郎)	121
18	昭和59年 7月 16～18日 (長野)	名古屋市市民御岳休暇村セントラルodge (菱田 幹雄)	89
19	昭和60年 7月 28～30日 (鳥取)	大山共同研修所 (千葉 徳男)	75
20	昭和61年 7月 16～18日 (長野)	小諸布引温泉国民年金保養センター (久我 修)	95
21	昭和62年 8月 5～7日 (宮城)	東北大学川渡共同セミナー (相原 利雄)	99
22	昭和63年 7月 20～22日 (大分)	いこいの村 国東 (伊藤 猛宏)	102

(10) 伝熱セミナーセッション内容

回数	セッション
1	<ul style="list-style-type: none"> ・ 強制対流 (eddy diffusivity ϵ_H, ϵ_M について) ・ 自然対流 (層流・乱流遷移について) ・ 物質移動を伴う熱伝達 (境界層の構造について) ・ ふく射 (輝炎のふく射) ・ 沸騰 (気泡の初生の機構) ・ 二相流 (気液二相流の流動様式とその遷移)
2	<ul style="list-style-type: none"> ・ 熱伝導 ・ 超臨界圧流体 ・ 凝縮 ・ 熱交換器 ・ 総合討論
3	<ul style="list-style-type: none"> ・ 相変化を伴う伝熱 ・ 物性値とその測定 ・ 極限状態下の伝熱 ・ 伝熱未来学 (放談会) ・ 化学反応を伴う伝熱 ・ 非平衡熱力学と伝熱 ・ 液体金属の伝熱
4	<ul style="list-style-type: none"> ・ 輝炎およびガスふく射 ・ 回転場の熱伝達 ・ コンパクト熱交換器 ・ 乾燥 ・ 石油化学における伝熱問題 ・ 製鉄および冶金工学における伝熱問題
5	<ul style="list-style-type: none"> ・ 原子炉と伝熱問題 ・ 相変化を伴う気液二相流の伝熱・流動 ・ 高温における伝熱の問題点 ・ 日本原子力研究所東海研究所、動燃事業団大洗工学センターの見学
6	<ul style="list-style-type: none"> ・ 研究テーマの開拓と研究の方法論 ・ 生体工学における伝熱・流動問題 ・ 特殊温度測定法 ・ 環境と価値観の変遷 ・ LNGにおける低温技術の諸問題 ・ 大阪酸素尼崎工場見学
7	<ul style="list-style-type: none"> ・ 動力プラントの安全生と伝熱 ・ 熱公害と伝熱 ・ 伝熱研究の未来 (放談会) ・ 伝熱問題への計算機の利用

8	<ul style="list-style-type: none"> ・ エネルギーシステム ・ 国際会議の話題を中心として ・ 複合伝熱 (I) ・ 複合伝熱 (I I) ・ 札幌下野幌焼却場、北海道開拓記念館見学
9	<ul style="list-style-type: none"> ・ 燃焼と伝熱 ・ 気液二相の動的諸問題 ・ 伝熱現象のフィルム映写 ・ 伝熱失敗集 (自由討論) ・ 熱物性値
10	<ul style="list-style-type: none"> ・ 霜の生成問題について ・ 対流伝熱における伝熱促進法 ・ 伝熱トピックス ・ 火炎伝熱について ・ 伝熱放談会
11	<ul style="list-style-type: none"> ・ 熱と流れの測定技術 ・ 省エネルギー技術と伝熱工学 (I) ・ 省エネルギー技術と伝熱工学 (I I) ・ 熱工学放談会 ・ 境界領域における熱工学的諸問題 ・ 鬼首地熱発電所建設現場、鳴子ダム、鳴子温泉見学
12	<ul style="list-style-type: none"> ・ 直接接触伝熱 ・ 伝熱トピックス ・ 環境伝熱-1 ・ 環境伝熱-2 ・ 国際伝熱学会会議報告 ・ 蓄熱
13	<ul style="list-style-type: none"> ・ クリテイカルレビュー ・ 未来エネルギー ・ 特別講演 ・ 研究座談会 ・ 省エネルギーと伝熱 (フィルムセッション) ・ 総括
14	<ul style="list-style-type: none"> ・ 伝熱学における測定法 ・ エネルギーシステム ・ 伝熱研究の展望 (パネル) ・ 自由討論会 ・ 伝熱トピックス

15	<ul style="list-style-type: none"> ・ 資源エネルギーの開発と伝熱 (I) ・ 資源エネルギーの開発と伝熱 (II) ・ 寒冷地における伝熱問題 ・ 80年代の伝熱研究に望むこと ・ 苫小牧東部工業基地見学
16	<ul style="list-style-type: none"> ・ 新・省エネルギーに関連した伝熱問題 ・ 講演「筑波研究学園都市」 ・ 映画「サンシャイン計画」 ・ 筑波地区関連研究機関等(12カ所)見学
17	<ul style="list-style-type: none"> ・ これまでとこれからの伝熱 ・ 特別講演 ・ 流動伝熱問題のモデリング ・ 流動伝熱問題の数値解析手法 ・ フィルムセッション ・ 伝熱トピックス
18	<ul style="list-style-type: none"> ・ 伝熱研究の展望と解説 ・ 伝熱促進と熱交換器 ・ 乱流伝熱の機構 ・ 座談会 ・ 伝熱トピックス
19	<ul style="list-style-type: none"> ・ 伝熱研究と赤外線利用 ・ 乱流とはどのような流れか ・ 相変化と核生成 ・ 座談会「乱流とはどのような流れか」 ・ 先端技術と伝熱工学
20	<ul style="list-style-type: none"> ・ 伝熱日々に新たなり ・ 沸騰二相流に関する伝熱研究 ・ トピックス「豪雪を利用する」 ・ 限界熱流束現象の研究の歩み ・ 小諸ワイナリーぶどう酒工場見学 ・ 座談会「境界領域における伝熱研究の進展」 ・ パネルディスカッション「企業は大学における伝熱研究に何を望むか」 ・ トピックス「船舶用ディーゼル機関と伝熱」
21	<ul style="list-style-type: none"> ・ パネルディスカッション(1)「熱工学で新材料開発はどこまで可能か」 ・ パネルディスカッション(2)「数値解析で伝熱のどこまで分かるか」 ・ 平泉(中尊寺、毛越寺等)見学 ・ 大放談会「21世紀の伝熱」* その予測をタイムカプセルに詰めよう* ・ 特別講演「次世代の地熱開発としての高温岩体の利用」 ・ パネルディスカッション(3)「伝熱工学で極限環境下の安全性はどこまで確保できるか」

22	<ul style="list-style-type: none"> ・ 環境における熱と物質の輸送 ・ 混相流伝熱 (I) ・ 混相流伝熱 (II) ・ 特別講演「沸騰熱伝達研究の歴史的展開」 ・ フィルムセッション ・ 工業製品における伝熱工学的課題
----	---

(11) 国際伝熱会議

回数	開催期間	開催地 (国名)	発表論文件数 (日本/全体)
1	1951年 9月11日～13日	ロンドン (英国)	1/93
2	1961年 8月28日～9月1日	ボウルダー (米)	11/125
3	1966年 8月8日～12日	シカゴ (米)	12/177
4	1970年 8月31日～9月4日	パリ (仏)	17/355
5	1974年 9月3日～7日	東京 (日本)	30/330
6	1978年 8月7日～11日	トロント (加)	36/395
7	1982年 9月6日～10日	ミュンヘン (独)	44/454
8	1986年 8月17日～22日	サンフランシスコ (米)	46/451
9	1990年 9月6日～10日	エルサレム (イスラエル)	46/415

以上の資料に関しまして会員の皆様より御叱正、御教示をたまわれれば次号にて訂正、補充を行ないたいと存じます。

(事務局)

＜創立30周年を祝って＞

日本伝熱学会と日本学術会議との関わり

西川 兼康（九州電力）

日本伝熱研究会が発足して30周年になることを編集委員長から報らされ、早くも30年経過したかと正に今昔の感がある。今や日本伝熱学会として発展していることは誠に喜ばしいことである。編集委員会からの依頼もあり、伝熱研究会と学術会議との関わりを主体にして、思い付くままに伝熱研究会発足時からの感想を述べてみたいと思う。

伝熱研究会の発足にあたっては、東京大学の橋藤雄教授の呼び掛けで始まったように思う。当時既に関西地区では京都大学の水科篤郎教授と佐藤俊教授が中心になって伝熱の研究会が発足しておいたのであるが、昭和35年頃東北大学の抜山四郎教授、京都大学の菅原首雄教授、九州大学の山県清教授、東京大学の橋藤雄教授、日本大学の栗野誠一教授、京都大学の水科篤郎教授、京都大学の佐藤俊教授、それに小生も加わって相談し、全国的な伝熱の研究会をつくらうということになった。そこで日本伝熱研究会を発足するが、本部を中央におくことをせず、中央は連絡の事務的なものとし、各地方の活動を重視し、各研究グループとして独自の活動をし、日本伝熱研究会としてはシンポジウムを年一回開催することにした。

日本学術会議の研究連絡委員会（研連）はナショナル・コミッティとして国際的学会連合に対応することを主な任務としており、将来の国際的活躍をするためには、当時としては学術会議の中に研究連絡委員会をもつことが必要であった。しかし、もともと研連の発足時には慣用の学問分野にない学際的な分野について研連をつくる趣旨であったこともあり、委員会の数に制限があり、熱工学関係では既に燃焼研究連絡委員会が昭和29年より設置されている当時の状態では、新たに伝熱研究連絡委員会を設置することは非常に困難であった。そこで当時（昭和38年）の学術会議会員であった名古屋大学の小林明教授と色々相談され、差し当たり燃焼研究連絡委員会のなかに伝熱関係の委員を入れてもらうことになった。その後昭和41年（委員長 東京大学矢木栄教授）に熱工学研究連絡委員会と改称し、その中に燃焼分科会と伝熱分科会が正式に発足した。その後総合研連の考え方が出て来たときにエネルギー研連の一つとして熱エネルギー研連に改名されたが、昭和58年日本学術会議の法改正後、各専門分野に直結する分野に研連をつくる傾向になり、昭和59年再び熱工学研連と改名し、このとき従来の燃焼分科会、伝熱分科会について熱物性分科会を組み入れ、現在に至っている。

昭和47年頃（委員長 九州大学清水浩教授）から国際伝熱会議を日本で開催することが熱工学研連で議論され、昭和49年9月に日本学術会議主催の下に第5国際伝熱会議を開催することができた。このことに関しては特に水科篤郎教授が熱心で、東京大学西脇仁一教授を組織

委員長として、水科篤郎、内田秀雄、西川兼康、森康夫、甲藤好郎、一色尚次、青木成文、武山斌郎等の各教授が組織委員に加わり、日本の伝熱研究者の総力を挙げての周到な準備の下に、日本で最初の国際伝熱会議が開催された。各国からの参加者も多く、十分な成果が挙げられ、この会議は日本の伝熱研究の進展に大いに貢献し、日本の学術レベルを世界的水準に上げる端緒となったように思う。この国際会議の特徴の一つは Round Table Discussion の充実で、11 の分野について企画され、伝熱科学の新しい領域や考え方について各国の学者の自由な討議が行われた。筆者はこのとき沸騰熱伝達のオーガナイザーを勤めさせられたのであるが、東京大学平田賢教授や船舶技研成合英樹博士の協力をえて周到な準備をし、テーマを(1)沸騰熱伝達の機構、(2)沸騰研究の将来展望、の二つに分け、それぞれの司会者をドイツのStephan 教授とアメリカのRohsenow教授に依頼し、話題提供者も(1) S.G.Bankoff, D.B.R.Kenning, N.Afgan, F.Mayingier, N.Isshiki (2) B.B.Mikic, K.Nishikawa, M.G.Cooper, I.Michiyoshi, D.B.R.Kenning, W.M.Rohsenow という顔触れで当時の第一線の研究者を総動員して活発な討議が行われ、十分な成果が得られたように思われる。

また昭和48年頃より熱工学研連で「熱エネルギーの有効利用」に関する全国組織の研究プロジェクトの検討を始め、昭和49年には熱工学研連主催で「熱エネルギーの有効利用」のシンポジウムを開催して注目をあび、その後「化学エネルギーの有効利用」に関する特定研究申請の要望と協議を重ね、「エネルギーの有効利用に関する工学的研究」として特定研究を申請し、昭和53年より文部省の特定研究として取り上げられた。これは熱工学研究連絡委員長清水浩教授の発案で、森康夫教授が特に熱心であったように思う。それは文部省の特定研究として熱関係の研究はそれまで取り上げられていなかったのであるが、熱工学の研究推進のため全国的組織の研究プロジェクトの必要が痛感され、熱工学研究連絡委員会で熱心に討議され、学術会議の推薦を経て文部省に提出された。一年目は総合研究として準備することになり、二年目に準特定研究になり、やっと三年目に特定研究として発足した。ところでこの時期にいわゆる第一次オイルショックが始まり、文部省もエネルギー特別研究を発足することになり、この研究プロジェクトは「熱エネルギーの有効利用」としてその一部門に併合され、7年にわたり研究が継続された。この組織は重点領域研究として現在も続いている。この研究プロジェクトは日本の伝熱研究に大きな寄与をし、伝熱研究会の発展を促したと思う。なお、昭和63年(委員長 西川兼康教授)には熱工学白書的なものとして「熱工学の研究動向と熱技術の進展」が熱工学研連によって纏められ、研究動向について総合的分析を加え、その長期的な研究推進に示唆を与えている。

最近の伝熱シンポジウムは年々論文発表件数が増加し、これは伝熱研究の発展を物語っているものであるが、第5回国際伝熱会議のRound Table Discussionのような雰囲気欠けているように思われる。30年を契機としてもう一度初心に返り、質的にレベルの高い論文の発表と真剣な討論が行われ、伝熱学会が伝熱研究推進の母体として益々発展することを祈念したい。

1. 過去30年の発展

日本伝熱学会が創立されてより今日までの30年の間の科学技術の一般的発展を顧みると、それまでにない速度、分野の拡大、内容の充実化が行われ、その発展を基礎として、急速な産業・経済の発達・拡大と国際化が行われた。伝熱学はこの近代科学技術の急速な発展の環境の中で、エネルギー・石油危機に加えて、コンピューター、自動車、家電品等の急速な進歩に必要な研究開発の要求に答えながら30年前には考えられなかった発展を遂げてきた。

このように発展してきた伝熱学を、一般の科学技術の表現と内容に対応させて考えると、伝熱科学、伝熱工学、伝熱技術に大別することができるようになってきた。伝熱科学はよく知られているように、伝導、対流、凝縮、沸騰、輻射の5分野に大別される。また科学の分類からは、伝熱物理と伝熱化学に分けられるもので、現状では伝熱物理の分野が主体である。伝熱化学としては燃焼が主に取り扱われてきた分野である。しかし、伝熱化学と言うべき分野が、今後伝熱学でも、検討すべき重要な問題を含むと考えられるので後述する。

本会が創立された頃には、伝熱学に関する専門書は、わが国では2冊位、海外でも多くは出版されていなかった。それらの本では伝熱科学の基本現象が主に記述され、伝熱機器については余り説明されていない。本学会創設の頃より、伝熱科学の分野の研究、例えば各種対流の基礎現象、複合対流、凝縮の基礎性能、諸条件下での沸騰現象、輻射のミクロ的解明の研究などが行われ始めた。ついでエネルギー危機が起こり、省エネルギー、エネルギーの有効利用などが要求されるようになり、関連する各種伝熱機器の開発とその性能向上の研究開発が盛んになった。しかしこれらの伝熱科学と伝熱技術の知識の間にはかなりのギャップがある場合が多くなり、伝熱工学的研究が要求され、その研究が盛んになった。例えばブル或は管内対流の沸騰などの分野において、多くの工学的研究が行われるようになった。更にコンピューターの出現とその性能の急速な向上の要求に答えるために、チップ・エレメントの放熱性能向上、例えば微小伝熱要素の相互干渉、特殊伝熱環境での伝熱特性などが、伝熱工学・技術の立場で研究されるようになった。

伝熱科学の一つの成果が、他所で予期されは伝熱技術に利用された例を示す。水平加熱直円管中の流れでは、層流の場合で流入流体と管壁の温度差が 1°C 以上の場合でも、流れはポアゼイユの分布とはならず、従って温度分布は半径の4乗の関数では表わせず、2次流れの影響が支配的となることを、本会の第3回のシンポジウムで実験結果を報告した。ついで更に一般的に管軸に直角に外力が作用する総ての場合を系統的に論じて報告した。この伝熱科学的研究の結果は、数年後、GEで製作・実用化された無人ミサイルの各種の配管中の流れ・伝熱の性能設計に用いられたことが知らされた。伝熱科学の現象の中で、平板周りの強制・自然対流、

及び垂直冷却平板周りの凝縮等の前縁は、例えば膜状凝縮のヌッセルトの解では特異点であり、無限大のヌッセルト数を持つ。平板の熱伝導を考えると、前縁で非常に高い伝熱特性が得られ、この結果は自動車のラジエーターの高性能化、高性能凝縮器の開発等に用いられた。今後も伝熱科学は伝熱工学・技術の基礎となり、伝熱学の発展に大きく寄与すると考えられる。

2. 今後の展望

今後の伝熱学、特に伝熱科学、工学の展望・展開について私見を述べる。伝熱学に特に期待されるのは、エネルギー、地球環境問題に対する寄与である。例えばエネルギー有効利用システムとして関心を引いている燃料電池、及び水の熱分解による水素製造装置において、前者に必要な高温プレートフィン熱交換器では、高温化のために熱応力を最小にするような被加熱ガス出口温度分布を与える構造、また後者では750°C前後の狭い温度範囲での熱分解に必要な高熱負荷条件での伝熱の実現が要求される。今後はこのような伝熱工学的に適当な因子を最適化する伝熱システムの研究開発が望まれる。伝熱科学の分野ではスーパーコンピューター利用の重要性が大きくなると思われる。またミクロスケールの伝熱現象を解析する分子動力学の活用は、伝熱学の多くの問題に新しい知見を与え得る。しかし厚さ約10分子以上の固体層の熱伝導解析には、フーリエの熱伝導則を用いる従来のエネルギー式は、時・空間の平均的温度分布を充分正確に与える。一方乱流のスーパーコンピューターによるdirect simulationの数値計算の現状は、無限大自由度を有している流体の乱流現象をよく近似しているとは考えられない。固定壁周りの乱流では、表面における小さな初期バーストの発生、その大きな渦への成長と表面よりの剥離、次のバーストの発生というサイクルを充分正確に模擬するには、計算に用いる時間・空間の単位セルの適切な寸度を、実験より求まるバーストの初期の大きさ等に基づいて決定するなどの検討が必要である。同様の問題は、水平加熱平板上のプール沸騰の初期気泡の発生から、気泡成長、離脱、次の微小気泡の発生のサイクル的現象のDNS計算においても存在すると考えられる。

最後に、伝熱化学について述べる。勿論燃焼もこの分類に属するが、伝熱学は広くHeat and Mass Transferの問題を含むと考え、熱・物質移動に関する研究開発の今後の大きな課題の一つは、地球環境に関するものであろう。例えば燃焼後のガス、又は燃焼前の炭化水素燃料より分離した二酸化炭素を、液化後深海中に放出する提案に関連する問題では、二酸化炭素水和物の生成、或は液相二酸化炭素分子の海水中での拡散現象など、また燃焼により発生して大気中に拡散される窒素酸化物の雨滴への溶解などは、熱物質移動の基礎現象としては余り研究されていない。気体中での多種の分子の拡散、反応などはかなり研究されているが、液体中で温度の異なる他種の液体分子の拡散・化学反応は、異種液体分子間力、拡散液体の溶解性にも依存し、現在までこの問題の研究報告は多くない。これらの地球環境の改善に重要な問題は、従来余り研究開発されていないが、伝熱化学の一分野とも呼ばれるもので、今後の展開が待たれる。

<創立30周年を祝って> エネルギー・環境問題と日本伝熱学会の使命

おとう りょう
甲藤好郎 (日大・理工)

創立30周年を祝って「伝熱研究」に一文をとのご依頼である。そう言えば今も尚、まるで昨日の
ことのように思い出される昭和36年11月22日、赤門学士会館のさほど広くない6号室(当時、
熱関係の研究発表の場であった)での日本伝熱研究会の設立総会、あれから早いものでこれまでに
満31年が経っている。それにその間、国内は言うに及ばず、国際的にも直接間接、伝熱分野の振
興に果たした本会の役割は計り知れぬほど大であろう。とすれば普通なら上記のような長期間の存
続と、今もなお続いている活力を心から喜び、またその成果への祝意をまず述べるべきだろう。し
かし率直な話、本会の設立運動に当初から直接関与した筆者にとっては、ある意味で自画自賛に通
じ兼ねない祝詞など慎むべきだとの気持が強い。それに日本伝熱研究会設立に関する合意とその発
足を最終的に決定したのは、実は上述の設立総会をさらに1年遡る昭和35年12月2日、赤門学
士会館での会合だったが、そのメンバー8名(抜山四郎、佐藤俊、水科篤郎、山県清、°西川兼康、
°栗野誠一、橘藤雄、°甲藤好郎の各氏)のうち現存者は°印の僅か3名。また設立後4、5年を
経た頃、足腰の未だ弱い研究会を崩壊にまで導きかねない危機が一二度襲ったこともある。

とまれ、そんなことで先の執筆依頼状をもう一度眺めてみると、仮題として「エネルギー・環境
問題と日本伝熱学会の使命」という副題が付いているのに気が付いた。思うに、陳腐な祝詞などよ
り、実(み)のある記事をとの気のきいた配慮のようで、さすが若い方々はと感心したのだが、
ただ上記の文題は筆者個人への依頼テーマとのこと。これには筆者もいささか驚いた。なぜなら日
頃、誠に申し訳ないことながら「エネルギー・環境問題」に人並の興味は持ち得ずに暮している小生
だからである。否、正確には「日本で現在、多くの人が口を合せて言っているエネルギー・環境問
題」と言うべきかも知れないが、それでも随分見当違いの依頼先であることは間違いない。

大体わが国では、大きな組織から小さなグループに到るまで、何か「お題目」を掲げないと生き
甲斐を感じず目標も定まらないと言った気風がある。また人目をひくお題目があると誰も彼もがワ
ッと集い寄り、そうでない者は村八分にされてしまう。実はこれこそ独創的な研究の萌芽、醸成に
大変不適な雰囲気と思うのだが、上に記した「日本伝熱学会の使命」という題目にも、もしそんな
ことが潜むとすれば心配である。もともと日本伝熱学会の「目的」自体、学会定款第2章第4条に
明記してあるところである。また会員の一人として、筆者個人は新しい知見を独自に拓くのが好き
だし、また技術的には超高速コンピューター、宇宙、スペースプレーン、核融合、バイオ、マイクロ、
新材料、やる気になれば長期的視野を持つ新しく重要な問題がいくらでもあると思う。

所で主題とすべき「エネルギー・環境問題」は、自然の尊重など個人の純粹感情(筆者など誰に
も負けない真剣な気持を持っている)に基づく問題ではなく、また科学技術だけの問題でもなく、
その根底には人類の経済活動にかかわる社会問題がある。つまり人類の経済活動規模が拡大し、資

源の有限性、および自然や環境への悪影響を無視出来ぬ段階にまで立ち到った時、なおそれ以上の「人類の経済成長」を考える際に現れる問題、つまり自然との両立 (compatibility) の問題である。そしてわれわれ特に工学技術者は、この問題を打開し得るのは「科学技術」である、あるいは「科学技術」しかないと単純に考える。だが例えばエンジン一台を考えると、その有害排出物の低減を図(はか)れるのは確かに「技術」だが、排出物の総量(これが環境に影響する)はエンジンの生産台数で決まり、生産台数は「人類の成長意思」にかかわる。そして後者は技術より優位に立つ根源的な力であり、その力(時には盲目的な)が技術者の努力を台無しにしてしまうこともあり得る。また、日々変化する技術活動と地球環境全体を一つのシステムとして捉え、そのシステムの工学的分析を通して最適の進路を設定すると言う考え方もある。しかし自然環境に有害な変化を引き起こす原動力は人間の意思、欲望による所が多く、しかも自由を本質とする人間の、過ち多き意思と欲望とである(広くは人口増加、浪費的欲望、その他いろいろの事柄もからむ)。

要するに「エネルギー・環境問題」にかかわる工学技術は、普通の技術とは質的に違う側面を持っている。これに対し、技術によって眼前の目的を達成するという普通の技術概念に慣れ切った工学技術者は、技術によって「エネルギー・環境問題」も同じく解決できると単純に考え易く、こうした一種の「思い上がり」が研究の方向を誤らせたり、空想を現実と取り違え無駄な活動に向かわせたりする可能性は大きい。ただし、そのことを十分に弁えた上で技術の世界だけに視野を絞り、そこで問題になる事柄の大筋を見ることは容易である。すなわち、技術活動が自然に及ぼす有害な作用について、①自然のおかれた現状の観測調査、②自然へ出る有害作用の低減、③自然へ出た有害作用の回収、修復、④有限資源の乱用の抑制、等々であろう(広くは農林漁業から外科医療まで含む)。そして地球や自然の現状からみて、これらに関する研究が緊急を要することは言うまでもない。しかし、そういう「錦の御旗」を掲げた研究だけが有用とは言えず、原理的には既知の知見の応用問題に過ぎぬのに、外面的装いの新しさと人目を引いているものが随分多い。もちろん工学、特に環境の分野では応用問題が大切であろう。だが長期的にみて本当に有用かつ重要なのはやはり独創的な内容の研究や技術開発であり、また科学や技術の普遍的性格から言っても、錦の御旗に余りコミットしない研究の中から広い視野の下に革新的な結果が生まれ出ることが少なくない。

それゆえ日本伝熱学会が、エネルギー・環境にかかわる工学、技術と深い関係を持つ組織であるとは言え、学会の「使命」とか、学会に課せられた「任務」と言うような国策型、管理型の考え方はなく、個々の会員がそれぞれ自由に創造的な研究活動を指向する自主的態度の尊重こそ大切ではなかろうか。また筆者は、それが若い会員諸兄の優れた力で実現されるものと信じている。

ただ最後に、低俗な話になるけれども、沢山の研究費を貰うとか、本学会の社会的ステータスを向上させるとか、そう言った目的のために「エネルギー・環境問題と日本伝熱学会の使命」式のお題目を便宜的に使うことは許されよう。もちろん、そんなやり方を公に推奨する訳にもいくまいが、理念や長期的ビジョンの大変希薄な社会的風土のなかでは、それに応じた行き方も仕方ないであろう。ただし精神的にそれに慣れることは避けるべきで、特に学術の面からは、時流に乗った特定の問題しか眼に入らぬことは精神的スケールの狭さを意味するからである。

Heat Transfer in Japan

R. J. Goldstein

Regents' Professor

James J. Ryan Professor and Head

Department of Mechanical Engineering

University of Minnesota, Minneapolis, U. S. A.

I would like to congratulate the members of the Heat Transfer Society of Japan on their 30th Anniversary.

I have had many interactions with heat transfer researchers and practitioners from Japan. My first visit to Japan was in 1967 for the Japan Semi-International Conference on Heat Transfer. At that time I visited a number of Universities including the University of Tokyo, Kyoto University, Fukuoka University, and Hokkaido University. It was an opportunity to see the excellent facilities that were being operated and to meet senior and young researchers, including Professor Masaru Hirata of the University of Tokyo, and Professor Kenjiro Suzuki of the University of Kyoto who have been close friends over the years.

Since that time I have returned to Japan on many occasions. These include the 5th international Heat Transfer Conference in 1974, when my first climb of Mt. Fuji was frustrated by the need to return to a Conference banquet. In 1980 I participated in the Japan/US joint Heat Transfer Seminar in Tokyo and in 1987 the 2nd International Symposium on Transport Phenomena in Turbulent Flow. In 1989 I had the honor of receiving a grant from the Japan Society for the Promotion of Science to work in Japan for three months. I was centered at the University of Tokyo through the courtesy of Dr. Hirata and Dr. Kasagi, and I was able to visit many industrial and university laboratories. At this time I also met some of my close colleagues who were formerly students and researchers at the University of Minnesota. During that stay I learned much about Japanese education from kindergarten up. I was also able finally to "conquer" Mt. Fuji accompanied by my

son Benjamin and Dr. Tokuda.

Over these many years I have been impressed with Japan's advances in science and technology and the high quality of students, faculty, and researchers. Japan has progressed greatly in a number of areas of technology including the coming of age of outstanding researchers. Generations of outstanding leaders are taking their place in the world community of Heat Transfer. I look forward to many more years of pleasant and fruitful cooperation with my Japanese colleagues.

My students from Japan who received degrees at Minnesota have always been very close to me. These include; Sadasuke Ito, Kanichi Kadotani, Toyoaki Yoshida, and the late Tetsuro Aiba. Other close contacts are with those who spent a year or more working in our laboratories: Toshie Abe, Yutaka Asako, Masaru Hirata, Ryogi Ishiguro, Kazuhiko Kudo, Hisashii Kuriyama, Takashi Masuoka, Masahide Miyamoto, Hiroyaki Nouse, Takehito Saito, Shinobu Tokuda, Kahoru Torii, Akina Tsuchida and Shinichior Yamazaki. These researchers and colleagues worked with me at Minnesota and are my most important contacts with Japan. They have probably taught me far more than I ever could teach them.

Of course there are so many others with whom I have close ties. These include Professors Katto, Kasagi, Hirata and Nakajima and the late Professor Nishiwaki from Tokyo University; Professors Fujii, Fujita, and Nishikawa from Kyushu University; Professors Echigo, Hijikata, Mori, and Nakayama from Tokyo Institute of Technology, and Professors Ogino and Suzuki from Kyoto University. To these and other colleagues, to whom I apologize for not including them herein, (truly a sin of accidental omission not commission) I give my thanks and great appreciation for your fine progress in the Heat Transfer area and for helping me learn more about heat transfer and Japan.

To all in the Japan Heat Transfer community, I salute you and wish you continued great success.

In honour of the 30th anniversary
of the
Heat Transfer Society of Japan

J. H. Whitelaw
Professor of Convective Heat Transfer
Imperial College of Science Technology and Medicine
London

The Heat Transfer Society of Japan has a distinguished history which has grown with every passing year. It has fulfilled admirably its purposes to stimulate research on heat transfer in Japan, and to promote exchange of views and friendship among the many institutions interested in the subject. These purposes have extended far beyond of Japan so that Japanese research is known world wide and with it Japanese scientists and engineers who have fostered friendship and cooperation in many countries. It is not by accident that three Past Presidents of the Society have received the Max Jacob award in recognition of their eminence.

The National Heat Transfer Symposium of Japan has been held every year since 1964 and is well known for the wealth of new information which it provides, with the last meeting held in Osaka continuing this tradition. In its 30th year, the Symposium will be held in Yokohama under the chairmanship of my old friend Professor Masanobu Maeda of Keio University and we can expect the usual gathering of Japanese Colleagues and friends and the presentation of excellent technical papers. The Society organised the 5th International Conference in Tokyo in 1974 and has contributed its members and experience to many other conferences including the very successful Two-Phase Flow Symposia and Flow-Visualisation Symposia and to the 9th Turbulent Shear Flows Symposium which will be held in the Anniversary year under the chairman of another old friend, Professor Kenjiro Suzuki of Kyoto University. This process has led to a steady internationalisation of Symposia

in Japan and has afforded many foreign workers, like myself, the opportunity to enjoy visits to Japan and discussions with members of the Society.

This brief essay appears in a special issue of the 32nd Volume of the Journal of the Heat Transfer Society of Japan which represents another important vehicle for the dissemination of information. The articles presented in the Journal are frequently in Japanese with contents lists also in English but it is probable that an increasing number of papers will appear in English. Special Issues deal with many important matters and I note particularly those in the 31st Volume dealing with Heat Transfer in Urban and Building Environments and with Progress in Computer Utilisation on Heat Transfer and Fluid Analysis. The first is an example of the promotion of research on a topic of immediate interest to the environment and our well being and the latter on a topic which can assist the former and many other aspects of engineering and heat transfer in particular. The inter-relationship of the two topics is evident in the research described and the Society is to be commended in this example of the way in which it guides and presents new work.

It is my considerable pleasure to contribute this brief essay on the Heat Transfer Society and its excellent work and to offer my thanks to many of its members for their warmth and hospitality on visits to Japan by me and my colleagues in the United Kingdom. Equally, it has been a pleasure to receive an increasing number of its members on visits to London. In both cases, the friendship has been coupled with free exchange of knowledge in keeping with the purposes of the Society.

1. はじめに

本稿では、熱伝導・接触熱抵抗に関する近年の内外の研究の中から著者らの興味を引いたいくつかのテーマの研究状況を述べる。熱伝導の分野としては、熱物性値の測定法と、境界条件や形状を逆算する逆問題も含まれるが、ここでは温度や熱流束を求めるいわゆる順問題に限ることとする。また近年融解凝固を伴う系の研究が活発であるので、相変化を伴うものと伴わないものに分けて示す。

2. 相変化を伴わない熱伝導

2.1 解析法

内部発熱項が温度の指数関数である一次元（平板、円柱、球における）定常非線形熱伝導問題に対して、解の存在する条件が示されている[1]。時間に関し陽解法と陰解法のハイブリッド法が差分法に適用され、局所的に空間分割が細かい場合や熱拡散率の大きな物質が分布している場合を解析するとき、計算速度を速められることが確かめられた[2]。その他、近似解析、数値解析に多くの研究が成されている[3, 4, 5]。

2.2 移動熱源問題

レーザーまたは電子ビームによる熱処理[6, 7]、研削[8, 9]、圧延[10, 11, 12]などの生産工程やころがり接触[12]および滑り接触[13]する系に現れる問題である。高速回転する磁気光ディスクにパルスレーザーを当て、局所的にキュリー温度以上に上げ、磁性の極を反転させることによりデータの書き込みを行なう系が検討されている[14]。

ディスクは $0.08\mu\text{m}$ の $\text{Tb}_x\text{Fe}_{1-x}$ 膜をガラス基盤上に SiO_2 膜との間に挟んだ構造になっている。図1は、 10m/s のディスク速度で 150ns 間 20mW の照射を 350ns 間の休止期間を置いて照射した場合、 100°C （キュリー温度）以上になる領域を積分変換法を用いて解析した結果である。この条件では $2\mu\text{m}$ 程度の間隔ができており適当である。この間隔が小さくなれば混信を起こすし、離れ過ぎている場合は書き込み密度が小さく

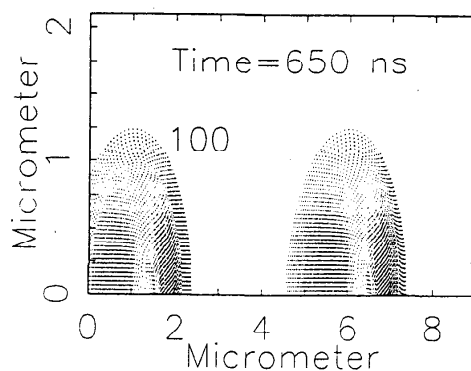


図1 磁気光ディスクがパルスレーザー照射を受けた時、 100°C 以上になる領域[14]

なる。

研削時の伝熱では、図2のモデルにおいて、研削時に発生する熱は砥粒側と被研削材側に分れ、被研削材側へ伝えられた熱は被研削材内部と研削液に伝えられる。従来砥粒側と被研削材側に分れる割合を仮定していたが、三方向への伝熱を別々にモデル化し、境界で温度を接続させることによりこの割合を定めた[8]。モデルの妥当性を過去の実験との比較により検証している。さらに、図2に示すように、研削液の膜沸騰と焼きつきを起こす臨界研削熱を求めている[9]。

2. 3 超伝導体における伝熱

超伝導フィラメントが銅などに埋め込まれた超伝導線を巻いたコイルにおいて、常伝導化した領域が拡大進展する過程を簡単に計算する手法が示され、実験との比較により手法の妥当性が確かめられている[15]。超伝導・半導体ハイブリット回路の熱伝導解析により、トランジスタとジョセフソン素子の最小間隔を求めている[16]。 $YBa_2Cu_3O_7$ の様な高温超伝導体は強い異方性を示す。この異方性超伝導膜において、使用電流

が、温度分布により形成される臨界電流密度分布の空間積分値を越えなければ安定であるとして熱的安定性が検討されている[17]。図3中に示された座標系において、 $x=0, y=0$ に線状瞬間熱源があったときの温度場を熱伝導の異方性を考慮して差分法により数値解析し、{使用電流密度/使用温度における臨界電流密度} $< 1 - \phi_{max}$ なるパラメータ ϕ_{max} が求められた。アスペクト比が大きく熱伝導率比 k_x/k_y が小さい方が安定性が高いことがわかる。この様に異方性の影響が顕著である。

2. 4 複合材の熱伝導

繊維や粒子が分散した複合材や多孔質物質の有効熱伝導率は、複雑な構造を簡単な基本構造にモ

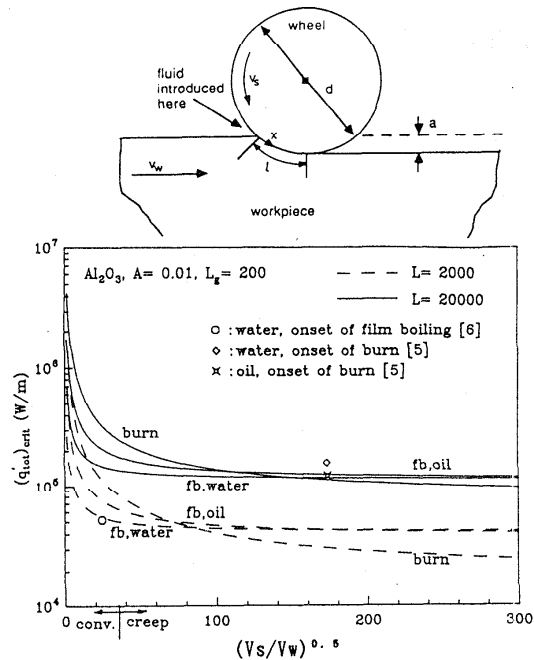


図2 研削速度と膜沸騰および焼きつきを起こす臨界研削熱[8]

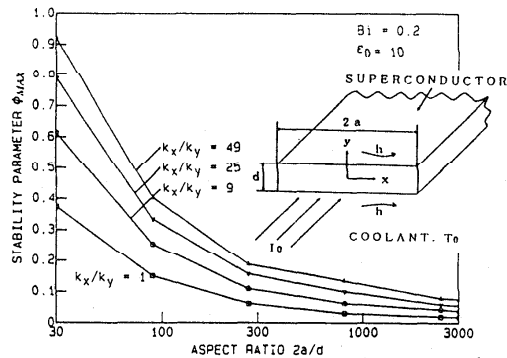


図3 超伝導膜の安定性[17]

デル化し、一次元熱流の近似により、または二次元、三次元熱伝導方程式の解析解または数値解により求められる[18,19]。また混合物を多数のポロノイ多面体（二次元では多角形）に分割し、3次元数値解析を行なって平均熱伝導率を求めている[20]。円柱状繊維が任意に分散した二次元複合材に対し、その幾何学的特徴をフラクタル次元を求めることにより定め、分散系を基本構造に変換する方法が提案されている[21]。熱流方向および直角方向のフラクタル次元 d_p 、 d_r により図4中に示した基本構造の形状を

$$(D/L_0) = (L_r/L_0)^{d_r}, \quad (D/L_0) = (L_p/L_0)^{d_p}$$

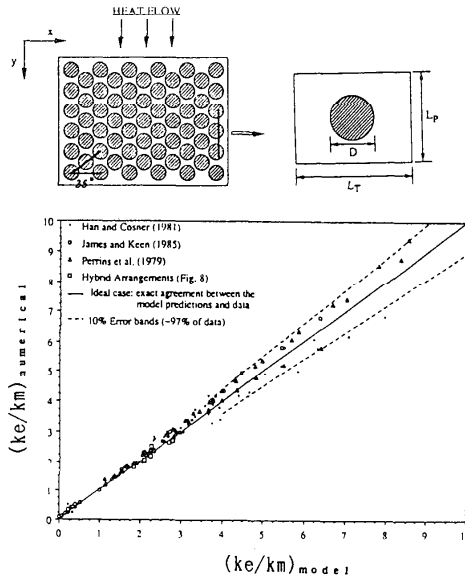


図4 有効熱伝導率算出のためのフラクタル次元によるモデル化の妥当性[21]

により定めた。この基本構造の有効熱伝導率は知られている。種々の分散系に対して、従来求められている結果を縦軸に、この基本構造に変換する方法による結果を横軸に取って図4のように比較がなされた。両者はよく一致している。

2. 4 フーリエの法則に従わない問題

非常に短い時間の熱伝導や極低温における熱伝導では熱の伝播速度を有限として取り扱うことが必要になり、一次元のフーリエの法則は緩和時間 τ を用いて下記の左側の式に置換えられる。右側の式はエネルギー方程式である。常温では $\tau=10^{-11}$ s程度である。

$$\tau \frac{\partial q}{\partial t} + q = -k \frac{\partial T}{\partial x}, \quad \frac{\partial q}{\partial x} = -\rho c \frac{\partial T}{\partial t}$$

上式は周期問題[22]、熱伝導率の温度依存性を考慮した非線形問題[23]など多くの系に対して解かれている。矩形波状パルス熱流束を受けた厚さ L の平板の背面温度変化から、 $L/\sqrt{a\tau} \geq 25$ の範囲ではフーリエの熱伝導方程式が成り立つことが示されている[14]。

金属表面に非常に短いパルスレーザーを照射した場合、通常の内部発熱を伴う熱伝導方程式（一段階加熱）ではなく、以下の式のように、初めフォトンが電子に吸収され、次に電子とフォノンの相互作用により格子が加熱されるとする二段階加熱の考え方の方が妥当である[25]。

$$C_e(T_e) \frac{\partial T_e}{\partial t} = \nabla \cdot (K \nabla T_e) - G(T_e - T_i) + Q$$

$$C_l(T_l) \frac{\partial T_l}{\partial t} = G(T_e - T_l)$$

ここで、 T は温度、 C は熱容量、 Q は発熱項、添え字 e は電子、 l は格子を表す。図5において、厚さ l の金薄膜がエネルギー流束 1 mJ/cm^2 パルス幅 96 fs のパルスレーザーを受けたときの膜の裏面の電子温度の過渡変化を一段階モデルと二段階モデルにより計算し、反射率の変化が電子温度の変化に比例すると見なせること（すなわち $\Delta R / (\Delta R)_{\text{max}} = \Delta T_e / (\Delta T_e)_{\text{max}}$ ）から、電子温度の計算結果と反射率の測定結果を比較している[25]。図より2段階モデルの妥当性がわかる。また、ピコセカント以下の速いパルス加熱を受ける場合は二段階モデルによる解析が必要であるが、ナノセカントオーダーの遅い加熱では従来の一段階モデルによる解析でよいことが示されている[25]。

2. 6 粒子衝突時の伝熱

流動層において、粒子は温度の異なる物体（粒子または壁）と衝突して熱伝導により熱を伝える。2個の球が弾性衝突したときの伝熱量が理論解析により求められている[26]。この結果は固気二相流衝突噴流の伝熱機構の解明に利用されている[27, 28]。また弾塑性衝突の場合に拡張され、実験との比較が成された[29]。図6は衝突時の伝熱量を測定する装置である[29]。加熱されたステンレス球を温度の低い平らな金属面（コレクター）上に落としてコレクターの

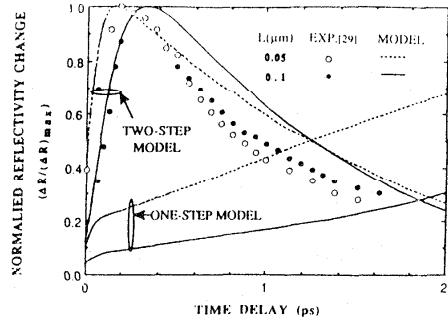


図5 パルスレーザー照射による金薄膜裏面の反射率の過渡変化[25]

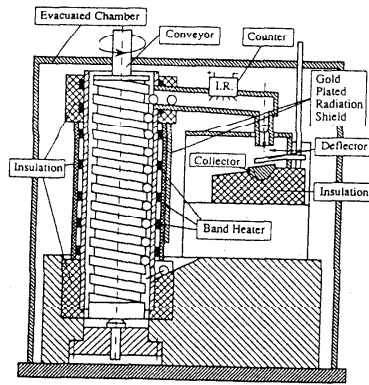


図6 衝突時の伝熱量測定装置[29]

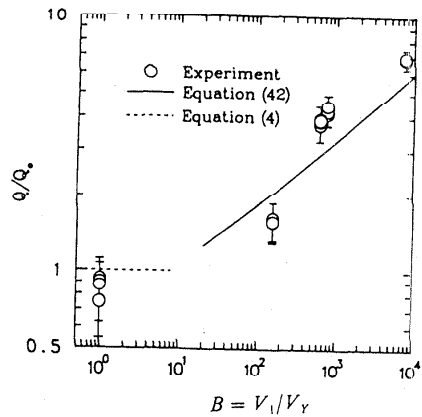


図7 衝突速度と伝熱量[29]

温度上昇から伝熱量を測定している。実験はコレクターの材質（硬さ）を変えて行なわれた。実験結果を図7に示す。縦軸は弾性衝突の場合[26]に対する伝熱量の比であり、横軸はコレクターが降伏を起こす最低衝突速度に対する衝突速度の比である。実線は弾塑性衝突の解である。コレクターが工具鋼の様な硬い材料の場合以外では弾塑性衝突として取り扱う必要がある。

3. 相変化（融解・凝固）を伴う熱伝導

3. 1 単成分溶液の凝固

水に代表される単成分溶液の凝固問題は、例えば潜熱蓄熱における伝熱特性の解明など、工学的に重要であるため多くの研究者によって取り組まれており、福迫の研究レビュー[30]に詳細にまとめられている。潜熱蓄熱の放熱過程（凝固過程）での伝熱特性を向上させるために、平澤ら[31, 32]は、図8に示す様な熱伝導率の良い伝熱促進体（コイル）を相変化物質（水）の中に分散させた不均質混合材料を蓄熱材料として利用する方法を提案した。そしてコイルの体積割合、配列、形状及び物性値が不均質混合材料の凝固過程におよぼす影響を実験と解析によって明らかにした。図9に、各種直径のコイルを分散させた場合の、伝熱促進率 V_i/V_c とコイル体積率 V_d の関係を示す。ただし、 V_i と V_c

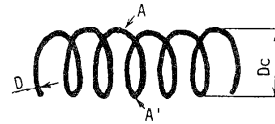


図8 コイルの概略図[32]

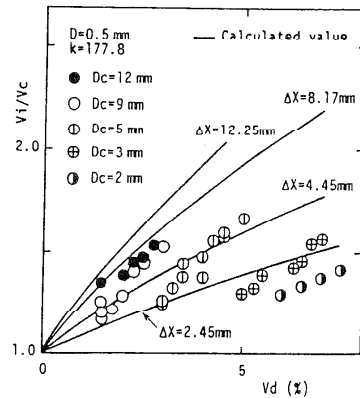


図9 V_i/V_c と V_d の関係 [32]

はそれぞれコイルを含む場合と、含まない場合の水の生成率を示す。 Δx は計算モデルの要素の長さ（コイル直径に相当）を示す。また、図中のシンボルが実験値を実線が解析値を示す。図より、 V_d が増加すると伝熱促進率が大きくなり、特に D_c の大きな場合には1~2%程度のコイルの混入で伝熱特性が大きく向上することが分る。

3. 2 水溶液の凝固

水溶液の凝固現象の解明は、現在の所、実験に負うところが多い[33]。著者ら[34]は、対流が存在せずそしてマッシュ領域での凝固による溶液の濃度変化や物質拡散があるという条件下で、水平平板上での水溶液の凝固問題に関しての解析を行ない、物質拡散が凝固過程におよぼす影響を明らかにした。また、著者らの一人[35]は、水溶液で満たされた矩形容器を垂直壁から凝固させる系に対して、凝固時に溶質は完全に液相に吐き出されるという仮定での解析が、この凝固現象解明にある程度有効であることを示した。Christensonら[36]は、 NH_4Cl 水溶液で満たされた矩形容器を垂直壁から凝固させる系に対して、実験と次式で表されるようなマッシュ領域での透過率 k を用いて解析を行なった。その結果、この凝固現象でしばしば見られるマッシュ領域内の微小なチャンネルの発生等の定性的傾向においては、解析は実験と一致した。

$$k = K_0 \cdot g_1^3 / (1 - g_1)^2$$

ただし、 g_1 :液相の体積分率、 K_0 :マッシュ領域の構造に依存する定数。

図10に計算結果の一例を示す。図に示すように、解析値は実験値と定量的にはそれほど良い一致が見られない。この原因としては、主に透過率の評価方法に問題があるためと考える。

3.3 溶液で満たされた多孔質の凝固

水を多孔質内に満たした凝固問題に関しては多くの報告があり [37, 38]、比較的良くその現象は解明されてきた。しかし、水溶液を多孔質内に満たした凝固問題に関しては、殆ど報告されていないのが現状である。著者ら [39]は、100mm×100mmの矩形容器内において、水溶液で満たされた多孔質の垂直壁からの凝固問題に関して、実験と解析を行なった。解析においては、この凝固現象を支配する最も重要な因子としてのマッシュ領域での透過率 k を局所的に液相の体積分率 χ によって次式で表した。

$$k/k_0 = (\chi/\Phi)^n$$

ただし、 k_0 :凝固前の透過率、 Φ :空隙率。

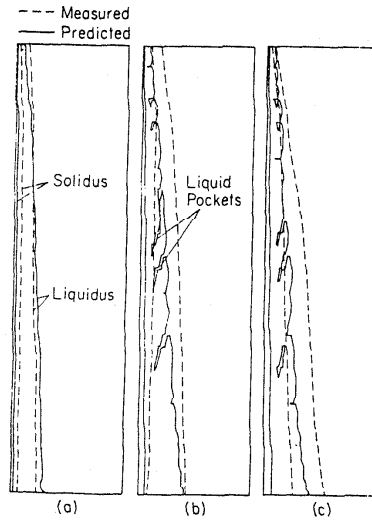


図10 界面位置の経時変化 [36]
(a)3min; (b)11min; (c)20min

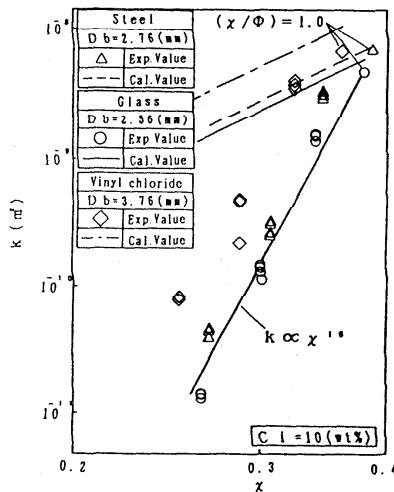


図11 k と χ の関係 [40]

そして、実験との比較した結果より、マッシュ領域での透過率を上記の式で与えた解析は、この凝固現象を比較的良くシミュレーションすることを示した。また、凝固過程の挙動に依存する指数 n は、多孔質物質を構成するヒーズの材質に殆ど依存しないことを明らかにした。また、著者ら [40]は、多孔質内のマッシュ領域において、多孔質内の溶質の濃度分布がマクロ的に一様とみなせる系での透過率の非定常測定法を提案した。そして測定の結果、図11に示すように、 k は χ^n にはほぼ比例することが分った。

今後、水溶液の凝固をより正確にシミュレーションするためには、マイクロレベルでのマッシュ領域伝熱研究 Vol. 32, No. 124

域での氷の構造を検討し、透過率がどのような物理量に依存するか厳密に評価する必要があると考え
る。

3.4 接触溶融

接触溶融現象は、例えばBareissら[41]による水平円管内、Sparrowら[42]による傾斜円管内、Royら[43]による球殻内など種々な系で解析や実験が行なわれている。斎藤ら[44,45]は、図12に示す様な接触溶融の伝熱モデルを基に相変化に伴う固液界面での吹出しの影響や、液相内の流れを考慮した定常状態での解析を行ない、実験との良い一致を示した。また、 $Ste = 10^{-3} \sim 4.0$ 、無次元圧力 $P^* = 10 \sim 10^{11}$ の広範囲について無次元熱流束 q^* を次式で表せること示した。

$$q^* = (P^*)^{0.25} (Ste)^{-0.25} \cdot f(Ste)$$

ただし $f(Ste) = 0.915 + 0.168 Ste - 0.00608 Ste^2 \cdot 64$ 。

さらに、固相の解け始めから終わりまでの平均熱流束を q_A とし、ある物理量 X の変化 δX に対する q_A の変化量 δq_A を次式で表すと、種々の物理量の変化が平均熱流束におよぼす影響の大きさを表す K は表1の様になることを示した。

$$(\delta q_A / q_A) = K (\delta X / X)$$

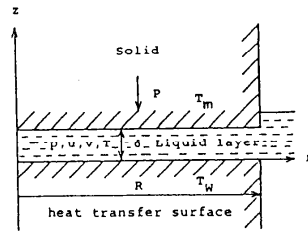


図12 接触溶融の伝熱モデル [45]

表1 物理量に対するKの値 [45]

X	K
$d, \rho_L, \Delta D$	0.25
u	-0.25
R	-0.5
k	0.75
c	$0.25 + \frac{0.229 + 0.126Ste}{0.915 + 0.168Ste}$ (0-0.155)
L	$\frac{0.229 - 0.126Ste}{0.915 + 0.168Ste}$ (0.095-0.25)
ΔT	$1 + \frac{-0.229 + 0.126Ste}{0.915 + 0.168Ste}$ (0.75-0.905)

接触溶融を促進させるには表1からも明らかなように、伝熱面の半径 R を小さくすることが効果的であり、斎藤ら[46]は、伝熱面に溝を掘ることが伝熱面の半径を小さくすると同じ効果をもたらすと考え、伝熱面に溝を掘った系での解析と実験を行った。その結果、溝の存在が、接触溶融を促進させるのに有効であることを示した。さらに斎藤らは、種々の系や、非定常状態での接触溶融現象の研究を行なっている。

3.5 その他

ここでは、過冷却、生体の凍結・融解、そして分子レベルでの水の変相化を取上げる。

潜熱蓄熱における冷却過程での過冷却現象は伝熱特性低下の原因となるため、その現象の解明が重要である。斎藤ら[47,48]は確立論的な解析手法により、伝熱面、外的要因(対流、振動、衝撃、試料水中での固体間の衝突)の様なマクロ的因子が、過冷却解消温度におよぼす影響を示し、興味深い知見を与えた。また、対流の影響に関しては、大河ら[49]や柏木ら[50]によっても検討されている。今後は、マイクロ(分子)レベルでこの過冷却現象の解明が期待される。

生体の凍結・融解問題は、細胞というマイクロなレベルでの相変化を伴う熱伝導を含む複雑な伝熱現象に加え、生命の維持ということが不可欠となってくる。棚澤ら[51]は、ミジンコの凍結・融解実験を行ない、生存に対する冷却と融解の最適条件を論じている。林ら[52]は、図13で示す生体の凍結モデルを用いて解析を行ない、細胞の脱水と核生成速度に対する冷却面熱流束 q_0 、膜透過係数 K 、過冷却度 ΔT 、細胞の大きさ λc そして試料寸法の大きさ L の影響を示し、細胞レベルでの凍結損傷、すなわち、細胞内の氷結、脱水、細胞の変形という挙動の

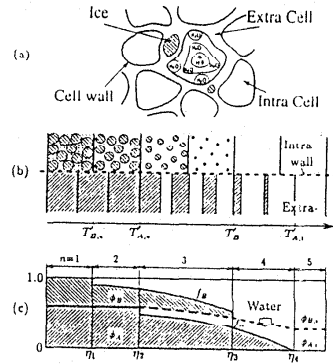


図13 凍結モデル [52]

解明のための端緒を与えた。図14に解析結果を示す。

斎藤ら[53]は、氷の融解過程での分子レベルでの構造変化を分子動力学法を用いてシミュレーションを行っている。図15に融解過程での水分子の分子配置の経時変化を示す。時間の経過とともに氷の結晶を形成していた水分子の配列が局所的に乱れ始め、氷の結晶構造が崩れていくことが分る。

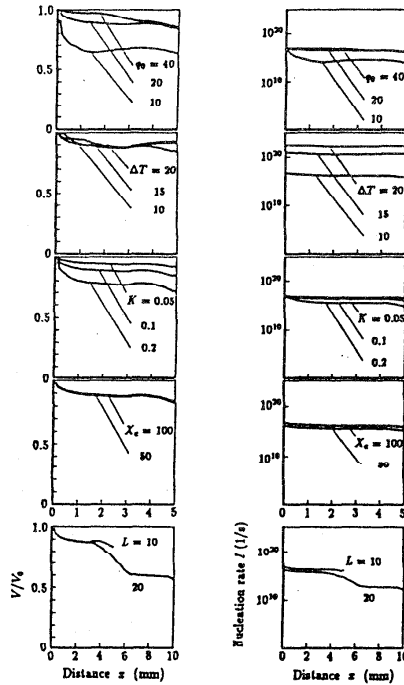


図14 各パラメータが細胞の体積変化と核生成速度におよぼす影響[52]

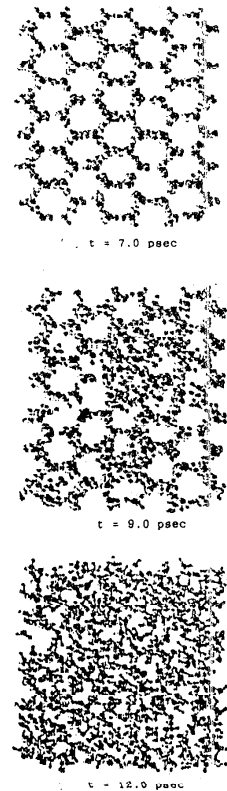


図15 融解時における水の分子構造 [53]

今後このような伝熱現象に対するマイクロレベルでの論議が、伝熱問題を取り扱う上でさらに重要になっていくと思う。

最後にマイクロレベルの伝熱を考える上での参考として、小竹の著書[54]の中に掲載されている工業技術と原子分子現象の関係を、図16に示す。

4. 接触熱抵抗

接触熱抵抗は熱伝導と材料力学とが複合した問題の一つであり、ミクロとマクロのつながりが重要になる複雑な問題であるため、未解決な点が多い。接触熱抵抗に関して丁寧なレビューがなされているが[55, 56, 57]、その中でアルミニウム合金どうしを例に取り、種々の関係式から接触熱コンダクタンスを計算した結果が 図 17 のように示されている[55]。結果に大きな差があり、設計上混乱を来している。したがって接触面の特性の計測および表記方法を標準化する必要があると指摘されている。

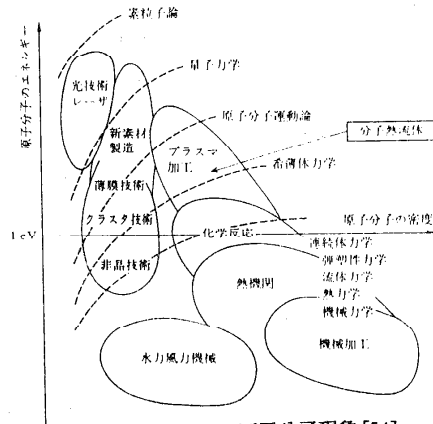


図16 工業技術と原子分子現象[54]

真空中で荷重がかけられているとき、接触熱コンダクタンスは

$$h \sigma / \lambda = \xi \sigma' (F / H A_s)^x$$

と表わされる[58, 59]。

ここで σ は表面の凹凸の標準偏差、 λ は熱伝導率、 ξ は定数、 σ' は表面の平均傾斜、 F は荷重、 H は柔らかい方の面の硬さ、 A_s は見かけの接触面積である。指数 x は研究者により、 $x=0.85$ or 0.95 などの値が与えられている。Majumdar and Tien

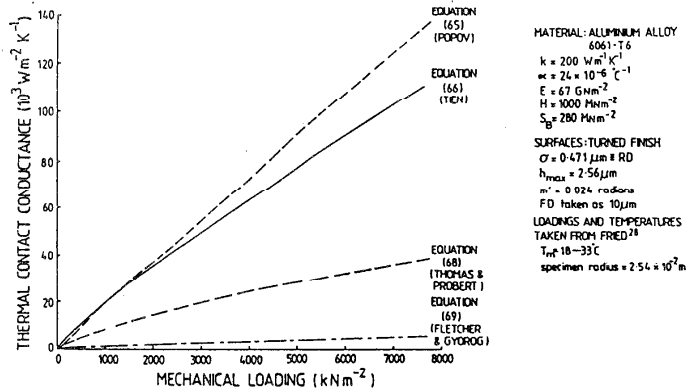


図17 接触熱コンダクタンスの計算式の比較[55]

[60]は平均傾斜は表面の凹凸を測定する装置の分解能に強く依存するので一義的なデータではないことを示している。ここで表面凹凸のフラクタル構造を調べ、抵抗のネットワークモデルを作って解析し、指数 x の意味を明らかにしている。

異種金属間または同種でも異なる表面特性間の接触熱コンダクタンスには整流作用があることが知られている。図18は粗いステンレス鋼301と滑らかなニッケル200との接触熱コンダクタンスの実験結果である[61]。熱流方向の違いによりおよそ1.5倍の違いがある。整流作用はミクロ的、マクロ的熱変形により生じると考えられているが詳細は不明である。

接触面に金属をコーティングすることにより接触熱コンダクタンスの増大が図られる。図19は、ニッケル200をラップ仕上げしたのち銀を蒸着させた面と同じニッケル材をガラスビーズで所定の粗

さにプラスティングした面との接触熱コンダクタンスを示す[62]。横軸は接触面圧でパラメータはコーティング材の厚さであり、裸のニッケル表面の二乗平均粗さが $1.3\mu\text{m}$ の場合である。薄いコーティングでも接触熱コンダクタンスが著しく増大する。しかし、接触熱コンダクタンスを最大にする最適コーティングの厚さがあることが示されている[63]。図20はアルミニウム6061T6を旋盤加工し(表面粗さはおよそ $0.7\mu\text{m}$)、裸面と、裸面をインジウムでコーティングした面との接触熱コンダクタンスの増大率を示す。コーティング材の厚さを増すと、当初は実接触面積を増大させるがその後その効果は薄れ、逆にコーティング材自身による熱抵抗が増大する。結果として、接触熱コンダクタンスの最大値が存在する。この最適厚さに対する表面特性の影響を明らかにすることの必要性が指摘されている。

図21は発熱素子上に放熱用の伝熱体を乗せたときの、接触面で熱抵抗 r_c の実測値と理論式の比較である[64,65]。材質と間隙ガスの種類を変えて測定している。この系では接触面圧が小さく、実接触面積が小さいので接触熱コンダクタンスは間隙ガスのみによっているとしてよい。理論式は、表面粗さをガウスの確率分布で表わしたYovanovichの理論[66]に従っている。Yは間隙の平均距離であり、 δ_c は平行平板間の飛距離熱伝導としたときの温度飛距離長さであり、 λ_g はガスの熱伝導率である。

熱抵抗の問題においては、ころがり接触、すべり接触などの動的な系や接触面で融解が生じる系などは、さらに研究を必要とする興味ある問題です。

5. 終りに

以上の他にも多くの重要な課題があり、興味ある結果が得られているが、紙面の制限により、わ
伝熱研究 Vol. 32, No. 124

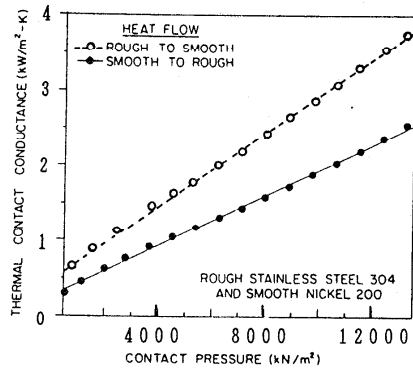


図18 接触熱コンダクタンスの整流作用[61]

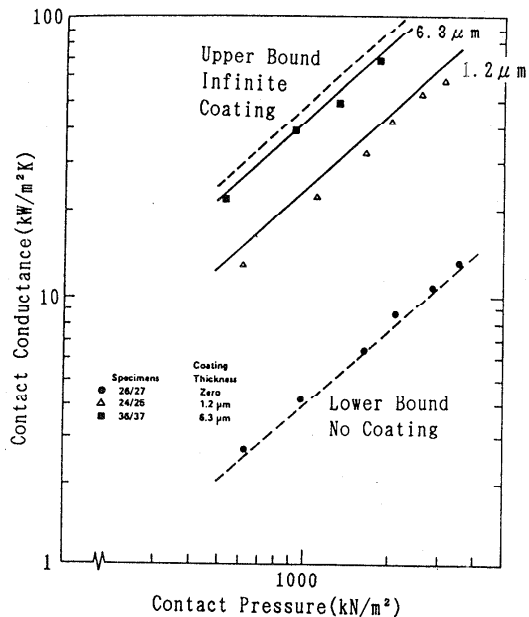


図19 コーティングによる接触熱コンダクタンスの増大[62]

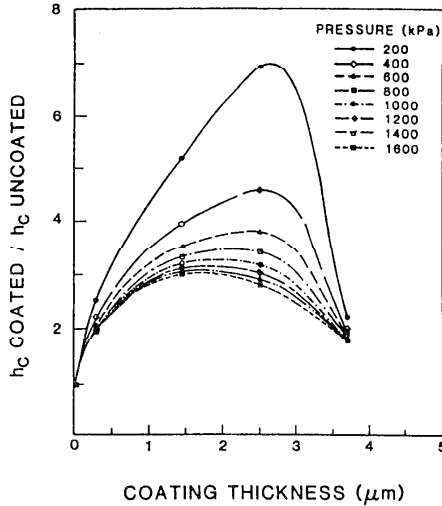


図20 コーティング材厚さによる接触熱コンダクタンスの変化[63]

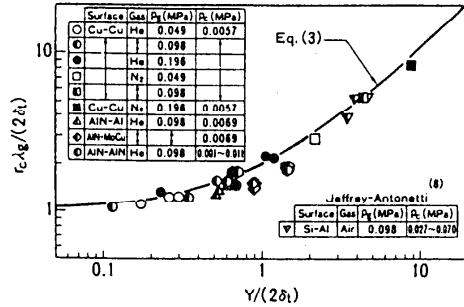


図21 接触面圧が小さい場合の接触熱抵抗[65]

ずかな項目についての記述となった。熱伝導・接触熱抵抗の分野には力学、電磁気学などの他分野との複合問題、分子伝熱、マイクロとマクロをつなげる論理など取り組まなければならない多くの問題があり、今後の発展が期待される。

参考文献

[1] Lippke A., Trans. ASME, J. Heat Transfer, 113(1991), 5.
 [2] 安藤浩一・内田敏夫, 日本機械学会論文集, B, 57-536(1991), 1434.
 [3] 浜中順一, 日本機械学会論文集, B, 55-514(1989), 1661.
 [4] 吉川文明・田中正隆, 日本機械学会論文集, B, 50-453(1984), 1310.
 [5] 川島康・西本廉, 日本機械学会論文集, B, 50-455(1984), 1727.
 [6] Pesta R., et al., Int. J. Heat Mass Transfer, 31-1(1988), 99.
 [7] Modest M.F. and Abakians H., Trans. ASME, J. Heat Transfer, 108(1986), 597.
 [8] Lavine A.S. and Jen T.-C., Trans. ASME, J. Heat Transfer, 113(1991), 296.
 [9] Lavine A.S. and Jen T.-C., Int. J. Heat Mass Transfer, 34-4/5(1991), 983.
 [10] Yuen W.Y.D., Trans. ASME, J. Heat Transfer, 107(1985), 541.
 [11] Tseng A.A., et al., Trans. ASME, J. Heat Transfer, 112(1990), 301.
 [12] Bejan A., Trans. ASME, J. Heat Transfer, 111(1989), 257.
 [13] Yuen W.Y.D., Int. J. Heat Mass Transfer, 31-3(1988), 637.
 [14] Kant R. and Deckert K.L., Trans. ASME, J. Heat Transfer, 113(1991), 12.
 [15] 大島まり・Thome R.J., 日本機械学会論文集, B, 57-542(1991), 3505.
 [16] 土方邦夫, 他2, 日本機械学会論文集, B, 56-529(1990), 2747.
 [17] Filk M.I. and Tien C.L., Trans. ASME, J. Heat Transfer, 112(1990), 10.
 [18] 竹越栄俊・他3, 日本機械学会論文集, B, 58-547(1992), 879.
 [19] 大島信徳・渡里望, 日本機械学会論文集, B, 54-504(1988), 2144.
 [20] 小林陸夫・他3, 日本機械学会論文集, B, 57-537(1991), 1795.
 [21] Pitchumani R. and Yao S.C., Trans. ASME, J. Heat Transfer, 113(1991), 788.
 [22] Glass D.E., et al., Int. J. Heat Mass Transfer, 30-8(1987), 1623.
 [23] Kar A., et al., Trans. ASME, J. Heat Transfer, 114(1992), 14.

