

ISSN 0910-7851

伝熱研究

Journal of The Heat Transfer Society of Japan

1997 April
Vol. 36 No. 141

〈レビュー特集〉

ISSN 0918-9963

THERMAL SCIENCE AND ENGINEERING

Vol. 5

No. 2

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

日本伝熱学会第35期（平成8年度）役員

会 副	長 会 長	(編集出版) (企 画) (総 務)	越 後 亮 三(東 工 大) 荻 野 文 丸(京 大) 曾 田 正 浩(三 菱 重 工) 齋 藤 彬 夫(東 工 大)
理	事	(編集出版)	部 会 長
	北 海 道 東 海	早 坂 洋 史(北 大) 熊 田 雅 弥(岐 阜 大) 金 了 邦 彦(東 大)	增 岡 隆 上(九 工 大) 太 田 照 和(東 北 大) 松 尾 篤 二(三 菱 重 工)
	(企 画)	北 陸 信 越 中 国 四 国	部 会 長 伝 熱 シ ン ポ ジ ウ ム 準 備 委 員 長 関 西
	(総 務)	青 木 和 夫(長 岡 技 大) 森 岡 齋 徳 島 大) 松 木 健 次(シ ャ ー プ)	笠 木 伸 英(東 大) 戸 田 三 郎(東 北 大) 中 島 健 一(神 戸 大) 五十嵐 喜 良(東 北 電 力)
監 評	九 州 事 務 員	尾 添 紘 之(九 大) 鳥 居 薫(横 浜 国 大) 鈴 木 立 之(富 山 県 立 大) 西 尾 茂 文(東 大) 功 刀 資 彰(原 研) 森 英 夫(九 大) 丸 山 茂 夫(東 大) 佐 藤 春 樹(慶 大) 辻 俊 博(名 工 大) 田 中 宏 史(福 岡 工 大) 山 田 明(三 菱 重 工) 廣 田 真 史(名 大) 小 林 健 一(東 工 大) 山 岸 英 明(釧 路 高 専) 松 田 理(石 川 高 専) 時 田 雄 次(大 分 大) 小 原 拓(東 北 大) 富 山 明 男(神 戸 大) 片 岡 勲(京 大) 鈴 木 豊 彦(鳥 取 大) 加 藤 泰 生(山 口 大) 森 康 彦(慶 大) 飛 原 英 治(東 大) 水 上 紘 一(愛 媛 大) 前 川 透(東 洋 大) 宮 内 敏 雄(東 工 大) 佐々木 章(秋 田 高 専) 吉 田 英 生(東 工 大) 武 内 洋(北 工 技 研)	部 会 長 関 東
			山 田 幸 生(工 技 院) 塩 冶 震 太 郎(石 播 重 工) 日 向 滋(信 州 大) 石 黒 博(筑 波 大) 森 岡 幹 雄(石 播 重 工) 浅 古 豊(都 立 大) 松 島 均(日 立) 中 山 昭 男(九 州 産 大) 岸 浪 紘 機(室 蘭 工 大) 大 原 敏 夫(日 本 電 装) 大 河 誠 司(東 工 大) 二 松 順 次(岐 阜 大) 中 山 明 人(ト ヨ タ 自 工) 原 利 次(日 本 工 大) 東 之 弘(い わ き 明 星 大) 高 田 保 之(九 大) 小 宮 山 正 治(阪 大) 久 角 喜 徳(大 阪 ガ ス) 橋 本 律 男(三 菱 重 工) 松 本 浩 二(宮 崎 大) 川 西 康 平(三 菱 重 工) 数 土 幸 夫(原 研) 中 島 利 誠(お 茶 水 女 大) 塩 津 正 博(京 大) 佐 藤 勲(東 工 大) 村 上 周 三(東 大) 広 瀬 宏 一(岩 手 大) 岡 田 昌 志(青 山 学 院 大)

「Thermal Science and Engineering」

チーフエディター

土 方 邦 夫(東 工 大)

伝熱研究 目次

〈随想〉

この数ヶ月間の出来事について 岐美 格 (京都大学) 1

〈レビュー特集〉

レビュー特集号の編集にあたって

..... 第35期編集委員会 太田照和 (東北大学), 片岡勲 (京都大学) 3

乱流熱伝達のDNSとLES 河村洋 (東京理科大学) 4

代替冷媒の開発と熱物性研究に関する最近の進展

..... 渡部康一 (慶應義塾大学理工学部システムデザイン工学科) 16

沸騰熱伝達の促進と機構 藤田恭伸 (九州大学工学部機械エネルギー工学科) 27

複雑な系におけるふく射伝熱 円山重直 (東北大学流体科学研究所) 40

〈世界のホットユース〉

Duke 大学を訪ねて 池上康之 (佐賀大学海洋温度差エネルギー実験施設) 53

〈賛助会員紹介〉

三浦工業(株) 川上昭典 (三浦工業(株)技術部) 56

〈行事カレンダー〉 59

〈お知らせ〉

第34回日本伝熱シンポジウム 60

日本機械学会平成9年度熱工学講演会講演募集 81

平成9年度熱流体フォーラム講演会開催のご案内 81

BIOTRANSPORT'98: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON HEAT AND MASS TRANSFER IN BIOLOGICAL AND MEDICAL ENGINEERING 82

「伝熱研究」会告の書き方 82

「伝熱研究」原稿の書き方 83

事務局からの連絡 84

日本伝熱学会, 入会申込み, 変更届用紙 85

インターネット情報サービス

● <http://htsj.mes.titech.ac.jp/htsj.html>

最新の会告・行事の予定等を提供

● htsj-info@mes.titech.ac.jp

最新の情報を電子メールで受け取りたい方のための電子メールアドレスの登録受付

● htsj@mes.titech.ac.jp

事務局への連絡の電子メールによる受付

Journal of The Heat Transfer Society of Japan
Vol.36, No.141, January, 1997

CONTENTS

<Essay>

On the Matter in the Last Several Months
Itaru Michiyoshi (Kyoto University) 1

<Special Issue: Review>

Preface to Special Issue: Review
Terukazu Ota (Tohoku University) and Isao Kataoka (Kyoto University) 3

DNS and LES of Turbulent Convective Heat Transfer
Hiroshi Kawamura (Science University of Tokyo) 4

Recent Progress in Development of Alternative Refrigerants and Thermophysical Properties Research
Koichi Watanabe (Department of System Design Engineering, Faculty of Science and Technology,
Keio University) 16

Enhancement of Boiling Heat Transfer and Its Mechanism
Yasunobu Fujita (Dept. Energy and Mechanical Engineering, Kyushu University) 27

Radiative Transfer in Complicated System
Shigenao Maruyama (Institute of Fluid Science, Tohoku University) 40

<World Hot Youth>

A Visit to Duke University
Yasuyuki Ikegami (OTEC Laboratory, Saga University) 53

<Profile of Industrial Member>

MIURA CO., LTD.
Akinori Kawakami (Technical Department, MIURA CO., LTD.) 56

<Calendar> 59

<Announcements> 60

この数ヶ月間の出来事について

On the Matter in the Last Several Months

岐美 格 (京都大学)

Itaru MICHIYOSHI (Kyoto University)

「伝熱研究」の随想欄に、「これまでないしこれからの伝熱研究」に関連して、内容随意で執筆するようにとの依頼を受けた。ちょうど50年前に、菅原菅雄先生の指導のもとに、卒業研究として粗面板の強制対流熱伝達に関する研究を行って以来、これまでの伝熱研究について述べることは、既に二、三の学会誌に書いたことと重複することになるばかりでなく、まさに老人が好む昔話に似て、皆様の鬢髻を買うことになりかねない。一方、これからの伝熱研究について述べることは、松江工業高等専門学校の校長職を6年間勤め、その間会議のために伝熱シンポジウムに一度も出席することができなかった私には、ふさわしいことではなからう。それで、この数ヶ月間の出来事に関連して、私の感想を書きとめることにしたい。

昨年10月15日付京都新聞朝刊の第1面トップに、「銅鐸31個が出土」と報ぜられた。その地は、鳥根県加茂町岩倉の丘陵で、宍道湖の南西端から南へ広島県三次市まで延びる国道54号線(松江と広島を結ぶ高速バスが走っている)の近くにある。その後の発掘で、銅鐸は全部で39個となり、1ヶ所から最多の出土となった。実は今から13年前にも、この地から北西123kmほど離れた斐川町神庭の荒神谷遺跡で、銅剣358本、銅鐸6個、銅矛16本が出土して、世間を驚かせたものである。これらの青銅器は、いずれも2000年ほど前のものとのことであるが、一体誰が、何処でつくったのか。誰が使い、また埋めたのか。加茂岩倉の銅鐸には、袈裟襷(けさだすき)文や流水文の文様があり、さらにシカヤトンボの絵をかいたものがあり、また鈕(ちゅう、つり手)に、鑄造後に×印を刻んだと思われるものがある。その×印に似たものが荒神谷の銅剣の根元にもあったという。文様を見ると、凝固の際の鑄型へのなじみ方などを知った相当の鑄造技術を身につけた集団が存在していたように思われる。しかし、動物の単純な線画を見ると、文様とは異質なものを感ずる。今後、いろいろ

な計測技術を用いて、銅鐸の素材の産地の特定も含めて調査研究されるにちがいない。

国道54号線をさらに南下し、長崎で原子爆弾に被災した永井隆博士の記念館のある三刀屋町を通り、掛合町で国道から離れて山に入ると、たたら製鉄で有名な吉田村に至る。2千数百年前に、鉄と青銅の金属文化といわれるものがわが国に入ってきたが、もともと中国地方や九州には砂鉄があったので、鉄づくりの下地があった。そして2000年前の西日本には既に鉄文化のもとにあったとのことである。吉田村には鉄の歴史博物館があり、その村の菅谷(すがや)の高殿(たかどの)は、たたら製鉄を今にも伝える貴重な遺構である。高殿を中心に、広く製鉄に従事する者の集落があって、これを山内(さんない)といった。現在、これも保存されている。たたらとは踏鞴(とうはい)と書き、足で踏んで空気を送るふいごのことである。粘土でつくった方形の炉に、砂鉄と木炭をまぜて入れ、たたらで空気を送って鉄をつくる、日本古来の製錬法を、たたら吹きといっている。同じ鳥根県の横田町大呂の日刀保たたらは、いまでも昔ながらの鉄の製錬を行っている。奈良東大寺の南大門の国宝金剛力士像(仁王像)は、鎌倉時代の傑作といわれる彫刻で、数千点のヒノキ材を釘とかすがいで組立てた高さ8m余の寄せ木細工でつくられている。数年前、800年ぶりの本格的解体修理にあたって、それに使われてきた釘やかすがいの材料の組織や性質を調査・分析したうえで、その結果に相当することがわかったので、日刀保たたらで製錬し、くり返し鍛錬してつくられた釘やかすがいが使用され、無事修理を終えた。今も、昔の製鉄法で得られた良質の玉鋼(たまはがね)から日本刀がつけられている。

さて、本年1月隠岐島の北方でのロシア船の破損と、それによって生じた重油の流出は、極めて悲惨な事故であった。事故発生当初、船員の救出に全力が注がれ、船長1名を除いて他の船員は全員救助されたが、重油の流出に対する対策は後手にまわって

しまった。わが国の保有する油回収船は日本海側には無く、しかもその出勤も遅れ、現地での活動が始まったのは、かなりの日数が経ってからのことであった。船上から重油をひしゃくでくみ上げて、海岸に接近するのを防ごうとするしか手段がないとは、何ということだろうか。日本海には海流があるので、海岸に到達することはなかりと予想されたが、冬の日本海は風が強く、荒れて波も高いので、その影響によって流出重油は能登半島をまわって新潟県から秋田県にも達するとともに、海岸にも打寄せることとなった。しかも、破損した船首部分は重油を流出しながら福井県三国町沖まで漂流し、そこで座礁した。その船体からの重油の抜取りも難行をきわめた。抜取りが完了したのは2月になってからである。流出重油の流れを予想するのは困難な仕事であることを、図らずも露呈した。今回の事故を教訓として、予想のための計算法が確立されるとよいが、そのために必要な、いろいろのデータが収集されているであろうか。それにしても、低温における重油の高粘度化は、テレビにうつし出されるものを見るだけでも激しいことがわかるし、波にもまれて海水と混合しているうえに、さらに砂の混ざったものなどがあるので、吸引ポンプの設計や運転管理には、混相流や非ニュートン流の取扱いが必要であろう。重油で汚染された現地で作業を続ける多くの地元の人々やボランティアの人々の除染活動には頭の下がる思いがする。重油を含む回収物質は、廃棄物として、結局燃焼し、廃棄されるに過ぎない。全く非生産的な、人々の生活に困窮をもたらしただけの、悲惨な事故であった。なお、3月になった現在も、水深2500mの海底に沈んだ船体から重油が流出し続けているのである。

ところで、この事故は、連日新聞、ラジオ、テレビで報道されているので、人々の関心が高いと思われるが、その関心は悲惨さにあって、いわゆるエネルギー問題に対する関心ではなく、マスコミもまたエネルギー問題としてのとらえ方をしていないように思われる。時あたかも、三池炭鉱の閉山のニュースが報じられたが、戦後の復興に大きな力のあった石炭が、結局石油にとって代られ、いまも海外から運搬を続けざるを得ないわが国は、内外のタンカーや備蓄基地などの万一の事故による海洋汚染などの防止対策についても、原子力発電の安全対策と同様

に、格段の配慮と高度な技術手段を具備しておかなければならないと考える。

さて、伝熱研究会が社団法人伝熱学会となり、その学会誌「伝熱研究」の内容も編集委員の皆様の努力により充実してきたのはよろこばしいことである。学会は、学問の継承と発展に資することを目的としているが、伝熱が日常生活はもちろん、広く産業のいろいろの分野にかかわりのあることがらであるので、伝熱研究の課題も多岐にわたる。しかも、伝熱の分析的・解析的研究ばかりでなく、伝熱システムの合成的・総括的研究も必要である。今後の一層の発展を望んで止まない。ところで、「伝熱研究」に研究論文が掲載されるようになった。学会になったとき、研究論文がどれほどの数になるのか心配したが、機械学会論文集などにくらべると、ずっと少ない。研究者が研究課題やその内容によって投稿先を選択しているのであろうか。あるいは、「伝熱研究」の発行部数とその普及の程度によるのであろうか。論文は国の内外で広く読まれ、評価されるべきである。

毎年、伝熱に関する二、三の論文の査読について、外国から依頼がある。今年の2月にも、アメリカから、その1997 National Heat Transfer Conference に提出の論文の査読が来た。この種の査読において一番困ることは、式中の記号（添え字を含む）が途中で変わっていたり、本文中の記号と図表の記号とが違っていたり、記号の説明がなかったり、本文の説明と図表が違っていたり、計算や実験の条件が記載してなかったり、熱伝達係数の定義が明記してなかったりなど、このような不備が多かれ少なかれ見受けられることで、著者自身が書いたのかと疑われるような、推敲していない杜撰な論文原稿には、全くうんざりする。一体、なぜこのようなことが起こるのか。論文を推敲するために査読があるのではなく、推敲された論文を提出することが本来必要なことを肝に銘ずるべきである。また、和文論文の場合に、ワープロを使うとき、漢字に変換するのが誤っていると、論文を読むのに一苦労することになり、読むことを止めてしまうことになりかねない。「伝熱研究」が、十分に推敲された、内容の高く豊富で論文と記事を掲載するとともに、伝熱学会の活動が一層活発になることを希望する。

(平成9年3月3日記)

レビュー特集号の編集にあたって

Preface to Special Issue: Review

第35期編集委員会

太田 照和 (東北大学), 片岡 勲 (京都大学)

Terukazu OTA (Tohoku University)

and Isao KATAOKA (Kyoto University)

「伝熱研究」ではこれまで各号において、伝熱学の基礎から応用までの各分野において重要な特定のテーマを選んで特集を企画し、関連する研究者、技術者の方々に研究の現状についての詳細な解説記事をご執筆戴くことにより、それぞれのテーマについて、より深く掘り下げた内容を伝熱学会会員に提供することを試みて参りました。幸い、ご執筆者の方々の献身的なご努力とご厚意により、毎回興味深く内容豊富な解説記事を掲載することができ、特集の企画は十分にその目的を達しているものと考えております。こうした企画は今後とも「伝熱研究」の重要な使命として継続されて行くことと考えております。

一方において、伝熱学の研究は近年その深化と同時に大きな広がりとして急速な進展を見せております。計測技術、数値シミュレーション技術の飛躍的発展、産業の高度化に基づくより広い分野での技術的要請等により、伝熱学の研究はこれまで以上に速い速度で進められてきており、その研究成果は質的にも量的にも極めて高い水準にあります。と同時に伝熱学に関わる研究者、技術者が1個人のレベルでこうした研究情報を収集し伝熱学の研究全般の現状を把握する事が益々困難になりつつあることも事実であります。

こうした伝熱学の研究の現状に鑑み、本号ではこれまでの特集号とは異なった切り口で、伝熱学の各分野についての研究のレビューを特集する事を企画致しました。勿論、本号で取り上げる分野は極めて広範な伝熱学の諸分野のごく一部に過ぎず、多くの重要な分野が残されていますが、近年

特に進展の著しい分野、学問的、技術的に注目されている分野のいくつかについて、第一線でご活躍の下記の先生方にレビュー記事をご執筆戴きました。

乱流熱輸送のDNSとLES

河村 洋 先生

(東京理科大学理工学部機械工学科)

強制対流伝熱促進機構

鳥居 薫 先生

(横浜国立大学工学部生産工学科)

J.I.Yanagihara 先生

(サンパウロ大学)

代替冷媒の開発と熱物性に関する最近の進展

渡部 康一 先生

(慶應義塾大学理工学部システムデザイン工学科)

沸騰熱伝達の促進と機構

藤田 恭伸 先生

(九州大学工学部機械エネルギー工学科)

複雑系における輻射伝熱

円山 重直 先生

(東北大学流体科学研究所)

ご執筆の先生方はいずれも年度末の貴重なお時間を割いて、それぞれのご専門の分野について最近の研究の進展についてご解説戴きました。これにより伝熱学会会員各位が絶え間なく進展する伝熱学の各分野の現状について把握する一助となれば幸いです。なお、強制対流伝熱促進機構につきましても、諸般の事情により次号に掲載される予定であることを申し添えます。

乱流熱伝達のDNSとLES

DNS and LES of Turbulent Convective Heat Transfer

河村 洋 (東京理科大学)

Hiroshi KAWAMURA (Science University of Tokyo)

1 はしがき

乱流は、われわれの身のまわりに広く見られる現象であるが、これを定義しようとするのが難しく、むしろその特徴を挙げて説明する方が容易である。乱流の大きな特徴を三つ挙げると、

1. 空間的に不規則 (三次元的)
2. 時間的に不規則 (非定常、非周期的)
3. 大小広範な渦の存在

とすることができる。これら三つの特徴のすべてが、乱流の数値シミュレーションを困難にしている。

上記の特徴のうち第3項は、乱流エネルギーの流れを考えるうえで、特に重要である。通常流れの運動エネルギーを平均分と変動分に分けて考えると、変動分の担う運動エネルギーを「乱流エネルギー (k)」と呼んでいる。この乱流エネルギーは、平均流からまず大きな渦に伝えられ、次に次第に小さな渦へと伝えられて最終的には熱エネルギーとして散逸される。すなわち、大きな渦ではその周りにできる速度勾配は小さいので熱エネルギーへの散逸は大きくはなく、そこで乱流エネルギーは小さな渦に伝えられて、主としてそこで熱エネルギーに変換される (図1)。

他方、マクロな輸送特性はむしろ大きな渦によって支配されるから、例えば「自分は乱流熱輸送を知りたいのだから、大きな渦のみを計算すれば十分である。」という人がいるとしても、それでは乱流エネルギーの「はけ口」が不十分なので、どうしても小さな渦までを計算しなくてはならなくなる。これが乱流のシミュレーションが莫大な計算量になる理由である。もっとも、小さな渦といっても無限に小さな渦まで存在するわけではなく、渦の大きさには下限がある。これがいわゆるコルモゴロフスケール (η) で、

$$\eta = \left(\frac{\nu^3}{\varepsilon} \right)^{\frac{1}{4}} \quad (1)$$

で与えられる。(ν : 流体の動粘性係数、 ε : 乱流エネルギーの散逸率) そのためこのスケールまで数値計算の

メッシュを細かく切れば、乱流といえども数値的にシミュレートすることができる。これが乱流の直接数値シミュレーションすなわちDNS (Direct Numerical Simulation) である。

乱流のDNSは、レイノルズ数が低くかつ流れ場の形状の単純な場合に限って可能になってきたものの、レイノルズ数が高くかつ形状も複雑な実用的な流れは取り扱うことはできない。そこで、大きな渦のみを扱い乱流エネルギーの散逸プロセスはモデル化して近似的に扱うのが、 $k-\varepsilon$ モデルに代表される乱流モデルの手法である。この中間に、メッシュをできる限り細かく切るが、それ以下のスケールの渦におけるエネルギー散逸はモデル化しようというアプローチがある。これをLES (Large Eddy Simulation) と呼んでいる (図1)。本稿は、これらのうち、DNSとLESによる乱流輸送解析の現状を展望しようとするものである。もっとも、かつてはこの種の計算も例が限られていたため、そのほとんどすべてを紹介するような記述が可能であったが、最近では数多く行われるようになったため、ここでは筆者の私見による代表例を紹介するととどまることをお許しいただきたい。

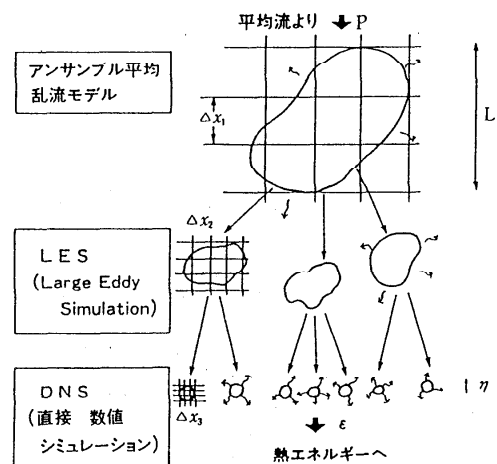


図1: 乱流エネルギーカスケードの模式図

2 DNS の設計

最初の DNS は、すでに 25 年以前の 1972 年に Orszag-Patterson^[1] によって行われた。流れ場は一様な等方性乱流で、当時の CDC6600 で約 1.5 時間を要した。彼らの論文には「従来乱流は数値的に計算するのは非常に困難とされてきたが、注意深く計算スキームを組み立てていけば、十分可能である」と述べている。

2.1 計算領域とメッシュ数

現在、もっとも広く行われている DNS の流れ場の形状は無限に広い二枚の平行平板間乱流である。(図 2)。これを、チャンネル乱流と呼び、そのレイノルズ数を、

$$Re_\tau = \frac{Du_\tau}{\nu} \quad (2)$$

と表現することが多い (u_τ : 壁面摩擦速度, D : チャンネルの半幅, ν : 動粘性係数)。通常の等価直径 $D_e (= 2D)$ と、断面内平均流速 U_b で表すレイノルズ数 Re との間には

$$Re_\tau = \frac{Du_\tau}{\nu} = \frac{\left(\frac{D_e}{2}\right) \left(U_b \sqrt{\frac{f}{2}}\right)}{\nu} = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{f}{2}} Re \quad (3)$$