- [24] Gembarovic J. and Majernik V., *Int. J. Heat Mass Transfer*, 31-5(1988), 1073.
- [25] Qiu T.Q. and Tien C.L., *Int. J. Heat Mass Transfer*, 35-3(1992), 719.
- [26] Sun J. and Chen M.M., *Int. J. Heat Mass Transfer*, 31-5(1988), 969.
- [27] 黒崎晏夫・佐藤勲, 日本機械学会論文集, B, 57-537(1991), 1780.
- [28] 黒崎晏夫・佐藤勲, 日本機械学会論文集, B, 57-537(1991), 1787.
- [29] Ben-Ammar F., et al., *Int. J. Heat Mass Transfer*, 35-6(1992), 1495.
- [30] 福迫尚一郎, 日本冷凍協会論文集, 7-1(1989), 1.
- [31] 平澤良男・他2名, 日本冷凍協会論文集, 6-2(1989), 61.
- [32] 平澤良男・他3名, 日本冷凍協会論文集, 7-2(1990), 27.
- [33] 笹口健吾・他2名, 日本機械学会論文集, B, 57-539(1991), 2315.
- [34] 松本浩二・他2名, 日本冷凍協会論文集, 9-3(1992).
- [35] 岡田昌志・他2名, 日本機械学会論文集, B, 56-526(1990), 1790.
- [36] Christenson M.S., et al., *Int. J. Heat Mass Transfer*, 32-1(1989), 69.
- [37] Chellaiah S., et al., *Int. J. Heat Mass Transfer*, 31-2(1988), 331.
- [38] 笹口健吾・松藤能長, 日本機械学会論文集, B, 57-536(1991), 1340.
- [39] Koji M., et al., *Int. J. Heat Mass Transfer* (掲載予定).
- [40] Masashi O., et al., *Proc. of 3rd Asian Thermophysical Properties Conference*, (1992), 490.
- [41] Bareiss M. and Beer H., *Int. J. Heat Mass Transfer*, 27-5(1984), 739.
- [42] Sparrow E.M. and Myrum T.A., *Trans. ASME, J. Heat Transfer*, 107(1985), 533.
- [43] Roy S.K., and Sengupta S., *Trans. ASME, J. Heat Transfer*, 109(1997), 460.
- [44] 斎藤彬夫・他3名, 日本機械学会論文集, B, 50-460(1984), 2977.
- [45] 斎藤彬夫・他3名, 日本機械学会論文集, B, 52-473(1986), 110.
- [46] 斎藤彬夫・他2名, 日本機械学会論文集, B, 57-541(1991), 3141.
- [47] 斎藤彬夫・他4名, 日本機械学会論文集, B, 54-502(1988), 1439.
- [48] 斎藤彬夫・他3名, 日本冷凍協会論文集, 8-2(1991), 151.
- [49] 大河誠司・斎藤彬夫, 日本冷凍協会論文集, 9-1(1992), 65.
- [50] 柏木孝夫・他3名, 日本機械学会論文集, B, 53-490(1988), 1823.
- [51] Tanazawa I., et al., 18th International Congress of Refrigeration, Paper No. 317(1991).
- [52] Hayashi Y., *Proc. of Third International Symposium on Cold Region Heat Transfer*, (1991), 47.
- [53] 斎藤彬夫・他2名, 第29回日本伝熱シンポジウム講演論文集, (1992), 495.
- [54] 小竹進 著, "分子熱流体", (1991), 2, 丸善.
- [55] Snaith B., et al., *Applied Energy* 22(1986), 31.
- [56] Madhusudana C.V. and Fletcher L.S., *AIAA J.* 24-3(1986), 510.
- [57] Fletcher L.S., *Trans. ASME, J. Heat Transfer*, 110(1988), 1059.
- [58] Tien C.L., *Proc. of 7th Thermal Conductivity Conf.*, U. S. Bureau of Standards, 735.
- [59] Yovanovich M.M., *Proc. of Int. Symposium on Cooling Technology for Electronic Equipment*, Honolulu, HI, Keynote Address, (1987).
- [60] Majumdar A. and Tien C.L., *Trans. ASME, J. Heat Transfer*, 113(1991), 516.
- [61] Stevenson P.F., et al., *Trans. ASME, J. Heat Transfer*, 113(1991), 30.
- [62] Antonetti V.W. and Yovanovich M.M., *Trans. ASME, J. Heat Transfer*, 107(1985), 513.
- [63] Kang T.K., et al., *Trans. ASME, J. Heat Transfer*, 112(1990), 864.
- [64] 芦分範行・他3, 日本機械学会論文集, B, 58-547(1992), 571.
- [65] 芦分範行, 日本機械学会論文集, B, 58-554(1992), 3141.
- [66] Yovanovich M.M., et al., *Proc. AIAA/ASME 3rd Joint Thermophys. Fluids, Plasma Heat Transfer Conf.*, AIAA-82-0888(1982).

壁面剪断乱流の構造と輸送機構

笠木 伸英 (東大工)

1 序論

乱流現象は、自然界、産業界を通じて我々の生活に極めて多面的に関与しており、それらを予測し、あるいは適切に制御することは、重要な工学的課題のひとつである。伝熱学分野においても、乱流中の熱・物質の輸送・拡散問題は古くから取り上げられ、多くの研究が精力的に行われてきた。従来は、単相の非圧縮性流体の乱流がほとんどの研究の対象とされたが、最近では混相流や圧縮性流体の乱流も頻繁に取り上げられる状況にある。これらの研究は、未解明の乱流現象についての基本的な知見を得ることを目的にしたもの、数値予測のための乱流モデルの開発と評価を目的としたもの、乱流現象の制御を目的としたものなどにおおよそ分類できる。一方、研究の質的な側面から見れば、具体的な工学的応用を意図したものと同時に、乱流現象の基本的かつ普遍的な物理機構に関する理解を目指したものも多い。特に後者の研究活動は、伝熱学の基盤を強化し、さらに他の基礎学問領域との連携によって伝熱学の裾野を広げることに貢献してきたと言える。

伝熱学分野では、固体壁と流体との熱の授受に関する様々な問題が存在するので、これらに適切に対処し、正しい理解を得る上で、本稿の主題である壁面剪断乱流についての知識は重要である。一方、壁面乱流、中でも乱流境界層、円管内乱流、チャンネル内乱流などの基本的な形態の乱流について、従来極めて多くの研究が成されてきたことについては、以下に述べるような背景があることを理解しておく必要がある。

すなわち、乱流現象の理解を得ようとするとき、様々な境界条件の下でのそれらの多様性と複雑な物理機構を考慮すると、個々の現象の巨視的特性を理解することも有用であるが、むしろそれらに内包される要素的な過程を取り出し、それらの理解を基にして体系的な理解を築こうという研究戦略が描かれる。例えば、レイノルズ分解による変動量を基盤とすれば、乱れエネルギーやレイノルズ応力の生成、拡散、分配、散逸の過程が考察の対象となる。変動のスケールの間の力学的な干渉に注目すれば、波数空間での挙動としての各種スケクトル(カスケード)や空間的な相関量が取り上げられる。さらに、乱流場の動的挙動、特に力学的因果関係に注目すれば、剪断乱流中の様々な準秩序的な構造についての知見が必要となる。そこで、必要最小限の力学的素過程を含む系として、単純形状の壁面剪断乱流が取り上げられることになる。特に、流体の渦度方程式から明らかのように、初期に渦度を有しない流れ場には渦度が生じることはなく、乱流の重要な性質の一つである3次元渦度変動は、粘着条件が課せられる固体面でのみ生じ、流れ場へ輸送される。さらに、固体面の存在によって、乱れ生成に不可欠な平均速度場の強い剪断変形も生じる。このような意味で、固体面に沿って流れる乱流は、研究対象として工学的にも、物理学的にも最も基本的な形態の乱

流であり、その力学機構、輸送機構の素過程の理解は広い一般性を有していると言える。自由乱流あるいはさらに基本的な等方性乱流にも共通した素過程が生じる。一方、より複雑な剪断乱流では、回転、加速・減速、体積力、剥離・再付着などの種々の力学的因子、あるいは伝熱学的因子としてのプラントル数の影響が加わるが、そこでの素過程がどのような挙動を示すかを理解する上では、基礎的な壁面乱流に関する知見が重要となる。以上のような理由から、壁面剪断乱流は乱流の力学や輸送機構を理解する上で、中心的な位置付けがなされるのである。

2 壁面乱流の研究の歴史

壁面乱流の構造に関する研究は少なくとも過去40年に渡って精力的に続けられ、現在相当の知識が累積されていると言える。ところで、この間の研究の足取りについては、時代によってかなり明確な質的な変貌を遂げており、そのような背景を理解しておくことも重要と思われる。そこで、壁面乱流の構造について現在得られている知見について述べる前に、これまでの関連研究の足取りについて、以下にその概要を振り返ってみる^[1-6]。

剪断乱流の構造に関する本格的な研究は、熱線流速計が実用化された1950年代に始まったと言えよう。米国NBSなどでの、乱流境界層^[7]や管内乱流^[8,9]などの基本的な流れ系での乱れの統計量の測定は、それまで未解明であった壁面乱流の基本的性質を明かにした。特に、壁面に接する極く薄い粘性底層に至る計測は、壁面乱流が全域で乱流状態にあることを示唆した。60年代に入ると、スタンフォード大学Klineら^[10,11]による乱流境界層の可視化実験が報告され、いわゆるバースティング現象^[12]に代表される、乱流中の秩序だったあるいは決定論的な運動の存在という画期的な事実が示された。同様の観察がオハイオ州立大学のBrodkeyら^[13]によっても確認され、また後に乱流混合層中にも大きなスケールの渦構造の秩序運動が発見され^[14]、従来の無秩序、ランダム性を主にした乱流の概念が大きく塗り変えられた。60年代はデジタル計算機が急速に発展した時代でもあり、レイノルズ分解に基づく乱流モデルの開発^[15]や、それらを使った乱流や乱流伝熱の数値予測も始まった。1968年には、乱流モデル計算のオリンピックと言われた第1回のスタンフォード会議^[16]が開催されている。

1970年代には、様々な剪断乱流の統計量の計測がより詳細にわたって進められたが^[17-22]、特に、剪断乱流中で乱流諸量が時空間的に特有な位相関係を保って運動する流体部分を準秩序構造として捉えることが一般化し、それらに関する様々な知見の蓄積が試みられた^[2,23]。これらは、熱線・熱膜流速計やレーザー流速計、そしてそれらの出力信号を大量かつ高速に処理するためのデジタル信号処理技術の進展に支えられた。壁面乱流の構造については、これらの測定技術に加えて条件付き抽出法など^[24-28]の新しい信号処理法によって、バースティング現象の詳細、時空間特性スケールが調べられ、この特有の構造が運動量や熱の輸送に支配的な役割を果たしていることが明かになっていった^[12,29,30]。乱流モデルについては、2方程式乱流モデルが例えば低レイノルズ数効果などを取り入れるように改良が進む一方^[31]、レイノルズ応力・フラックス方程式モデルの原型^[32,33]が整備された。渦粘性概念に基づく2方伝熱研究 Vol. 32, No. 124

程式モデルなどの乱流モデルや乱流プラントル数モデルは急速に実用計算コードに組み入れられ、種々の流れ系においてそれらの評価や改良が進んでいった。これらの70年代の研究成果の総括として、乱流モデル計算に関する第2回のスタンフォード会議^[34]が1980/81年に開催され、乱流モデル研究における歴史的なコーナーストーンを築いた。

1980年代は、スーパーコンピュータを利用した乱流の大規模な数値シミュレーションが新しい研究手法として確立された時期と言えよう。直接数値シミュレーション(DNS)あるいはラージ・エディ・シミュレーション(LES)は米国スタンフォード大学とNASA/Ames研究所の研究者が精力的に押し進めたが^[35-37]、80年代の後半からは、ヨーロッパ^[38]や我が国^[39,40]でも同様の人規模計算が行われるようになった。これらのデータベースは、乱流場の動的な挙動や統計量についての詳細な情報を提供できるため、比較的低レイノルズ数で単純形状の基本的な乱流場については、従来の実験データに替わって研究対象とされるようになった。特に、乱流境界層のDNSデータベースの可視化による構造解析^[41]が進行すると共に、従来主として実験的に蓄積されてきた壁面乱流の準秩序構造に関する知識について、研究者間のコンセンサスを得ようとする国際的な研究協力^[42]も行われた。そして、実験的な観察結果の多くがシミュレーション・データベースにおいて再確認されると共に、限られたデータに頼らざるを得なかった実験的知見の一部が修正されていった^[43,44]。さらに、DNSデータベースによれば、乱流の各種統計量の輸送方程式に現れる、生成、散逸、再配分、拡散などの各項の値が精度良く求められるので、乱流モデルの検証を改めて詳細に行うことが可能になった^[45]。統計量の壁面漸近挙動^[46]を考慮したモデルの開発^[47,48]、あるいは応力・フラックスの輸送方程式モデルの開発^[49,50]が急速に進展した。一方、実験研究の分野での新しい展開として、デジタル画像処理機器の急速な発展と共に可視化技術によって流れ場の定量情報を得ることが可能になり、改めて乱流研究の強力な武器に育っていったのもこの時代である^[51]。特に、2点相関テンソルを始めとする乱流場の情報が得られるようになり^[52]、今後シミュレーションの困難な複雑乱流の構造を調べるための技術として期待が大きい。

以上、現在までの壁面剪断乱流の研究の歴史についてその概説したが、90年代に入り乱流研究は従来とは質的にかなり異なった進展を開始している。上述のように、実験的には従来の点測定技術に替るフィールド計測技術^[51]によって、数値実験的にはスーパーコンピュータによる数値シミュレーションによって、乱流や乱流伝熱における統計量や準秩序構造に関するより詳細かつ正確な情報の抽出が可能となっており^[37,39,53]、この分野の新しい進展と拡張が期待されている。

3 壁面剪断乱流の準秩序構造

3.1 壁面乱流の基本構造とスケーリング則

壁面乱流は、いくつかの特徴のある領域から成り立っている^[1,54]。各領域の特性量に対してはスケーリング則があり、スケーリング・パラメータとして、剪断層厚さ δ 、速度差(主流速度 u_∞ あるいは中心速度 u_c)、温度差($T_w - T_\infty$)などの巨視的パラメータと、粘性長さ ν/u_τ 、摩

さて、上述の壁面乱流の基本的な骨格に対する考察は、平均速度、温度分布に加えて、各領域の乱れ諸量の統計量、さらには後述の準秩序構造の時空間的なスケールの普遍的な整理に対しても適用される。また、これらのスケーリング則は、当然ながら各領域の物理機構を探る上でも重要な概念となっている。例えば、壁近傍の速度乱れや温度乱れ、それらの相関係数などの分布は、上述の内層パラメータによって整理すれば、外層構造のかんりの変化に対しても不変な相似性を示す^[67]。また、よく知られているように、壁面乱流の準秩序構造の一つとして、ストリーク構造とバースティングに至る特有の運動がある^[11,12]。ストリーク構造は流れの可視化などで最も明瞭に観察できる構造であるので、定量的な知識が得られており、そのスパン方向間隔の分布は対数正規分布に従い、平均間隔は種々の条件下でほぼ一定である^[3,56,57]。この値は、圧力勾配、流れの加減速、レイノルズ数などに強く依存しない^[11,68]。従って、ストリーク構造は、何等かの力学的要因に対して壁近傍領域が自発的に示す運動パターンであると言える。一方、この低速ストリークが外層に向かって放出され、強いレイノルズ応力を生成する平均的な周期が、内外層のどちらのパラメータによって適切に整理されるかについては長く議論が続いた^[12,69-72]。この点は、準周期的なレイノルズ応力の再生成に、内外層のどのような力学機構が関与しているかという観点から重要な問題である。ただし、従来のいわゆるバースティング周期の測定法、定義には不備があったことも事実で、最近のDNSによる結果からは、低レイノルズ数範囲では内層パラメータで整理されるようであり^[73]、低速ストリークの放出現象は基本的には内層領域で自己完結した力学機構であると考えるべきである。いずれにせよ、壁近傍の準秩序構造の時空間的なスケールがどのようなパラメータで整理されるかは、それらの構造がどのような力学的な機構によって生じているかを探る大きな手がかりとなっている。

3. 2 壁面乱流の準秩序構造と伝熱機構

前述のように、80年代後半からのDNSデータベースを利用した壁面乱流の構造解析の進展と共に、従来プローブ測定などを基に主として時系列的に把握されていた壁面乱流の挙動に対して、それらをもたらず乱流の空間的な構造(トポロジー)の理解に重点が置かれるようになった。例えば、可視化手法という計測手段によって提示された低速ストリークの壁面からのリフトアップ、振動、ブレイクアップという一連のバースティング現象のプロセス^[12]、あるいはVITA法^[27]などで探査される特徴的な速度変動間の位相関係は、いずれも時系列挙動であり、むしろそれらがどのような空間構造によってもたらされるのか、あるいはそれらが乱流の秩序構造のどのような側面を反映しているのかといったことが中心課題となっている。

以下は、最近Robinson^[44]が、従来の研究と自らのDNSデータベースの観察から分類した、乱流境界層の8つの準秩序構造である。

- (1) 低速ストリーク(Wall low-speed streaks)
- (2) イジェクション(Ejections of low-speed fluid outward from the wall)

- (3) スウィープ(Sweeps of high-speed fluid inward toward the wall)
- (4) 渦構造(Vortical structures of various forms)
- (5) 局所剪断層(Sloping near-wall shear layers, exhibiting local concentrations of spanwise vorticity and $\partial u'/\partial x$)
- (6) ポケット(Near-wall "pockets")
- (7) 大規模渦運動(Large scale (δ -scale) motions capped by 3-D bulges in the outer turbulent/potential interface)
- (8) バックス(Shear-layer "backs" of large-scale outer-region motions, consisting of (δ -scale) sloping discontinuities in u)

(2)、(3)は、各々低速、高速の流体が壁面から離れる、あるいは壁面に向う運動を指すが、これらはレイノルズ剪断応力を形成する速度変動成分の4象限解析^[24,25]によって定義される。(4)は、壁面乱流中に現れる種々の形状、寸法の渦運動を指す^[2,44,58,74-79]。従来の研究において、ヘアピン渦、馬蹄渦、フック渦、流れ方向の縦渦、などが、指摘されている。(5)は、壁近傍からおおよそ $y^+ = 80$ 程度に至る、壁面に浅い角度で延びて形成される強いスパン方向渦度を伴う層を指す^[11,13,27,80]。イジェクションの上流側に追従する高速の流体との界面に形成され、強いレイノルズ応力と乱れエネルギーの散逸を伴う。従来、条件付き抽出法の一つであるVITA法で捉えられていた、穏やかな減速に急激な加速が追従する現象が該当すると考えられる。(6)は、Falco^[81]が可視化で見出した構造で、壁近傍にトレーリを流した場合に部分的にトレーサが排除される円形に近い領域を指す。現在はスウィープの足跡と見なすむきが多い^[44]。(7)、(8)は境界層外層に特有の構造で、直径が境界層厚さオーダーのスパン方向に軸を有するゆっくりとした回転運動とその上流側の速度成分の急変を伴う層を指す^[62,63]。管内流においても、コア領域に大きなスケールの運動が存在する^[82]。

これらの構造の中で、最も明確な知見が累積されているのは、低速ストリークである。そのスパン方向平均間隔はおおよそ $100v/u_\tau$ であり^[11,56,57]、流れ方向の長さは $1000v/u_\tau$ 以上にも及ぶ^[29,83]。温度場が存在する場合には、同様に温度ストリーク^[29]が形成されるが、プラントル数によってその特性は大きく変化する^[84,85]。低プラントル数では、熱拡散が迅速に行われるため、温度ストリークは速度のそれに比べてより太く丸みを帯びた形状に変化する^[85]。低速ストリークの峰は部分的に壁から離れて運動し、強いレイノルズ応力を生じる(イジェクション)ことが可視化実験やDNSで確認されており、ストリーク構造の形成機構は重要課題のひとつである。最近の一樣剪断乱流のDNSにおいて、その剪断速度が壁乱流における値と同様に大きい場合には、類似の渦構造やストリーク構造が現れることが示された^[86,87]。一方、平均剪断速度を可変とするクエット・ポアズイユ乱流のDNSによって、剪断のない壁乱流ではストリーク構造が消失することが示された^[88]。これら二つのDNSの結果は、一般にストリーク構造が著しく強い剪断を受けた流体層で、壁面が存在しなくても生じることを明らかにしたもので、重要である。ところで、従来ストリーク構造が明瞭に現れない粗面に沿う乱流境界層でもイジェクションが観察されており^[89]、ストリーク構造がレイノルズ応力の生成

に不可欠かどうか疑問であった。また、壁面乱流の機構を中心的に支えていると考えられる後述の渦構造の寸法は、流れ方向には $150\sim 300v/u_\tau$ でストリークほど長くない。従って、ストリーク構造に担われる本質的な役割は、スパン方向の準周期的な速度分布の形成にあると考えることが適切かも知れない。

壁面乱流には、種々の渦構造が存在することが流れの可視化や条件付き抽出法によって占くから指摘されていたが、最近乱れの2点相関テンソルを基礎とした理論、例えば、Stochastic Estimation (SE)^[90]やProper Orthogonal Decomposition^[91]によって、より明瞭な形でそれらの平均的な物理像が抽出されている^[52,79,92,93]。これは、DNSや画像処理流速計(3-D PTV)などによって得られたフィールド情報を用いて、従来理論的に提唱されていた数学的手法を応用できるようになったためである。一例として、図1は3-D PTVから得られた速度乱れの2点相関テンソル分布を用いて、SEによって、最も出現頻度の高い二つの速度ベクトルの方向を条件に推定された渦構造を示したものである^[52]。これらは、壁面に浅い角度で接する流れ方向の渦対である^[79,94]。渦対間では、強いイジェクションあるいはスイープが生じ、レイノルズ応力や乱れエネルギーの生成が行われる。壁面に接する縦渦列を仮定した構造モデル^[68,95]によれば、このような縦渦の集合によって形成される人工的壁乱流には、乱流境界層の統計的なあるいは運動論的な特性についての従来の実験的知見がよく反映されることが示されている。

さて、このような壁面乱流の平均的な物理像は、我々の理解を大いに助けるのではあるが、元来平均値に比べて変動が相当大きい乱流場の各時刻の挙動とはかなりかけ離れたものである。例えば、上述のようなスパン方向に隣接した逆方向の回転を伴う一組の渦対(ヘアピン渦、馬蹄渦)は、可視化実験やDNSで再現される乱流場での出現率は低く、傾いた縦渦構造の多くは単一の渦であることが明らかになっている^[58,78]。この相違は、スパン方向に一様な場での統計的な平均は常にスパン方向に面対称となる必然性による^[96,97]。このような背景から、最近では、DNSデータベースを用いた瞬間場の構造解析が精力的に行われている^[41,44,98,99]。

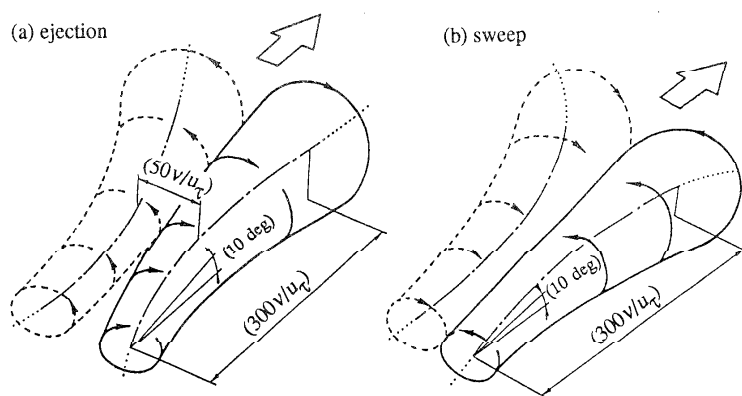
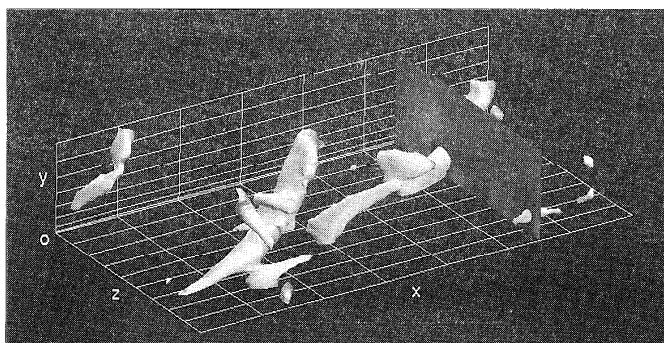


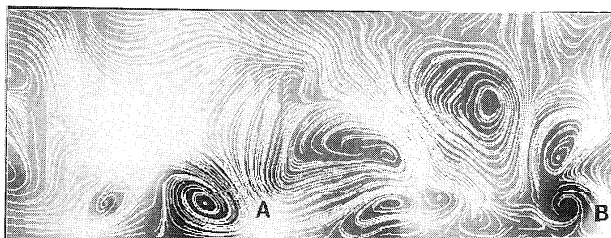
図1 Linear Stochastic Estimationによる壁面乱流の準秩序構造の推定^[52]

渦構造は、乱流現象の中心的な役割を果たしていると言われていたが、一般に三次元非定常流中での渦運動の同定は難しく、共通した定義は存在しない。Robinson^[44]は、「渦中心の対流速度で移動する座標系からみたときに、中心軸に垂直な平面に投影した瞬時の流線がおおよそ円形あるいはらせん状を描く」と渦を定義したが、この定義は多くの支持を得るにしても、依然として観察者の任意性によるところが完全には排除されていないので、むしろ定量的な、特にスカラー量を規準とした同定法が望ましい。局所的に圧力変動が強い負値を示す領域は渦運動とよく対応する^[44]。一例として、図2は、発達したチャンネル乱流中で、A、Bで示される強い渦運動が局所的な低圧領域とよく対応することを示している^[98]。渦形状は、壁面と浅い角度をなすバナナ状で、壁面近傍で最も発生頻度の高い形状である^[99]。さらに最近では、流体の歪みと回転の相対的な大きさの指標である変形速度テンソルの第二不変量が、渦の内部で大きな負値をとることが明らかになっている^[44,99]。DNSデータベースに観察される傾いた縦渦構造は、そのコア部分が直径で $25\sim 35v/u_\tau$ 、流れ方向に $150\sim 300v/u_\tau$ 、高さ方向に $100\sim 150v/u_\tau$ のスケールを有しており、その寿命は比較的長く、その形状をほぼ保って流れ方向に $1000v/u_\tau$ 以上にわたって流下する^[99,100]。

このようにして捉えられた渦構造が、乱流場の力学機構、輸送機構にどのような役割を果たしているかが次の問題である。図3は低圧領域とレイノルズ応力積 $-u'v'$ が正の大きな値を



(a) 低圧領域 ($p'^+ < -3.0$)



(b) 図(a)中の断面の瞬間流線図と圧力分布 (Black to white: $p'^+ = -3.0$ to 3.0)

図2 チャンネル内乱流での局所的な低圧領域としての渦構造の同定^[98]
(可視化領域は、下壁からチャンネル中心まで、約 $800 \times 150 \times 400(v/u_\tau)^3$ の矩形領域)

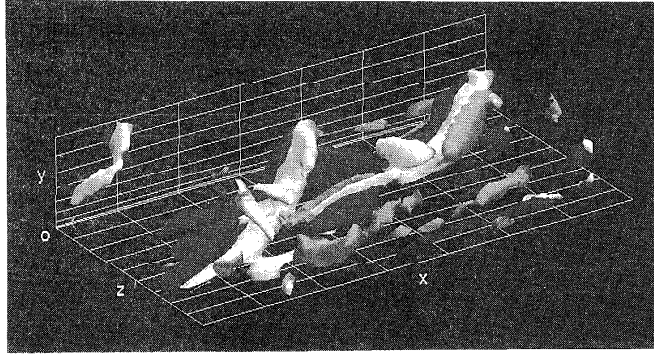


図3 低圧領域に付随するレイノルズ応力積の大きな領域^[85,98]
 (Dark gray (ejection): $(u'^+v'^+)_{2} < -3.0$, light gray (sweep): $(u'^+v'^+)_{4} < -3.0$)

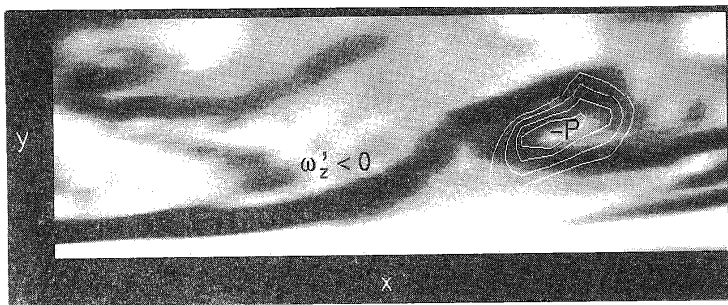


図4 x-y断面での低圧領域と付随する局所剪断層
 ($-p'^+ = 2.0, 3.0, 4.0, 4.5$; black to white: $\omega_x'^+ = -0.15$ to 0.15)

とる領域を示したものである。渦の回転に伴い、その左右側方でイジェクションとスウィープが発生している。図4は、流れと平行で壁面と垂直な断面で低圧領域とスパン方向の渦度変動の分布を可視化したものである。傾いた縦渦が流下することによって壁近傍の低速流体が持ち上げられ、シート状に引き延ばされて強い剪断層が形成される。このような観察から推察されたレイノルズ剪断応力の発生消滅機構の模式図^[98]を図5に示す。すなわち、壁近傍に流れ方向に軸を持つ渦が存在する時、その内部は低圧領域になり、渦運動によって連行された流体が壁面に向かうことにより壁面付近に高圧領域が生じる。一方、渦の反対側では、低速の流体塊が上方に押しやられるため、上流側からの高速流体の到達により高圧領域が生じる。この低速流体と高速流体とが接する領域には、いわゆる局所剪断層が壁近傍から渦構造の上面側にわたって形成される。レイノルズ応力の生成領域は、渦の左右側方に存在する。一方、低圧領域、高圧領域の内部は、レイノルズ応力の消滅項としての圧力歪相関項が大きな領域となっており、圧力拡散項は、生成領域から消滅領域にレイノルズ応力を輸送する役割を担っている。

上述のような乱流構造に伴うスカラー輸送機構についても、DNS^[94,95,100]のデータベースを利用して解明が進んでいる。図6は、両壁面で等熱流束条件で加熱される発達したチャンネル乱流で、プラントル数が0.71及び0.025の場合に、乱流熱流束積 $v'T$ が大きな値を取る領域を

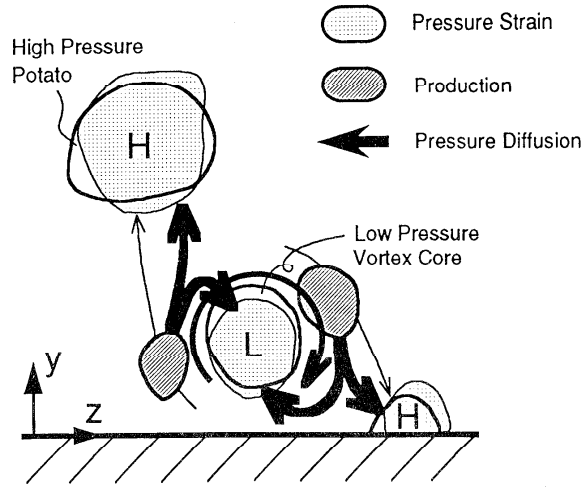
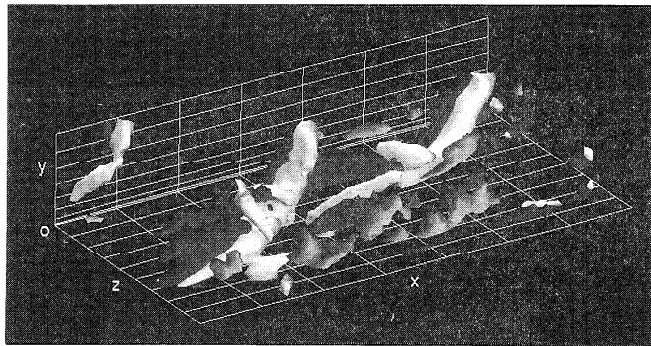
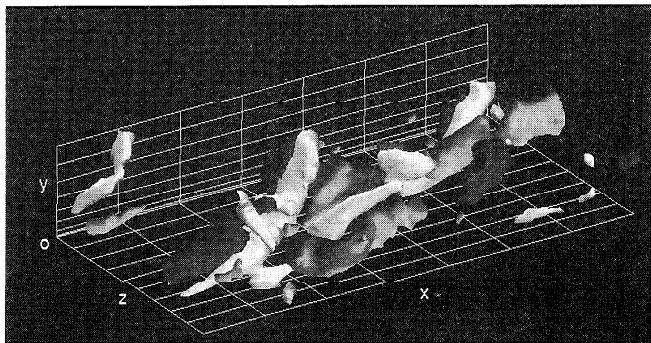


図5 レイノルズ剪断応力の生成消滅機構の概念図¹⁹⁸¹



(a) $Pr = 0.71$ (Dark gray: $(v'^+T'^+)_{1} > 3.0$, light gray: $(v'^+T'^+)_{3} > 3.0$)



(b) $Pr = 0.025$ (Dark gray: $(v'^+T'^+)_{1} > 0.23$, light gray: $(v'^+T'^+)_{3} > 0.23$)

図6 低圧領域に付随する乱流熱流束積の大きな領域^{85]}

示したものである。図3と比較すれば、プラントル数が1に近い場合には、 $v'T$ の分布は $u'v$ のそれに酷似しており、よく知られた運動量と熱輸送のアナロジーが、瞬時場でも成立していることがわかる^[39]。一方、プラントル数が極く小さい場合には、乱流熱流束自体が熱伝導に比べて小さくなり、その分布状態もかなり変化するが、やはり渦構造に密接に関連して生じている^[85]。なお、乱流熱流束の生成消滅に関しても、上述のレイノルズ応力と類似の機構が存在することが明かにされつつある。

4 結言

非線形系の力学として代表的な乱流とその輸送現象については、その研究の歴史は比較的長いにもかかわらず多くの困難な課題が山積している。しかし、既に述べたように、その研究はいくつかの時代に渡って確かな進歩を遂げてきたと言える。本稿の主題である壁面剪断乱流の準秩序構造については、レイノルズ応力や乱流熱流束の生成と消滅が傾いた縦渦構造という特有の構造に隣接して生じること、またそのように壁面乱流の中心的機構が時空間的に局在し、極めて間欠的に分布することは、最近のDNSデータベースから得られた新しい壁乱流の物理像である。今後は、複数の秩序構造の間の時空間的な位相関係をさらに明かにすると共に、それらの生成から消滅に至る時空間発展、力学的な因果関係、そして熱物質の輸送機構における役割について、それらの全容の解明が大きな目標である。特に上述の縦渦構造の再生成については、壁面の粘着条件によってもたらされる渦度場の階層構造^[58,68,78]が種となって新しい渦構造が形成されるとする推察もある^[44,79,99]。また、空間的に拘束を受ける壁乱流がその自立に必要とする長さスケールに対する検討^[101,102]も行われており、これらの示唆するところは興味深い。上記の目標が達成できれば、乱流輸送現象の制御^[103]についても、大きな可能性が生まれてくるものと期待される。

本稿では、紙面の都合から多くの重要な研究成果や文献の引用を割愛せざるを得なかった。また、壁面乱流の物理像に関してどのような知見を重要視するかについては、現在も研究者によってかなりの相違があることもお断りしておきたい。

参考文献

- [1] Hinze, J. O., 1975, *Turbulence*, 2nd Edition, McGraw-Hill, New York.
- [2] Cantwell, B. J., 1981, "Organized Motion in Turbulent Flow," *Ann. Rev. Fluid Mech.*, Vol. 13, pp. 457-515.
- [3] Hirata, M., Tanaka, H., Kawamura, H., and Kasagi, N., 1982, "Heat Transfer in Turbulent Flows," *Proc. 7th Int. Heat Transfer Conf.*, Hemisphere, Washington, D.C., Vol. 1, pp. 31-57.
- [4] 谷一郎編, 流体力学の進歩・乱流, 丸善, 1980.
- [5] 谷一郎編, 流体力学の進歩・乱流, 丸善, 1984.
- [6] Kline, S. J., and Robinson, S. K., 1990, "Quasi-Coherent Structures in the Turbulent Boundary Layer: Part I. Status Report on a Community-Wide Summary of the Data," *Near-Wall Turbulence*, S. J. Kline and N. H. Afgan, eds., Hemisphere, Washington, D.C., pp. 200-217.
- [7] Klebanoff, P. S., 1954, "Characteristics of Turbulence in a Boundary Layer with Zero Pressure Gradient," NACA Rep. 1247
- [8] Laufer, J., 1950, "Investigation of Turbulent Flow in a Two-Dimensional Channel," NACA TN 2123.
- [9] Laufer, J., 1954, "The Structure of Turbulence in Fully Developed Pipe Flow," NACA Rep. 1174.
- [10] Kline, S. J., and Runstadler, P. W., 1959, "Some Preliminary Results of Visual Studies of the Flow Model of the Wall Layers of the Turbulent Boundary Layer," *Trans. ASME, Ser. E*, Vol. 2, pp. 166-170.
- [11] Kline, S. J., Reynolds, W. C., Schraub, F. A., and Runstadler, P. W., 1967, "The Structure of Turbulent

- Boundary Layers," *J. Fluid Mech.*, Vol. 30, pp. 741-773.
- [12] Kim, H. T., Kline, S. J., and Reynolds, W. C., 1971, "The Production of Turbulence Near a Smooth Wall in a Turbulent Boundary Layer," *J. Fluid Mech.*, Vol. 50, pp. 133-160.
- [13] Corino, E. R., and Brodkey, R. S., 1969, "A Visual Investigation of the Wall Region in Turbulent Flow," *J. Fluid Mech.*, Vol. 37, pp. 1-30.
- [14] Brown, G. L., and Roshko, A., 1974, "On Density Effects and Large Eddy Structure in Turbulent Mixing Layers," *J. Fluid Mech.*, Vol. 64, pp. 775-816.
- [15] Harlow, F. H., and Nakayama, P. I., 1967, "Turbulence Transport Equations," *Phys. Fluids*, Vol. 10, pp. 2323-2332.
- [16] Kline, S. J., Morkovin, M. V., Sovran, G., and Cockrell, D. J., 1969, *Proceedings Computation of Turbulent Boundary Layers-1968 AFOSR-IFP-Stanford Conference*, Vol. I, Methods, Predictions, Evaluation and Flow Structure, Stanford University, Stanford, California.
- [17] Gupta, A. K., and Kaplan, R. E., 1972, "Statistical Characteristics of Reynolds Stress in a Turbulent Boundary Layer," *Phys. Fluids*, Vol. 15, pp. 981-985.
- [18] Eckelmann, H., 1974, "The Structure of the Viscous Sublayer and the Adjacent Wall Region in a Turbulent Channel Flow," *J. Fluid Mech.*, Vol. 65, pp. 439-459.
- [19] Hussain, A. K. M. F., and Reynolds, W. C., 1975, "Measurement in Fully Developed Turbulent Channel Flow," *ASME J. Fluids Eng.*, Vol. 97, pp. 568-580.
- [20] 菱野, 長野, 白木, 1978, "管内乱流の速度と温度の乱れ," *機論*, Vol. 44B, pp. 126-134.
- [21] Kreplin, H. P., and Eckelmann, H., 1979, "Behavior of the Three Fluctuating Velocity Components in the Wall Region of a Turbulent Channel Flow," *Phys. Fluids*, Vol. 22, pp. 1233-1239.
- [22] Purtell, L. P., Klebanoff, P. S., and Buckley, F. T., 1981, "Turbulent Boundary Layer at Low Reynolds Number," *Phys. Fluids*, Vol. 24, pp. 802-811.
- [23] Smith, C. R., and Abbott, D. E., 1978, *Coherent Structure of Turbulent Boundary Layers*, AFOSR/Lehigh University Workshop, Lehigh University, Bethlehem, Pennsylvania.
- [24] Wallace, J. M., Eckelmann, H., and Brodkey, R. S., 1972, "The Wall Region in Turbulent Shear Flow," *J. Fluid Mech.*, Vol. 54, pp. 39-48.
- [25] Willmarth, W. W., and Lu, S. S., 1972, "Structure of the Reynolds Stress Near the Wall," *J. Fluid Mech.*, Vol. 55, pp. 65-92.
- [26] Lee, M. K., Eckelmann, L. D., and Hanratty, T. J., 1974, "Identification of Turbulent Wall Eddies through the Phase Relation of the Components of the Fluctuating Velocity Gradient," *J. Fluid Mech.*, Vol. 66, pp. 17-33.
- [27] Blackwelder, R. F., and Kaplan, R. E., 1976, "On the Wall Structure of the Turbulent Boundary layer," *J. Fluid Mech.*, Vol. 76, pp. 89-112.
- [28] Wallace, J. M., Brodkey, R. S., and Eckelmann, H., 1977, "Pattern Recognized Structures in Bounded Turbulent Shear Flows," *J. Fluid Mech.*, Vol. 83, pp. 673-693.
- [29] Iritani, Y., Kasagi, N., and Hirata, M., 1984, "Heat Transfer Mechanism and Associated Turbulence Structure in a Near-Wall Region of a Turbulent Boundary Layer," *Turbulent Shear Flows IV*, L. J. S. Bradbury et al., eds., Springer-Verlag, Berlin, pp. 223-234.
- [30] Khabakhpasheva, Y. M., 1986, "Experimental Investigation of Turbulent Momentum and Heat Transfer in the Proximity of the Wall," *Proc. 8th Int. Heat Transfer Conf.*, Hemisphere, Washington, D. C., Vol. 1, pp. 79-90.
- [31] Jones, W. P., and Launder, B. E., 1972, "The Prediction of Laminarization with a Two-Equation Model of Turbulence," *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 15, pp. 301-314.
- [32] Launder, B. E., Reece, G. J., and Rodi, W., 1975, "Progress in the Development of a Reynolds-Stress Turbulence Closure," *J. Fluid Mech.*, Vol. 68, pp. 537-566.
- [33] Launder, B. E., 1976, "Heat and Mass Transport," *Topics in Applied Physics*, Vol. 12, P. Bradshaw, ed., Springer-Verlag, Berlin, pp. 231-287.
- [34] Kline, S. J., Cantwell, B. J., and Lilley, G. M., 1982, *1980-81 AFOSR-HTTM-Stanford Conference on Complex Turbulent Flows: Comparison of Computation and Experiment*, Vols. 1-3, Stanford University, Stanford, California.
- [35] Rogallo, R. S., and Moin, P., 1984, "Numerical Simulation of Turbulent Flows," *Ann. Rev. Fluid Mech.*, Vol. 16, pp. 99-137.
- [36] Moin, P., and Spalart, P. R., 1989, "Contributions of Numerical Simulation Data Bases to the Physics, Modeling, and Measurement of Turbulence," *Advances in Turbulence*, W. K. George and R. Arndt, eds., Hemisphere, Washington, D.C., pp. 11-38.
- [37] Reynolds, W. C., 1990, "The Potential and Limitations of Direct and Large Eddy Simulations," *Whither Turbulence? - Turbulence at the Crossroads*, J. L. Lumley, ed., Springer-Verlag, Berlin, pp. 313-342.
- [38] Schumann, U., and Friedrich, R., 1987, "On Direct and Large Eddy Simulation of Turbulence," *Advances in Turbulence*, G. Comte Bellot and J. Mathieu, eds., Springer Verlag, Berlin, pp. 88-104.
- [39] Kasagi, N., 1991, "Direct Numerical Simulation Data Bases: An Effective tool in Fundamental Studies of Turbulent Heat Transfer," *1991 Japan-U.S. Sci. Sem. Computers in Heat Transfer Science*, Oiso.
- [40] 笠木, 長野, 堀内, 宮内, 三宅, "直接数値シミュレーションによる乱流輸送現象のデータベース構築に関する研究," 平成3年度科研費総合研究(A)成果報告書, No. 02302043.

- [41]Robinson, S. K., Kline, S. J., and Spalart, P. R., 1990, "Quasi-Coherent Structures in the Turbulent Boundary Layer: Part II. Verification and New Information from a Numerically Simulated Flat-Plate Layer," *Near-Wall Turbulence*, S. J. Kline and N. H. Afgan, eds., Hemisphere, Washington, D.C., pp. 218-247.
- [42]Kline, S. J., and Robinson, S. K., 1988, "Nomenclature for Canonical Turbulent Flows," 2nd Draft, *Workshop on New Directions in Turbulent Wall-Layer Research*, University of Michigan, Ann Arbor.
- [43]Robinson, S. K., 1991, "Coherent Motions in the Turbulent Boundary Layer," *Ann. Rev. Fluid Mech.*, Vol. 23, pp. 601-639.
- [44]Robinson, S. K., 1991, "The Kinematics of Turbulent Boundary layer Structure," NASA TM 103859.
- [45]Mansour, N. N., Kim, J., and Moin, P., 1988, "Reynolds-stress and Dissipation-rate Budgets in a Turbulent Channel Flow," *J. Fluid Mech.*, Vol. 194, pp. 15-44.
- [46]Chapman, D. R., and Kuhn, G. D., 1986, "The Limiting Behavior of Turbulence near a Wall," *J. Fluid Mech.*, Vol. 170, pp. 265-292.
- [47]Myong, H. K., and Kasagi, N., 1990, "A New Approach to the Improvement of k- ϵ Turbulence Model for Wall-Bounded Shear Flows," *JSME Int. J.*, Ser. II, Vol. 33, pp. 63-72.
- [48]Nagano, Y., and Tagawa, M., 1991, "An Improved k- ϵ Model for Boundary Layer Flows," *ASME J. Fluids Eng.*, Vol. 112, pp. 33-39.
- [49]Launder, B. E., 1989, "Second-Moment Closure: Present and Future?," *Int. J. Heat Fluid Flow*, Vol. 10, pp. 282-300.
- [50]Shih, T.-H., Lumley, J. L., and Chen, J.-Y., 1990, "Second-Order Modeling of a Passive Scalar in a Turbulent Shear Flow," *AIAA J.*, Vol. 28, pp. 610-617.
- [51]Kasagi, N., and Nishino, K., 1991, "Probing Turbulence with Three-Dimensional Particle Tracking Velocimetry," *Exp. Therm. Fluid Sic.*, Vol. 4, pp. 601-613.
- [52]Nishino, K. and Kasagi, N., 1991, "On the Quasi-Coherent Turbulence Structures in the Two-Dimensional Channel Flow," *Proc. 8th Symp. Turbulent Shear Flows*, Vol. 2, pp. 28.3.1-28.3.6.
- [53]笠木, 1991, "乱流工学研究におけるダイレクト・シミュレーションの応用, 日本造船学会誌," No.751, pp. 29-33.
- [54]Tennekes, H., and Lumley, J. L., 1972, *A First Course in Turbulence*, MIT Press, Cambridge, Massachusetts.
- [55]Kader, B. A., and Yaglom, A. M., 1972, "Heat and Mass Transfer Laws for Fully Turbulent Wall Flows," *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 15, pp. 2329-2351.
- [56]Smith, C. R., and Metzler, S. P., 1983, "The Characteristics of Low-Speed Streaks in the Near-Wall Region of a Turbulent Boundary Layer," *J. Fluid Mech.*, Vol. 129, pp. 27-54.
- [57]入谷, 笠木, 平田, 1985, "二次元チャネル内乱流におけるストリーク構造," 機論, Vol. 51B, pp. 3092-3101.
- [58]Kim, J., Moin, P., and Moser, R., 1987, "Turbulence Statistics in Fully Developed Channel Flow at Low Reynolds Number," *J. Fluid Mech.*, Vol. 177, pp. 133-166.
- [59]Spalart, P. R., 1988, "Direct Simulation of a Turbulent Boundary Layer up to $R_0 = 1410$," *J. Fluid Mech.*, Vol. 187, pp. 61-98.
- [60]Brodkey, R. S., Wallace, J. M., and Eckelmann, H., 1974, "Some Properties of Truncated Turbulent Signals in Bounded Shear Flows," *J. Fluid Mech.*, Vol. 63, pp. 209-224.
- [61]Coles, D., 1969, "The Young Person's Guide to the Data," *Proceedings Computation of Turbulent Boundary Layers-1968 AFOSR-IFP-Stanford Conference*, Vol. II, Coles, D. E., and Hirst, E. A., eds., Compiled Data, Stanford University, Stanford, California.
- [62]Kovaszny, L. S. G., Kibens, V., and Blackwelder, R. F., 1970, "Large-Scale Motion in the Intermittent Region of a Turbulent Boundary Layer," *J. Fluid Mech.*, Vol. 41, pp. 283-325.
- [63]Brown, G. L., and Thomas, S. W., 1977, "Large Structure in a Turbulent Boundary Layer," *Phys. Fluids*, Vol. 20, pp. s243-s252.
- [64]Kader, B. A., 1981, "Temperature and Concentration Profiles in Fully Turbulent Boundary Layers," *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 24, pp. 1541-1544.
- [65]Perry, A. E., and Hoffmann, P. H., 1976, "An Experimental Study of Turbulent Convective Heat Transfer from a Flat Plate," *J. Fluid Mech.*, Vol. 77, pp. 355-368.
- [66]Subramanian, C. S., and Antonia, R. A., 1981, "Effect of Reynolds Number on a Slightly Heated Turbulent Boundary Layer," *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 24, pp. 1833-1846.
- [67]Coles, D., 1978, "A Model for Flow in the Viscous Sublayer," *Coherent Structure of Turbulent Boundary Layers*, AFOSR/Lehigh University Workshop, Lehigh University, pp. 462-475.
- [68]Kasagi, N., 1989, "Structural Study of Near-Wall Turbulence and Its Heat Transfer Mechanism," *Near-Wall Turbulence*, S. J. Kline and N. H. Afgan, eds., Hemisphere, Washington D. C., pp. 596-619.
- [69]Rao, K. N., Narashima, R., and Narayana, M. A. B., 1971, "The Bursting Phenomenon in a Turbulent Boundary Layer," *J. Fluid Mech.*, Vol. 48, pp. 339-352.
- [70]Blackwelder, R. F., and Haritonidis, J. H., 1983, "Scaling of the Bursting Frequency in Turbulent Boundary Layers," *J. Fluid Mech.*, Vol. 132, pp. 87-103.
- [71]Alfredsson, P. H., and Johansson, A. V., 1984, "Time Scales in Turbulent Channel Flow," *Phys. Fluids*, Vol. 27, pp. 1974-1981.
- [72]Luchik, T. S., and Tiederman, W. G., 1987, "Timescale and Structure of Ejections and Bursts in Turbulent

- Channel Flows," *J. Fluid Mech.*, Vol. 174, pp. 529-552.
- [73] Kim, J., and Spalart, P. R., 1987, "Scaling of the Bursting Frequency in Turbulent Boundary Layers at Low Reynolds Numbers," *Phys. Fluids*, Vol. 30, pp. 3326-3328.
- [74] Bakewell, H. P. and Lumley, J. L., 1967, "Viscous Sublayer and Adjacent Wall Region in Turbulent Pipe Flow," *Phys. Fluids*, Vol. 10, pp. 1880-1889.
- [75] Blackwelder, R. F., and Eckelmann, H., 1979, "Streamwise Vortices Associated with the Bursting Phenomenon," *J. Fluid Mech.*, Vol. 94, pp. 577-594.
- [76] Hatzivramidis, D. T., and Hanratty, T. J., 1979, "The Representation of the Viscous Wall Region by a Regular Eddy Pattern," *J. Fluid Mech.*, Vol. 95, pp. 655-679.
- [77] Smith, C. R., and Schwartz, S. P., 1983, "Observation of Streamwise Rotation in the Near-Wall Region of a Turbulent Boundary layer," *Phys. Fluids*, Vol. 26, pp. 641-652.
- [78] Kasagi, N., Hirata, M., and Nishino, K., 1986, "Streamwise Pseudo-Vortical Structures and Associated Vorticity in the Near-Wall Region of a Wall-Bounded Shear Flow," *Exp. Fluids*, Vol. 4, pp. 309-318.
- [79] Adrian, R. J., Moin, P., and Moser, R. D., 1987, "Stochastic Estimation of Conditional Eddies in Turbulent Channel Flow," *Proc. Summer Program 1987*, CTR, NASA/Stanford, pp. 7-19.
- [80] Johansson, A. V., Alfredsson, P. H., and Eckelmann, H., 1987, "On the Evolution of Shear-Layer Structures in Near-Wall Turbulence," *Advances in Turbulence*, G. Comte-Bellot and J. Mathieu, eds., Springer-Verlag, Berlin, pp. 383-390.
- [81] Falco, 1980, "The Production of Turbulence Near a Wall," *AIAA Paper* 80-1356.
- [82] Rajagopalan, S., and Antonia, R. A., 1979, "Some Properties of the Large Structure in a Fully Developed Turbulent Duct Flow," *Phys. Fluids*, Vol. 22, pp. 614-622.
- [83] Moin, P., and Kim, J., 1982, "Numerical Investigation of Turbulent Channel Flow," *J. Fluid Mech.*, Vol. 118, pp. 341-377.
- [84] Kasagi, N., Tomita, Y., and Kuroda, A., 1992, "Direct Numerical Simulation of Passive Scalar Field in a Two Dimensional Turbulent Channel Flow," *ASME J. Heat Transfer*, Vol. 114, pp. 598-606.
- [85] Kasagi, N., and Ohtsubo, Y., 1992, "Direct Numerical Simulation of Low Prandtl Number Thermal Field in a Turbulent Channel Flow," *Turbulent Shear Flows VIII*, to appear, Springer-Verlag, Berlin.
- [86] Rogers, M. M., and Moin, P., 1987, "The Structure of the Vorticity Field in Homogeneous Turbulent Flow," *J. Fluid Mech.*, Vol. 176, pp. 33-66.
- [87] Lee, M. J., Kim, J., and Moin, P., 1990, "Structure of Turbulence at High Shear Rate," *J. Fluid Mech.*, Vol. 216, pp. 561-583.
- [88] 黒田, 笠木, 平田, 1990, "DNSによる壁面乱流における平均速度勾配の力学的効果に関する研究," 第27回伝熱シンポジウム, Vol. 1, pp. 46-48.
- [89] Grass, A. J., 1971, "Structural Features of Turbulent Flow over Smooth and Rough Boundaries," *J. Fluid Mech.*, Vol. 50, pp. 233-255.
- [90] Adrian, R. J., 1975, "On the Role of Conditional Averages in Turbulence Theory," *Turbulence in Liquids*, J. L. Zakin and G. K. Paterson, eds., Science Press, Princeton, pp. 323-332.
- [91] Lumley, J. L., 1970, *Stochastic Tools in Turbulence*, Appl. Math. Mech., Vol. 12, Academic, New York.
- [92] Adrian, R. J., and Moin, P., 1988, "Stochastic Estimation of Coherent Structure: Homogeneous Shear Flow," *J. Fluid Mech.*, Vol. 190, pp. 531-559.
- [93] Moin, P., and Moser, R. D., 1989, "Characteristic-Eddy Decomposition of Turbulence in a Channel," *J. Fluid Mech.*, Vol. 200, pp. 471-509.
- [94] Kim, J., 1985, "Turbulence Structures Associated with the Bursting Event," *Phys. Fluids*, Vol. 28, pp. 52-58.
- [95] Kasagi, N., Kuroda, A., and Hirata, M., 1989, "Numerical Investigation of Near-Wall Turbulent Heat Transfer Taking Into Account the Unsteady Heat Conduction in the Solid Wall," *ASME J. Heat Transfer*, Vol. 111, pp. 385-392.
- [96] Blackwelder, R. F., 1988, "Some Symmetrical Properties of Conditional Averages," *Transport Phenomena in Turbulent Flows*, M. Hirata and N. Kasagi, eds., Hemisphere, Washington, D. C., pp. 89-90.
- [97] Guezennec, Y. G., Piomelli, U., and Kim, J., 1989, "On the Shape and Dynamics of Wall Structures in Turbulent Channel Flow," *Phys. Fluids*, Vol. A1, pp. 764-766.
- [98] 笠木, 住谷, 鈴木, 飯田, 1992, "壁面乱流における準秩序構造," 機械学会第70期全国大会講演論文集, No. 920-78C, pp. 515-517.
- [99] 鈴木, 笠木, 1991, "壁面乱流における準秩序構造の非定常挙動," 機械学会第69期全国大会講演論文集, No. 910-62 B, pp. 233-235.
- [100] Kim, J., 1988, "Investigation of Heat and Mass Transport in Turbulent Flows via Numerical Simulation," *Transport Phenomena in Turbulent Flows: Theory, Experiment and Numerical Simulation*, M. Hirata and N. Kasagi, eds., Hemisphere, Washington, D. C., pp. 157-170.
- [101] Maruyama, S., and Tanaka, H., 1987, "The Effect of Spatial Restriction on the Inner-Layer Structure of Wall Turbulence," *J. Fluid Mech.*, Vol. 177, pp. 485-500.
- [102] Jimenez, J. and Moin, P., 1991, "The Minimal Flow Unit in Near-Wall Turbulence," *J. Fluid Mech.*, Vol. 225, pp. 213-240.
- [103] 笠木, 1992, "乱流現象の制御—その展望," 機械学会セミナー教材, No. 920-75, 乱流の制御とその応用, pp. 1-10.

対流熱伝達における伝熱促進

鈴木健二郎 京大・工

稲岡恭二 ”

1. はじめに

本稿では他の記事との重複を避ける意味から、单相流の強制対流熱伝達における伝熱促進法に絞って稿を進める。伝熱促進については、最近にも、その達成手段や応用分野を中心に記事を纏めた、いくつかの優れた展望記事がある⁽¹⁾⁻⁽⁵⁾。以下では、それらと少し観点を変えて、伝熱促進を達成するための流れの制御方式、とくに著者らが関心を持つ制御方式を対象として伝熱促進機構についての概説と、その観点からの今後の研究方向に関する展望を述べる。

一般的に言うと伝熱促進とは「伝熱量の増大」を指すが、ここではそれをやゝ狭義に捉えて「熱流束の増大」と考えることにすると、それは流体の伝熱面近傍における温度勾配を大きくすることに相当する。それを達成するためには伝熱面近傍にそれに適した流れを作り出す必要があり、これまで種々の伝熱面近傍流れの制御方式が提案、検討され、また実用化されている。以下では、その制御方式を流れの定常、非定常に注目して

1. 流れの定常性を保つ伝熱促進。
2. 流れの非定常化による伝熱促進。
3. 乱流制御による伝熱促進。

の3種類に区分し、それぞれについて上述の観点からの議論を行う。第2章では、定常層流を取り扱い、伝熱促進の基本的機構について述べる。第3章では流れ中に周期性の強い時間変化が発生することによる伝熱促進を取り扱う。この種の伝熱促進は、遷移流の熱伝達、あるいは他の物体の後流中の渦列に曝される伝熱面における熱伝達が、定常層流下のそれより良好であることから良く知られているが、これまでその伝熱機構についての検討は不十分であった。第3章では、著者らの最近の研究成果に基づいて、この点について考察を行う。第4章では乱流熱伝達の伝熱促進機構について触れるが、そこでは研究者の注目が集中しがちな典型的な壁乱流だけでなく複雑乱流に視野を広げた包括的な乱流構造の研究が必要であること、また非定常乱流についての検討も重要であることを指摘する。

2. 流れの定常性を保つ伝熱促進

流体温度の壁面温度勾配を大きくするためには (1) 温度境界層を薄くする、(2) 温度分布の形状を変える、の2種類が考えられ、それを達成する手段としては (I) コンパクト形熱交換器用フィンで見られる境界層更新効果を用いる方法のように、伝熱面の幾何形状を変更して薄

い境界層で覆われる部分の割合を大きくする方法、あるいは伝熱面近傍に新鮮な冷たい流体を接近させる、または伝熱面近傍から高温流体を吸い出して伝熱面の過熱を妨げることを通じて、境界層を薄く保つとともに温度分布の形状をも変える手法、が考えられる。後者の例として、(II) 衝突噴流、(III) 縦渦を利用する方法、等がある。以下、それぞれについて少し具体的に記述する。

熱交換器の伝熱性能の向上をねらって、種々のフィン形式が使用されているが、その基本は、伝熱面の幾何形状を変えることによって境界層更新効果のより有効な利用^{(4)・(5)}を図ることにあり、この効果の重要性については良く知られている。しかし、その有効利用のために何に留意すべきかについての議論は必ずしも十分でないように思われる。そこで、本節では図1に示した2次元フィンモデルを対象として、境界層更新効果の重要性と同時に、その有効利用に影響を与える他の因子の影響について触れる。

図2は、オフセットフィン(図1のOフィン)に対する計算結果の1例で、対象とした5段フィン列内の各段フィン(オフセット長がL)における局所ヌセルト数の分布(曲線C)を、全高が同一(すなわち5L)の1枚フィンに対する結果(曲線D)と比較したものである⁽⁶⁾。境界層が更新される各フィンの前縁位置($x/L = 0.0, 1.0, 2.0, 3.0, 4.0$)でヌセルト数が高くなっており、その分だけ全高にわたる平均ヌセルト数を押し上げることに繋がる。したがって境界層更新効果の利用は有効である。

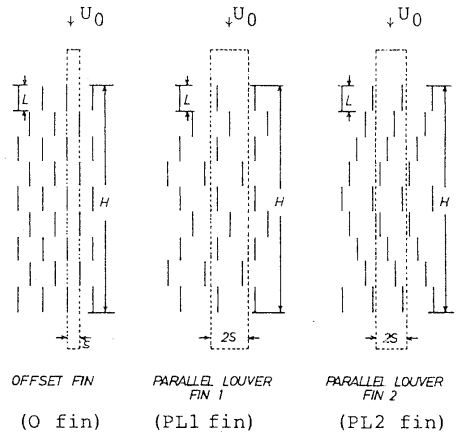


図1 2次元フィン列モデル

図3は、図1中の3種類のフィンモデルそれぞれに対して、全高Hを一定に保ちつつ、その間の分割回数(すなわち各フィンのオフセット長L)を変更して、境界層更新回数を変えた場合の、系全体の平均ヌセルト数を比べた図である⁽⁷⁾。

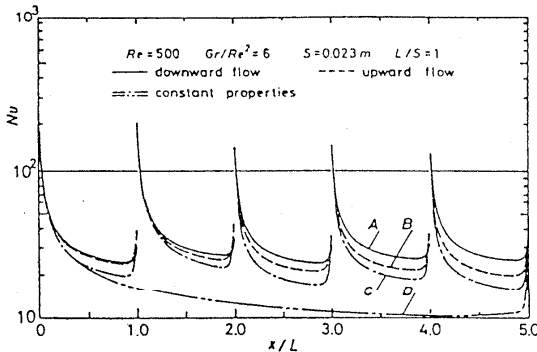


図2 各段フィンの局所ヌセルト数分布

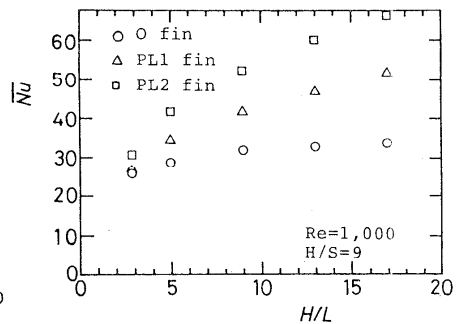


図3 フィン系全体の伝熱特性

図から、境界層更新回数 (H/L) を増すと、いずれのフィン系でも伝熱特性が向上することが確かめられる。したがって、確かに境界層を更新する回数を増せば、より有効なフィン系の伝熱促進が図れることが明白である。しかし同時に、図3では同一の境界層更新回数においても、異なる様式のフィン系の間では伝熱特性がかなり異なることが認められ、境界層更新効果の有効利用に重要な影響を与える他の因子があることが示唆される。

境界層更新効果の有効度に影響を与える諸因子の一つに後流未回復効果がある。この効果は、各フィンに接近する流れ中に上流側In-line フィン（上流段フィン）によってもたらされる速度欠損や過剰温度がどの程度残っているかによって、フィン前縁への接近流の実効レイノルズ数や、接近流とフィン面の温度差が異なり、そのことによりヌセルト数の低下分（後流未回復効果）が影響を受けることによるもので、最適フィン形状を検討する際の第一のガイドラインとなる重要な因子である⁽⁷⁾。すなわちPL1、PL2フィンでは、上流段フィンとの間隙（フィン後流長）がオフセット長さ L より大きい $3L$ もしくは $5L$ となっているフィンがあり、それらのフィンでは前縁に至るまでに上流段フィンに基づく速度欠損、過剰温度が殆ど回復し切るため、後流未回復効果によるヌセルト数の低下が小さく、その分ヌセルト数が高くなる。図3に見られる3種類のフィンの伝熱特性の差異は、主としてこの後流未回復効果の違いに起因しており、とくにオフセット長が短いほどその影響が顕著であるので、細線フィンやピンフィンでは、この効果に十分留意した設計が必要である。

フィン厚さの影響^{(8),(9)}をも考慮に入れると、定常流の範囲に限ってもフィン系の伝熱特性はより複雑になり、それを数種類の因子の複合効果として捉える必要が生じる。それらの因子の中で、最も大きな影響を及ぼすのは、フィン系内で生じる流れの蛇行であり、その発生によって伝熱特性は不良になる。この流れの蛇行はフィン厚さが大きく、フィンピッチが小さいほど、より顕著に現れる。境界層更新効果を有効に利用するには、これらのマイナス効果につながる諸因子の影響を低減できるフィン形状を選択することが必要である。鳥越ら⁽⁵⁾らによって展望されているように、熱交換器の開発動向として細径管を用いる方向にあるので、フィン間流れが定常を保つ範囲での使用状況が増しており、定常流下のフィン系の伝熱特性についての検討は今後とも重要である。従来の検討は2次元取扱いに依拠したものであるが、実際の熱交換器用フィンはその幾何形状や管の配置に基づく3次元性の影響を強く受けるので、今後はその影響を考慮に入れた検討が望まれる。

つぎに衝突噴流熱伝達について考えよう。衝突噴流では、噴流は伝熱面に向かって吹き出される。伝熱面に向かう速度成分は、伝熱面上に形成される温度不均層（簡単のため温度境界層）の厚さの増大を抑制し、また温度境界層内の温度分布に影響を与えるから、流れが層流であっても衝突噴流の熱伝達は良好である。この原理は噴流レイノルズ数が増大して、流れが非定常化しても、さらに乱流化しても同様に成立するので、レイノルズ数の如何にかかわらず噴流衝突面の熱伝達は良好であり、このため、有効な伝熱促進法として多方面で使用されている。

これまでの研究例では、電子機器モジュールの冷却を目的とする1mmあるいはそれ以下の直径の細孔ノズルからの液体衝突噴流熱伝達の研究もあるものの、一般にレイノルズ数の比較的大きな場合の実験例⁽¹⁰⁾が多い。しかし、医用工学等での応用と関連して、今後は小さな装置に利用できる伝熱促進が重要性を増すものと考えられるので、小寸法ノズルから噴出される衝突噴流熱伝達等も重要であり、流れが定常層流⁽¹¹⁾から非定常化し始めるレイノルズ数領域の研究が望まれる。また、従来は単一ノズルから吹き出される衝突噴流熱伝達が基礎系として多く取り扱われているが、實際上重要な多孔ノズル噴流、斜交噴流や、クロスフロー⁽¹¹⁾を伴う噴流の衝突面における熱伝達についての研究は、未だ十分とは言えず、今後の研究が待たれる。

最後に縦渦を用いる伝熱促進について触れる。壁近傍の縦渦については、それが浮力を受ける水平チャンネル流や曲率を持つ固体面に沿う流れで発生し易いことや、それを利用した境界層制御技術⁽¹²⁾とも関連するため、古くから多数の検討があるが、縦渦の導入は伝熱促進上も重要である。平板に設置した3角翼を用いて縦渦を発生させ、層流境界層熱伝達を促進する研究が鳥居ら⁽¹³⁾⁻⁽¹⁶⁾によって行われ、その有効性が示されている。Torii ら⁽¹⁶⁾によると、吹き下ろし流れによって伝熱面に温度境界層が押し付けられて薄くなるのが主要な伝熱促進機構であると結論されている。これは、基本的には衝突噴流による伝熱促進機構と同じ原理に基づくものであるが、縦渦はかなりの距離にわたって存続するので、より大きな領域における伝熱促進に適している。また例えばLiu-Sabry⁽¹⁷⁾はゲルトラー渦による伝熱促進の有効性を指摘しているが、その機構は発達するきのこ状の縦渦によって、高温流体が境界層の外方に吸い出されることにあるようで、前記のTorii らの取り扱った縦渦の場合とは異なっている。しかし、この手法は伝熱面の加工等を必要としないから、縦渦の発生、制御が容易であるならば、実際応用上も有望であると考えられる。

なお、電気流体力学的に発生する噴流⁽¹⁸⁾、イオン風⁽¹⁹⁾や2次流⁽²⁰⁾による伝熱促進は、発生方法から見ると先の例とは全く異なるけれども、機構上はこの章で述べた内容と類似のものと言える。

3. 流れの非定常化による伝熱促進

流れの非定常化による伝熱促進を、インタークーラー用のインナーフィンに実際に応用した研究例⁽²¹⁾が平松らによって報告されている。また、排熱エネルギーの回収用熱交換器等では、流体が保有する熱量の回収率を向上すること、言い替えばJ因子あるいは Stanton 数を高く保つことが必要であり、したがってなるべく低いレイノルズ数において作動させることが基本となるが、それだけでは回収熱量が低減してしまうので、それを補うために伝熱促進を図ることが望まれる。この目的に合致する一つの方法として、流れの非定常化による伝熱促進が考えられる。流れが非定常化して周期変化を伴うようになると伝熱特性が向上することは以前から知られているが、その機構については明確な知見が無かった。著者らは最近、数種の異なる

流れ系での流れの非定常化に伴う伝熱促進について検討を行って、いずれにも共通する機構が存在していることを見だしており、それは次章で述べる乱流伝熱の促進とも関連があるようなので、その一部をここで紹介する。

レイノルズ数が $Re = 1,000$ 程度の平行平板間の流れは、そのままでは定常であるが、角柱を挿入すると入口流れが定常であっても角柱下流域ではカルマン渦の発生によって流れは非定常化する。この種の非定常流は、物体の挿入方式によって発生する非定常流の様式が相違したり、あるいは発生するカルマン渦が交差運動をする⁽²²⁾等、流動の面で興味深い点が多いが、以下では平板面の伝熱促進機構^{(23)・(24)}に絞って、その概略を述べる。

図4は、 $Re = 1,000$ の場合の角柱を挿入した場合と、それを挿入しない場合の平行平板面上の時間平均局所ヌセルト数の分布を示したもので、 $x/H = 1.6$ 付近に認められるピークは流れが非定常化して流体混合が促進されるために生じる伝熱促進の表れである。すなわち、角柱下流域では速度変動の2次相関(乱流におけるレイノルズ応力)⁽²⁵⁾、速度変動-温度変動2次相関(乱流における乱流熱流束)⁽²³⁾等がゼロでない値をとり、流れ中の運動量輸送や熱輸送が促進されるためである。このことを、流れの瞬間構造の時間変化と関連づけて考えると、次のようである。

図5に、ある瞬間の局所ヌセルト数分布を示した。また図6に、図5と同じ時刻における流れ場の計算結果を、断面内の平均流速で移動する観察者から見た流れ線図として示した。陰影部は渦度が正(惹起される回転運動が反時計方向)、非陰影部は渦度が負(惹起される回転運動が時計方向)の領域に対応する。↑印で示した瞬間ヌセルト数のピーク位置は、閉じた流れ線のほぼ下部に相当している。この流れ線は、その位置に存在する強い渦(孤立渦)によって惹起される時計方向に回転する流体運動に対応している。この流体運動は、下流域から冷たい流体を巻き込んで、その下部の平板面の近傍に供給する役割(洗濯効果)を果たしており、その位置の瞬間局所ヌセルト数を増大させ、その結果として時間平均ヌセルト数の向上に寄与している。なお、この洗濯効果にはもう

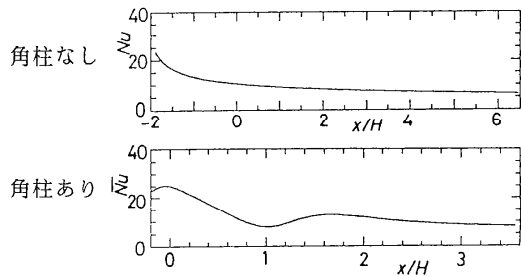


図4 時間平均局所ヌセルト数分布

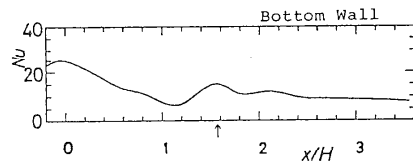


図5 瞬間局所ヌセルト数分布

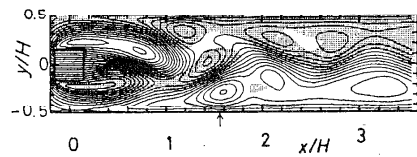


図6 平均速度で移動する観察者から見た流れ線図

ひとつの興味深い点がある。それは、下流域からの流体の巻き込みによって、閉じた流線下部の平板面近傍の流速が低下するので、その位置の摩擦係数が低下する⁽²⁴⁾点である。すなわち、そのことによって次章の乱流伝熱でも注目する運動量輸送と熱輸送の非相似性が発現されることになる。

コンパクト形熱交換器用フィンのJ因子は、低レイノルズ数域では

$$J \sim Re^{-1/2} \quad (1)$$

に従うが、フィン厚レイノルズ数が100程度以上になると、その値は式(1)より上方にシフトし始める。その具体例として、図7(a)中に図示した3段タンデムフィン列の2段目フィンのJ因子の計算値を図7(b)に示した。フィン厚さの小さな場合の結果に対して、フィン厚さが大きな場合の結果は、あるレイノルズ数以上で上方にシフトすることが確かめられる。この上方へのシフトは、初段フィンの後流が不安定化することによって得られる2段目フィンの伝熱促進に起因する。いま、図7(b)中にプロットした1例(Re = 3,430、 $t/L = 0.126$ の場合)に対する数値解析結果⁽²⁶⁾、⁽²⁷⁾に注目する。図8は、ある瞬間の初段フィンの後流と2段目フィンまわりの流れ場を、変動速度のベクトル線図として示したもので、この図から初段フィンの後流の不安定化により後流内部はもちろん、2段目フィンまわりにおいても顕著な速度変動が存在していることがわかる。このため、前節

の例と同様に速度変動の2次相関および速度-温度変動2次相関はゼロでない値をとることになり、混合が促進されて2段目フィンの伝熱促進が生じる。混合促進の具体的な機構の主要なものとして次の二つが挙げられる。その一つは、図8(a)を見ると分かるように、初段フィンの後流では、その後半部でまず隣接渦どうしが互いに逆回転する一列の渦列が発生し、さらにそ

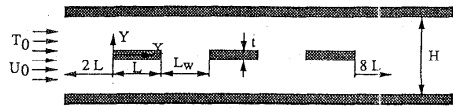


図7(a) 3段タンデムフィン列モデル

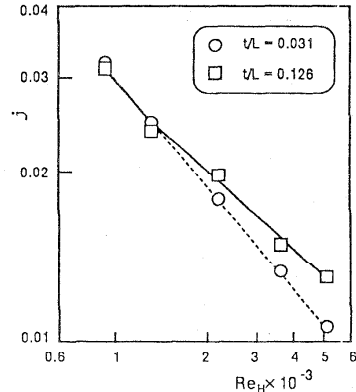


図7(b) j因子のレイノルズ数への依存性

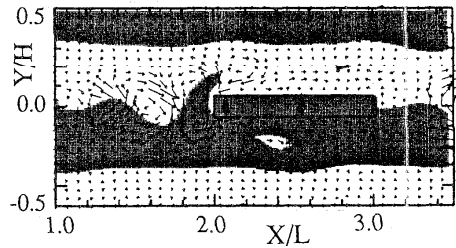


図8(a) フィンまわりの変動速度場と等温度線図

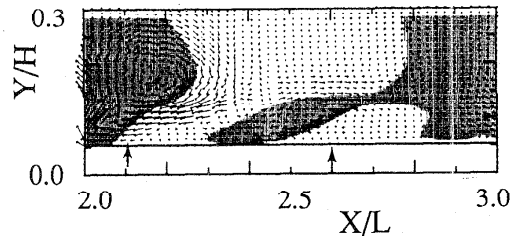


図8(b) 変動速度場(拡大図)と変動温度場

れが2列の渦列へと発展する過程をたどるが、この渦列は間欠的に後流内中央部の低速、高温流体を後流の外方へ排出し、また主流の高速、低温流体を後流内部に巻き込む作用をし、後流内の速度欠損と過剰温度の迅速な回復をもたらす。このため、接近流の有効レイノルズ数が増大し、また接近流とフィン面との温度差が拡大し、2段目フィンの伝熱促進が生じる。二つめの機構は、拡大図である図8(b)に認められるように、初段フィン後流内の渦列が2段目フィンに衝突すると、フィンの上下両面の近傍に、前節で述べた孤立渦と類似の渦が次々と形成され、それらの渦が下流側から冷たい流体を巻き込み、その上流側で温度上昇した流体を外部に排出し、フィン面への洗濯効果とフィン面の温度上昇を妨げる役割を果たすことによるものである。なお、この場合にもこの孤立渦は先の場合と同じく運動量輸送と熱輸送の非相似性を発現する。

著者らは、電子機器モジュールの空冷問題の基礎例として、図9のように平行平板の一方の流路壁に2個のリブを取り付けた2次元系を取り上げて、数値解析を行っている⁽²⁸⁾。この流れ系では、レイノルズ数が臨界値以上になると、第1リブ前縁からの剥離層が不安定化し、それはある空間的ピッチ毎に渦に巻き込まれて第2リブに到達することになるが、この渦はやはり以上述べた孤立渦と類似の効果を及ぼすして第2リブの前面及び上面の伝熱促進を惹起する。以上の例では、いずれの場合にも周期的に形成される渦が伝熱促進に有効性を発揮している。そのことからすると、これと類似の渦を人工的に作り、それを周期的に伝熱面近傍に供給することが出来れば、低レイノルズ数のもとでも有効な伝熱促進が実現できるのではないかと期待される。

流れの非定常化による伝熱促進の中には、以上の他に急拡大管⁽²⁹⁾や2次元管内噴流⁽³⁰⁾で見られるコアンダ効果に基づく流れの自励振動による伝熱促進、あるいは熱伝達が不良なステップ下流あるいは物体後方の循環流領域の熱伝達を、物体を挿入して流れを非定常化することにより促進した例⁽³¹⁾等が含まれる。また、衝突噴流熱伝達においても、流れの非定常化によってその良好な伝熱特性を一層向上させ得る可能性があり、またそのほか脈動流下の熱伝達はStirling冷凍機等への応用とも関連して重要な課題である。今後、非定常流下の熱伝達の研究が各方面で活発化することを期待したい。

なお、流れの制御に関する研究の中には、例えば物体後方の流れを安定化させてカルマン渦の発生を止めようとする研究もある⁽³²⁾。かかる研究は、一見本記事の内容と無関係のようであるが、かかる制御が、かなり広いレイノルズ数範囲で実現できるならば、例えばこれまで騒音レベルの観点から作動レイノルズ数の上限を低く抑えていた熱交換器等では、より高いレイノルズ数での運転が可能となり、間接的に伝熱促進の達成が可能となる点で実は無関係とは言え

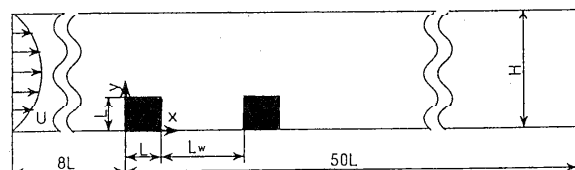


図9 リブを付設した平行平板間流路モデル

ないものである。

4. 乱流制御による伝熱促進

壁乱流は、2種類の間欠構造によって特徴付けられる。その一つは、壁のごく近傍で認められるバースティング現象であり、もう一つは大規模渦構造と関連するものである。後者は十分に発達した内部流では存在しないが、外部流において境界層の外端部で特徴的に見られ、前者は全ての壁乱流で認められる。大規模渦構造は、主流中の低温流体を壁近傍に巻き込む作用を通じて熱輸送を促進し、またバースティング現象も、スweepや壁向きインタラクション運動が低温流体を壁近傍にもたらす作用を果たし、エジェクションや外向きインタラクション運動が壁近傍の高温流体を外部に排出する作用を果して、やはり熱輸送を促進している。したがって、乱流熱伝達はかなり良好であり、それをさらに促進することは容易ではない。しかし、その重要性を鑑みてこれまで多くの試みがなされているので、その数例を紹介する。

乱流熱伝達の促進を図る最も古典的な方法は、乱れ強度の増大を図る手法である。この手法は、各種の乱流において速度-温度相関係数が比較的類似した値をとるとの仮定にたって、速度変動を大きくすることが出来れば乱流熱流束を増大させることが出来て、その結果として伝熱促進が図れるとする考えに基づいている。この考えは単純で、理解しやすく、乱流伝熱機構の検討にあたって最も基本的な概念として使用されている。事実、主流乱れ⁽³³⁾や噴流乱れ⁽³⁴⁾等によって伝熱増進が達成できる事実、また管内噴流熱伝達において壁近傍乱れの強度が大きい循環流域内で熱伝達率が最大値をとる事実^{(35), (36)}や、吹き出しを伴う乱流境界層⁽³⁷⁾や後に述べるLEBU板を挿入した乱流境界層⁽⁴⁷⁾における熱伝達率の低減等が壁近傍の乱れ強度と関連付けられる事実等、この概念と対応する現象は少なくない。しかし、これはあくまで乱流熱輸送機構の概略を説明するための概念であって、有効な伝熱促進法の開発のためには、もっと基本的な乱流輸送機構の把握が必要と考えられる。まず、その理由について述べる。

乱流中に物体を挿入すると、やはり乱れ強度を高めることが出来る。かかる物体を乱流プロモーターと呼んでいる。しかし、例えば乱流境界層内に円柱を挿入して伝熱促進を図った研究例^{(38), (39)}によると、実際の伝熱促進機構はもう少し複雑である。すなわち、円柱の挿入によって壁近傍の間欠現象であるバースティング現象が影響を受けて、その特性の一部が変わってしまう。例えば、その結果インタラクション運動が選択的に増強される。このことは、結果として伝熱促進と同時に壁への運動量輸送の抑制をもたらす、熱伝達率の向上と同時に摩擦係数の低下をもたらす。いわゆる運動量輸送と熱輸送の非相似性が、この特性の変化により発現する^{(40), (41)}。したがって、単に乱れ強度の増大のみを伝熱促進の目安とすることは適切ではない。

乱流熱伝達を渦発生体の設置によって促進する研究が多くの研究者によって行われている。例えば、熱伝達とその促進機構、それと関連する乱流構造等について、EibeckとEaton⁽⁴²⁾、

PauleyとEaton⁽⁴³⁾、ShizawaとEaton⁽⁴⁴⁾、あるいはWroblewskiとEibeck⁽⁴⁵⁾らが検討しており、また同様の手法による管-プレートフィン系熱伝達の促進例がFiebigら⁽⁴⁶⁾によって報告されている。これらの研究は乱流熱伝達においても縦渦による伝熱促進が有効であることを示

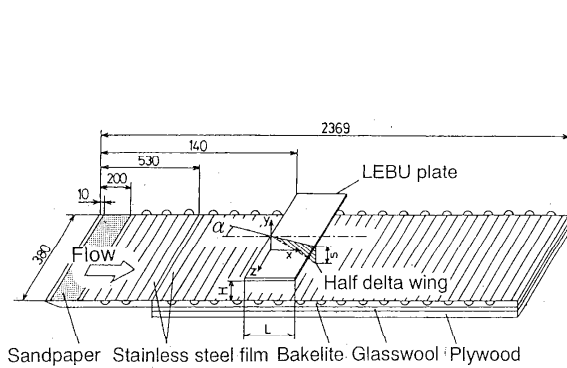


図10 渦発生体とLEBU板を設置した平板乱流境界層

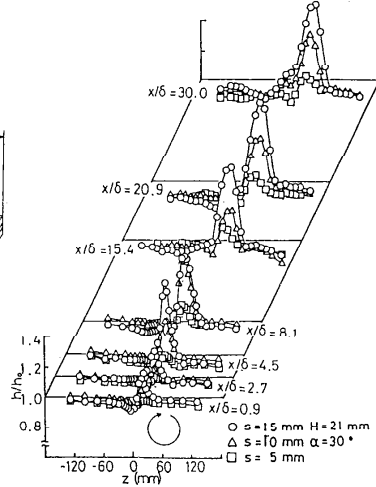


図11 局所熱伝達率分布

している。

運動量輸送と熱輸送の非相似性は、より良好な伝熱特性を、より小さな圧力損失のもとで達成できる可能性を示唆しており、実際応用上重要な現象である。しかし、円柱は形状抗力が大きく、それによる運動量損失が小さくないため、実際の応用上の挿入物体として最適ではない。このため、稲岡ら^{(47)・(48)}は挿入物体形状の最適化の一貫として、乱流境界層やダクト内流れに種々の物体を挿入して伝熱特性や乱れ特性を調べている。文献(48)では、渦発生体を伝熱面に設置する代わりに、それをさらに図10に示したように摩擦係数低減の目的で流れ中に挿入したLEBU板⁽⁴⁷⁾に取り付ける場合について、熱伝達実験が行われており、縦渦の伝熱促進効果がLEBU板によって減じられることは無いと結論されている。図11は、その際の熱伝達率の測定値(物体を挿入しない場合の値との比)の分布例を示しており、広い範囲で伝熱促進が達成できることが確かめられる。これらの諸研究では、渦の発生によって乱れ強度の変化は生じるものの、それが伝熱促進の主因ではなく、むしろ先の層流の場合と同じく縦渦により伝熱面に向う吹き下ろし流が作られ、それによって主流部から低温流体が伝熱面近傍にもたらされることが伝熱促進の主要機構とされている。

運動量輸送と熱輸送の非相似性に関連し、かつ前述の縦渦にも関連があるものとして、ライフル管の熱伝達がある。流体工学分野では、壁面摩擦係数の低減法の一つとして、固体面に流れに沿ってV形もしくはU形の縦溝(リブレット)を使用することが提唱されている⁽⁴⁹⁾。ライフル管は、この形状の伝熱面を管内流の熱伝達に応用したものと見なすことも出来る。リブレットでは、縦溝内部には2次流が形成される⁽⁵⁰⁾と言われている。この2次流は、長さスケールで見ると小規模であるが、流体のプラントル数が1より大きな流体では、熱伝達の増進

に有効であると考えられ、乱流輸送現象の非相似性が発現できる可能性⁽⁵¹⁾があり、検討を行うことは有意義であろう。なお、この点と関連がある伝熱促進法としては、伝熱面を粗面にする、伝熱面にリブを付す、あるいはリボン等を挿入する等の方法があり、古くから多数の検討があるが、それらについては、例えば文献(52)等に譲る。

以上の数例でわかるように、乱流伝熱の有効な促進法の究明のためには、乱れ強度の増大のみを手がかりにする考え方は単純すぎる。今後は、研究者の目が向いがちな比較的単純な乱流系だけでなく、より多くの形式の複雑乱流にも目を向けて、それらを包括できる乱流輸送機構を把握することが必要である。また、上に述べた乱流輸送機構の非相似性は円柱下流域におけるカルマン渦の存在と無関係ではなさそうであり、非定常乱流についての研究、とくに壁乱流と物体後方の渦列の干渉に関する研究が重要な意義を持つのではないかと推定される。

最後に、乱流噴流衝突面の熱伝達について触れる。この熱伝達は、第2章で述べた原理によってかなり良好であるが、さらに良好な伝熱性能が必要な場合もある。たとえば、ガスタービンでは熱効率の向上のため入口ガス温度の上昇が緊要であるが、そのためにはタービン翼のより良好な冷却技術の開発が必要であり、その一つである翼内面からの冷却においては、特に熱的に過酷な翼前縁部で衝突噴流熱伝達が使用されており、その伝熱性能の向上は重要である。したがって、衝突噴流熱伝達のさらなる促進⁽⁵³⁾の可能性を開くことは大変重要である。また、乱流衝突噴流熱伝達自体の伝熱機構についても、渦対の発生が重要とする考え方⁽⁵⁴⁾がある一方で、壁面近傍の流体の更新に注目して、壁近傍流れの非定常性を強調する考え方^{(55)・(56)}も提唱されていて、いまだ知見が定まったとは言い難く、やはり今後の検討がまたれる。

5. 結言

本稿では、伝熱面近傍流れの制御方式を流れの定常、非定常に注目して3種類に区分し、定常流下の伝熱促進、流れの非定常化による伝熱促進、乱流制御による伝熱促進のそれぞれについて、対流熱伝達の伝熱促進機構の概説を行った。とくに、流れの非定常下に伴う伝熱促進においては洗濯作用を及ぼす孤立渦の働きが重要であること、乱流伝熱の促進においては乱れ強度のみに注目する概念は単純に過ぎることを指摘し、また非定常流熱伝達の研究が活発に行われることの必要性、種々の形式の複雑乱流を包括する乱流構造の研究の重要性、輸送現象の非相似性から見た非定常流熱伝達と乱流伝熱の共通性、ならびに強い周期性を示すカルマン渦と壁近傍流れの干渉についての研究の意義等について、著者らの経験に基づいて述べた。

文献

- (1) Bergles, A. E., 1988, Some Perspectives on Enhanced Heat Transfer - Second Generation Heat Transfer Technology, J. Heat Transfer, Vol. 110, pp.1082-1096.
- (2) Incropera, F. P., 1988, Convection Heat Transfer in Electronic Equipment Cooling,

J. Heat Transfer, Vol.110, pp.1097-1111.

- (3) 相原利雄、1991、伝熱制御の現状と将来(1) - (4)、機械の研究、第43巻、第 6号、pp.641-648、第 7号、pp.771-776、第 8号、pp.869-876、第 9号、pp.979-986。
- (4) 棚沢一郎、1986、高性能対流熱交換技術、エネルギー・資源、Vol. 7, No. 4, pp.38-43.
- (5) 鳥越邦和、川端克宏、川添政宣、1989、熱交換器における対流伝熱促進、伝熱研究、Vol. 28, No.108, pp.40-53.
- (6) Suzuki. K., Hirai. E., Sato. T. and Kieda. S., 1982. Numerical Study of Heat Transfer System with Staggered Array of Vertical Flat Plates Used at Low Reynolds Number, Heat Transfer 1982, Vol. 3, pp.483-488.
- (7) 鈴木健二郎、林哲郎、Schuerger, M. J., 西原淳夫、林政克、1989、平行ルーバフィンの伝熱特性に関する基礎的研究、日本機械学会論文集 B編、55 - 516, pp.2457-2464.
- (8) 喜冠南、萩原良道、兼田哲男、鈴木健二郎、1991、フィン列の流動・伝熱特性に及ぼすフィン厚さの影響(低レイノルズ数域におけるオフセットフィンの場合)、日本機械学会論文集 B編、57 - 542, pp.3469-3475.
- (9) 喜冠南、鈴木健二郎、萩原良道、1991、フィン列の流動・伝熱特性に及ぼすフィン厚さの影響(低レイノルズ数域における平行ルーバフィンの場合)、日本機械学会論文集 B編、57 - 542, pp.3476-3482.
- (10) 伝熱工学資料、1986、改訂第4版、日本機械学会、pp.65-67。
- (11) Al-Sanea, S., 1992, A Numerical Study of the Flow and Heat Transfer Characteristics of an Impinging Laminar Slot jet Including Cross Flow Effects, Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 35, No. 10, pp.2501-2513.
- (12) 中村育雄、大阪英雄、櫛田武広、大窪範夫、1987、縦渦列と乱流境界層の干渉に関する研究、日本機械学会論文集 B編、53-492, pp.2340-2347.
- (13) 柳原・ジュンヂェイ・一蔵、鳥居薫、1990、渦発生体による平板層流境界層熱伝達の促進、日本機械学会論文集 B編、56-530, pp.3045-3049.
- (14) Torii, K. and Yanagihara, J.L., 1989, The Effects of Longitudinal Vortices on Heat Transfer of Laminar Boundary Layers, JSME International Journal, Series II, Vol. 32, pp.395-402.
- (15) Yanagihara, J.L. and Torii, K., 1990, Heat Transfer Characteristics of Laminar Boundary Layers in the Presence of Vortex Generators, Heat Transfer 1990, ed. by B. Hetsroni et al., Vol. 6, pp.323-328, Hemisphere.
- (16) Torii, K., Yanagihara, J.L. and Nagai, Y., 1991, Heat Transfer Enhancement by Vortex Generators, Proc. ASME/JSME Thermal Engineering Joint conference 1991, Vol. 3, pp.77-83.
- (17) Liu, J.T.C and Sabry, A.S., 1991, Concentration and Heat Transfer in Nonlinear

- Gortler Vortex Flow and the Analogy with Longitudinal Momentum Transfer, Proc. Royal Soc. A, 432, pp.1 - 12.
- (18) Yabe, A and Maki, H., 1988, Augmentation of Convective and boiling Heat Transfer by Applying an Electronic-hydrodynamical Liquid Jet, Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 31, No. 2, pp.407-417.
- (19) 栗山雅文、原田英二、今野宏卓、コロナ風による水平円管列からの伝熱促進、化学工学論文集 Vol. 13, No. 4, pp.429-434.
- (20) Yabe, A., Mori, Y. and Hijikata, K., Heat Transfer Augmentation around a Downward Facing Flat Plate by Non-uniform Electric Fields, 6th Int. Heat Transfer Conference, ed. by Rogers, J.T., vol. 3, pp.171-176, Hemisphere.
- (21) 平松道雄、石丸典生、大河内隆樹、1991、インタクーラ用インナフィンの数値解析、日本機械学会論文集 B編、57-539、pp.2342-2348.
- (22) Suzuki, H., Inoue, Y., Nishimura, T., Fukutani, K. and Suzuki, K., 1992, Unsteady Flow in a Channel Obstructed by a Square Rod, Int. J. Heat and Fluid Flow, (in publication)
- (23) 鈴木洋、鈴木健二郎、井上義章、萩原良道、1991、角柱の挿入により非定常化した平行平板間流れと熱伝達（第3報）、日本機械学会論文集 B編、57-536、pp.1403-1409.
- (24) Suzuki, K. and Suzuki, H., 1993, Annual Review of Heat Transfer, ed. C.L. Tien, to be published.
- (25) 鈴木洋、井上義章、鈴木健二郎、1991、角柱の挿入により非定常化した平行平板間流れと熱伝達（第2報）、日本機械学会論文集 B編、57-536、pp.1398-1402.
- (26) 喜冠南、二神俊蔵、萩原良道、鈴木健二郎、中間レイノルズ数域におけるフィン列の流動・伝熱特性（第1報）、日本機械学会論文集 B編、（掲載予定）or第29回日本伝熱シンポジウム講演論文集、pp.43-44.
- (27) 喜冠南、二神俊蔵、萩原良道、鈴木健二郎、中間レイノルズ数域におけるフィン列の流動・伝熱特性（第2報）、日本機械学会論文集 B編、（掲載予定）or Proc. 2nd JSME-KSME Thermal Engineering Conference, Vol2, pp79-84.
- (28) Treidler, B., Suzuki, K., Suzuki, H. and Nishihara, A., 1992, Fluid flow and Heat Transfer in a Symmetric Sudden Expansion, US Nat. Heat Transfer Conference.
- (29) 村瀬道雄、村田良一、黒川幸清、鈴木健二郎、佐藤俊、1973、ダクト内2次元噴流の壁面からの物質伝達について、第10回日本伝熱シンポジウム講演論文集、pp.201-204.
- (30) 前洋介、Burke Treidler、鈴木洋、鈴木健二郎、1992、リップ付ダクト内流れの流動・伝熱特性に関する研究、第29回日本伝熱シンポジウム講演論文集、pp.26-27.
- (31) 鈴木洋、鈴木健二郎、喜多茂雄、中前隆行、後向きステップ流の熱伝達不良域における伝熱促進、日本機械学会論文集 B編、57-536、pp.1410-1415.

- (32) Strykowski, P.J. and Sreenivasan, K.R., 1990, On the Formation and Suppression of Vortex 'Shedding' at Low Reynolds Numbers, J. Fluid Mechanics, Vol. 218, pp. 71-107.
- (33) Baskaran, V., Abdellatif and Bradshaw, P., 1989, Effects of Free-Stream Turbulence on Turbulent Boundary Layers with Convective Heat Transfer, Proc. 7th Symp. on Turbulent Shear Flows, pp. 20.1.1~20.1.6.
- (34) Maciejewski, P.K. and Moffat, R.J., 1989, Effects of Very High Turbulence on Heat Transfer, Proc. 7th Symp. on Turbulent Shear Flows, pp. 20.3.1~20.3.6.
- (35) Kang, Y., Suzuki, K. and Sato, T., 1978, Convective Heat Transfer in an Axisymmetric Confined Jet, Studies in Heat Transfer, ed. T.F. Irvine et al., pp. 103-125.
- (36) 鈴木健二郎、須賀一彦、押川祐士、李忠求、1987、循環流を伴う乱流に対する実験と数値解析、日本機械学会論文集 B編、53-496、pp. 3639-3647.
- (37) Senda, M., Suzuki, K. and Sato, T., 1980, Turbulence Structure Related to the Heat Transfer in a Turbulent Boundary Layer with Injection, Turbulent Shear Flows II, ed. L.J.S. Bradbury et al., pp. 143-157, Springer.
- (38) Marumo, E., Suzuki, K. and Sato, T., 1985, Turbulent Heat Transfer in a Flat Plate Boundary Layer Disturbed by a Cylinder, Int. J. Heat and Fluid Flow, 6-4, pp. 241-248.
- (39) Suzuki, K., Suzuki, H., Kikkawa, Y., Kigawa, H. and Kawaguchi, Y., 1991, Heat Transfer and Skin Friction of a Flat Plate Turbulent Boundary Layer Disturbed by a Cylinder, Turbulent Shear Flows VII, ed. F. Durst et al., pp. 119-135, Springer.
- (40) Kawaguchi, Y., Matsumori, Y. and Suzuki, K., 1984, Structural Study of Momentum and Heat Transfer in the Wall Region of a Disturbed Turbulent Boundary Layer. Proc. 9th Biennial Symposium on Turbulence, pp. 28.1~28.10.
- (41) Suzuki, H., Suzuki, K. and Sato, T., 1988, Dissimilarity between Heat and Momentum Transfer in a Turbulent Boundary Layer Disturbed by a Cylinder, Int. J. Heat Mass Transfer, 31-2, pp. 259-265.
- (42) Eibeck, P.A. and Eaton, J.K., 1986, The Effects of Longitudinal Vortices Embedded in a Turbulent Boundary Layer on Momentum and Thermal Transport, Heat Transfer 1986, ed. Tien, C.L. et al., pp. 1115-1120, Hemisphere.
- (43) Pauley, W.R. and Eaton, J.K., 1988, Experimental Study of the Development of Longitudinal Vortex Pairs Embedded in a Turbulent Boundary Layer, AIAA Journal, 26-7, pp. 816-823.
- (44) Shizawa, T. and Eaton, J.K., 1992, Turbulence Measurements for a Longitudinal

- Vortex Interacting with a Three-Dimensional Turbulent Boundary Layer, AIAA Journal, 30-1, pp.49-55.
- (45)Wroblewski, D.E. and Eibeck, P.A., 1992, Measurements of Turbulent Heat Transport in a Boundary layer with an Embedded Streamwise Vortex, Int. J. Heat Mass Transfer, 34-7, pp.1617-1631.
- (46)Fiebig, M., Mitra, N. and Dong, Y., 1990, Simultaneous Heat Transfer Enhancement and Flow Loss Reduction of Fin - Tubes, Heat Transfer 1990, ed. Hetsroni, G. et al., Vol.3, pp.51-55, Hemisphere.
- (47)稲岡恭二、木川弘、鈴木洋、鈴木健二郎、1991、LEBU板を挿入した乱流境界層における熱伝達、日本機械学会論文集 B編、57-537 pp.1734-1739.
- (48)稲岡恭二、鈴木一之、鈴木洋、萩原良道、鈴木健二郎、1992、LEBU板に付設した渦発生体による乱流伝熱促進、日本機械学会論文集 B編、58-551 pp.2241-2247.
- (49)Nguyen, V.D., Dickinson, J., Jean, Y., Chalifour, Y., Smaili, A., Page, A. and Paquet, F., Turbulent Boundary Layer over a Ribletted Surface with Tandem Manipulators Using Surface Drag Balances, Turbulence control by Passive Means, ed: E. Coustols, pp.79-96, Kluwer Academic Publishers.
- (50)Clark, D.G., 1990, Boundary Layer Flow Visualization Patterns on a Riblet Surface, Turbulence control by Passive Means, ed. E. Coustols, pp.79-96, Kluwer Academic Publishers.
- (51)Launder, B.E., Private Communication.
- (52)Bergles, A.E., 1981, Principles of Heat Transfer Augmentation. 1:Single-phase Heat Transfer, Heat Exchangers - Thermal-Hydraulics Fundamentals and Design, ed. Kakac, S. et al., pp.819-842, Hemisphere.
- (53)Kataoka, K., Hamano, S., Minamiura, K. and Li, G.Y., 1990, Local Control of Impinging Jet Heat Transfer by an Array of Circular Cylinders, Heat Transfer 1990, Vol.4, pp.203-208.
- (54)横堀誠一、笠木伸英、平田賢、1983、2次元衝突噴流よどみ領域における乱流輸送機構、日本機械学会論文集 B編、49-441、pp.1029-1037.
- (55)Kataoka, K., Suguro, M., Degawa, H., Maruo, K. and Mihata, I., 1987, The Effect of Surface Renewal due to Large-Scale Eddies on Jet Impingement Heat Transfer, Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 30, pp.559-567.
- (56)Yuan, T.D. and Liburdy, J.A., 1992, Application of a Surface Renewal Model to the Prediction of Heat Transfer in an Impinging Jet, Int. J. Heat Mass Transfer, Vol.35, No.8, pp.1905-1912.

密閉空間内自然対流研究の進展

尾添 紘之 (九大機能研) 岩本 光生 (九大機能研)

平野 博之 (九大総理工)

はじめに

自然対流の問題は工学の分野では当初は大空間内の鉛直加熱平板上の境界層流について取り扱われていた [A2, A4, A5]。密閉空間内 (又は閉領域内) の自然対流については、いつ頃から注目されたのかははっきり解らないが、Churchill [A1] によれば、化学反応を伴う水平円筒壁の一部加熱、一部冷却の問題に端を発し、その後、より簡単な二次元場対流を取り扱うということで長方形断面 (現在標準問題となっている対向する鉛直壁が加熱・冷却され、上下水平壁は断熱又は熱伝導) を取り上げる様になった。これは各種工業機器の冷却、建物内空気流、二重窓、等の問題の理想化した場合に相当し、1960年代以後、その研究報告が徐々に増加してきた。この問題は孤立鉛直平板上の自由対流の問題と異なり、境界層近似が成立しない為、モデル方程式は二次元場、三次元場の連立非線形偏微分方程式となり、本問題の研究の進展はデジタルコンピューターの一般的使用の程度と軌を共にしてきた。このような経緯とその後の研究の発展については、以下のいくつかの review paper (A1, A3) あるいは、4年毎の国際伝熱会議(IHTC)の Key note lecture [A6~A13] に詳しい。1986年においては、自然対流に関連する Key note lecture が4件もあり、研究者人口の増加が伺える。

さて、今回、伝熱研究に表記の題目でレビューを行なうようにとのことなので、この機会に1990年以降について、文献を少し集めてみた。我々の図書室にある限られた範囲の雑誌 (表1) の過去3年弱分 (1990, 1991, 1992年) から拾い出した。最後の J. Crystal Growth は、材料製造関連において、自然対流の存在が強く意識され、この問題が多く取り上げてあるからである。論文の内容の分布を表2に示す。自然対流は、幾何学的容器形状に従った流れ方を呈す場合が多いので、必然的に流路形状で分類せざるを得ないが、この中には外力の種類、相変化の有無、多孔質等の他

表1. 調査対象 学術誌名 (過去3年分)

- | | |
|--|---|
| 1. J. Heat Transfer (JHT) | 6. Warme und Stoffubertragung (WU) |
| 2. 日本機械学会論文集 (日機論) | 7. 化工論文集 (化工論) |
| 3. Int. J. Heat Mass Transfer (IJHMT) | 8. J. Chem. Eng. Japan (JCEJ) |
| 4. Numerical Heat Transfer, A, B (NHT) | 9. J. Crystal Growth (JCG) |
| 5. Int. Communications in Heat Mass Transfer (ICHMT) | 10. Experimental Thermal and Fluid Science (ETFS) |

表2. 文献分類と数分布	報文数	報文数
A. Review, Key note paper	13	J. 二重拡散 19
B. 外界とつながっている問題	54	K. 相変化を伴うもの 34
C. 主流に浮力流れが加わる場合	26	L. 多孔質層内 46
D. 標準問題 (立方体又は直方体容器)	30	M. チョクラルスキー法 (結晶成長関連) 20
E. しきり又は物体が入っているもの	27	N. ブリッジマン法 (結晶成長関連) 13
F. 各種形状容器 (円筒、球、不定形状)	23	O. 浮遊帯域法 (結晶成長関連) 11
G. サーモサイホン (ループ)	10	P. 化学蒸着 (CVD) 13
H. 液体金属関係 (電磁場、内部発熱)	18	Q. 遠心効果、モフォロジ、薄膜 15
I. 低Re数乱流モデル、計算法他	14	R. 表面張力流、低高重力場 18
		計 404

の因子を考慮した分類も併用した。本稿題目は密閉空間であるが、一応ここでは、物体まわりの自由対流他を含め、自然対流の全体像を概観したい。半開系 (又は自然換気) を含めた分類B, Cは何等かの形で外界に開いていて、他は基本的に閉領域である。物体まわりの境界層流れや、主流に伴う二次流れの問題は工業的応用、換気問題、電子機器冷却等の関連から依然として多く、BとCの分類で80報となる。密閉容器内の問題では細かく分類していくと、上記の様に分けられるが、相変化も含めるとDからKまでで175報となる。一般には、純粋に物理的な問題としてというよりも、工学の各種問題の本質的な部分を取り出して研究対象とした場合がほとんどと考えられ、従って広い分布を呈しているのも当然であり、今後共、研究対象として発展していくことが予測できる。その他、多孔質層関連46報で依然として多い。また、ここで特に結晶成長関連を取り上げたが、これも、90報ある。以下では上記分類のうち、D-Iについて個別の文献の極く簡単な紹介を試みる。

D. 水平流体層および直方体容器内

水平流体層を下方から加熱し、上方から冷却した場合の古典的ベナール問題で、流動形態の細分化の問題 (D1, D5)、低プラントル数流体のみかけの臨界レイリー数の上昇の問題 (D2)、D3は水平加熱面上に大きな断熱物体がある問題の数値解。D4は3次元インターフェロメータによるロールの測定、D6はマッハツェンダー干渉計による測定が報告された。

直方体容器内流体を側壁から加熱、冷却する標準問題について。D7は立方体内高プラントル数流体の数値実験、D8は側壁からの熱損失を考慮した数値計算で実験結果との比較をする上で指針となる、D9は背の高い薄い流体層内の多セル構造の生成と消滅の2次元計算、D10は同様の系で一つのセルの中の流れに注目した流れの可視化、D11は正方形断面の隣接壁が加熱冷却される2次元流、D12は立方体容器標準問題の高速計算機による精密解と可視化、D13は狭くかつ背の低い流体層を下方加熱、上方冷却した場合、D14は直方体内の流れの軌跡、写真。D15は対向壁より一様熱流束加熱した場合。

次に直方体容器内の過渡解や過渡特性に注目したものを示す。D16はGSMAC法のテスト対象

として正方形断面内の2次元対流を $Ra=10^8$ まで計算したものの。3次元解を前記D12の結果と比較されることが望まれる。D17は二次元解、D18は食品加熱の問題で、缶の中の非ニュートン流体の過渡対流。D19は $Ra=5 \times 10^9$ までの二次元解で、境界層流れの波打ち現象が乱流への遷移を導くとしており興味深い。今後このような振動流の解析が増加することが期待される。D20はD12の過渡特性。D21はR114を用いたミニモデルと実寸の空気の入った部屋での実験を行ないR114で過渡特性がモデル化できるとしている。D22は蓄熱を想定した断熱容器の鉛直壁からの非定常加熱の二次元解を与えている。D23は断面のアスペクト比効果の検討。D24は建物や電子機器冷却を想定して、正方形断面内2次元流の1つの鉛直壁温度を周期的に変動させた問題だが $Ra=1.4 \times 10^5$ に限られている。D25は水とグリセリンの混合液($Pr=13\sim 234$)を用いて、 $Ra=3.4 \times 10^8$ まででステップ壁加熱・冷却した後の過渡測定で、D19の結果の検証をめざしたものの。D26は $8\sim 20^\circ\text{C}$ の水を一つの鉛直壁から 0°C にステップ冷却した後の過渡特性を二次元解析、可視化実験したものでこの時当然Boussinesq近似は使えないと述べている。

D27はマントル対流の生成機構の数値解。D28はマグマの対流を想定して、コーンシロップをモデル流体として水平底面の一部のみ加熱、上面冷却したもので物性値温度依存性の大きい問題の解析例でもある。D29は電子機器冷却を想定し、鉛直壁上の二ヶ所の発熱源の二次元流のマッシュアップ写真と数値解析を $Gr=5 \times 10^5$ まで行ない、下方の発熱源の方が大きい熱伝達率を示すことを述べている。電子機器冷却ではむしろ発熱源の最高到達温度をいかに下げるかを議論すべきであろう。D30は鉛直加熱壁内の熱伝導を考慮した上下冷却壁を持つ二次元容器内流体を対象としたものの。Ra数は 10^7 まで、熱伝導率の固体/流体の比は0.5から50まで。熱伝達率比が小さい程両者の連成度は高くなる。

E. 直方体空間内に半しきり、しきり又は物体が入っている場合

長方形断面空間の床又は天井より縦の半しきりを入れることにより流れを妨げる問題である。E1からE8のうち、E2が実験で、E8が三次元解析、他は極めて似かよった二次元流解析である。

E9とE11では二重窓の様な縦長の傾斜加熱又は冷却面上に多数のフィンをつけると熱伝達率を低くできることが見い出された。E10では電子機器の多数の発熱体が鉛直壁上に並んだ問題で熱伝達率の相関式が得られ、エチレングリコールを使った流れの可視化が行なわれた。E12、E14、E15は完全なしきり、E13はブラインドが入った場合を取り扱っている。いずれにしる、熱通過量は減少する。

次は室内に加熱物体がある場合である。加熱水平円柱が一本(E27)又は上下に二本並んだ時(E16、E24)の干渉流の実験。E17、E18、E21、E26はDの標準問題の中央に長方形又は板の断熱物体がある問題、E19、E23は断熱又は伝導物体が入った容器が傾斜した場合で、内部物体の存在で熱伝達率が幾分増加することがあるが見い出された。E25は水平二重円筒の加熱内筒の上下壁が空いているユニークな系を対象としている。熱伝達を極大にするすきま巾が見い出された。E20は水平円筒内に六角形加熱物体がある問題が座標変換で解かれた。

F. 二重円筒、二重球、不定形状容器

まず水平軸を持つ円筒、二重円筒の場合を示す。F1は狭い間隔の二重円筒間の空気の対流(内筒加熱・外筒冷却)の多セルの数値解析。F2は同様の系で $Ra=6 \times 10^5$ までの計算と実験で、振動解と乱れの考察もある。F3は水平二重円筒の内筒を一樣熱流束で加熱した時の実験と解析を $Ra=7 \times 10^5$ までについて行なったが、半径比が大きく、単一水平円柱に近い値を得た。F4は、二重円筒間隙の下方に水、上方に空気があるという場合のマッハツェンダー観察と数値解析という目新しいもの。F5は同様の系で外筒を冷やし、 4°C を含む水の対流のマッハツェンダー観察とデンドライト発生特性が報じられた。F6は水平二重円筒の軸端壁の存在を入れた数値解析。F7は二重円筒間隙内空気の二次元解析と間隙基準 Ra で518から994までで周方向流速のLDA測定がされた。F8は $Ra=6.67 \times 10^7$ までの二重円筒内対流の二次元FEM解析と可視化実験がされた。

次に円筒容器の軸が鉛直な場合を示す。鉛直二重円筒の下方軸端を加熱した時の周方向にロールセルが並ぶ問題が級数解で解かれた(F9)。F10では鉛直円筒の下面加熱をした時の熱伝達率の相関式が $Ra \leq 10^9$ で与えられた。F11では、鉛直円筒容器内に7本の加熱鉛直棒がある問題のNu数相関式と数値解析が得られた。F12では、底面中央加熱部分がグラフィイトと銅又は銅のみの場合のNu実験式が $Ra=10^{11}$ まで得られた。F13では鉛直二重円筒の内筒が加熱された場合を $Ra=10^6$ まで、内外筒半径比15まで、すきま縦横比10までの二次元数値計算がされ、相関式が与えられた。F14では周方向に温度分布がある場合の三次元流動が $Pr=0.01$ で $Ra=2.4 \times 10^4$ まで、F15では球殻間の薄い流体層対流(軸対称)の線形安定解析が $Pr=0 \sim 100$ について与えられた。F16では二重球間隙内対流(軸対称)の過渡特性が $Ra=10^6$ まで $Pr=0.02, 0.7, 6.0$ について求められた。

次は不定形状容器内対流のもの。F17は傾斜太陽集熱器カバーに縦仕切りを入れたもので $Ra \leq 5 \times 10^4$ までで縦横アスペクト比が0.2から3の数値解。F18は逆台形の傾斜側壁(22.5°C 、 45°C 、 75°C 傾斜壁)を加熱・冷却した問題。 $Pr=0.001 \sim 100$ 、 $Ra=10^2 \sim 10^5$ 、容器傾斜角は全周。平均Nu数と流動形態表示。F19は平行平板間に斜め仕切りを入れたもの。F20は傾斜六角形セルの軸端を加熱・冷却した問題。F21は水平円筒を縦割にし、中央に加熱板を入れた問題で太陽集熱器を想定。 $Ra=10^8$ まで。 $Pr=0.7$ 。円筒を水平軸のまわりに 90°C まで傾斜。F22は水平三角柱内対流の数値解。Nu対Ra、流速ベクトル図示。F23は鉛直円筒容器の底面が大小の半球形の場合の実験。太陽集熱器や建築への応用想定。

G. サーモサイホン

G1では不凝縮ガスを含むサーモサイフォン凝縮部内の流動解析が4種の作動流体に対して行なわれた。G2は二相二重管熱サイホンで水、エタノール、R113を作動流体として、熱流束の実測を行ない、二重管にした為R113で単管の4倍の限界熱流束が得られた。G3では密閉形二相の場合の作動限界熱輸送量をR113、メタノール、水について求め、管径影響を検討し、限界熱輸送量の相関式を与えた。G4は直方体ダクトのループしたもので、一部加熱、一部冷却したものの数値解析。 $Pr=5.5$ で $Ra=8000$ まで、全方向傾斜、局所Nu分布が与えられた。G5は密閉二重管形二相熱サイホンで上端をろうと状にしたもので、R113を作動流体とし、熱輸送限界を実験的に求めた。ろうと状にすると熱輸送限界が上昇する。G6はG2の系で循環流量を実測した。G7は密閉単相傾斜サイホ

ンにおいて水について水平から鉛直まで温度差30℃までで流動形態、Nu数を図示した。G8はループ円管内循環流の変動流速のカオスを解析した。G9では気液対向流形式沸騰管内の限界熱流束の解析と水による実験が行なわれた。管軸任意位置断面での定常液膜流厚さを与える式が力学関係から導かれた。G10では、G3の系で加熱面に粗さをつけると沸騰促進と限界熱輸送量が向上した。

H. 液体金属、電磁場効果、内部発熱

H1では溶融金属の蒸発表面の形や界面近傍の流れの数値解析がされた。高温蒸発界面ではくさび状の液面陥没を示す。H2は液体金属層 ($Pr=0.00125$) を下面中央部で局所加熱した時の2次元解析が $Ra=3\times 10^6$ まで行なわれた。H3は標準問題で $Pr=0.001\sim 10$ を $Ra=10^2\sim 10^{11}$ まで計算した。

次に電磁場効果。H4は水平磁場をステップ印加した後の過渡対流を数値計算した。H5は立方体容器に鉛直磁場を印加した時のGSMAC3次元数値解析と液晶シートによる側壁上の温度分布の可視化も行なわれた。誘導磁場が対流を促進させる効果が認められた。H6は半導体結晶成長における磁場印加のレビューである。H7は、ボート型容器内に水平又は鉛直に一樣磁場が印加された問題で表面張力流を入れた解析が行なわれた。H8は立方体容器内対流への三方向からの磁場印加効果の違いを実測した。H9は、磁場を印加して、半径方向の濃度分布が減少することを見出した。H10は、水平ボート内対流に鉛直磁場が印加された時の2次元対流を扱った。H11は水平円筒容器（高圧水銀ランプ）内のガスの対流と弱い磁場の効果が三次元数値解析された。H12は水平ダクト内対流にコロナ放電を与え対流伝熱を促進させる実験が行なわれた。H13では水平気液流体層に電位を与えることによる自然対流の開始が安定論により解析された。H14はH13と同じ。

次に流体内部で発熱が生じる場合。H15は $Pr=0.01$ の水平流体層で $Ra_E=10^{10}$ まで $Ra_I=10^{10}$ までの範囲の乱流自然対流の数値計算が混合長近似で行なわれた。H16では、 $Pr=7$ で、 $Ra=1.5\times 10^5$ までで傾斜正方形断面容器内の対流の数値計算が内部発熱に対して計算された。振動流が $Ra=5\times 10^4$ で得られた。H17では正方形断面容器内発熱対流の数値解析が行なわれた。H18では水平流体層で化学反応発熱が起こって自然対流が生じる問題を線形安定論で解析し、熱爆発の臨界条件を見出した。

I. 乱流モデル、計算法、ふく射効果

I1は鉛直管内空気の混合対流の低レイノルズ数k-εモデルによる数値解析。I2は背の高い（5：1）二次元空間内の自然対流を浮力の非等方性を考慮したk-εモデルと代数応力モデルを合成した新しいモデル式で解析し、 $Ra=4\times 10^{10}$ の実験値と比較している。I3はI2と同じ。I4は標準問題を低レイノルズ数モデルで空気 $Ra=10^{14}$ まで、水で $Ra=10^{15}$ まで計算した。I5は乱流ベナール問題の水平加熱面近くの温度境界層厚さの解析。

次に計算法。I6は渦度-速度表示法（流れ関数ではない）による新しい計算法による標準問題の $Ra=10^8$ までの計算。I7は密度を変数として解く新計算法をブシネスク近似を用いた結果と比較しその有効性を4℃を含む水で例証している。I8は立方体標準問題で圧力の3種の解法の比較を行なった。I9は水平二重円筒内対流を流速とBernoulli関数の緩和法を用いた有限要素法で解いたもの。I10からI14はふく射の効果を考慮したもの。

以上、自然対流の関連する工学問題はますます広がっていている。その他、海洋、大気、地球物理、宇宙物理とか生理学、家政学等々がある。なお、本サーベイは必ずしも関連ペーパーを全て拾い上げることができたものとは考えていない。一応の目安と考えていただければ幸いである。

REFERENCES

Review, Key note paper

- A1. Churchill, S.W., 1966, The prediction of natural convection, Third Int. Heat Transfer Conf. (IHTC), Chicago.
- A2. Ede, A.J., 1967, *Advances in Heat Transfer*, vol. 4.
- A3. Ostrach, S., 1972, *ibid*, vol. 8.
- A4. 藤井哲, 1974, *伝熱工学の進展*, vol. 3, 養賢堂.
- A5. 相原利雄, 1976, *ibid*, vol. 4, 養賢堂.
- A6. Catton, I., 1978, *Natural Convection: Cavities & cells*, 6th IHTC, Toronto.
- A7. Combarous, M., 1978, *Natural convection in porous media and geothermal systems*. *ibid*.
- A8. de Vahl Davis, G., 1986, *Finite Difference methods for natural and mixed convection in enclosures*, 8th IHTC, San Francisco.
- A9. Hoogendoorn, C.J., 1986, *Natural convection in enclosure*, *ibid*.
- A10. Incropera, F.P., 1986, *Buoyancy effects in double-diffusive and mixed convection flows*, *ibid*.
- A11. Yang, K.T., 1986, *Numerical modelling of natural convection-radiation interactions in enclosures*, *ibid*.
- A12. Nieuwstadt, F.T.M., 1990, *Direct and large-eddy simulation of free convection*, 9th IHTC, Jerusalem.
- A13. Guo, Zeng-yuan, 1990, *Thermal drive and thermal instability in convective problems*, *ibid*.
- 鉛直板上の自由対流, 半開, 自然換気 他
- B1. S.S. Tewari et al., 1990, *JHT*, 112, 975-987.
- B2. S.H. Park et al., 1990, *JHT*, 112, 952-958.
- B3. A. Bejan et al., 1990, *JHT*, 112, 787-790.
- B4. M.H. Kim et al., 1991, *IJHMT*, 34, 1327-1336.
- B5. S. Lee et al., 1991, *JHT*, 113, 501-504.
- B6. D.B. Ingham et al., 1991, *WU*, 26, 289-298.
- B7. 三角利之 他, 1991, *日機論*, 57, 1365-1370.
- B8. 稲垣照美 他, 1991, *日機論*, 57, 3461-3464.
- B9. B. Zeghmati et al., 1991, *IJHMT*, 34, 899-909.
- B10. Z.-Z. Lin et al., 1991, *IJHMT*, 34, 2813-2818.
- B11. T. Hanzawa et al., 1991, *JCEJ*, 24, 726-730.
- B12. A.V. Hassani, 1992, *JHT*, 114, 768-773.
- B13. 藤井 哲 他, 1992, *日機論*, 58, 1617-1623.
- B14. A. Nakayama et al., 1992, *JHT*, 114, 127-134.
- B15. M. Sakakibara et al., 1992, *IJHMT*, 35, 2289-2297.
- B16. M. Mammou et al., 1992, *IJHMT*, 35, 2277-2287.
- B17. H.R. Lee et al., 1992, *IJHMT*, 35, 207-220.
- B18. P.R. Chappidi et al., 1990, *JHT*, 112, 1082-1085.
- B19. M.A.I. El-Shaarawi et al., 1990, *IJHMT*, 33, 1873-1884.
- B20. K. Kato et al., 1990, *JCEJ*, 23, 64-68.
- B21. B.B. Rogers et al., 1990, *IJHMT*, 33, 79-90.
- B22. J.T. Lin et al., 1990, *IJHMT*, 33, 2121-2132.
- B23. D. Naylor et al., 1991, *JHT*, 113, 620-626.
- B24. 富村寿夫 他, 1991, *日機論*, 57, 676-681.
- B25. C.-H. Cheng et al., 1991, *ICHMT*, 18, 127-140.
- B26. J.T. Lin et al., 1991, *IJHMT*, 34, 1568-1571.
- B27. 森 英明 他, 1991, *日機論*, 57, 3465-3468.
- B28. L. Martin et al., 1991, *JHT*, 113, 899-905.
- B29. T.T. Hamadah et al., 1991, *JHT*, 113, 507-510.
- B30. W.-M. Yan et al., 1991, *IJHMT*, 34, 1309-1313.
- B31. R.B. Yedder et al., 1991, *IJHMT*, 34, 1237-1248.
- B32. M. Al-Arabi et al., 1991, *IJHMT*, 34, 1019-1025.
- B33. K. Kato et al., 1991, *JCFI*, 24, 568-574.
- B34. D. Elpidorou et al., 1991, *IJHMT*, 34, 573-578.
- B35. S. Ray et al., 1992, *IJHMT*, 35, 815-822.
- B36. C.-H. Cheng et al., 1992, *IJHMT*, 35, 2643-2653.
- B37. T. Hanzawa et al., 1992, *JCEJ*, 25, 307-314.
- B38. H.R. Lee et al., 1992, *IJHMT*, 35, 1913-1925.
- B39. M.M. Rahman et al., 1990, *IJHMT*, 33, 1307-1319.
- B40. T.A. Myrum, 1990, *JHT*, 112, 632-639.
- B41. N.S. Buenconsejo et al., 1990, *ETFS*, 3, 603-612.
- B42. D.M. Sefcik et al., 1991, *IJHMT*, 34, 3037-3046.
- B43. K. Vafai et al., 1991, *JHT*, 113, 627-634.
- B44. D.M. Sefcik et al., 1991, *JHT*, 113, 912-918.
- B45. M.D. Pavlovic et al., 1991, *ETFS*, 4, 648-655.
- B46. J. Ettefagh et al., 1991, *JHT*, 113, 1025-1028.
- B47. J.L. Lage et al., 1992, *JHT*, 114, 479-486.
- B48. M. Epstein, 1992, *JHT*, 114, 535-538.
- B49. J.L. Xia et al., 1992, *ICHMT*, 19, 447-460.
- B50. 北村健三 他, 1991, *日機論*, 57, 670-675.
- B51. C.J. Ho et al., 1990, *WU*, 25, 337-343.
- B52. 北村健三 他, 1991, *日機論*, 57, 3885-3890.