の関係がある。ここに f は管摩擦係数 (例えば $f = \frac{0.079}{Re^{1/4}}$) である。現在もっとも広く行われているチャンネル乱流は $Re_\tau = 180$ の場合で、 $Re \approx 5500$ に対応する。このときのコルモゴロフスケール (η) の大きさを評価してみる。コルモゴロフスケールは、式 (1) に見るとおり、散逸 ε が大きいほど小さい。他方、 ε は壁面近くで最も大きく、

$$\varepsilon \approx \frac{0.2u_\tau^4}{\nu} \quad (4)$$

■: 可視化領域

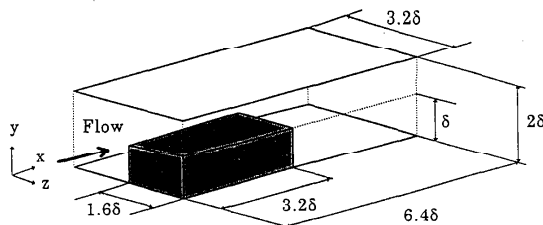


図 2: 平行平板間乱流の DNS に用いられる計算領域の例

であることが知られている。これを式 (1) に代入すると、

$$\eta = \frac{1}{0.2^{1/4}} \frac{\nu}{u_\tau} \quad (5)$$

あるいは、

$$\eta^+ = \frac{\eta u_\tau}{\nu} \approx 1.5 \quad (6)$$

であることがわかる。これは、壁面近傍には $\Delta y^+ \approx 1.0$ 程度のメッシュを配置すべきことを示しており、これは特別に小さなメッシュ幅ではない。たとえば通常の $k-\varepsilon$ モデルによる計算でも、壁面にはこの程度のメッシュを配置しないと十分良い結果は得られない。(ただし、DNS の場合には、必ず三次元かつ非定常の計算を行わねばならない点異なる。) もしこのメッシュ幅で不等間隔にチャンネル幅を切ると、 $Re_\tau = 180$ の場合、チャンネル全幅では約 360 個のメッシュが必要となる。実際には不等間隔メッシュを切るので、チャンネルの中心付近で $\Delta y^+ \approx 5 \sim 10$ として y 方向には 64 ~ 128 程度のメッシュ数を用いるのが通常である。

スパン方向の計算領域は壁面近傍のいわゆるストリーク構造を十分とらえることを主眼に定められる。一般にストリーク構造の平均的な間隔は、 z^+ で 100 ~ 150 であることが知られているから 3 ~ 4 本のストリーク構造をとらえようとする、 z^+ で約 600、すなわち $z^+/D \approx 3 \sim 6$ 程度の計算領域を確保する必要が生ずる。スパン方向には特にどこに細かな構造が現れるということはないので、これを等分割することとし、 $\Delta z^+ \approx 5 \sim 10$ で分割すると、やはりスパン方向にも 64 ~ 128 個のメッシュを必要とすることがわかる。流れ方向の領域は、ストリーク構造よりも長くとる必要がある。ストリークの長さは、 x^+ 方向に数百と見られており、これを把握するために x^+ で 1000 以上、すなわち $x^+/D \approx 5 \sim 10$ を確保する。これを $\Delta x^+ \approx 10$ 程度で分割すると、 x 方向にも 128 程度のメッシュ数を必要とする。

以上のことから十分発達した平行平板間乱流の DNS は、図 2 のような計算領域と、 x, y, z 方向に $128 \times 64 \times 128$ (64) 程度のメッシュ数で行えることがわかる。これは 50 ~ 100 万点に相当し、現在のコンピュータ技術では、ハイエンドのパソコンやワークステーションにでもメモリー規模としては収まるようになってきた。(ただし、相当の計算時間は必要とする。)

このようにして計算した平行平板間 DNS の結果から、壁面近傍の高速ストリーク及び低速ストリークを視覚化した図を図 3 に示す。視覚化領域は図 2 に示すとおり計算領域の八分の一である。図中白は圧力の低い

領域、黒は高速ストリーク、中間色は低速ストリークを示している。図示しているのは計算領域に対し、スパン方向にも流れ方向にも半分の領域である。確かに複数本のストリークが把握されていることがわかる。

次にレイノルズ数を大きくする場合を検討する。コルモゴロフスケールは式(6)のように得られる。従って、一方向のメッシュ数は Re_b に比例して増加させねばならない。他方 Re_τ と Re_b の間には式(3)の関係があるから、一方向メッシュ数は Re_b の $\frac{21}{8}$ 乗に比例する。現在 $Re_b \approx 5,500$ の DNS が 100 万点程度のメッシュ数で行われているから、三方向の総メッシュ数では、

$$N^3 \approx 10^6 \times \left(\frac{Re_b}{5500} \right)^{\frac{21}{8}} \quad (7)$$

程度のメッシュ数が必要となる。

次に乱流熱伝達の DNS を行う際のプラントル数 (Pr) の影響について考察する。プラントル数が 1 近傍の場合には、流れの乱れスケールと温度場の乱れスケールに大きな違いはないから、同じメッシュで乱流熱伝達の計算も同時にできると予測される。しかしプラントル数が大きくなると、温度場の微小スケール η_θ はより小さくなる。この関係は

$$\frac{\eta_\theta}{\eta} = Pr^{-\frac{1}{2}} \quad (8)$$

であることが知られている^[2]。したがって必要なメッシュ数は、Pr の増加に応じて、

$$N^3 \propto Pr^{\frac{3}{2}} \quad (9)$$

と増加する。例えば Pr が 1 から 5 に増加すると、各方向に約 2 倍のメッシュ数を必要とする。筆者の知る限りでは、平行平板間乱流については、筆者ら^[3]の行っ

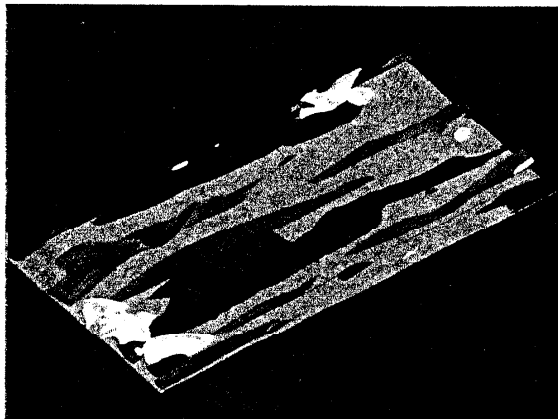


図 3: 平行平板間乱流における低速領域と高速及び低速ストリーク

た $Pr = 5$ の DNS がもっとも大きなプラントル数の計算である。

他方、低いプラントル数の例では、現在のところ、Kasagi-Otsubo^[4]による $Pr = 0.025$ がもっとも低いプラントル数である。さらにプラントル数を低下させると、上記のような問題は軽減されるが、温度場の構造が大きくなるため、より大きな計算領域を確保する必要が生ずると思われる。しかし、この点についてはさらに十分な検討が必要である。

以上の考察をもとに、平行平板間乱流熱伝達の DNS に必要な概略のメッシュ数と必要メモリ数を見積もったのが、図4である。この図からわかるように、現在までの DNS は主として Re_b が 10^4 以下 Pr が 1 程度の範囲に限られており、レイノルズ数では最高値が $Re_b \approx 2 \times 10^4$ 、プラントル数では $Pr = 5$ となっている。たとえば、 $Re_b = 10^5$ という実験では標準的なレイノルズ数の流れを考えると $N^3 = 2 \times 10^9$ 程度のメッシュ数が必要で、これは約 1TB (テラバイト) のメモリー容量に相当し、現在これを満たすコンピュータは存在しない。

2.2 スペクトル法

次に、DNS を行う上で重要なのは、むしろ数値計算の手法である。現在までのところ乱流 DNS の多くは、スペクトル法^[5]を用いて行われた。この方法では、無限に大きいとして周期境界条件を課す方向、すなわち図2では x 方向と z 方向にはフーリエ級数展開を行い、壁面に垂直方向にはチェビシヨフ級数展開を用い

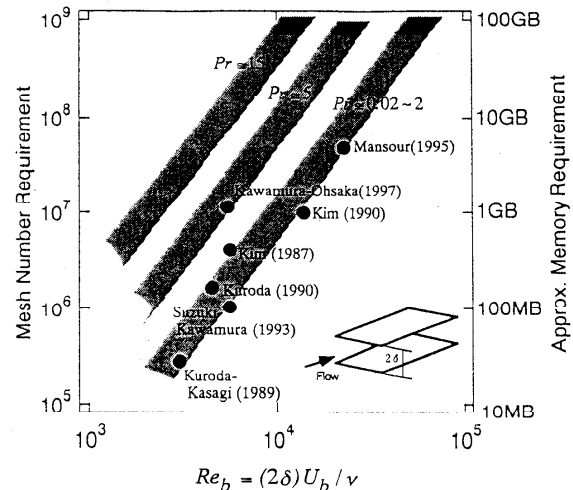


図 4: 平行平板間乱流熱伝達の DNS に必要なメッシュ数とメモリー容量 (概算値)

る。平行平板間乱流について最初に行われた Kim ら¹⁶⁾の DNS がこの方法を採用し、我が国で初めて行われた Kuroda-Kasagi¹⁷⁾もこれに従っている。フーリエスペクトル法とは、求めようとする関数 $u(x, t)$ を、

$$u(x, t) = \sum_{k=-\frac{N}{2}}^{\frac{N}{2}-1} a_k(t) e^{ikx} \quad (10)$$

として N 個のフーリエ関数の和として表し、このときの係数 $a_k(t)$ を数値的に求めることにより解 $u(x, t)$ を得ようとするものである。一般にこの方法の利点は、与えられた項数 N に対して (差分法に比して) より良い精度の得られる点にあるとされている。現にそのとおりであるが、筆者の見解では、空間微分の操作が解析的に行えるとの利点も大きい。すなわち式 (9) を x について微分すると、

$$\frac{\partial u}{\partial x} = \sum ik a_k(t) e^{ikx} \quad (11)$$

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = -\sum k^2 a_k(t) e^{ikx}$$

等となって、未知数である $a_k(t)$ に対して (ik) や $(-k^2)$ をかけることにのみよって微分操作が行え、他のフーリエモード $(k-1, k+1)$ 等とのインタラクションがない。この点、差分法では、例えば、

$$\left. \frac{\partial u}{\partial x} \right|_i = \frac{u_{i+1} - u_{i-1}}{2\Delta x} \quad (12)$$

$$\left. \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \right|_i = \frac{u_{i+1} + u_{i-1} - 2u_i}{\Delta x^2}$$

等となって、 i 点における微分が $i+1$ や $i-1$ の点の値を必要とするのと大きく異なる。スペクトル法はこのようにいくつかの大きな利点を有するが、他方非線形項 (つまり対流項) においてその周期性 (例えば、 $\theta = \alpha$ と $\alpha + 2\pi$ が同じ値を持ってしまう) のために誤差を生じてしまい、これをエーリアン (よそ者) と同じ語源の “エーリアス誤差” と呼んでいる。(正確には擬スペクトル法における誤差。) この誤差を回避するためにはいろいろな方法はあるが、通常は “よそ者” が侵入してきてもそれが無害なようにゼロにしておくという方法で対処している。そのため “よそ者” 部分に強制的にゼロを入れてより大きな領域で解く必要が生じている。もう一つのスペクトル法の難点は、簡単な形状にしか適用できないという点である。そのためこの方法が適用されているのは、平行平板間流れ、円管内流れ、正方形管間流れ等に限られている。

2.3 差分法

では、差分法では DNS は行えないのかということのようなことはなく、Schumann ら^{8), 10)}のグループでは差分法による DNS を行っており、筆者らのグループもこの方法を用いている。差分法を用いると、解析対象の形状に自由度が高い代わりに、数値精度上の問題が生ずる。これに対しては、従来は差分精度を向上させる方向の改善策がとられてきた。これはむろん有効ではあるが、高次差分式を用いるとより多くの点を参照する (例えば式 (12) で $i+1, i-1$ のみならず $i+2, i-2$ も必要となる。) 等の問題が生ずる。また、それ以外にも次のような本質的な問題もあることがわかった。それは解析的微分操作との整合性である。例えば、解析的には、

$$\frac{\partial}{\partial x} fg = f \frac{\partial g}{\partial x} + g \frac{\partial f}{\partial x} \quad (13)$$

が成立するのは当然であるが、これを差分式で置き換える際、図5のように P 点の左右に E (East) と W (West) 点を取ると、直観的には、

$$\left. \frac{\partial}{\partial x} fg \right|_P = \frac{f_E g_E - f_W g_W}{2h} \quad (14)$$

$$f \left. \frac{\partial g}{\partial x} \right|_P = f_P \frac{g_E - g_W}{2h} \quad (15)$$

$$g \left. \frac{\partial f}{\partial x} \right|_P = g_P \frac{f_E - f_W}{2h} \quad (16)$$

となる。しかしこれでは、数値的には式 (13) は成立しない。では数値微分では式 (13) は満足できないのかということ、一旦中間点 e と w で値をつくり、それを P 点に寄せ集めるようにすると式 (13) を満足できる。すなわち、

$$\begin{aligned} f \left. \frac{\partial g}{\partial x} \right|_P &= \frac{1}{2} \left\{ f \left. \frac{\partial g}{\partial x} \right|_e + f \left. \frac{\partial g}{\partial x} \right|_w \right\} \\ &= \frac{1}{2} \left\{ \frac{f_E + f_P}{2} \frac{g_E - g_P}{h} \right. \\ &\quad \left. + \frac{f_P + f_W}{2} \frac{g_P - g_W}{h} \right\} \quad (17) \end{aligned}$$

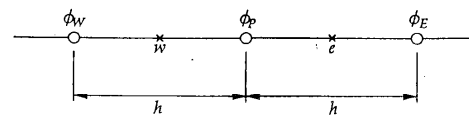


図5: 差分メッシュ

$$\begin{aligned}
 g \frac{\partial f}{\partial x} \Big|_P &= \frac{1}{2} \left\{ g \frac{\partial f}{\partial x} \Big|_e + g \frac{\partial f}{\partial x} \Big|_w \right\} \\
 &= \frac{1}{2} \left\{ \frac{gE + gP}{2} \frac{fE - fP}{h} \right. \\
 &\quad \left. + \frac{gP + gW}{2} \frac{fP - fW}{h} \right\} \quad (18)
 \end{aligned}$$

とすれば確かに

$$\text{式(14)} = \text{式(17)} + \text{式(18)}$$

が成立する。この点は、すでに Schumann^[9]によって指摘されていたものであるが、筆者らのグループ^{[10][11]}は、これを乱流の DNS に適用することにより、差分法（しかも基本的に二次精度）でも、十分良い結果を得ることができることを示した。この差分法を、解析的微分操作と整合性を有するという意味で「コンシテントスキーム」と呼んでいる。

3 乱流熱伝達の DNS

すでに述べたとおり最初に平行平板間乱流の DNS が行われたのはすでに十年前に発表された Kim ら^[6]による $Re_\tau = 180$ の DNS である。その後 $Re_\tau = 395$ が行われ、最近 $Re_\tau = 600$ の計算が行われたようである。同じ体系における乱流熱伝達の DNS も、まず Kim ら^[12]によっておこなわれた。レイノルズ数はプラントル数は $Re_\tau = 180$ 、 $Pr = 0.1, 0.71, 2$ であった。この論文には乱流統計量の詳細は発表されていないが、後に Antonia-Kim^[13]はこのデータを解析して、少なくとも $Pr = 0.1 \sim 2$ の範囲内では、乱流プラント

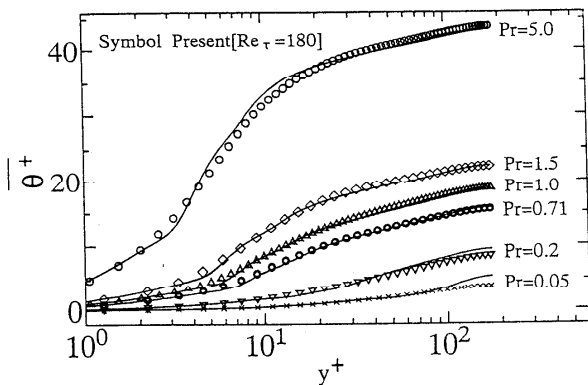


図6 各種プラントル数における平均温度

ル数 Pr_t は壁面近傍で、流体のプラントル数によらず、

$$Pr_t \approx 1.1 \quad (y^+ \rightarrow 0) \quad (19)$$

に漸近することを見いだした。乱流プラントル数は、熱伝達の実用計算では重要な量であるにも関わらず、実験的にはその値を求めるのは難しいものの、DNS によればこのように壁面漸近値もある程度精度よく得ることができる。

つづいて Lyons-Hanratty^[14]がやや低いレイノルズ数 ($Re_\tau = 150, Re_b \approx 4,500$) で $Pr = 1.0$ の DNS を行った。我が国では Kasagi らのグループがやはり $Re_\tau = 150$ について $Pr = 0.71$ ^[15] と $Pr = 0.025$ ^[4] の DNS を実施している。この中では、各種乱流統計量、例えば温度変動強度 $\overline{\theta^2}$ (θ は温度変動)、その散逸率 ϵ_θ 、乱流熱流束 $\overline{u\theta}$ 、 $\overline{v\theta}$ (u, v は x 及び y 方向速度変動) 等の分布及びその輸送方程式の各項の収支が求められた。筆者らのグループ^{[3][11]}も、差分法（コンシテントスキーム）により、 $Pr = 0.025$ から $Pr = 5$ までの広範囲について、DNS を行っている ($Re_\tau = 180$)。この中からいくつかの結果を以下に示す。まず、平均温度 ($\overline{\theta^+} = \frac{\overline{\theta}}{q/\rho c_p u_\tau}$) と y^+ の関係を図6に示す。よく知られているとおり $Pr = 0.025$ は水銀、 $Pr = 0.71$ は空

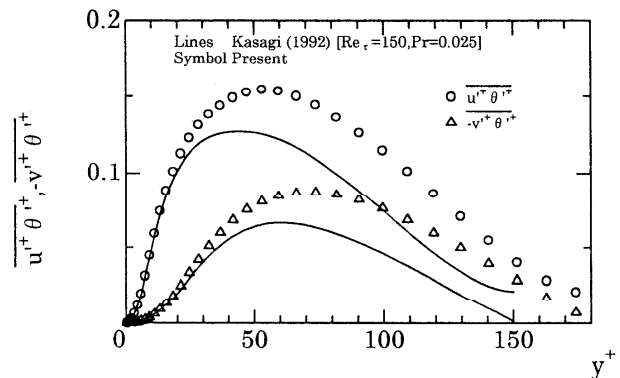
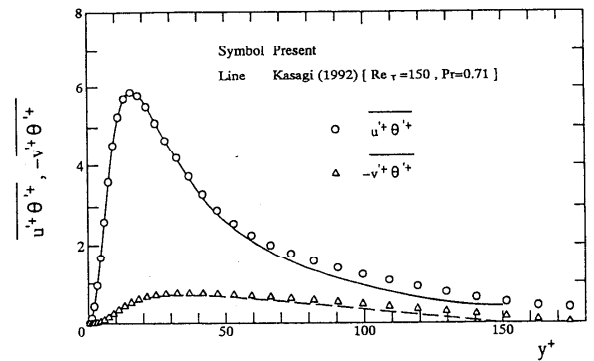


図7 乱流熱流束 (上 $Pr = 0.71$ 下 $Pr = 0.025$)

気、 $Pr = 5.0$ は水に対応する。 $Pr = 0.1 \sim 0.4$ の中間的な値については、これまで実験値もないと思われるが、実際にもネオンの混合気体等として実在するようである。壁垂直方向及び流れ方向の熱流束 ($\overline{v\theta}$ 及び $\overline{u\theta}$) を $Pr = 0.71$ と 0.025 について図7に示す。図中には Kasagi らの結果も示しているのが興味深い。すなわち、 $Pr = 0.71$ では、この程度のレイノルズ数の差ではその影響はほとんど見られないが、 $Pr = 0.025$ ではその影響が明確に現れている。

次に温度変動強度 ($k_\theta = \frac{\theta^2}{2}$) の輸送方程式の収支を示す。この収支は元来運動方程式とエネルギー式から多少の式変形を経て厳密に導出されるもので、次のように表される。

$$\frac{Dk_\theta}{Dt} = P_\theta - \varepsilon_\theta + T_\theta + D_\theta \quad (20)$$

$$P_\theta = -\overline{u_k \theta} \frac{\partial \theta}{\partial x_k} \quad \text{生成項 (21)}$$

$$\varepsilon_\theta = a \left(\frac{\partial \theta}{\partial x_k} \right)^2 \quad \text{散逸項 (22)}$$

$$T_\theta = -\frac{\partial}{\partial x_k} \overline{u_k k_\theta} \quad \text{乱流拡散項 (23)}$$

$$D_\theta = a \frac{\partial^2 k_\theta}{\partial x_k^2} \quad \text{粘性拡散項 (24)}$$

ここで、 a は流体の熱拡散係数 (m^2/s)、添え字はいわゆる総和規約に従い、一つの項の中で繰り返されているとき $1 \sim 3$ について加える。(例えば $a_k b_k = a_1 b_1 + a_2 b_2 + a_3 b_3$ の意。)

代表的な例として図8に $Pr = 5, 0.71, 0.022$ の結果を示す。これらによれば、全体的にはすべてのプラントル数において流路中央では生成項と散逸項がほぼバランスしており、いわゆる混合長モデル等の現象論的モデルの成立する基盤があることを示している。壁面近傍では分子拡散項と散逸項がバランスしており、速度変動の乱流エネルギーについての収支と全く同様の傾向を示している。

プラントル数の影響を見ると、 Pr が小さくなるにつれて生成項のピークは流路中央へと移動する。これは生成項中に現れる熱流束 ($\overline{v\theta}$) のピークが中央へと移動し、かつ平均温度 $\bar{\theta}$ の勾配も、プラントル数が低いと壁面近傍での値が小さいためである。 $Pr = 5$ と $Pr = 0.71$ では全体の傾向に大きな差はなく、これらがいわゆる通常流体の範疇に入ることがわかる。しかし詳細に見ると、 $Pr = 5$ では乱流拡散項の最大値 (実際には最小値) が、散逸項と同程度にまで大きくなっ

ているのが興味深い。

次に、乱流熱流束 $\overline{u_i \theta}$ の収支を示す。まず輸送方程式は、次のように導出される。

$$\frac{D\overline{u_i \theta}}{Dt} = P_{i\theta} - \varepsilon_{i\theta} \Pi_{i\theta} + T_{i\theta} + D_{i\theta} \quad (25)$$

$$P_{i\theta} = -\overline{u_k \theta} \frac{\partial U_i}{\partial x_k} - \overline{u_i u_k} \frac{\partial \theta}{\partial x_k} \quad \text{(生成項) (26)}$$

$$\varepsilon_{i\theta} = (a + \nu) \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_k} \right) \left(\frac{\partial \theta}{\partial x_k} \right) \quad \text{(散逸項) (27)}$$