- B53. T.R. Al-Alusi et al., 1992, JHT, 114, 394-400.
- B54. K. Jafarpur et al., 1992, IJHMT, 35, 2195-2201.
- 混合対流
- C1. I.M. Rustum et al., 1990, IJHMT, 33, 1485-1496.
- C2. J.B. Aparecido et al., 1990, IJHMT, 33, 341-347.
- C3. J.R. Maughan et al., 1990, JHT, 112, 612-618.
- C4. H.V. Mahaney et al., 1990, IJHMT, 33, 1233-1245.
- C5. J.-D. Chen et al., 1991, IJHMT, 34, 2545-2553.
- C6. G. Evans et al., 1991, IJHMT, 34, 2039-2051.
- C7. R. Smyth et al., 1991, ICHMT, 18, 669-680.
- C8. D.E. Wroblewski et al., 1991, IJHMT, 34, 1617-1631.
- C9. 小泉博義 他、1991、日機論、57, 1051-1056.
- C10. Y. Mori et al., 1992, WU, 27, 195-200.
- C11. K.L. Yerkes et al., 1992, IJHMT, 35, 1209-1228.
- C12. F.S. Lee et al., 1992, JIIT, 114, 761-764.
- C13. R.J. Goldstein et al., 1992, WU, 27, 265-272.
- C14. D.K. Choi et al., 1992, IJHMT, 35, 2053-2056.
- C15. J.-D. Chen et al., 1992, IJHMT, 35, 263-267.
- C16. 福井啓介、1992、化工論、18, 108-115.
- C17. T.A. Nyce et al., 1992, IJHMT, 35, 1481-1494.
- C18. C.J. Chang et al., 1990, IJHMT, 33, 2701-2720.
- C19. B. Weigand et al., 1992, IJHMT, 35, 1803-1809.
- C20. Z.-Y. Guo et al., 1992, IJHMT, 35, 1635-1644.
- C21. L. Yang et al., 1992, IJHMT, 35, 1947-1956.
- C22. C.J. Ho et al., 1992, JHT, 114, 418-424.
- C23. S. Fann et al., 1992, NHT, 22, 257-288.
- C24. A.A. Mohamad et al., 1991, NHT, 19, 187-205.
- C25. R. Iwatsu et al., 1992, IJHMT, 35, 1069-1076.
- C26. M.K. Moallemi et al., 1992, IJHMT, 35, 1881-1892.
- ペナール問題、標準問題、過渡解
- D1. J.G. Mavcety et al., 1991, ICHMT, 18, 59-70.
- D2. J.G. Georgiadis, 1991, JHT, 113, 1029-1031.
- D3. 竹内正紀 他、1991、日機論、57, 2070-2077.
- D4. S. Bahl et al., 1991, IJHMT, 34, 949-960.
- D5. D. Mukutmoni et al., 1992, IJHMT, 35, 2145-2159.
- D6. Y.C. Michael et al., 1992, JHT, 114, 622-629.
- D7. 木村繁男、1990、日機論、56, 2717-2723.
- D8. Y. Le Peutrec et al., 1990, JHT, 112, 370-378.
- D9. P. Le Quere, 1990, JHT, 112, 965-974.
- D10. 本本日出夫 他、1991、日機論、57, 236-242.
- D11. A. Sarkar et al., 1991, NHT, 19, 445-470.
- D12. T. Fusegi et al., 1991, IJHMT, 34, 1543-1557.
- D13. M. Souhar et al., 1992, IJHMT, 35, 749-758.
- D14. M.P. Arroyo, 1992, ETFS, 5, 216-224.
- D15. B.W. Webb et al., 1992, JHT, 114, 115-120.
- D16. 岡永博夫 他、1990、日機論、56, 2922-2929.
- D17. W.S. Fu et al., 1990, NHT, 18, 189-212.
- D18. A. Kumar et al., 1991, IJHMT, 34, 1083-1096.
- D19. S.W. Armfield et al., 1991, IJHMT, 34, 929-940.
- D20. T. Fusegi et al., 1991, IJHMT, 34, 1559-1564.
- D21. D.A. Olson et al., 1991, JHT, 113, 635-642.
- D22. 笹口健吾 他、1991、日機論、57, 1057-1064.
- D23. 笹口健吾 他、1992、日機論、58, 2024-2030.
- D24. M. Kazmierczak et al., 1992, IJHMT, 35, 1507-1518.
- D25. C.G. Jeevaraj et al., 1992, IJHMT, 35, 1573-1587.
- D26. S.L. Braga et al., 1992, IJHMT, 35, 861-875.
- D27. 梅村章、1991、日機論、57, 3859-3866.
- D28. T.Y. Chu et al., 1990, JHT, 112, 388-395.
- D29. M.L. Chadwick et al., 1991, IJHMT, 34, 1679-1693.
- D30. Z.-G. Du et al., 1992, IJHMT, 35, 1969-1975.
- 半しきり、全しきり、内部に物体
- E1. W.-S. Fu et al., 1990, WU, 25, 233-243.
- E2. D. Olson et al., 1990, JHT, 112, 640-647.
- E3. K.S. Chen et al., 1990, JHT, 112, 648-652.
- E4. S. Acharya et al., 1990, IJHMT, 33, 931-942.
- E5. K.S. Chen et al., 1991, IJHMT, 34, 237-246.
- E6. M. Ciofalo et al., 1991, IJHMT, 34, 167-179.
- E7. A. Yucel et al., 1991, NHT, 19, 471-485.
- E8. K.C. Karki et al., 1992, JHT, 114, 410-417.
- E9. R. Scozia et al., 1991, NHT, 20, 127-158.
- E10. M. Keyhani et al., 1991, JHT, 113, 883-891.
- E11. M. Hasnaoui et al., 1992, WU, 27, 357-368.
- E12. A. Kangni et al., 1991, IJHMT, 34, 2819-2825.
- E13. Z. Zhang et al., 1991, JHT, 113, 377-383.
- E14. T.G. Karayiannis et al., 1992, IJHMT, 35, 1645-1657.
- E15. P.K. Ghosh et al., 1992, NHT, 21, 231-248.
- E16. 稲垣照美 他、1990、日機論、56, 3050-3055.
- E17. J.M. House et al., 1990, NHT, 18, 213-225.
- E18. K.M. Kelkar et al., 1990, NHT, 17, 269-285.
- E19. 木村照夫 他、1991、日機論、57, 2369-2376.
- E20. E.K. Glakpe et al., 1991, NHT, 20, 779-796.
- E21. D.J. Close et al., 1991, JHT, 113, 371-376.
- E22. S.B. Sathe et al., 1991, IJHNT, 34, 2149-2163.
- E23. 木村照夫 他、1992、日機論、58, 850-856.
- E24. M. Lacroix, 1992, NHT, 21, 37-54.
- E25. M. Yang et al., 1992, NHT, 22, 289-305.
- E26. S.B. Sathe et al., 1992, JHT, 114, 401-409.

E27. N.K. Ghaddar, 1992, *IJHMT*, 35, 2327-2334.

各種形状容器 (二重円筒 他)

- F1. D.B. Fant et al., 1990, *JHT*, 112, 379-387.
F2. K. Fukuda et al., 1990, *IJHMT*, 33, 629-639.
F3. R. Kumar et al., 1990, *JHT*, 112, 784-787.
F4. C.J. Ho et al., 1991, *IJHMT*, 34, 1371-1382.
F5. S. Fukusako et al., 1991, *IJHMT*, 34, 693-702.
F6. K. Vafai et al., 1991, *IJHMT*, 34, 2555-2570.
F7. A. Cheddadi et al., 1992, *JHT*, 114, 99-106.
F8. 加藤保真 他、1992, *日機論*, 58, 686-691.
F9. D.L. Littlefield et al., 1990, *JHT*, 112, 959-964.
F10. T. Hanzawa et al., 1990, *JCEJ*, 23, 378-381.
F11. J.F. Lafortune et al., 1990, *IJHMT*, 33, 435-445.
F12. W.J. Yang et al., 1991, *JHT*, 113, 1031-1033.
F13. R. Kumar et al., 1991, *IJHMT*, 34, 513-524.
F14. J.P. Pulicani et al., 1992, *IJHMT*, 35, 2119-2130.
F15. R.W. Douglass et al., 1990, *IJHMT*, 33, 2533-2544.
F16. V.K. Garg, 1992, *IJHMT*, 35, 1935-1945.
F17. W.-M. Chen et al., 1990, *WU*, 25, 59-67.
F18. T.S. Lee, 1991, *NHT*, 19, 487-499.
F19. H. Yuncu et al., 1991, *ICHMT*, 18, 559-568.
F20. Y. Asako et al., 1991, *JHT*, 113, 906-911.
F21. G.A. Moore et al., 1992, *JHT*, 114, 120-126.
F22. G.S.H. Lock et al., 1992, *IJHMT*, 35, 155-164.
F23. W.M. Lewandowski et al., 1992, *JHT*, 114, 94-98.

サーモサイホン

- G1. 小林康徳 他、1990, *日機論*, 56, 3064-3070.
G2. 井村英昭 他、1990, *日機論*, 56, 3816-3820.
G3. 植田辰洋 他、1990, *日機論*, 56, 1746-1752.
G4. E. Ramos et al., 1990, *IJHMT*, 33, 917-930.
G5. 福田研二 他、1991, *日機論*, 57, 687-692.
G6. 吉田正道 他、1991, *日機論*, 57, 1428-1433.
G7. G.S.H. Lock et al., 1992, *IJHMT*, 35, 165-173.
G8. Y.-Z. Wang et al., 1992, *IJHMT*, 35, 111-120.
G9. 甲藤好郎 他、1992, *日機論*, 58, 839-845.
G10. 宮下 徹 他、1992, *日機論*, 58, 1234-1239.

液体金属、電磁場、内部発熱

- H1. 塩田和則 他、1990, *日機論*, 56, 3372-3377.
H2. Y. Cao et al., 1990, *IJHMT*, 33, 1367-1370.
H3. J.L. Lage et al., 1991, *NHT*, 19, 21-41.
H4. 尾添紘之 他、1990, *化工論*, 16, 990-997.
H5. 佐藤敏浩 他、1990, *日機論*, 56, 1571-1578.
H6. R.W. Series et al., 1991, *JCG*, 113, 305-328.
H7. A. Hirata et al., 1992, *JCEJ*, 25, 62-66.
H8. K. Okada et al., 1992, *JHT*, 114, 107-114.
H9. J.-C. Han et al., 1992, *JCG*, 121, 394-398.

H10. J.P. Garandet et al., 1992, *IJHMT*, 35, 741-748.

- H11. P.Y. Chang et al., 1992, *IJHMT*, 35, 1857-1864.
H12. 多田幸生 他、1991, *日機論*, 57, 217-228.
H13. T. Maekawa et al., 1992, *IJHMT*, 35, 613-621.
H14. 前川 透 他、1992, *日機論*, 58, 1313-1320.
H15. F.B. Cheung et al., 1991, *JHT*, 113, 919-925.
H16. H.-O. May, 1991, *IJHMT*, 34, 919-928.
H17. T. Fusegi et al., 1992, *NHT*, 21, 215-229.
H18. A.K. Kolesnikov, 1992, *IJHMT*, 35, 1091-1102.

乱流モデル 他

- I1. M.A. Couon et al., 1990, *IJHMT*, 33, 275-286.
I2. L. Davidson, 1990, *IJHMT*, 33, 2599-2608.
I3. L. Davidson, 1990, *NHT*, 18, 129-147.
I4. R.A.W.M. Henkes et al., 1991, *IJHMT*, 34, 377-388.
I5. M.K. Chung et al., 1992, *IJHMT*, 35, 43-51.
I6. 芳里 直 他、1990, *日機論*, 56, 2914-2921.
I7. 富山明男 他、1991, *日機論*, 57, 2054-2059.
I8. 本田逸郎 他、1991, *日機論*, 57, 2627-2631.
I9. 加藤保真 他、1992, *日機論*, 58, 2100-2107.
I10. T. Fusegi et al., 1990, *JHT*, 112, 802-804.
I11. P.Y. Chang et al., 1990, *IJHMT*, 33, 483-493.
I12. A. Draoui et al., 1991, *NHT*, 20, 253-261.
I13. Z. Tan et al., 1991, *IJHMT*, 34, 785-793.
I14. P.Y. Chang et al., 1991, *IJHMT*, 34, 1811-1822.

二重拡散

- J1. J. Lee et al., 1990, *NHT*, 18, 343-355.
J2. J.M. Hyun et al., 1990, *IJHMT*, 33, 1605-1617.
J3. T.F. Lin et al., 1990, *IJHMT*, 33, 287-299.
J4. J.W. Lee et al., 1990, *IJHMT*, 33, 1619-1632.
J5. J. Lee et al., 1990, *IJHMT*, 33, 869-875.
J6. J.G. Petri et al., 1990, *IJHMT*, 33, 1441-1449.
J7. J.A. Weaver et al., 1991, *IJHMT*, 34, 3121-3133.
J8. J.W. Lee et al., 1991, *IJHMT*, 34, 2423-2427.
J9. J.W. Lee et al., 1991, *IJHMT*, 34, 2409-2421.
J10. K. Kamakura et al., 1991, *JCEJ*, 24, 622-627.
J11. J.A. Weaver et al., 1991, *IJHMT*, 34, 3107-3120.
J12. H. Han et al., 1991, *IJHMT*, 34, 461-471.
J13. H. Han et al., 1991, *IJHMT*, 34, 449-459.
J14. J.A. Weaver et al., 1992, *ETFS*, 5, 57-68.
J15. J. Dosch et al., 1992, *IJHMT*, 35, 1811-1821.
J16. L.G. napolitano et al., 1992, *IJHMT*, 35, 1003-1025.
J17. C. Gau et al., 1992, *IJHMT*, 35, 2257-2269.
J18. G. Zimmermann et al., 1992, *IJHMT*, 35, 2245-2256.

J19. C. Beghein et al., 1992, IJHMT, 35, 833-846.

相変化 (純物質)

K1. S. Chellaiah et al., 1990, ETFS, 3, 222-231.

K2. Y. Cao et al., 1990, JHT, 112, 812-816.

K3. W. Shyy et al., 1990, IJHMT, 33, 2545-2563.

K4. W. Shyy et al., 1990, IJHMT, 33, 2565-2578.

K5. 平田哲夫 他、1990, 日機論, 56, 3468-3475.

K6. 平田哲夫 他、1990, 日機論, 56, 3481-3488.

K7. M. Lacroix et al., 1990, NHT, 17, 25-41.

K8. V.R. Voller, 1990, NHT, 17, 155-169.

K9. Z. Zhang et al., 1990, IJHMT, 33, 661-671.

K10. C.-J. Kim et al., 1990, IJHMT, 33, 2721-2734.

K11. T.L. Bergman et al., 1990, IJHMT, 33, 139-149.

K12. S.K. Roy et al., 1990, IJHMT, 33, 1135-1147.

K13. W.Y. Raw et al., 1991, IJHMT, 34, 1503-1513.

K14. Y. Asako et al., 1991, JHT, 113, 1017-1020.

K15. 秋山友宏 他、1991, 日機論, 57, 284-291.

K16. T.L. Spatz et al., 1991, IJHMT, 34, 1847-1859.

K17. D. Gobin et al., 1992, JHT, 114, 521-524.

K18. J.S. Lim et al., 1992, JHT, 114, 784-787.

K19. 稲葉英男 他、1992, 日機論, 58, 2556-2564.

K20. M. Lacroix, 1992, NHT, 22, 79-93.

相変化 (多成分)

K21. D.G. Neilson et al., 1990, IJHMT, 33, 367-380.

K22. C. Prakash, 1990, NHT, 18, 147-167.

K23. C. Prakash, 1990, NHT, 18, 131-145.

K24. G. Amberg, 1991, IJHMT, 34, 217-227.

K25. B.N. Antar, 1991, JCG, 113, 92-102.

K26. Q. Yu et al., 1991, IJHMT, 34, 843-852.

K27. D.G. Neilson et al., 1991, IJHMT, 34, 1717-1732.

K28. C.M. Oldenburg et al., 1991, IJHMT, 34, 2107-2121.

K29. 西村龍夫 他、1991, 日機論, 57, 4174-4181.

K30. 石川正昭 他、1992, 日機論, 58, 490-496.

K31. K.C. Chiang et al., 1992, IJHMT, 35, 1771-1778.

K32. F. Vodak et al., 1992, IJHMT, 35, 1787-1793.

K33. S. Fukusako et al., 1992, JHT, 114, 34-40.

K34. H. Yoo et al., 1992, IJHMT, 35, 2335-2346.

多孔質

L1. F. Chen, 1990, JIT, 112, 1088-1092.

L2. N.D. Rosenberg et al., 1992, IJHMT, 35, 1261-1273.

L3. J. Sheridan et al., 1992, IJHMT, 35, 2131-2143.

L4. A. Sasaki et al., 1990, NHT, 18, 17-32.

L5. 佐々木 章 他、1991, 日機論, 57, 188-194.

L6. E.A. Ellinger et al., 1991, ETFS, 4, 619-629.

L7. X. Zhang et al., 1991, IJHMT, 34, 389-405.

L8. H. Lein et al., 1992, IJHMT, 35, 187-194.

L9. 笹口健吾 他、1992, 日機論, 58, 1511-1517.

L10. A. Sasaki et al., 1992, WU, 27, 289-298.

L11. Z.-G. Du et al., 1990, NHT, 18, 371-386.

L12. M.R. Islam et al., 1990, IJHMT, 33, 151-161.

L13. Y.F. Rao et al., 1991, IJHMT, 34, 247-252.

L14. Z.-G. Du et al., 1992, WU, 27, 149-155.

L15. L. Robillard et al., 1990, IJHMT, 33, 953-963.

L16. C.Y. Soong et al., 1990, IJHMT, 33, 1805-1816.

L17. 王家兵 他、1990, 化工論, 16, 723-731.

L18. A. Bejan, 1990, JHT, 112, 662-667.

L19. F.C. Lai et al., 1991, IJHMT, 34, 525-541.

L20. R.V. Kamath et al., 1992, IJHMT, 35, 823-832.

L21. C.Y. Choi et al., 1992, JHT, 114, 143-151.

L22. F.C. Chou et al., 1992, IJHMT, 35, 1197-1207.

L23. K. Vafai et al., 1990, JHT, 112, 793-797.

L24. H. Ozoe et al., 1990, NHT, 17, 249-268.

L25. F.C. Lai, 1990, ICHMT, 17, 791-800.

L26. I. Pop et al., 1990, ICHMT, 17, 801-811.

L27. T. Nilsen et al., 1990, JHT, 112, 396-401.

L28. H. Herwig et al., 1990, JHT, 112, 1085-1088.

L29. N. Kladias et al., 1990, JHT, 112, 675-684.

L30. D.-X. Wang et al., 1990, IJHMT, 33, 827-833.

L31. 増岡隆士 他、1991, 日機論, 57, 243-249.

L32. 増田善雄 他、1991, 日機論, 57, 2065-2069.

L33. 増田善雄 他、1991, 日機論, 57, 4203-4208.

L34. 木村繁男 他、1992, 日機論, 58, 1860-1866.

L35. D.A. Niield, 1991, IJHMT, 34, 87-92.

L36. E. David et al., 1991, JHT, 113, 391-399.

L37. J. Ni et al., 1991, JHT, 113, 1033-1037.

L38. P. Le Breton et al., 1991, JHT, 113, 892-898.

L39. S.S. Vorontsov et al., 1991, IJHMT, 34, 703-709.

L40. F.C. Lai et al., 1991, IJHMT, 34, 1189-1194.

L41. D.R. Marpu et al., 1991, WU, 26, 141-147.

L42. L. Storesletten et al., 1991, IJHMT, 34, 1959-1968.

L43. M.C. C-Mojtabi et al., 1991, IJHMT, 34, 3061-3074.

L44. T. Nishimura et al., 1992, NHT, 22, 241-255.

L45. H. Lein et al., 1992, IJHMT, 35, 175-186.

L46. S. Kimura et al., 1992, WU, 27, 85-91.

チョクラルスキー法

M1. K. Kakimoto et al., 1990, JCG, 102, 16-20.

M2. H. Kopetsch, 1990, JCG, 102, 505-528.

M3. A.A. Wheeler, 1990, JCG, 102, 691-695.

M4. L.N. Hjellming, 1990, JCG, 104, 327-344.

- M5. P. Sabhapathy et al., 1990, JCG, 104, 371-388.
M6. M.G. Williams et al., 1990, JCG, 100, 233-253.
M7. Y. Ryckmans et al., 1990, JCG, 99, 702-706.
M8. S. Kobayashi, 1990, JCG, 99, 692-695.
M9. T. Munakata et al., 1990, JCG, 106, 566-576.
M10. K.W. Kelly et al., 1991, JCG, 113, 265-278.
M11. K.W. Kelly et al., 1991, JCG, 113, 254-264.
M12. P. Sabhapathy et al., 1991, JCG, 113, 164-180.
M13. N. Kobayashi, 1991, JCG, 108, 240-246.
M14. Y. Okano et al., 1991, JCG, 109, 94-98.
M15. K. Kamiuto et al., 1991, JCG, 114, 715-725.
M16. C.T. Yen et al., 1991, JCG, 113, 549-556.
M17. J.J. Derby et al., 1991, JCG, 113, 575-586.
M18. J. Trauth et al., 1991, JCG, 112, 451-457.
M19. J.R. Ristorcelli et al., 1992, JCG, 116, 447-460.
M20. K. Kamiuto et al., 1992, IJHMT, 35, 2551-2555.
- ブリッジマン法
- N1. H. Matsushima et al., 1990, IJHMT, 33, 1957-1968.
N2. A.G. Ostrogorsky, 1990, JCG, 104, 233-238.
N3. S. Motakef, 1990, JCG, 104, 833-850.
N4. J.J. Favier, 1990, JCG, 99, 18-29.
N5. R.A. Brown et al., 1991, JCG, 109, 50-65.
N6. D.H. Kim et al., 1991, JCG, 109, 66-74.
N7. K.H. Lie et al., 1991, JCG, 109, 205-211.
N8. Y.V. Apanovich et al., 1991, JCG, 110, 839-854.
N9. D.H. Kim et al., 1991, JCG, 114, 411-434.
N10. D.J. Knuteson et al., 1991, JCG, 109, 127-132.
N11. M. Saitou et al., 1991, JCG, 113, 147-156.
N12. K. Grasza et al., 1992, JCG, 116, 139-150.
N13. S. Brandon et al., 1992, JCG, 121, 473-494.
- Fz法
- O1. M. Jurisch, 1990, JCG, 102, 223-232.
O2. M. Jurisch et al., 1990, JCG, 102, 214-222.
O3. C.W. Lan et al., 1990, JCG, 104, 801-808.
O4. G.W. Young et al., 1990, JCG, 106, 445-466.
O5. K.H. Lie et al., 1991, JCG, 109, 167-173.
O6. C.W. Lan et al., 1991, JCG, 108, 1-7.
O7. C.W. Lan et al., 1991, JCG, 108, 340-350.
O8. C.W. Lan et al., 1991, JCG, 108, 351-366.
O9. C.W. Lan et al., 1991, JCG, 114, 517-535.
O10. C.W. Lan et al., 1992, JCG, 119, 281-291.
O11. C.W. Lan et al., 1992, JCG, 118, 151-159.
- CVD
- P1. M. Choi et al., 1990, JHT, 112, 1063-1069.
P2. 鈴木基之 他、1990, 化工論, 16, 588-596.
P3. J. Ouazzani et al., 1990, JCG, 100, 545-576.
P4. Y.N. Nakarov et al., 1990, JCG, 100, 646-650.
P5. D.I. Fotiadis et al., 1990, JCG, 100, 577-599.
P6. D.I. Fotiadis et al., 1990, JCG, 102, 441-470.
P7. D.I. Fotiadis et al., 1990, JCG, 102, 743-761.
P8. R.L. Mahajan et al., 1991, JHT, 113, 688-695.
P9. Y.T. Lin et al., 1991, JHT, 113, 400-406.
P10. K.F. Jensen et al., 1991, JHT, 107, 1-11.
P11. A.H. Dilawari et al., 1991, JCG, 108, 491-498.
P12. 佐藤恒之 他、1991, 化工論, 17, 362-370.
P13. Y.T. Lin et al., 1992, JHT, 114, 735-742.
- 遠心効果 他
- Q1. W. Weber et al., 1990, JCG, 100, 145-158.
Q2. W.A. Arnold et al., 1992, JCG, 119, 24-40.
Q3. P.A. Vorobiov et al., 1992, JCG, 119, 111-121.
Q4. G. Muller et al., 1992, JCG, 119, 8-23.
Q5. R.N. Grugel et al., 1992, JCG, 121, 599-607.
Q6. M.A. Fikri et al., 1992, JCG, 119, 41-60.
Q7. M. Kimura et al., 1990, JCG, 99, 1295-1299.
Q8. K. Asakawa et al., 1990, JCG, 99, 1291-1294.
Q9. D. Canright et al., 1991, JCG, 114, 153-185.
Q10. R. Ananth et al., 1991, JCG, 108, 173-189.
Q11. J.L. Castillo et al., 1992, JCG, 116, 105-126.
Q12. P.E. Phelan et al., 1992, JHT, 114, 227-233.
Q13. M.I. Flik et al., 1992, JHT, 114, 255-263.
Q14. Z.M. Zhang et al., 1992, JHT, 114, 644-652.
Q15. M.I. Flik et al., 1992, JHT, 114, 666-674.
- 表面張力流、低g
- R1. D. Langbein, 1990, JCG, 104, 47-59.
R2. J.C. Chen et al., 1990, IJHMT, 34, 663-671.
R3. J.C. Chen et al., 1990, NHT, 17, 287-308.
R4. D.A. Goussis et al., 1990, IJHMT, 33, 2237-2245.
R5. A. Nadarajah et al., 1990, JCG, 104, 218-232.
R6. W.-S. Fu et al., 1990, ICHMT, 17, 501-510.
R7. K. Kinoshita et al., 1990, JCG, 99, 1275-1280.
R8. J.R. Keller et al., 1990, JHT, 112, 363-369.
R9. W. Shyy et al., 1991, JCG, 108, 247-261.
R10. C. Huo et al., 1991, JCG, 114, 486-496.
R11. J.I.D. Alexander et al., 1991, JCG, 113, 21-38.
R12. A. Nadarajah et al., 1992, JCG, 118, 49-59.
R13. U. Buckle et al., 1992, NHT, 21, 121-141.
R14. 森 英明 他、1992, 日機論, 58, 832-838.
R15. W.-S. Fu et al., 1992, WU, 27, 109-117.
R16. J. Maquet et al., 1992, IJHMT, 35, 2695-2703.
R17. H.Q. Yang, 1992, IJHMT, 35, 2413-2420.
R18. D. Rivas et al., 1992, IJHMT, 35, 1469-1479.

1. はじめに

自然対流の乱流場の構造と熱伝達のメカニズムは、浮力の影響は加わるものの、これまで基本的には強制対流のものとあまり差異がないと一般に考えられてきた。これは、計測が困難なため、熱伝達率に関するデータ以外には速度場と温度場に関する信頼できる計測結果が少なかったことに起因している。ところが、垂直平板上の自然対流乱流境界層を実際に調べてみると、壁近傍の粘性底層、レイノルズ応力および流れ方向乱流熱流束の挙動などについて、この境界層が通常の乱流境界層とはかなり異なる特性を有すること [1, 2]、また強制対流の壁近傍で観察される組織構造もこの境界層においては欠如していることが次第にわかってきた [3]。そのため、なぜ自然対流がこのような特性を有しているのか、その原因を追求することが研究の新しい展開として必要になってきた。これは、環境伝熱、電子機器の冷却などの実用問題の解決および浮力乱流の数理モデルの構築に関連する重要な研究課題である。

本稿では、自然対流乱流境界層に関する従来の研究の状況とこの境界層について現在どこまで明らかになっているかを概説する。さらに、自然対流乱流境界層の特異な性質の原因を探る目的で行った、乱流エネルギーの生成メカニズムに関する研究についても紹介する。

2. 自然対流乱流境界層に関する研究の進展

垂直平板に沿う自然対流境界層は、流体の種類および実験条件によって異なるが、レーレー数がおおよそ $10^9 \sim 10^{10}$ になると層流から乱流へ遷移する [4]。乱流への遷移の研究については、Gebhart ら [5, 6] が詳述しているので、ここでは乱流境界層に関する研究に内容を絞ることにする。ただし、1972年頃までの乱流境界層の実験および理論は、九州大学藤井哲教授が詳しく解説されているので [4]、それを参照願うことにして、その後の研究の進展について話を進める。

2.1 自然対流乱流境界層の実験的研究

1972年頃までの研究は平均温度分布、熱伝達率に関するものが主で（平均速度と変動速度に関する萌芽的研究も若干あるが [7-12]）、速度場と温度場の乱流統計量に関するものは非常に少なく、そのため自然対流の乱流特性を理解する上でこれらのデータの蓄積が強く要望されていた。この乱流境界層（空気）の系統的な計測は、1972年に Cheesewright の指導のもとに Smith [13] によって初めて試みられている。計測には、熱線と熱電対を用い、当時としては最新のデータ処理を行って乱流統計量を得たが、低流速の測定に伴う実験の困難さのために、データの精度、再現性についてはまだ満足 of いくものではなかった [14]。しかしながら、乱流境界層に関する画期的な研究であったことに間違いない。

その後、Papaïliou-Lykoudis [15] は水銀について温度乱れの強さとスペクトルのデータを示し、Hoogendoorn-Euser [16] は空気の平均速度と速度の乱れ強さのデータを得ている。また、1979年には Bill-Gebhart [17] が、遷移域から乱流境界層（水）における温度と速度の乱れ強さ、スペクトル、乱流熱流束の変化を調べている。残念ながら、この頃までの実験データ（特に熱線を用いて計測した速度場のデータ）は、不確かさが大きく定量的に信頼できるものは極めて少なかった。

1982年になって、Miyamoto ら [18, 19] および Cheesewright-Ierokipiotis [20] がレーザー・ドップラー流速計による空気流の測定を行い、ようやく速度場について定量的にも信頼できるデータ

が得られるようになった。Cheesewright-Ierokipiotis のデータは平均速度と流れ方向の速度乱れに関するものであるが、Miyamoto らのデータはこれまで皆無であった壁面垂直方向の速度乱れ、レイノルズ応力および乱流熱流束に関する情報を含み、自然対流の乱流特性解明の手がかりとなる貴重なものであった。また、Cheesewright-Ierokipiotis [21] も、平均速度と温度の測定データを用いて、平均流および熱エネルギーの方程式からレイノルズ応力と乱流熱流束を間接的に算出することを試みている。ただし、壁近傍の平均速度の測定値（特に壁面せん断応力）の精度が悪く、Miyamoto らのデータとあまりよい一致を得ていない。

一方、空気自然対流乱流境界層に関しては、高グラフホフ数における熱伝達率の実験データが望まれていた。Siebers ら [22] は、高温伝熱面（520 °C）について熱伝達率と平均温度分布の測定を行い、グラフホフ数が 2×10^{12} までの乱流境界層の熱伝達率は伝熱面の高さに無関係に一定になること、平均温度分布には対数則が成立することを 1985 年に発表した。

1988 年、Tsuiji-Nagano [1, 2] は熱線および冷線の組合せによる空気自然対流乱流境界層の計測を行った。従来、熱線による計測は精度的に困難とされてきたが [21]、Tsuiji-Nagano は測定誤差の発生原因を調べ、それをできる限り除去する工夫を施し [14, 23]、定量的にも信頼度の高いデータを示した。この研究の中で、壁近傍の平均速度分布から求めた、自然対流の壁面せん断応力分布を初めて明らかにした [1]。これまで、この量の測定は非常に困難とされていたが、自然対流と通常の強制対流の乱流境界層の壁近傍の乱流構造を対比して考察する上では非常に重要な特性量である。そのため、Cheesewright-Mirzai [24] も光ファイバー・レーザー・ドップラー流速計を使用して壁面せん断応力を求めることに労苦した。彼らの結果は、Tsuiji-Nagano [1] のものと非常に一致する。壁面せん断応力の測定結果が得られたことによって、自然対流乱流境界層では強制対流と同じ粘性底層の概念は成立しないこと、熱と運動量の輸送のアナロジも成立しないことが明らかになった [1]。

Tsuiji-Nagano ら [2, 25] が得た測定結果について、平均速度 U^+ 、 V^+ 、平均温度 T^+ および速度と温度の乱れ強さ $\sqrt{u^2}/u_\tau$ 、 $\sqrt{v^2}/u_\tau$ 、 $\sqrt{w^2}/u_\tau$ 、 $\sqrt{t^2}/t_\tau$ を図 1 に示した。図 2 には、レイノルズ応力および流れ方向と壁面方向の乱流熱流束を示した。これらは、計測プローブの空間分解能を高めるため細線を V 字形に折り曲げて製作した V 形熱線 [23] による測定データである。図 1 には通常の I 形熱線による測定値、図 2 には平均速度と温度分布を用いて平均流と熱エネルギー

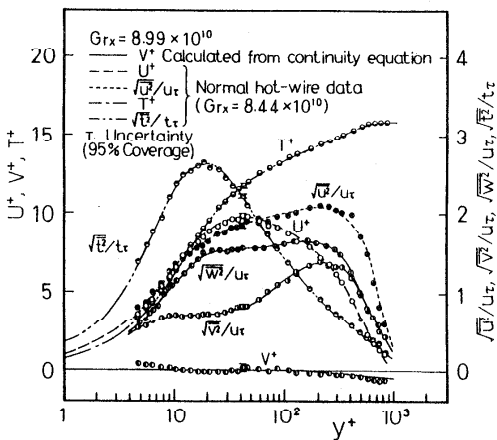


図1 平均速度、温度および速度と温度の乱れ強さ

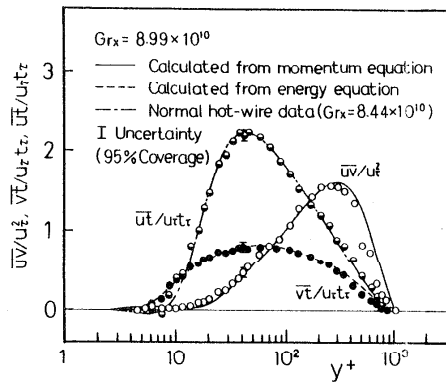


図2 レイノルズ応力と乱流熱流束

ギの方程式から算出した間接測定値を比較したが、いずれの測定値についてもよく一致し、データの信頼性を高めている。また、Miyamotoら [18, 19] の結果も、壁近傍で若干の差異はあるが、基本的に本データとよく一致することが確認された。自然対流乱流境界層の乱流特性の顕著な点は：平均温度には対数分布が現れるが、平均速度には現れない；温度の乱れ強さについては壁近傍でその値が最大となるが、速度乱れの強さはいずれの方向についても最大速度より外側の領域の一致した位置で最大となる；壁近傍ではレイノルズ応力はほぼ零になり、また最大速度の位置とレイノルズ応力が零になる位置は一致しない；流れ方向の乱流熱流束も壁近傍ではほぼ零となることなどである。なお、速度勾配の大きい壁近傍においてレイノルズ応力がほぼ零になることは、閉空間内の乱流自然対流の直接数値シミュレーション [26] によってもその後確認されている。さらに、Tsuji-Nagano [27] は乱流境界層の相似性についても検討し、壁近傍の平均速度と速度の乱れ強さが“層流境界層の相似変数”を用いて整理できることを指摘している。このように自然対流の乱流統計量の挙動は、特に壁近傍で強制対流のそれとは大きく異なっていることが次第に明らかになってきた。

以上は、主に自然対流境界層の基本特性を示す乱流統計量に関する研究についての経緯である。次に乱流構造に関する研究について述べることにするが、上述のように定量的なデータさえ不足していたために、これに関する研究は遅れ、その数も非常に少ない。1978年にCheesewright-Doan [28] が2本の熱電対を用いて遷移域から乱流境界層（空気）の温度場の時空間相関を調べたのが、自然対流の乱流構造に関連する本格的な研究の始まりである。その中で自然対流におけるバースト現象の存在を暗示した。そして、Cheesewright-Dastbaz [29] は、乱流境界層の温度場の時空間相関を再び調べ、条件付きサンプリングにより通常の乱流境界層と類似のバースト現象とストリーク構造を確認したと報告している。さらに、1985年にKitamuraら [30] は、水と空気自然対流乱流境界層について、乱流構造を調べる有力手法である水素気泡法とスモーク・ワイヤ法による速度場の可視化および液晶を用いた伝熱面温度の可視化の実験結果を発表した。この研究でもバースト現象とストリーク構造が観察されたと報告されている。

乱流統計量については、上述のように強制対流のものとはかなり異なる挙動の実験結果が得られている。したがって、通常の乱流境界層と類似の乱流構造が存在するとは無理がある。そこで、Tsuji-Nagano [3, 31] は、多数本の熱電対を用いた温度場の多点同時測定および熱線を用いた速度場の2点同時測定を行い、瞬時温度分布の時間変化および速度場と温度場の時空間相関を調べて乱流構造を検討した。そして、温度場の変化については最大速度位置より外側の領域が支配的であること、バースト現象およびストリーク構造の存在については否定的な結果を得た（このことはスモーク・ワイヤ法による可視化実験 [32] でも確認した）。

しかしながら、上述の定量的な乱流統計量のデータおよび乱流構造に関する検討結果は、気体の自然対流乱流境界層に関するものであることに注意を要する。液体についてのKitamuraら [30] の結果は、水素気泡、液晶による観察と温度変動の自己相関測定に基づく結果であり、信頼度が非常に高いものである。ただし、このような乱流構造が液体の自然対流乱流境界層に存在するとしても、Kitamura-Inagaki [33] が共存対流に関して、自然対流から共存対流へ移行するとき熱伝達率の低下とバースト現象の消滅を観察しているように、通常の乱流境界層と類似ではなく、やはり自然対流特有の乱流構造が存在すると思われるほうが妥当である。この点については、更なる確認と定量的データの蓄積が必要である。

2.2 自然対流乱流境界層の理論的研究

実験的研究と同様に、1972年頃以降の理論的研究の進展について述べることにする。ただし、自然対流乱流境界層に関する信頼できるデータが極めて少なかったという背景があるため、殆ど

の研究が強制対流の知見を参考に進められてきたものである。

理論においても、1972年に行われた Smith [13] の研究は画期的なもので、自然対流の解析にいち早く $k-\varepsilon$ 方程式モデルを採用し、さらには最大速度位置とレイノルズ応力が零になる位置が一致しないという予測（これは Cheesewright [7] の示唆によるものと思われる）のもとに、応力方程式も連立させて解くことを試み、乱流統計量に関する自己の実験データと比較している（2方程式モデルによる自然対流の解析は、Yang-Nee [34] のものが最初であるが、この研究は渦粘性と渦拡散係数に関する方程式を連立したものである）。

その後、比較できる実験データが限られていたせいもあって、Mason-Seban [34] は1方程式モデルによる解析、Cebeci-Khattab [36] および Noto-Matsumoto [37] は零方程式モデルによる解析を行った。1977年、Plumb-Kennedy [38] は $k-\varepsilon$ 方程式モデル、また藤井-藤井 [39, 40] は1方程式モデルに新たに温度変動強度の方程式を連立させ、乱流統計量に関する解析を行った。両者の結果は、温度変動強度と散逸の分布に若干の差異はあるものの基本的に一致し、実験データとの比較も既存の解析よりは良好であった。

一方、George-Capp [41] は、1979年に自然対流におけるスケーリング則に関する考察と解析から平均速度分布と平均温度分布を求めた。この解析結果は、自然対流乱流境界層に関する実験と理論の基準となるものと当時注目を集めたが、研究が進んだ現在では疑問視されている [22, 27, 42, 43]。

Miyamoto ら [18, 19] の実験データが1982年に公表された後、Humphrey-To [44] (あるいは To-Humphrey [45]) は、その実験データを参考に、 $k-\varepsilon$ 方程式および代数応力方程式モデルによる解析を1985年に発表した。ただし、解析の複雑さを避けるため、温度場の解析には Gibson-Launder [46] の簡略化した式を用いた。この研究の特徴は、Boussinesq 近似に基づく従来理論に対し、密度変動を考慮した乱流モデルを構築しようとした点である。しかしながらこのモデルは、結果的に Boussinesq 近似に基づくモデル（例えば Hossain-Rodi [47]）に類似したものになり、乱流統計量の予測についてはまだ不十分であった。

その後、Henkes-Hoogendoorn [48] は、1989年に強制対流に関する既存の乱流モデル（ $k-\varepsilon$ 方程式および代数応力方程式）のいくつかを自然対流乱流境界層の解析に適用し、主に熱伝達率に関してモデルの比較評価を行った。次いで、比較的良好な結果を与えた乱流モデルによる解析結果から、乱流境界層の相似則を検討した [43, 49]（乱流統計量に関する実験値との比較は行っていない）。さらに、Heiss ら [50] および Peeters-Henkes [51] によって理論的研究は、応力-乱流熱流束方程式モデルのレベルまで発展した。1988年に公表された Tsuji-Nagano [1, 2] の実験データと比較すると、乱流統計量についてかなりの程度一致するところまで到達しているが、壁面近くのレイノルズ応力および流れ方向の乱流熱流束についての予測はまだ不十分である。これらの研究も強制対流乱流境界層の知見に強く依存したものであるが、これまで実験データが不備であったことを考えるとやむを得ない。

Nagano-Yin-Tsui [52] は、Tsuji-Nagano [1, 2] のデータを基に、自然対流乱流境界層の壁近傍の特性が通常の強制対流とは異なることに着目して、 $k-\varepsilon$ 方程式と温度場2方程式 [53] を用いた新しいモデルを1989年に提案した。この乱

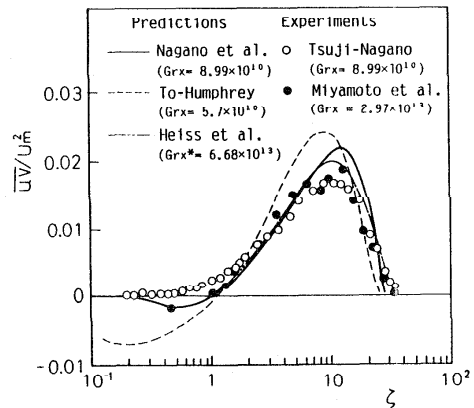


図3 レイノルズ応力に関する解析と実験の比較

流モデルの基幹は、速度変動の挙動に対して浮力効果を考慮したことにある。レイノルズ応力についての解析結果を図3に示した。Heissら [50] の応力-乱流熱流束方程式モデルに比べても遜色のない結果である (Peeters-Henkes [51] の結果は Heissら [50] のものとはほぼ一致する)。また、乱流熱流束の予測については他よりも実験値との一致はよい (図省略)。しかしながら、筆者らは他の乱流統計量の分布も含めて、定量的にはまだ満足できるものとは考えていない。実験に関する知見からみて、自然対流に関する乱流モデルの本質的な改良あるいは新しい乱流モデルの開発が今後必要であろう。

3. 自然対流乱流境界層の乱流エネルギー生成のメカニズム [25, 54]

自然対流乱流境界層が種々の点で強制対流とは異なる特性を有していることが実験的に明らかになるにつれ、その根本原因を追求する研究が今後一層必要となる。このことに関連して境界層の乱流エネルギーの収支を調べ、その結果から筆者らが最近得た知見を以下に述べることにする。

3.1 平均流と速度乱れ成分のエネルギー輸送方程式

浮力により誘起される速度場および温度場の支配方程式において、空気を理想気体とし、Boussinesq 近似および境界層近似を行うことによって、平均流と流れ方向および壁面垂直方向速度乱れ成分のエネルギー $U^2/2$, $\overline{u^2}/2$, $\overline{v^2}/2$ に関する方程式は次のように表される。

$$\underbrace{\frac{U}{2} \frac{\partial U^2}{\partial x} + \frac{V}{2} \frac{\partial U^2}{\partial y}}_{(a)} - \underbrace{\overline{uv}}_{(b)} \frac{\partial U}{\partial y} + \underbrace{\frac{\partial U \overline{uv}}{\partial y}}_{(c)} - \underbrace{\frac{\nu}{2} \frac{\partial^2 U^2}{\partial y^2}}_{(e)} - \underbrace{g\beta U(T - T_\infty)}_{(f)} + \underbrace{E}_{(g)} = 0 \quad (1)$$

$$\underbrace{\frac{U}{2} \frac{\partial \overline{u^2}}{\partial x} + \frac{V}{2} \frac{\partial \overline{u^2}}{\partial y}}_{(a)} + \underbrace{\overline{uv}}_{(b)} \frac{\partial U}{\partial y} + \underbrace{\frac{1}{2} \frac{\partial \overline{u^2} v}{\partial y}}_{(c)} + \underbrace{\frac{1}{\rho} \frac{\partial \overline{p}}{\partial x}}_{(d)} - \underbrace{\frac{\nu}{2} \frac{\partial^2 \overline{u^2}}{\partial y^2}}_{(e)} - \underbrace{g\beta \overline{ut}}_{(f)} + \underbrace{\varepsilon_u}_{(g)} = 0 \quad (2)$$

$$\underbrace{\frac{U}{2} \frac{\partial \overline{v^2}}{\partial x} + \frac{V}{2} \frac{\partial \overline{v^2}}{\partial y}}_{(a)} + \underbrace{\frac{1}{2} \frac{\partial \overline{v^3}}{\partial y}}_{(c)} + \underbrace{\frac{1}{\rho} \frac{\partial \overline{p}}{\partial y}}_{(d)} - \underbrace{\frac{\nu}{2} \frac{\partial^2 \overline{v^2}}{\partial y^2}}_{(e)} + \underbrace{\varepsilon_v}_{(g)} = 0 \quad (3)$$

ここで、

$$E = \nu \left(\frac{\partial U}{\partial y} \right)^2, \varepsilon_u = \nu \left[\left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial u}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial u}{\partial z} \right)^2 \right], \varepsilon_v = \nu \left[\left(\frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial z} \right)^2 \right] \quad (4)$$

式(1)~(3)において、(a)は移流項、(b)は生成項、(c)は乱流拡散項、(d)は速度・圧力勾配相関項、(e)は分子拡散項、(f)浮力による生成項、(g)は散逸項である。

自然対流乱流境界層の測定値 [1, 2] を用いて、上記方程式の各項を評価した。以下に示す結果において、寄与が極めて小さい項は混乱を避けるために図示を省略する。

3.2 平均流と速度乱れ成分のエネルギー収支

図4は、平均流のエネルギー $U^2/2$ の収支を u_T^4/ν で無次元化して表したものである。エネルギーは浮力により生成され、その最大となる位置は $y^+ \simeq 10 \sim 15$ (最大速度位置は $y^+ \simeq 40$) である。このエネルギーは主に、分子拡散によって壁近傍へ輸送され散逸し、乱流拡散により外層(最大速度位置から境界層外縁までの領域)へ運ばれる。また、エネルギーの一部は下流へも輸送される。外層では、平均流のエネルギーが、レイノルズ応力と平均流の変形に関する項を介して乱れのエネルギーの生成に消費される。ところが、内層(壁面から最大速度位置までの領域)では、 $\overline{uv}(\partial U/\partial y) > 0$

で、平均流が僅かではあるが乱れから逆にエネルギーを貰うことになり、通常の強制対流乱流境界層には起こりえない逆エネルギー転換過程が出現する。

速度乱れ成分のエネルギー $\overline{u^2}/2$, $\overline{v^2}/2$ の収支を u_τ^4/ν で無次元化して、図5, 6にそれぞれ示した。図5の $\overline{u^2}/2$ については、浮力によるエネルギーの生成項 $g\beta\overline{ut}$ があり、外層ではこの項と平均流からの生成項が、散逸、乱流拡散および速度・圧力勾配相関項と平衡する。生成されたエネルギーは、速度・圧力勾配相関により他の乱れ成分へ伝達され、乱流拡散によって壁面方向と境界層外縁へ輸送される。ところが、内層の壁近傍では、速度・圧力勾配相関 $\overline{u(\partial p/\partial x)}$ による非常に大きなエネルギーの生成がある。そして、この項が平均流による乱れの負の生成、分子拡散、散逸と平衡する。そのため、乱れのエネルギーがレイノルズ応力と平均流の変形に関する項を介して平均流に転換されることになる。散逸は、局所等方性を仮定して見積もられているために不確かさは大きい。たとえこれが零であるとしても、速度・圧力勾配相関が大きなエネルギーを生成することには変わりがなく、また散逸が大きいとすればこのエネルギーの生成はさらに大きいことになる。通常の強制対流乱流境界層では、速度・圧力勾配相関項は主にエネルギー再分配の役割を担い、新たなエネルギーの生成には殆ど寄与しない。

一方、図3の $\overline{v^2}/2$ の収支には、平均流および浮力に基づくエネルギーの生成はない。外層では強制対流と同様に、エネルギー $\overline{u^2}/2$ から速度・圧力勾配相関項を通して分配されたエネルギーが散逸、乱流拡散のものと平衡する。しかしながら、内層の壁近傍ではやはり、速度・圧力勾配相関 $\overline{v(\partial p/\partial y)}$ による大きなエネルギーの生成が現れる。前述のように、壁近傍の $\overline{u^2}/2$ の速度・圧力勾配相関は、エネルギー生成の役割をなしているため、このエネルギーは決してそれからの再分配ではない。そして、散逸、分子拡散および乱流拡散のエネルギーと平衡し、分子拡散により壁面方向へ、乱流拡散により境界層の外側へエ

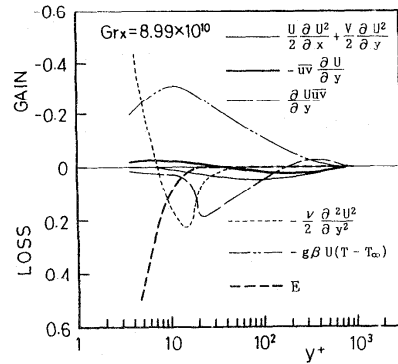


図4 平均流のエネルギー $U^2/2$ の収支

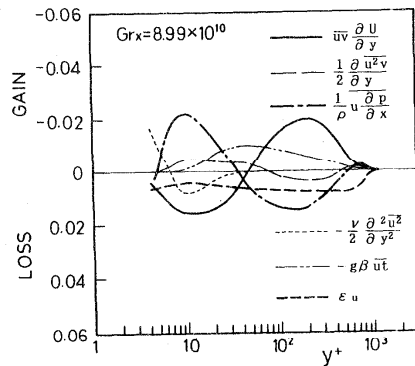


図5 速度乱れのエネルギー $\overline{u^2}/2$ の収支

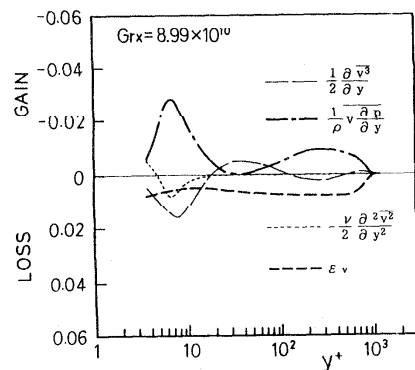


図6 速度乱れのエネルギー $\overline{v^2}/2$ の収支

エネルギーが輸送される。このように、通常の乱流境界層とは著しく異なったエネルギー収支が自然対流乱流境界層の壁近傍で得られるが、これは以下のように説明できる。浮力による流動のエネルギーの発生源は、全て壁面から供給される熱エネルギーにある。流体の持つ全エネルギーのうち、運動エネルギーを差し引いた熱エネルギーの方程式（位置エネルギーを含む）[5]は、境界層近似を適用して次のように表される。

$$U \frac{\partial T}{\partial x} + V \frac{\partial T}{\partial y} + \frac{\partial \overline{vT}}{\partial y} - \alpha \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{1}{c_p} \left\{ g\beta U(T - T_\infty) - \frac{1}{\rho} \left(u \frac{\partial p}{\partial x} + v \frac{\partial p}{\partial y} + w \frac{\partial p}{\partial z} \right) + g\beta \overline{uT} - E - \epsilon \right\} = 0 \quad (5)$$

上式の括弧内の項は他の項に比べると極めて小さく、通常の熱エネルギーの収支においてはこれらの項は無視される。しかしながら、熱駆動の乱流場において、平均流と乱れエネルギーの発生と散逸を考える上では非常に重要な項である。すなわち、これらの項は、式(1)~(3)中の浮力に関する生成項および速度・圧力勾配相関項に対応し、熱エネルギーがこれらの項を通して運動エネルギーに転換されることを表している。すなわち、速度・圧力勾配相関項が熱駆動乱れのエネルギー生成を担っている。しかも、壁近傍の $u^2/2$ と $v^2/2$ に同程度のエネルギー生成があることは、熱エネルギーの転換が空間的な方向性を持たないことから容易に理解される。また図1に示したように、伝熱面幅方向の速度乱れ強さ $\sqrt{w^2}$ の測定値が、壁近傍で速度乱れ強さ $\sqrt{u^2}$ と同程度の大きさになることも納得がいく（速度乱れ v は、壁面によって抑制されるため、他の方向の乱れより小さくなる）。壁近傍におけるエネルギーの転換過程を図7に示したが、このようなエネルギーの転換過程を考えれば、他の乱流境界層では観察されない乱流諸量の分布が壁近傍で出現することも不自然ではない。また図8には、外層におけるエネルギーの転換過程を表した。ここでは、熱エネルギーは、平均流と速度乱れ u に対し、浮力によるエネルギー生成として転換される。そして、平均流のエネルギーがレイノルズ応力を介して、速度乱れ u のエネルギーに転換され、さらに u のエネルギーが速度・圧力勾配相関によって他の速度乱れ v, w のエネルギーに分配される。したがって、外層におけるエネルギーの転換過程は、浮力によるエネルギー生成が付加される点で若干の違いはあるが、基本的には強制対流のものと同じと考えてよい。

以上のエネルギー収支から、自然対流乱流境界層の壁近傍においては通常の乱流境界層とは全く異なる乱流エネルギーの生成過程が存在することが明らかになった。

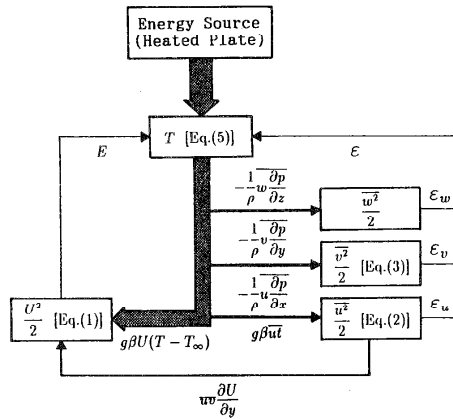


図7 壁近傍におけるエネルギー転換過程

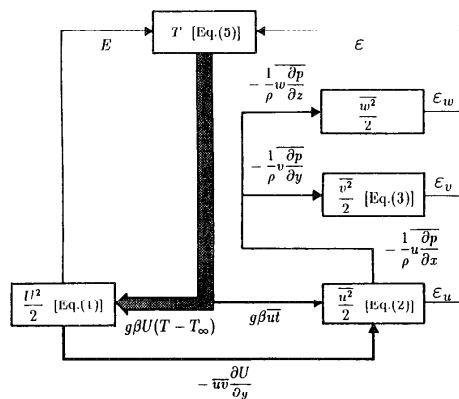


図8 外層におけるエネルギー転換過程

Boussinesq 近似を用いた支配方程式では、熱エネルギーの運動エネルギーへの転換を流れ方向の乱流熱流束という形で一応考慮している。ところが、実際にはそれ以上の乱流エネルギーの生成があるということで、先に述べた理論的研究における Nagano-Yin-Tsuji [52] の乱流モデルは、結果的にはあるがこの事情を反映して、壁近傍の乱流統計量の挙動を比較的良好に予測できるものと考えられる。

4. おわりに

自然対流乱流境界層に関する実験と理論における研究の進展およびこの境界層が現在どこまで調べられているかを本稿で解説した。ようやく信頼できる実験データが得られるようになり、そのデータを用いて求めた乱流エネルギーの収支から、自然対流境界層の壁近傍ではこれまでの強制対流の知見からは全く予測できない現象が生じていることが明らかになった。しかしながら、現象を支配する乱流構造の知見に関しては強制対流のそれと比べると極めて乏しいのが現状であり、それが自然対流乱流境界層についての今後の大きな研究課題となっている。なお、乱流エネルギーの収支以外の温度変動強度、レイノルズ応力、乱流熱流束の収支および速度場と温度場の時間スケールについては文献 [25, 54] に示している。これらのデータは浮力を伴う乱流場に関する新しい理論の構築に有用と思われるので参照頂ければ幸いである。

主な記号

c_p :	流体の定圧比熱	x :	伝熱面に沿う前縁からの距離
Gr_x :	グラスホフ数	y :	伝熱面からの垂直距離
g :	重力の加速度	y^+ :	無次元距離 = $u_\tau y / \nu$
T :	流体の時間平均温度	z :	伝熱面の中心線からスパン方向の距離
T^+ :	無次元温度 = $(T_w - T) / t_\tau$	β :	流体の体膨張係数 = $1/T_\infty$
ΔT_w :	流体温度差 = $T_w - T_\infty$	ζ :	無次元座標 = $-(y/\Delta T_w)(\partial T/\partial y)_{y=0}$
t :	温度乱れ	α :	流体の温度伝導率
t_τ :	摩擦温度	ν :	流体の動粘性係数
U, V :	x および y 方向の時間平均速度	ρ :	流体の密度
U_m :	最大速度	(\quad) :	時間平均値
U^+, V^+ :	無次元速度 = $U/u_\tau, V/u_\tau$	添字	
u, v, w :	x, y および z 方向の速度乱れ	w :	壁面における値
u_τ :	摩擦速度	∞ :	周囲における値

文献

- [1] Tsuji, T. and Nagano, Y., 1988, "Characteristics of a Turbulent Natural Convection Boundary Layer along a Vertical Flat Plate," *Int. J. Heat Mass Transfer*, vol. 31, pp. 1723-1734.
- [2] Tsuji, T. and Nagano, Y., 1988, "Turbulence Measurements in a Natural Convection Boundary Layer along a Vertical Flat Plate," *Int. J. Heat Mass Transfer*, vol. 31, pp. 2101-2111.
- [3] Tsuji, T. and Nagano, Y. and Tagawa, M., 1992, "Experiment on Spatio-Temporal Turbulent Structures of a Natural Convection Boundary Layer," *Trans. ASME, J. Heat Transfer*, vol. 114, pp. 901-908.
- [4] 藤井, 1974, "自由対流熱伝達の基礎," 伝熱工学の進展, vol. 3, 養賢堂, pp. 1-110.
- [5] Gebhart, B., Jaluria, Y., Mahajan, R. L. and Sammakia, B., 1988, "Buoyancy-Induced Flows and Transport," Hemisphere, pp. 547-655.
- [6] Gebhart, B., 1988, "Transient Response and Disturbance Growth in Vertical Buoyancy-Driven Flows," *Trans. ASME, J. Heat Transfer*, vol. 110, pp. 1168-1173.
- [7] Cheesewright, R., 1966, "Natural Convection from a Vertical Plane Surface," Ph.D. Thesis, Univ. of London.

- [8] Cheesewright, R., 1968, "Turbulent Natural Convection from a Vertical Plane Surface," *Trans. ASME, J. Heat Transfer*, vol. 90, pp. 1-8.
- [9] Lock, G. S. H. and Trotter, F. J. deB., 1968, "Observations on the Structure of a Turbulent Free Convection Boundary Layer," *Int. J. Heat Mass Transfer*, vol. 11, pp. 1225-1232.
- [10] Coutanceau, J., 1969, "Convection Naturelle Turbulente sur une Plaque Verticale Isotherme, Transition, Echange de Chaleur et Frottement Parietal, Lois de Repartition de Vitesse et de Temperature," *Int. J. Heat Mass Transfer*, vol. 12, pp. 753-769.
- [11] Vliet, G. C. and Liu, C. K., 1969, "An Experimental Study of Turbulent Natural Convection Boundary Layers," *Trans. ASME, J. Heat Transfer*, vol. 91, pp. 517-531.
- [12] Kutateladze, S. S., Kiriyashkin A. G. and Ivakin, V. P., 1972, "Turbulent Natural Convection on a Vertical Plate and in a Vertical Layer," *Int. J. Heat Mass Transfer*, vol. 15, pp. 193-202.
- [13] Smith, R. R., 1972, "Characteristics of Turbulence in Free Convection Flow past a Vertical Plate," Ph.D. Thesis, Univ. of London.
- [14] 辻, 1991, "自然対流における乱流計測," 伝熱研究, vol. 30, no. 117, pp. 56-65.
- [15] Papailiou D. D. and Lykoudis, P. S., 1974, "Turbulent Free Convection Flow," *Int. J. Heat Mass Transfer*, vol. 17, pp. 161-172.
- [16] Hoogendoorn, C. J. and Euser, H., 1978, "Velocity Profiles in the Turbulent Free Convection Boundary Layer," *Proc. 6th Int. Heat Transfer Conf.*, Toronto, vol. 2, pp. 193-197.
- [17] Bill, R. G. and Gebhart, B., 1979, "The Development of Turbulent Transport in a Vertical Natural Convection Boundary Layer," *Int. J. Heat Mass Transfer*, vol. 22, pp. 267-277.
- [18] Miyamoto, M., Kajino, H., Kurima, J. and Takanami, I., 1982, "Development of Turbulence Characteristics in a Vertical Free Convection Boundary Layer," *Proc. 7th Int. Heat Transfer Conf.*, Munich, vol. 2, pp. 323-328.
- [19] Miyamoto, M. and Okayama, M., 1982, "An Experimental Study of Turbulent Free Convection Boundary Layer in Air along a Vertical Plate Using LDV," *Bull. Japan Soc. Mech. Engrs.*, vol. 25, pp. 1729-1736.
- [20] Cheesewright, R. and Ierokipiotis, E., 1982, "Velocity Measurements in a Turbulent Natural Convection Boundary Layer," *Proc. 7th Int. Heat Transfer Conf.*, Munich, vol. 2, pp. 305-309.
- [21] Cheesewright, R. and Ierokipiotis, E., 1984, "Measurements in a Turbulent Natural Convection Boundary Layer," *Proc. 1st U. K. Conf. Heat Transfer*, Leeds, vol. 2, pp. 849-856.
- [22] Siebers, D. L., Moffatt R. F. and Schwind, R. G., 1985, "Experimental, Variable Properties Natural Convection from a Large, Vertical, Flat Surface," *Trans. ASME, J. Heat Transfer*, vol. 107, pp. 124-132.
- [23] Tsuji, T. and Nagano, Y., 1989, "An Anemometry Technique for Turbulence Measurements at Low Velocities," *Exp. Fluids*, vol. 7, pp. 547-559.
- [24] Cheesewright, R. and Mirzai, M. H., 1988, "The Correlation of Experimental Velocity and Temperature Data for a Turbulent Natural Convection Boundary Layer," *Proc. 2nd U. K. Conf. Heat Transfer*, Glasgow, vol. 1, pp. 79-89.
- [25] Tsuji, T. and Nagano, Y. and Tagawa, M., 1991, "Thermally Driven Turbulent Boundary Layer," *Proc. 8th Symp. Turbulent Shear Flows*, Tech. Univ. of Munich, Munich, vol. 2, pp. 24.3.1-24.3.6.
- [26] Paolucci, S., 1990, "Direct Numerical Simulation of Two-Dimensional Turbulent Natural Convection in an Enclosed Cavity," *J. Fluid Mech.*, vol. 213, pp. 229-262.
- [27] Tsuji, T. and Nagano, Y., 1989, "Velocity and Temperature Measurements in a Natural Convection Boundary Layer along a Vertical Flat Plate," *Exp. Thermal Fluid Sci.*, vol. 2, pp. 208-215.
- [28] Cheesewright, R. and Doan, K. S., 1978, "Space-Time Correlation Measurements in a Turbulent Natural Convection Boundary Layer," *Int. J. Heat Mass Transfer*, vol. 21, pp. 911-921.
- [29] Cheesewright, R. and Dastbaz, A., 1983, "The Structure of Turbulence in a Natural Convection Boundary Layer," *Proc. 4th Symp. Turbulent Shear Flows*, Karlsruhe, pp. 17.25-17.30.
- [30] Kitamura, K., Koike, M., Fukunaka, I. and Saito, T., 1985, "Large Eddy Structure and Heat Transfer of Turbulent Natural Convection along a Vertical Flat Plate," *Int. J. Heat and Mass Transfer*, vol. 28, pp. 837-850.
- [31] 辻・長野・田川・青山, 1989, "自然対流乱流境界層の時空間構造," 日本機械学会論文集, B, vol. 56, no. 527, pp. 2019-2026.

- [32] 辻・股・長野, 1989, “自然対流乱流境界層の構造特性,” 第26回日本伝熱シンポジウム, 仙台, vol. 3, pp. 734-736.
- [33] Kitamura, K. and Inagaki, T., 1987, “Turbulent Heat and Momentum Transfer of Combined Forced and Natural Convection along a Vertical Flat Plate - Aiding Flow,” *Int. J. Heat and Mass Transfer*, vol. 30, pp. 23-41.
- [34] Yang, K. T. and Nee, V. W., 1970, “Structure of Turbulent Free-Convection Boundary Layers along a Vertical Plate,” *Heat Transfer 1970*, Elsevier, Amsterdam, vol. 4, NC 1.12, pp. 1-11.
- [35] Mason, H. B. and Seban, R. A., 1974, “Numerical Predictions for Turbulent Free Convection from Vertical Surfaces,” *Int. J. Heat Mass Transfer*, vol. 17, pp. 1329-1336.
- [36] Cebeci, T. and Khattab, A., 1975, “Prediction of Turbulent-Free-Convection-Heat Transfer from a Vertical Flat Plate,” *Trans. ASME, J. Heat Transfer*, vol. 97, pp. 469-471.
- [37] Noto, K. and Matsumoto, R., 1975, “Turbulent Heat Transfer by Natural Convection along an Isothermal Vertical Flat Surface,” *Trans. ASME, J. Heat Transfer*, vol. 97, pp. 621-624.
- [38] Plumb, O. A. and Kennedy, L. A., 1977, “Application of a $K - \epsilon$ Turbulence Model to Natural Convection from a Vertical Isothermal Surface,” *Trans. ASME, J. Heat Transfer*, vol. 99, pp. 79-85.
- [39] 藤井・藤井, 1977, “鉛直面上の乱流自由対流に関する数値解析 (第1報, 空気の場合),” 日本機械学会論文集, 2, vol. 43, no. 374, pp. 3825-3834.
- [40] 藤井・藤井, 1978, “鉛直面上の乱流自由対流に関する数値解析 (第2報, 乱流の長さスケール, プラントル数および伝熱加熱条件の影響),” 日本機械学会論文集, 2, vol. 44, no. 384, pp. 2797-2807.
- [41] George, W. K. Jr. and Capp, S. P., 1979, “A Theory for Natural Convection Turbulent Boundary Layers Next to Heated Vertical Surfaces,” *Int. J. Heat Mass Transfer*, vol. 22, pp. 813-826.
- [42] Cheesewright, R., 1986, “The Scaling of Turbulent Natural Convection Boundary Layer in the Asymptotic Limit of Infinite Grashof Number,” Preprint Euromech. Colloquium 207, Delft, pp. 17-18.
- [43] Henkes, R. A. W. M. and Hoogendoorn, C. J., 1990, “Numerical Determination of Wall Functions for the Turbulent Natural Convection Boundary Layer,” *Int. J. Heat Mass Transfer*, vol. 33, pp. 1087-1097.
- [44] Humphrey, J. A. C. and To, W. M., 1985, “Numerical Prediction of Turbulent Free Convection along a Heated Vertical Flat Plate,” *Proc. 5th Symp. Turbulent Shear Flows*, Cornell Univ., New York, pp. 22.19-22.25.
- [45] To, W. M. and Humphrey, J. A. C., 1986, “Numerical Simulation of Buoyant, Turbulent Flow - 1. Free Convection along a Heated, Vertical, Flat Plate,” *Int. J. Heat Mass Transfer*, vol. 29, pp. 573-592.
- [46] Gibson, M. M. and Launder, B. E., 1978, “Ground Effects on Turbulent Transport of Heat and Momentum,” *J. Fluid Mech.*, vol. 86, pp. 491-511.
- [47] Hossain, M. and Rodi, W., 1982, “A Turbulence Model for Buoyant Flows and Its Application to Vertical Buoyant Jets,” HMT, Turbulent Buoyant Jets and Plumes, W. Rodi, ed., Pergamon Press, Oxford, vol. 6, pp. 121-178.
- [48] Henkes, R. A. W. M. and Hoogendoorn, C. J., 1989, “Comparison of Turbulence Models for the Natural Convection Boundary Layer along a Heated Vertical Plate,” *Int. J. Heat Mass Transfer*, vol. 32, pp. 157-169.
- [49] Henkes, R. A. W. M., 1991, “Scaling of the Turbulent Natural-Convection Boundary Layer along a Hot Vertical Plate,” *Proc. 8th Symp. Turbulent Shear Flows*, Tech. Univ. of Munich, Munich, vol. 2, pp. 24.2.1-24.2.6.
- [50] Heiss, A., Straub, J. and Catton, I., 1988, “Application of Turbulence Models to Natural Convection from a Vertical Isothermal Plate,” *Proc. 25th National Heat Transfer Conf.*, Houston, vol. 2, pp. 181-190.
- [51] Peeters, T. W. J. and Henkes, R. A. W. M., 1992, “The Reynolds-Stress Model of Turbulence Applied to the Natural-Convection Boundary Layer along a Heated Vertical Plate,” *Int. J. Heat Mass Transfer*, vol. 35, pp. 403-420.
- [52] Nagano, Y., Yin, Y. and Tsuji, T., 1989, “Numerical Prediction of Turbulent Buoyant Flows,” *Proc. 7th Symp. Turbulent Shear Flows*, Stanford Univ., Stanford, vol. 1, pp. 12.1.1-12.1.6.
- [53] Nagano, Y. and Kim, C., 1988, “A Two-Equation Models for Heat Transport in Wall Turbulent Shear Flows,” *Trans. ASME, J. Heat Transfer*, vol. 110, pp. 583-589.
- [54] 辻・長野・西尾・尾鷲, “自然対流乱流境界層のエネルギー生成機構,” 日本機械学会論文集, B, vol. 57, no. 543, pp. 3879-3884.
- [55] Monin, A. S. and Yaglom, A. M., 1971, “Statistical Fluid Mechanics,” MIT Press, Cambridge, vol. 1, pp. 52-59.

金属の凝固伝熱研究の進展

大中逸雄（阪大工）

1. はじめに

凝固に関する伝熱学的研究は、氷の生成や溶岩の凝固などの自然現象の他に、4000年の歴史を有する鑄造、現代製鉄工業の発展に大きく貢献している連続鑄造、エレクトロニクス産業を支える半導体の結晶成長、食品の冷凍保存など、種々の産業とも深く関係しているため、多くの研究がこれまでになされてきた。

これらの研究は、(1)非線形問題あるいは移動境界問題の一つとして、主に数学的あるいは物理的興味からなされたものと、(2)鑄造プロセスなどの工業的応用を目的としてなされたもの、の二つに大別される。本稿では、これらの研究の過去を振り返り、今後の方向についての私見を述べる。ただし、筆者の興味は、上記(2)の工業的応用が主であり、工学的立場からの見解であることをお断りしておく。

2. ステファン問題の行き詰まり

1891年 Stefan は北極での氷の生成に関連し、融点温度の半無限液体が固体に変化する問題の厳密解を発表している（固相表面温度は一定、固相、液相の物性値はそれぞれ一定とし、熱伝導による熱移動のみを考慮）。また、Neumann は同様の問題の解を1860年代の講義ノートに記載している[1]。これらが、凝固伝熱研究の始まりと言って良いであろう。

その後、この種のいわゆるステファン問題の解析解が追求され、半無限固体に完全接触した半無限純物質の凝固問題（Schwarz[2]）や、半無限物体間に熱抵抗のある場合（Garciaら[3]）などが取り扱われたが、基本的な解は、Stefan-Neumann の解と同じで、基本的な進展はほとんどなかったと言って良いであろう。

実際の合金の凝固現象は、このような簡単なものではないが、この<熱伝導モデル>は、凝固現象の基本モデルとも言うべきもので、これらの成果がモジュラス法として、現在に至るまで、鑄造技術に利用されている[4]。すなわち、Chvorinoff[5]は、鑄造品の凝固問題を、鑄造品の複雑な形状効果を無視して、冷却表面積(S)と凝固体積(V)の等しい次元問題と近似すると共に、Neumann の解を利用して、凝固時間(t_f)を推定する、いわゆるクボリノフの式($t_f \propto M^2$, $M(\text{モジュラス})=V/S$)を導いた。

なお解析解が行き詰まったため、積分法などの近似解がその後提案されたが（Goodman[6]）、実際の解を求めるには、数値計算が必要であるため、実際にはほとんど利用されていない。

3. 凝固現象の解明

一方、このような凝固熱伝導問題に関する研究以外に、凝固現象そのものを詳細に観察し、その機構を解明する研究が顕微鏡などの観察手法の進歩や半導体用単結晶材料製造の必要性などと共に進展した。特に1950、60年代の進歩は大きく、デンドライト凝固の特徴、その生成機構の解明、溶質分布の機構、ポロシティ欠陥の生成機構などが追求された (Smith[7], Chalmers[8], Flemings[9])。

特に、樹枝状に結晶が成長するデンドライト成長は、実用合金材料のみならず、雪や氷の結晶成長などの自然現象とも関係している。そして、複雑なデンドライト形状がなぜ生じるのかという、科学的な興味から、工学研究者のみならず物理科学研究者の興味を引いており、現在でもかなり活発に研究が行われている (Langer[10], Kesslerら[11], 宮田ら[12])。

4. コンピュータの出現と数値解析法の発展

解析的手法では、単純な一次元熱伝導凝固問題しか取り扱うことができないため、その後、より複雑な形状、境界条件、初期条件を取り扱えるアナログシミュレーションが1940年代に検討された (Paschkis[13])。しかし実用的に利用されるには至らなかった。これは、2次元解析はともかく、3次元解析になるとコストが高く、種々の形状への適用性が実用的でないためである。

1950年代に入ると、コンピュータが使用できるようになり、1954年にはテイラー展開差分法によるインゴットの凝固解析が行われた (Sarjant[14])。ただし、当時のコンピュータは記憶容量と計算速度が十分ではなく、極めて単純な形状の場合にしか適用されなかった。

しかしコンピュータの進歩は早く、1960年代に入ると、より複雑な形状と境界条件の場合も取り扱えるようになった。また、解析領域を単に液相域と固相域に二分するのではなく、固液共存域をも考慮するようになった。さらに、単なるテイラー展開差分法ではなく、不十分ではあったが、後述の直接差分法的方法により、複雑な形状の鋳造品の凝固解析が行われた (Henzel[15])。我国でも1960年代後半には、差分法による数値解析法、潜熱の取扱い法、固液界面の推定法などが種々検討された (新山[16], 梅村[17], 片山ら[18], 齋藤[19])。

1970年代以降になると、テイラー展開差分法以外に、より複雑な形状を考慮しやすい有限要素法 (Soliman[20], Ohnaka[21])、コントロールボリューム法 (Patankar[22])、直接差分法 (大中[23])、境界要素法 (Hongら[24])などが種々検討された。例えば、1972年には有限要素法による凝固解析が報告されたが[20]、計算時間や記憶容量などの観点からむしろ否定的な意見であった。一方著者[21]も、異なった観点から独立に有限要素法を凝固問題に適用し、問題点を明らかにするとともに、より利用しやすい直接差分法[4, 23]を提案するきっかけとなった。

しかし、1970年代は一般的には差分法の全盛期であり、連続鋳造などの簡単な形状への伝熱研究 Vol. 32, No. 124

適用、潜熱蓄熱装置の開発に関連した解析など、簡単な境界条件の場合の解析が行われた。それでも、少し形状が複雑になると、入力データを作製するのに1、2週間かかることはめづらしくなく、さらに結果がでるまでに、大学の大型計算機センターでも1、2週間かかるという有り様であった。このため、実際に利用できるのは大学や大企業に限定された。また入力データをコンピュータを利用して製作する、プリプロセッサの重要性が認識されだした（大中ら[25]）。

5. 凝固シミュレーションへの展開

1980年代になると凝固現象がさらに詳細に解明され、またコンピュータが一層進歩したため、固液共存域での凝固収縮流や溶質対流をダルシー流れと仮定した<ダルシーモデル>や、液相の熱対流を層流とした<層流モデル>、あるいは、結晶や気泡の核生成と成長、マイクロ偏析、凝固層の変形などを考慮した解析が行われるようになった（大中[26]）。また、単結晶の成長や溶接などでも、表面張力の変化によるマランゴニ対流や、磁場の影響などを考慮した、より精密な解析と流動挙動の観察が行われるようになった（小林[27]、Munakataら[28]、柿本ら[29]）。このような解析は、むしろコンピュータによる<凝固現象のシミュレーション>と呼ぶべきものである。

一方、<熱伝導モデル>は、単純なモデルではあるが、実用的なモデルであり、コンピュータハードウェアの進歩とともにさらに発展し、有限差分法あるいは直接差分法および有限要素法により、複雑な形状の鋳造品の3次元解析が実用的に可能になった。これは、利用しやすい（ユーザーフレンドリーな）プリプロセッサが開発され、比較的容易に（数時間内に）入力データが製作でき、大型コンピュータを使用しなくても、ワークステーションやパーソナルコンピュータでかなりの解析が可能になったためである。さらに、固液共存域に関する研究が進み、固相率分布、温度勾配などから、引巣欠陥がかなり実用的に推定できることが明らかになったためでもある。なお、この間、有限要素法などによる汎用熱解析プログラムが主に米国で開発され、凝固解析への応用が検討されたが、実用的ではなく、熱伝導凝固解析専用のソフトウェアが実際には使用されている（Ohnaka[30]）。このような研究は主に、1970年代の研究を実用化したもので、凝固あるいは鋳造工学研究者が主体となっている。

6. 複雑なシステムとマイクロへの挑戦

1990年代に入り、ますます複雑なシステムのシミュレーションが行われている。このため、一般的な解析は少なくなり、対象を限定した以下のような研究が行われている。

(1) 鋳造プロセス

凝固を含む、鋳造過程の全てをコンピュータシミュレーションしようとする努力がなされている。特に、複雑な鋳型キャビティを熔融金属が流動充填し、凝固する湯流れシミュレーション

ン(図1)、繊維強化複合鋳造法のシミュレーション(図2、Michaudら[31])、マクロ偏析のシミュレーション(Shahaniら[32])、ポロシティ欠陥の直接シミュレーションによる定量的評価方法、固相流動を考慮した凝固組織の推定(大中[33])などが主な課題となっている。なお湯流れシミュレーションは一部実用化されており、層流近似でかなりのシミュレーションが現在可能になっているが、その精度については、まだ問題がありそうである。

また、米国では固相と液相が共存する場における運動量保存則の議論や、ステファン問題の逆解析も行われている(Vollerら[34], Benardら[35])。

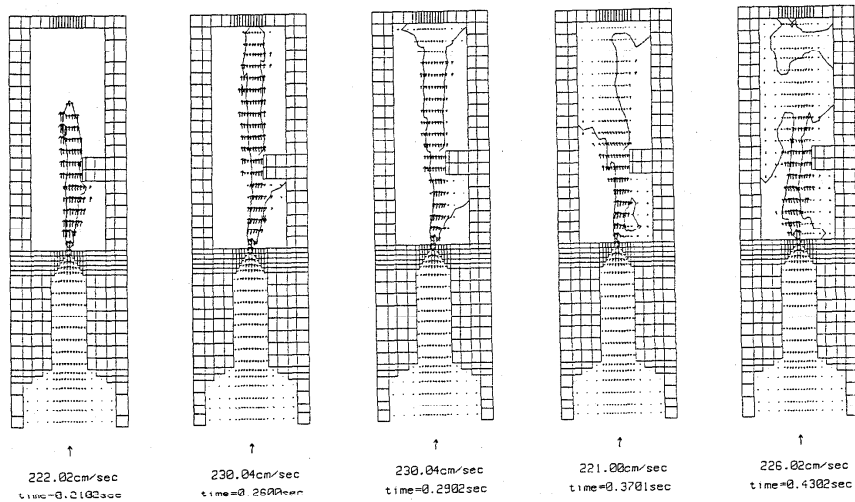


図1. アルミニウムダイカストの湯流れシミュレーション例(大中, 朱ら)

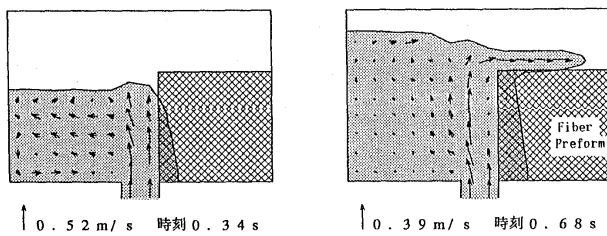


図2. 繊維強化複合鋳造法のシミュレーション例(大中, 朱ら)

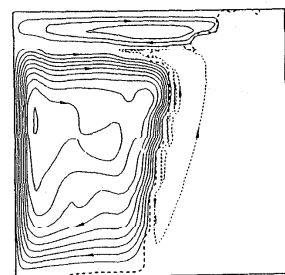


図3. 拡散2重層のシミュレーション例(Yooら[39])

連続鋳造や精錬過程では、溶湯流動、温度変化、非金属介在物の浮上、凝固、凝固層の変形などがシミュレートされている。この場合も形状は簡単であるが、乱流状態が多いことが問題
伝熱研究 Vol. 32, No. 124

となっている (Shyyら [36])。

なお、熱伝導モデルによるシミュレーションは実用化されているものの、直交分割を利用したソフトが多く、また、非直交分割ソフトでは分割に要する時間が長すぎ、実用的ではない。CAD ソフトを利用し、短時間に非直交分割が可能なプリプロセサーの開発が望まれている。

(2) 単結晶プロセス

形状は単純であるが、鋳造品より、より高品質の製品が要求されるため、熱対流、溶質対流、マランゴニ対流などをシミュレートし、温度分布、温度勾配、濃度分布、残留応力などを求める研究が進んでいる (今石 [37])。しかし、これらの研究が、鋳造の場合のように結晶製造に直接的に利用される状態には至っていないようである。

(3) ミクロシミュレーションおよびフラクタル理論の応用

固液界面でのミクロな物質移動、温度分布などを考慮するのみならず、原子の移動を考慮したシミュレーションやフラクタル理論の応用が行われるようになりつつある (Meakin [38])。特にファセット凝固などの機構を明らかにすることは高温超伝導材料などの新材料の開発に重要である。

(4) その他

米国では、固液共存域での流動 (熱および溶質対流) に関する研究が多く (図 3、Yooら [39])、インゴット鋳造を対象としているが、このような実生産はあまりないのではなからうか。この他、スプレー成形法のシミュレーション (Trapagaら [40]) など新しいプロセスのシミュレーションも行われている。

7. 今後の展開

基礎的な研究結果が、工学や工業にそのまま利用される時代は終わりに近づいている。例えば、米国における固液共存域での流動解析は複雑形状の鋳造品への適用は経済的に困難であり、鋳造用には新たなシミュレーション手法の開発が必要である。この関係は、軍需研究で開発された技術が、民生用には適用できない場合が多いのと似た関係にある。また、単純なモデル化の時代も過去のものとなりつつあり、現象を良く理解して、目的に応じたモデル化をすることが必要である。このためには、現象に関するより詳細な情報が必要である。さらに、微分方程式が分かっている、形状が簡単であれば、ほとんどの問題が数値解析できる。残るのは、境界条件、初期条件と物性値だけである。単ロール法、ストリップ鋳造やレーザーによる表面改質、その他の新材料開発、新プロセスの解析は、多くの場合、物性値と境界条件 (特に、溶湯と鋳型間などの熱伝達係数) の問題と言っても良い。しかし、物性値の測定は金と時間をかければできるが、資金の調達と興味を持つ人材が少ないのが問題である。また、溶湯と鋳型間の熱伝達係数などに関する研究も一般化が困難で、研究しにくいテーマである。

従って、今後の研究は、以下のようなものとなるであろう。

(1) 複雑な現象の観察とシミュレーション

研究対象、目的を明確にして、実際の複雑な現象を明らかにしつつ、シミュレーションアルゴリズムを開発する研究が望まれる。これは既に鑄造工学研究者などが行っている方法で、工業的に最も有用である。ただし、この場合、開発したソフトウェアが実際にも容易に利用されるように、フォーマットを統一するなどの何らかの工夫が望まれる。ソフトウェアの実用化は容易ではなく、大学でのほとんどのソフトウェア成果は死んでいると言って良いだろう。

(2) 原子レベルでのシミュレーション

マクロな現象の理解はかなり進んだが、原子レベルではまだ未知のことが多い。分子軌道法、分子動力学法、モンテカルロ法などで、原子一個一個の挙動を追跡できるようになりつつある。今後、凝固現象の原子レベルでのシミュレーションが進歩するであろう。そして、将来は、単にプロセスの制御ではなく、新材料の創製に寄与できるようにならねばならない。

(3) 新しいプロセスの提案

多くの場合、熱や物質移動の機構が分からなくても、製品はできる。従来解析は効率改善や事後の説明にしか役立たないことが多かった。新たな発展には新たなプロセスの提案が必要である。このためには、単なる解析、シミュレーションで満足してはならない。

8. おわりに

コンピュータの進歩は凝固伝熱研究に極めて大きい影響を与えた。今後の研究もコンピュータ抜きでは有り得ないであろう。事実の観察とコンピュータシミュレーションの両輪がバランスして、新たな発展が生まれるであろう。しかし、産業におけるプロセスはますます高度化し、複雑なシステムとなりつつある。そのシステムを大学などで解析するのは容易ではない。産学の理想的協力か、大学はもっと先を見た萌芽的研究に重点を置かざるを得なくなるのではなかろうか。

9. 文献

- [1] Carslaw, H.S. and Jaeger, J.C., "Conduction of Heat in Solid", Oxford (1959), 282
- [2] Schwarz, C., "Die rechnerische Behandlung der Abkühlungs- und Erstarrungsvorgänge bei flüssigem Metall. I", Arch. Eisenhüttenwes., 5 (1931), 139-148
- [3] Garcia, A., Clyne, T.W., and Prates, M., "Mathematical Model for the Unidirectional Solidification of Metals: II Massive Models", Met. Trans., 10B (1979), 85-92
- [4] 大中逸雄: コンピュータ伝熱・凝固解析入門、丸善 (1985)
- [5] Chworinoff, N., "Theorie der Erstarrung von Gussstücken", Gießerei, 27 (1940), 177-186
- [6] Goodman, T.R., "The Heat-Balance Integral and Its Application to Problems Involving", 伝熱研究 Vol. 32, No. 124

- ing a Change of Phase", Trans. ASME, 80(1958), 335-342
- [7] Smith, C.S., "History of Metallography". University of Chicago Press. (1960)
- [8] Chalmers, B., "Principles of Solidification". John Wiley & Sons, Inc. (1964)
- [9] Flemings, M.C., "Solidification Processing". McGraw-Hill. (1974)
- [10] Langer, J.S., "Instabilities and pattern formation in crystal growth". Rev. Modern Physics. 52(1980), 1-28
- [11] Kessler, D.A., Koplik, J., and Levine, H., "Pattern selection in fingered growth phenomena". Adv. Phys. 37(1988), 255-339
- [12] 宮田保教、鈴木俊夫、"最近のデンドライト形態論について"、日本金属学会報、27(1988), 540-547
- [13] Paschkis, V., "Studies on Solidification of Castings" Trans. AFS, 53(1945), 90-101
- [14] Sarjant, R. J. and Slack, M. R., "Internal temperature distribution in the cooling and reheating of steel ingots", J. Iron and Steel Inst., 177(1954), 428-444
- [15] Henzel, J. G. and Kevearian, J., "The Theory and Application of a Digital Computer in Predicting Solidification Patterns", J. of Metals, 17(1965), 561-568
- [16] 新山英輔、"鋳物の凝固速度の計算方法(その2)"、鋳物、43(1971), 28-38
- [17] 梅村晃由:"鋳物の凝固に関する伝熱論的研究の展望"、鋳物、46(1973), 1068-1077
- [18] 片山功蔵、齋藤彬夫、服部賢、"非定常熱伝導の数値解法"、伝熱工学の進展3、養賢堂、(1974), 111-209
- [19] 齋藤武雄、"数値伝熱学"、養賢堂、(1986)
- [20] Soliman, J. I. and Fakhroo, E. A., "Finite Element Solution of Heat Transmission in Steel Ingots", J. Mech. Eng. Science, 14(1972), 19-24
- [21] Ohnaka, I. and Fukusako, T., "Calculation of Solidification of Molten Metal by Finite Element Method", Tech. Rept. Osaka Univ., 24(1974), 461-475
- [22] Patankar, S. V., "Numerical Heat Transfer and Fluid Flow", Hemisphere Pub. (1980)
- [23] 大中逸雄、"非定常熱移動問題に対する数値計算法の分類と改良内節点法"、鉄と鋼、65(1979), 1737-1746
- [24] Hong, C. P., Umeda, T., and Kimura, Y., "Numerical Models for Casting Solidification: Part I, The Coupling of the Boundary Element and Finite Difference Methods for Solidification Problems", Met. Trans. B., 15B(1984), 91-99
- [25] 大中逸雄、長坂悦敬、福迫達一、"内節点法による鋳物の3次元凝固解析"、鋳物、53(1981), 376-382
- [26] 大中逸雄:"凝固現象のコンピュータシミュレーション"日本金属学会会報、30(1991), 208-216、および"金属材料の凝固とコンピュータシミュレーション"、

伝熱研究,30(1991),14-22

- [27] 小林信之, " 引上げ法におけるメルト中の流れ", 日本結晶成長学会誌,9(1982),1-19
- [28] Munakata,T.,and Tanazawa,I., "Onset of Oscillatory Flow in A Czochralsky Growth Melt and Its Suppression by Magnetic Field",J.Crystal Growth,106(1990),566-576
- [29] 柿本浩一、江口実、渡辺久夫、日比谷孟俊, " 溶融半導体からの結晶成長における流れの直接観察", 日本結晶成長学会誌,15(1988),71-77
- [30] Ohnaka,I., "State of the Art of computer simulation of Casting in Japan", Numerical Simulation of Casting Solidificaion in Automotive Applications, ed.by C.Kim, and C-W.Kim,TMS(1991),35-43
- [31] Michaud,V.J.and Mortensen,A., "Infiltration of Fiber Preforms by a Binary Alloy: Part II.Further Theory and Experiments",Met.Trans.A,23A(1992),2263-2280
- [32] Shahani,H.Amberg,G.,and Fredriksson,H., "On the formation of Macrosegregations in Unidirectionally solidified Sn-Pb and Pb-sn Alloys",Met.Trans.A.,23A(1992),2301-2311
- [33] Ohnaka,I., "Modeling of fluid flow and solidification in casting", to be published in "Modeling of Casting, Welding and Advanced Solidification Processes, VI", TMS(1993)
- [34] Voller,V.R., "Enthalpy method for inverse stefan problems", Numerical Heat Transfer,21(1992),41-55
- [35] Benard,C.,and Afshari,A., "Inverse Stefan Problem: Tracking of The Interface Position From Measurements on The Solid Phase", Int.J. Numer.Methods Eng., 35(1992),835-851
- [36] Shyy,W.,Pang,Y.,Hunter,G.B.,Wei,D.Y.,and Chen,M.-H., "Modeling of turbulent transport and solidification during continuous ingot casting", Int.J.Heat Mass Transfer, 35(1992),1229-1245
- [37] 今石宣之, " チョクラルスキー法", 伝熱研究,30(1991),23-28
- [38] Meakin,P., "The Growth of Fractal Aggregates and Their Fractal Measures",Phase Transitions and Critical Phenomena,Vol.12,ed by C.Domb and J.L.Lebowitz, Academic Press(1988),336-489
- [39] Yoo,H.,and Viskanta,R., "Effect of anisotropic permeability on the transport process during solidification of a binary mixture", Int.J.Heat Mass Transfer, 35(1992),2335-2346
- [40] Trapaga,G.,and Szekely,J., "Mathematical Modeling of the Isothermal Impingement of Liquid Droplets in Spraying Processes",Met.Trans. B,22B(1991),901-914

1. 緒言

沸騰は，人類が火の使用を手にして以来，生活に密着した現象としてなじみの深いものであるが，学問の対象として注目され始めたのは1930年代からと言ってよく，特に1940年以降は原子動力その他の実用上の必要性から研究が急激な進展を見せた．しかし，図1（沸騰に関連した主要研究論文数の年代別推移）に示すように，およそ半世紀の歴史を経た1980年から現在にかけて少なくとも量的にはやや頭打ちの傾向が見られる．図2の日本伝熱シンポジウムにおける沸騰関連の講演発表数の推移を見ても同様の傾向が認められ，また総論文数に対する比率（実折線）が1980年を境に下降気味にある．この現実を一学問分野のたどる盛衰の通例として冷ややかに捉えるともできようが，沸騰研究が本当に終焉へ向かっていることを示しているのか，あるいは単に研究の質的な停滞を意味しているものなのかを見極めることは，沸騰研究に従事している我々のみならず将来にわたり研究を継続しようとしている新進の研究者にとっては極めて本質的かつ重要な問題である．こうした問題点のあることを念頭に置いて，ここでは沸騰研究の現在までの到達点について概観した後，将来に対する私見を述べてみたい．

2. 沸騰研究の進展状況

沸騰は熱や流体の流れに相変化が介在した複雑な伝熱現象であり，高い熱伝達が得られることから応用も広く，研究も極めて多方面にわたっている．過去において現象の特性，熱伝達の機構などの基礎的事項に関心が払われていた沸騰の研究は，先ず原子力，次に省エネルギー，そして昨今は伝熱促進技術や各種先端技術に関連した実用問題へとその対象を移しつつ現在に至っている．周知のように沸騰においては，加熱面の温度に応じて核沸騰，遷移沸騰，膜沸騰の三モード（三形態）が現れ，各モードで熱伝達の特性あるいは加熱面上の気液挙動に明瞭な違いが見られる．そして，モード間の境界に位置するのが限界熱流束（バーンアウト）および極小熱流束であり，沸騰曲線からも明かなように沸騰熱流束の極大および極小を与え，加熱あるいは冷却問題に関連して実用的にも重要な特性点となっている．したがって沸騰熱伝達を論じる際は（1）

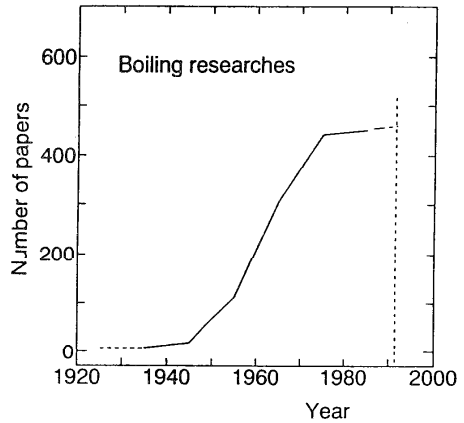


図1 沸騰関連主要論文数の時代別推移

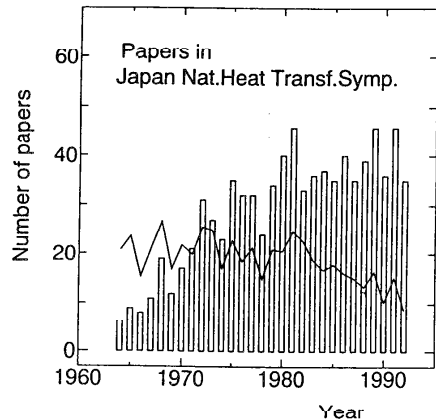


図2 日本伝熱シンポジウム沸騰関連論文数推移（折線は総論文数に対する比率の変遷）

核沸騰 (2) 限界熱流束 (3) 遷移沸騰 (4) 極小熱流束 (5) 膜沸騰と分類するのが通例であるが、図3はこの5つの分野について研究の年代別推移(主要論文概数)を見たものである。研究初期において活発であった核沸騰および限界熱流束の研究がここ最近減少あるいは減少気味であるのに対し、遷移沸騰、極小熱流束、膜沸騰の研究が相対的に増加傾向にある。ただし、研究内容をやや強引であるが基礎的なもの(メカニズム探求)と応用的なものに分けてみると、たとえば図4のようであり、遷移沸騰を除くと基礎研究はいずれもその数が減少している。沸騰の研究が量的には減じていないにも拘らず質的には停滞気味とする意見の一端にはこのことが原因しているように思われる。一方、図5は応用研究の種類別年代推移である⁽¹⁾。1970年以前から1980年代にかけて原子力に関連した研究が盛んであり、近年は先端技術に関連したもの、伝熱促進技術に関わる研究が活発になっていることが見てとれる。

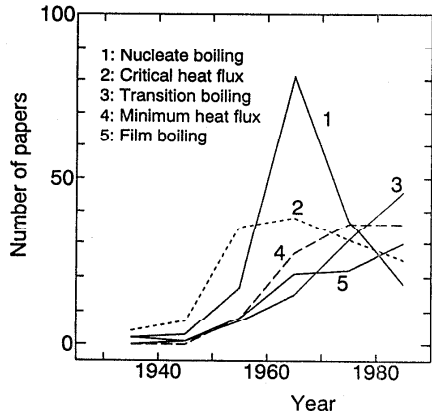


図3 沸騰の分野別論文数の時代別推移

3. 沸騰研究の現在と問題点

紙数の関係で、ここではプール沸騰の熱伝達機構あるいはモデルに話を限り、従来の研究を概観して問題点を指摘したい。プール沸騰は沸騰現象解明における基本系であり、ここで不明な事柄は実用的に重要な流動沸騰系(沸騰二相流)にあってもまた当然未知であるからである。過去の沸騰に関する論文数は優に千を越えるものがあり、プール沸騰の特定のモードに話題を限定しても、詳細な研究レビューをするとなると倍するスペースが必要になる。幸い最近、各権威による優れたレビューや解説が出されているので、必要があればそれらを参考にすることができる。たとえば全般にわたる最近の進展に関する「沸騰熱伝達と冷却」⁽¹⁾、西尾⁽²⁾のまとめ、核沸騰に関するDhir⁽³⁾、Fujita⁽⁴⁾、限界熱流束に関するLienhard & Witte⁽⁵⁾、Lienhard⁽⁷⁾、Katto⁽⁶⁾ ⁽⁸⁾ ⁽⁹⁾、Bergles⁽¹⁰⁾、遷移沸騰に関するKlimenjo et al.⁽¹¹⁾、Dhir⁽³⁾、Auracher⁽¹²⁾ ⁽¹³⁾、Auditori⁽¹⁴⁾、極小熱流束に関する西尾⁽¹⁵⁾、Sakurai-Shiotsu⁽¹⁶⁾、膜沸騰熱伝達に関するSakurai⁽¹⁶⁾ ⁽¹⁷⁾などのレビューがある。

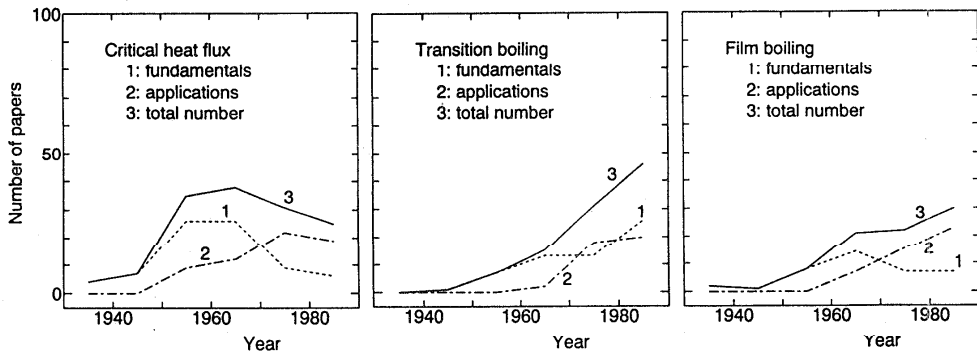


図4 基礎的研究と応用的研究の時代別推移

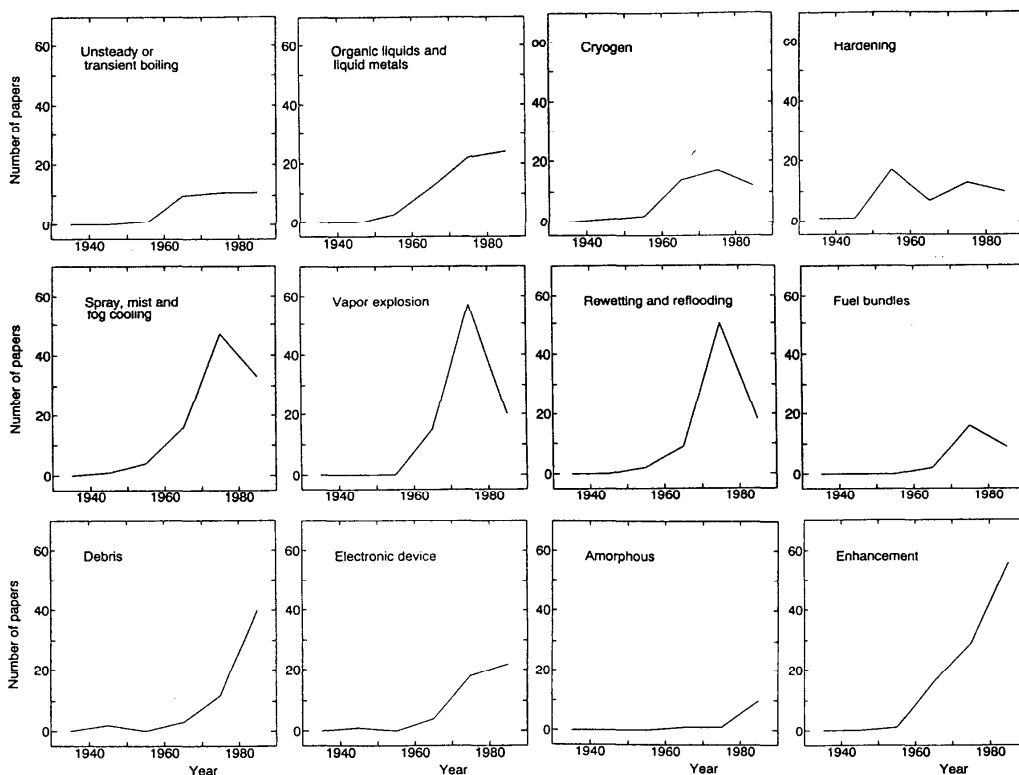


図5 沸騰応用分野別論文数の時代別推移(概数)

(1) 核沸騰熱伝達の機構

核沸騰では加熱面上の微細な気泡核から気泡が発生、成長、離脱を繰り返し、僅かな過熱度で極めて高い熱伝達が見られる点に特色がある。したがって熱伝達の機構を考えるには加熱面の発泡核、発泡条件、発泡点密度、発泡気泡の影響領域と相互干渉、気泡の成長あるいは消滅、離脱条件と離脱径、離脱周期などの問題についての知識が必要になり、これらの問題に関し数多くの研究がなされている。また発泡開始初期においては、発泡核の活性化の遅れが原因としてヒステリシス現象が観察され、低過熱度での沸騰利用の問題とも関連し研究が活発である⁽¹⁸⁾。ところでGaertner⁽¹⁹⁾によれば、加熱面温度あるいは熱流束の違いによって発生気泡の挙動が異なり、低過熱度、低熱流束では孤立気泡の形をとるが、熱流束の増加と共に発生気泡の数が次第に増し、高過熱度、高熱流束では気泡の相互干渉と合体が生じて大きな合体二次気泡が現れる。こうした気泡挙動の変化に伴い離脱気泡径⁽¹⁹⁾や加熱面上のポイド分布⁽²⁰⁾、さらには加熱面の姿勢などによる熱伝達特性⁽²¹⁾に明確な差が現れる。したがって核沸騰熱伝達のメカニズムは低熱流束の孤立気泡域と高熱流束の合体気泡域に分けて考えられることが多い。ただし、核沸騰熱伝達の特性を過熱度と熱流束との関係でマクロに捉えた場合、両者で明確な違いは認められない。限界熱流束に近い高熱流束で差が現れる(第2遷移点⁽²²⁾)との指摘があるが、一般的に認められるものとはなっていない。

孤立気泡域における素過程はおおよそ図6のように分別、整理できる⁽²³⁾。また核沸騰で得られる高い熱伝達は、加熱面から液体への過渡熱伝導、気泡の発生・成長・離脱に伴う微小対流の発生と

流れの攪乱効果（気泡攪乱機構），蒸気と液体の入れ替わりによる加熱面の熱的更新効果（気液交換機構），および気泡と加熱面間に構成されるマイクロ液膜の蒸発（薄液膜蒸発機構）などによるとされる．そして研究初期に提出された核沸騰整理式の多く^{(24) - (26)}は前二者の機構を念頭に気液の運動を単相の流れ（自然対流型あるいは強制対流型）に見立てて導かれたものである．一方，Moore ら⁽²⁷⁾の実験に始まり一時極めて注目を浴びた第3の薄液膜蒸発機構は，その後の幾多の検証によって必ずしも常に支配的なものではないと考えられている．要するに低熱流束核沸騰熱伝達は上記の諸機構が複雑に作用したものであり，寄与度の違いと理解するのが正しいであろう．実際，Graham & Hendricks⁽²⁸⁾，Juddら^{(29) (30)} Paul & Abdel-Khalik⁽³¹⁾ などによって核沸騰全域における複合多機構モデルが扱われ，熱伝達への各機構の寄与度が検討されているが，それらの結果（図7など）によれば，対流による伝熱が重要であるのは中程度熱流束域までであり，高熱流束域の伝熱はマイクロ液膜あるいは後述のマイクロ液膜の蒸発による潜熱輸送が支配的になる．

高熱流束合体気泡域の熱伝達はGaetner & Westwater⁽¹⁹⁾，甲藤・横谷⁽³²⁾などの実験観察により，合体気泡（蒸気塊）底部の加熱面上に存在する液層（マイクロ液膜）の蒸発と消耗により定まると考えられる．マイクロ液膜は後述のように限界熱流束あるいは遷移沸騰熱伝達にも関係すると考えられているが，その構成機構あるいは厚さなどについては現在でも不明の部分が多く議論の絶えないところであるが⁽³³⁾

⁽³⁹⁾，合体泡（蒸気塊）の生成初期に厚さ（初期厚さ）が定まり，液膜内では核沸騰が生じ，加熱面上に蒸気塊がする間，蒸発によりその厚さを次第に減ずるものと考えられる．図8は，マイクロ液膜の消耗過程を捉えた甲藤・横谷⁽³²⁾の写真（瞬間写真）であり，これからわかるように液膜は加熱面上で一様なものではないが，それを空間的に平均化して考えると，消耗状況は図9のようにモデル化できる⁽⁴⁰⁾．そして，マイクロ液膜の消耗による熱流束は蒸気塊の滞留期間（蒸気塊の離脱周期の逆数）を τ ，その間のマイクロ液膜の平均消耗厚さを $\Delta\delta$ として熱バランスから次式で与えられる．

$$q_N = \rho_v h_{fg} (1 - A_v/A_w) \Delta\delta / \tau \quad (1)$$

ここに ρ_v は蒸気の密度， h_{fg} は蒸発潜熱， A_v/A_w はマイクロ液膜内の乾き（蒸気ステム）の面積割

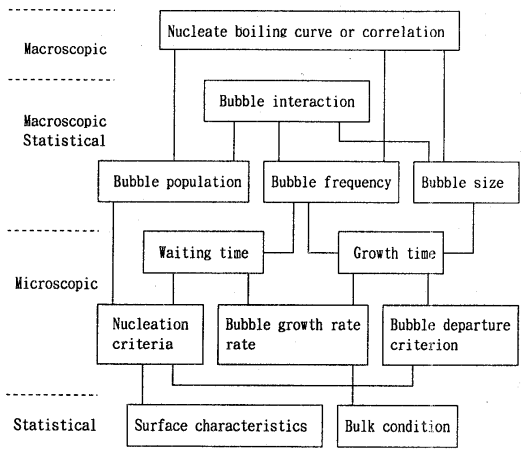


図6 核沸騰の素過程と相互のかかわり⁽²³⁾

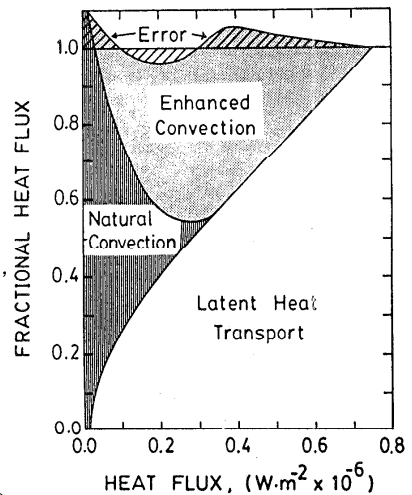


図7 核沸騰熱伝達における伝熱機構と寄与割合⁽³¹⁾

合である。一方、最近、Dhir & Liaw^{(41) (42)} は γ 線を用い加熱面上の時間平均ポイドを詳細に測定し、その結果から加熱面上の気液分布を仮定し、熱移動は液層を通しての2次元熱伝導で生ずるとのモデルを提案している。彼らは、そのモデルが核沸騰のみならず遷移沸騰へも拡張可能であるとして沸騰曲線予測のためのユニファイモデルと位置付けているが、加熱面のぬれ性の影響などがよく説明できる点に特色がある。マクロ液膜に基礎を置くモデルは他にもあり⁽⁴³⁾、近年は遷移沸騰熱伝達とも関連した形でより細部にわたる検討がなされている⁽⁴⁴⁾。

なお、核沸騰の熱伝達に影響を持つ因子として加熱面の粗さ、ぬれ性、清浄度、寸法、厚さ形状、姿勢、材質（熱伝導性）、液体のサブクール度、系圧力、加速度（重力）の他、加熱あるいは冷却速度に関係した過渡沸騰、非定常沸騰の問題があり、今日まで極めて多くの研究がある。これら全ての影響を評価しうる物理モデルは現在でもまだ与えられていないが、Nishikawa & Fujita⁽⁴⁵⁾の整理式が経験式ながら諸因子の影響を含み唯一それに近い。上記関係因子の影響についてはDhir⁽⁸⁾あるいはFujita⁽⁴⁾らの文献によくまとめられている。

核沸騰の研究は2章で記したように現在は一時ほどの活況はなくなっているが、最も基本となる核生成、発泡点密度と加熱面の実際性状との関係がまだほとんど明らかにされていない。また、気液挙動に違いがあるに拘らず低熱流束域と高熱流束域で過熱度と熱流束の関係に何故差が現れないのかといった基本問題に対する明快な答もまだ与えられていない。

(2) 限界熱流束のメカニズム

核沸騰の高熱流束域（合体気泡域）は発達した核沸騰とも呼ばれ、低熱流束域（孤立気泡域）と異なり液水位⁽⁴⁶⁾や加熱面の姿勢⁽²¹⁾、液体の流動⁽⁴⁷⁾や加速度（重力の変化）⁽⁴⁹⁾などの影響をほとんど受けない。また、加熱面と発生蒸気塊の間にはマクロ液膜（核沸騰液層）が存在し、その蒸発と消耗が蒸気塊の成長と離脱に深くかかわっていることも明らかにされている^{(32) (49) (51)}。

限界熱流束は高熱流束核沸騰の上限として実用上の重要性が高いため、沸騰研究の始めから極めて活発に研究され、幾多のモデルや考えが提案されてきた⁽⁵¹⁾。核沸騰に上限界が生ずることを説明する代表的な考えの一つは、熱流束が高くなり気泡の発生が極度に増加する結果、加熱面に蒸気が充満し、これが加熱面温度の急上昇をもたらすもの（気泡充満モデル）であり⁽⁵²⁾、感覚的には非常に理解し易いものである。他の一つは、気液の安定な流れ（相対速度）には限界があり（ヘルムホルツ不安定）、このため加熱面からの蒸気の除去に限界が生じるとするもの（流体力学的不安定モデル）であり、Zuber⁽⁵³⁾の解析に見られるように数学的に見事な結果が得られる。この



図8 マクロ液膜消耗最終段階の様子⁽³²⁾
(水平加熱面の上方から撮影)

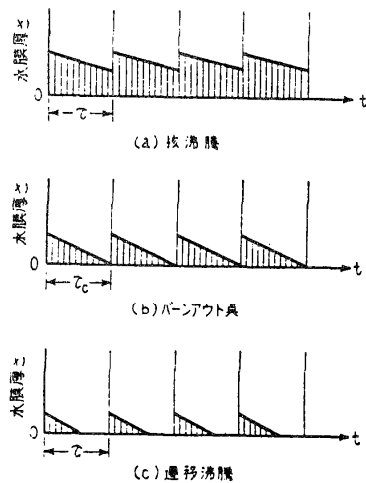


図9 マクロ液膜の消耗モデル⁽⁴⁰⁾

モデルには現実の現象挙動と合致しない部分もあるが、明快で拡張性のあることから⁽⁵⁴⁾⁻⁽⁵⁶⁾信奉者は少なくない⁽¹⁰⁾。また従来のはほとんどすべての伝熱の教科書にはこの考えが解説されており広く周知のものとなっている。これに対し、マクロ液膜の消耗時間と蒸気塊の加熱面上での滞留時間のバランスが限界を定めるとするのがマクロ液膜モデルであり、甲藤・横谷⁽⁸²⁾により一連の実験的研究から帰結され提出されたものである。このモデルも物理的な意味が明快であり、限界熱流束値は式(1)で $\Delta\delta$ をマクロ液膜の初期厚さ δ で置き換えて直ちに得られ、また流動沸騰系⁽³⁷⁾や非定常沸騰⁽⁵⁷⁾、遷移沸騰へも拡張可能なこと⁽⁸⁹⁾⁽⁵⁸⁾、実際の現象挙動との整合性がよい⁽⁵⁹⁾などから最近では広く理解され受け入れられてきている。ただ、前にも記したように、マクロ液膜の構成機構や厚さの評価、さらには液膜乾燥部(蒸気スチーム部分)の割合などに関する正確な情報がまだ不足おり完全に完成された形となっていないため、流体力学モデルとの対比において充分評価されないこともある⁽¹⁰⁾⁽¹¹⁾。

限界熱流束点において実際に加熱面上で生じている気液挙動は、少なくとも見かけ上、気泡充満説や流体力学不安定モデルが想定する状況とはなっていない。この点から見る限り、マクロ液膜モデルが現実にもっと近いと言えるが、肝心のマクロ液膜自体の知識が完全でなく問題が残されている。先ずマクロ液膜厚さに関して言えば、Gaertner & Westwater⁽¹⁹⁾⁽²²⁾の研究以降現在まで幾つか測定があり⁽⁸⁹⁾⁽⁶⁰⁾⁻⁽⁶²⁾、厚さが熱流束の関数であることは明らかになっているものの、測定の難しさも手伝ってデータのばらつきが非常に大きい。また、マクロ液膜の構成機構についてはヘルムホルツ不安定によるとするもの⁽⁸⁷⁾、気泡の離脱と合体によるとするもの⁽⁶¹⁾、微小な1次気泡の合体によるとするもの⁽⁸⁸⁾⁽⁶³⁾⁽⁶⁴⁾などがあって現在活発な議論と研究がなされているところである。マクロ液膜内の乾きに関して、遷移沸騰の研究と連動した形で比較的最近多くの研究があるが⁽⁴¹⁾⁽⁶⁵⁾⁻⁽⁶⁷⁾、まだ結論を得るに至っておらず、将来の問題として残されている。

なお、限界熱流束には加熱面性状、加熱面材質や厚さ、寸法、液サブクール、圧力、加速度などが影響する。これらの研究状況に関しては、Katto⁽⁶⁾⁽⁸⁾⁽⁹⁾やLienhard⁽⁵⁾⁽⁷⁾のまとめがある。また、限界熱流束に関連した当面の個別テーマとしては、ミクロスケール加熱面の限界熱流束の問題、限界熱流束点温度の問題、高サブクール条件下の限界熱流束とマイクロジェット沸騰(気泡微細化現象)の問題、超高熱流束沸騰と到達可能最高熱流束の問題などが挙げられる。

(3) 遷移沸騰熱伝達の機構

遷移沸騰では、過熱度の増加と共に熱流束が減少して不安定であるため、定常状態を実現するためには特別な工夫を要すること、実用上の重要性が比較的少なかったことなどから、核沸騰や膜沸騰に比べ研究が遅れていた領域であった。しかし、原子炉の再冠水や焼き入れ技術、冷却技術などの実用上の要請から、また限界熱流束あるいは極小熱流束のメカニズムの解明、あるいは加熱面のぬれの問題に対する学問的興味から近年は最も関心の持たれている分野となつている。遷移沸騰の研究はDrew & Mueller⁽⁶⁸⁾あるいはWestwater & Santangelo⁽⁶⁹⁾の観察実験に始まるとされるが、本格的な最初の研究はBerenson⁽⁷⁰⁾の研究と言ってよい。Berensonは詳細な実験から、遷移沸騰では加熱面と液体の接触が空間的、時間的に複雑に生起していること、不安定な核沸騰と不安定な膜沸騰が共存状態にあると見なせること、熱伝達の大きさは、粗さや汚れ、ぬれ性などの加熱面性状に非常に敏感であることなどを明らかにした。遷移沸騰の特色はほとんどこのBerensonの指摘に尽

きるが、その後、加熱あるいは冷却過程で得られる熱伝達がしばしば異なる⁽⁷⁰⁾⁽⁷¹⁾ことから遷移沸騰には2本の沸騰曲線が存在するとの仮説(ヒステリシスの存在)が出され⁽⁷²⁾、それを支持する実験結果が続いた⁽³⁹⁾⁽⁷³⁾⁻⁽⁷⁵⁾が、最近の注意深い検討によれば、加熱面の温度が一様であり、系が充分定常にある限りそうしたヒステリシスは現れないとされている⁽⁷⁶⁾⁽⁷⁷⁾。

遷移沸騰の熱伝達を説明する最も簡便なモデルは、遷移沸騰を核沸騰と膜沸騰の共存として捉え、その熱流束を

$$q_t = q_N F + q_F (1 - F) \quad (2)$$

と表現するものである。ここに q_N 、 q_F は遷移沸騰域における核および膜沸騰相当熱流束、 F は固液の接触割合であり、これらの諸量を如何に評価するかが重要問題となる。 q_N および q_F については、限界熱流束(CHF)と極小熱流束(MHF)を採用する考え⁽⁷⁸⁾⁽⁷⁹⁾と、核沸騰曲線および膜沸騰曲線を所期の過熱度まで外挿して得られる熱流束値を採用するもの⁽⁸⁰⁾とがある。また、固液接触割合に関しては、熱流束の測定値から過熱度の関数としてこれを表現する方法⁽⁷⁹⁾⁽⁸⁰⁾、発泡点密度から予測する方法⁽⁸¹⁾がある一方、電気抵抗プローブ、電気容量法、微細熱電対などによって実測もされている⁽⁶⁵⁾⁻⁽⁶⁷⁾⁽⁸²⁾が(図10)、実験の難しさのため研究者によるデータのばらつきが大きく、まだ統一的に整理できる状態には至っていない。なお、遷移沸騰熱伝達を式(2)に似た方法で表現する考えがLiaw & Dhir⁽⁸³⁾により提案されている。

ところで限界熱流束モデルとして先に説明した甲藤・横谷のマクロ液膜モデル、Dhir-Liawのユニファイモデルは、その考えを延長して遷移沸騰熱伝達を説明できる可能性がある。前者についての検討がPan et al.⁽⁸⁴⁾⁻⁽⁸⁶⁾により理論的に、Shoji et al.⁽³⁹⁾によって実験的に検討されている。また、後者についてはDhir & Liaw⁽⁴⁰⁾自身の検討がある。いずれのモデルを用いても定性的には遷移沸騰熱伝達をよく説明することができるが、前者が空間平均的なモデルであるのに対し、後者は時間平均モデルとなっていて相互の関連が明確でない。この問題に対し最近、Maruyama et al.⁽⁸⁷⁾は2次元的なマクロ液膜の消耗過程を数値シミュレーションして熱伝達の時間変動、加熱面のボイド変動を計算し、両モデルがよく整合するものであることを示している。

これまで述べた遷移沸騰のモデルでは、加熱面上の核生成や気泡の成長などの気液挙動については全く考慮されていない。これに対しNishio & Nagai⁽⁸⁸⁾は気泡の発生と接合を考えた新しい遷移沸騰モデル(Dynamicモデル)を提案している。

以上要するに、遷移沸騰については現在まさに活発な研究がなされているが、加熱面のぬれと乾きの問題、固液接触挙動の問題、核生成と気泡接合の問題、マクロ液膜の構成にかかわる問題などがまだ全く不明の状態に近く、今後一層の研究が必要である。なお、遷移沸騰に及ぼす関係因子、特に加熱面の材質や厚さ、過渡性の影響についてはWestwaterのグループによる詳細な検討がある⁽⁸⁹⁾⁻⁽⁹¹⁾。しかし、系の圧力や加速度などについての研究は皆無に等しく、こうした問題も当面の研究課題として挙げられよう。

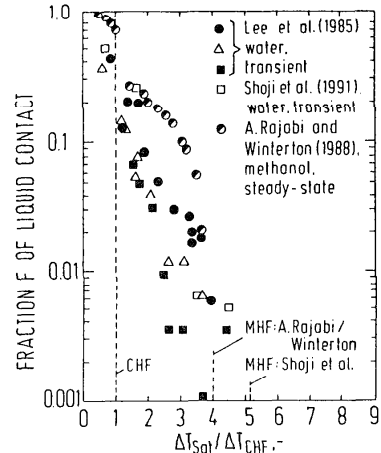


図10 遷移沸騰における固液接触割合(実測値)⁽¹³⁾

(4) 極小熱流束のメカニズム

極小熱流束は膜沸騰の下限として、また遷移沸騰の下限として重要であるばかりでなく、急速冷却におけるクエンチあるいはリウェット現象、液滴の蒸発におけるライデンフロスト現象、スプレークーリングなどの各種水冷却技術、さらには蒸気爆発の発生条件などに関連して実用上重要であり、これまで数多くの研究がなされている。しかしながら、気液界面の安定性の問題、固液接触やぬれの開始・消滅の問題、核生成や液体の過熱限界など難解な問題を多く含むため、メカニズムについてはまだ不明の部分が少なくない。

極小熱流束に関する理論として周知のものにZuber⁽⁹²⁾あるいはBerenson⁽⁹³⁾による流体力学的不安定理論がある。このモデルは蒸気膜の運動がテイラー不安定に基づくとして、発生気泡間隔、離脱気泡径、離脱気泡周期を定め、加熱面上に蒸気膜を保持するために必要な蒸気供給量に下限があるとそれを最小離脱周期に求め、極小熱流束を導くものである。この理論には未定定数が一つ含まれてくるが、Berensonは水平上向き平板の場合の値を実験値から定め、極小熱流束のみならず極小熱流束点過熱度の式を導いている。水平円柱の場合に対する同様の扱いはLienhard & Wong⁽⁹⁴⁾によりなされている。限界熱流束に関する流体力学不安定モデルと意を同じくして提案されたこのモデルは、熱流束自体に極小値が存在し、その時の過熱度は膜沸騰熱伝達との関連で自然に定まるとする点から「熱流束支配モデル」と呼ぶことができる。これに対し、加熱面の温度に極小値を定める原因があるとする考えがあり⁽⁹⁵⁾⁽⁹⁶⁾、この考えはかなり以前から西尾が強く主張してきたものである。系圧力を広範に変化させ極小点過熱度あるいは気泡挙動を実験的に調べたYao & Henry⁽⁹⁷⁾及びSakurai et al.⁽¹⁶⁾⁽¹⁷⁾によれば、熱流束支配型の理論（Zuberタイプ）が成立するのは大気圧近傍においてだけであり、少なくとも高圧域では加熱面温度が極小値を定めるとした方が妥当との結果を得ている。そもそも熱流束支配型モデルにおいて未定定数を実験的に定めること自体、実は極小条件的を物理的に説明することになっていない。実際、ぬれ難い加熱面では膜沸騰は低過熱度域まで安定に存在しうることが観察されている⁽⁸²⁾⁽⁸⁸⁾。Sakuraiらは⁽¹⁷⁾詳細な実験的ならびに理論的検討をおこなって、高圧下での極小熱流束は自発核生成温度により、また低圧下の極小熱流束は流体力学不安定モデル（熱流束支配モデル）により生ずるとしている。この考えは実際的なもので従来のデータをよく説明するが、ぬれ難い面を含め加熱面性状の影響が古典的な核生成理論だけで扱い得るかどうか、厳密なことを言えばまだ問題が残されている。

なお、膜沸騰の崩壊、極小熱流束点は固液接触の開始点を意味するものではなく、固液接触自体は一般にずっと高過熱度の膜沸騰域から生起している。また、膜沸騰の崩壊は加熱面のぬれと直接的に関係するため、加熱面の周辺条件に強く依存する⁽⁹⁹⁾（図11）。したがって極小点を実験的に定めるには細心の注意が必要である。従来の極小熱流束のデータが実験者により大きく隔たっている最大の原因はこの点にある。極小熱流束に及ぼす諸因子（加熱面形状、姿勢、寸法、端面条件、液サブクール、液流速、重力、表面性状、系圧力）の影響については

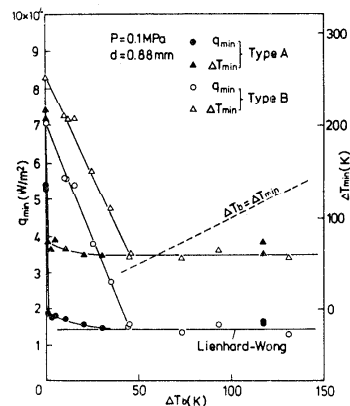


図1 極小熱流束に及ぼす加熱円柱端部温度の影響⁽⁹⁹⁾（端部温度 ΔT_b が低いと極小熱流束、極小熱流束点温度が共に高くなる）

文献⁽¹⁾あるいは西尾の解説⁽²⁾に詳しい。

(5) 膜沸騰熱伝達と整理式

膜沸騰は連続した蒸気膜が加熱面を覆う形となっており、加熱面での核生成や気泡の発生は原則的にはなく、蒸発により相変化が生ずるモードである。したがって、気液両相が分離した2単相の状態にあるため、他の沸騰形態に比べると機構は簡明で理論的扱いも比較的容易であって、現在の知識は完全とは言えないまでもある程度満足できるものとなっている。

膜沸騰の解析において問題となる事柄は、蒸気流の取扱い(層流、乱流)、気液界面の取扱い(形、時間変化、熱流体的境界条件)、放射の寄与度、加熱面寸法と蒸気膜形状と寸法、熱流体物性の評価等であり、解明が容易でない部分も勿論あるが、核沸騰や遷移沸騰にくらべると問題は少ない。したがってここでは、ごく総括的に研究の紹介をするにとどめる。

膜沸騰においては蒸気膜、蒸気流は加熱表面に沿ったものとなる。したがって、研究内容も加熱面形状によって分類整理するのがわかり易い。まず、水平平板上のプール膜沸騰沸騰に関しては周知のBerenson⁽¹⁰¹⁾の解析がある。Berensonは加熱面上に一定厚さの蒸気膜、一定形状の気泡が規則的に存在するとして蒸気膜厚さを解析的に求め、蒸気膜を通しての熱伝導から膜沸騰熱伝達率を求めている。同様の扱いながら、蒸気部分の時間発展や2次元気泡分布を考えに入れた解析もある^{(102) (103)}。また、テテファン問題と類似の熱拡散による蒸気膜の成長を考える扱いもある⁽¹⁰⁴⁾。水平加熱面の膜沸騰実験は以外に少なく、理論と実験の対比は充分ではない。

水平加熱面に沿う強制対流膜沸騰の解析^{(105) - (108)}では、支配方程式を相似則を用い積分法あるいは数値的に解くことになるが、蒸気流が層流、乱流のいずれとするか、また流速の影響の程度などによって扱いに差がでる。

垂直加熱面の膜沸騰に関してはBromley⁽¹⁰⁹⁾以来多くの研究^{(110) - (115)}がある。ここでは加熱面が大きくなった場合の問題、すなわち層流から乱流への発達の問題、加熱面に沿う気液界面の形状変化の問題、放射の寄与度の問題などが議論の対象とされている。熱伝達と加熱面サイズのかかわりに関する問題が最近、Bui-Dhir⁽¹¹⁶⁾、Nishioら⁽¹¹⁷⁾によりユニットモデルを導入、説明されたことは注目される。

水平円柱は最も基本となる膜沸騰熱伝達の系であり、研究の歴史も古く、今日に至るまで活発な研究がなされている^{(118) - (127)}。ここでは特に円柱径の影響評価、特殊流体(液体金属、ヘリウム)への適用性、圧力依存性などが問題にされるが、最近Sakurai-Shioitsu^{(16) (17)}により詳細な実験的、理論的研究がなされ、ほぼ満足できる統一的な整理式が与えられている。強制対流膜沸騰については、解析も限られ、剥離点の問題、後流渦内の熱伝達の評価の問題などまだ実験的情報が不足している部分が残されており、当面の研究課題として挙げられる。

球まわりの膜沸騰熱伝達は化学触媒、微粒化、蒸気爆発などの実用上の問題とも関連し、比較的以前から多くの研究がなされてきている^{(128) - (132)}。ただし球の実験は非正常実験によらざるをえず、実験データは充分ではない。ここでも強制対流熱伝達については水平円柱の場合と同じ問題点が指摘できる。

要するに、膜沸騰熱伝達は前記のようにその基礎的事項は核沸騰や遷移沸騰に比べかなりのレベルにまで解明が進んでいる。しかし一方、実用の問題に関連したポストドライアウト、再冠水、管

群などの複雑系，沸騰二相流においてはまだまだ説明すべき部分が多く，現在も盛んに研究が続けられている⁽¹⁾。

4. 沸騰研究の将来

沸騰の研究が本格的に開始されてより今日まで半世紀を越える時を経過し，その間先賢の弛まぬ努力によって，前章で概観したように沸騰現象に関するかなりの知識が集積され，学問としての体系も一定のレベルには達している，と言って良いであろう。そしてこれからも，少なくとも当面の将来は2章で見た現在の状況から考えて，実用技術あるいは応用技術に先導される形で沸騰研究が行われることはほぼ間違いない。高効率，高制御性のある冷却技術や伝熱促進技術の開発を目指した沸騰研究が続けられるであろう。超伝導，宇宙空間の利用のため極低温流体の沸騰や特殊環境下での沸騰挙動が調べられるに違いない。また，自然との共生に適合した各種熱機器あるいは新機能液体開発との関連で，特に特殊液体，混合溶液や沸騰二相流の研究が引き続き継続されて行くであろう。メカニズムを探求する基礎的研究も少なくとも現状程度にはなされていくであろう。3章でも記したように，核沸騰における加熱面と発泡核，発泡点の関連，遷移沸騰から極小熱流束領域におけるぬれ，核生成の物理は是非にも明らかにしなければならない。研究課題はまだまだ残されている。このような見方からすれば，沸騰研究の現在あるいは将来に愁うべき大きな問題はあるようには思われない。しかし一方，我々，特に沸騰研究に携わっている者あるいは携わってきた者にとって，沸騰研究の現状は充分満足できるものではなく，その将来に何か不安に似たものを感じるのもまた真実であろう。これは何故なのか。この問題は沸騰研究の将来を論ずるときには避けて通れない大きな重要問題である。

この困難な問題を考える一つの手がかりは，過去において沸騰の研究が何を動機としてどのようにして行われてきたかを振り返ってみることであろう。西川も記している⁽¹⁾ように，1970年代までの沸騰研究は原子動力の利用技術に触発されながらも現象自体への興味から極めて盛んで活発な研究がおこなわれ，大きな研究成果が得られている。また1970年代はエネルギー危機に関連した形で省エネルギー，エネルギーの有効利用に動機付けられて研究が継続され，そして現在の多くの研究はエネルギーの高効率利用と各種先端技術に引っ張られた形で行われていることは先に見た通りである。一方，科学と工学，工学と技術，技術と科学の関わりは，歴史的に眺めた場合，先ず技術が先行して科学の進展を促し，次に科学に基づいた工学の発展があり，その工学研究の成果をふまえて新しい技術の開発が行われるというサイクリックな経過を辿るのが常であり，蒸気動力－熱機関－熱力学－蒸気工学－伝熱工学－沸騰研究－エネルギーの有効利用と省エネルギー，先端技術と伝熱促進に至る熱工学の歴史もまさにそのようなものとして捉えることができる。そして現在は，科学とか工学なる言葉を耳にしないことはあっても「テクノロジー」なるサウンドが届かない日のない時代であり，確実に新技術の時代となっている。このように考えてくると，将来は現在の先端技術に立脚した，そしてそれを乗り越えた形のサイエンス（新しい科学）の時代に向かうことになる（向かうべきと言うべきか）とは言えまいか。そうだとすれば沸騰研究も例外ではありえない。筆者は，現在の沸騰研究の質的停滞を脱皮し再度従前のような研究の進展を意図するのなら，沸騰現象に内在する科学（自然科学，基礎科学）に目を向ける以外方法は無いと考える。たとえその結果が，現在の沸騰研究とはおよそ形の違ったものになるとしてもである。ここで問題となるの

は、沸騰現象にそうした未知の科学的なものがそもそも内在しているのかどうかであるが、筆者は可能性として少なくないと楽観している。かの有名なハイゼンベルクが、天国に行ったとき神に聞きたいことが2つある；その一つは相対論の、他の一つは乱流の仕組みと構造についてである、と言っている。さらに、神は少なくとも前者についての答は与えてくれるであろう、とも言っている。沸騰は、この神秘に満ちた乱流の問題に相変化まで関わっている物理現象である。我々はこのことをむしろ好運と喜ぶべきと思う。

実を言えば、筆者には具体的に何をどうすれば沸騰の研究に新しい科学を芽生えさせるかわかっているわけではない。しかし、例えば次のような問題へのアプローチが当面手がかりとなり得るのではないかと想像している。

- ① ミクロな相変化の物理の研究：単に液体の蒸気への相変化のみならず、熔融金属の固化、固体の熔融現象も含む。界面の物理や核生成の熱力学など。
- ② 超高速、超高熱流束熱移動現象の研究：n sec, p sec, さらにはf secオーダの現象の研究。フォノン、自由電子、さらにはフォトンが関与する形の伝熱形態で支配方程式が異なる。
- ③ 固体表面のフラクタル構造の研究：沸騰核、発泡点密度などとの関わり。
- ④ 沸騰の非線形力学、パターン認識の研究：乱流の研究と連動した大域構造の時間発展現象の体系化。沸騰現象のカオス的特性と数値シミュレーションによる解析。
- ⑤ ミクロスケールの液体物性の研究：液体物性が固体側の分子配置に従って配向し、マクロな物性と異なる影響の研究など。例えば、ガラスに接する薄い（ミリ以下ミクロン厚さ）水の凝固点が一〇〇℃近くなることは既に知られる。沸点その他の熱物性はどうか、それとミクロスケール伝熱現象との関わり等の問題。

これらの課題は相互に関係するもので、現在の解明手法とは違った切り口からの沸騰現象へのアプローチとなりえよう。また、現在の優れたレーザー技術、光技術、表面処理技術、薄膜技術、真空技術、電子計測技術はいずれも上記の基礎実験に不可欠であり、積極的な利用が望まれる。

以上、沸騰研究の将来展望としてはいささか現実から遊離した私見を主張し過ぎたかも知れない。しかし、少なくとも沸騰の研究において熱伝達の整理式を誘導することのみが目的とされた時代は終わっているのではないかと思う。沸騰に関連した研究が必ずしも直ちに熱伝達の理論やモデルに結び付かねばならないとの見方はそろそろ捨て去るべき時である。研究テーマに拘り定規な評価が下され研究者が不要な努力をするよりも、ゆとりと遊び（知的遊び）の精神を持って研究することこそ現在我々に不足しているものであり、まさに求められているものと考える。

引用文献

- (1) 日本機械学会編、「沸騰熱伝達と冷却」、日本工業出版社；
- (2) 西尾，東大生研セミナーテキスト，コ-715(1990)；
- (3) Dhir, V. K., 9th Int. Heat Transfer Conference, KN-9(1990), 129；
- (4) Fujita, Y., Pool and External Flow Boiling, ASME(1992), 83；
- (5) Lienhard, J. H. & Witte, L. C., Rev. Chem. Eng., 3(1985), 187；
- (6) Katto, Y., Adv. Heat Transfer, 17(1985), 1；
- (7) Lienhard, J. H., J. Heat Transfer, 110(1988), 1271；
- (8) Katto, Y., Pool and External Flow Boiling, ASME(1992), 151；
- (9) Katto, Y., Trans. Thermal Sci. Tech. Beijing(1992), 69；
- (10) Bergles, A. E., Pool and External Flow Boiling, ASME(1992), 165；
- (11) Kalinin, E. K. et al., Adv. Heat Transfer, 18(1987), 241；
- (12) Auracher, H., 9th Int. Heat Transfer Conference, KN-5(1990), 69；
- (13) Auracher, H., Pool and External Flow Boiling, ASME(1992), 219；
- (14) Auditori, E. F., 3rd ASME-JSME Thermal Joint Conference, 2(1991), 51；
- (15) 西尾，生産研究，35-3(1983), 113；
- (16) Sakurai, A., 9th Int. Heat Transfer Conference, KN-10(1990), 157；
- (17) Sakurai, A. & Shiotsu, M., Pool and External Flow Boiling, ASME(1992), 277；
- (18) ASME, Pool and External Flow Boiling(1992)；
- (19) Gaertner, R. F., Trans. ASME, C87(1965), 17；
- (20) 藤田ら，日機論，43(1977), 4586；
- (21) Nishikawa et al., Int. J. Heat Mass Transfer, 27(1984), 1559；
- (22) Gaertner, R. F.