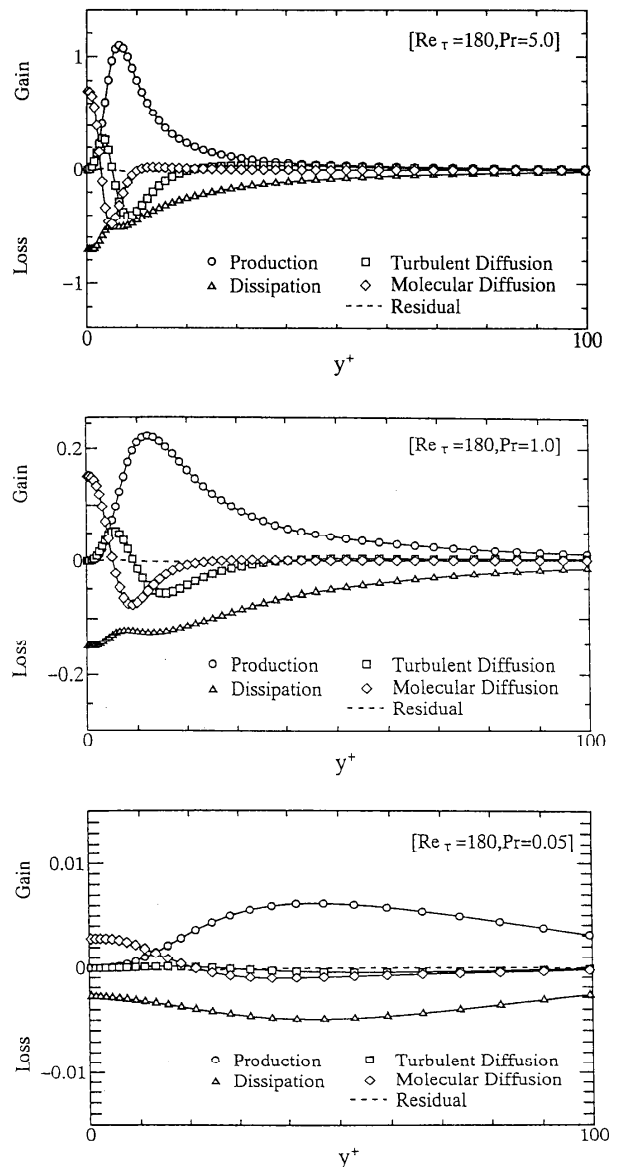


図8 温度変動強度の収支 ($Pr = 5.0, 1.0, 0.05$)

$$\Pi_{i\theta} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} \quad (\text{温度・圧力勾配項}) \quad (28)$$

$$T_{i\theta} = -\frac{\partial}{\partial x_k} (\overline{u_i u_k \theta}) \quad (\text{乱流拡散項}) \quad (29)$$

$$D_{i\theta} = \frac{\partial}{\partial x_k} \left(\overline{a u_i} \frac{\partial \theta}{\partial x_k} + \nu \theta \frac{\partial u_i}{\partial x_k} \right) \quad (\text{分子拡散項}) \quad (30)$$

この乱流熱流束の輸送方程式の収支を、 $Pr = 0.4, 0.2, 0.05$ の場合について図9に示す。以前から知

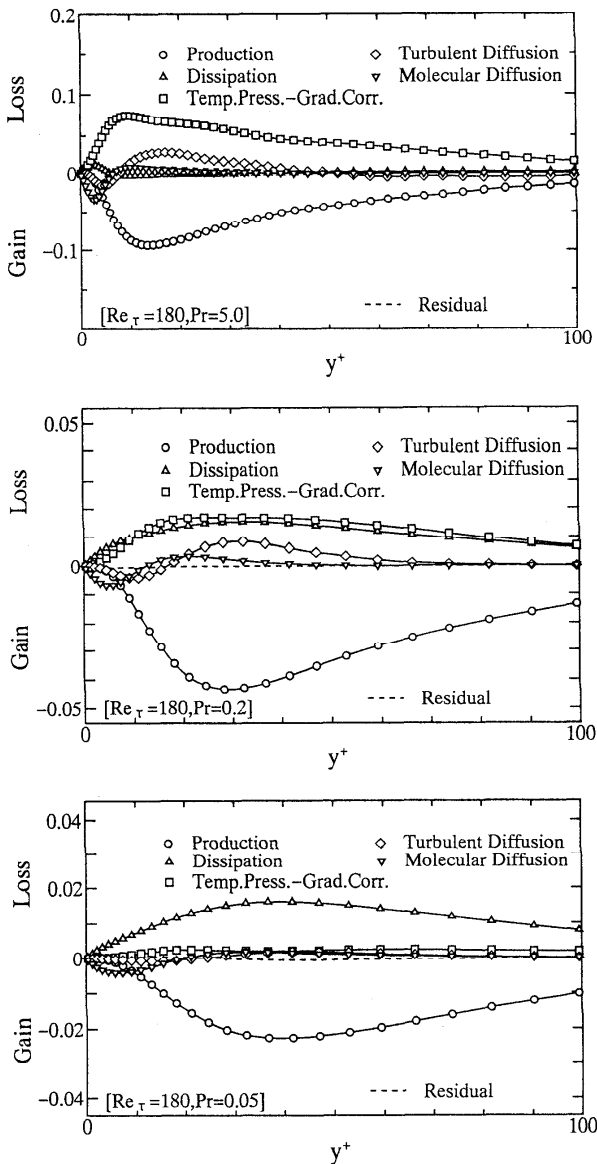


図9 乱流熱流束の収支 ($Pr = 5.0, 0.2, 0.05$)

られているとおり^[16]通常流体においては乱流熱流束の散逸の寄与は小さく、プラントル数が小さくなるにつれて大きくなる。

この傾向はKasagi^[14]のDNSにおいても $Pr = 0.71$ と 0.025 の場合を比較することにより、見いだされていた。すなわち、 $Pr = 0.71$ では生成項は温度・圧力勾配項 (TPG) とバランスし、 $Pr = 0.025$ では散逸項とバランスしていた。同様の傾向は図9の $Pr = 0.4$ と $Pr = 0.05$ にも見られる。ではどの程度のプラントル数でTPG項と散逸項が同程度になるか、すなわち通常流体と低プラントル数流体の境界はどの付近にあるかという興味があるが、図9によれば、少なくともこのレイノルズ数 ($Re_\tau = 180$) では、 $Pr = 0.2$ 付近がこの境界であることが分かる。

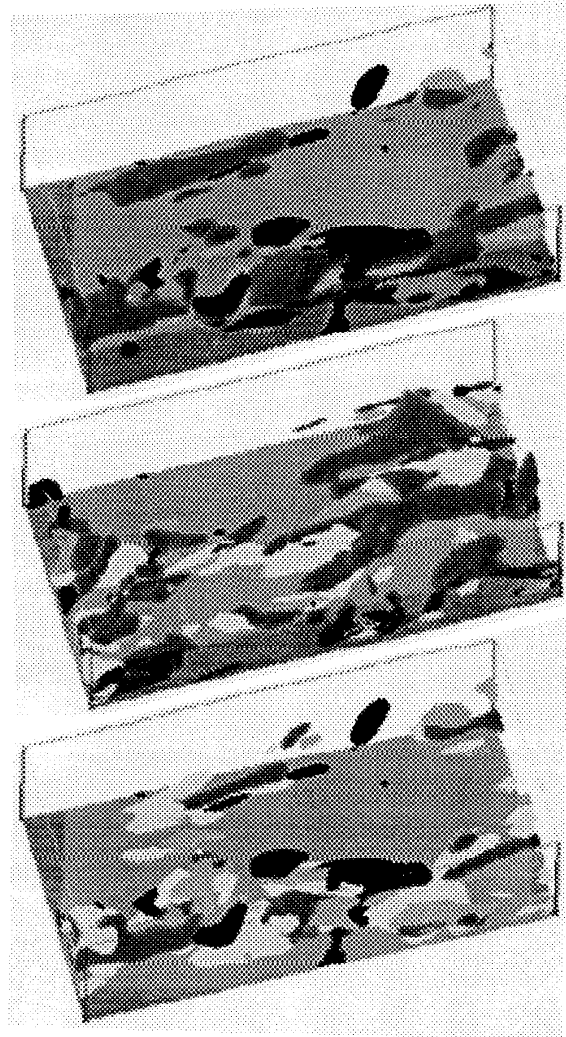


図10 乱流熱流束収支の可視化 ($Pr = 0.4, 0.2, 0.05$)

これらの場合における TGP 項と散逸項の可視化図を図 10 に示す。白から黒に向かって順に、散逸、生成、TPG、低圧領域を示す。なお $Pr = 0.4$ と 0.05 は同じ速度場に対して計算されているので、両者の分布を直接比較できるが、 $Pr = 0.2$ の場合は速度場が異なる。これによれば、 $Pr = 0.05$ の場合にはたしかに散逸項の寄与が大きくなっていることがわかる。

次に乱流プラントル数 Pr_t の分布を図 11 に示す。乱流プラントル数は実用的に重要な量であるにもかかわらず実験的に求めることが困難なため特に壁面近傍の分布については未知の点が多かった。従来、Hisida-Nagano-Tagawa^[17] の実験がよく知られており、これが Pr_t は壁面に向かって増加するとする結果を与えていたためこれに基づく整理式^[18] も提唱されていた。これに対し、従来一般には

$$Pr_t = \begin{cases} 0.9 & (\text{壁乱流}) \\ 0.6 & (\text{自由乱流}) \end{cases} \quad (31)$$

とする簡単な方法で、少なくとも通常流体に対してはよい結果の得られることが経験的に知られていた。たしかに、すでに述べたように Kim ら^[12] の DNS は壁に向かって Pr_t は一定であるとの結論を与え、これまでの経験が妥結であったことを裏付けた。また、分子プラントル数が大きくなるにつれ乱流プラントル数がどうなるかとの疑問もあったが、図 11 からは、 Pr が 0.6 程度以上では、 Pr_t にほとんど変化のないこと

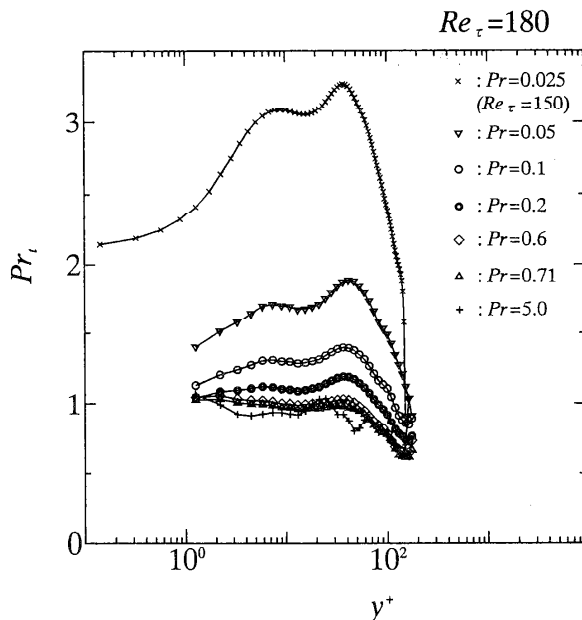


図 11 各種 Pr に対する乱流プラントル数

が分かり、これも式 (31) の経験的知見を支持するものとなっている。なお、 $Pr = 0.2$ 以下では Pr_t は次第に増加しており、やはりこの程度の Pr が低プラントル数流体の境界となることを示している点が興味深い。

このほか、笠木らのグループは、平行平板間乱流に浮力の影響が重畳した場合^{[19],[20]} や吸い込み吹き出しのある場合^[21] の計算を行った。また Groetzbach ら^[22] は薄い液体層を下から加熱するベナール対流が乱流に遷移する場合の DNS を行っている。

4 乱流熱伝達の LES

DNS は、基礎式をできる限り厳密に解こうとするもので、その手法もかなり確立されて来たのに対し、LES はモデル化を導入することにより、より小さな計算量で乱流を解析しようとするものであるから、その手法の確立には DNS よりも大きな困難を伴うとも言える。LES とは、計算格子をエネルギー保有領域を解像できる程度に分割して、計算格子の幅より小さいスケール (Subgrid Scale, SGS) の運動の影響を SGS 乱流モデルで記述し、計算格子の幅より大きいスケール (Grid Scale, GS) の運動のみを計算することによって、DNS より粗い計算格子でも乱流の数値解析を行うことを可能にする手法である。

いま乱流の速度場をある時刻で凍結させて考えると、そこには多数の山と谷が存在するであろう。DNS では、これを完全に解像できるように細かい格子を用意するものであるが、LES はこれを粗い格子で計算しようとするものであるから、いわば、小さな凹凸は無視して一種のスムージングを行うことになる。これをフィルタリングと呼んでいる。ある関数 $\phi(x)$ (簡単のためここでは一次元とする) に対してフィルタ関数 $G(\xi)$ をかける操作を施すと、フィルタリングを施された関数 $\bar{\phi}(x)$ は、

$$\bar{\phi}(x) = \int_{-\infty}^{+\infty} (G(\xi)\phi(x+\xi)) d\xi \quad (32)$$

で表される。フィルタ関数としては、
ガウシアンフィルタ

$$G(x) = \sqrt{\frac{6}{\pi\Delta^2}} \exp\left(-\frac{6x^2}{\Delta^2}\right) \quad (33)$$

トップハットフィルタ

$$G(x) = \begin{cases} \frac{1}{\Delta} & (|x| \leq \frac{\Delta}{2}) \\ 0 & (|x| > \frac{\Delta}{2}) \end{cases} \quad (34)$$

がしばしば用いられる。

連続の式と運動方程式及びエネルギー式にフィルタリングを行うと

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0 \quad (35)$$

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial^2 \bar{u}_i}{\partial x_j^2} - \frac{\partial}{\partial x_j} \tau_{ij} \quad (36)$$

$$\frac{\partial \bar{\theta}}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial \bar{\theta}}{\partial x_j} = -\frac{\partial h_j}{\partial x_j} + a \frac{\partial^2 \bar{\theta}}{\partial x_j^2} \quad (37)$$

が得られる。ここで τ_{ij} と h_j はフィルタリングによって現れたサブグリッドスケール(SGS)レイノルズ応力や乱流熱流束で

$$\tau_{ij} = \bar{u}_i \bar{u}_j - \bar{u}_i \bar{u}_j \quad (38)$$

$$h_j = \bar{u}_j \bar{\theta} - \bar{u}_j \bar{\theta} \quad (39)$$

である。

通常のスモグリンスキーモデルでは、渦粘性型のSGS動粘性係数 ν_{SGS} と熱拡散係数 a_{SGS} を導入することにより、以下のようにモデル化を行う。

$$\tau_{ij} - \frac{1}{3} \delta_{ij} \tau_{kk} = -\nu_{SGS} 2\bar{S}_{ij} \quad (40)$$

$$h_j = -a_{SGS} \frac{\partial \bar{\theta}}{\partial x_j} \quad (41)$$

ここで

$$\nu_{SGS} = (C_S f \Delta)^2 |\bar{S}| \quad (42)$$

$$\bar{S}_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \quad (43)$$

$$\bar{S} = (2\bar{S}_{ij}\bar{S}_{ij})^{\frac{1}{2}} \quad (44)$$

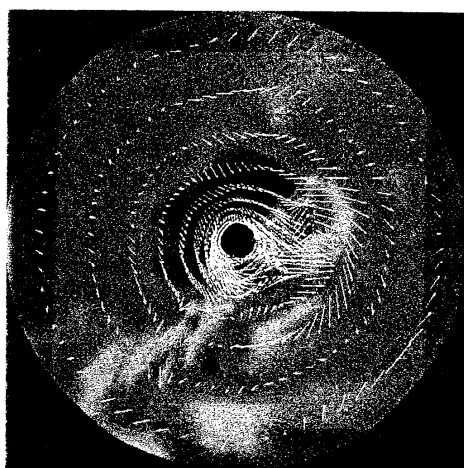


図12 内管周りの速度場と温度場

で与えられる。式(42)中の C_S は唯一のモデル定数であり一般にスモグリンスキー定数と呼ばれる。この定数は、それぞれの流れ場に応じて最適化する必要がある、チャンネル乱流では通常0.1を用いる。

また、壁ですべり無し条件を課す場合、壁面上で $\tau_{ij} = 0$ すなわち $\nu_{SGS} = 0$ でなければならない。しかし、平均流に強い速度勾配がある場合 S_{ij} はこれを満足しない。したがって、通常は、van Driest型の減衰関数 $f = 1 - \exp(-\frac{y^+}{25})$ をフィルタ幅 Δ に乗じて修正を行う。この減衰関数は経験的なものであり、壁からの無次元距離 y^+ だけ離れたところで一様な減衰を与えるため、乱れの局所性を反映できない欠点がある。SGS乱流モデルに関する最近の研究はこのスモグリンスキーモデルを改良する傾向にある。

式(41)中の a_{SGS} は、一種の乱流プラントル数 Pr_{SGS} を用いて

$$a_{SGS} = \frac{\nu_{SGS}}{Pr_{SGS}} \quad (45)$$

と近似する。 Pr_{SGS} は壁乱流では0.8~0.9程度の値にとられることが多い。

筆者らのグループ^[23]は、二重円管内の乱流に対して、スモグリンスキーモデルを適応し速度分布、温度分布、熱伝達率等を得た。図12は、細い内管まわりの速度ベクトルと変動温度場を視覚化したものである。内管を加熱しているので、内管から流出する方向の領域に高温部(白)内管に向かう部分に低温部(黒)が見られる。図13には、内管上の熱伝達率と内外径比の関係を示す。 C_{NU} は $\frac{Nu}{Re^{0.8} Pr^{0.4}}$ で通常は $C_{NU} = 0.021 \sim 0.023$ になる量である。このLESの結果は従来の実験結果や整理式(実線)とよく一致しており、内外径比が0.02という極細内管のLESも、おそらく妥当な値を与えられていると思われる。

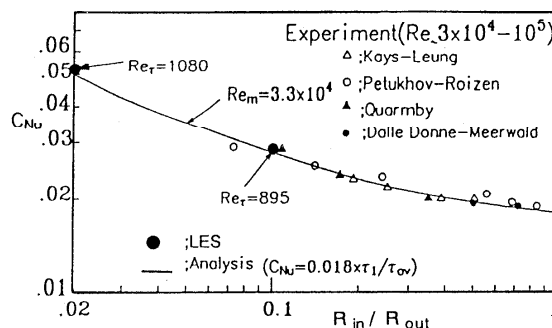


図13 内管上の熱伝達率

以上のスマゴリンスキーモデルは簡単なモデルであるために広く用いられてきたが、壁近傍に減衰関数を導入することや、層流から乱流への遷移を再現できないため等の難点があることが知られてきた。そこで Germano ら^[24]は、大きさの異なる二種のフィルタを用いることにより、定数 C を仮定することなく (Dynamic に) 定め得る手法を提唱した。まず式 (36) にさらに大きなフィルタ (テストフィルタ) を施すと、以下の式が得られる。

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial t} + \frac{1}{Re\tau} \frac{\partial^2 \bar{u}_i}{\partial x_j^2} - \frac{\partial}{\partial x_j} T_{ij} \quad (46)$$

式 (36) と式 (46) の異なる空間フィルタにおいてその相似性に着目し、渦粘性による近似を施す。スマゴリンスキーモデルを用いて、

$$\bar{\tau}_{ij} = -2C\bar{\Delta}^2 |\bar{S}| \bar{S}_{ij} \quad (47)$$

$$= \widetilde{\bar{u}_i \bar{u}_j} - \bar{u}_i \bar{u}_j \quad (48)$$

$$T_{ij} = -2C\bar{\Delta}^2 |\bar{S}| \bar{S}_{ij} \quad (49)$$

$$= \widetilde{\bar{u}_i \bar{u}_j} - \bar{u}_i \bar{u}_j \quad (50)$$

ここで、

$$\begin{aligned} \mathcal{L}_{ij} &= T_{ij} - \bar{\tau}_{ij} \\ &= (\widetilde{\bar{u}_i \bar{u}_j} - \bar{u}_i \bar{u}_j) - (\widetilde{\bar{u}_i \bar{u}_j} - \bar{u}_i \bar{u}_j) \\ &= -(\widetilde{\bar{u}_i \bar{u}_j} - \bar{u}_i \bar{u}_j) \end{aligned} \quad (51)$$

に注目するとこの右辺に得られた \bar{u}_i にさらにテストフィルタを施すことにより実際に求め得る量であることがわかる。他方、式 (47)、(49) より

$$\mathcal{L}_{ij} = -2C[\bar{\Delta}^2 |\bar{S}| \bar{S}_{ij} - \bar{\Delta}^2 |\bar{S}| \bar{S}_{ij}] \quad (52)$$

の関係があり、

$$M_{ij} = -2\bar{\Delta}^2 |\bar{S}| \bar{S}_{ij} - \bar{\Delta}^2 |\bar{S}| \bar{S}_{ij} \quad (53)$$

とすると

$$C = -\frac{\mathcal{L}_{ij}}{2M_{ij}} \quad (54)$$

として C の値を (Dynamic に) 求めることができる。ところが、式 (52) はテンソル式であるので、 C の値は唯一には定まらない。そこで Lilly は^[25]、式 (52) の残差すなわち

$$Q_{ij} = \mathcal{L}_{ij} + 2CM_{ij} \quad (55)$$

が最小になるように最小自乗法を用いることにより、 $\frac{\partial Q_{ij}^2}{\partial C} = 0$ から

$$C = -\frac{\mathcal{L}_{ij} M_{ij}}{2M_{ij} M_{ij}} \quad (56)$$

とする方法を提唱した。

エネルギー式についても式 (37) にテストフィルタを施すと

$$\frac{\partial \bar{\theta}}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial \bar{\theta}}{\partial x_j} = -\frac{\partial H_j}{\partial x} + a \frac{\partial^2 \bar{\theta}}{\partial x_j^2} \quad (57)$$

となる。ここで

$$H_j = \widetilde{\bar{u}_j \bar{\theta}} - \bar{u}_j \bar{\theta}_j \quad (58)$$

であり、上記と同様にスマゴリンスキーモデルに基づいて

$$H_j = -\frac{C\bar{\Delta}^2}{Pr_{SGS}} |\bar{S}| \frac{\partial \bar{\theta}}{\partial x_j} \quad (59)$$

とすると

$$P_j = H_j - \bar{h}_j \quad (60)$$

$$= -(\widetilde{\bar{u}_j \bar{\theta}_j} - \bar{u}_j \bar{\theta}_j) \quad (61)$$

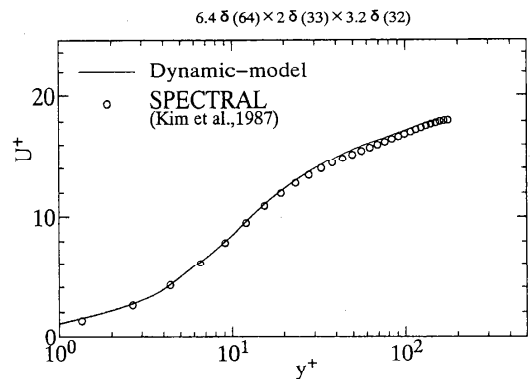


図 14 平行平板間乱流の平均速度分布

$$P_j = -\frac{C}{Pr_{SGS}} N_j \quad (62)$$

$$N_j = \tilde{\Delta}^2 |\tilde{S}| \frac{\partial \tilde{\theta}}{\partial x_j} - \bar{\Delta}^2 |S| \frac{\partial \theta}{\partial x_j} \quad (63)$$

より、同様に最小自乗法により

$$\frac{1}{Pr_{SGS}} = \frac{1}{C} \frac{P_j N_j}{N_j N_j} \quad (64)$$

を得る。

このようにして求められたCを用いて図2と同じ平行平板間乱流をメッシュ数の64×32×32で解いた場合の速度分布を図14に示す。DNSよりも各方向に半分ずつのメッシュ数、すなわち三方向では約8分の1のメッシュ数であるにもかかわらずDNSとほぼ良く一致した値を与えていることがわかる。

またこの時の定数Cの値を、スマゴリンスキーモデルにvan Driest減衰関数をかけた場合と比較すると、図15のようになり、Dynamicモデルでは、特別に減衰関数を導入しなくとも、壁近傍の減衰を表現し得ることもわかる。他方、Dynamicモデルでは定数Cが負の値をとることもある。これは、乱流エネルギーが小さな渦からより大きな渦へと伝えられる”逆カスケード”を表現するもので重要な特性とは考えられているが、計算上は不安定性の原因となるので、均一な方向に平均をとるなどのアドホックな手法も広く用いられている(図もこの手法による)。このようにDynamicモデルは有望な手法であるものの、今後の改善も期待される段階にあるといえる。