& Westwater, J. W., Chem. Engng. Sump. Ser., 56-30(1960), 39.; (23)Hsu, Y. Y. & Graham, R. W., NASA TND 594(1961), 1.; (24)Rohsenow, W. M., Trans. ASME, C74(1952), 969.; (25)Kutateldze, S. S., AEC-translation-3770(1952), 129.; (26)Nishikawa, K. & Yamagata, K., Int. J. Heat Mass Transfer, 1-2/3(1960), 219.; (27)Moore F. D. & Mesler, R. B., AIChE J., 7(1961), 602.; (28)Graham, R. W. & Hendricks, R. C., NASA TND-3943(1967), 1.; (29)Judd, R. L. & Hwang, K. S., J. Heat Transfer, 98(1976), 623.; (30)Judd, R. L. & Lavdas, C. II., J. Heat Transfer, 102(1980), 461.; (31)Paul, D. D. & Abdel-Khalik, Int. J. Heat Mass Transfer, 26(1983), 509.; (32)Katto, Y. & Yokoya, S., Int. J. Heat Mass Transfer, 11(1968), 993.; (33)Bhat, A. M. et al., Int. J. Heat Mass Transfer, 26(1983), 735.; (34)Bhat, A. M. et al., *ibid.*, 26(19883), 833; (35)Bhat, A. M. et al., *ibid.*, 29(1986), 1953.; (36)Pasamehmetoglu, K. O. & Nelson, R. A., Int. Comm. Heat Mass Transfer, 14(1987), 709.; (37)Haramura, Y. & Katto, Y., Int. J. Heat Mass Transfer, 26(1983), 389.; (38)Sadasivan, P. et al., Pool and External Flow Boiling, ASME(1992), 135. .; (39)Shoji, M., Pool and External Flow Boiling, ASME(1992), 237.; (40)甲藤, 日機誌, 71(1968), 82.; (41)Liaw, S. P. & Dhir, V. K., J. Heat Transfer, 111(1989), 731.; (42)Dhir, V. K. & Liaw, S. P., J. Heat Transfer, 111(1989), 739.; (43)Bhat, A. M. et al., Int. J. Heat Mass Transfer, 29(1986), 1953.; (44)Jairajpuri, A. M. & Saini, J. S., Int. J. Heat Mass Transfer, 34(1991), 1579.; (45)Nishikawa, K. & Fujita, Y., *ibid.*, 20(1977), 233.; (46)Katto, Y. et al., 4th Int. Heat Transfer Conference, VB3. 2(1970); (47)Katto, Y. & Kunihiro, M., Bulletin JSME, 16(1973), 1357.; (48)Merte Jr H. & Clerk, J. A., J. Heat Transfer, 83(1961), 233.; (49)Lienhard, J. H. & Hassan, M. M., J. Heat Transfer, 101(1979), 276.; (50)Haramura, Y., Heat Transfer-Japanese Research, 18(1990), 18.; (51)「沸騰熱伝達」, 日本機械学会(1965); (52)Rohsenow, W. & Griffith, P., Chem. Eng. Prog. Symp. Ser., 52-18(1956), 47.; (53)Zuber, N., AECU-4439(1959). or J. Heat Transfer, C95(1958), 711.; (54)Sun, K. H. & Lienhard, J. H., Int. J. Heat Mass Transfer, 13(1970), 1425.; (55)Lienhard, J. H. & Dhir, V. K., J. Heat Transfer, 95(1973), 152.; (56)Lienhard, J. H. & Eichorn, R., Int. J. Heat Mass Transfer, 19(1976), 1135.; (57)Serizawa, A., Int. J. Heat Mass Transfer, 26(1983), 921.; (58)Pan, C. H. et al., Int. J. Heat Mass Transfer, 32(1989), 1337.; (59)Kumada, T. & Sakashita, Pool an External Pool Boiling, ASME(1992), 143. (60)Iida, Y. & Kobayashi, K., Bulletin JSME, 12(1969), 283.; (61)Bhat, A. M. et al., Int. J. Heat Mass Transfer, 26(1983), 735.; (62)Bhat, A. M. et al., *ibid.*, 29(1986), 1953.; (63)庄司ら, 日本伝熱ソポヅム, B236(9992), 436.; (64)Kumada, T. & Sakashita, Pool and External Flow Boiling, ASME(1992), 177.; (65)Lee, L. Y. et al., Int. J. Heat Mass Transfer, 28(1985), 1415.; (66)Dhuga, D. S. & Winterton, R. H. S., Int. J. Heat Mass Transfer, 28(1985), 1869.; (67)Ragheb, II. S. & Cheng, S. C., J. Heat Transfer, 101(1979), 381. (68)Drew, T. B. & Mueller, C., Trans. EICHe, 33(1937), 449.; (69)Westwater, J. W. & Santangelo, J. C., Ind. Engng. Chem., 47(1955), 1605.; (70)Berenson, P. J., Int. J. Heat Mass Transfer, 5(1962), 985.; (71)Sakurai, A. & Shiotsu, M., 5th Int. Heat Transfer Conference, 4B3. 1(1974), 81.; (72)Witte, L. C. & Lienhard, J. H., Int. J. Heat Mass Transfer, 25(1982), 771.; (73)Bui, T. D. & Dhir, V. K., J. Heat Transfer, 107(1985), 756.; (74)Ramilison, J. M. & Lienhard, J. H., J. Heat Transfer, 109(1987), 746.; (75)Maracy, M. & Winterton, R. H. S., Int. J. Heat Mass Transfer, 31(1988), 1443.; (76)Auracher, H., Pool and External Flow Boiling, ASME(1992), 219. (77)Haramura, Y., 3rd ASME-JSME Thermal Joint Conference, 2(1991), 59.; (78)Bjornard, T. A. & Griffith, P., PWR Blowdown Heat Transfer, ASME(1977), 17.; (79)Cheng, S. C., Lett. Heat Mass Transfer, 8(1981), 85.; (80)Kalinin, E. K. et al., Adv. Cryogenic Engng., 21(1976), 273.; (81)Hsu, Y. Y. & Kim, E. S., Int. Comm. Heat Mass Transfer, 15(1988), 533.; (82)Shoji, M. et al., 9th Int. Heat Transfer Conference, 2(1990), 135.; (83)Liaw, S. P. & Dhir, V. K., 8th Int. Heat Transfer Conference, 4(1986), 2031.; (84)Pan, C. H. et al., Int. J. Heat Mass Transfer, 32(1989), 1337.; (85)Pan, C. H. & Lin, T. L., 9th Int. J. Heat Transfer Conference, 2(1990), 147.; (86)Pan, C. H. & Lin, T. L., Int. J. Heat Mass Transfer, 34(1991), 1355.; (87)Maruyama, S. et al., 2nd JSME-KSME Tjermal Joint Conference, 3(1992), 345.; (88)Nishio, S. & Nagai, S., Pool and External Flow Boiling, ASME(1992), 271.; (89)Lin, D. Y. T. & Westwater, J. W., 7th Int. Heat Transfer Conference, 4(1982), 155.; (90)Peyayopanukul, W. & Westwater, J. W., Int. J. Heat Mass Transfer, 21(1978), 1437.; (91)Irving, M. E. & Westwater, J. W., 8th Int. Heat Transfer Conference, 4(1986), 2061.; (92)Zuber, N., AECU-4439(1959); (93)Berenson, P. J., Int. J. Heat Mass Transfer, 5(1962), 985.; (94)Lienhard, J. H. & Wong, P. T. Y., J. Heat Transfer, C86(1964), 220.; (95)Spiegler, P. et al., Int. J. Heat Mass Transfer, 6(1963), 987.; (96)西尾, 機論, 51-470(1985), 3404.; (97)Yao, S. C. & Henry, R. E., J. Heat Transfer, 100(1978), 260.; (98)西川ら, 機論, 37-297(1971), 1018.; (99)Shoji, M. et al., Int. J. JSME, 30-268(1987), 1587.; (100)Bromley, L. A., Cem. Eng. Prog., 46-5(1950), 221.; (101)Berenson, P. J., J. heat Transfer, 83(1961), 351.; (102)Ruckenstein, E., Int. J. Heat Mass Transfer, 10(1967), 911.; (103)Lao, Y. J., 4th Int. Heat Transfer Conference, 5B3. 10(1970); (104)Chang, Y. P., J. Heat Transfer, 81(1959), 1.; (105)Cess, R. D. & Sparrow, E. M., J. Heat Transfer, C83(1961), 370 & 377. (106)Ito, T. & Nishikawa, K., Int. J. Heat Mass Transfer, 9(1966), 117.; (107)Wang, B. X. & Shi, D. H., Int. J. Heat Mass Transfer, 27(1984), 1025.; (108)Wang, B. X. & Shi, D. H., Int. J. Heat Mass Transfer, 28(1985), 1499.; (109)Bromley, L. A., Ind. Engng. Chem., 44(1952), 2966.; (110)Koh, J. C. Y., J. Heat Transfer, 84(1962), 55.; (111)Sparrow, E. M. & Cess, R. D., J. Heat Transfer, 84(1962), 149.; (112)Nishikawa, K. et al., Int. J. Heat Mass Transfer, 19(1976), 1173; (113)Hsu, Y. Y. & Westwater, J. W., Chem. Eng. Symp. Ser., 56-30(1960), 15.; (114)Suryanarayana, V. N. & Merte Jr. H., J. Heat Transfer, 94(1972), 377.; (115)Greitzer, E. M. & Abernathy, F. H., Int. J. Heat Mass Transfer, 15(1972), 15.; (116)Bui, T. D. & Dhir, V. K., J. Heat Trans-fer, 107(1985), 764. (117)Nishio, S. & Ohtake, K., Pool and external Flow Boiling, ASME(1992), 331.; (118)Bromley, L. A., Chem. Eng. Prog., 46(1950), 221.; (119)Pitshman, P. & Grigull, U., Warme Stoffubertrag, 3(1970), 75.; (120)Breen, B. P. & Westwater, J. W., Chem. Eng. Prog., 58-7(1962), 67.; (121)石谷・沖, 機論, 29-189(1963), 348.; (122)西川ら, 機論, 38-308(1972), 858.; (123)Sakurai, A. et al., Nucl. Sci. Eng., 88(1984), 321. (124)Bromley, L. A. et al., Ind. Eng. Chem., 45-12(1953), 2639.; (125)Motte, E. I. & Bromley, L. A., Ind. Eng. Chem., 49-11(1957), 1921.; (126)Yilmaz, S. & Westwater, J. W., J. Heat Transfer, 102(1980), 26.; (127)Shigechi, T. et al., Bulletin JSME, 27-227(1984), 939.; (128)Hendricks, R. C. & Baumeister, K. J., 4th Int. Heat Transfer Conference, 5B3. 7(1970); (129)Frederking, T. N. K. & Clark, J. A., Adv. Cryo-genic Eng., 8(1963), 501.; (130)Merte, H. & Clark, J. A., J. Heat Transfer, 86(1964), 66.; (131)西尾・上村, 機論, 52-476(1986), 1811.; (132)Grigoriev, V. A. et al., 7th Int. Heat Transfer Conference, FB36(1982); (133)Kobayashi, K. J. Nucl. Sci. Tech. 26(1965), 62.; (134)Witte, L. C. & Orozco, J., J. Heat Transfer, 106(1984), 191.

1. まえがき

単成分蒸気の膜状凝縮に関するすべての研究はNusselt⁽¹⁾理論の修正、精密化と、特殊条件への拡張を内容としていると云ってよいであろう。蒸気を作動流体とする動力プラントや、冷凍・空調・ヒートポンプシステム、化学プラントでは各種の凝縮器が使用される。それらの凝縮器内の流動・伝熱現象を理解し、伝熱量と圧力降下を予測する方法を確立することが膜状凝縮研究の中心的な課題であった。近年になると、省エネルギー対策および新エネルギー開発の一環として高性能凝縮器の開発研究がさかんになり、伝熱促進法が主要な研究課題となった。この分野の研究も最近では一段落した観があるが、地球環境問題の顕在化と云う新しい事態を迎えて、CFC冷媒からHFC冷媒への変更等に伴う研究開発が必要になっている。

凝縮に関するレビューは既に多数発表されている。そのうち、1980年のWestwater⁽²⁾および1990年のTanasawa⁽³⁾のレビューには今後研究が必要な分野が取り上げられている。膜状凝縮に限ると、Westwater⁽²⁾は(1)液体金属、(2)水平管群、(3)管内凝縮の流動様式および多成分蒸気の管内凝縮、(4)フィン、溝付き面上の凝縮、を挙げている。一方、Tanasawa⁽³⁾は(1)多成分蒸気の凝縮、(2)伝熱促進技術、とくに能動的技術、を挙げている。両者には一部重複があるものの、かなり相違している。このことは、Westwater⁽²⁾の取り上げた諸分野について、この10年間に進展がみられた事を示すものと解釈することが出来よう。しかし未解決の問題も多く残されている。ここでは主として管内・管外凝縮を取り上げ、研究の現状と残された問題点について述べる。

2. 鉛直面上および鉛直管内の凝縮

Nusselt⁽¹⁾理論の最も重要な仮定は層流液膜の仮定である。しかし、実際の凝縮液膜は非常に小さい膜レイノルズ数 Re_f で波状流に遷移する。そして、 Re_f の増大につれて波の変形と合体が進み、同時に液膜内の乱れが増大してついに乱流に遷移する。層流膜状凝縮理論についてはRose⁽⁴⁾のレビュー、Fujii⁽⁵⁾の成書があるので、それらを参照していただくことにして、ここでは波状流域と乱流域を取り上げる。

二次元波領域の体積力対流凝縮に関して、Hirshburg-Florschuetz⁽⁶⁾は積分法による解析を行っている。彼らは波形をフーリエ級数の6項目までで表し、波の頻度 f をパラメータとして $Re_f \leq 10^3$ の領域の解を得ている。この解析では壁に直角方向の運動が無視されているので、波高の高い部分で不正確になる。一方、Maron⁽⁷⁾らは波動をともなう流下液膜を流動特性の異なる4領域に分けて解析する方法を提案している。また、Nagasaki-Hijikata⁽⁸⁾は差分法による厳密な数値解を求めている。しかし、得られた解は $Re_f \leq 34.1$ に限られている。これらの解析は波状流の性

質をより正確に記述することが可能であり、今後の発展が期待される。

乱流液膜領域については、平滑な気液界面を仮定し、単相流の壁乱流のモデルをそのまま適用した解析が1950~60年代に発表された。しかし、これらの解析は遷移域から乱流域にかけて高めの熱伝達係数を与えることが指摘され、いくつかの修正モデルが提案された。乱流液膜理論によれば、液膜内の無次元温度降下 T_1^+ は $T_1^+ = T_1^* = \int_0^{\delta^+} (q/q_w) / \{1/Pr_1 + (v_1/v_1)/Pr_1\} dy^+$ で与えられる。修正法の一つは、上式中のう

ず動粘性係数 ν_1 に液膜流の特性を考慮しようとするものである。Uedaら⁽⁹⁾は二層モデルを仮定して水蒸気の鉛直管内凝縮の実験値を解析し、無次元液膜厚さ $\delta^+ < 80$ の領域で無次元粘性底層厚さ δ_s^+ が増大することを見出した。図1にその結果を示す。Blangetti-Schlünder^(10,11)は気液界面の変形仕事のために渦の減衰が起こると考えるLevich⁽¹²⁾のモデルを用い、界面近傍の ν_1 を修正した。Suzukiら⁽¹³⁾は界面液の通過によって引き起こされる液膜内の運動の影響を $\nu_1 = cu \cdot l$ の形に表した。ここに u, l はそれぞれ波による運動の速度スケールおよび長さスケールである。その他の修正モデルとして、Blumfield-Theofanous⁽¹⁴⁾は波膜を薄い連続層と波高の大きい波の組み合わせとして表し、それぞれの部分に従来モデルを適用した。

上述の各種モデルを適用する際に問題になるのは、液膜流の諸量に関する測定値が非常に少ないことである。従って、実験値との比較によるモデルの検討も十分にはなされていない。図2は鉛直面上への静止蒸気の凝縮に関する平均熱伝達係数 α の実験値をいくつかの理論解および実験式と比較したものである。ここに $Nu^* = \alpha(\nu^2/g)^{1/3}/\lambda_1$, $Re_f = 4 \int_0^l q dx / \mu_1 L$ である。今後、波状液膜の構造に関するデータの蓄積が望まれる。

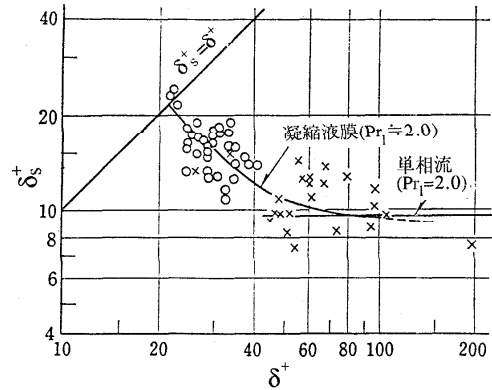


図1 粘性底層厚さ δ_s^+ の液膜厚さ δ^+ による変化⁽⁹⁾

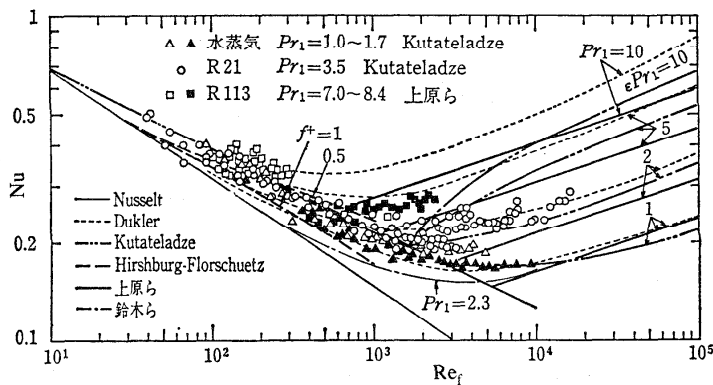


図2 鉛直面上の静止蒸気の凝縮: 実験値と予測値の比較

3. 水平管内凝縮

管内凝縮では凝縮の進行に伴って蒸気流速が減少し、液膜流を支配する駆動力は蒸気流によるせん断力から重力へと変化する。そのため、水平管内の気液二相の流動様式は管軸方向に変化し、熱伝達特性も変化する。Bellら⁽¹⁵⁾は水平管内凝縮の熱伝達を評価する上で流動様式の判定が重要であることを指摘した。凝縮二相流の流動様式は1970年代に活発に研究され、いくつかの流動様式地図が提案された。しかし、現在最も広く受け入れられているのは断熱二相流に対する力学的考察から導かれたTaitel-Dukler⁽¹⁶⁾の流動様式地図である。彼らによれば、水平管および微小傾斜管内の流動様式遷移は4個の無次元数 X, Fr, T, K に支配される。図3にそれを示す。さらに彼ら⁽¹⁷⁾は凝縮二相流の流動様式遷移モデルも提案している。

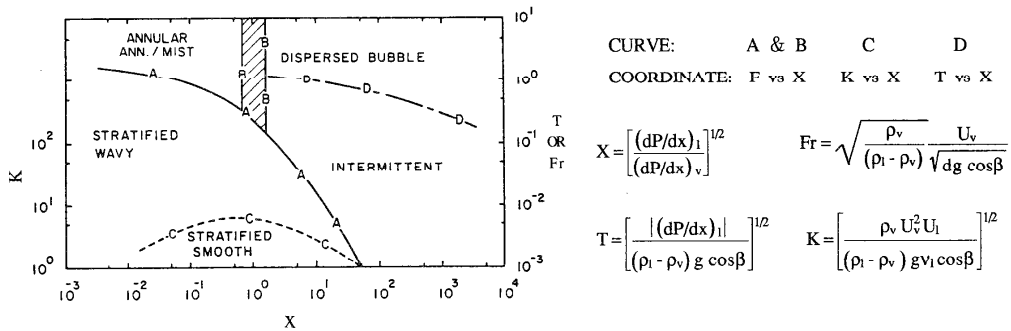


図3 Taitel-Duklerの流動様式地図⁽¹⁶⁾

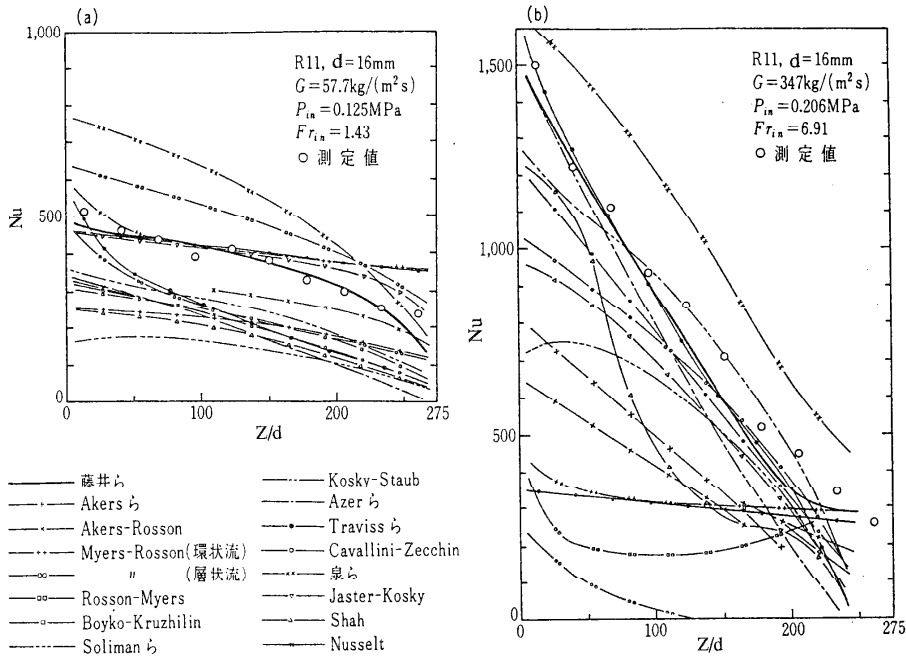


図4 水平管内凝縮: 実験値と予測値の比較⁽¹⁸⁾

従来提案されている熱伝達の式には環状流、半環状流、層状流等の特定の流動様式モデルに基づく式、等価液相レイノルズ数の概念に基づく式、および純然たる整理式がある。図4は熱伝達係数の実験値と種々の式との比較例⁽¹⁸⁾を示す。熱伝達係数の予測値の間には大幅の差がある。従って、特定の凝縮条件において使用すべき式の選定が重要になる。その方法としては、(1)流動様式地図を利用する^(19~21)、(2)異なる流動様式に対する式の予測値の大きい方を採用する⁽¹⁸⁾、(3)各式の適用範囲を規定する⁽²²⁾、等の方法が提案されている。なお、従来の理論では低クオリティ域で生じる凝縮液の過冷却の影響が考慮されておらず、凝縮終了点が不正確であった。橋詰ら⁽²³⁾は最近、過冷却を考慮した層状流モデルを提案している。

管内凝縮の伝熱特性は蒸気流によるせん断力に強く依存する。従ってその正確な予測法の確定も重要である。従来の研究ではLockhart-Martinelliパラメータによる整理式が提案されているが、精度、一般性ともに必ずしも十分ではない。蒸気流によるせん断力は流動様式とも密接な関係がある。両者の関係に注目した研究が望まれる。

4. 水平円管外面および水平管群における凝縮

復水器に代表される大型管群における凝縮熱伝達は蒸気流速と凝縮液イナナーションの影響を受ける。しかし、これらの複合効果を解析するのは困難なので、多くの研究では両者を分けて取り扱っている。

水平単管上の凝縮では凝縮液流量が少ないので、かなりの蒸気流速まで層流液膜の取り扱いが有効である。鉛直下降蒸気流に関して、Shekri adze-Gomelauri⁽²⁴⁾は蒸気吸い込みによる気液界面せん断力だけを考慮した解析を行い、解析解を得た。Fujii⁽²⁵⁾らは二相境界層理論による数値解を求め、熱伝達係数の近似式を提案した。図5は鉛直下降蒸気流に関する熱伝達係数の実験値と層流理論の比較例⁽⁴⁾を示す。ここに $Nu = \alpha d / \lambda_1$, $Re_L = U_\infty d / \nu_1$, $F^* = \mu_1 L g d / \lambda_1 \Delta T U_\infty^2$, $G^* = (\lambda_1 \Delta T / \mu_1 L) (\rho_1 \mu_1 / \rho_v \mu_v)^{1/2}$, $P^* = \rho_v L \nu_1 / \lambda_1 \Delta T$ である。理論では F^* の減少(蒸気流速の増大)につれて $Nu / Re_L^{1/2}$ が一定値に漸近するのに対して、実験では一定の F^* 以下で再び $Nu / Re_L^{1/2}$ の値が増加している。これは液膜の波動および乱れが次第に大きくなるためである。また、水蒸気に関する実験値は $F^* \cong 0.005 \sim 0.1$ で理論値よりもかなり小さくなる。これは、理論では一様壁温を仮定しているのに対して、高蒸気流速域では周方向の壁温変化が顕著になるためである。Honda-Fujii⁽²⁶⁾は冷却側との複合伝熱問題を解析し、凝縮物質による伝熱特性の差を明かにしている。

イナナーションの影響を表す伝統的な方法は、熱伝達係数が縦管列数 n の関数として $\alpha_n / \alpha_0 = n^{-a}$ または $\bar{\alpha}_n / \alpha_0 = n^{-a}$ と表されるものと仮定し、経験的に a の値を定める方法である。ここに α_0 はイナナーションがない場合の値、 α_n は第 n 管列の値、 $\bar{\alpha}_n$ は第 n 管列までの平均値である。この形の代表的な整理式には静止蒸気に関する Kern⁽²⁷⁾ の式、鉛直下降蒸気流に関する Fujii-Oda⁽²⁸⁾ の式がある。その他の方法として、McNaught⁽²⁹⁾ は強制対流凝縮域のデータを管内凝縮の場合と同様に α / α_0 対 X の関係で整理した。また本田ら⁽³⁰⁾ は液膜流に関する前述の関係をもとにして整理した。表1は鉛直下降蒸気流に関する実験値と整理式の比較例⁽³⁰⁾を示す。ここに、

$$E_1 = (100/N) \sum_{i=1}^N \{(\alpha/\alpha_c)_i - 1\}, E_2 = (100/N) \sum_{i=1}^N |(\alpha/\alpha_c)_i - 1|, N \text{ はデータ数, } \alpha \text{ は実験値, } \alpha_c \text{ は計算値である.}$$

実際の凝縮器管群では、蒸気の流入方向は場所によって変化する。単管に関する理論解析⁽³¹⁾によれば、蒸気流方向による熱伝達係数の差は共存対流凝縮領域($F^* \approx 1$)の鉛直下降流と鉛直上昇流の間で最も大きく、後者は前者の半分以下になる。管群に関する実験⁽³²⁾では、下降流の熱伝達係数は $F^* \approx 0.2 \sim 0.3$ で上昇流の約45%になっている。この原因は、上昇流の場合共存対流凝縮領域でフラディングが発生することによる。なお、水平流と下降流との差は小さい。

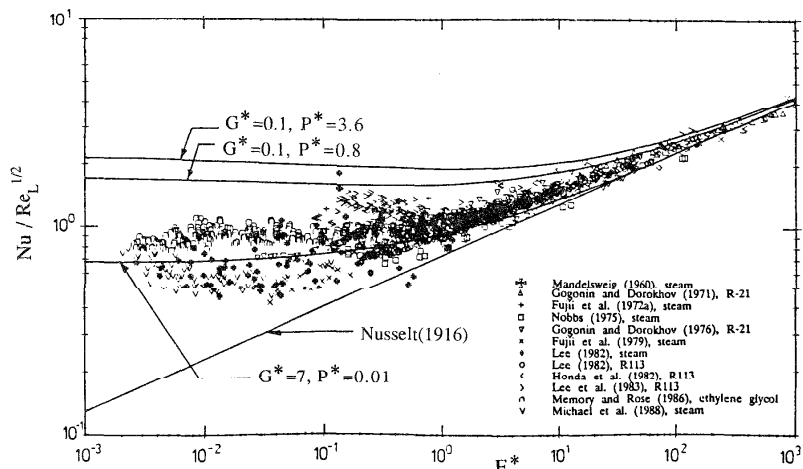


図5 水平円管上の強制対流凝縮: 実験値と層流理論の比較⁽⁴⁾

表1 水平管群における凝縮: 実験値と予測値の比較⁽³⁰⁾

Data source	Fluid	Pattern	p_1/p_2	p_1/d	N	Re_1	Present		McNaught		Fujii-Oda*		Cavallini	
							e_1	e_2	e_1	e_2	e_1	e_2	e_1	e_2
Present	R113	In-Line	1.0	1.38	450	$(4.7 \sim 97) \times 10^4$	-0.7	4.5	-12.9	17.4	5.0	17.4	15.3	18.6
		Staggered	1.0	1.38	450	$(5.4 \sim 97) \times 10^4$	2.3	5.4	-26.8	26.8	10.4	12.1	23.2	23.2
Ivanov et al.	R12	Staggered	3.25	2.44	16	$(1.8 \sim 55) \times 10^2$	-19.2	19.3	-18.8	22.8	-12.6	15.0	-16.5	17.5
Cavallini et al.	R11	Staggered	1.15	1.33	166	$(2.1 \sim 64) \times 10^4$	-10.0	12.3	-13.9	22.0	-0.2	5.9	1.7	4.7
		Staggered	1.73	1.63	305	$(2.8 \sim 50) \times 10^4$	0.1	9.9	-0.4	9.2	0.5	7.7	26.4	28.5
Kutateladze et al.	Steam	In-Line	1.0	1.25	159	$(1.2 \sim 27) \times 10^5$	4.0	13.2	-1.5	9.0	-33.9	34.0	-9.5	11.0
		Staggered	1.15	1.25	126	$(1.0 \sim 28) \times 10^5$	13.9	15.4	4.6	12.4	-23.0	26.3	15.3	16.9

* Modified

5. 凝縮熱伝達の促進

単成分蒸気が膜状凝縮する際の伝熱抵抗には気液界面の抵抗と液膜の抵抗があるが、前者は通常の場合無視できる。従って、凝縮伝熱の促進は何らかの手段を用いて液膜を薄くするか、または粘性底層を薄くすることによって達成される。しかし、後者は通常大幅な流動抵抗の増大を伴うので実用的ではない。また、フィンを用いて伝熱面積の増加をはかる方法も有効である。

5.1 鉛直面上および鉛直管外の凝縮促進

Gregorig⁽³³⁾は鉛直管に微細な縦溝をつけ、表面張力効果を利用して凝縮伝熱を促進する画期

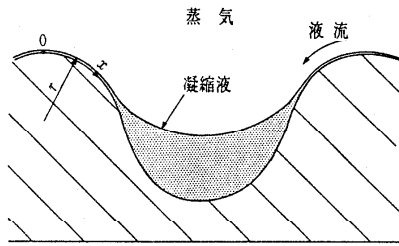


図6 鉛直溝付き管上の凝縮

的な方法を開発した。図6は縦溝付き管上の凝縮状態を模式的に示す。伝熱面上の凝縮液には曲率 r の変化による圧力こう配 $dP/dx=d(\sigma/r)/dx$ が作用し、山部の凝縮液は溝部へ引き込まれる。そのため山部の液膜は非常に薄くなり、伝熱が

大幅に促進されるとともに、溝部の液膜は厚くなり、重力による凝縮液の流下が促進される。

Gregorig⁽³³⁾は山部の液膜厚さが一定となる比較的なだらかな溝形状を提案した。その後種々の溝またはフィン形状に関する解析と実験が報告された。Moriら⁽³⁴⁾は理論解析によるフィン形状・寸法の最適化を試みた。彼らは3種類のフィンの伝熱性能を比較し、鋭い先端と平坦な溝部を有する平底フィンが優れていることを示した。図7にその結果を示す。ここに h はフィン高さ、 p はフィンピッチ、 H は伝熱面高さである。彼らはまた、溝部に液が充満するのを避ける手段として凝縮液排除ディスクを取り付けることを提案した。森ら⁽³⁵⁾はついで矩形フィン付き管の管群の伝熱性能を調べ、R113についてNusselt⁽¹⁾の式の約10倍の伝熱促進率を得た。なお、蒸気流速が増大すると前方管の凝縮液が飛ばされて後方管に付着し、後方管の伝熱性能が約15%低下している。Ueharaら⁽³⁶⁾は4種類の正方形溝を有する鉛直面を用いて実験を行った。伝熱特性は基本的には鉛直フィン付き管と同様であり、溝に液が充満しない限り溝寸法が小さい面ほど伝熱性能も高い。鉛直溝付き面の凝縮伝熱性能は理論的に予測できるが、数値解析はかなり面倒である。木田・藤井⁽³⁷⁾は理論解析に基づいた簡便な熱伝達係数の計算法を提案している。

表面張力効果を利用する簡便な伝熱促進法として、管表面に針金を一定間隔で取り付ける方法⁽³⁸⁾⁽³⁹⁾も研究されている。こうすると管表面上の凝縮液は針金の取付け部に形成される厚い液膜へ引き込まれて薄くなり、伝熱が促進される。しかし、得られる伝熱促進率はフィン付き管よりも低い。

Velkoff-Miller⁽⁴⁰⁾は接地した伝熱面の近くに高圧電極を配置すると気液界面が不安定になり、凝縮伝熱が促進されることを見出した。Didkovsky Bologa⁽⁴¹⁾は横のスリットを設けた平板電極を用いて凝縮実験を行い、高電圧になると凝縮液のスプレーが伝熱面から電極に向かって飛び出す現象を観察した。矢部ら⁽⁴²⁾、竹谷ら⁽⁴³⁾は鉛直管のまわりに配置した針金電極に3kVの電圧を伝熱研究 Vol. 32, No. 124

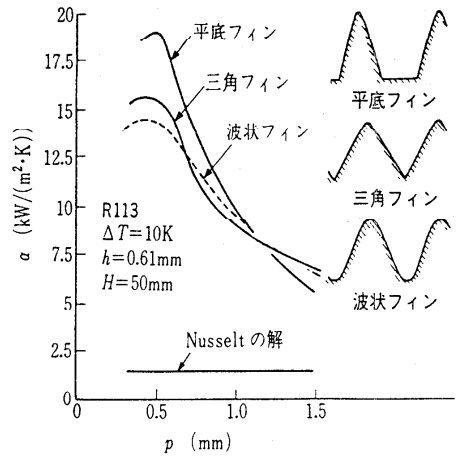


図7 フィン形状およびフィンピッチによる熱伝達係数の変化⁽³⁴⁾

かけることによって96%の凝縮液を引き出すことに成功し、2.8倍の伝熱促進率を得ている。Sunadaら⁽⁴⁴⁾は平板電極を用いてR113とR123の凝縮実験を行い、4MV/m以上の電界強さで滴状凝縮に類似の現象が現れることを見出した。そして8MV/mで約4倍の伝熱促進率を得た。さらにYamashitaら⁽⁴⁵⁾はらせん電極と格子電極を併用した50kW級の凝縮器を開発している。

5.2 管内凝縮の促進

管内凝縮の促進法としては、管内にねじれテープやらせん形ミキサーエレメント等を挿入する方法と、管内面にフィン設ける方法が研究されている。前者は伝熱促進率が1.1~1.8倍であるのに対して摩擦圧力降下が2~5倍に達するので、あまり実用的ではない。内面フィン付き管は大幅な圧力降下を伴うことなく伝熱が促進される。フロン系冷媒については、 $h=0.1\text{mm} \sim 0.3\text{mm}$ 、 $p<0.5\text{mm}$ 、ねじれ角 $7 \sim 30^\circ$ の微細フィン付き管によって最高2.4倍の伝熱促進率が得られ、一方圧力損失は約1.4倍に留まっている。

Royal-Bergles⁽⁴⁶⁾とLuu-Bergles⁽⁴⁷⁾は4種類の内面フィン付き管を用いてそれぞれ水蒸気とR113の凝縮実験を行っている。それによると、水蒸気では h, p の大きい管が、またR113では h, p の小さい管が高い伝熱性能を示す。平沢ら⁽⁴⁸⁾とKhanparaら⁽⁴⁹⁾はそれぞれ形状、寸法の異なる8種類の内面フィン付き管についてR113の凝縮実験を行っている。図8はKhanparaら⁽⁴⁹⁾の伝熱管のフィン形状と伝熱特性の例を示す。最高性能を示す管は質流速度 G 、乾き度 x 、 ΔT 等によって変化するが、彼らは8と9のフィン形状が総合的に最も良いとしている。なお、Luu-Bergles⁽⁴⁷⁾と平沢ら⁽⁴⁸⁾は熱伝達の整理式を提案している。内面フィン付き管の伝熱促進要因には、表面積増加と表面張力効果の他に溝による液膜流の乱れがあると考えられている⁽⁴⁹⁾。しかし、フィン付き管内の液膜流の挙動はほとんど理解されていない。今後の研究の進展が望まれる。

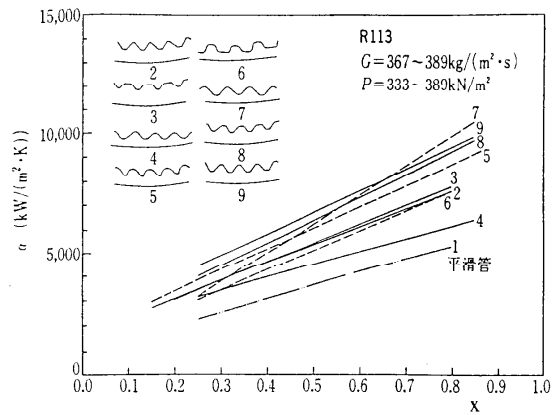


図8 水平内面フィン付き管の伝熱特性の比較⁽⁴⁹⁾

5.3 水平管外凝縮の促進

水平管外凝縮の促進法としてはフィンの使用が一般的である。しかし、水平フィン付き管には表面張力の作用による伝熱阻害要因も同時に存在する。図9は水平環状フィン付き管のフィン間溝部における凝縮液の挙動を模式的に示す。管上半部の $0 \leq \phi \leq \phi_f$ の領域では溝部の液膜は薄く、フィンが有効な伝熱面として働く。しかし管下半部の $\phi_f \leq \phi \leq \pi$ の領域ではフィン間に液が充満しており、フィンの先端部以外は伝熱に寄与しない。液充満角 ϕ_f は保持された凝縮液の液位に対

応する静圧差 $\rho_l g z$ とフィン先端に接するメニスカスの最大内外圧力差 σ/r_f の釣合によって定まる⁽⁵⁰⁾。ここに r_f はメニスカスの最小曲率半径である。従って同一管では σ/ρ_l の小さい物質ほど ϕ_f は大きくなり、高い伝熱促進効果が得られる。

水平フィン付き管上の凝縮に関してはMarto⁽⁵¹⁾の詳細なレビューがある。そこで、ここでは主として最近の研究について述べる。Katzとその共同研究者^(52~54)は環状フィン付き管の凝縮伝熱性能に関する一連の論文を発表した。その結論は(1)管下部のフ

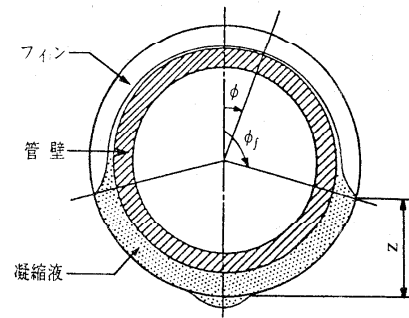


図9 フィン間に保持される凝縮液の状態

イン間に保持される凝縮液の影響は無視できる、(2)縦管列数の影響は非常に小さい、(3)熱伝達係数はフィン側面とフィン根元管表面にNusselt⁽¹⁾の式を適用して求められる値より5%小さい、の3点である。(1)と(3)は一般的には正しくないが、彼らの式は現在でもよく引用される。その後1970年代になって3次元フィン付き管が開発され、環状フィン付き管の2倍以上の伝熱性能を示すと報告された⁽⁵⁵⁾。フィンの形状は鋸歯状、ピラミッド状、ピン状、多孔質体、その他種々のものがある。3次元フィンの伝熱促進要因は、鋭く上がった先端や多数の角部または微細な多孔構造を有するため、環状フィンよりも表面張力を効果的に利用できることにある。

Beatty-Katy⁽⁵³⁾の理論の見直しとフィンの寸法、形状の最適化をめざす研究は1980年代になって活発になった。環状フィン付き管の単管に関して、Owen⁽⁵⁶⁾らはBeatty-Katy⁽⁵³⁾の式に液充填角度の補正を加えた。Webb⁽⁵⁷⁾ら、Honda-Nozu⁽⁵⁸⁾はフィン上の凝縮についても表面張力効果を考慮したモデルを提案した。Honda⁽⁵⁹⁾ら、Adamek-Webb⁽⁶⁰⁾はさらにフィン根元管表面上の凝縮についても表面張力効果を考慮した。また、フィンの各部寸法が熱伝達に及ぼす影響を調べた系統的な実験値^(61~67)が報告され、蒸気流速の影響に関する実験値^(68,69)も報告された。そのほか、フィン付き管の伝熱性能をさらに向上させる方法として、Honda⁽⁵⁰⁾らは管下端に多孔質排液板を取付ける方法を提案した。この方法はとくに σ/ρ_l の大きい物質に有効である。Torikoshi⁽⁷⁰⁾らは微細な切り込みを付けた巻き付きフィン付き管を開発した。王-上方⁽⁷¹⁾は環状フィンの側面に微細な凹凸をつけることにより、R113について約14倍の伝熱促進率を得た。土方⁽⁷²⁾らはさらにこの管の伝熱モデルを提案した。

凝縮液イナnderションの影響に関して、Marto⁽⁷³⁾、Murata⁽⁷⁴⁾らは環状フィン付き管の実験値を報告した。Webb-Murauski⁽⁷⁵⁾は環状フィン付き管、T形フィン付き管、3次元フィン付き管を比較し、イナnderションによる伝熱性能低下は3次元フィン付き管が最も大きいことを報告した。Honda^(76,77)らは環状フィン付き管の縦管列における凝縮液の落下モードを調べ、それに基づいて単管の理論を縦管列に拡張した。

蒸気流速と凝縮液イナnderションの影響が共存する管群内の凝縮に関して、Nosetani⁽⁷⁸⁾ら

は大型復水器内の局所熱通過係数を調べ、環状フィン付き管によってかなりの伝熱促進効果が得られることを報告した。Honda^(79,80)らは平滑管、環状フィン付き管、3次元フィン付き管の基盤目管群および千鳥管群におけるR113の伝熱性能を比較した。またChun-McNanght⁽⁸¹⁾は平滑管と環状フィン付き管の千鳥管群におけるR113

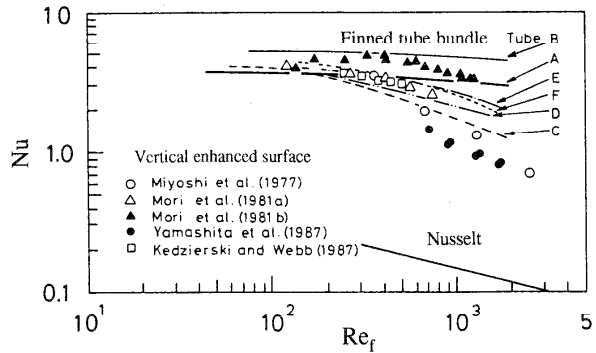


図10 水平フィン付き管群と鉛直伝熱促進面の伝熱特性の比較⁽⁷⁹⁾

の伝熱性能を比較した。図10は基盤目管群の実験値を鉛直フィン付き管、電場を付与した鉛直管に関する実験値と比較した例⁽⁷⁹⁾を示す。ここに管A、Bは環状フィン付き管、管C～Fは3次元フィン付き管である。管Bは全領域にわたって最高の伝熱性能を示す。この管のフィン寸法は理論解析⁽⁷⁷⁾による最適値に近い。なお、基盤目管群と千鳥管群を比較すると、千鳥管群のほうが凝縮液イナnderションの影響が小さく、全般的に良好な伝熱性能を示す⁽⁸⁰⁾。

フィン付き管以外の伝熱促進管としては、コルゲート管⁽⁸²⁾、ワイヤーを巻き付けた管⁽⁸³⁾も研究されている。前者では約1.4倍、後者では約3倍の伝熱促進率が得られている。

6. あとがき

単成分蒸気の膜状凝縮とその促進法に関する研究の現状を紹介した。平滑面については、液膜流の挙動には不明の点が多いものの、工業的に重要な多くの場合について、実用上十分の精度で伝熱量を計算できるようになった。膜状凝縮の促進に最も有効な方法は、現在のところフィンを使用し、その形状・寸法を最適化することである。管外凝縮については、伝熱性能の理論的予測も可能になった。しかし、フィンによる伝熱促進はすでに限界に近づいていると考えられる。従って、電場付与に代表される能動的方法のさらなる発展が期待される。

文献

- (1) Nusselt, W., Zeit. Ver. Deut. Ing., 60 (1916), 541, 569
- (2) Westwater, J. W., Proc. Japan-United States Joint Seminar 1980, (1980), 67.
- (3) Tanasawa, I., App. Mech. Rev., 43-1 (1990), 1.
- (4) Rose, J.W., JSME Int. J., Ser. II, 31-3 (1988), 357
- (5) Fujii, T., Theory of Laminar Film Condensation (1991), 1, Springer.
- (6) Hirschburg, R. I. and Florschuetz, L. W., Trans. ASME, J. Heat Transf., 104-3(1982), 452.
- (7) Maron, D. M. ほか2名, Phys. Chem. Hydrodynamics, 6(1985), 87.
- (8) Nagasaki, T. and Hijikata, K., ANS Proc., 1989 Nat. Heat Transf. Conf., 4 (1989), 23.
- (9) Ueda, T. ほか2名, Proc. 5th Int. Heat Transf. Conf., 3 (1974), 304.

- (10) Blangetti, F.L. and Schlünder, E.U., Proc. 6th Int. Heat Transf. Conf., 2 (1978), 437.
- (11) Blangetti, F.L. and Schlünder, E.U., Condensation Heat Transfer, (1979), 17, ASME.
- (12) Lerich, V.G., Physicochemical Hydrodynamics (1962), 689, Prentice-Hall.
- (13) Suzuki, K. ほか2名, Proc. 1987 ASME/JSME Thermal Eng. Joint Conf., 5 (1987), 55.
- (14) Blumfield, L.K. and Theofanous, T.G., Trans. ASME, J. Heat Transf., 98-3 (1976), 496.
- (15) Bell, K.J. ほか2名, Chem. Eng. Prog. Symp. Ser., 66-102 (1970), 150.
- (16) Taitel, Y. and Dukler, A.E., AIChE J., 22-1 (1976), 47.
- (17) Dukler, A.E. and Taitel, Y., Multiphase Science and Technology, 2 (1986), 1, Hemisphere.
- (18) 藤井, ほか2名, 冷凍, 55-627 (1980), 3.
- (19) Breber, G. ほか2名, Trans. ASME, J. Heat Transf., 102-3 (1980), 471.
- (20) Jaster, H. and Kosky, P.G., Int. J. Heat Mass Transf., 19-1 (1976), 95.
- (21) Sardesai, R.G. ほか2名, Chem. Eng. Sci., 36-7 (1981), 1173.
- (22) Shah, M.M., Int. J. Heat Mass Transf., 22-4 (1979), 547.
- (23) 橋詰, ほか3名, 第26回日本伝熱シンポ講論, 1 (1989), 130.
- (24) Shekrladze, I.G. and Gomelaury, V.I., Int. J. Heat Mass Transf., 9 (1966), 581.
- (25) Fujii, T. ほか2名, Int. J. Heat Mass Transf., 15 (1972), 235
- (26) Honda, H. and Fujii, T., Trans. ASME, J. Heat Transf., 106-2 (1984), 841.
- (27) Kern, D.Q., AIChE J., 4-2 (1958), 157.
- (28) 藤井・小田, 機論, 52-474, B (1986), 822.
- (29) McNaught, J.M., Proc. 7th Int. Heat Transf. Conf., 5 (1982), 125.
- (30) 本田, ほか4名, 機論, 54-502, B (1988), 1453.
- (31) Honda, H. and Fujii, T., Proc. 5th Int. Heat Transf. Conf., 3 (1974), 299.
- (32) 藤井・小田, 機論, 48-436, B (1982), 2580.
- (33) Gregorig, R., Zeit. Angew. Math. Phys., 5-1 (1954), 36.
- (34) Mori, Y. ほか3名, Trans. ASME, J. Heat Transf., 103-1 (1981), 96. および森・上方, 伝熱学特論 (1984), 216, 養賢堂
- (35) 森, ほか3名, 機論, 50-460, B (1984), 3000.
- (36) Uehara, H. ほか2名, Int. J. Refrig., 8-1 (1985), 22.
- (37) 本田・藤井, 機論, 50-460, B (1984), 2993.
- (38) Thomas, D.G., I&EC Fundamentals, 6-1 (1967), 97.
- (39) Rifert, V.G., ほか4名, Heat Transf. Sov. Res., 9-2 (1977), 23.
- (40) Verhoff, H.R. and Miller, T.H., Trans. ASME, J. Heat Transf., 87-1 (1965), 197.
- (41) Didkovsky, A.B. and Bologa, M.K., Int. J. Heat Mass Transf., 24 (1981), 811.
- (42) 矢部, ほか5名, 機論, 48-435, B (1982), 2271.
- (43) 竹谷, ほか4名, 機論, 52-477, B (1986), 2202.
- (44) Sunada, K. ほか3名, Proc. ASME/JSME Thermal Eng. Joint Conf. 1991, 3 (1991), 47.
- (45) Yamashita, K. ほか5名, Proc. ASME/JSME Thermal Eng. Joint Conf. 1991, 3 (1991), 61.
- (46) Royal, J.H. and Bergles, A.E., Trans. ASME, J. Heat Transf., 100-1 (1987), 17.
- (47) Luu, M. and Bergles, A.E., ASHRAE Trans., 86-2 (1980), 293.
- (48) 平沢, ほか3名, 第20回日本伝熱シンポ講論, (1983), 274.
- (49) Khanpara, J.C. ほか2名, ASME HTD, 65 (1986), 21.
- (50) Honda, H. ほか2名, Proc. ASME/JSME Thermal Eng. Joint Conf., 3 (1983), 289.
- (51) Marto, P.J., Trans. ASME, J. Heat Transf., 110-4(b) (1988), 1287.

- (52) Katz, D.L. ほか2名, Dept. Eng. Res., Univ. Michigan, Project M592 (1947), 1.
- (53) Beatty, K.O. and Katz, D.L., Chem Eng. Prog., 44 (1948), 55.
- (54) Katz, D.L. and Geist, J.M., Trans. ASME, 70 (1948), 907.
- (55) Arai, N. ほか5名, ASHRAE Trans., 83-2 (1977), 58.
- (56) Owen, R.G. ほか3名, Inst. Chem. Engrs. Symp. Ser., No.75 (1983), 415.
- (57) Webb, R.L. ほか3名, Trans ASME, J. Heat Transf., 107-1 (1985), 255.
- (58) Honda, H. and Nozu, S., Trans. ASME, J. Heat Transf., 109-1 (1987), 218.
- (59) Honda, H. ほか2名, JSME Int. J., Ser. II, 31-4 (1988), 709.
- (60) Adamek, T. and Webb, R.L., Int. J. Heat Mass Transf., 33-8 (1990), 1721.
- (61) Yau, K.K. ほか2名, Trans. ASME, J. Heat Transf., 107 (1985), 377.
- (62) Masuda, H. and Rose, J.W., Proc. 1987 ASME/JSME Thermal Eng. Joint Conf., 1 (1987), 525.
- (63) Masuda, H. and Rose, J.W., Heat Transfer Science and Technology (1987), 480, Hemisphere.
- (64) Wanniarachchi, A.S. ほか2名, Trans. ASME, J. Heat Transf., 108 (1986), 960.
- (65) Marto, P.J. ほか3名, Trans. ASME, J. Heat Transf., 112-3 (1990), 758
- (66) Sukhatme, S.P. ほか2名, Trans. ASME, J. Heat Transf., 112-1 (1990), 229.
- (67) Briggs, A. ほか2名, Trans. ASME, J. Heat Transf., 114-3 (1992), 719.
- (68) Michael, A.G. ほか3名, ASME HTD, 114 (1989), 1.
- (69) Cavallini, A. ほか2名, Inst. Chem. Engrs. Symp. Ser., No.129, 2 (1992), 829.
- (70) Torikoshi, K. ほか3名, Proc. 2nd Int. Symp. Condensers and Condensation. (1990), 441.
- (71) 王・土方, 機論, 56-527 (1990), 196.
- (72) 土方, ほか2名, 機論, 57-537 (1991), 195.
- (73) Marto, P.J., Proc. 8th Int. Heat Transf. Conf., 1 (1986), 161.
- (74) Murata, K. ほか2名, Proc. 9th Int. Heat Transf. Conf., 4 (1990), 259.
- (75) Webb, R.L. and Murauski, C.G., Trans. ASME, J. Heat Transf., 112-3 (1990), 367.
- (76) Honda, H. ほか2名, Proc. 1987 ASME/JSME Thermal Eng. Joint Conf., 1 (1987), 517.
- (77) Honda, H. ほか2名, Trans. ASME, J. Heat Transf., 111-2 (1989), 525.
- (78) Nosetani, K. ほか5名, ASME HTD, 108 (1989), 97.
- (79) Honda, H. ほか4名, Trans. ASME, J. Heat Transf., 113-2 (1991), 479.
- (80) Honda, H. ほか4名, Trans. ASME, J. Heat Transf., 114-2 (1992), 442.
- (81) Chu, C.M. and McNaught, J.M., Inst. Chem. Engrs. Symp. Ser., No.129 (1992), 225.
- (82) Mehta, M.H. and Raja Rao, M., Advances in Enhanced Heat Transfer (1979), 11, ASME.
- (83) 藤井, ほか3名, 機論, 51-467, B (1985), 2436.