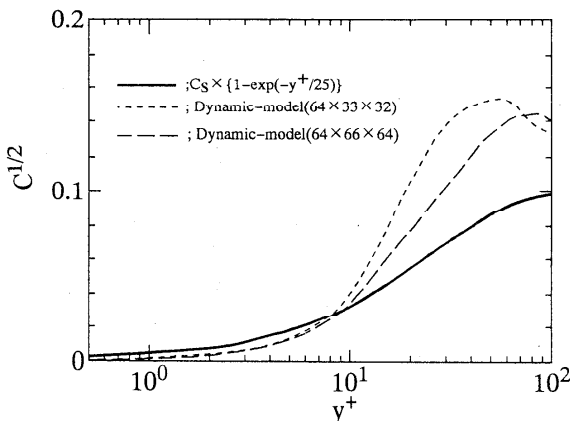


図15 Dynamic modelにおける定数Cの分布

5 あとがき

以上、乱流熱伝達のDNSとLESについて概観してきた。もっとも筆者の力が及ばない固気あるいは気液のような二相流及び燃焼を伴う場合については言及することができなかった。まずDNSについては、計算手法は少なくとも単相流については確立しつつあり、今後コンピュータの発展とともにより高いレイノルズ数や二相流、燃焼流等の新しいDNSが、ハイエンドのコンピュータによって次第に可能になると期待される。他方、身近なワークステーションやパソコンによっても小規模なDNSはさらに容易に行えるようになるであろう。LESについては、計算量はDNSより小さいものの、レイノルズ数の大きな流れや流れ方向に発達する流れを計算するには、現在の計算機の能力も十分とは言えない。またサブグリッドスケールのモデリングや数値手法には、まだまだ発展の余地が大きい。現在、新たな視点に基づいたモデルの提唱が続いており、モデル研究の面でも大きな寄与が望まれる分野でもある。

伝熱は元来、相変化、燃焼、等を含む複雑な仮定である。むろん、これまでのDESやLESが乱流伝熱の基礎的な理解に寄与した面は大きいですが、現在まで行われているDNSやLESは、いわば解ける問題を解いている段階ともいえる。今後は、DNSも次第に複雑な乱流現象を扱えるようになり、乱流伝熱の基礎的な理解にさらに寄与することが期待される。他方LESでは、実際に解くことが望まれている問題への適用が試みられるようになろう。これまで行われてきたことはまだまだ入口であり、今後期待される進歩の方がずっと大きいといえる。

参考文献

- [1] Orszag, S. A. and Patterson, "Numerical simulation of three-dimensional homogeneous isotropic turbulence," Phys. Rev. Lett., 28, pp.76-79. G. S., (1972)
- [2] Tannekes, H. and Lumley, J.L., "A first course in turbulence," MIT Press, p.96., (1972)
- [3] 大坂, 河村, "低から中プラントル数流体の平行平板間乱流熱伝達のDNS" 第34回日本伝熱シンポジウム(1997)

- [4] Kasagi, N. and Ohtsubo, Y., "Direct numerical simulation of low Prandtl number thermal field in a turbulent channel flow," *Turbulent Shear Flow 8*, Springer, pp.97-119., (1992)
- [5] Canuto et al., *Special Methods in Fluid Dynamics*, Springer, (1987)
- [6] Kim, J., Moin, P. and Moser, R., "Turbulence statistics in fully developed channel flow at low Reynolds number," *J. Fluid Mech.*, Vol.177, pp.133-166., (1987)
- [7] Kuroda, A., et al., "Direct numerical simulation of turbulent plane Couette-Poiseuille flows," *Proc. 9th Symp. Turbulent Shear Flows, Kyoto*, 1, 8.4.1-8.4.6, (1993)
- [8] Gerz, T., Schumann, U. Elghobashi, S.E., "Direct numerical simulation of stratified homogeneous turbulent shear flows," *J. Fluid Mech.*, Vol.200, pp.563-594., (1989)
- [9] Schumann, U., "Subgrid scale model for finite difference simulation of turbulent channel flows in plane channels and annuli," *J. Comput. Phys.* Vol.18, pp.376-404., (1975)
- [10] 鈴木, 河村, "乱流の直接数値シミュレーションにおける差分式の整合性," *日本機械学会論文集*, 60巻, 578号, B編, pp.3280-3286(1994)
- [11] Kawamura, H. Kondoh, Y. "Application of consistent finite difference to DNS of turbulent heat transfer in channel flow," *Proceeding of the 3rd KSME-JSME Thermal Engineering Conference*, pp.20-23, (1996)
- [12] Kim, J. and Moin, P., "Transport of passive scalars in a turbulent channel flow," *Turbulent Shear Flow 6*, Springer, pp.85-96. (1989)
- [13] Antonia R. A., Kim, J., "Turbulent Prandtl number in the near-wall region of a turbulent channel flow," *Int. J. Heat Mass Transf.*, Vol.34, pp.1905-1908, (1994)
- [14] Lyons, S. L., et.al., "Direct numerical simulation of passive heat transfer in a turbulent channel flow," *Int. J. Heat Mass Transfer*, 34, pp.1149-1161., (1991)
- [15] Kasagi, N., et.al., "Direct numerical simulation of passive scalar field in a turbulent channel flow," *J. Heat Transfer*, Vol.114, pp.598-606., (1992)
- [16] Launder, B. E., "Heat and mass transfer," *Turbulence* (ed. P.Bradshaw), Springer, pp.231-287., (1976)
- [17] Hishida, M., Nagano, Y., Tagawa, M., "Transport process of heat and momentum in the wall region of a turbulent pipe flow," *Heat Transfer 1986*, pp.925-930, (1986)
- [18] Kays, M. W., "Turbulent Prandtl number, where are we?," *J. of Heat Transfer*, Vol 116, pp.123-176, (1994)
- [19] 飯田, 笠木, "不安定密度成層乱流におけるプラントル数の効果," 第32回日本伝熱シンポジウム講演会論文集, pp.641-642, (1995)
- [20] 西村, 笠木, "鉛直チャンネル内共存対流乱流の直接数値計算による解明," 第32回日本伝熱シンポジウム講演論文集, pp.643-644, (1995)
- [21] Sumitani, Y., Kasagi, N., "A Direct Numerical Simulation of Turbulent Channel Flow with Injection and Suction," *AIAA 93-3101, 24th Fluid Dynamics Conference*, (1993)
- [22] Woerner, M., Groetzbach, G., "Turbulent heat flux balance for natural convection in air and sodium analysed by direct numerical simulations," *5th international symposium on refined flow modelling and turbulence measurements*, Paris, France, September, (1993)
- [23] 河村ら, "二重円管内乱流熱伝達の LES よる解析," *Thermal Sci. Eng.* Vol. 2, No.2, pp.16-25 (1994)
- [24] Germano, M., et.al., "A dynamic subgrid-scale eddy viscosity model," *Phys. Fluid.* A3 7, pp.1760-1765, (1991)
- [25] Lilly, D.K., "A proposed modification of the Germano subgrid-scale closure method," *Phys. Fluid.* A4, pp.633-635., (1992)

代替冷媒の開発と熱物性研究に関する最近の進展

特集

Recent Progress in Development of Alternative Refrigerants
and Thermophysical Properties Research

渡部 康一 (慶應義塾大学理工学部システムデザイン工学科)

Koichi WATANABE (Department of System Design Engineering,
Faculty of Science and Technology, Keio University)

1. はじめに

クロロフルオロカーボン (chlorofluorocarbon; 以下CFCと略記する) などに代表されるハロゲン化炭化水素による成層圏オゾン層の破壊が初めて指摘されて⁽¹⁾から既に4半世紀が経過しようとしている。特に、1980年代に入って、全地球規模での環境問題の深刻化とそれらの解決にむけての国際協調・協力の重要性が次第に広く認識されるようになり、成層圏オゾン層を破壊する可能性のある物質の生産・消費を抑止・規制するための国際的合意が、いわゆるモントリオール議定書として締結されたのが1987年であったから、ちょうど今年と同議定書締結から10年目の節目の年にあたることになる。

この間、国連環境計画 (UNEP: United Nations Environmental Program) やモントリオール議定書締結国会議などでの討議・合意形成により、当該化合物に関する国際規制はさらに加速され、CFCに代わるハイドロクロロフルオロカーボン (hydrochlorofluorocarbon; HCFCと略記する) 系化合物の全廃スケジュールも確定し、昨今では、このHCFCに代わるべき、塩素原子を全く含まないハイドロフルオロカーボン (hydrofluorocarbon; HFCと略記する) 系化合物が、いわゆる代替冷媒の中核として考えられている。

本稿では、冷凍・空調分野にあって、およそ60数年間にわたり人類の快適な生活環境水準 (アメニティー性) の向上や冷熱エネルギーの有効利用技術の開発に欠くことができなかったCFCやHCFCに代わる代替冷媒としてのHFC系冷媒の熱物性研究の現状を中心に、その周辺分野の技術開発の動向などについても触れてみたい。

2. 国際規制の現状と今後

既述したCFCの生産が先進工業国にあっては1995年末日をもって全廃されたのに続いて、HCFCにつ

いてもその使用量が1996年以来いわゆる総量規制の対象となっている。すなわち、1995年12月に開催されたモントリオール議定書第7回締約国会議での合意として、先進国にあってはHCFCの消費量を[(生産量) + (輸入量) - (輸出量)]と定義し、その全廃時期を2020年とし、2004年には1989年時点の消費量の65%以下、2010年には同35%以下、さらに2015年には同10%以下にそれぞれ削減することになっている。一方、発展途上国でのCFC、HCFCの全廃時期も2010年、2040年と約束されている。

このような国際的な合意形成には、UNEPにおける技術・経済アセスメントパネル (TEAP) とその下部組織としての図1に示した7つの専門委員会 (TOC: Technical Option Committee) における各国専門家による様々な視点からの討論・意見調整が重要な役割を演じている。本稿で注目する冷凍・空調・

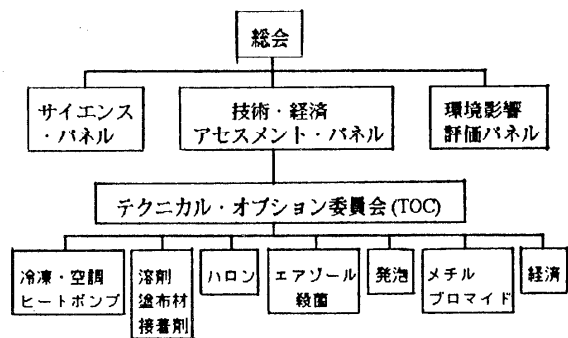


図1 UNEPにおける技術・経済アセスメント・パネル(TEAP)の構成

ヒートポンプ分野を扱うTOCでは、これまでに1990年と1994年に公式報告書を公表してきており、モントリオール議定書の改訂作業に大きな寄与をしてきた。現在、1998年秋の第3次報告書の作成にむけての準備が開始されており、これまでの第1次、第2次報告書の内容とは大きく異なる視座にたった意見

調整が進められている。具体的には、これまでの主要課題がオゾン層保護とそのためのものであり、代替冷媒、代替技術、特に先進国での実用化やCFCに代わるHCFC関連の技術的見通しなどであったのに対して、地球温暖化現象への影響度に関する評価、途上国におけるCFC全廃時期と先進国におけるHCFC全廃時期の繰り上げなどが主要課題となっている。

特に地球温暖化抑制への関心は各国で次第に強いものとなっており、二酸化炭素などに代表される温室効果ガスの排出抑制のための国際的な合意形成が国連気候変動枠組条約 (Framework Convention of the United Nations on Climate Change: UNFCCC と略称される) の下で急がれており、この枠組条約の第3回締約国会議(COP 3)が今年の12月に京都で開催されることをご承知の通りである。中・長期的に見て、既述したようにHCFCに代わるべき代替冷媒としてHFCが最有力視されているものの、これらの

化合物も塩素原子を含みぬためにオゾン破壊係数 (Ozone Depletion Potential: ODPと略称する) はゼロではあっても、地球温暖化係数 (Global Warming Potential: GWPと略称する) は表1に示すようにゼロではない。このため、ODPがゼロで、GWPもほとんどゼロに近い炭化水素 (HC: プロパンやブタンなど) をはじめ、二酸化炭素、空気あるいはアンモニアなども含めて自然冷媒 (natural refrigerant) と総称される物質群を冷凍・空調分野の技術開発に適用する動きが北欧やドイツに代表される欧州各国で近年著しく顕在化している。このような気運は、地球温暖化問題をはじめとする様々な環境問題に関する政治、行政、経済面での対応策とも密接に関連しており、技術面では一部の自然冷媒に固有の可燃性あるいは毒性といった欠点をどのように克服するかが大きな課題と考えられている。

なお、HFC系冷媒、特にそれらの混合冷媒が

表1 主要なCFC, HCFC, HFC, HFC混合冷媒, HC (炭化水素) および NH₃ の環境負荷特性と安全性

	ASHRAE Designation ¹⁾	Components	Composition (wt%)	Atmospheric Lifetime (yr)	ODP ²⁾	GWP ³⁾	Toxicity ⁴⁾ (ppm)	Safety Group ⁵⁾ Classification
CFC	R-11	R-22/115	48.8/51.2	50	1.0	4000	1000	A1
	R-12			102	1.0	8500	1000	A1
	R-502			-	0.334	5600	1000	A1
HCFC	R-123	-	-	1.4	0.02	93	10~30	B1
	R-22	-	-	13.3	0.055	1700	1000	A1
HFC	R-23	-	-	264	0	11700	1000	A1
	R-32	-	-	5.6	0	650	1000	A2
	R-125	-	-	32.6	0	2800	1000	A1
	R-134a	-	-	14.6	0	1300	1000	A1
HFC Blends	R-143a	-	-	48.3	0	3800	1000	A2
	R-404A	R-125/143a/134a	44/52/4	-	0	3300	1000	A1/A1
	R-407A	R-32/125/134a	20/40/40	-	0	1800	1000	A1/A1
	R-407C	R-32/125/134a	23/25/52	-	0	1500	1000	A1/A1
HFC Blends	R-410A	R-32/125	50/50	-	0	1700	1000	A1/A1
	R-507A	R-125/143a	50/50	-	0	3300	1000	A1/A1
	R-508A	R-23/116	39/61	-	0	10200	1000	A1/A1
	R-508B	R-23/116	46/54	-	0	10400	1000	A1/A1
HC	R-290	(propane)	-	months	0	<3	1000	A3
	R-600a	(isobutane)	-	weeks	0	<3	1000	A3
NH ₃	R-717	-	-	14	0	<1	25	B2

1) 米国冷凍空調学会 (ASHRAE) 作成のANSI/ASHRAE規格34-1992による表記法

2) R-11に対するODPを1.0と約束した相対値

3) 積分時間限界 (ITH: Integrated Time Horizon) を100年とした場合のGWPで、CO₂に対するGWPを1.0と約束した相対値

4) 通常の作業環境条件下での毒性に関する許容下限値

5) ASHRAE規格34-1992による安全性グループ分類で右表のように分類されている。なお、HFC混合冷媒の () の後の分類は成分分留があった場合の最も厳しい条件下での分類を意味する

Higher Flammability	A3	B3
Lower Flammability	A2	B2
No Flame Propagation	A1	B1
	Lower Toxicity	Higher Toxicity

HCFC系冷媒の代替冷媒として最有力視されていることと、HCFCの全廃が2020年に予定されていることは既述したが、このHCFC全廃の国際規制スケジュールも冷凍・空調・ヒートポンプTOCにおける予備的討議から見るかぎり、かなり繰り上げられるものと予測されており、一部には2005年あるいは2010年に前倒しになる可能性を指摘する予想すら存在するのが実情である。

3. HFC系混合冷媒とその熱力学的特徴

冷凍・空調分野における代替冷媒の開発目標の主眼は、全廃を目前に控えたHCFC系冷媒の使用量が最も大きな機器用の代替冷媒におかれてきた。すなわち、現在R-22がほぼ全面的に用いられている空調・ヒートポンプ機器（ルームエアコンやパッケージ・エアコン）は、全世界の年間生産台数も約2700万台と極めて大きな市場であり、特にここ数年来中国や東南アジア各国での需要の急増、生産台数の顕著な増加と併せてインドも含むこれらの国々での膨大な人口や急激な経済成長を考慮した場合の潜在的マーケットの大きさなどを考えて、日本や米国の関連業界ではR-22に代わるべき代替冷媒の開発と関連する技術開発が最大の関心事であったと言える。また、市場規模ではこれより小さいものの、業務用低温冷凍機器などに用いられてきた共沸混合冷媒R-502 [R-22/115(48.8/51.2 wt%)]の成分物質であるR-115はCFCであることもあって、このR-502に代わるべき代替冷媒の開発も急務とされてきた。このような背景の下で、米国空調冷凍工業会(ARI: Air-Conditioning and Refrigeration Institute)では1992年より代替冷媒評価プログラム(略称 AREP)を発足させ、1993年からはわが国の日本冷凍空調工業会

(JRAIA)でも同趣旨の評価プログラム (JAREP)を機器製造企業13社が中核となり、冷媒製造企業5社ならびに潤滑油製造企業7社をオブザーバーとして共同研究開発が進められてきた。また、日・米両国の工業会を中心にカナダと欧州の関連企業も参加して、当該分野の国際協力がいわゆるコンソーシアムの形態で3年間にわたって実施されてきた。

これらの国際協力事業を通じて、R-22やR-502の代替冷媒の体系的な探索・開発が実施されてきたが、そのための主要な評価項目は極めて多岐にわたり、1) 環境負荷、2) 毒性、3) 熱的安定性、4) 燃焼性・安全性、5) 電気絶縁性、6) 熱力学性質を中心とする熱物性、7) 潤滑油や機器構成材料との適合性、8) 実用性、9) 経済性など様々な観点に立脚したものとなっている。

有機流体の分子設計の立場では、大気化学などの分野の知見から、CFC分子中の塩素原子数を減らし、水素原子を加えることで、HCFCの大気中での分解は大半が対流圏内でおこり、残存する一部の影響により成層圏オゾンを破壊することが知られている。さらに、塩素原子を含有しないHFCではODPはゼロではあるものの、水素原子の存在により大気中での水酸基との反応性が向上し、成層圏内での分解に至る寿命は短縮されるものの、全般的な大気中の寿命は表1にも見られるようにHCFCより一般的には長寿命となり、GWP値の面でも温暖化への影響は無視できない。

また、塩素原子を含有しないために、潤滑油との相溶性や潤滑性能が減少する欠点がHFCには現れる一方、不燃性であったCFCとは大きく異なり可燃性を示す物質もR-32, R-143a, R-152aのように含まれてくる。一般に、分子中のC(炭素)-F(フッ素)結合は結合エネルギーも大きく、化学的安定性はフ

表2 HFCの基本的熱力学性質

ASHRAE Designation	Chemical Formula	Molar Mass	Normal Boiling Point (K)	Critical Temperature (K)	Critical Pressure (MPa)	Critical Density (kg/m ³)
R-23	CHF ₃	70.014	191.00	299.00	4.815	529
R-32	CH ₂ F ₂	52.024	221.50	351.255	5.780	424
R-125	CHF ₂ CF ₃	120.022	224.66	339.165	3.616	568
R-134a	CH ₂ CH ₂ F	102.031	247.07	374.110	4.052	511
R-143a	CF ₃ CH ₃	84.041	225.92	345.860	3.764	434
R-152a	CHF ₂ CH ₃	66.051	249.10	386.41	4.512	368
R-22	CHClF ₂	86.468	232.33	370.30	4.988	513
R-502		111.63	227.84	355.37	4.065	567

フッ素原子数の増加とともに増し、毒性も低下するが、大気中の寿命は永くなる。一方、水素原子数の増加により、可燃性は当然増大する（一般的に、水素原子数/フッ素原子数 ≥ 1 の分子では可燃性が現れる）ので、環境負荷の低減と使用上の安全性とは相反する結果を与えることになる。

さらに、冷凍サイクルに関する熱力学的考察や重要な熱物性面では、代替冷媒の選定上冷凍能力と成績係数(COP)などの評価が重要な役割を演じる。具体的には、R-22やR-502の代替冷媒として、表2に示したHFCを単一組成の純粋冷媒のまま用いることは総合的に不可能と判断されており、両者の代替冷媒としてはR-32、R-125、R-134aおよびR-143aの4物質を成分物質とする2成分、3成分あるいは4成分系混合冷媒が候補物質となりうるものと考えられている。表2に併記したR-22と基本的熱力学性質が近

いR-32を主成分とし、その欠点である可燃性を不燃性であるR-125やR-134aを成分物質として加えることで、2成分あるいは3成分系混合冷媒とすればこの欠点は克服できる。しかしながら、図2に示したように成績係数の向上のためには、R-134aやR-32の組成比率を増加させることが効果的であり、冷凍能力の向上にはR-32やR-125の組成比率の増加が効果的であることもわかる。換言すれば、R-134aのみに着目すると、その組成比率を増加させると成績係数は上昇するものの、冷凍能力は低下する。一方、温暖化への影響という点では、R-32のGWPは表1にも示したように他のHFCに比べて大幅に小さく、この組成比率の大きな混合冷媒の方が環境負荷が小さいことがわかる。このように、可燃性を回避できても、逆にGWPは増加してしまい相反する効果しか期待できないことになる。

このように見てくると、ごく限られた特性や性質のみに着目しても、文字どおり「一方を立てれば他方が立たず」といった状況にあり、既述した様々な評価項目の全てを満足しうる最適な組成比率は存在しえず、この点がHFC系混合冷媒の開発・選定に際しての最大の課題と言える。結論的には、利用目的・使用機器への適合性を総合的に判断した上で混合冷媒の最適組成の決定が行われてきた。表3には、R-22およびR-502用の代替冷媒として現在最有力視されているHFC系混合冷媒をまとめたが、いずれもAREPあるいはJAR EP評価プログラムによる共通の結論と考えられている。なお、表3には含めていないが、ごく最近になってパッケージ・エアコン用の3成分系混合冷媒 R-32/125/134a (25/15/60) が非共沸混合冷媒としてR-407Cよりも理論性能面で若干優れているとの報告⁽²⁾がなされ注目を集めつつある。ASIRAE規格では正式な冷媒番号は未決定ではあるものの、R-407Xとして仮称されており、図3に示

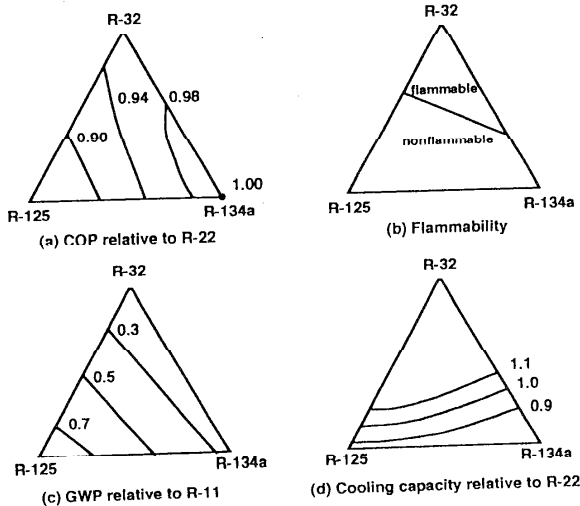


図2 R-32/125/134a 混合冷媒の主要特性とその組成依存性

表3 R-22, R-502 代替用としての HFC 系混合冷媒

Replacement to	ASHRAE Designation	Composition (wt%)	Normal Boiling Point (K)	Temperature Glide (K)	
R-22 (Air Comditioner)	R-410A	R-32/125 (50/50)	221.7	0.1	Near-Azeotrope Zeotrope
	R-407C	R-32/125/134a (23/25/52)	229.2	7.2	
R-22 or R-502 (Low Temperature Refrigeration)	R-404A	R-125/134a/143a (44/4/52)	226.5	0.4	Near-Azeotrope Zeotrope Azeotrope
	R-407A	R-32/125/134a (20/40/40)	227.9	4.1	
	R-507A	R-125/143a (50/50)	226.0	0.0	

したようにR-407CよりもR-125の組成比率が少なくなりその分R-134aの比率が増加している。

なお、表3に示したHFC系混合冷媒の熱力学的特徴を把握する上で、表中に示した混合冷媒の組成依存性による分類・定義が極めて重要である。一般に、混合物は、気・液両相における組成がそれぞれ異なるのが通常であり、非共沸混合物 (zeotrope: かなり以前は non-azeotrope とよばれることが多かった) と

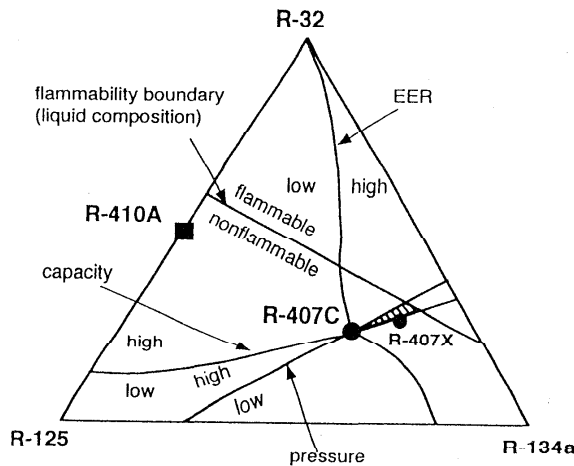


図3 R-32/125/134a 混合冷媒とその評価⁽²⁾

よばれている。これに対して、気・液両相における組成が等しい例外的な場合を、共沸混合物(azeotrope)とよび、これに極めて近い混合物については擬似共沸混合物(near-azeotrope)などとよばれている。なお、ASHRAE規格では、400番台の冷媒番号は非共沸混合冷媒および擬似共沸混合冷媒を意味しており、厳密に共沸混合冷媒として確認された混合冷媒にのみ500番台の冷媒番号が約束されていることに留意されたい。非共沸混合冷媒と共沸混合冷媒の顕著な相違点などに関する詳しい熱力学的検討については文献⁽³⁾にゆずるが、特に重要な留意点は相変化の際の気・液両相における組成変化の様相が根本的に違う点にある。すなわち、共沸混合冷媒では、単一組成の純粋冷媒と全く同様な熱力学的挙動を示すのに対して、非共沸混合冷媒では、冷凍サイクル内で圧縮機の入口や出口あるいは膨張弁入口状態などでの単一相状態にあっては、混合冷媒組成は充填時の初期成分組成と変わらないものの、蒸発器と凝縮器にあっては相変化の様相に応じて気・液両相での組成が充填時の初期組成とは異なるわけである。また、このような相変化時には、熱交換器内で混合冷媒圧力が一定値に保たれていても、露点温度と沸点温度とは一致しないために、相変化過程においていわゆる

温度変化(温度勾配: temperature glide)が生じることになる。表3中にはこの温度変化量も示してあるが、共沸混合冷媒であるR-507Aではゼロであるのに対して、擬似共沸混合冷媒であるR-410AやR-404Aでは0.1K、0.4Kと極めて小さく、非共沸混合冷媒であるR-407C、R-408Aではそれぞれ7.2K、4.1Kと無視できない大きさになっている。

つぎに、近い将来HFC系混合冷媒が冷凍・空調機器に適用される場合に、実用面で十分配慮すべき点についても触れておきたい。このことは、冷凍・空調機器の保守・点検といったサービス技術の面ばかりでなく、HFC系混合冷媒を用いた伝熱研究をはじめ様々な基礎研究面においても留意すべき事項であると考えられる。例えば、非共沸混合冷媒であるR-407Cを、あらかじめ定められた組成比率で充填されている容器から別の容器や機器に充填する操作の際に、一部の冷媒が万一大気中に漏洩するなどの問題が生じると、当然のことながら所定の混合組成は維持管理できないことになり、機器の特性や性能面でも所期の能力を期待できない事態が生じることになる。具体的には、もし気相からの漏洩があると、R-32やR-125といった低沸点成分の組成比率が低下する一方で、高沸点成分であるR-134aの組成比率が上昇することになる。このため、充填後の混合冷媒の組成は所期のものから大幅に変化してしまうことになり、場合によっては数10%にも達してしまうことも容易に予測できる。一方、液相からの漏洩・流出ではその量にもよるが、一般的には極めて微量の組成変化を生じるにすぎない。したがって、R-407Cの組成比率をASHRAE規格に定められている公差(3成分物質とも±2wt%)以内に保持するためには、気相からの漏洩を極力防止する工夫が肝要であり、初期充填容器中には液相をある程度残した状態で充填操作を終了すべきである。

一方、共沸混合冷媒であるR-507Aなどの場合には、R-407Cなどと比較して漏洩による組成比率の変化は著しく低いものとなる。もちろん、気相からの漏洩による影響の方が液相からのそれによるものよりも多少は大きいものの、移送・再充填の操作は液相ばかりでなく気相からも十分可能でありこれまでのR-22やR-502といった冷媒の取扱いと基本的には同じにしてよいといえよう。

4. HFC系冷媒の熱物性研究

R-22やR502用の代替冷媒の探索にはじまり、既存機器を用いたいわゆる"drop-in test"の段階を終わ

り、表3に示した最有望視されるHFC系混合冷媒を用いた実用化への技術開発が現在主要企業において実施されている。特に、圧縮機や蒸発器、凝縮器などの伝熱機器に関するいわゆる要素技術の確立が火急の課題になっており、関連して新しい潤滑油の選定なども大きな課題になりつつある。このような局面を迎えて、数年前の代替冷媒の探索・選定の段階で必要であったHFC系混合冷媒の熱物性値情報とは、その確度、信頼度の面ではるかに質の高い熱物性値情報が要求されるようになってきた。

一方、冷媒や代替冷媒をはじめ様々な熱エネルギー変換システムに用いられる作動流体の熱物性研究に多年に亘って携わってきた筆者などの立場からは別の問題点も指摘することができる。すなわち、要素機器の技術開発やサイクル特性・性能の評価などに必要不可欠な熱物性値の種類は極めて多岐にわたり、個々の候補物質に関してそれぞれ固有の性質を示すため、実験的研究に依存せざるを得ない点がまず第1に指摘できる。このため、最新の測定・計測技術や機器を用いても、膨大な努力とかなりの時間・研究者数・研究予算が必要になる。また、混合冷媒を対象とする当該分野の基礎研究にあっては、様々な熱物性値の組成依存性を全組成領域にわたって解明する必要があり、単にR-407CやR-507Aなどとして規定された混合組成比率における熱物性測定では全く不十分で、それぞれの混合冷媒の示す諸性質の組成依存性がかなり異質のものとなることに十分な配慮が必要となる宿命をもっている。

このことは、いわば単一組成の数種類の純粋物質を対象として、あるひとつの熱物性値を広い温度・圧力・密度範囲にわたって解明しえた上で、はじめて2成分系混合冷媒の当該性質に関する組成依存性の全容を知りうることを意味しており、3成分系混合冷媒ではさらに複雑かつ多岐にわたる精密測定が必要となることをご理解いただければ。

さて、当該分野の基礎研究の重要性は昨今では広く認識されるようになってきているものの、世界中でも表4に示したようにごく限られた研究機関において熱物性研究が実施されているにすぎない。

熱物性に関する基礎研究の重要性と緊急度の高さから、表4に示したような主要な研究機関ごとの研究体制では不十分であり、国際的な研究協力活動が必要であることは論をまたないし、今後も益々その必要性が高くなるものと予想される。このような国際的な研究協力活動の代表例として、国際エネルギー機関(IEA: International Energy Agency)における「改良型ヒートポンプ・システムの開発計画に関する実

表4 代替冷媒の熱物性研究に関する主要研究機関

イタリア	Ancona大学 (A/B), Padova大学 (A)
ドイツ	Hannover大学 (A), Paderborn大学 (A) Karlsruhe大学 (A), Munchen工科大学(A/B) Stuttgart大学 (B), Rostock大学 (B) PTB (A)
イギリス	ICI (A/B), Imperial College (A/B)
フランス	Paris Nord大学 (B), Elf-Atochem (A)
チェコ	科学アカデミー熱力学研究所 (A) West Bohemia大学 (A)
ポルトガル	Lisbon大学 (A/B)
ギリシャ	Aristotle大学 (B)
ウクライナ	国立冷凍アカデミー (A)
ベラルーシ	動力工学問題研究所 (A/B)
ロシア	Moscow動力大学 (A) St. Petersburg 冷凍・食品技術国立アカデミー (A/B)
アメリカ	NIST (Boulder)(A/B), NIST (Gaithersburg)(A) Texas A&M大学 (A), DuPont (A) Colorado鉱山大学 (A), Idaho大学 (A) Clemson大学 (A), Maryland大学 (B)
韓国	Seoul国立大学 (A/B)
中国	西安交通大学 (A), 精華大学 (A/B)
日本	いわき明星大学 (A), 筑波技術短大 (A) 旭硝子 (A/B), ダイキン工業 (A) 慶應義塾大学 (A), (B), 東京大学 (A) 神奈川工科大学 (A/B), 神戸大学 (A/B) 京都工芸繊維大学 (A/B), (A)

備考：(A)は熱力学性質（平衡性質）を、(B)は輸送性質（非平衡性質）に関する研究を表す。

施協定」に基づき、付属書 Annex 18 とよばれる国際研究協力が実施されている。このAnnex 18は「環境保全上容認しうる冷媒熱物性」と題し、米国の国立標準・技術研究所(NIST)のMcLinden博士がoperating agent、筆者がcooperating agentとなり、現在カナダ、ドイツ、日本、ノルウェー、スウェーデン、英国および米国の計7ヶ国が参加して精力的な活動を継続している。

Annex 18 は 1990年3月に発足し、1993年3月までの第1期（3年間）にあつては、主としてCFCl₃に属するR-12およびR-11の代替冷媒としてのR-134aおよびR-123に関する状態方程式の評価と国際標準となる国際推奨状態方程式の選定を行った。また、代替冷媒の試料純度分析法に関する規定、熱物性データベースの構築 (Stuttgart 大学)、世界各国における熱物性研究の実情調査やR-134aおよびR-123の表面

張力、粘性率ならびに熱伝導率に関する相関式の作成などについても大きな成果を取ることができた。なお、上述した国際推奨状態方程式に関しては、原報の公表⁽⁴⁾、⁽⁵⁾に続いて国際冷凍学会(IIR: International Institute of Refrigeration)から熱物性値表⁽⁶⁾、⁽⁷⁾も出版されている。

Annex 18 の第 2 期 (1993年4月~1996年3月) にあつては、HFC系混合冷媒の熱力学性質を矛盾なく表現するためのモデリング (状態方程式や相関式のフォーミュレーション) の作成や提案されたモデルの比較・検討に努力が払われた。また、この目的に関連して、重要な成分物質であるR-32およびR-125の国際推奨状態方程式の評価・選定を行った。その結果、R-32⁽⁸⁾およびR-125⁽⁹⁾の国際推奨状態方程式が昨秋決定し、引き続き今夏を目標にR-143aに関する国際推奨状態方程式の評価・選定作業が実施されることになっている。なお、HFC系混合冷媒に関するモデルについても、これまでに数種類のモデルが提案されており、上述した成分物質に関するモデルとの整合性などをさらに詳しく比較・検討する段階を迎えている。

既述した北欧、ドイツなどの欧州各国における自然冷媒への関心の大きさを反映して、IEAでは「自然冷媒を作動流体とする圧縮式ヒートポンプシステム」と題する国際共同研究プログラムをAnnex 22として1995年より発足させている。このような動きに

呼応して、Annex 18の第 2 期後半からは、自然冷媒の熱力学性質に関する状態方程式の評価や最適なモデルの提唱をAnnex 22に対して行うことも活動の一環となっている。Annex 18に関しては、第 3 期目の国際研究協力プログラムが既にIEA理事会で承認されており、昨年 4 月より1999年3月までの 3 年間にわたり、引き続き自然冷媒の分野にも力を注ぐこと、特にアンモニアに注目することで合意が得られている。現在、この第 3 期目の課題としては、R-507A やR-404AのようなR-143aを含む混合冷媒のモデリングをはじめ、HFC系混合冷媒の輸送性質に関する実測値情報の収集・評価なども進行中であり、第 2 期目に未了であった活動計画と併せて精力的な基礎研究と国際研究協力活動が進められている。なお、特筆すべきことは、第 2 期目の後半からAnnex 18の参加国の主要冷媒製造企業 6 社がこのAnnex 18に直接参加・協力するようになってきている点で、わが国からは旭硝子とダイキン工業が、Allied Signal (米国)、Du Pont (米国)、Elf-Atochem (米国支社)、ICI(英国)とともに参加している。

さて、これまでに報告されている当該分野の研究状況の一端を紹介する目的で図 4 を準備した。この図には、モントリオール議定書が締結された1987年以降昨年秋頃までに報告された主要な熱力学性質に関する実測値数(実測値が報告されている測定点数)が示されている。興味深い点は、(1) モントリオ

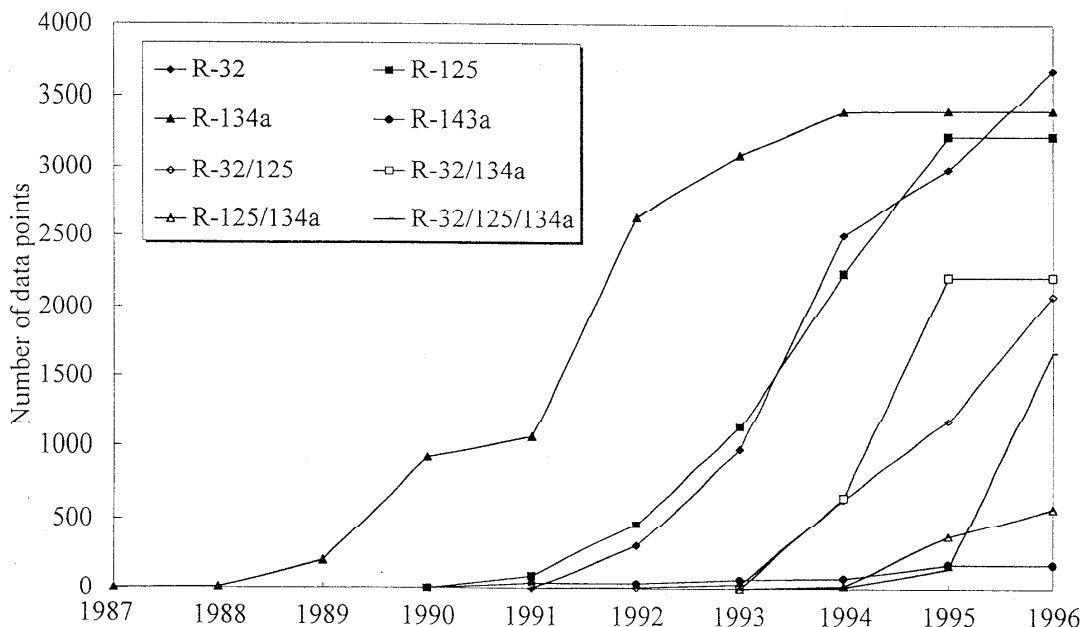


図4 HFC系代替冷媒に関する熱力学性質の実測値情報

ール議定書の締約直後からR-134aとR-123 (HCFCであるので図4からは除外した)に関する実験的研究が極めて精力的に加速され、1994年頃にはほとんど飽和した状況にあること、(2) 続いて、R-32とR-125に関する実測値の報告が1991年から急増したこと、(3) 2成分系混合冷媒としては、R-32/134a、R-32/125を中心に1993年から増加していることなどであろう。また、単一組成のHFC系冷媒であるR-143aの実測値情報は依然として不足しており、2成分系でもR-125/134aに関する研究も不十分な状況にあることが指摘できる^{(10),(11)}。一方、同図からも明らかのように、現在代替冷媒として最も注目を集めている3成分系混合冷媒R-32/125/134aに関する実験的研究は1995年頃から緒についたばかりであることもわかる。

さらにもう1点指摘しておきたい点は、実測値総数の多さである。例えば、R-134aの場合に見られるように、当該分野の実験的研究が開始されてわずか7~8年の間に、実に3500点にも達する実測値が報告されていることは驚嘆に値しよう。このことは、代替冷媒としてのR-134aが1986年以前には全く合成されておらず、研究用試料ですら入手できない状況にあったことを憶いおこせば、まさに奇跡的な展開といっても過言ではない。換言すれば、それだけ短期間にこの分野の基礎研究の必要性が叫ばれ、それに呼応する形で主要な研究機関で一連の研究が実施

されたことを意味しており、既述したCFCやHCFCの全廃に至る国際規制の加速化と産業界における技術開発の急速な進展がその背景にあることを物語っている。工業上最も古くから幅広く活用されてきた水・水蒸気の主要な熱力学性質に関する実測値情報は、ほぼ200年以上の年月を経て約20,000点程度であると考えられており⁽¹²⁾、いかにHFC系冷媒に代表される代替冷媒の当該分野の研究の進展が急激であったか、またその成果が冷凍・空調産業における新しい技術・研究開発を支援したかを示す証であるともいえよう。

図5はHFC系代替冷媒の熱力学性質に関する実測値情報を分類した上で冷媒ごとに示したものであり、図4の場合と同様に1996年秋頃までの状況を集大成したものである。この図からも、単一組成の純粋冷媒の中ではR-143aの情報が不足していることがわかり、混合冷媒についても全組成領域を網羅する精密測定が必要であることを考えると、今後さらに一連の研究を実施する必要性が高いことが指摘できる。なお、図5からは基本的かつ最重要な熱力学性質であるPVT性質(混合冷媒ではPVTx性質)とVLE(vapor-liquid equilibria)性質(純粋冷媒では蒸気圧や飽和液体密度を、混合冷媒では沸点・露点圧力や飽和液体密度などの気液平衡性質を意味する)とに関する実測値情報が大半を占めていることもわかる。また、一般的な傾向として、PVT性質やVLE性

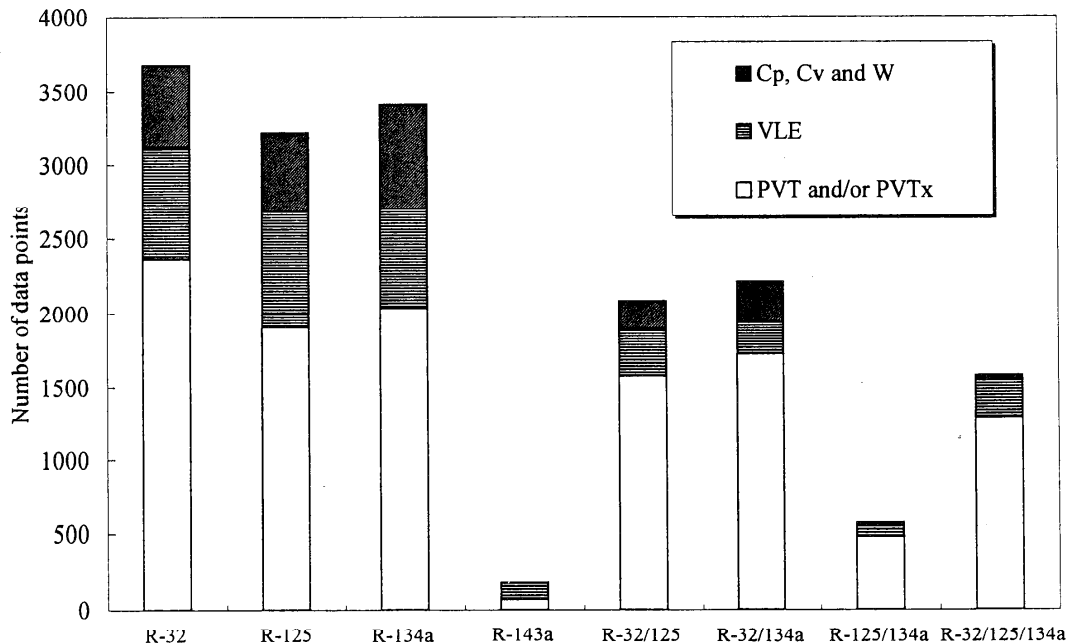


図5 HFC系代替冷媒の熱力学性質の分類

質などが究明された後に、定圧比熱(C_p)、定容比熱(C_v)や音速(w)などの高精度測定が比較的むずかしい諸性質に関する実験的研究が遂行される傾向にあることも理解でき興味深い。熱力学の基礎理論としてよく知られているように、対象とする純粋流体系の状態方程式を作成するためには、可能な限り広い温度・圧力・密度領域で高精度なPVT性質、蒸気圧力の複数の実測値群に加えて、理想気体状態における定圧比熱値 C_p^0 の温度依存性がわかっている必要がある。混合流体系にあっても基本的には同じであり、PVTx性質として組成依存性が把握されていればいわゆる混合則についてもモデル化が可能になる。

しかしながら、上述した定圧比熱や音速などの諸性質はPVT状態曲面の曲率を与える2階の導関数などで定義されることから、これらの熱力学性質に関する高精度な実測値情報を加えて状態方程式のモデリングを実施すれば、より信頼度が高く熱力学的一貫性をもつ状態方程式が作成できることになる。一例として、筆者らのグループで実施しているHFC系冷媒を対象とした気相域での音速測定の場合には、ほぼ72ppm程度の拡張不確かさ(新しいISOの不確かさ表記法により、包含係数を2とした場合)で音速値が決定できる。その結果、これらの実測値情報から、従来にない高精度で第2、第3ビリアル係数値が決定できる⁽¹³⁾。また、理想気体状態の定圧比熱値も高精度で決定できるほか、混合冷媒に関する混合則の検討なども可能になることを見だしている⁽¹⁴⁾。このように、巨視的な平衡性質を与える熱力学性質に関する実測値情報の質と量が向上した代替冷媒の場合などでは、それらの実測値情報が単に工学・工業上の応用を支えるばかりでなく、これまで未解明であった分子構造や分子間ポテンシャルと巨視的に観測される熱力学性質との関連性を明らかにするといった学術面での新しい知見の構築にも役立つ段階になりつつある⁽¹⁵⁾。

これまではHFC系代替冷媒の熱力学性質に関する研究の進展に関して述べてきたが、輸送性質に目を転じるとかなり状況がちがうことに気付く。すなわち、熱力学性質の実測値情報に比べて、輸送性質に関するそれは量的にも質的にも不十分な状況にあるといわざるをえない。単一組成のHFC系代替冷媒の中では、R-134aに関しては必要最小限の情報が蓄積・集大成されている^{(6),(16)}が、R-32やR-125に関しては近年少しずつ増えつつある。また、R-143aに関しては極めて少ないのが実情であり、既述した代替冷媒として有力視されているHFC系混合冷媒の輸送性質に関しては実測値情報が皆無に近い状況にあ

るといっても過言ではない。また、粘性率に関する実測値情報の方が、熱伝導率のそれに比べて若干多いものの、測定領域がごく限定された温度・圧力領域にとどまっている報告例が多く、重複する測定領域内の個々の実測値群の一致も数%から10数%程度であることも指摘できる。