1. はじめに

燃焼と伝熱のかかわり方は2つに大別されよう。その1つは、ボイラ、加熱炉、熱処理などに見られるように燃焼により発生した熱を利用するときに燃焼ガスから固体壁までの伝熱過程と伝熱速度が問題となる。他は、燃焼過程そのものに伝熱が密接に関わっていることである。その結果、伝熱はたとえば火炎温度ひいては反応速度、火炎伝播速度、等に影響を及ぼす。

以下には、いくつかの燃焼形態の中での伝熱の関わりについて述べる。

2. 燃焼過程を記述するための諸式

燃焼場では燃料、酸化剤等の流れ、混合、拡散、反応、熱発生、伝熱の過程が同時に生じる。このため、燃焼過程を記述する基礎式は、(1)質量、(2)運動量、(3)エネルギー、(4)化学種についての各保存式である。これらは、定常軸対称2次元の境界層流れ場においては次式であるが、さらに一般的な場合については項の数が増えるが本質的には大差ない。記号は慣用のものである。

質量の保存式：

$$\frac{\partial}{\partial x}(\rho u) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(r \rho v) = 0 \quad (1)$$

運動量の保存式：

$$\rho \left(u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial r} \right) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(\mu r \frac{\partial u}{\partial r} \right) + \rho g_x \quad (2)$$

化学種 j の保存式：

$$\rho \left(u \frac{\partial m_j}{\partial x} + v \frac{\partial m_j}{\partial r} \right) = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \rho D_{jm} \frac{\partial m_j}{\partial r} \right) + R_j \quad (3)$$

エネルギーの保存式：

$$\begin{aligned} & \rho \left(u \frac{\partial h}{\partial x} + v \frac{\partial h}{\partial r} \right) \\ & = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\lambda}{C_{pm}} \frac{\partial h}{\partial r} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left\{ r \sum_j \left(\rho D_{jm} - \frac{\lambda}{C_{pm}} \right) h_j \frac{\partial m_j}{\partial r} \right\} \end{aligned} \quad (4)$$

これらの式は燃焼流れ場における流速，各種化学種濃度，エンタルピー（温度）を規定する方程式である。ただし， h ， h_j ：混合ガス，成分 j のエンタルピー， D_{jm} ：化学種 j の有効拡散係数である。いま，燃焼（反応）を伴わない場合は化学種 j の保存式 (4) の右辺の反応項 R_j が 0 となる。そのときの上記の諸式は流動，伝熱，成分の拡散を含む問題に対応する式となる。また，燃焼（反応）がなく成分の濃度 m_j も均一であれば化学種 j の保存式 (3) は不要となり，エネルギーの保存式 (4) の右辺第 2 項の熱の伝導と成分の拡散によるエンタルピー輸送の不均衡の効果をあらわす項もなくなる。このときの上記の諸式は流動と伝熱の問題に対応する式となる。

上式から明らかなように，燃焼の問題を考えようとするれば必ず流動と伝熱の問題が含まれ，逆に対流伝熱の問題が解ける段階にあれば，反応と拡散の効果を加えることによって燃焼の問題に対応することができる。すなわち，燃焼と伝熱の問題は密接な関連があり，問題を考える上でかなりの部分に互換性がある。

にもかかわらず，燃焼があるために特有の問題がある。多成分系であること，温度の変化が急峻であるため物性値の変化が大きいことなどのほかに，最大の問題は反応の複雑さである。たとえば，メタン (CH_4) を空气中で燃焼させると 200 を越える素反応が並行して生じる。素反応と反応速度定数が決まれば式 (3) における成分 j の単位時間単位体積当たりの生成速度 R_j は次式で計算する。

$$R_j = M_j \sum_{i=1}^m (\nu_{j,i}'' - \nu_{j,i}') k_i \prod_{l=1}^s [C_l]^{\nu_{l,i}} \quad (5)$$

ただし， $\nu_{j,i}'$ ， $\nu_{j,i}''$ = 反応 i における j 成分の反応物，または生成物の量論係数， k_i = 反応 i の反応速度定数， $[C_j]$ = 成分 j のモル濃度である。また，式 (5) における反応 i とは各素反応において正逆反応をそれぞれ別々の反応と見なして考え， m はその反応の数であり， s は化学種の数である。

また，多成分であるためにすべての成分の組み合わせの拡散係数，各成分の熱伝導率，粘性係数の値が温度の関数として必要となる。これらの値は分子運動論に基づく数式により算出できる。

温度 T は式 (3)，(4) からエンタルピー h と m_j を求めれば次式の関係から得られる。

$$h = \int_{T_0}^T \sum_j m_j C_{p_j} dT + \sum_j h_{j0} m_j \quad (6)$$

ここで， C_{p_j} = 成分 j の定圧比熱， h_{j0} = 成分 j の標準生成エンタルピー， T_0 = 基準温度である。

3. 層流火炎における拡散と熱の移動

燃料と酸化剤が混合しながら燃焼する拡散火炎内の流速，温度，各化学種濃度は前節の基礎

方程式と補助式で規定できる。熱の移動はエネルギーの保存式(4)に含まれる。特定の条件は境界条件で決める。

図1は水素、メタン、窒素の混合気を燃料とし円管から噴出し、空気流中で燃焼する層流拡散火炎において、ノズル先端からの軸方向距離が $x = 55 \text{ mm}$ の断面における温度と成分濃度（質量分率）の半径方向分布である。 r は火炎中心軸からの距離である。実線は計算値⁽¹⁾、プロットは石塚・酒井⁽²⁾の実験値である。計算結果は実験で得られている各種分布をかなり良く記述できることがわかる。

計算結果と結果の内訳を分析すれば火炎内で生じている熱や物質の拡散などの状況がわかる。拡散火炎では中心軸近傍は燃料過剰、周辺部は燃料希薄であり、断面における最高火炎温度はおおまかには当量比が1（燃料と酸化剤が過不足のない混合比）の近傍で生じる。しかし、詳細に見れば火炎温度は熱と成分の選択的な拡散によって影響を受ける。エンタルピーを規定する式(4)右辺第1項は拡散項でエンタルピーの分布を均一化するが、第2項はエンタルピーを不均一化するように作用する。ルイス数 ($Le = D_{jm} / (\lambda / \rho C_p)$) は各成分について必ずしも1ではないので、熱と成分の選択拡散の影響によりエンタルピーの過不足が生じ、温度に影響を及ぼす。エンタルピーの不均一を生じさせる成分は H 、 H_2 、 H_2O であることが式(4)右辺第2項の各成分の内訳から知ることができる。

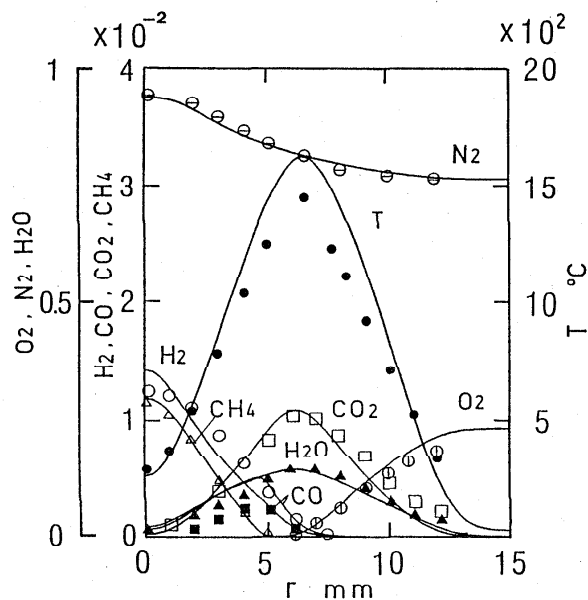


図1 $H_2/CH_4/N_2$ 層流火炎における濃度と温度の半径方向分布

($x = 55 \text{ mm}$. 実線: 計算値. プロット: 実験値)

また、式(3)における各成分の拡散係数 D_{jm} が同一ではないので成分同士の選択拡散も生じる。これにより、最高火炎温度の火炎面近傍に燃料の水素成分が選択的に拡散し、燃料成分が濃縮されたり、さらに周辺に拡散し燃料成分が希薄化されたりする。エンタルピーの過不足と燃料成分の濃縮、希釈により火炎温度がもとの燃料の断熱火炎温度よりも上流部ではかなり高くなり下流部では低くなる。これらが消炎やNO生成に影響を及ぼす。

層流火炎は上記のようにかなり詳細に数値解析できるようになってきた。これは計算機の性能向上によるところがおおきい。しかし、高位の炭化水素の燃焼については反応スキームと速度定数のデータが不明確であるので、上記のような計算はできる段階にない。低位の炭化水素（たとえば CH_4 ）が燃焼する場合も主要反応はその分解反応であるが現実にはすす（固体）が火炎内で生成されることから重合によって高位の炭化水素も生成されていることになる。低位の炭化水素の燃焼でもすべての過程を記述できていない。

4. 乱流火炎におけるスカラー量の移動

乱流場で時間平均した流速、化学種濃度、エンタルピー等を求めるときはもとの方程式を時間平均した方程式を用いる。たとえば、定常、軸対称、境界層流の場合で軸方向の速度 U と成分 j の質量分率 M_j についての方程式は次式となる。

$$\bar{\rho} \left(\bar{U} \frac{\partial \bar{U}}{\partial x} + \bar{V} \frac{\partial \bar{U}}{\partial r} \right) = - \frac{\partial \bar{P}}{\partial x} - \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r \bar{\rho} u' \tilde{v}') + \bar{\rho} \bar{g} \quad (7)$$

$$\bar{\rho} \left(U \frac{\partial \bar{M}_j}{\partial x} + V \frac{\partial \bar{M}_j}{\partial r} \right) = - \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r \bar{\rho} v' \tilde{m}_j') + \bar{R}_j \quad (8)$$

ここで、 $\bar{}$ は時間平均、 $\tilde{}$ は密度加重 (Favre) 時間平均、 $\tilde{}$ は密度加重平均からの変動量をあらわす。 u' 、 v' はそれぞれ密度加重の軸方向速度 \tilde{U} 、半径方向速度 \tilde{V} からの変動速度成分、 m_j' は密度加重の質量分率 \tilde{M}_j からの変動成分を表す。エネルギーの保存式を考えると、式(6)で定義されるエンタルピーが反応によって変化しない保存量であることから式(8)での m_j' を h' 、 \tilde{M}_j を \tilde{h} と置き換え、反応項 \bar{R}_j を 0 とすればよい。また、流れ場における局所の燃料と酸化剤の混合度合いを表す質量混合分率 \tilde{F} についての保存式を考えると、これも反応によって変化しない保存量であるので式(8)の \tilde{M}_j を \tilde{F} 、 m_j' を f' と置き換え、 \bar{R}_j を 0 とすればよい。 f' は \tilde{F} の密度加重平均からの変動成分である。すなわち、燃焼場でも燃焼によらない保存量 \tilde{h} または \tilde{F} が、それらが流れ場のエネルギー状態および混合状態を規定しており、 \bar{R}_j を 0 とした式(8)と同じ式で計算できる。ただし、式(7)、(8)を計算するにはそれぞれの

式の右辺の変動量の相関項 $\widetilde{u''v''}$ や $\widetilde{v''f''}$ を別途計算する必要がある。たとえば、 $\widetilde{v''f''}$ を求める輸送方程式は次式である。

$$\begin{aligned} \bar{U} \frac{\partial \widetilde{v''f''}}{\partial x} + \bar{V} \frac{\partial \widetilde{v''f''}}{\partial r} - \frac{\widetilde{w''f''}}{r} \bar{W} = & -\bar{v}''^2 \frac{\partial \bar{F}}{\partial r} + \frac{\widetilde{w''f''}}{r} \bar{W} - \bar{f}'' \frac{\partial \bar{P}}{\partial r} \frac{1}{\bar{\rho}} - C_{1c} \frac{\bar{\epsilon}}{k} \widetilde{v''f''} - C_{2c} \frac{\bar{W}}{r} \widetilde{w''f''} \\ & - C_{1c} \frac{\bar{\epsilon}}{k} \left\{ \frac{1}{k} (\bar{v}''^2 \widetilde{v''f''} + \widetilde{v''w''} \widetilde{w''f''} + \widetilde{u''v''} \widetilde{u''f''}) - \frac{2}{3} \widetilde{v''f''} \right\} \\ & + 2 \frac{\partial}{\partial r} C_c \frac{\bar{k}}{\bar{\epsilon}} \left(\bar{v}''^2 \frac{\partial \widetilde{v''f''}}{\partial r} - \frac{1}{r} \widetilde{v''w''} \widetilde{w''f''} \right) - \frac{2}{r^2} C_c \frac{\bar{k}}{\bar{\epsilon}} (\widetilde{w''^2} \widetilde{v''f''} + \widetilde{v''w''} \widetilde{w''f''}) \\ & + \frac{2}{r} C_c \frac{\bar{k}}{\bar{\epsilon}} \left(\bar{v}''^2 \frac{\partial \widetilde{v''f''}}{\partial r} - \widetilde{v''w''} \frac{\partial \widetilde{w''f''}}{\partial r} \right) \end{aligned} \quad (9)$$

$\widetilde{v''f''}$ は \bar{F} を半径方向（主流に直角な方向）へ乱れによって輸送する項である。半径方向への乱れによるエンタルピーの輸送 $\widetilde{v''h''}$ は式(9)の f'' を h'' に \bar{F} を \bar{h} に置き換えればよい。 $\widetilde{v''f''}$ または $\widetilde{v''h''}$ は境界層の流れでは \bar{F} または \bar{h} の混合または移動を支配する量である。式(9)の左辺および右辺第3項まではそのまま導かれる項で右辺第4項以下は変動量の高次の相関や圧力変動が関係する項をモデル化^{(3)・(4)}したものである。モデル化した項には実験定数 C_{1c} 、 C_{2c} 等を含む。式(7)、(8)や式(9)に相当する運動量、成分およびエネルギーの乱流流束の輸送方程式を連立させると燃焼場における速度、温度、化学種濃度の分布を求めることができ

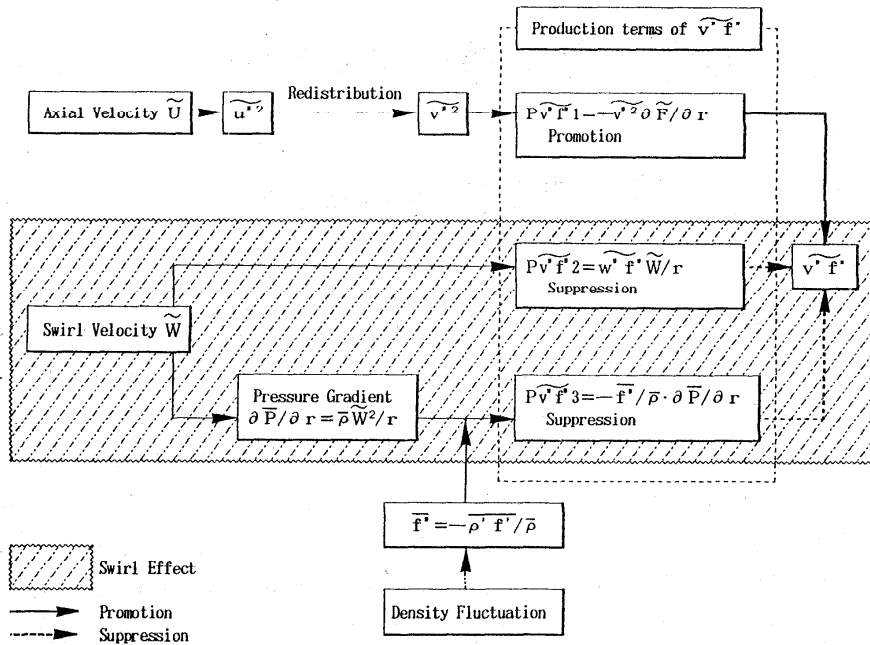


図2 混合の促進と遅延を引き起こす過程

る⁽⁵⁾。特に、乱流拡散火炎等では燃料と酸化剤の混合が現象を律速することが多く、 $\tilde{v} \tilde{f}$ の特性が重要となる。その特性は式(9)の各項を分析することによって理解できる。

図2は $\tilde{v} \tilde{f}$ を増加させたり減少させたりする影響因子をとくに式(9)の生成項(右辺第1～第3項)に着目して示した⁽⁶⁾。 $\tilde{v} \tilde{f}$ を増加させる因子は式(9)右辺第1項で \tilde{F} の半径方向勾配に比例することから勾配拡散を促す項である。右辺第2項は左辺第3項と同じで、旋回速度成分 \tilde{W} が関係する。この項は $\tilde{v} \tilde{f}$ を減少させ、混合を遅らせる効果を持つ。右辺第3項は半径方向の圧力勾配と密度変動が関係し、中心部が高温で周辺部が低温であるような場合は混合を遅らせる効果がある。第2、3項は \tilde{F} の勾配と関係しないので勾配型の拡散モデルでは記述できないことになる。

4. 噴霧の燃焼

液体燃料を微粒化して燃焼させる噴霧燃焼の過程を記述する式としてガスは連続体として扱い、前節と同様に質量、運動量、各化学種の保存式を用いる。噴霧については各液滴の運動を追跡するため液滴の運動の式を用いる。液滴とガスとの運動量の交換は抗力係数を介して計算する。液滴周囲のガスから液滴が加熱され温度上昇し、蒸発する過程は熱および物質の拡散を連立させて各液滴について計算する。液滴およびガス側のすべての関係式を連立させて数値計算することによって噴霧の流動、蒸発、着火および燃焼の過程をシミュレートできる⁽⁷⁾。

図3はディーゼル噴霧と類似の非定常噴霧について、計算による等温線と実験におけるシュリーレン写真⁽⁸⁾を対比して示す。両図の経過時間 t および尺度は共通である。実験では噴射開始から約1msで着火がおり、着火後に高温部が膨張により広がるが、計算でも約1msでホットスポットが生じ、高温部の広がりシュリーレン写真と類似している。非定常噴霧の着火や燃焼の全体的な特徴は予測できている。

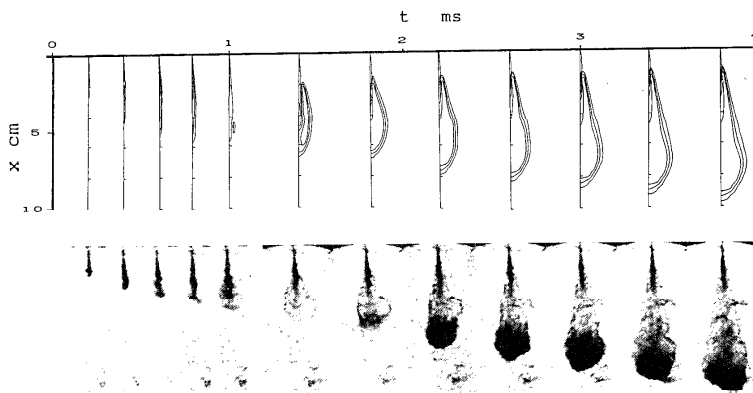


図3 非定常噴霧の着火と燃焼(計算による等温線と実験⁽⁸⁾によるシュリーレン写真)

噴霧燃焼の中の伝熱問題は液滴の昇温、蒸発がある。ディーゼル燃焼では高圧であるので超臨界圧での蒸発が最近の問題になっている。蒸発した燃料が燃焼する過程は前節のようなガス拡散火炎の扱いになり、乱流場での熱や成分の拡散が問題となる。

5. むすび

燃焼過程では必ず伝熱が生じる。伝熱がなければ通常の火炎の伝播や安定な燃焼を維持できない。燃焼のない場での流動と伝熱の解析は燃焼場の解析にも応用でき拡散と反応を加えれば燃焼解析ができる。最近の計算機の性能向上のため、かなり詳細な燃焼解析ができるようになってきている。

参考文献

1. 高城, 徐, 水素/メタン拡散火炎の数値解析—選択拡散の影響, 機論 (B 編), 59, 558, (1993), 掲載予定.
2. Ishizuka, S. and Sakai, Y., Twenty-first Symposium (International) on Combustion, (1986), 1821, The Combustion Institute.
3. Launder, B.E., Reece, G.J. and Rodi, W., J. Fluid Mech., 68, (1975), 537.
4. Launder, B.E., Turbulence (ed. Bradshaw, P.), (1976), 232, Springer-Verlag.
5. 高城, 平井, 沖, 管内旋回火炎における流動, 混合および燃焼の予測, 機論 (B 編), 57, 534, (1991), 715.
6. 平井, 高城, 応力・スカラーフラックス方程式による旋回乱流輸送特性パラメータの導出, 機論 (B 編), 58, 547, (1992), 921.
7. Takagi, T., Fan, C.Y., Kamimoto, T. and Okamoto, T., Numerical Simulation of Evaporation, Ignition and Combustion of Transient Sprays, Comb. Sci. Tech., 75, (1991), 1.
8. 横田, 神本, 小林, 機論 (B 編), 54, (1988), 741.

1. はじめに

ふく射伝熱という伝熱の機構は自然の成立とともにあったはずであるが、この機構が初めて熱工学の研究の課題となったのは、高温の工業システム、とりわけエネルギーの生産にかかる蒸気原動所の火炉における伝熱の評価を通じてであった。このような研究の課題は、いまなお重要でありつづけているが、この二三十年におけるふく射伝熱の研究を振り返ると、ふく射伝熱研究の課題も、工業生産と社会構造の変化に応じてかなりの程度に変化してきたことがわかる。ふく射伝熱研究は、原子力、太陽エネルギー、宇宙、低温・真空、結晶・薄膜、電子機器、生活・地球環境など、それまでには関連の薄かった産業・生活関連の分野からも求められるようになった。コンピューター技術の発達に応じて、研究の方法・手法にも変質があった。

行われた多くの研究は、学術誌の年鑑記事[1-5]などに整理され、またいくつかのレビュー[6-12]が与えられている。伝導・対流など他の機構の伝熱とふく射伝熱が複合的に起こる場合、ふく射の散乱・吸収・放射性媒質を含む場合などのふく射伝熱のとり扱いが研究され、また、ふく射伝熱の特殊性を積極的に利用して伝熱促進をはかるシステム工学的な努力がなされてきた。従来のたとえば火炉燃焼の研究では、工業系における現象や問題がまずあって、研究の主体的な努力はむしろそれを一般的に記述しあるいは克服することに注がれていたようであるが、最近のふく射伝熱研究では、理論・計算研究が先行し実験的な検証を得る方式のものが主流になりつつある。ふく射物性の研究は、おもに工業系を構成する気体、粒子・粒子層、実在表面などの性質をとり扱ってきた。しかし、最近とくに多様化してきた物質や物質系の状態、伝熱システムの研究の進展には必ずしもうまく対応できていない。とくに実在表面についての研究の立ち遅れが指摘される。

本稿では、ふく射伝熱研究のニーズとふく射物性研究のシーズについて、著者が理解する研究のすじみち・方向を述べ、今後のふく射物性研究の必要性を強調する。

2. ふく射伝熱の系とふく射物性

2.1 コンピューター コンピューターの発達は、複雑な工学系での伝熱についての多角的な検討を可能にして多くのモデル計算研究を生み出し、実験に基礎を置く研究の割合を相対的に減少させた。コンピューターは、また、ふく射物性に関する実験の制御や物性モデルに基づく数値実験において重要な役割を果たした。より直接的な実験の結果を入力量とし、ひとつの反転問題を解いてより本質的な物性を探る形式の実験研究が、現在むしろ普通のものになりつつある。しかし、一方、ふく射伝熱・ふく射物性研究の成果が工業設計・制御の現場で十分に

生かされてきたわけではない。とくに、ふく射物性については、より基礎的な理解の不徹底がある。研究サイドの問題として、ふく射伝熱・ふく射物性の問題の数学的な難点を克服し計算時間の短縮のために払う努力を、コンピューターの計算処理能力に置き換えて、避けて済ませられるようになることは望ましい。その場合、基礎となるより単純な、物理現象についての研究のアイデア、あるいはシステム工学的な研究のアイデアの検討に研究の主力を注ぐことが、近い将来可能になることが期待される[13]。

2.2 Cz炉 複数の固体壁面間にふく射の散乱・吸収性の媒質がない場合、ふく射は直接には固体壁面のみと相互作用する。壁面間にある媒質とは、ふく射によって加熱された壁面からの伝導あるいは対流伝熱を通じて間接的に関係する。ふく射伝熱は壁面のふく射性質のみで代表されるので、その特性のとり扱いは十分に簡単なものであるはずである。ところが、実際には、ふく射物性の値がない、しかも工学系の特性はその値に著しく敏感であるというところで、行き詰まることが多い。

シリコン単結晶製造の主流となっているCz法では、シリコン融液や引き上げられる単結晶は低温の壁に面する。雰囲気は低圧のアルゴンであり、シリコンの融液と結晶の表面からのエネルギーの放出は、実質的にふく射伝熱のみによるので、この伝熱量が評価できないと、結晶化の解析のみならず工学系のエネルギー収支も把握できないことになる。ところが、シリコンのこの温度域でのふく射性質は全くと言ってよいほど知られていない。原子番号で指定される地球上に最も多い元素の、清浄な光学鏡面が真空に向かうときの値が（全放射率だけでもよいと言っても）ないのである。事情は半導体を含む各種の薄膜の生成・加工工程についても同様である。

2.3 流動層・充填層 壁面間にふく射の散乱・吸収性の媒質がある場合、ふく射はこの媒質とも直接に相互作用する。この場合、ふく射伝熱は、ふく射輸送方程式をふく射輸送の項を含むエネルギー方程式と連立して評価することになる。

たとえば、固体粒子の流動層や充填層は、石炭燃焼炉や化学反応装置あるいは原子炉の燃料棒などに見られる系であるが、この問題について典型的なものである。流動層については、固体粒子を含む流体と壁面との間のふく射・対流複合伝熱が問題になる。充填層については、高密度で充填された固体粒子層をよぎるふく射・伝導複合伝熱が問題になる。これらの層でのふく射伝熱は、粒子層とそれをとり囲む壁面とのふく射交換と、粒子層内でのふく射交換とを、ふく射輸送方程式に含まれる粒子層のふく射性質とその方程式の境界条件に含まれる壁面のふく射特性を通じて評価することになる。粒子層の性質は、減衰係数、散乱アルベド、散乱の位相関数のスペクトルで代表されるが、もし、粒子がふく射の波長に比べて比較的小さく、また充填率が低く、粒子間距離がふく射の波長に比べて小さいか同程度である場合には、数学的な記述には深刻には困まらないことも多い。これは、後に述べるように、粒子を構成する物質の光学定数のスペクトルが既知であれば、という意味である。現実には、一般に複雑な物理的・

化学的な組成をもつこれらの粒子についてそれを知るのには難しい。また、ふく射物性モデルの数学的な記述が適切であるや否やは別の問題である。さらに、流動層や充填層をとり囲む壁面は典型的な実在表面であり、そのふく射性質を推定するのは容易ではない。

2.4 ガス灯のマントル 明治の初期にガスの炎を包んで明るい光を放射する布があった。原理的にこれとは少し異なるものではあるが、以前の家庭のガスストーブには陶器や金網のキャップが付いていた。これは、都市ガスの不輝炎でキャップを高温にし、そこからのふく射をわれわれ/人体の直接的な加熱/暖房に用いる工夫であった。工業系のニーズに直接的に応える研究とは別に、この類の(単純で優れた)システム工学的な着想の生かされる研究が期待される。

これまでも、ふく射伝熱の特徴を積極的に利用し伝熱促進をはかるいくつかの方法が検討されてきた[6]。ふく射の放射・吸収性のない流体と固体壁面と間の伝熱特性を改善するために、流路内に平板・フィンなど固体の拡大伝熱面を設置し、あるいは流体に固体の粒子を混合して、流体と壁面との間の伝熱を促進する方法が検討された。また、流路に流動抵抗の小さい多孔質の固体層を設けて、その層内に大きな温度勾配を形成することによって、層の上流側にふく射の高密度空間を実現する方法が開発され実用化された。これらは、流体のエンタルピーをいったん固体の熱エネルギーに変換して後、加熱された固体の放射するふく射のエネルギーの形で利用しようとするものである。より直接的にふく射の方向を制御するために、鏡や円柱、板などを配置する工夫も試みられている。ふく射伝熱促進のためには、固体表面の微視構造を含めて種々の因子のバランスよい最適化をはかることが重要である。

今後、とくに電子・医療などに関係する分野で、熱システムの小型化、マイクロマシン化が進むとき、同種の問題がこれまでとは違う大きさ・温度差の尺度で問題になり、そのときには表面のふく射性質がより重要な問題として浮上するものと思われる。

3. 実在表面と安全設計

ふく射伝熱の評価が重要となる分野が拡大すると、ふく射物性研究の対象となる物質はますます多様になる。固体について言えば、その実在表面はさらに多様である。多くの場合、固体のふく射性質は表面の性質であるので、ふく射物性の研究者はこの多様さいかに対処すべきかを考えることが必要である。

新しい材料についてはふく射性質の値が全くないのが普通である。一方、多用される材料については、図面いっばいにデータが散乱していて選択に困ることがある。これは実験の精度の問題ではなく、表面の多様さの反映である。運よく値が特定できたとしても、その値は、表面が安定的にそのままであれば確からしいということである。工業装置や自然界の実環境下で、表面は一般に安定ではないし、事故時には表面状態は瞬時に著しく変化する。すなわち、実在表面のふく射性質を仮定するには、かなりの危険が伴う。一方、工学系の設計では、未知の高温系を高度の安全性を確保しつつ開発して行かなければならない場合も少なくない。このよう

な、ときに深刻な問題に対して、ふく射物性研究の側では、第一に、安全設計の方針をとることを勧める。表面の温度が推定できれば、その表面が黒体であるとして計算して最大のふく射流束は抑えられる。もし、ふく射伝熱以外の他の伝熱の機構が主たるエネルギー輸送の機構であるのなら、ふく射伝熱はないものとして最小のふく射流束を抑えるのがよい。ふく射伝熱が優勢である場合には、表面が平滑で清浄な表面であるとして計算すれば、最小のふく射流束は抑えられる。平滑で清浄な表面の性質は光学定数スペクトルがあれば計算できるし、heavily に合金された耐熱合金などでは、そのスペクトルを電気伝導率から推定できることもある。

個々の実在表面の性質をふく射伝熱評価の応用のために測定することは、現在のところ簡単ではない[14]。ふく射物性研究の側でなすべき第二点は、実在表面の性質を適切に測定するための方法を開発することである。さらには、それが研究成果の利用者の側で使えるものに準備されることが重要である。第三に、より本質的には、実在表面のふく射性質を系統的に記述するための方法を確立することが重要である。物理学ではなく物理工学のふく射性質研究の視点、あるいは表面を生き物として捉える生態学的な視点が望まれる。

4. 物性と分光

4.1 ふく射物性の波長特性 　ふく射物性の波長特性に関する議論は、ふく射はさまざまな波長の波からなるのでより分析的に研究するのがよい、という積極的なあたり由来するものではない。伝熱学は、要するになんワットのエネルギーが輸送されるかを問題にするので、その答えが適切に得られるならば、議論は簡単な方がよい。ところが、ふく射性質の波長特性をある程度正確に把握しなければ、伝熱評価の正確度は必要なレベルには達しないので分光器を用いる研究を行うというのが実情である。伝熱学は基本的に温度勾配のある系内でのエネルギー輸送をとり扱うが、ここで温度差の大きい表面間のふく射輸送を扱うときに、全吸収率と全放射率は値の精度以前に等しくない。

図1は、無限平行平板間のふく射伝熱量を示して、この点を強調するものである。両平板は光学鏡面であり、その光学定数スペクトルはその温度特性を含めて既知であるとして、2種の計算を行った結果である。図の縦軸の q^* は、表面1から表面2へのふく射流束に比例する無次元量(黒体表面間のふく射流束で規格化した値)である。 T_1 と T_2 はそれぞれ表面1と表面2の温度である。実線は、両表面の放射率の波長・温度特性を考慮して計算した q^* の値を示す。破線は、実線の場合のデータを基にして厳密に半球放射率を温度特性をも含めて計算して用い求めた q^* の値を示す。一点鎖線は、両表面のふく射性質の波長・温度特性を考えないときの値である。この図では、破線の実線からのずれが、両平板の温度差が大きい場合にかなり大きいことに気づかれる。すなわち、全放射率を用いて破線を計算するときに依拠した、表面の吸収・放射特性がふく射の波長によらないとする灰色体の仮定がこの大きな誤差を生む。ここで、破線を計算するのに用いた全放射率は、この計算をするための論理に照らして100%正し

いものである。この例に示されるように、どんなに正確な全放射率を用いても、この灰色体の仮定に基づく限り、計算結果には1桁の有効数字もなくなってしまうことが、決して珍しいことではない。

灰色体の仮定は、多くのふく射伝熱の計算法にとって必然的なものではないが、粒子系や実在表面についての物性データが見出せないことにも関係して、安易に仮定されることが多い。大ざっぱに言ってもふく射伝熱に寄与する広い波長域にわたって放射率が一定である表面はないので、全吸収率と全放射率は基本的に等しくない。太陽エネルギー工学の分野では常識的なこのことが、従来の伝熱学の分野ではそうでもなかったのは残念なことである。

灰色体の仮定の難点は、ふく射の波長域を二三の領域に分けて考え、そこでふく射性質は区間的に灰色であるとする波長帯域近似法を用いることによって、かなりの程度に改善されるはずである。この変更は、灰色体計算のプログラムの主たる部分をほとんど変更することなく実行できる。よい学部課程の(伝熱一般の)教科書である Incropera-Dewitt の書[15]では、この方法がていねいに説明され演習問題にも扱われている。

4.2 ふく射物性の角度特性 ふく射の散乱・吸収性の媒質を含まない簡単な壁面間のふく射伝熱問題については、テキストの示す形態係数を用いるふく射エネルギー交換の計算は便利であり、開発され、最近では市販されることもある熱解析のプログラムにはこの方法が多く用いられているようである。

この方法では、表面のふく射性質の角度特性について、2つの仮定をとる：(1) 完全拡散放

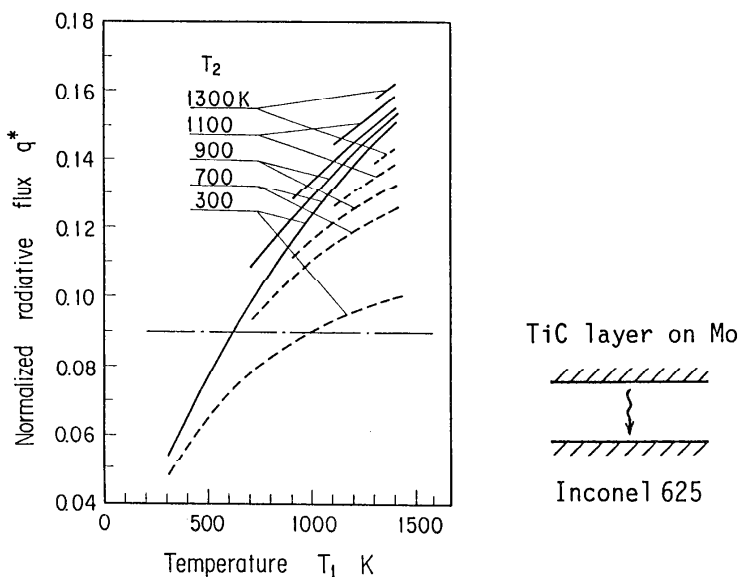


図1 ふく射物性における波長特性がふく射伝熱評価に及ぼす影響

射の仮定と (2) 完全拡散反射の仮定 である。仮定(1)は、表面が ふく射を半球等強度放射するとするものであり、これは悪くはない。仮定(2)は、表面に 半球等強度入射したふく射が半球等強度反射されるとするものであり、形態係数を用いるこの方法に本質的なものである。実際には、伝熱学は温度差のある表面間のエネルギー交換を扱うので、一つの表面にはいろいろな温度・放射率の壁面からのふく射が入射するため、入射は原理的にも半球等強度的ではない。また、実在表面は不完全に拡散反射的で鏡面反射性はかなり強いので、その表面は指向性をもって反射する。すなわち、この仮定に基づく計算では、第一に、ふく射が輸送される方向が実際とは違うことになる。第二に、半球等強度入射半球反射率の値が実際の分布をもった入射に対する半球反射率の値とは異なるので、半球入射吸収率ひいては半球放射率の値が実際のそれとは異なることになる。とくに、この第一点は、特定の壁面へ/からの エネルギー流束の評価が重要であり誤れば危険に至るような場合には、深刻な問題にもつながる。

この完全拡散反射の仮定の難点は、表面反射の角度特性を鏡面反射成分と拡散反射成分に分けて考慮することによって、かなり改善されるはずである。この場合、もう一連の幾何光学的な鏡面反射成分についての計算のルーチンが必要になるが、これについては、照明工学の分野の手法を移入することによって得られるところが多いであろう。

4.3 界面放射率 表面から放射されるふく射の強さあるいはエネルギーは、ふく射がその表面からどのような媒質に向かって放射されるのかに依存する。また、表面に入射したふく射が表面で反射される強度あるいはエネルギーの割合は、ふく射がどのような媒質から表面に入射するのかに依存する。すなわち、ふく射物性の波長・角度特性を厳密に考えても、なお、放射率や吸収率は物質に固有の値ではなく、その表面とそれに接する媒質(物質)との関係で決まる特性である。ふく射物性のデータ集には、さまざまな表面の全放射率(の温度特性)が与えられ、あるいは放射率・反射率などのスペクトルが描かれているが、それらの率は、暗に表面が真空や空気、他の気体に対向することを想定するものである。しかし、表面が液体や固体に面するときには、値はデータ集のものとは著しく異なるものになる。

最近では、固体表面が液体ヘリウム、熔融塩、有機材料などの赤外透過性液体に接し、あるいは近赤外透過性の固体石英の高温容器が熔融シリコンに接する場合は、現実的なものとなり、そのような系でのふく射伝熱の評価が重要なものになりつつある。この場合、放射率や反射率は複数の物質間の関係として決定される。このような状況での放射率や反射率を正面からとり扱おうとすると、もっとも簡単な、2つの媒質が光学的に平滑な面で接している場合についても、両物質の光学定数スペクトルが必要である。実在の系では固体の表面は(汚れて)あるいは実在表面であることが多いので、その研究の進んでいない現在の状況ではよい示唆を与えることは難しい。荒木ら[16]は、最近、熔融塩に接する(腐食された)金属表面のその条件での波長帯域放射率を測定することを試みた。その研究は、今後のふく射物性研究の一つの方向をさし示すものである。

4.4 有効熱伝導率 粒子の充填層や繊維質の材料は断熱材として用いられ、省エネルギー政策に貢献してきた。また、ガラスや赤外半透過性セラミックス・結晶・流体の熱特性が伝熱学の問題になることが多い。最近では、伝導・対流・ふく射複合伝熱問題を正統的にとり扱う手法が確立され、従来これらの物質について有効熱伝導率なる量で特徴づけられていた熱通過(heat transmission)の実態が明らかにされつつある。また、ふく射伝熱の影響を受けない、高温物質の真の熱伝導率や熱拡散率を測定する努力がある。このような正当な伝熱・熱物性の研究の進展も、しかし、ふく射物性研究の研究の進展を伴わず、あるいは伝熱学の理解が必ずしも行き届いていない社会状況の下では、以前の有効熱伝導率は“有効”であったのに、真の熱伝導率や熱拡散率は工学系の伝熱特性の評価をより不十分なものにする、という皮肉な(社会)現象を一時的には生むかもしれない。

5. ミクロ指向

5.1 粒子と表面のミクロ構造 a. 粒子散乱 粒子が球形に近く、粒子と粒子間距離がふく射の波長に比べて小さい粒子の系については、Mie散乱の計算を通じて、ふく射輸送方程式に代入すべき物性値は得られる。球形でなくても簡単な幾何形状のものについては、解が準備されていることがある。

粒子密度が高い場合、粒子と粒子の間で電磁場の干渉が生じるが、球形粒子系については、それが起こるサイズパラメータ(粒子の直径のふく射の波長に対する比に比例する) α と粒子密度の領域を示す図が示されている[8]。この図によれば、この干渉の影響の小さい独立散乱領域は意外に広い。干渉散乱の結果、巨視的に見ると粒子系の吸収は増加する。干渉散乱現象の理論的など扱い、粒子形状が単純な場合にも難しいようである。そこでは、電磁気学的な難しさの他に、粒子の現実的な3次元分布が仮定されなければならない点が指摘される。

粒子がふく射の波長に比べてはるかに大きいときには、粒子の散乱特性は、粒子のサイズというより粒子の表面を構成する表面の微視形状・性状とふく射の相互作用の問題となる。この粒子散乱から表面散乱への移行する過程は一つの研究の課題となる。あるいは、そのような大きい粒子については、鏡面反射的かあるいは完全拡散反射的かを仮定して計算を実行することが行われることもある。

小さな粒子の独立散乱系の、もっとも基礎的な場合についても、研究成果を実際の系に適用しようとする、困ったことが起きる。すなわち、散乱の研究では散乱モデルの妥当性を主たる検討の課題とするが、多くの場合、粒子散乱特性は、粒子を構成する物質の光学定数 \hat{n} とサイズパラメータ α で特徴づけられるので、研究は代表的な \hat{n} について、 α と散乱の角度特性の関係を調べるものになる。したがって、その研究の成果を実際の系のための計算に適用するには、論文の著者の辿った計算の軌跡を、その実際の系の粒子の光学定数スペクトルに応じて、必要な波長域にわたって、改めて何度も辿らなければならない。しかも、それができるの

は、(一般には複雑な組成をもつ)粒子の物質の光学定数スペクトルがある場合にである。

塗装膜のふく射性質は、基本的には粒子特性によって特徴づけられる。また、アルミナ、ジルコニアなどの白く見える高密度のセラミックスの可視・近赤外特性は、基本的にはこれらの材料を形成する小さい単結晶粒の粒界での屈折率差がもたらす粒子散乱の干渉効果の結果である。しかし、この高密度で分布する粒子の散乱場について、ふく射の干渉を詳細に追う解析的なアプローチが行われるのは、あまり現実的ではない。すなわち、実際の高密度系についてふく射散乱の波長・角度特性を詳細に把握し伝熱の計算に結びつけることは、多くの場合難しい。この場合、ふく射輸送方程式では実用上のネックとなる散乱の位相関数は、前方散乱係数と後方散乱係数の比に置き換えられる。媒質の層をとり囲む壁(実在表面)の反射特性のとり扱い・仮定の詳しさとのバランスにもよるが、媒質層での等方散乱を仮定し層の減衰係数や散乱アルベドのオーダーだけでも確からしく(しかし必ず物性の波長特性は考慮して)把握するのがよい。ただし、流束モデルの物性値には、そのモデルのために準備された値のスペクトルが用いられることが重要である。

b. 表面散乱 伝熱学の実在表面は、一般にふく射の波長のオーダーの凹凸をもつあるいは表面である。また、多くの場合、表面にはなんらかの表面被膜が形成されている。その被膜も必ずしも均質成長したものではないので、さらに被膜と下地の間の界面の幾何形状が問題になることもある。ふく射吸収性の強い表面(典型的には金属)のふく射性質は表面のごく近傍の薄い部分で決まるので、その性質を理論的にとり扱うには、まず表面の幾何形状におけるふく射(電磁波)の干渉を扱わねばならないことになる。この場合、もしふく射性質に及ぼす表面形状の影響が小さく、それが一つのパラメータ(たとえば2乗平均あかさ)について単調な特性をもつものであるなら、実験を繰り返しその結果に一般性を見いだす努力をするのがよい。ところが、表面形状の影響はかなり強く放射率を100%も変えることもある類のものである。また、たとえば2乗平均あさは指標とはなりえても、ふく射性質を特徴づける唯一有効な因子ではない。この点については、フラクタル幾何や表面のスペクトルの3原色論のアイデアを含めて一般的な表面モデルをつくる努力もある。

ふく射物性の実験研究の側からは、実験法、とりわけ指向放射率や指向入射半球放射率のスペクトル、そして半球放射率や半球等強度入射半球放射率のスペクトルを、特定のこの表面について測定できる体制ができるようにすることが望まれる。

5.2 分子動力学 ふく射(電磁波)は、われわれが原子層に働きかけてその状態を制御するためのよい手段の一つである。たとえば、薄膜のレーザ加工を想定し、ふく射の照射と融解・凝固現象のメカニズムに注目するのは興味深い。このような系は伝熱の非平衡・非定常系であり、研究のすじみちには熱平衡状態に注目する正統的な分子動力学のそれとは少し異なる。ここで、ふく射については、単にそれをエネルギーを運ぶ粒子ではなく、位相情報を持ち、干渉する波として捉えることが重要である。 μm のスケールで見ると、(典型的には)強吸収体で

ある金属の放射や反射は表面現象と見なせるが、nmのスケールの原子層の厚さの視点で見るとき、金属の場合でも、ふく射現象はその層内で起こる。ふく射場は層内で干渉し、またそのエネルギーは層内で体積的に吸収される。

コンピュータの処理能力や研究経費に強く依存する議論ではあるが、現在の段階では、上述の干渉と体積吸収の2点を抑えれば、原子の運動<熱>を古典力学的に取扱ひ、外来の波によって層内に形成される(単色の)電磁場の干渉<ふく射>を古典電磁気学的にとり扱う、いくぶん折衷的なとり扱ひをするがよいであろう。原子層が放射する全ふく射はむしろふく射輸送方程式に基づいて処理するのがよい。2体問題としてのとり扱ひの妥当性、原子間ポテンシャル関数の厳密さは、少なくとも現在の段階では伝熱研究者の定性的な研究の課題とはならない。

6. おわりに -ふく射伝熱学の用語-

第12回日本伝熱シンポジウムのインフォーマルミーティングで、ふく射伝熱学に関する用語が検討されたことがあったが、その後にも、用語は ばらばらに使われてきた。論理的な学術(science)の思考は ことばをもつてするので用語は重要であるが、それを「統一する」ことには学術のためにも賛成できない。しかし、意見を交換するのはよいことであると思われる。

本稿では、電磁波あるいは広い意味での光を総称して ふく射(radiation)と呼んできた。この考え方によれば、とくに熱(heat, therm)から変換されやすく、また 熱に変換されやすい赤外域のふく射を熱ふく射(thermal radiation)という。古典論的にいって、熱は 質量のある電子や原子などの運動エネルギーであり、ふく射は電磁場のエネルギーである。ふく射は熱ではない。ふく射熱、ふく射熱流束、太陽熱などの熱素説を想起させる用語には抵抗がある。著者の大学の理学部には放射物理学講座があって、そこではおもに紫外分光の研究が行われているが、ひらかなのふく射は柔らかいわれわれの電磁波にはふさわしいものかと思われる。

おもに赤外のふく射を想定して述べると、(物質の)熱のエネルギーが(電磁場の)ふく射のエネルギーに変換されることを ふく射の放射(emission of radiation)という。逆に、(電磁場の)ふく射のエネルギーが(物質の)熱のエネルギーに変換されること ふく射を吸収(absorption of radiation)という。伝熱の学会では、ふく射というセッションが 対流、熱伝導、沸騰などのセッションと並べられることが多いが、いくぶんバランスが悪い。ふく射以外は自動詞で述べられる現象であるのに対して、ふく射現象は、目的語を伴って述べられる現象であるからである。トランジスターのエミッター(emitter)は電子を emit する。レーザー(Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation)はふく射を emit する。長い間ふく射伝熱学は高温の物体とりわけ火炎の放射する熱ふく射を扱ってきたので、目的語はなくても、それは日本語の伝熱学の文脈のなかで了解されてきたものと推察される。しかし、より広い分野での現象と関わっていくためには、radiation と emission とを区別する用語をもつことが重要であると思われる。

ふく射伝熱学では減衰係数・放射率などの物質の性質を物性と呼んできたが、他の分野の物性は、多くの場合より微視的な性質を指すようである。伝熱学の著書[17]にも、(神の与えた)普遍性あるそのものに固有の属性を property と呼び、"もの"の一時的な性質で(人間が制御できる側面)は characteristic と呼ぶという考え方もあり、たとえば抵抗率には resistivity のように -ivity を接尾語に与え、抵抗は resistance のように -ance を接尾語として一段低いところに置くことを主張されたことがあった。しかし、普遍性の定義は難しいし、普遍性はほどほどにあるときによい。現在では、われわれが -ivity 量を制御できることも多くなった。いまは、こだわらずに、"もの"の性質を物性と呼び、放射率は、ものによらず emittance と呼ぶのがよいと思われる。

文献

- [1] 林 勇次郎・高城敏美・ほか14名: 機械工学年鑑(1991年)熱工学, 日本機械学論文集, ser. B, vol.58, no.552, pp.2336-2347, Aug.1992.
- [2] 林 勇次郎・高城敏美・ほか5名: 機械工学年鑑(熱工学), 日本機械学会誌, vol.95, no.885, pp.698-701, Aug.1992.
- [3] Tanasawa, I., Nishio, S. and Echigo, R.: Heat transfer bibliography- Japanese works, Int. J. Heat Mass Transf., vol.35, no.11, pp.2757-2768, Nov.1992.
- [4] Martynenko, O. G.: Heat and mass transfer bibliography- Soviet works, Int. J. Heat Mass Transf., vol.34, no.12, pp.3011-3023, Dec.1991.
- [5] Eckert, E. R. G., ほか11名: Heat transfer- a review of 1990 literature, Int. J. Heat Mass Transf., vol.34, no.12, pp.2931-3010, Dec.1991.
- [6] 国友 孟・黒崎晏夫・越後亮三: in "伝熱工学特論", 養賢堂, 東京, pp.105-124, 238-248, Oct.1984.
- [7] Howell, J. R.: Thermal Radiation in Participating Media: The Past, the Present, and Some Possible Futures, Trans. ASME, J. Heat Transf., vol.110, no.4(B), pp.1220-1229, Nov.1988.
- [8] Tien, C. L.: Thermal Radiation in Packed and Fluidized Beds, Trans. ASME, J. Heat Transf., vol.110, no.4(B), pp.1230-1242, Nov.1988.
- [9] Viskanta, R. and Menguc, M. P.: Radiative transfer in dispersed media, Appl. Mech. Rev., vol.42, no.9, pp.241-259, Sept.1989.
- [10] Makino, T.: Present Research on Thermal Radiation Properties and Characteristics of Materials, Int. J. Thermophys., vol.11, no.2, pp.339-352, Mar.1990.
- [11] 日本機械学会編: "伝熱工学ハンドブック", 日本機械学会, 東京, 刊行予定, 1993.
- [12] 日本熱物性学会編: "熱物性ハンドブック", 養賢堂, 東京, May.1990.
- [13] Nakayama, W. and Yang, K. T., eds.: Computer and Computing in Heat Transfer Science and Engineering", Begell House, Washington, D.C., to be published, Dec.1992.
- [14] 牧野俊郎: 伝熱学のふく射物性実験の手法, 伝熱研究, vol.30, no.117, pp.39-48, Apr. 1991.
- [15] Incropera, F. P. and DeWitt, D. P.: "Introduction to Heat Transfer", 2nd ed., John Wiley, New York, pp.053-024, 1990.
- [16] 荒木信幸・ほか3名: 溶融塩中の金属の界面放射率測定, 第13回日本熱物性シンポジウム講演論文集, pp.309-312, Sept.1992.
- [17] Edwards, D.K.: Thermal radiation measurement, in "Measurement in Heat Transfer", Eckert, E. R. G. and Goldstein, R. J., eds., Hemisphere, pp.425-473.

〈国際伝熱会議委員会報告〉

国際伝熱会議アセンブリ委員会に出席して

芝浦工業大学システム工学部教授

平 田 賢

1992年9月20日、ローマの Palazzo Baleani, Univ. of Rome で開かれた国際伝熱会議アセンブリ委員会に京都大学萩野文丸教授とともに出席した。この委員会は、アセンブリメンバーの各国から、機械系と化学工学系を代表する委員の2人ずつで構成されており、4年に1回開かれる国際伝熱会議の開催地などを決めている。日本の機械系代表は、これまで故西脇仁一東京大学名誉教授、甲藤好郎東京大学名誉教授と引き継がれてきたが、昨'91年より平田が交代し、今回が初めての会合であった。

今回の出席者は、会長 S.Sideman ('90 IHTC9 Israel 会議組織委員長、以下敬称略)が議長を務め、France が M.Combarous と J.Taine, Italy が M.Cumo, Korea が C.K.Choi と S.T.Ro, U.K. が G.F.Hewitt と H.C.Simpson, China が S.Y.Ko と B.X.Wang, Germany が E.Hahne, Israel が D.M.Maron, Japan が M.Hirata と F.Ogino, Netherland が A.A.M.Delil, U.S.A. が S.G.Bankoff と L.S.Fletcher, 及び前会長として R.J.Goldstein, 旧Yugoslavia が A.Alujavic と K.Hanjalic, ほかにオブザーバーとして BrazilのL.Milanez, U.S.A.の J.Howell, 出版社の W.Begell と言った顔ぶれであった。世界情勢を反映して、旧 U.S.S.R. が欠席、旧 Yugoslavia の2人は Alujavic が Slovakia, Hanjalic が Bosnia Hercegovina の代表と署名した。

会議はまず、前 IHTC9, Jerusalem 1990 会議の報告が Israel により行われ、総参加者数 472 人、一般論文 415 編、キーノート論文 30 編、Open Poster Forum 43 編(内 11編は取消し)、収入 167,005 U.S.\$ (内参加費収入151,655U.S.\$), 支出 165,000 U.S.\$ などのデータが示された。

次に、1994 IHTC10 の開催地についての議論が行われた。決定されていた Kiev, Uklaina は国内事情を勘案して、1998 年の予定地である U.K. と入れ換える案が、'92年5月25日付書簡で議長より提示され、書面による賛否の投票が求められていたが、その結果、32票が入れ換え可としたので、このローマの会議で 1994 年の開催地は、正式に U.K. に決定したい旨諮られ、異議なく承認された。そこで、U.K. 代表の Prof.G.F.Hewitt から IHTC10 の計画詳細が示され、了承した。IHTC10 組織委員長は、Prof.H.Simpson, University of Strathclyde, 副委員長兼事務局長は、Prof.G.F.Hewitt, Imperial College, 開催地は City of Brighton, Conference Centre, U.K., 期間は Sunday 14 - Thursday 18, August 1994, 450 論文, 18 sessions を予定する。Abstract 締切 June 1, 1993, Draft Manuscript 締切 October 1, 1993, Final

Camera Ready Manuscript 締切 March 1, 1994 (注意: これらの締切口の設定は各国の論文委員会に任されており, 国ごとに多少の相違がある)。日本の論文割当数は前回と同じ 50 編で, この中に日本, パキスタン, 台湾その他東アジア (中国, 韓国を除く) を含む。参加費を安くすることを基本方針としたいとのことであった。

続いて 1998 年, IHTC11 の開催地について議論した。Kiev 以外の立候補は, India, Korea, China, Italy であったが, 投票の結果, 提案書の整っていた韓国 Seoul に決定した。更に, 2002 年, IHTC12 については, Kiev, China, India, Italy, France, U.S.A. (Minneapolis / St. Paul) の立候補地の中から, 1994 年のアセンブリ委員会で決定することとした。

次回のアセンブリ委員会は, August 19, 1994, Brighton で開かれる。また, 1996 年のアセンブリ委員会は, Moscow で開かれる予定である。なお, 1994 Brighton IHTC10 の日本の論文委員会 (Scientific Committee) 委員長は, 京都大学鈴木健二郎教授にお願いすることとなった。

(以上)

東北グループ・秋季伝熱セミナー

月 日：平成4年10月24日（土）1泊

場 所：わらび会館（秋田県仙北郡田沢湖町）

参加者：45名（大学・高専 22名，企業 2名，学生 21名）

講演会

○講演Ⅰ：「最近の研究から」

- | | |
|--------------------|-------------|
| (1) 含水多孔質物体の凍結熱伝達 | 佐々木 章（秋田高専） |
| (2) 通電加熱による熱物性値の測定 | 高橋 一郎（山形大） |
| (3) 任意形状物体の放射伝熱と制御 | 円山 重直（東北大） |

○講演Ⅱ：「企業における熱問題」

- | | |
|----------------------|----------------------------|
| (1) 半導体結晶製造における熱問題 | 小川 伸（同和鉱業・
半導体研究所） |
| (2) ヒートパイプとその応用例について | 望月 正孝（藤倉電線・
エネルギー開発技術部） |

講演要旨：

講演（Ⅰ）－（１） 含水多孔質物体の凍結現象は自然界のみならず、様々な工業分野に於て見られることから、凍結量の経時変化、或は凍結層の温度分布等に関する研究は活発に行われている。しかし、凍結層の持つ蓄冷熱量や凍結時の熱伝達特性に関する研究はほとんどなされていない。

そこで、上下面を断熱、又左右を各々加熱、及び冷却した矩形含水多孔質層を用い、その凍結時の熱伝達特性、凍結量並びに蓄冷熱量の経時変化を理論と実験の両面から検討を行い、良好な結果が得られたことが示された。

講演（Ⅰ）－（２） 熱物性測定の一方法である通電加熱法は試料に特別な加工を施すことなく、広い温度領域で測定することが出来ることから、金属等の導電性極薄固体材料、或は難加工性固体材料、特に耐熱性材料の熱物性を測定するのに適していることが解說的に述べられた。又測定装置の詳細と共にアモルファス合金、TiAl合金他の熱膨張率、比熱、熱伝導率、半球放射率および熱拡散率等の測定例が示された。

講演（Ⅰ）－（３） 従来、放射伝熱時の形態係数は幾何学的量として扱われてきたが、本研究では「形態係数 F_{ij} は表面 A_i から射出される全放射エネルギー束と、表面 A_j に到達する放射エネルギー束との割合である」という形態係数本来の物理的意味に立ち帰って形態係数を定義した場合の任意形状単一黒体面からの放射伝熱解析法が示された。更に、その様に定義された形態係数に、任意形状3次元等温黒体面に投影する放射有効面積を導入すると、複雑な形状の2黒体間の放射伝熱が容易に求められる事、又そこに吸収形態係数と乱反射形態係数を導入すると、鏡面と乱反射面を含む任意形状灰色面間の放射伝熱解析が可能であり、計算例が紹介された。

講演（Ⅱ）－（１） 電子素子が緻密になればなるほど、不純物や格子欠陥をより厳密に制御した単結晶の半導体が必要になる。そこで、液体封止引上法による化合物半導体ガリウム・ヒ素(GaAs)結晶の製造を例にとり、問題点である化合物半導体の多結晶化及びインゴットの形状変化が熱環境に大きく依存する事、又今後、インゴットの大口徑化、長尺化に当たっては、マクロ的な温度環境の整備が益々重要になり、伝熱を制する者がその技術を制するであろう事が紹介された。

講演(Ⅱ)－(2) 近年、ヒートパイプは様々な方面で利用されているが、解説をまじえ、以下の様な利用例が示された。即ち、熱交換器、電子機器の冷却、産業機器・家庭用品、太陽温水器、宇宙用(A T S - 6 静止衛星のヒートパイプ放熱システム)、電力機器応用システム、大型ヒートパイプによる地熱利用、高温用ヒートパイプ(原子力プラント、高温加熱炉の均熱化、燃料電池の熱回収など)、癌の温熱療法、融雪・低温利用(道路融雪システム、屋根雪融雪システム、電柱支線の融雪システム、ヒートパイプ式地中低温貯蔵庫)など。

(東北地区理事 山川紀夫)

北陸信越地方グループ

『1992 秋季伝熱セミナー（新潟）報告』

日 時：平成4年10月30日(金)～31日(土)

見学会場：東北電力(株)東新潟火力発電所

日本海LNG(株)新潟基地（新潟県北蒲原郡）

講演会場：国民宿舎「胎内パークホテル」

内 容：

○見学会（10/30）

東北電力(株)東新潟火力発電所「ガス・蒸気タービン複合サイクル」

日本海LNG(株)新潟基地「液化天然ガス貯蔵プラント」

○グループ講演会（10/31）

- (1) 回転同心円筒間の乱流の温度場 ($k-\epsilon$ セパルによる予測)
*小林 正人 (新潟大院), 小林 睦夫, 前川 博 (新潟大工)
- (2) 垂直上昇流中に置かれたノズルから発生する気泡の寸法分布に関する研究
*桜井 正幸, 日向 滋, 姫野 修広 (信州大織)
- (3) 非定常加熱によるセラミックス材料の熱物性値の簡易測定に関する研究
*姫野 修広, 日向 滋 (信州大織), 梁取 美智雄 (日立)
- (4) 粒子層内の不飽和水分流れの数値解析
青木 和夫, 服部 賢 (長岡技科大), *赤堀 匡俊 (長岡技科大)
- (5) 電場を利用した固気混相流の制御と伝熱促進—伝熱促進機構について—
*高橋 幸志 (金沢大院), 多田 幸生, 滝本 昭, 林 勇二郎 (金沢大工)
- (6) 過冷による合金の組織制御
林 勇二郎 (金沢大工), *義岡 秀晃 (金沢大院)

講演要旨：

北陸信越地方グループの企画による第5回の伝熱セミナー（見学会と講演会）が，“エネルギーの安定供給”をテーマに，新潟大学の前川・小林両先生のお世話でグループの最北部に位置する新潟市郊外の新潟東港臨海工業団地にある東北電力(株)/日本海LNG(株)および，さらにそこから東北の山麓に入った国民宿舎において，大学・高専25名，学生6名の計31名の参加のもと開催された。

初日は，新潟東港の東北電力(株)火力発電所前に集合し，「複合発電設備」および「LNG冷熱発電設備」などの見学会を行った。「ガスタービン・蒸気タービンによる複合発電」は，将来にわたる電力の安定供給と電源の多様化の一環として建設されたもので，コンバインドサイクルプラント（複合発電）の採用による効率の向上，LNG燃料の導入による環境への配慮などのさまざまな新技術・新工法が開発導入されたものとして注目されている。また，「液化天然ガス貯蔵プラント」は，クリーンエネルギー源としての液化天然ガスの貯蔵と民生用ガスや化学材料原料としての供給などのほか，冷熱エネルギーを自家発電や液体窒素の製造などへ有効に利用されている。

設備の概要についての説明を受けた後，広い構内をバスにより移動し，火力発電所では

<地方研究グループ活動報告>

ガスタービン、排ガスボイラーおよび蒸気タービンなどの大型機器を、また、LNG基地では冷熱発電設備、タンクなどを見学し、討論を行った。環境に飽くまで優しくかつ熱エネルギーの有効利用を実践している両社に感銘するとともに、伝熱研究のさらなる発展を強く感じさせられた見学会であった。見学案内といろいろお世話になった東北電力(株)、日本海LNG(株)に紙面をかりて厚くお礼申し上げます。

見学会終了後、会場を新潟港から北東の山麓にある国民宿舎「胎内パークホテル」に移動し、参加者相互の情報交換と親睦を図るべく懇親会が開かれ、部屋に戻っても夜遅くまで懇親の輪が広がった。

見学会の翌日は、同会場にてグループ講演会が開催された。講演(1)では、冷却され静止した外円筒と加熱され回転する内円筒間の乱流Taylor渦を伴う速度場と温度場についての数値解析結果が報告され、周期境界条件の設定や軸方向温度分布などの質疑討論があった。講演(2)では、水流中での単孔ノズルからの気泡の生成機構とそれに及ぼす空気および液流速の影響についての実験結果と理論的考察についての報告があり、ノズル形状、ノズル径および液体の種類の影響、さらに逆流の問題、JEMでの検討などの質疑討論があった。講演(3)では、非定常ステップ加熱によるセラミックス材料の比熱、熱伝導率などの熱物性値の簡易測定法についての報告があり、有効性や対流の問題、境界条件の対称性などについての質疑討論があった。講演(4)では、土壌内やヒートパイプウィック内および乾燥過程などの不飽和粒子層内の水分浸透を伴う熱・物質移動について、新たな浸透モデルの提示と解析結果の報告があり、粒子層内蒸気拡散や温度分布の取り扱いなどの質疑討論があった。講演(5)では、対流伝熱の促進と制御を目的として、気流中にガラスまたは金属粒子を懸濁した固気混相流に電場を利用した促進効果について、実験結果と粒子挙動と熱伝達の解析結果が報告され、装置形状と流れの二次元性、粒子間の相互作用および粒子性状の影響などについての質疑討論があった。講演(6)では、合金の組織の方向性制御を目的としたPb-Sn合金による過冷凝固過程についての実験結果が報告され、過冷度ならびに凝固速度と結晶構造の関係、デンドライト結晶と熱的過冷と組成的過冷などについての質疑討論があった。

その他、講演会開催前に、理事会報告と各種協議を行い、さらなる会員増の依頼と、次回セミナーを明年春に富山大学担当で開催することが決定された。

(北陸信越地方理事 滝本 昭)

〈地方研究グループ活動報告〉東海研究グループ企画

賢島伝熱セミナー「熱流体計測の基礎と最前線」報告

加藤 征三（三重大）

東海研究グループが企画する一泊二日の伝熱セミナーは第1回が浜名湖畔で「乱流伝熱の基礎と最前線」、第2回が長良川湖畔で「企業における伝熱の最前線」と、いずれもポストセミナーが楽しめる風光明媚な地で開催され、今回が第3回目になります。「熱流体計測の基礎と最前線」をテーマに8月18日～19日の日程で英虞湾に面した賢島で開催された本セミナーには81名もの参加者があり、講座旅行を兼ねた研究室もあって54名が学生、企業から10名と年令的には若々しい活気に溢れた雰囲気となりました。

1日目の午後、長野靖尚先生（名工大）の開会の挨拶から始まり、社河内敏彦先生（三重大）の進行で、まず竹野忠夫先生（名大）から「レーザ誘起蛍光法による濃度場測定」の話題提供をいただきました。レーザ計測の利点は流れ場全体の情報を非接触で瞬間的に計測できることにあり、レーザ誘起蛍光法による瞬間二次元断面像の作成から濃度分布を求めるプロセスを例示され、レーザ計測の意義と有用性を分かりやすく解説いただきました。引き続き、岩澤嘉昭氏（三菱重工業）から「航空・宇宙における熱流体計測」について話題提供がありました。航空宇宙分野における熱流体計測技術の変遷を具体的事例で解説された後、機体システムにおける空力加熱対策に係わる熱流体技術の重要性を強調されるとともに、極限へのチャレンジ精神を学生諸君へ鼓舞されました。

コーヒーブレークの後、「希薄気体力学の現状」と題して藤本哲夫先生（名大工学部長）から特別講演をいただきました。司会の宇佐美 勝先生（三重大）から先生のご紹介がありましたが、先生は日本における希薄気体力学の草分けのお一人であり、ソ連のスプートニクから脚光を浴び始めた希薄気体力学が近年では半導体プロセスやマイクロマシンなどの先端技術の進歩に重要な役割を果たしていることを力説され、分子・原子オーダーのミクロな計測技術の重要性にも言及されました。