粘性率に関する実測値情報の蓄積状況の一例を、R-32に関して田中が作成した図6⁽¹⁷⁾として示した。

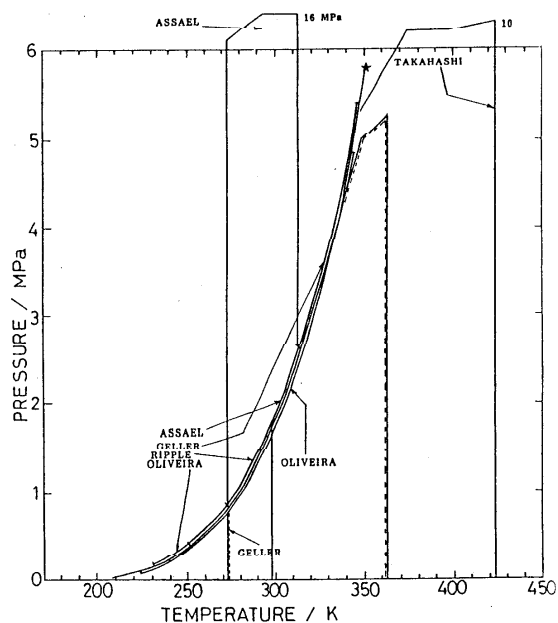


図6 R-32の粘性率測定の実況

気相域ではTakahashi⁽¹⁸⁾の振動円板法による実測値数は114点と最も多く、Geller⁽¹⁹⁾らの気・液両相での測定、Oliveira⁽²⁰⁾らの飽和状態での測定、液相での Assael^{(21),(22)}ら、飽和液体に関するRipple⁽²³⁾らの実測値群が存在するにすぎないことがわかる。また、同じR-32に関する熱伝導率についての実測値情報をまとめたものが表5であり⁽²⁴⁾、気・液両相において実測値数が限られていることがわかる。特に、熱伝導率値が臨界点近傍の領域において、いわゆる臨界異常と呼ばれる興味深い挙動を示すことを考え併せると、現状ではGeller⁽³²⁾らによる測定のみがこの領域で報告されているにすぎず、今後の実験的研究の進展に期待せざるをえないといえよう。

5. おわりに

主としてR-22およびR-502に代わるべきHFC系代

表5 R-32の熱伝導率に関する実測値情報

Region	First Author	Ref.	Temperature Range (K)	Pressure Range (MPa)	Number of Data
Liquid	Papadaki	(25)	205 - 303	Saturation	10
	Yata	(26)	253 - 324	2 - 30	27
	Gross	(27)	234 - 334	0.4 - 6.4	37
	Grebenkov	(28)	275 - 350	1.7 - 10	72
	Assael	(29)	253 - 313	0.6 - 18	27
	Ro	(30)	223 - 323	2 - 20	24
	Gao	(31)	203 - 304	0.2 - 30	44
Critical Region	Geller	(32)	254 - 427	0.1 - 50	140
Vapor	Gross	(27)	265 - 345	0.1 - 4.0	43
	Grebenkov	(28)	260 - 403	8.3 - 13	26
	Tanaka	(33)	283 - 333	0.1 - 3.9	53

替冷媒、特にそれらの混合冷媒に注目し、それらの熱物性研究の最近の進展について概説した。また、当該分野の著しい進展の背景にあるHCFC系冷媒の生産・消費に関する国際規制の動向、今後の見通しについても言及し、HFC系代替冷媒の開発動向、冷凍・空調分野における技術・研究開発の現状、問題点などの周辺事情についても解説した。

当該分野の数年来の急激な技術開発の必要性が、熱物性研究という一つの基礎研究分野の国際的な展開・国際研究協力活動を生みだし、その研究成果が工学・工業にフィードバックされている格好の例としてご理解いただければ幸いである。なお、紙幅の関係もあり、HFC系代替冷媒のモデリングの諸成果については詳細を割愛せざるをえなかった。この分野でも、いくつかの新しい展開が見られており、熱力学性質に関する豊富な、信頼度の高い実測値情報の蓄積に支えられて実用上活用しやすい熱力学モデルが逐次公表されつつあることを付記しておきたい。

最後に、R-32, R-125およびR-143aを対象として、一連の熱物性値情報を集大成した熱物性値表の刊行準備が、現在日本冷凍空調学会（旧称：日本冷凍協会）において進められていることをご紹介します、筆をおきたい。

参考文献

- (1) Molina, M.J. and Rowland, F.S., *Nature*, 249 (1974), 810.
- (2) 日下道美, 蔵地正夫, Proc. of the Int. Symp. on HCFC Alternative Refrigerants '96—Technology Update on Practical Use for Air Conditioning and Refrigeration Equipment—, Kobe (1996), pp.101-106.
- (3) 高石吉登, 渡部康一, 日本冷凍協会論文集, 3(3) (1986), 123.
- (4) Tillner-Roth, R. and Baehr, H.D., *J. Phys. Chem. Ref. Data*, 23(5) (1994), 657.
- (5) Younglove, B.A. and McLinden, M.O., *J. Phys. Chem. Ref. Data*, 23(5) (1994), 731.
- (6) Int. Inst. of Refrigeration, "Extended Thermophysical Properties, R 134a" (1995), 48pp.
- (7) Int. Inst. of Refrigeration, "Thermodynamic and Physical Properties, R 123" (1995), 56pp.
- (8) Tillner-Roth, R., Yokozeki, A. and Baehr, H.D., to be submitted to *J. Phys. Chem. Ref. Data* (1997).
- (9) Piao, C.-C. and Noguchi, M., to be submitted to *J. Phys. Chem. Ref. Data* (1997).
- (10) Watanabe, K., Proc. of the Inst. of Refrig. 90 (1993/94), 33.
- (11) Watanabe, K., *Bull. of the Int. Inst. of Refrig.*, 76(6) (1996), 2.
- (12) Sato, H., Watanabe, K., Levelt-Sengers, J.M.H., Gallagher, G.S., Hill, P.G., Straub, J. and Wagner, W., *J. Phys. Chem. Ref. Data*, 20(5) (1991), 1023.
- (13) 宝積勉, 佐藤春樹, 渡部康一, 熱物性, 11(1) (1997), 10.

- (14)宝積勉, 学位論文 (慶應義塾大学), (1997).
- (15)Yokozeki, A., Sato, H. and Watanabe, K., paper to be submitted to *Int. J. Thermophys.* (1997).
- (16)日本冷凍協会・日本フロンガス協会編, 「代替フロン類の熱物性—HFC-134a, HCFC-123—」, 日本冷凍協会 (1991).
- (17)田中嘉之 (神戸大学工学部), 私信 (1996).
- (18)Takahashi, M., Shibasaki-Kitakawa, N., Yokoyama, C. and Takahashi, S., *J. Chem. Eng. Data*, 40(4) (1995), 900.
- (19)Geller, V.Z., Paulaitis, M.E., Bivens, D.B. and Yokozeki, A., *Int. J. Thermophys.*, 17(1) (1995), 75.
- (20)Oliveira, C.M.B.P. and Wakeham, W., *Int. J. Thermophys.*, 14(6) (1993), 1131.
- (21)Assael, M.J., Dymond, J.H. and Polimatidou, S.K., *Int. J. Thermophys.*, 15(4) (1994), 591.
- (22)Assael, M.J., Papadopoulos, A.S. and Polimatidou, S., Proc. of the 4th Asian Thermophys. Props. Conf., Tokyo (1995), 623.
- (23)Ripple, D. and Matar, O., *J. Chem. Eng. Data*, 38(4) (1993), 560.
- (24)矢田順三 (京都工芸繊維大学工学部), 私信 (1996).
- (25)Papadaki, M. and Wakeham, W.A., *Int. J. Thermophys.*, 14(6) (1993), 1215.
- (26)Yata, J., Hori, M., Kobayashi, K. and Minamiyama, T., *Int. J. Thermophys.*, 17(3) (1996), 561.
- (27)Gross, U. and Song, Y.W., *Int. J. Thermophys.*, 17(3) (1996), 607.
- (28)Grebenkov, A.J., Kotelevsky, Yu.G., Saplitza, V.V., Beljaeva, O.V., Zajatz, T.A. and Timofeev, B.D., Proc. of the Joint Meeting of the IIR Commissions B1, B2, E1 and E2, "CFCs, The Day After", Padova (1994), 419.
- (29)Assael, M.J. and Karadiannidis, L., *Int. J. Thermophys.*, 16(1) (1995), 851.
- (30)Ro, S.T., Kim, J.M. and Kim, D.S., *Int. J. Thermophys.*, 16(5) (1995), 1193.
- (31)Gao, X., Iijima, H., Nagasaka, Y. and Nagashima, A., Proc. of the 4th Asian Thermophys. Props. Conf., Tokyo (1995) 1, 125.
- (32)Geller, V.Z. and Paulaitis, M.E., paper presented at the 12th Symp. on Thermophys. Props., Boulder (1994).
- (33)Tanaka, Y., Matsuo, S. and Taya, S., *Int. J. Thermophys.*, 16(1) (1995), 121.

沸騰熱伝達の促進と機構

Enhancement of Boiling Heat Transfer and Its Mechanism

藤田 恭伸 (九州大学工学部機械エネルギー工学科)
Yasunobu FUJITA (Dept. Energy and Mechanical
Engineering, Kyushu University)

1. はしがき

熱エネルギーの高効率利用には熱交換器の高性能化が欠かせない。沸騰による蒸発過程は各種プラントで多くみらる。この場合、熱源間の温度差を最大限に利用し、熱交換装置の大きさを小規模に抑えるには、沸騰促進が求められる。他の伝熱形態に比較し核沸騰の熱伝達率は高い。これは核沸騰が十分発達した場合であり、核生成それほど活発でない中程度あるいは低過熱度では沸騰伝熱の優位性はなくなる。沸騰伝熱ではこの領域の促進がことに重要である。

伝熱促進には受動型(passive)と能動型(active)がある(1)。受動型は外部動力を要しない促進法である。沸騰の場合、表面処理や表面加工により濡れ特性や表面の微細構造を①核生成や核安定性に適合させ、あるいは②伝熱機構を操作して促進を図る。この種の伝熱面は「高性能沸騰伝熱面」と総称される。伝熱面には手を加えず、動力あるいはエネルギーを投入して促進を図るのが能動型である。この方法には①伝熱面の振動や回転、②表面付近の流体の掻取りや吸込み、③流体振動、④電場付与、⑤超音波付与、などがある。おもに①伝熱面上の発生気泡や伝熱面近傍の過熱液層の速やかな更新、②発生気泡に作用する力の変化、などに着目した促進法である。

伝熱促進に関してはレビューが度々行われている。ここでは沸騰伝熱の基本であるプール核沸騰の受動型伝熱促進について、おもに伝熱特性の概要、熱伝達率の予測法、解析モデルの現状を紹介する。

2. 受動型伝熱促進の基本

気泡発生には微小であるが有限の大きさの核が必要であり、伝熱面上の切り欠きや窪みなどキャビティ内の捕獲微小蒸気が気泡発生の核になる。

図1に理想化した3種類のキャビティを示す。

キャビティ内の蒸気核の気液界面は、面を濡らし易い液体では液側に向かって凸、濡らし難い液体では凹で、曲率半径 R はキャビティの頂角 2ϕ 、接触角 θ 、界面の位置 x の関数として表わされる。接触角 θ が小さい面を濡らし易い液体ほど平衡蒸気核の曲率半径は小さくなり、大きな過熱度を要す。有機液体、液化ガスなどの低温流体、フロン類などがその例である。

図2は0.1MPaのR-113の蒸気核が図1のキャビティ内を移動したときの平衡過熱度の変化を示

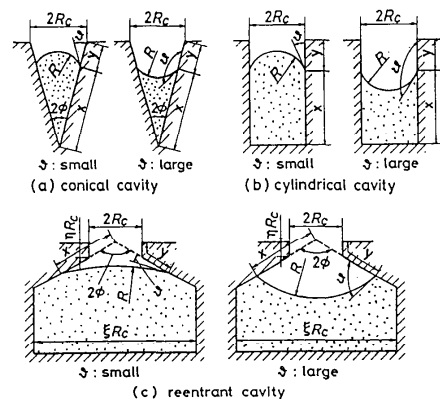


図1 キャビティ形状とメニスカス

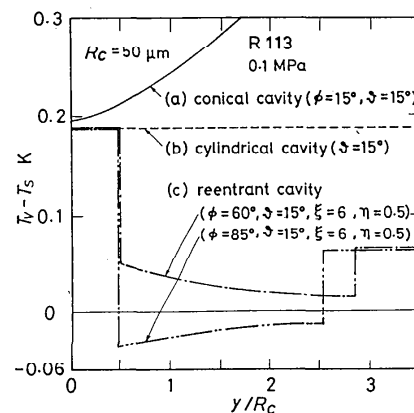


図2 キャビティ内の蒸気核の平衡過熱度

3. 受動型伝熱促進の特性

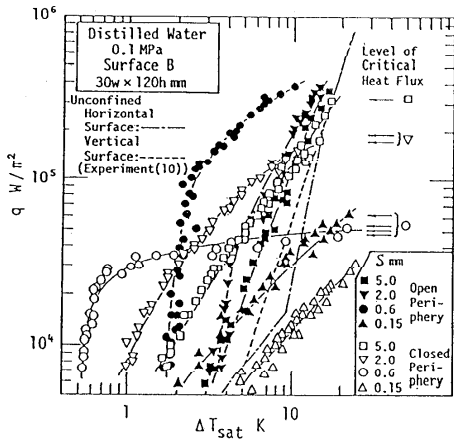


図3 沸騰空間制限の効果

す。キャビティ開口半径 R_c は $50\mu\text{m}$ 、接触角は 15° である。平滑面上のキャビティは図1(a)の円錐状とみなされ、この場合の捕獲蒸気核の安定性が最も低い。何らかの外乱で壁温が低下し凝縮により蒸気核の界面が後退を始めると、凝縮はますます助長される。このとき図2の平衡過熱度以上に温度が回復しなければ、やがて蒸気核は消滅して不活性化する。図1(c)のリエントラントなキャビティの場合、凝縮により蒸気核がある程度後退すると平衡過熱度が急低下する領域があり、そこに達すると凝縮が停止し、蒸気核の消滅に至らないことが多い。とくに頂角 2ϕ が 180° 以上の二重リエントラントキャビティは面を濡らし易い液体でも蒸気核を常に安定化し、不活性化しない。以上の静的平衡モデルの考察から、蒸気核の安定性と低過熱度の核生成にはリエントラントキャビティが有効であることが分かる。

一方、沸騰空間が気泡の大きさ以下に制限されると、気液の流動状態の変化により伝熱特性も変わる。図3は長方形の垂直沸騰面に対向板を置き、すき間 S を変えたときの沸騰曲線(2)を示す。沸騰空間の制限は伝熱促進にむしろ有利である。

受動型促進法は伝熱面の表面構造を微細化し、リエントラントキャビティを高密度で付与することによる①低過熱度での安定な核生成と、②微細化制限空間内の伝熱機構変化を基本にしている。微細化の方法には①金属繊維の焼結や金網の装着、②金属微粒子による多孔質表面層の形成、③機械加工による微細構造化、などがある。

図4は製品化された高性能伝熱面の断面を示す。これらの伝熱面の伝熱特性は水、有機液、フロンなどで測定(3)-(11)されている。図5は伝熱促進の測定結果の例(8)を示す。同一の熱流束を伝えるのに要する伝熱面過熱度は平滑面の約1/10に改善されている。これと同程度の改善は他の液体でも得られている。

西川ら(12)は金属繊維層、金属粒子層、機械加工面など、各種の高性能沸騰伝熱面の性能を同一の試験装置で詳細に調べている。測定した各伝熱面の仕様を表1に示す。図6と図7は大気圧の飽和沸騰の水とR-113の結果を示す。熱流束と伝熱面過熱度は多孔質層底面あるいはトンネル底面を基準に定義してある。

伝熱促進の程度は多孔質層を形成する①素材の材質、②粒子径や繊維径、③層の厚み、④空隙率、⑤素材間の結合度、⑥多孔質層と基材面の密着度、などにより複雑に変わっている。

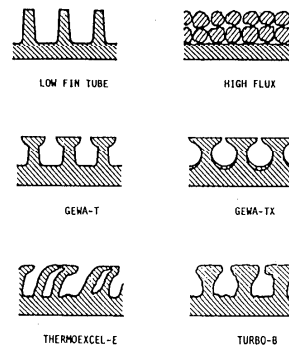


図4 商用高性能沸騰伝熱面の断面形状

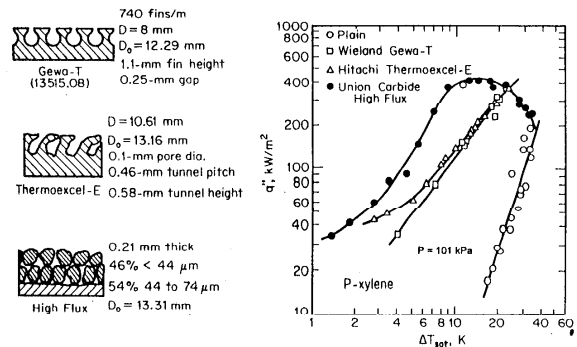


図5 商用高性能沸騰伝熱面の伝熱促進例

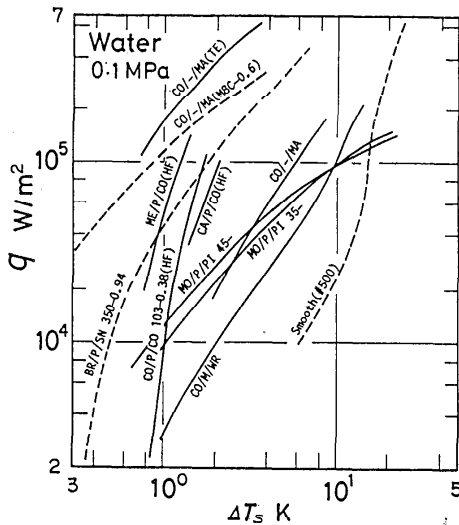


図6 各種の高性能沸騰伝熱面の特性比較
(水、大気圧、飽和)

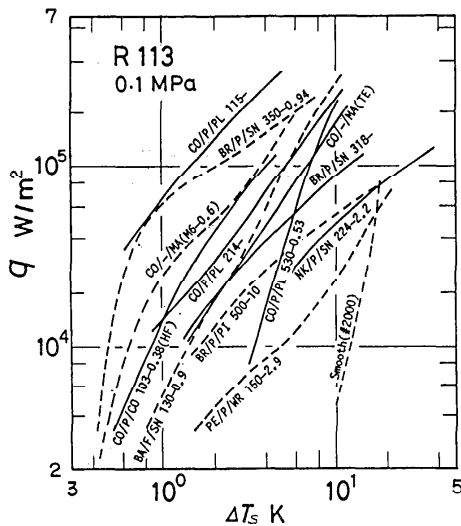


図7 各種の沸騰伝熱促進面の特性比較
(R-113、大気圧、飽和)

高性能伝熱面は高熱流束になると伝熱促進の割合が低下の傾向を示す。また同じ伝熱面でも水とR-113で優位性の順序が変わる。面を濡らし易いR-113の場合、不規則構造の多孔質層伝熱面が有利のようである。一方、面を濡らし難い水に対しては機械加工による規則的なトンネル構造の微細構造面が高い伝熱促進率を与えている。表面構造と液体の組合せにより伝熱特性が複雑に変化することから、表面構造の最適化を行うには多くのデータ

表1 高性能沸騰伝熱面の仕様

(a) 水				
	粒子径 [μm]	粒子層厚 ^a [mm]	空隙率 [-]	基材との結合 の良否
BR/P/SN 350-0.94	350	0.94	0.36	0
ME/P/CO(HF)	U.N.	-0.25	0.5-0.65	0
CO/P/CO 103-0.38(HF)	78-127	0.38	U.N.	0
CA/P/CO(HF)	U.N.	0.25-0.38	0.6	0
CO/-/MA	-	-	U.N.	0
MO/P/PI 45-	m:40-50	3.2-3.8	U.N.	X
MO/P/PI 35-	M:30-40	3.2-3.8	U.N.	X
CO/M(WR)	U.N.	U.N.	U.N.	X
CO/-/MA(HBC-0.6)	-	fh:0.6	-	0
CO/-/MA(TE)	pd:80	ph:0.6	-	0
(b) R113				
BA/F/SN 130-0.9	130	0.9	0.82	0
PE/P(WR 150-2.9	150	2.9	0.65	X
BR/P/SN 350-0.94	350	0.94	0.36	0
BR/P/PI 500-10	500	10	0.36	X
CO/P/CO 103-0.38(HF)	78-127	0.38	U.N.	0
CO/P/PL 530-0.53	530	0.53	U.N.	0
CO/P/PL 214-	214	0.43-0.64	U.N.	0
CO/P/PL 115-	115	0.35-0.46	U.N.	0
BR/P/SN 318-	318	U.N.	0.45	0
NK/P/SN 224-2.2	150-297	2.2	0.66	0
CO/-/MA(M6-0.6)	ov:100	fh:0.6	-	0
CO/-/MA(TE)	pd:U.N.	ph:U.N.	-	0

[A]/[B]/[C]

[A] BA: 真鍮	[B] F: ファイバー	U.N.: 不明
BR: ブロンズ	M: メッシュ	
CA: 銅合金	P: 粒子	fh: フィン高さ
CO: 銅		ow: 開口幅
ME: 金属	[C] CO: コーティング	pd: 開口径
MO: モネルメタル	MA: 機械加工	ph: トンネル高さ
NK: ニッケル	PI: 堆積	
PE: ポリエチレン	PI: メッキ	
	SN: 焼結	
	WR: 巻きつけ	

の収集と分析、さらに形状パラメータが多いことから伝熱過程のモデル化が欠かせない。

4. 金属繊維層の促進

金属繊維層や小メッシュの何重かの金網で平滑面を被膜するなどして表面に多孔層を形成すると、沸騰伝熱は促進される。図8は直径 d_f 、密度 ρ_f のステンレス鋼繊維を表面に焼結した伝熱面に対する梶川ら(13)の測定結果を示す。液体は大気圧のR11である。多孔質層の仕様は次の通りである。

$$8 \mu\text{m} < d_f < 30 \mu\text{m}$$

$$0.37 < \varepsilon < 0.77$$

$$0.115 \text{ kg/m}^2 < \omega < 1.80 \text{ kg/m}^2$$

$$25 \mu\text{m} < \delta < 360 \mu\text{m}$$

$$3.8 < N_{th} < 19.5$$

$$4.6 \mu\text{m} < D_{th} < 60.5 \mu\text{m}$$

ここに、 ε : 多孔層の空隙率、 ω : 基材の単位面積あたりの多孔層の面密度、である。また繊維層を規定する三つの形状パラメータである層厚 δ 、厚さ方向の繊維数 N_{th} 、均一な繊維分布を仮定したときの空隙の内接円直径 D_{th} 、は次式による。

$$\delta = \omega / [\rho_f(1 - \varepsilon)] \quad (1)$$

$$N_{th} = \sqrt{8\omega} / [\rho_f d_f \sqrt{\pi(1 - \varepsilon)}] \quad (2)$$

$$D_{th} = d_f (\sqrt{\pi/2(1 - \varepsilon)} - 1) \quad (3)$$

$$\text{単相: } \psi = N_{th} \quad (4)$$

$$\text{二層: } \psi = [N_{th}(B) + N_{th}(T)] [D_{th}(B) / D_{th}(T)] \quad (5)$$

一種類の線径繊維を用いた単層より、底層を大線径にして D_{th} を大きくし、表層を小線径にして D_{th} を小さくした二層構成の方が良い結果を与える。図9に熱伝達率と繊維焼結層の設計パラメータ ψ の関係を示す。

ここに、添字は"T":表層、"B":底層を表す。熱伝達率は $\psi=25$ あたりで平滑面より約1桁大きい最高値をとる。

5. 金属粒子層の促進

5.1 金属粒子層の熱伝達整理式

金属粒子からなる多孔質表面層は平滑面や平滑管に粒子を堆積、焼結、熔射、コーティングなどして形成するが、焼結法によるものが多い。

西川ら⁽¹²⁾は金属粒子の材質、直径 d_p 、焼結層の厚さ δ 、空隙率 ε を変えた多孔質粒子焼結伝熱管を多数試作し、同一のプール沸騰試験装置を用いて大気圧のR-11、R-113、ベンゼンに対する各伝熱管の特性を調べている。基材表面の熱流束と伝熱面温度を基準に定義した熱伝達率の測定データを多重回帰分析し、次の整理式によりデータを再現している。

$$\frac{\alpha\delta}{\lambda_m} = 10^{-3} (\sigma^2 \Delta h_v / \delta^2 q^2)^{0.0284} (\delta / d_p)^{0.56} \times (d_p q / \varepsilon \Delta h_v \mu_v)^{0.593} (\lambda_l / \lambda_m)^{0.708} (\rho_l / \rho_v)^{1.67} \quad (6)$$

$$\lambda_m = \varepsilon \lambda_l + (1 - \varepsilon) \lambda_p \quad (7)$$

焼結層のパラメータ範囲は、

$$0.1 \text{ mm} < d_p < 1 \text{ mm}$$

$$1.6 < \delta / d_p < 20$$

$$61 \text{ W/mK} < \lambda_p < 372 \text{ W/mK}$$

$$0.38 < \varepsilon < 0.71$$

ここに、 Δh_v : 蒸発潜熱、 ρ_l と ρ_v : 液体と蒸気の密度、 λ_l と λ_v : 液体と粒子の熱伝導率、 μ_v : 蒸気の粘性係数、 σ : 表面張力、である。熱伝達率の予測精度はおよそ $\pm 30\%$ である。ただし、大気圧水に適用すると高めの熱伝達率を与え、また種々の液体で系圧力が大気圧から離れると圧力の影響が異常に大きくなる傾向を示し、異なる圧力の実験データの充足とそれらの実験データによる検証が必要である。

式(7)の焼結層の有効熱伝導率 λ_m に対する液体の熱伝導率 λ_l の寄与は無視できるので、式(6)から熱

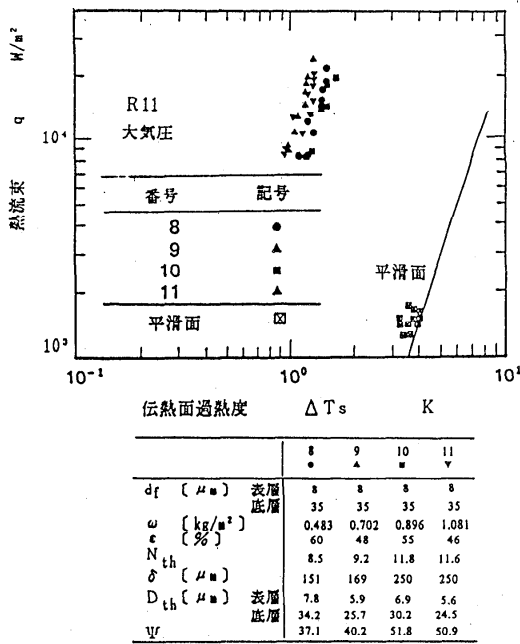


図8 金属繊維焼結面の特性 (R-11、大気圧)

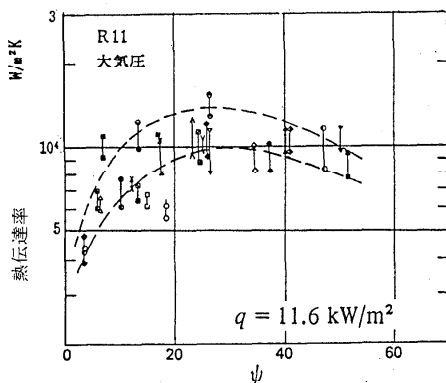


図9 金属繊維焼結面の特性と設計パラメータ

伝達率に及ぼす気液の物性値、粒子の直径と熱伝導率、焼結層の厚さと空隙率、熱流束のそれぞれの影響は次のように表わされる。

$$\alpha = 10^{-3} \rho_l^{1.67} \rho_v^{-1.67} \Delta h_v^{-0.565} \lambda_l^{0.708} \mu_v^{-0.593} \sigma^{0.056} \times \lambda_p^{0.296} d_p^{0.033} \delta^{-0.497} (1-\epsilon)^{0.292} \epsilon^{-0.593} q^{0.536} \quad (8)$$

熱伝達率に及ぼす形状パラメータの影響は単調なため、上式から最大の熱伝達率を与える最適な粒子焼結層の条件は定められない。

5.2 金属粒子層の静的伝熱モデル

O'Neillら(14)は同じ粒径の金属粒子を規則的に配列した理想的な多孔質面に対して伝熱モデルを提案している。彼らのモデルでは図10のように粒子間の各空隙に気泡が粒子に内接して保持されている。熱流経路は先ず基材表面から積層粒子に熱伝導で伝わり、次いで粒子表面から薄い液膜を通じて気泡に伝わる。粒子の熱抵抗を無視すると、基材表面の過熱度 ΔT_s は液膜内の伝導抵抗に対応する温度差($T_w - T_v$)と、空隙内の気泡の平衡過熱度($T_v - T_b$)の和で表わされる。規則的な粒子配列、粒子と気泡間の液膜厚さとして平均の膜厚、液膜内の一次元熱流、などを仮定すると、

$$\Delta T_s = (T_w - T_v) + (T_v - T_b) = \beta R_b^2 q / \lambda_l + 2\sigma T_s / \rho_v \Delta h_v R_b \quad (9)$$

ここに、 T_w と q : 基材の表面温度と熱流束、 R_b : 空隙内の気泡半径、 β : 粒子層の厚さ δ と空隙率 ϵ で定まる形状係数、である。

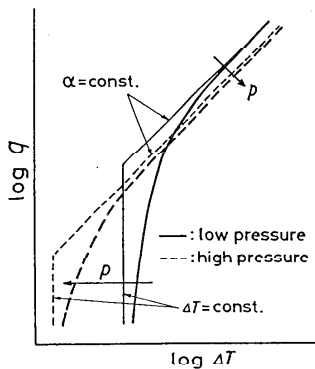


図 1 1 熱流束と圧力による伝熱特性の変化 (O'Neillらのモデル)

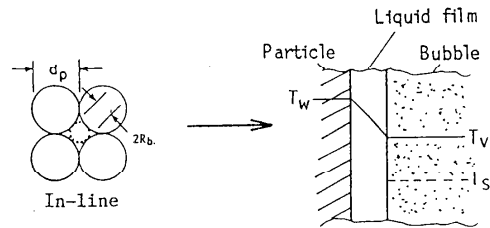
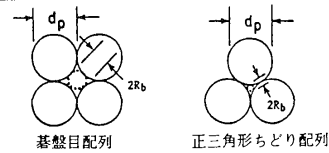


図 1 0 O'Neillらの伝熱モデル

表 2 粒子配列の形状係数 (O'Neillらのモデル)

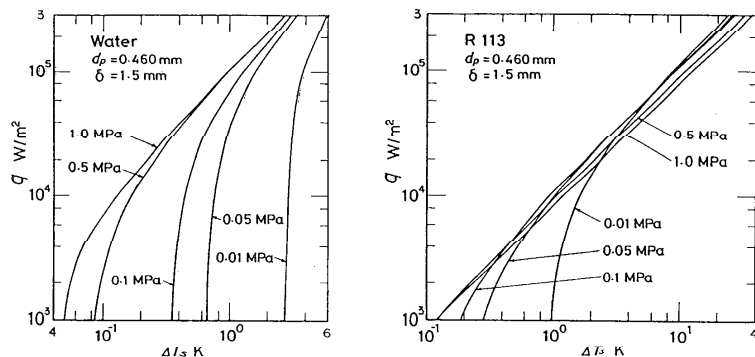
配列法	ϵ	$2R_b/d_p$	V_t/SR_b	$\beta\delta$
基盤目配列	0.476	0.414	1.54	1.04
正三角形ちどり配列	0.089	0.155	21.62	40.15



$$\beta\delta = \left[1 - (1 - \epsilon) \left\{ 1 + (2R_b/d_p)^3 \right\} \right]^{1/3} (V_t/SR_b)^3 \quad (10)$$

ここに、 V_t および S : 基材の単位面積当たりの多孔質層の体積および体積内の粒子の全表面積、である。これらの数値は基盤目と正三角形千鳥の粒子配列に対して表2の値をとる。

O'Neillらのモデルから予測される熱流束と圧力による沸騰曲線の定性的変化を図11に示す。低熱流束では液膜の熱抵抗の温度差より気泡の平衡過熱度が支配的なため ΔT_s = 一定の直線に漸近し、



(a) 水 (b) R-113
図 1 2 伝熱特性の予測結果 (O'Neillらのモデル)

高熱流束になると液膜の熱抵抗が支配的となり、熱伝達率 α ＝一定の直線に漸近する。それぞれの漸近式は、

$$\Delta T_s = 2\sigma T_s / \rho_v \Delta h_v R_b \quad (11)$$

$$\alpha = \lambda_l / \beta R_b^2 \quad (12)$$

系圧力が高くなると、沸騰曲線は矢印の方向に移り、高熱流束になると熱伝達は低下傾向を示す。

図12は $d_p=0.460\text{mm}$ 、 $\delta=1.5\text{mm}$ の基盤目配列の粒子層の沸騰曲線を大気圧の水とR-113について示す。水は気泡の過熱度支配形、R-113は液膜の熱抵抗支配形である。支配形態の違いから沸騰曲線の傾きや伝熱特性に及ぼす熱流束や圧力の影響は流した体間で違っている。

最高の熱伝達率を与える最適粒子径は、

$$d_p = 2(\lambda_l \sigma T_s / \beta \rho_v \Delta h_v q)^{1/3} \quad (13)$$

となり、高熱流束になるほど小さい粒子径の多孔質層が望ましい。O'Neillらのモデルは蒸気泡は空隙に一定の大きさで静止したままで、気泡の成長や移動に伴う多孔質内の気液循環を考えない。しかし図6や図7の実験データの傾向を定性的に説明し、多孔質層内の熱流経路のモデルとしては簡明である。

5.3 金属粒子層の静的伝熱モデル

金属粒子多孔質層内の気液の流動を考慮した動的モデルをKovalevら(15)-(18)が提案し、沸騰曲線を求めている。このモデルによると、多孔質層は図13の断面図に示すように直径の異なるチャンネル(毛细管)で構成され、ある限界半径より小径のチャンネルを液が下降し、大径のチャンネルを蒸気が上昇する。このため蒸気と液のチャンネル間に図13の下段の図のような圧力差が生じる。気液のチャンネルは横方向にも連絡し、圧力差は表面張力による毛管力と平衡し、メニスカスを形成する。メニスカスは静止のままで、熱は骨材を通してメニスカスに伝わり、蒸発に費やされる。

底面からの距離が x の位置の気液の圧力差からこの断面のメニスカス半径 $R^*(x)$ が定まる。

$$\Delta P(x) = P_v(x) - P_l(x) = 2\sigma / R^*(x) \quad (14)$$

図14はこの断面の空隙分布を示し、それぞれの空隙の断面はすべて円形で、その半径 R は $R_{\min} \leq R \leq R_{\max}$ の範囲で変化し、単位面積あたりの数密度などは図のように分布関数 $f(R)$ と累積分布関数 $\phi(R)$ で表わされるものとする。

$$\phi(R) = \int_{R_{\min}}^R f(R) dR \quad (15)$$

$$\phi(R_{\max}) = 1 \quad (16)$$

空隙の内、 $R < R^*(x)$ のチャンネルを液、 $R > R^*(x)$ のチャンネルを蒸気が占める。 x -方向に圧力差 $\Delta P(x)$ が減少するので、 $R^*(x)$ は増加する。このため蒸気と液の占有断面積が x -方向に変化するので、蒸気は上向きに加速され、液は下向きに加速される。この気液の対向一次元流れを層流と仮定すると、運動方程式は次式のようにになる。

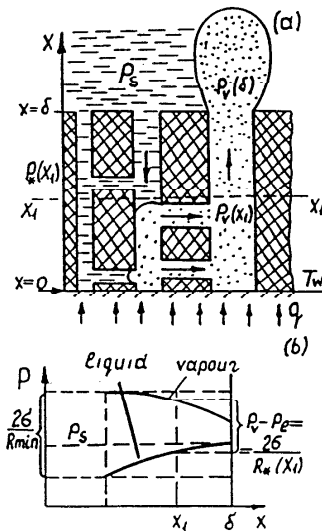


図13 Kovalevらの伝熱モデル

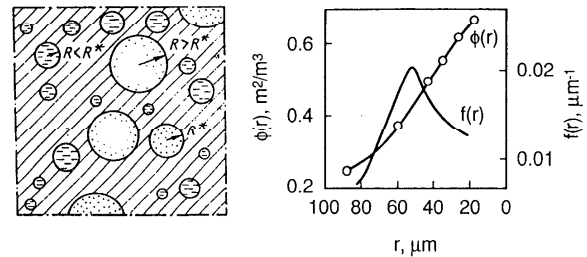


図14 空隙半径の分布 (Kovalevらのモデル)

$$\frac{\rho_v}{\varepsilon^2} u_v \frac{du_v}{dx} = -\frac{dP_v}{dx} - \frac{\mu_v}{K_v} u_v - \beta_v \rho_v u_v^2 \quad (17)$$

$$\frac{\rho_l}{\varepsilon^2} u_l \frac{du_l}{dx} = -\frac{dP_l}{dx} - \frac{\mu_l}{K_l} u_l - \beta_l \rho_l u_l^2 \quad (18)$$

ここに ε : 空隙率、 K : 透過率、 β : 抵抗係数、である。

上向きの蒸気の質量速度を $G(x)$ とすれば、下降液流と上昇蒸気流のあいだの質量保存の関係から、気液の速度 u_v と u_l は次式で表わされる。

$$u_v = \frac{G(x)}{\rho_v [1 - \varphi(R^*)]} \quad (19)$$

$$u_l = -\frac{G(x)}{\rho_l \varphi(R^*)} \quad (20)$$

式(14)、(19)、(20)の関係式を用いると、運動量方程式(17)と(18)は次式となる。ただし式(18)の右辺の最終項は無視する。

$$\frac{dR^*}{dx} \left[\frac{2\sigma}{R^{*2}} - \frac{G^2(x)f(R^*)}{\varepsilon^2} \left[\frac{1}{\rho_l \varphi^3(R^*)} + \frac{1}{\rho_v [1 - \varphi(R^*)]^3} \right] \right] = \frac{G(x)}{\varepsilon^2} \left(\frac{dG(x)}{dx} \right) \left\{ \frac{1}{\rho_v [1 - \varphi(R^*)]^2} - \frac{1}{\rho_l \varphi^2(R^*)} \right\} + \frac{v_l G(x)}{K_l \varphi(R^*)} + \frac{v_v G(x)}{K_v [1 - \varphi(R^*)]} + \frac{\beta_v G^2(x)}{\rho_v [1 - \varphi(R^*)]^2} \quad (21)$$

熱は骨材を通して蒸気に伝わるので、エネルギー式は、

$$\lambda_{sh} \frac{d^2 T_{sh}}{dx^2} = \alpha_v(x) [T_{sh} - T_s(P_v)] \quad (22)$$

ここで T_{sh} : 骨材温度、 α_v : 蒸発の体積熱伝達率で、次の理論解析値(19)を用いる。

$$\alpha_v(x) = 5.6 \varepsilon^2 (\alpha_p \lambda_l)^{1/2} \left[\pi/2 - \arctan(\alpha_p \delta^* / \lambda_l)^{1/2} \right] \times \frac{\varphi(R^*)}{R^*} \int_{R^*}^{R_{max}} \frac{f(R) dR}{R} \quad (23)$$

また底面から x までの伝熱量はすべて蒸発に費やされるので、

$$G(x) = \frac{1}{\Delta h_v} \int_0^x \alpha_v(x) [T_{sh}(x) - T_s(P_v)] dx \quad (24)$$

境界条件は、 $x=0$ の多孔質層底面で、

$$G(x) = 0, \quad \frac{dT_{sh}}{dx} = -\frac{q}{\lambda_{sh}} \quad (25)$$

$x=0$ の表面で、

$$\frac{2\sigma}{R^*} = \frac{G^2(x)}{\rho_v [1 - \varphi(R^*)]^2} + \frac{4\sigma}{D_b} \cdot \frac{dT_{sh}}{dx} = 0 \quad (26)$$

となる。これらの条件下で式(21)、(22)、(24)を解いて $G(x)$ が求まると、伝熱量が計算できる。

図15は粒径が300から500 μm のステンレス鋼粒子を厚さ1mmに焼結した多孔質伝熱面で測定した大気圧水の熱伝達率と解析結果の比較である。予測値は実験結果の傾向をよく再現している。 $q=10^6 \text{ W/m}^2$ 付近の熱伝達率の急低下は多孔質層底部が蒸気膜で覆われ乾きの始まったことによる。

この解析モデルでは多孔質骨材の熱伝導率、透過率、層厚さの影響を調べることができる。図16はその結果の例である。

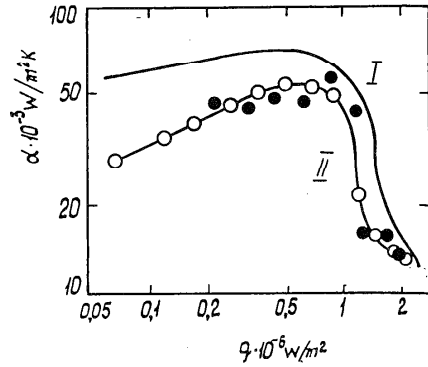


図15 伝熱特性の予測と実験の比較 (Kovalevらのモデル)

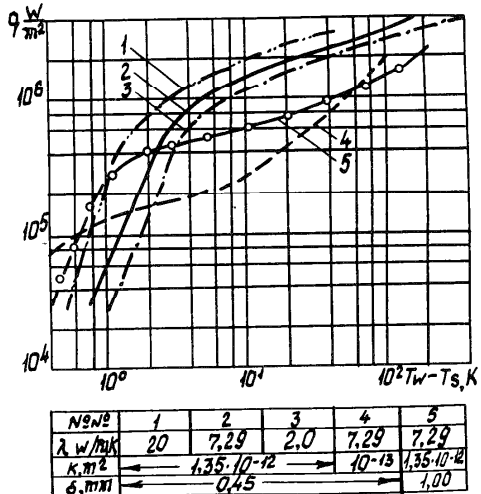


図16 多孔質層厚さ、透過率、骨材熱伝導率の影響 (Kovalevらのモデル)

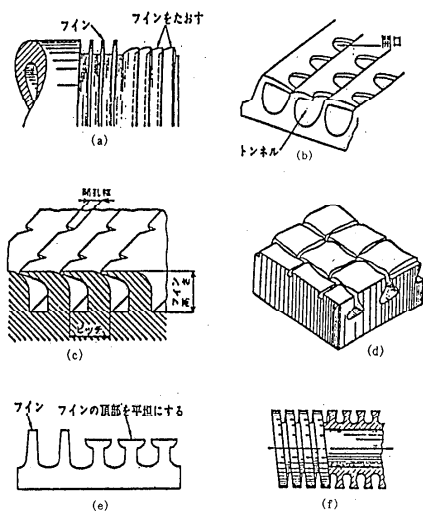


図17 微細構造高性能沸騰伝熱面の例

Dynamic bubble cycle

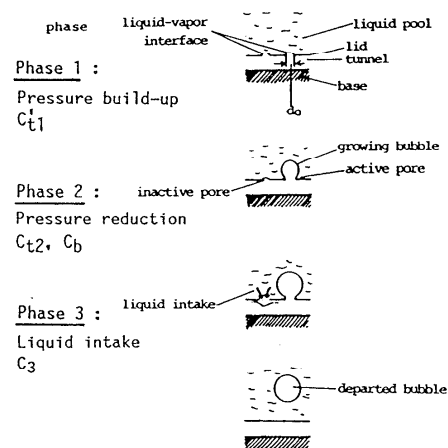


図18 中山らの伝熱モデル

6. 微細構造面の促進

実用的な高性能沸騰伝熱面としては、少ない工程でリエントラントな表面微細構造を機械加工や成形することが望まれる。図17はそのような微細構造面の例を示す。いずれもリエントラントなキャビティが規則的に高密度で配列され、各キャビティは内部のトンネルで互いに連絡している。トンネル開口部は孔状とスリット状のものがある。伝熱促進は次の要因の相乗効果によるものと考えられる。

- (1) リエントラント構造による低過熱度条件下の蒸気核捕獲と核安定化
- (2) 内部連絡による隣接キャビティの活性化
- (3) トンネル内への液体引込み
- (4) トンネル内面での液膜蒸発
- (5) キャビティ開口部からの気泡や蒸気の排出
- (6) 離脱気泡の対流効果

6.1 トンネル構造面の伝熱モデル (円形状開口)

中山ら(20)、(21)は図17(b)、(c)の等間隔で並んだ表面開口部の内側をトンネルが貫通した構造面について図18の伝熱モデルを提案している。このモデルでは気泡サイクルは①トンネル内面での液膜蒸発による圧力形成、②トンネル開口部からの気泡離脱、③気泡離脱中のトンネル内圧力低下による

不活性開口部からトンネル内への液体の引込み、および引込まれた液体の拡がりによる液膜形成、の各要素過程からなる。この一連の過程を実験定数を導入しながら解析し、実験データを参照して定数の値を定める方法により伝熱特性を予測している。

このモデルによると、伝熱面からの熱流束はトンネル内の液膜蒸発による成分 q_{lat} と、開口部から気泡が離脱浮上する過程の対流成分 q_{sen} の和で表わされる。

$$q = q_{lat} + q_{sen} \tag{27}$$

液膜の蒸発は二つの過程に分かれ、それぞれの周期 θ_1 と θ_2 のあいだの蒸発量 m_1 と m_2 の時間平均値から熱流束を求める。

$$q_{lat} = \frac{(m_1 + m_2)\Delta h_v}{(\theta_1 + \theta_2)A} \tag{28}$$

θ_1 は、気泡が離脱直後のトンネル内の初期圧力(飽和圧力)から気泡が半径 R_0 の開口部を通過するのに要する超過圧力 $2\sigma/R_0$ まで高めるまでの蒸発時間である。この間の蒸発量は、

$$\frac{dm_1}{dt} = \alpha_t A_t (T_w - T_v) \tag{29}$$

から定まる。ただし蒸発の熱伝達率 α_t と液膜の表面積 A_t が不明のため、比例定数 C_{t1} を用いて液膜の熱伝導率に関係づける。

$$\alpha_t A_t = C_{t1} \lambda_l \tag{30}$$

θ_2 は開口部に頭を出した半径 R_0 の気泡がトンネル内部から蒸気の供給を受けて成長を続け、やがて離脱にいたるまでの時間である。この間の蒸発量 m_2 は R_0 から離脱径 D_b までの気泡径の変化から求め、離脱にいたる気泡運動の解析に必要なトンネル内部からの蒸気供給速度は、式(29)と(30)において C_{11} の代わりに別の実験定数 C_{12} を用いて計算される。離脱気泡径は、

$$D_b = C_b [2\sigma/g(\rho_l - \rho_v)]^{1/2} \quad (31)$$

ここに C_b は実験定数である。

トンネル内の蒸気圧は θ_2 のあいだ下がり続け、この間に不活性な開口部から液がトンネル内に吸い込まれる。吸込まれた液膜の変位量は実験定数 C_3 を用いて排出蒸気量(m_1+m_2)に関係づける。