荒木信幸先生（静岡大工学部長）からは「傾斜機能材料の熱物性値の測定と評価」と題して山下博史先生（名大）の司会により話題提供いただきました。単純な物体の熱伝導率を高精度で測定すること自体大変なことなのに、層状の傾斜機能材料の遮熱性能を対象にした時の苦勞話には説得力があり、とくに内部的な傾斜機能特有の特性を明確にする評価法の確立の必要性を強調されました。

難しい勉強の話込みばかりでは学生諸君に睡魔が襲うので、今回は特別講座を企画しました。開催地の伊勢志摩は何といても伊勢神宮がシンボルですが、平成5年10月には20年に一度の式年遷宮が遷御のクライマックスを迎えます。そこで、伊勢商工会議所専務理事の垣野啓一氏にお願いし、「伊勢神宮とご遷宮について」の講座をいただきました。遷

宮の意義を中心に、裏話や伊勢のPRも含め大変ウイットに富んだお話しに暫し心を奪われました。学生を眠らせない講義のノウハウを教わって得をした思いでした。

2日目は午前9時より北村健三先生（豊橋技科大）の司会で、まず辻 俊博先生（名工大）から「熱線および冷線による乱流計測」の話題提供をいただきました。速度と温度の乱れを緻密な論理構成を用いて測定データから抽出する手法と測定誤差因子などに関するお話の後、誤差が少なく応答も良好な具体的方策を示していただきました。次いで、熊田雅弥先生（岐阜大）から「剥離域の流動および熱伝達の非定常計測」について話題提供いただきました。剥離域で局所の流れ方向、流速および熱伝達率を瞬時に同時計測する装置は国宝級の匠の技で驚嘆の思いとともに、その装置から得られた実験データからの伝熱機軸の解明には迫力があり、大いに納得いたしました。

コーヒブレイクの後、最後のセッションに入り、花村克悟先生（岐阜大）に進行をお願いして、丸山直樹先生（三重大学）から「ホログラフィー干渉法による三次元温度場計測」の話題提供をいただきました。ホログラフィー干渉法の利点は瞬時に非接触で温度場全体を計測できる点にあり、これをフルに活かした三次元計測法の原理と水平矩形加熱流路内の温度助走区間における事例を明示され、その応用範囲の広さをうかがわせる内容でした。本セミナー話題提供の締め括りとして長野靖尚先生（名工大）から「熱流体計測における不確かさ解析」をしていただきました。測定値の不確かさ解析の必要性はもっと強調されるべきものですが、それを具体的事例で啓蒙されるとともに、学生諸君には不確かさ解析を念頭に置いた装置構想、実験データの吟味や実験式の作式法など示唆に富んだアドバイスもありました。最後に、実行委員長より閉会の挨拶があり、次回のセミナーでの再会を期し、無事終了いたしました。いずれの話題提供にも活発な質疑応答やコメントがあり、大変有益であったことを感謝しております。

1日目の懇親会と二次会はお二人の現職の工学部長を中心に大いに盛り上がりました。部屋割りも学校や肩書きにこだわらず混ぜたため、懇親の効が発揮され、親交の宴が延々と続いておりました。懇親会で次回の当番校を名工大に決めましたが、話題提供者が偉すぎて学生が馬鹿な質問ができないとの的確な指摘がなされ、次回のセミナーではお偉方は後方に陣取り、助手や院生に話題提供も任せた方がいいのでは、という意見が大勢のように思われました。また、大学や企業の外国人留学生などからの英語による話題提供もあってもよいのでは、という意見もありました。今回のセミナーは伝熱学会へ移行して初めての企画ということで、主催を伝熱学会東海研究グループとし、日本機械学会東海支部に協賛をお願いすることにしました。

成功裡のうちに本セミナーを終えることができましたが、予期せぬ台風の襲来でポストセミナーの行事がいささか興醒めになったことが心残りでした。

最後に、ボランティアでありながら絶大のご協力をいただきました話題提供の先生方をはじめ、司会の先生方、裏方を務めた学生諸君に心よりお礼申し上げます。

< 地方研究グループ活動報告 >

伝熱学会東海地区

「若手研究者発表会およびイブニング・トーク」

日 時：平成4年12月5日（土） 午後1時～6時

会 場：愛知工業大学工学部機械工学科（豊田市八草町八千草1247）

参加者：61名

◎若手研究者発表会

1. 「多孔性固体内における超断熱燃焼」
* 足立 昌哉, 花村 克悟 (岐阜大学)
2. 「2次元リブによる矩形流路内助走区間の伝熱促進」
* 中山 俊孝, 藤田 秀臣, 廣田 真史 (名古屋大学)
3. 「環状フィン付き潜熱蓄熱器の融解過程における熱特性」
* 高橋 尚士, 海野 紘治 (豊田工業大学)
4. 「ピストンリング・シリンダライナ間の潤滑状態に関する研究」
* 小杉 尚, 児山 仁 (静岡大学)
5. 「細線により自由界面を局所加熱された流体層の流動」
* 横尾 博典, 鈴木 考司, 三田地 紘史 (豊橋技術科学大学)
6. 「自由乱流におけるスカラー輸送のDNS」
* 中村 明, 辻 俊博, 長野 靖尚 (名古屋工業大学)
7. 「はく離・再付着を伴う乱流場への適用を考慮した $k-\epsilon$ モデル」
* 安倍 賢一, 近藤 継男 (豊田中央研究所)

◎イブニング・トーク

「風洞小史・低速から高エネルギー流まで」

愛知工業大学 教授 保原 充 (名古屋大学名誉教授)

< 講演要旨 >

(1) 高空隙率のセラミック多孔質体に可燃性混合気を周期的に流動方向を反転させながら供給すると、混合気は多孔質体により十分予熱された後その中央で燃焼し、この燃焼ガスは内部を通過する間にその顕熱が多孔質体に蓄えられるので、常温まで温度低下した後排出される。この効果的な熱循環が周期的に行われることにより、発熱量わずか 128 kJ/m^3 (当量比0.036, 都市ガス13A) の超低発熱量ガスの自力燃焼が可能となることを明らかにした。

(2) 矩形流路の長辺壁上に2次元リブを設置した場合の、助走区間における伝熱特性を、ナフタレン昇華法により調べた。リブではく離した流れの再付着に起因する極大シャドウ数は、流路隅部に近づくにつれて上流側リブに近い位置に現れる。局所シャドウ数はスパン方向に変化し、微小スパン毎に流路軸方向へ平均化したシャドウ数は、伝熱面対称軸上で極小値、隅部近傍で極大値をとるなど、2次元流路とは異なる伝熱特性を明らかにした。

(3) 潜熱蓄熱器の熱特性を二次元特性である相似曲線で評価すると、運転条件に左右されない蓄熱器固有の特性として表現できる。本研究では、従来は数値計算により求めていた相似曲線を、実験により得られた三次元的熱特性から求める方法を開発した。そして、その方法を使ってフィンの無いものと環状フィンを有するものとの二種類の二重管形蓄熱器について検討を行っ

た。その結果、融解過程において前者では相似則が成立しないのに対し、後者ではフィンの存在によりそれが成立しやすくなっていることがわかった。

(4) 現在の、内燃機関の潤滑現象は不明な部分が多く、特に自動車等に用いられている小型多気筒ガソリンエンジンではその現象を実験的に把握するには困難なことが多い。そこで、本研究では小型多気筒ガソリンエンジンを用いそのトップリング・シリンダライナー間の油膜厚さに関して、静電容量の測定原理を利用して測定装置の開発を行ない実働運転に於ける測定値、理論解析の準定常状態への拡張、理論値と測定値との比較及び検討を行った。

(5) 本研究は、結果の傾向が従来まちまちであった界面の局所加熱により液体層内に誘起される対流に関する理解を深めることを目的としたものである。まず、単純化した体系での数値計算によって浮力ならびに表面張力差にもとづく対流の概略をつかんだ上で、金属細線により界面を加熱された液体層の対流について実験的に詳細に調べた。その結果、温度差が比較的小さい範囲では浮力が、比較的大きな範囲では表面張力差が対流の主要因であると考えられることを示した。

(6) 一様等方性乱流において平均温度勾配が重畳した場合の速度場・温度場について、非線形効果のない初期スペクトルを与えた時の過渡的な現象をDNSにより調べた。速度場・温度場共に、過渡的变化の初期には、非線形効果による波数間のエネルギー輸送が主として発生することをスペクトルの時間的变化から示した。非線形輸送が徐々に弱まるにつれ、減衰過程の速度場では全波数にわたる粘性散逸が、温度勾配の存在する温度場では低波数域におけるエネルギー生成が構造を支配していることを明らかにした。

(7) 長野・田川により提案された低レイノルズ数型 $k-\epsilon$ モデルに改良を加え、乱れの壁面漸近挙動を満足しつつ、はく離・再付着を伴う乱流場に適用し得る新しい $k-\epsilon$ モデルを提案した。さらに、種々の壁乱流に本モデルを適用して計算を行い、チャンネル乱流や逆圧力こう配流れのみならず、はく離・再付着流の代表であるバックステップ乱流についても、高い精度で予測できることを確認し、その有効性を示した。

<イブニング・トーク概要>

講師は、昭和62年から平成元年度にかけて文部省科学研究費補助金重点領域研究「数値流体力学」の研究代表者を務められた我国のCFDの草分けである。実験的研究も含めて、これまでに高速流、ショックチューブ、高温流、希薄流等航空・宇宙工学全般に亘る広い研究をされてきた。その豊富な経験・知識をもとに、稀にしか見れないスライドを用いて、風洞の歴史を熱っぽく語っていただいた。

ライト兄弟が飛行機を初めて飛ばした頃は、木製風洞で測定部も高々40cm角程度しかなく、定量的計測というよりも翼形状による性能変化を相対的な比較で論議するというものであった。本格的風洞は、NACAが1927年に製作したものである。測定部も大型化し、100馬力程度の動力を要した。もっとも最近の高温流用のものは、100万馬力～300万馬力と大動力を要するとのことである。超音速風洞になると、のど部にスリットを設けて衝撃波を逃がすなど特別な工夫がいる。最近ではCFDの発達が著しく、数値風洞が実際の風洞実験を補完するようになってきた。例えば、スペースプレーンなどの飛翔体まわりの極超音速流れのシミュレーションは、CFDの役割が極めて大きい。風洞にまつわる多くの逸話は、非常に興味深いものであった。

(東海地区理事 長野 靖尚)

中四国研究グループ活動報告

山口地方（宇部）特別講演会及び見学会開催の報告

日時：平成4年11月6日（金） 12:30～16:10

会場：（株）超高温材料研究センター

1. 特別講演会 「地球環境保全を目指す最近の高温エネルギーシステムの開発」

- 《講演題目》
1. 発電用小型ガスタービン
片山一三氏（近畿大学）
青木素直氏（三菱重工業(株)・高砂製作所）
 2. 加圧流動層ボイラーの開発
秋山巖氏（バブコック日立(株)・呉研究所）
 3. 固体電解質燃料電池の開発
山内康弘氏（三菱重工業(株)・長崎研究所）
 4. 超高温材料
榎本弘毅氏（(株)超高温材料研究センター）

2. 見学会・・・・・・・・超高温材料研究センター施設

〈講演概要〉

1. 発電用小型ガスタービンについて、前半部は三菱で開発されたMF-111ガスタービンを基にその開発コンセプトから始まり、タービン動静翼の冷却技術や壁面の冷却技術に関する概説、その他運転実績等が報告された。後半部はME-1000ガスタービンエンジン開発機の構造と適用技術に関して、個々の部品である圧縮機や遷音速タービンや燃焼器に関する特長が報告された。さらに性能試験、運転実績などに関する報告もなされた。ここで高温ガスタービンと言われる場合の温度領域は、1250℃前後を指す旨説明された。

2. 資源有効利用の背景からエネルギー環境の資料を基に、いわゆる電力需要見通しとCO₂排出量、エネルギー資源埋蔵量、高効率化によるCO₂低減等のためには、石炭利用がまだまだ必要であり、加圧流動層ボイラーの開発が期待されることを述べ、更に日立における加圧流動層ボイラーの開発状況をわかりやすく概説された。

3. 固体電解質燃料電池に関して、その開発背景を述べるとともに、主に各種発電方式（例えばガスタービン、USC(Ultra Super Critical:超々臨界)など）との複合発電を目的に、開発が推進されていること等が述べられた。円筒容射型SOFCの作動原理とその特徴、

要素技術開発から発電特性とモジュールの発電試験にいたる経緯に関する解説がなされ、さらにもう1つの焼結平板型のセルの開発にも少し触れられた。最後に将来発電システムの検討などにも言及された。

4. 超高温材料の使用が考えられる分野とその使用温度範囲すなわち超高温材料に対する各種（航空宇宙、エネルギー、素材創製プロセスなど）将来技術での温度環境ニーズに始まり、その超高温材料の種類として考えられる 1) 金属超耐熱合金 2) 金属間化合物 3) セラミックス 4) 複合材料、繊維強化材料 5) 傾斜機能材料などの特長をサンプルを交えて報告された。さらに、超高温材料の製造と評価、さらには超高温材料センターの置かれている立場にも話は及んだ。

今回は特別講演会「地球環境保全を目指す最近の高温エネルギーシステムの開発」と題して、4つのトピックで講演頂いた。またこれには関心が高く多くの参加者（45名）が得られた。紙上を借りて講師の方々及び実行委員の方々にお礼申し上げます。

なお資料集が多くはありませんが若干手元に残りました。御希望の方が御座いましたら御連絡ください。お送りいたします。（品切れ御免）

（中国四国地方連絡幹事 加藤泰生）

九州研究グループ

(1) 九州研究グループ特別講演会

日 時 : 平成4年9月22日(火) 14:00~17:15

場 所 : 九州大学総合理工学研究科熱エネルギーシステム専攻棟

講 演 :

1. ダイレクト・シミュレーション・データベースを利用した
乱流伝熱研究の新たな展開

笠木 伸英 (東京大学工学部)

2. 非定常流とその熱伝達

鈴木健二郎 (京都大学工学部)

〈講演概要〉

講演1: 乱流現象の数値実験として最近注目されているダイレクト・シミュレーション(DNS)の計算手法と最近の研究成果について解説がなされた。計算手法としては、流れ場の形状が単純であればスペクトル法が最良である。複雑な形状には差分法が用いられる。必要な格子数は乱流の最大長さスケールと最小長さスケールの比によって定まり、3次元計算では $Re^{9/4}$ に比例する。現状では Re が 10^3 のオーダーまで計算可能である。DNSは乱流現象の物理的理解と制御、乱流モデルの構築、乱流計測法の精度評価、乱流現象の予測などの有力な手段である。講演では、DNSデータベースを用いて壁近傍の準秩序構造をコンピュータ・グラフィックスにより可視化した結果が示され、関心を集めた。

講演2: 物体を挿入することによってかく乱を受ける流れの特異な流動・伝熱機構に関する一連の研究について解説がなされた。乱流境界層の壁近傍に円柱を挿入すると、乱流の組織構造が変化し、円柱近傍で伝熱促進と壁面摩擦の減少が得られる。中間レイノルズ数領域のチャンネル流では、挿入物体の後流に渦が放出されて周期的な非定常流になり、伝熱が促進される。同様の現象はタンデム形フィン列、チャンネル壁に取り付けたリブについてもみられる。このような流れに固有のカルマン渦の交差運動、運動量輸送と熱輸送の非相似性、インタラクション運動、流れの不安定化と安定化等の現象を、数値実験と測定を有機的に併用して解明した興味ある結果が示された。

本講演会には強制対流・乱流伝熱の分野で活躍されている2名の先生方を講師に迎え、最新のご研究について解説していただいた。講演会は64名の参加者があり、活発な質疑・応答がなされた。引き続きビスタホール（九州大学筑紫キャンパス）で開催された懇親会も32名の参加者をえて盛会であった。

（2）九州研究グループ講演会

日 時 : 平成4年12月 4日（金）13:30～17:05

場 所 : 九州大学工学部機械系大会議室

講 演 :

1. 金網ウィックの最大毛細管圧力

野田 英彦、宮武 修、白石 淳

永淵 慶秀（九州大学工学部）

2. 混合物の蒸発熱

伊藤 猛宏（九州大学工学部）

3. 内管が軸方向に移動する環状流路内の流動と伝熱

茂地 徹（長崎大学工学部）

4. 熱伝導の逆問題について

須永 照雄（九州大学工学部）

〈講演概要〉

講演1: 平織り金網の素線格子にできるメニスカスで、最も大きい毛細管力を賄う格子の中心部分に着目し、角部の影響を無視したドーナツリング形状での毛細管圧力とメニスカス形状との関係を解析し、隣接するメニスカスの影響を考慮した最大毛細管圧力を求めた。また、メッシュ数、素線径、接触角を変化させて最大毛細管圧力を実測し、解析解との対応を求めた。その結果、金網ウィックは接触角が 90° を越える場合でも、正の最大毛細管圧力を持つことを示した。得られた最大毛細管圧力の解析解と実験値との関係を整理し、接触角および素線格子の角部の影響を考慮した最大毛細管圧力の半経験式を示した。

講演2: 閉じた平衡系と開いた非平衡定常系における二成分混合物の蒸発熱の一般的計算方法を紹介した。前者は全組成が一定で、一定量の二成分混合物の相変化に要する熱量を計算するものであり、微小相変化と全量の相変化に対する計算方法を示した。相変化に際しては、特別の場合を除いて dP/dT は任意の値をとりうるので、圧力一定と温度一定の計算方法を例示した。後者は、流体が連続的に供給・除去されるような装置が定常的に作動している場合に、

特定の気液界面では一定の圧力、温度及び界面組成の下に相変化が起こっている現象に対応し、本質的に非平衡系に関わっている。界面の平衡条件は、熱・物質移動の輸送過程の保存式と連立して決定されるべきものであるが、その際に使用すべき蒸発熱の値の限界を示した。

講演3： 初めに本研究に着手した動機と見込まれる応用例について述べ、次に理論解析の例を(1)内管が軸方向に移動する同心環状流路内の層流熱伝達（流体力学のおよび熱的に十分に発達した場合）、(2)内管が軸方向に移動する同心環状流路内の乱流熱伝達（流体力学のおよび熱的に十分に発達した場合）、(3)加熱された内管が軸方向に移動する同心環状流路内の層流熱伝達（温度助走区間）、および(4)内管が軸方向に移動する偏心環状流路内の十分に発達した層流の厳密解、について説明し、加熱された内管が流体の平均速度と同じ方向に動く場合には、流体の変形した速度分布から予測されるように、内管表面での熱伝達は増大すること、などの主な結論を示した。

講演4： 回体内部の測定値から境界条件を求める問題に関し、解の一意性を論じた。定常の場合の一意性は知られているが、非定常の場合については未知のようである。まず、準備として定常の場合をとりあげ、2次元問題と3次元問題について問題の設定と解の一意性の証明を行った。ついで非定常の場合をとりあげ、支配方程式にラプラス変換を施すことにより1次元問題と3次元問題について解の一意性を証明した。さらに計算例として2次元の定常熱伝導問題をとりあげ、内部の測定誤差は境界で増幅されるため、最小1-ノルム法による適切化を行う等の計算の特別な工夫が必要なことを示した。

講演会には39名の参加者があり、各講演に対して活発な質問と討論が行われた。引き続き九州大学職員会館で開催された懇親会も25名の参加者をえて盛会であった。

(九州地区担当理事 本田 博司)

<お知らせ>

日本伝熱学会
「財政基盤強化のための募金事業」
に対するご協力をお願い

募金事業発起人代表
日本伝熱学会第31期会長
藤江 邦 男
募金事業実行委員会委員長
棚 沢 一 郎

日本伝熱学会は昭和36年11月に日本伝熱研究会として発足し、平成4年で30周年を迎えました。その間、工業の基盤的科学技術である伝熱学・熱工学を統括する本学会が、我が国の経済発展に果たしてきた役割は顕著なものであります。特に、二度に渡る石油危機など、エネルギー問題に対する本学会の成果は記憶に新しい所であり、さらに現在問題となっている地球環境問題等についても、今後、本学会が担うべき役割は国内的にも、国際的にも極めて重要なものになると考えられます。

このような状況のもと、本学会・組織検討委員会(30期、委員長・藤井哲九大教授)は21世紀にむけて、本学会の将来構想について検討を行って参りました。その結果、本学会の法人化が示唆され、法人化をにらんだ学会会則の改訂が行われたことは総会及び会誌「伝熱研究」等で御承知おきのことと存じます。「社団法人化」は、一定の目的のもとに集まった「人の集まり」に一つの法的人格を付与するものであります。これまで本学会が果してきた社会的貢献と学会規模を考えますと、本学会の「法人化」は必然的な過程であります。またこのような法的・社会的基盤を確立することは本学会をより活性化し、産学官の協力、国際交流の拡大及び国際協力等がより円滑、且つ強力に果たせることになり、本学会会員および産業界にとって有為なことでもあります。

当初、法人化達成には数年を要することが予想されていましたが、組織委員会諸氏の努力により幸いにも短期間で達成される見通しが出て参りました。また同時に、学会法人化を実現するためには、学会として最低二千万円の資産を持つことが必要条件であることも判明致しました。したがって、本学会と致しましては、この際是非とも学会の財政基盤を強化して法人化を達成すると共に学会運用資金の充実をはかる必要があります。

本件については、理事会に於いて鋭意審議致しました。その結果、財政基盤強化のために、学会会員諸氏からの募金と関連企業のお力添えをいただきたいとの結論に達しました。また本募金事業については別記の方々が趣旨に賛同され、発起人となって下さいました。

つきましては、諸事御多端の折りとは存じますが、何卒この趣旨を御汲み取りいただきまして、別記要領にて、募金にご協力下さいますようお願い申し上げます。

なお、本募金事業におきましては本学会会員に募金をお願いすると共に、別途関連企業各位にも御協力をお願いする予定であります。

平成4年12月19日

記

個人会員募金要項

1. 募金目標額 最低2000万円
2. 募金申込額 1口 5,000円
(ご参考までに個人募金額の目安を末尾に記しました。)
3. 申込期間 平成5年1月1日 ~ 平成5年12月31日
4. 申込方法 「伝熱研究」1月号(32巻、133号(1993))に折込の用紙、
日本伝熱学会「財政基盤強化のための募金申込書」にて御申込下さい。
5. 送金期間 平成5年1月1日 ~ 平成5年12月31日
6. 送金方法 綴じ込みの「郵便振替用紙」を御使用下さい。
<郵便振替口座>
口座番号: 東京3-711551
名 称: 日本伝熱学会募金事業実行委員会
代 表 者: 棚沢一郎
住 所: 〒113 東京都文京区本郷5-25-18
7. その他 募金事業に関する都知事の許可および免税措置については申請中です。
又、関連企業各位には、別途御協力をお願いする予定です。
8. 問い合わせ先
飯田 嘉宏(横浜国立大学工学部物質工学科)
TEL. 045-335-1451(EXT.2874)、FAX. 045-331-1704
坂口 忠司(神戸大学工学部機械工学科)
TEL. 078-881-1212(EXT.5152)、FAX. 078-881-0036
山川 紀夫(岩手大学工学部応用分子化学科)
TEL. 0196-23-5171(EXT.2852)、FAX. 0196-52-7144

「財政基盤強化のための募金事業」実行委員会名簿

委員長 棚沢一郎(東大)

地区代表委員

北海道地区	石黒亮二(北大)
東北地区	戸田三朗(東北大)
関東地区	黒崎晏夫(東工大) 斎藤孝基(東大) 成合英樹(筑波大) 岡田孝夫(高砂熱学)
東海地区	架谷昌信(名大) 藤掛賢司(豊田中研)
北陸地区	林勇二郎(金沢大)

関西地区 鈴木健二郎（京大） 鳥越邦和（ダイキン）
 中国・四国地区 広安博之（広島大）
 九州地区 藤田恭伸（九州大）

委員

窪田英樹（室蘭工大）	馬場 弘（北見工大）	菅原征洋（秋田大）
円山重直（東北大）	三浦隆利（東北大）	田中忠良（電綫研）
菱田公一（慶大）	飛原英治（東大）	西村 誠（岐阜大）
山下博史（名大）	青木和夫（長岡技科大）	竹内正紀（福井大）
東 恒雄（大阪市大）	片岡 勲（京都大）	千田 衛（同志社大）
森 幸治（阪大）	稲葉英男（岡山大）	鈴木 洋（広島大）
伊藤昭彦（大分大）	および来期の役員（平成5年6月以降）	

（総務担当）

工藤一彦（北大）	山川紀夫（岩手大）	井上 晃（東工大）
飯田嘉宏（横浜国大）	望月貞成（東京農工大）	長野靖尚（名工大）
滝本 昭（金沢大）	坂口忠司（神戸大）	加藤泰生（山口大）
本田博司（九州大）	地崎英二（新日鉄）	および来期の理事

（会計担当）

吉田英生（東工大）	高島啓行（住友金属）	森岡幹雄（石播重工）
-----------	------------	------------

（監査）

二階 勲（鹿島建設）

「財政基盤強化のための募金事業」発起人名簿（敬称略）

（付記） 本事業は当初「法人化のための募金事業」と称しましたが、事情により新名称に変更致しました。趣旨は同じですので御了承頂きたくお願い申し上げます。発起人には、日本伝熱学会（旧日本伝熱研究会）の役員経験者、関連企業および研究所等の代表者の方々にお願い致しました。

相原 利雄	荒木 信幸	石黒 亮二	稲村 隆夫	内田 秀雄
相場 眞也	有富 正憲	石塚 勝	稲葉 英男	梅宮 弘道
青木 和夫	飯田 嘉宏	石原 勲	井上 晃	梅村 晃由
青木 成文	飯野 利喜	石橋 英一	井村 英昭	越後 亮三
赤川 浩爾	猪飼 茂	一宮 浩市	岩崎 幸介	大内 雅樹
秋山 守	五十嵐 保	一色 尚次	岩淵 牧男	大須賀 正彦
秋山 光庸	生田 四郎	伊藤 昭彦	植田 辰洋	大隅 正人
秋山 美映	池崎 英二	伊藤 猛宏	植田 洋匡	太田 照和
東 恒雄	石谷 清幹	伊藤 正昭	上原 春男	大田 治彦
新井 亨	石垣 博	伊藤 龍象	上松 公彦	大中 逸雄
新井 紀男	石黒 博	稲井 信彦	埋橋 英夫	大場 謙吉

岡崎 卓郎	工藤 一彦	菅原 征洋	仲田 哲朗	平澤 茂樹
岡田 孝大	窪田 英樹	杉山 憲一郎	中西 重康	平田 哲夫
岡本 芳三	熊谷 哲	鈴置 昭	中山 顕	平田 賢
小笠原 英雄	熊田 俊明	鈴木 健二郎	中山 恒	平田 雄志
小笠原 光信	熊田 雅弥	鈴木 旬	永井 伸樹	廣安 博之
荻野 文丸	栗間 諄二	鈴木 洋	長島 昭	深野 徹
小口 幸成	黒川 政秋	須藤 浩三	長野 靖尚	福井 資夫
小熊 正人	黒崎 晏夫	関 信弘	鍋本 暁秀	福迫 尚一郎
落合 淳一	小竹 進	世古口 言彦	波江 貞弘	福田 研二
香川 達雄	小西 恵三	芹沢 昭示	成合 英樹	藤井 哲
笠木 伸英	小林 清志	千田 衛	西尾 茂文	藤井 照重
加治 増夫	小堀 哲雄	素谷 順二	西川 兼康	藤井 丕夫
片岡 勲	小山 繁	曾田 正浩	西原 英晃	藤江 邦男
片岡 邦夫	兎山 仁	高城 敏美	西村 誠	藤掛 賢司
片山 功蔵	今野 宏卓	高島 啓行	西山 進一	藤田 尚毅
甲藤 好郎	斎藤 彬大	滝本 昭	西脇 信彦	藤田 秀臣
勝田 勝太郎	斎藤 英二	竹内 正顯	野口 昌孝	藤田 恭伸
勝田 久雄	斎藤 孝基	竹内 正紀	野路 伸治	藤本 哲夫
加藤 征三	斎藤 武雄	竹越 栄俊	萩原 良道	二神 浩三
加藤 泰生	斎藤 武	武山 斌郎	架谷 昌信	古川 哲郎
門谷 皖一	斎藤 囧	田中 修	長谷川 修	古寺 雅晴
金山 公夫	坂井 正康	田中 忠良	蜂巢 毅	堀 雅夫
茅原 敏広	坂口 忠司	棚澤 一郎	八田 桂三	本田 博司
河村 洋	坂本 守義	谷口 博	服部 賢	前川 博
河村 祐治	坂本 雄二郎	玉木 恕乎	花岡 裕	前田 四郎
神坂 光男	櫻井 彰	玉利 賢一	浜口 八朗	前田 昌信
菊地 義弘	佐古 光雄	千葉 徳男	早坂 洋史	牧野 俊郎
岸浪 紘機	佐田 富道雄	千葉 陽一	林 勇二郎	増岡 隆士
北村 健三	佐藤 正	柘植 綾夫	原 朝茂	増田 英俊
北山 正文	佐藤 泰生	辻 廣	馬場 弘	増田 雅昭
吉川 進三	佐野川 好母	戸田 三朗	久角 喜徳	松井 剛一
木俣 成洋	塩津 正博	棚谷 吉郎	菱田 公一	松本 隆一
木村 照夫	茂地 徹	鳥居 薫	菱田 幹雄	円山 重直
木本 日出夫	宍戸 郁郎	鳥飼 欣一	土方 邦夫	三浦 隆利
幾世橋 広	島田 了八	鳥越 邦和	日向 滋	水上 紘一
久我 修	清水 昭比古	中里見 正夫	飛原 英治	水谷 幸夫
楠田 久男	庄司 正弘	中島 忠克	平井 英二	水野 忠治
葛岡 常雄	陣野 友久	中島 健	平井 秀一郎	三田地 紘史

岐美 格	宮本 政英	森 康彦	山家 讓二	吉岡 啓介
三石 信雄	宮良 明男	森岡 齋	山下 博史	吉澤 善男
三塚 正志	村尾 良夫	森岡 幹雄	山下 宏幸	吉田 駿
南山 龍緒	望月 貞成	矢田 順三	山田 悦郎	吉田 英生
宮内 敏雄	森 幸治	柳井 誠	山田 幸生	吉信 宏夫
宮下 尚	森 茂	矢野 歳和	山中 晤郎	老圃 潔一
宮武 修	森 英夫	矢部 彰	山本 春樹	渡辺 健次
宮部 喜代二	森 康夫	山川 紀夫	横山 孝男	

~~~~~

<個人募金額の日安(1口 5000円)>

|          |    |           |    |
|----------|----|-----------|----|
| 昭和30年代卒業 | 6口 | 昭和40年代卒業  | 5口 |
| 昭和50年代卒業 | 4口 | 昭和60年以降卒業 | 3口 |
| 学生会員     | 1口 |           |    |

※日本伝熱学会役員ご経験者および昭和30年以前に御卒業され  
た方は、上記の金額に上乘せしてお考え下されば幸いです。

~~~~~

募金申込者御芳名(1月1日~平成5年1月13日お申込分)

●正会員

片岡邦夫殿(神戸大学)
鈴木健二郎殿(京都大学)
(以上 10口)
笠木伸英殿(東京大学)
林勇二郎殿(金沢大学)
三浦隆利殿(東北大学)
宮本政英殿(山口大学)
望月貞成殿(東京農工大学)
(以上 8口)
上松公彦殿(慶応義塾大学)
加藤泰生殿(山口大学)
工藤一彦殿(北海道大学)
萩原良道殿(京都大学)

日向 滋殿(信州大学)
藤井丕夫殿(九州大学)
小澤由行殿(高砂熱学)
(以上 6口)
青木和夫殿(長岡技科大学)
赤井誠殿(工技院・機技研)
池崎英二殿(新日本製鉄)
(以上 5口)
栗間諄二殿(山口大学)
高島武雄殿(横浜国立大学)
高松 洋殿(九州大学)
(以上 4口)
青木秀之殿(東北大学)

塚越律夫殿(岩手大学)
(以上 3口)
稲岡恭二殿(京都大学)
黒田明慈殿(北海道大学)
柴田 豊殿(京都大学)
辻俊博殿(名古屋工業大学)
村田 章殿(東京農工大)
百生登殿(富山県立大学)
(以上 2口)

●学生会員

古畑明彦殿(東北大学)
近藤真英殿(名古屋工大)
(以上 1口)

切取り線

○

○

日本伝熱学会

「財政基盤強化のための募金事業」

個人会員用募金申込書

御芳名	勤務先	
募金予定口数	口 (円)	
御送金予定月日	申込と同時に、平成5年 月頃 (○で囲んで下さい)	
御連絡先住所		
御卒業年次	昭和・平成	年
通信文	会員の種類	正・学生

「募金申込書」

送り先住所

〒113

切取り線

東京都文京区本郷 5 | 25 | 18

日本伝熱学会事務局

募金事業実行委員会宛

切取り線

第30回 日本伝熱シンポジウム

- 開催日 平成5年5月26日(水)～28日(金)
- 講演会場 横浜市開港記念会館 〒231 横浜市中区本町1-6
JR京浜東北線 関内駅球場側出口より徒歩15分
- シンポジウム参加費 一般(1名) 事前申込:7,000円, 当日申込:8,000円
学生・院生(1名) 事前申込:3,000円, 当日申込:4,000円
(いずれも講演論文集代を含みません)
- 講演論文集代 1セット8,000円(消費税含む)
ただし、郵送の場合は1セット8,600円(送料含む)
(日本伝熱学会会員には1セット無料進呈)
- 懇親会 日時 5月27日(木) 18:30～20:30
会場 重慶飯店(ホテル・ホリディ・イン横浜内)
会費 事前申込:7,000円 当日申込:8,000円
ただし、同伴夫人は無料です。
- 参加申込要領 本号に同封の郵便振替払込用紙を1人につき1枚ご使用になり、通信欄に
〔(1) 氏名(ふりがな)、(2) 勤務先または学校名、(3) 参加費(一般・学生を明記)、(4) 懇親会費(夫人同伴の方はその旨を明記) (5) 講演論文集冊数および金額(進呈分以外)、(6) 合計金額、(7) 記念講演会「ネクスト30」(次ページに案内あり)参加の有無〕をご記入の上、当該費用をご送金下さい。参加証は当日受付にてお渡しいたします。
なお、事務の簡素化と経費節減のため原則として領収書の発行を省略させていただきますので、郵便局で受け取られる郵便振替払込金領収書を保存して下さい。
- 事前申込締切 平成5年5月7日(金) (消印有効)
- 申込先 郵便振替口座：横浜4-8491
第30回日本伝熱シンポジウム準備委員会
- 参加・講演についての問合せ先 〒223 横浜市港北区口吉3-14-1
慶應義塾大学理工学部機械工学科内
TEL045-563-1141 内線3130(菱田公一)
FAX045-563-5943
- 当日受付 第1日午前9:00(予定)よりシンポジウム会場で行います。

記念講演会行事

**第30回日本伝熱シンポジウム記念講演会
- ネクスト30 -**

日本伝熱学会関東地区研究グループ

共同企画

第30回日本伝熱シンポジウム準備委員会

本年5月、横浜において第30回のシンポジウムが開催されます。この機に下記のような記念講演会を開催する予定です。伝熱あるいはエネルギー関連分野の新しい潮流を示唆するような展望講演や、従来の伝熱学の枠を越えた新しい研究についてのホットな話が予定されています。伝熱研究の新時代へ向けての胎動が皆様の耳に届くような講演会にしたいと考えております。

開催日は第30回日本伝熱シンポジウムの前日、会場もシンポジウムと同じ開港記念会館です。シンポジウムと併せご参加下さいますようお願い申し上げます。

開催日： 1993年5月25日(火) 14:00~19:10

会場： 横浜市開港記念会館 講堂

参加費： 無料

参加申込方法： 伝熱シンポジウム申込用紙通信欄に参加の有無をご記入下さい。

次 第

時 間	題 目	講 師
14:00 ~ 14:10	開会の辞 望月貞成 (日本伝熱学会理事 - 関東地区担当)	
14:10 ~ 14:50	「米国における伝熱研究の新潮流」	W.-J. Yang (University of Michigan)
14:50 ~ 15:30	「エコ・エネルギー都市システムの実現に向けて (ニューサンシャイン計画新規プロジェクト)」	秋谷鷹二 (工業技術院 化学技術研究所)
15:40 ~ 16:30	「レーザーおよび荷電粒子ビームと物質の干渉」 (講演はロシア語, 通訳付き)	G.S. Romanov (Academy of Science of Belaruc)
16:30 ~ 17:10	「微小重力環境はどのように伝熱研究に寄与するか」 (講演は英語)	J. Straub (Technische Universitat Munchen)
17:20 ~ 17:40	「C ₆₀ の生成と物理」	丸山茂夫 (東京大学)
17:40 ~ 18:00	「流下液膜の膜厚挙動に見られるカオスの特徴」	森 幸治 (大阪大学)
18:00 ~ 18:20	「任意形状・任意加熱条件・任意表面を有する物体 の放射伝熱解析」	円山重直 (東北大学)
18:20 ~ 18:40	「物質変換における新しいプラズマ技術」	岡崎 健 (東京工業大学)
18:40 ~ 19:00	「近赤外光による生体内酸素濃度計測」	山田幸生 (工業技術院 機械技術研究所)
19:00 ~ 19:10	閉会の辞 前田昌信 (第30回日本伝熱シンポジウム準備委員長)	

第30回日本伝熱シンポジウム宿泊・航空機のご案内

1. 宿泊のご案内

- ◆ 宿泊日 平成5年5月25日(火)～28日(金)
- ◆ 宿泊代金 お一人様 1泊朝食付き(税、サービス料が含まれます。)

ご利用予定ホテル名	タイプ記号	1室1名使用	タイプ記号	1室2名使用	最寄り駅から	会場から
ホテルホリデイイン横浜	1-S	21,000	1-T	12,500	JR関内徒歩10分	徒歩4分
横浜伊勢佐木町ワシントンホテル	2-S	11,500			JR関内徒歩3分	徒歩10分
ホテルコンチネンタル横浜	3-S	12,000	3-T	11,500	JR関内徒歩7分	徒歩3分
シャトレイン横浜パトⅢ	4-S	11,000			JR石川町徒歩3分	徒歩10分
三愛ヨコハマホテル	5-S	8,500	5-T	8,000	JR桜木町徒歩3分	市バス花咲町徒歩2分
ヨコハマプラザホテル	6-S	8,500			JR横浜徒歩1分	市バス横浜駅徒歩1分

2. シンポジウム用特別割引航空運賃のご案内

- ◆ 本シンポジウムにご参加の方に限り、宿泊と同時に申し込み頂きますと、次表の通り特別往復割引運賃を適用させていただきます。
- ◆ 日本エアシステムの下記路線を往復ご利用の場合に限り、1名様よりお受けいたします。

空港名	割引往復運賃	空港名	割引往復運賃	空港名	割引往復運賃
札幌	40,000	小松	25,000	福岡	42,000
釧路	49,500	大阪	25,000	大分	41,000
女満別	52,700	出雲	35,800	熊本	44,500
帯広	48,500	徳島	35,800	長崎	48,000
旭川	49,500	高松	36,000	宮崎	44,800
青森	36,000	広島	37,000	鹿児島	48,000
三沢	36,000	北九州	42,000	沖縄	56,000

- ◆ ご予約の変更は1ヵ月前まで可能ですが、その後の変更はできませんのでご了承下さい。
- ◆ その他の区間および他航空会社のお手配も承ります。(但し普通運賃の適用となります。)
- ◆ この航空運賃は平成4年9月現在のものです。

3. お申し込みのご案内

- ◆ 別紙申込書にご記入いただき、3月31日(水)までにお申し込み下さい。
- ◆ お申し込みいただきました方には宿泊および航空券の予約確認書を5月10日頃までにご送付致しますので、ご出発前にご確認いただき、当日ご持参下さい。
- ◆ 事務通信費としてお一人様につき800円を申し受けますのでご了承下さい。
- ◆ お申し込み後、お客様のご都合で予約を変更または取り消しされる場合は取消料を申し受けます。
- 講演申し込みをされた方には、申し込みに関するご案内をお送りいたします。

4. 費用お支払いのご案内

- ◆ ご請求書、予約確認書が到着次第、下記郵便振替口座宛お振り込み下さい。
- ◆ 払い込み住所氏名欄に必ず連絡先電話番号をご記入下さい。
- ◆ 払い込み手数料は各自ご負担下さい。
- ◆ 取り消し・変更等によるご返金等の清算は、事務手続き上シンポジウム終了後、6月中に行いますので予めご了承下さい。

郵便振替口座：横浜4-61543
日本交通公社横浜支店

お問合せ・お申込書送付先

〒231 横浜市中区屋上町1-6
JTB横浜支店コンベンション事務局
第30回日本伝熱シンポジウム受付係
担当：渡辺・八束・堀
TEL:045(664)2760
FAX:045(641)2059

第30回 日本伝熱シンポジウム 宿泊・航空機 申込書

記入例	フリガナ 氏名	性別	年齢	宿泊申込				航空機 区間	申込		便名	
				宿 記号	5/25 (火)	5/26 (水)	5/27 (木)		5/28 (金)	往路 月日		復路 月日
	ヨコハマタロウ 横浜 太郎	男・女	才					長崎 ～ 羽田	往 復	月日 月日	: :	
①		男・女						～	往 復	月日 月日	: :	
②		男・女						～	往 復	月日 月日	: :	
③		男・女						～	往 復	月日 月日	: :	
④		男・女						～	往 復	月日 月日	: :	
⑤		男・女						～	往 復	月日 月日	: :	
⑥		男・女						～	往 復	月日 月日	: :	

申込担当者名 (フリガナ) 様	確認書類 送付先 〒 TEL ()
--------------------	-----------------------

申込締切日：3月31日 (水)
 申込先：〒231 横浜市中区尾上町1-6
 JTB横浜支店 TEL045(664)2760
 FAX045(641)2059

第 1 0 回国際伝熱会議論文募集

1. 開催地： 英国 ブライトン市会議センター (The Brighton Conference Centre)
2. 開催期日： 1994年 8月13日 (土) - 8月18日 (木)
3. 論文数： インド、韓国、中華人民共和国を除く東南アジア諸国を含めて50編
4. 論文内容： 伝熱研究に関する基礎的研究、応用的研究で未発表のもの：Topicsとして例えば

Ablation; Aerothermodynamics; Biological Heat Transfer; Biotechnology;
Boiling and Condensation; Buoyancy Driven Flows; Chaos in Heat Transfer;
Combined Heat and Mass Transfer; Combustion; Computational Fluid dynamics
and Heat Transfer; Conduction; Cryogenic Heat Transfer; Electric Systems;
Environmental Heat Transfer; Forced, Natural and Mixed Convection;
Heat Exchangers; Heat Pipes; Heat Transfer at Very High Fluxes;
Heat Transfer Augmentation; Heat Transfer in Turbomachinery and Gas Turbine;
Insulation; Interfacial Phenomena; Manufacturing Heat Transfer; Measurement
Techniques; Melting and Freezing; Micro-scale Heat Transfer; Modelling and
Numerical Techniques; Nuclear Reactor Systems; Particulate and Porous Media;
Radiation; Solar Energy; Space Energy Conversion Systems; Stability Problems
in Heat Transfer; Thermal Energy Storage; Thin-film Heat Transfer;
Transport Properties; Two-phase Flow 等が含まれます。

5. 応募要領： 500 語程度の英文アブストラクト 4部を期限までに下記宛送付下さい。

送付先 〒606-01 京都市左京区吉田本町
京都大学工学部機械工学科
鈴木健二郎

アブストラクト締切 1993年 6月 1日 (火)

アブストラクト採否通知 1993年 7月31日 (土)

第1次本論文原稿締切 1993年10月 1日 (金)

最終採否通知 1994年 1月 1日 (土)

6. 発表形式

一般論文の発表は全てポスターセッション形式で行いますので、著者の一人は必ず出席することが必要です。なお、今回は各ポスターセッションに先立ち、発表論文のレビューを含む各セッションのトピックスに関する特別講演が企画されています。

Heat Transfer Japanese Research

Editor 交代のお知らせ

伝熱学会会員の皆様には、Heat Transfer Japanese Research の編集に際しまして、日頃より多大の御援助を戴いており、誠に有難う御ざいます。同Journal のEditorを御引き受け致しましてから、8年目になります。この間、年間の号数も前Editor時代の4号から6号へと増え、また最近では8号となっており、私の事務局で扱いました論文数も300編を越えたものと推察致します。日本における伝熱研究の隆盛に伴い、同Journalも充実度を増し、ますます好評と聞いています。皆様の御支援の賜と存じます。

さて、平成5年1月を期しまして、同Journalの日本側編集業務を、

京都大学 工学部化学工学教室 荻野文丸教授
東京大学 工学部機械工学科 庄司正弘教授

の御二人の先生に交代して戴くことに致しました。なお、同Journalの米国側Editorには変更は有りません。また、これまで私から推薦させて戴いた論文で、未掲載のものが相当数ありますが、それらにつきましては、今後とも私の手元で取り扱わせて戴きますので、しばらくはこれまでと同様に宜しく御支援の程お願い申し上げます。

HTJR 前Editor
京都大学工学部機械工学教室
鈴木健二郎

” 分子およびミクロスケールでの熱・物質移動現象” に関する日米セミナーへの参加のご案内

このたび上記の標題での日米セミナーを日本学術振興会日米科学協力事業の一環として行うこととなりました。本来日米セミナーは限定された参加者で行うことを原則としておりますが、本テーマが比較的新しい研究分野であり、また、現在米国で非常に注目され、数多くの研究発表が行われ、その主要な研究者が参加することでもあり、日本でもできるだけ多くの方に関心を持っていただくために、ご希望の方に参加いたきたいと考えております。日米セミナーの内容は以下の通りですので、参加希望（発表を含めて）の方はご連絡ください。企業の研究者の方の参加も歓迎いたします。なお会場等の制約から参加人数には限りがあります。

セミナー名： 分子およびミクロスケールでの熱・物質移動現象
日本側責任者： 東京大学 教授 小竹 進
米国側責任者： University of California, at Berkeley 学長 C. L. Tien
開催日・場所： 平成5年7月11日～14日 金沢厚生年金会館
参加費： Proceeding 費等の実費（未定）
発表課題：

- (i) 高非平衡状態での熱・物質移動現象
 - a. 光励起過程に伴う熱移動
 - b. ミクロスケールでの加熱、冷却
 - c. 高熱流束エネルギー輸送
 - d. 複雑な構造を持つ分子のエネルギー輸送機構
 - (ii) 熱・物質移動現象の物理化学
 - a. 光・熱変換現象の動力学
 - b. 相変化現象における表面エネルギー効果
 - c. 薄膜における熱・物質輸送現象
 - (iii) 分子間相互作用
 - a. クラスタ動力学
 - b. 高温超伝導のフォノン・電子相互作用
 - c. 干渉分子間のエネルギー輸送機構
 - (iv) 輸送現象における量子効果
 - a. 高温超伝導材におけるエネルギー移動
 - b. 薄膜における輻射吸収機構
 - (v) 境界面における熱・物質移動の微細機構
 - a. 境界面熱抵抗
 - b. 粒界面における熱移動
 - c. 適合係数の定量化
- 米国側の主な参加予定者

C.L. Tien	University of California - Berkeley
F. Markus	Massachusetts Institute of Technology
A. Majumdar	University of California - Santa Barbara
S. Kumar	Polytechnic University
K.E. Goodson	Massachusetts Institute of Technology
K.S. Udell	University of California - Berkeley
A.S. Levinc	University of California - Los Angeles
M. Toner	Harvard University
H. Bau	University of Pennsylvania
E.G. Cravalho	Massachusetts Institute of Technology
P. Pheran	University of Hawaii - Manoa
R. Buckius	University of Illinois

問い合わせ・申込先： 東京工業大学 土方邦夫 FAX:03-3729-0628

関西研究グループ講演会開催通知

日本伝熱学会関西研究グループでは、標記の講演会を下記の通り開催致します。多数ご参加下さいますようお願い申し上げます。

記

日時：平成5年4月16日（金） 13:00-16:30
場所：姫路工業大学教養部，5号館1階 視聴覚教室
姫路市書写2167
JR姫路駅下車，神姫バスターミナルからバス（書写西住宅，姫路工大前，横関経由姫路グリーンハイツ，刀出，荒木，古瀬畑の各方面行き）に乗車して姫路工大前下車。

講演：

- (1) 高速X線CTによる気液二相流の可視化の試み
川西康平，堀慶一（三菱重工業・高砂研究所）
- (2) テイラー渦流の乱れの分岐現象
大村直人（神戸大学・工・応用化学）
- (3) 熱不良導層と電場による浸漬冷却制御
竹中信幸，藤井照重（神戸大学・工・機械）
- (4) 低レイノルズ数型応力モデルによる密度成層乱流の数値解析
福井啓介（姫路工業大学・工・産業機械）
- (5) ピンフィン熱交換器の流れの数値解析
園井英一（神戸製鋼所・機械研究所）

なお、講演会終了後に、講演者を交えて軽食での懇親会（会費1,000円、当日徴収致します）を開催致します。多数のご参加を期待致します。

講演会ならびに懇親会の出欠のご予定を、FAX等にて、講演会当日までの出来るだけ早い時期に、お知らせ下さいますようお願い致します。

連絡先：

〒671-22 姫路市書写2167

姫路工業大学工学部機械工学科， 小松源一。
産業機械工学科， 中西重康。

FAX. (0792) 66-8868 (共通)

TEL. (0792) 66-1661 (代)

混相流シンポジウム' 93 (第12回)

参加募集要項

- 共 催 日本学術会議水力学水理学研究連絡委員会ほか
(従来通りの所へ依頼)
- 開催日 平成5年7月15日(木), 16日(金)
- 場 所 九州大学工学科 防音教室
〒812 福岡市東区箱崎6-10-1
- 開催趣旨 混相流シンポジウムは、日本学術会議水力学水理学研究連絡委員会から、1987年に創立した日本混相流学会が幹事学会となって受け継ぎ、以来混相流に関心を持つ多くの専門分野の研究者のための学术交流の場として成果を挙げてまいりました。
来年度は、従来どおり「混相流分野の社会への貢献」のほか「混相流の実際上の問題と基礎研究のはざまを埋めるには」などを目的として、討論を行いたいと存じます。特に企業から多くの方が参加されるようお願いいたします。
- 研究発表講演
募集テーマ
1. 混相流の物理
 2. 混相流のダイナミックス
 3. 混相流のモデリング
 4. 混相流のシミュレーション
 5. 混相流の計測技術
 6. 混相流工業技術
 7. 自然現象における混相流
 8. 生体ならびにバイオ工学における混相流
 9. 複合流体材料
 10. その他
 11. 特別セッション「企業からの混相流に関する問題の提起と解決へのアプローチ」(仮題)を予定しています。
- 特別講演 「雲仙普賢岳を例とした火砕流」と「異相界面の科学」(いずれも仮題)の2件の特別講演を予定しています。
- 講演要旨
1. 講演の採否は、実行委員会にご一任願います。
 2. 講演は、2室で平行して行う予定です。1件につき講演時間15分、討論時間15分の予定ですが、件数によって多少変更があるかも知れませんのでご了承下さい。
 3. 講演論文原稿ページ数は、原稿用紙(47字×41字)4枚以内とし、その原稿を縮小オフセット印刷致します。
- 講演申込締切 平成5年4月16日(金)
- 原稿提出締切 平成5年5月21日(金)

講演申込方法
・申込書 日本混相流学会誌 Vol.6, No.4 (12月号)の巻末に添付されている申込用紙(またはそのコピー)、あるいはB5用紙に「混相流シンポジウム'93(第12回)講演申込」と題記し、(1)題目、(2)氏名(ふりがな)、連名の場合には講演者に※印、所属(勤務先)、連絡先ならびに日本混相流学会会員資格または所属学協会の資格、(3)講演概要(200字程度)およびキーワード(3語以内)と関連テーマ番号、(4)執筆要項送付先を明記し、下記の申込先までお送りください。

☆☆☆ 整理の都合上論文の著者と著者が複数の場合その順番及び発表者は、論文原稿提出時に変更しないようにして下さい。

整理費 講演1件につき1,000円を郵便振替、銀行口座振替あるいは現金書留にてお送り下さい。

郵便振替口座 名称:混相流シンポジウム'93実行委員会
口座番号:福岡 4-38214
銀行口座 名称:混相流シンポジウム'93実行委員会
銀行名:福岡銀行 箱崎支店(店番291)
口座番号:1598142

講演申込先
および
論文送付先 〒812 福岡市東区箱崎6-10-1
九州大学 工学部 機械工学科
混相流シンポジウム実行委員会
TEL (092) 641-1101 (内5440, 5441)
FAX (092) 641-9744

問合せ先 深野 徹(実行委員長:九大工学部) TEL(092)641-1101(内線5440)
楠田哲也(副実行委員長:九大工学部) TEL(092)641-1101(内線5216)
古川明德(総務:九大工学部) TEL(092)641-1101(内線5451)

事務局からの連絡

1. 学会案内と入会手続きについて

【目的】

本会は、伝熱に関する学理技術の進展と知識の普及、会員相互及び国際的な交流を図ることを目的としています。

【会計年度】

会計年度は、毎年4月1日に始まり翌年3月31日までです。（但し、「伝熱研究」の巻と表紙の色は1月号から10月号までの一年間同じです）

【会員の種別と会費】

会員種別	資 格	会 費（年 額）
正会員	伝熱に関する学識経験を有する者で、本会の目的に賛同して入会した個人	8,000円
賛助会員	本会の目的に賛同し、本会の事業を援助する法人またはその事業所、あるいは個人	1口 30,000円
学生会員	高専、短大、大学の学部および大学院に在学中の学生で、本会の目的に賛同して入会した個人	4,000円
名誉会員	本会に特に功労のあった者で、総会において推薦された者	0円
推薦会員	本会の発展に寄与することが期待できる者で、当該年度の総会において推薦された者	0円

【会員の特典】

会員は本会の活動に参加でき、次の特典があります。

- 1) 「伝熱研究, THERMAL SCIENCE AND ENGINEERING」の郵送が受けられる。
(来年度発行予定: 4月号, 7月号, 10月号, 1月号)
 - ・正会員、学生会員、名誉会員、推薦会員に1冊送付
 - ・賛助会員に口数分の冊数送付
- 2) 「日本伝熱シンポジウム講演論文集」の無料郵送が受けられる。
 - ・正・学生・名誉・推薦の各会員に1部、賛助会員に口数分の部数送付
(但し、伝熱シンポジウム開催の前年度の3月25日までに前年度分までの会費を納入した会員に限る)

【入会手続き】

正会員または学生会員への入会の際は、入会申込用紙にご記入の上、事務局（本郷）宛にファックスまたは郵送で送り、郵便振替にて当該年度会費をお支払い下さい。賛助会員への入会の際は、入会申込用紙にご記入の上、事務局（本郷）宛にファックスまたは郵送でお送り下さい。必要があれば本会の内容、会則、入会手続き等についてご説明します。賛助会員への申込みは何口でも可能です。

（注 意）

- ・申込用紙には氏名を明瞭に記入し、難読文字にはJISJ-ドのご指示をお願いします。
- ・会費納入時の郵便振替用紙には、会員名（必要に応じてフリガナを付す）を必ず記入して下さい。会社名のみ記載の場合、入金の取扱いができず、会費未納のままとなります。
- ・学生会員への入会申込においては、指導教官による在学証明（署名・捺印）が必要です。

2. 会員の方々へ

【会費納入について】

会費納入状況は「伝熱研究」郵送ラベルの累積請求額でご確認下さい。会費納入には折込みの郵便振替用紙をご利用下さい。その他の送金方法で手数料が必要な場合には、送金額から減額します。フリガナ名の検索によって入金の手務処理を行っておりますので会社名のみで会員名の記載がない場合には未納扱いになります。

【変更届について】

（勤務先、住所、通信先等の変更）

勤務先、住所、通信先等に変更が生じた場合には、巻末の「変更届用紙」にて速やかに事務局へお知らせ下さい。通信先の変更届がない場合には、郵送物が会員に確実に届かず、あるいは宛名不明により以降の郵送が継続できなくなります。また、再発送が可能な場合にもその費用をご負担頂くこととなります。

（賛助会員の代表者変更）

賛助会員の場合には、必要に応じて代表者を変更できます。

（学生会員から正会員への変更）

学生会員が社会人になられた場合には、会費が変わりますので正会員（正会員）への変更届を速やかにご提出下さい。このことにつきましては、指導教官の方々からもご指導をお願いします。

（変更届提出上の注意）

会員データを変更する際の誤りを防ぐため、変更届は必ず書面にて会員自身もしくは代理と認められる方がご提出下さるようお願いします。

【退会届について】

退会を希望される方は、退会日付けを記した書面にて退会届（郵便振替用紙に記載可）を提出し、未納会費を納入して下さい。会員登録を抹消し、「退会処理通知」を送付します。

【会費を長期滞納されている方へ】

長期間、会費を滞納されている会員の方々は、本号宛名ラベルの会費請求額をご確認の上、至急納入をお願いします。

（平成3年度以降の会費未納の方へ）

「伝熱研究」（本1月号以降）の送付を停止しております。近く会費個別請求を行い、その後も未納の場合には退会処置が理事会で協議されます。

（平成2年度以降の会費未納者の処置）

「伝熱研究」（一昨年10月号以降）の送付を停止しております。近く会費個別請求を再度行い、その後も未納の場合には退会処置が理事会で再度協議されます。

3. 事務局について

次の業務を下記の事務局で行っております。

事務局
（業務内容）
i) 入会届、変更届、退会届の受付
ii) 会費納入の受付、会費徴収等
iii) 会員、非会員からの問い合わせに対する応対、連絡等
iv) 前回までの「伝熱シンポジウム講演論文集」の注文受付、 新入会員への「伝熱研究」発送、その他刊行物の発送
v) その他必要な業務
（所在地） 〒113 東京都文京区本郷5-25-18 日本伝熱学会 TEL, FAX: 03-5689-3401 (土日、祝祭日を除く、午前9時～午後5時)

（注 意）

1. 事務局への連絡、お問い合わせには、電話によらず、できるだけ郵便振替用紙の通信覧やファックス等の書面にてお願いします。
2. 学会事務の統括と上記以外の事務は、下記にて行なっております。
3. 第30回日本伝熱シンポジウム関連の事務（発表・参加・論文集申込み、その他問い合わせ等）は扱っておりませんので、実行委員会に直接お願いします。

〒152 東京都日黒区大岡山2-12-1 東京工業大学 原子炉工学研究所 井上 晃 TEL: 03-3726-1111 (内線3077、3059) FAX: 03-3729-1875

日本伝熱学会 賛助会員新規入会申込み届用紙

0	申込年月日	H		年		月		日
---	-------	---	--	---	--	---	--	---

※ご記入に際しての注意

日本伝熱学会からの郵送物は代表者にお送りしておりますので、代表者の所属に変更がありましたら、書面にて事務局宛ご連絡下さるようお願いいたします。

1	会員資格	賛助会員
2	代表者氏名	
3	ふりがな	

4	代表者勤務先	名称 (所属)	
5		〒	
6		所在地	
7		TEL	
8		FAX	共通・専用
9	□数	□	

日本伝熱学会入会のご案内

1. 本学会の会計年度は毎年4月1日から翌年3月末日までです。
2. 賛助会員の会費は1口30,000円/年で、申し込みは何口でも結構です。申し込み口数により、次のように分けております。
A(3口)、B(2口)、C(1口)
3. 会員になりますと「伝熱研究」及び「日本伝熱シンポジウム講演論文集」等をお申し込み口数1口につき1部お送りします。
この伝熱研究は通常、年4回(4、7、10、1月号)発行しております。
但し、日本伝熱シンポジウム講演論文集につきましては、前年度の会費を年度末までに納入された会員に限り当該年度のものをお送りします。
尚、年度途中でご入会の方には残部の都合でお送りできない場合もありますので、あらかじめご承知おき下さい。
4. 本学会では、事務作業簡素化のために会費の領収書の発行は郵便振替や銀行振込の控えをあてています。簡単な書式の領収書はご用意できますが、それ以外の場合には貴社ご指定の書式をご送付下さいますようお願いいたします。

申込書送付先：〒113 東京都文京区本郷 5-25-18
日本伝熱学会事務局
TEL., FAX. 03-5689-3401

会費の払込先：

- (1) 郵便振替の場合 -- 郵便振替口座 東京6-14749 日本伝熱学会
- (2) 銀行振込の場合 -- 第一勧業銀行 大岡山支店 普通預金口座 145-1517941
日本伝熱学会 代表 井上 晃
- (3) 現金書留の場合 -- 上記の事務局宛に御送金下さい。

複写をされる方に

本誌に掲載された著作物を複写したい方は、著作権者から複写権の委託を受けている次の団体から許諾を受けて下さい。

学協会著作権協議会内日本複写権センター支部
〒107 東京都港区赤坂9 6 42 704
Phone 03-3475-4621/5618
Fax 03-3403-1738

Notice about photocopying

In the U.S.A., authorization to photocopy items for internal or personal use, or the internal or personal use of specific clients, is granted by [copyright owner's name], provided that designated fees are paid directly to Copyright Clearance Center. For those organizations that have been granted a photocopy license by CCC a separate system of payment has been arranged.

Copyright Clearance Center 27 Congress St.
Salem, MA 01970
Phone (508)744-3350
Fax (508)741-2318

伝 熱 研 究

ISSN 0910-7851

(Journal of The Heat Transfer Society of Japan)

Vol.32, No.124

1993年1月発行

THERMAL SCIENCE AND ENGINEERING ISSN 0918-9963

Vol. 1, No. 1

January, 1993

発行所 **日 本 伝 熱 学 会**

〒113 東京都文京区本郷5-25-18

電話 03(5689)3401

Fax. 03(5689)3401

郵便振替 東京 6-14749

Published by

The Heat Transfer Society of Japan

25-18, Hongo 5-chome, Bunkyo-ku,

Tokyo, Japan, Post No.113

Phone, Fax: +81-3-5689-3401

伝熱研究 Vol. 32, No. 124

日本伝熱学会30周年記念特集号 I

<会長挨拶>

創立30周年記念特集の発行に当たって…………… 第31期会長 藤江邦男 (新明和)

<日本伝熱学会の歴史>

日本伝熱学会の活動に関する資料…………… 第31期副会長 (事務担当) 井上 晃 (東工大)

<創立30周年を祝って>

日本伝熱学会と日本学術会議との関わり…………… 第15期会長 西川兼康 (九州電力、九大名誉教授)

伝熱学の30年の発展と今後の展望…………… 第17期会長 森 康夫 (東工大名誉教授)

エネルギー・環境問題と日本伝熱学会の使命…………… 第18期会長 甲藤好郎 (日大、東大名誉教授)

Heat Transfer in Japan…………… R. J. Goldstein (ミネソタ大学、米国)

In honour of the 30th anniversary of the Heat Transfer Society of Japan

…………… J. H. Whitelaw (インペリアルカレッジ、英国)

<伝熱研究の進展I>

熱伝導・接触熱抵抗研究の進展…………… 岡田昌志・松本浩二 (青山学院大)

壁面剪断乱流の構造と輸送機構…………… 笠木伸英 (東大)

対流熱伝達における伝熱促進…………… 鈴木健二郎・稲岡恭二 (京大)

密閉空間内自然対流研究の進展…………… 尾添紘之・岩本光生・平野博之 (九大)

自然対流乱流境界層の乱れの生成と熱輸送のメカニズム…………… 長野靖尚・辻 俊博 (名工大)

金属の凝固伝熱研究の進展…………… 大中逸雄 (阪大)

沸騰研究の過去、現在、未来…………… 庄司止弘 (東大)

管内・管外凝縮のメカニズムと促進…………… 本田博司 (九大)

燃焼中の伝熱…………… 高城敏美 (阪大)

ふく射伝熱研究のニーズとふく射物性研究のシーズ…………… 牧野俊郎 (京大)

<国際伝熱会議委員会報告>

国際伝熱会議アセンブリ委員会に出席して…………… 平田 賢 (芝浦工大)

THERMAL SCIENCE AND ENGINEERING Vol. 1, No. 1

1. Thermal and Electrical Modeling of Sub-Micron MESFETs…………… 1
-Majumdar, A. and Fushinobu, K.
(*Thermal conduction, FET, Microscale heat transfer*)
2. Microscale Thermal Diffusivity Measurement…………… 11
Development of the Technique and Measurement of Anisotropic
Behavior of a Nylon Fiber
Tanaka, N. and Nagashima, A.
(*Thermal diffusivity, Nylon fiber, Microscale measurement*)
3. The Operating System of the Heat Transfer Handbook and its
Extension to Personal Programming (in Japanese)…………… 19
Hijikata, K.
(*Operating system, Heat transfer, Software*)