トンネル外側の熱流束成分 q_{sen} は平滑面に適用される2パラメータ表示で表わす。

$$q_{sen} = (\Delta T_s / C_q)^{5/3} (N/A)^{1/3} \quad (32)$$

ここに N/A : 気泡離脱点密度、 C_q : 気液の物性値から定まる実験定数、である。

解析には4個の定数、 C_b 、 C_{11} 、 C_{12} 、 C_3 が含まれている。それらの値を大気圧のR-11、水、液体窒素の実験から求めている。R-11でトンネルの形状パラメータが $D_0=0.10$ 、 $\lambda_0=0.70$ 、 $\lambda_1=0.55$ 、 $H_1=0.40$ 、 $W_1=0.25$ mmの場合、 $C_b=0.442$ 、 $C_{11}=3.13 \times 10^2$ cm、 $C_{12}=2.77 \times 10^4$ cm、 $C_3=3.172$ である。開口径のみが $D_0=0.04$ mmに変わると、 $C_{11}=3.32 \times 10^2$ cm、 $C_{12}=3.20 \times 10^4$ cm、 $C_3=5.675$ 、となる。これは

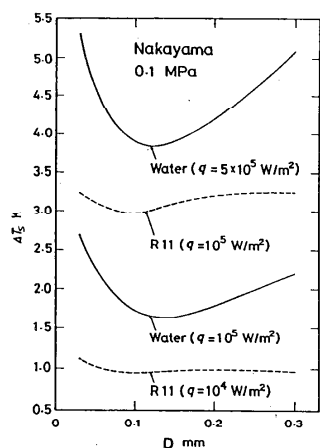


図19 開口径の影響 (中山らのモデル)

開口径の伝熱特性に及ぼす影響が大きいことを意味する。

図19は水とR-11について伝熱面過熱度に及ぼす開口径の影響を、熱流束をパラメータにとって示す。開口径 D_0 の影響は面を濡らし易いR-11の場合は比較的小さいが、面を濡らし難い水では0.1mm付近に最適径が存在する。 D_0 が小さすぎると開口部からの気泡離脱に要する過熱度が過大となり、また D_0 が大きすぎると液がトンネル内をみだし蒸気核が消失する。このため伝熱促進に対する開口径の影響は濡れ性で異なる。

中山らのモデル解析を種々の液体に適用するには液体に固有な4個の実験定数が必要である。今のところ水、R-11、液体窒素以外には経験定数の値は与えられていない。

6.2 トンネル構造面の伝熱モデルと整理式 (スリット状開口)

トンネルの開口が図17(d)、(e)、(f)のスリット状の伝熱面についてXinとChao(23)が伝熱モデルを提唱している。定式化により無次元特性数を抽出し、それらを用いた実験データの回帰分析から熱伝達整理式を得ている。

図20のトンネル形状に対し、開口部から一様温度の内面を液が膜状に流下し、その間に発生した蒸気は上向きに開口部から流出する。図20には蒸気が気泡状に描かれているが、モデルでは気泡サイクルは考えず、トンネル内の液と蒸気の流れは定常と仮定する。また液膜は底面までは達せず、底面付近は常に乾いていて伝熱に寄与しない。

液膜先端から上向きにx軸をとり、その液膜の厚さ $\delta(x)$ と単位幅あたりの液膜流量 $\Gamma(x)$ は、対向二相液膜流に対するWallisの関係式に従うとする。

$$\delta^*(x) = C [4 \Gamma(x) / \mu_l]^m \quad (33)$$

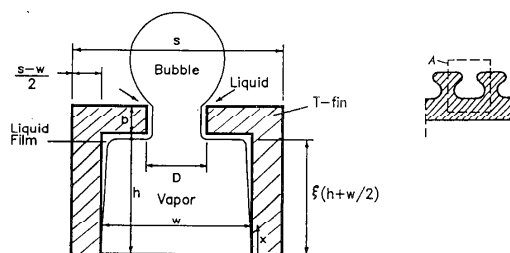


図20 XinとChaoの伝熱モデル

ここにcとmは実験定数、"*"は長さの次元をもつ $[v_l^2/g(1-\rho_v/\rho_l)]^{1/3}$ で正規化した無次元量を表わす。

液膜の流下距離は液膜に働く気流のせん断応力 τ_v と表面張力の影響を考慮する係数 ξ を用いて表わす。

$$h = \xi(H + W/2) \quad (34)$$

$$\xi = C_\xi (\sigma / \tau_v D)^n \quad (35)$$

$$\tau_v = C_f \rho_v u_v^2 / 2 \quad (36)$$

ここに C_ξ と n は定数である。

液膜の蒸発は液膜の熱伝導によるとして

$$q(x)dx = \frac{\lambda_l \Delta T_s}{\delta(x)} dx = \Delta h_v d\Gamma(x) \quad (37)$$

これを境界条件 $x=0$ で $\delta=0$ のもとで解くと、

$$\delta^*(x^*) = \left[4(m+1)C^{1/m} (\lambda_l \Delta T_s / \mu_l \Delta h_v) x^* \right]^{m/2} \quad (38)$$

これからトンネルの単位長さあたりの伝熱量が求まる。

$$Q_{lat} = 2 \int_0^h q(x) dx = \frac{2\lambda_l \Delta T_s (m+1)h^*}{\delta^*(h^*)} \quad (39)$$

開口部からの流下液はこの熱量により全量蒸発し、トンネルから流出する。このトンネル内の潜熱輸送量に対応する熱流束を q_{lat} で表わすと、

$$2\Gamma(h^*) = \frac{Q_{lat}}{\Delta h_v} = \frac{q_{lat} S}{\Delta h_v} \quad (40)$$

この式の $\Gamma(h^*)$ に式(33)を代入したうえで、 $\delta(h^*)$ に式(38)の関係をを用いると、

$$\frac{2\lambda_l \Delta T_s (m+1)h^*}{q_{lat} S} = C \left(\frac{2q_{lat} S}{\mu_l \Delta h_v} \right)^m \quad (41)$$

上式の無次元化のため、次の無次元特性数を定義する。

$$Nu = \frac{qS}{\lambda_l \Delta T_s} = \frac{q_{lat} S}{\lambda_l \Delta T_s} \left(\frac{q}{q_{lat}} \right) \quad (42)$$

$$Re = \frac{2qS}{\mu_l \Delta h_v} = \frac{4\Gamma(h^*)}{\mu_l} \left(\frac{q}{q_{lat}} \right) \quad (43)$$

$$Ar = \frac{D^3 g}{v_l^2} (1 - \rho_v / \rho_l) \quad (44)$$

$$We = \frac{\rho_v u_v^2 D}{\sigma} = \frac{(q_{lat} S)^2}{\sigma \rho_v (\Delta h_v)^2 D} \quad (45)$$

また伝熱面からの全熱流束 q はトンネル内の蒸発

成分 q_{lat} とトンネル外の顕熱輸送成分からなるが、液体のプラントル数 Pr を用いて q を q_{lat} と関係づける。

$$q / q_{lat} = C_q Pr^e \quad (46)$$

さらに開口部の蒸気速度を全蒸発量から求めると、

$$u_v = \frac{q_{lat} S}{\rho_v \Delta h_v D} \quad (47)$$

となり式(35)は、

$$\xi = C_\xi (2 / C_f We)^n \quad (48)$$

以上の関係式を用いて式(41)を無次元化すると、

$$Nu = \frac{2^{n+1} (m+1) C_\xi C_q^{m+1}}{C C_f^n} \left(\frac{2H+W}{2D} \right) Ar^{1/3} \times Re^{-m} We^{-n} Pr^{e(m+1)} \quad (49)$$

XinとChaoは上式の比例定数項と指数を大気圧の水、エタノール、R-113の実験データの回帰分析から定め、次の整理式を得ている。

$$Nu = 3.76 \left(\frac{2H+W}{2D} \right) Ar^{1/3} \times Re^{-0.15} We^{0.29} Pr^{0.76} \quad (50)$$

無次元パラメータの範囲は、

$$0.016 < Re < 7.03$$

$$1.4 \times 10^{-6} < We < 0.17$$

$$1.76 < Pr < 7.86$$

また形状パラメータの範囲は、

$$0.09 \text{ mm} < D < 0.24 \text{ mm}$$

$$0.6 \text{ mm} < W < 0.8 \text{ mm}$$

$$0.8 \text{ mm} < S < 1.2 \text{ mm}$$

$$0.5 \text{ mm} < H < 1.0 \text{ mm}$$

上式の予測精度は $\pm 30\%$ 以内である。

6.3 トンネル構造面の伝熱モデル

ガラス板でトンネル壁を作り、内部の流動様相を観察した中山らの結果(24)によれば、熱流束の値により図21の三つの気液流動パターンが現われる。中山らの解析対象は比較的高熱流束の蒸気がトンネル内を充満する場合である。WebbとHaider(25)は中程度の熱流束で液スラグと蒸気スラグが交互に並存する場合の伝熱モデルを提案している。

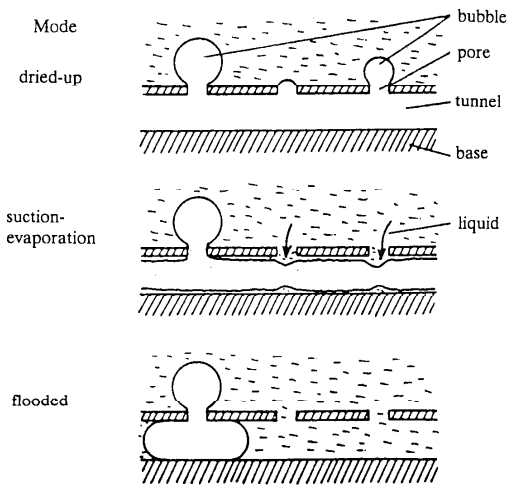


図 2 1 トンネル内の沸騰パターン

WebbとHaiderは図22に示すように解析の簡単化のため、ピッチ S_f で並んだトンネルは円形断面で、開口部は幅が S_g のスリット状とする。トンネル内面から気液界面のメニスカスへの伝導熱量 Q_m による蒸発で蒸気スラグは成長し、蒸気スラグの円筒部と壁の熱流は無視する。蒸気スラグは開口部から気泡離脱直後の最小の圧力 P_{min} と容積 V_{min} の状態と、開口部から半球状に頭を出したときの最大の圧力 P_{max} と容積 V_{max} の状態のあいだで気泡離脱頻度 f でサイクルを反復する。図22はその過程を示す。液スラグは両隣の蒸気スラグの膨張収縮の

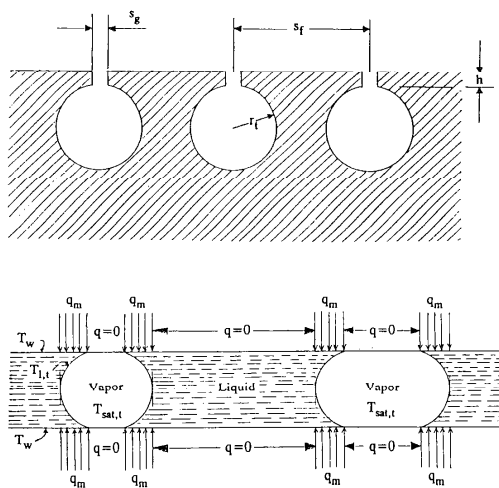


図 2 2 WebbとHaiderの伝熱モデル

体積変化に同期して左右に周期運動し、蒸発による液量変化を無視すると液スラグは常に一定の長さ x_l に保たれる。

離脱気泡径を D_b とすれば、

$$P_{max} = P_{sat} + 4\sigma / S_g \quad (51)$$

$$P_{min} = P_{sat} + 4\sigma / D_b \quad (52)$$

よって、

$$\Delta P_{max} = P_{max} - P_{min} = 4\sigma(1/S_g - 1/D_b) \quad (53)$$

開口部からの気泡の離脱頻度を f とすれば、液スラグの運動方程式は、

$$\frac{\partial u}{\partial t} = \frac{\Delta P_{max} \cos(2\pi f t)}{\rho_l x_l} + \frac{v_l \partial}{r \partial r} \left(r \frac{\partial u}{\partial r} \right) \quad (54)$$

これを初期条件 $u(r, t)=0$ 、境界条件 $u(r_t, t)=0$ 、 $\partial u(0, t)/\partial r=0$ のもとで解くと、その結果からメニスカスの最大変位 δ が計算できる。

$$\delta = \frac{2}{r_t} \int_0^{1/2f} \int_0^{r_t} u r dr dt = \frac{2 \Delta P_{max} F(r_t)}{\rho_l x_l (2\pi f)^2} \quad (55)$$

ここに $F(r_t)$ は r_t の既知関数である。

最大と最小の蒸気スラグの質量差はメニスカスからの蒸発量に等しく、また開口部から離脱する気泡の蒸気量にも等しい。

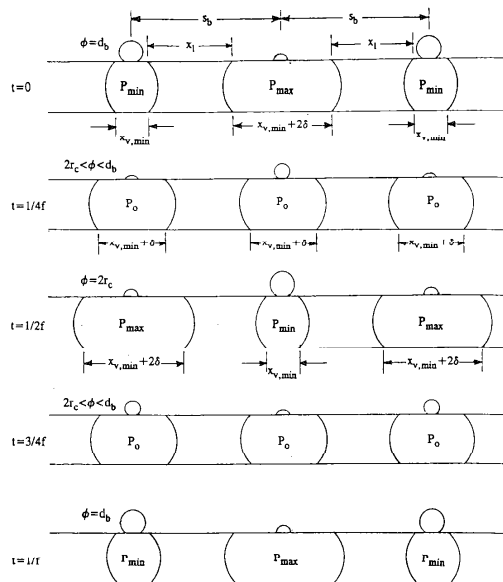


図 2 3 蒸気スラグの成長離脱サイクル (WebbとHaiderのモデル)

$$M_v = M_{\max} - M_{\min} = \frac{2}{\Delta h_v} \int_0^f Q_m dt$$

$$= \frac{2Q_m}{f \Delta h_v} = \pi \rho_v D_b^3 / 6 \quad (56)$$

よって気泡の離脱頻度は、

$$f = 12Q_m / (\pi \rho_v \Delta h_v D_b^3) \quad (57)$$

メニスカスは接触角 θ でトンネル内面に接する欠球面と仮定し、トンネル内面から欠球面への伝熱量 Q_m は、液の運動を無視して熱伝導から計算すると、

$$Q_m = 2\pi r_t \lambda_l \Delta T_s B(\theta) \quad (58)$$

ここに $B(\theta)$ は θ の既知関数である。

図23に示されているように気泡離脱点のピッチ S_b は、

$$S_b = x_{v,\min} + x_l + d \quad (59)$$

で表われ、最大と最小の蒸気スラグの体積差と離脱気泡体積の等値関係、

$$V_{\max} - V_{\min} = 2\pi r_t^2 \delta + \pi S_g^3 / 12 = \pi D_b^3 / 6 \quad (60)$$

から、

$$\delta = (D_b^3 - S_g^3 / 2) / (12r_t^2) \quad (61)$$

この δ を式(55)に代入すると x_l が求まる。

気泡離脱点の密度は、

$$N/A = 1 / S_f S_b \quad (62)$$

であるから、トンネル内部の蒸発による熱流束は

次式で計算される。

$$q_{lat} = 2Q_m / S_f S_b \quad (63)$$

トンネルの外側の対流による熱流束成分 q_{sen} はMikicとRohsenowの過熱境界層の剥ぎとりモデルから

$$q_{sen} = 2(\pi \rho_l c_l \lambda_l f)^{1/2} D_b^2 (N/A) \Delta T_s \quad (64)$$

したがって、全熱流束は、

$$q = q_{lat} + q_{sen} \quad (65)$$

図23はこのモデルによる熱伝達の予測結果を中山らのR-11の実験結果と比較したものである。解析には気泡の離脱径を必要とするが、式(31)の経験定数 C_b の取り方で予測結果に差がでている。WebbとHaiderのモデルは C_b 以外の経験定数は不要であり、この点で進んでいる。

7. むすび

プール核沸騰の受動型伝熱促進法に限定して、熱伝達予測のための整理式と解析モデルの現状について述べた。解析モデルには多くの経験定数や多孔質層の空隙に関する統計的情報を要するものもある。しかし多孔質層や微細構造内部の伝熱のメカニズムの解明が進めば、モデルも改良され、多孔質層や微細構造の最適形状パラメータの推定も可能となるはずである。この点でWebbとHaiderのモデルが先行している。

引用文献

- (1) Bergles, A.E.: Enhancement of Heat Transfer, Proc. 6th Int. Heat Transfer Conf., KS(9) (1978), 89-108.
- (2) F. Fujita, H. Ohta, S. Uchida: NuclSeate Boiling Heat Transfer within a Vertical Narrow Space, JSME Int. Journal, Ser. II, 31(3), 513-519(1988).
- (3) Yilmaz, S., and Westwater, J.W.: Effect of Commercial Enhanced Surfaces on the Boiling Heat Transfer Curve, Advances in Enhanced Heat Transfer-1981, ASME, HTD-Vol.18(1981), 73-91.
- (4) Yilmaz, S., Palen, J.W., and Taborek, J.: Enhanced Boiling Surfaces as Single Tubes and Tube Bundles, Advances in Enhanced Heat Transfer-1981, ASME, HTD-Vol.18(1981).
- (5) Bergles, A.E., and Chyu, M.C.: Characteristics of Nucleate Pool Boiling from Porous Metallic Coatings, J.Heat Transfer, 104-2(1982), 279-285.

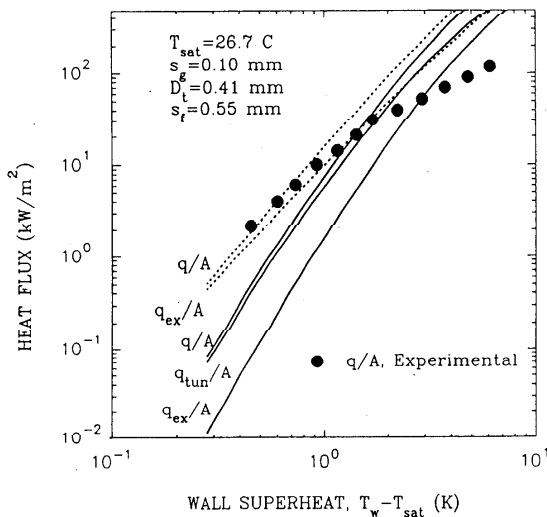


図24 伝熱特性の予測と実験の比較 (WebbとHaiderのモデル)

- (6) Marto, P.J., and Lepere, V.J.: Pool Boiling Heat Transfer from Enhanced Surfaces to Dielectric Fluids, *J.Heat Transfer*, 104-2(1982), 292-299.
- (7) Ayub, Z.H., and Bergles, A.E.: Pool Boiling from GEWA Surfaces in Water and R-113, *Warme- und Stoffubertragung*, 21-4(1987), 209-219.
- (8) Yilmaz, S., Hwalck, J.J., and Westwater, J.N. : Pool Boiling Heat Transfer Performance for Commercial Enhanced Tube Surface, ASME Paper No. 80-HT-41(1990).
- (9) Ayub, Z.H., and Bergles, A.E.: Pool Boiling Enhancement of a Modified GEWA-T Surface in Water, *J.Heat Transfer*, 110-1(1988), 226-268.
- (10) Memory, S.B., Chilman, S.V., and Marto, P.J.: Nucleate Pool Boiling Turbo-B Bundle in R-113, *J. Heat Transfer*, 116-3(1994), 670-678.
- (11) Memory, S.B., Sugiyama, D.C., and Marto, P.J.: Nucleate Pool Boiling of R-114 and R-114-Oil Mixtures from Smooth and Enhanced Surfaces-I. Single Tubes, *Int. J. Heat Mass Transfer*, 38-8(1995), 1347-1361.
- (12) Nishikawa, K. , Ito, T., and Tanaka, K.: Augmented Heat Transfer by Nucleate Boiling at Prepared Surfaces, *Proc. 1983 ASME/JSME Thermal Eng. Conf.*, 1(1983), 387-393.
- (13) Kajikawa, T., Takazawa, H., and Mizuki, M.: Heat Transfer Performance of Metal Fiber Sintered Surfaces, *Heat Transfer Engineering*, 4-1(1983), 57-66.
- (14) O'Neill, P.S. , C.F. Gottzman, C.F., and Terbot, J.W.: Novel Heat Exchanger Increases Cascade Cycle Efficiency for Natural gas Liquefaction, *Advances in Cryogenic Engineering*, 17(1972), 420-437.
- (15) Kovalev, S.A., and Solov'ev, S.L.: Model of Heat Transfer in the Boiling of Liquid at a Porous Surface, *High Temperature*, 22-6(1985), 899-904.
- (16) Kovalev, S.A., Solov'yev, S.L., and Ovodkov, O.A. : Liquid Boiling on Porous Surfaces, *Heat Transfer - Soviet Research*, 19-3(1987), 109-120.
- (17) Kovalev, S.A., Solov'ev, S.L., and Ovodkov, O.A. : Theory of Boiling Heat Transfer on a Capillary-Porous Surface, *Proc. 9th Int. Heat Transfer Conf.*, 2(1990), 105-110.
- (18) Polezhaev, Yu.V., and Kovalev, S.A. : Modelling Heat Transfer with Boiling on Porous Structures, *Thermal Engineering*, 37-12(1990), 617-620.
- (19) Solov'ev, S.L., and Kovalev, S.A., : Heat Transfer in the Evaporation of a Liquid on a Porous Surface, *High Temperature*, 22-3(1984), 431-439
- (20) Nakayama, W. , Daikoku, T., Kuwahara, H., and Nakajima, T.: Dynamic Model of Enhanced Boiling Heat Transfer on Porous Surfaces, Part I: Experimental Investigation, *J. Heat Transfer*, 102-3(1980)445- 450.
- (21) Nakayama, W. , Daikoku, T., Kuwahara, H., and Nakajima, T.: Dynamic Model of Enhanced Boiling Heat Transfer on Porous Surfaces Part II : Analytical Modeling, *J. Heat Transfer*, 102-3(1980),451-456.
- (22) Nakayama, W., Daikoku, T., and Nakajima, T. : Effects of Pore Diameters and System Pressure on Saturated Pool Nucleate Boiling Heat Transfer from Porous Surfaces, *J.Heat Transfer*, 104-2 (1982), 286-291.
- (23) Xin, M.D., and Chao, Y.D.: Analysis and Experiment of Boiling Heat Transfer on T-Shaped Finned Surfaces, AICHE paper, 23rd National Heat TransferConf., Denver, Colorado, (1985).
- (24) Nakayama, W., Daikoku, T., and Nakajima, T. : Effects of Pore Diameters and System Pressure on Saturated Pool Nucleate Boiling Heat Transfer from Porous Surfaces, *J.Heat Transfer*, 104-2(1982), 286-291.
- (25) Webb, R.L., and Haider, I. : An Analytical Model for Nucleate Boiling on Enhanced Surfaces, *Proc. Pool and External Flow Boiling Conf.*, 1(1992), 345-360.

複雑な系におけるふく射伝熱

Radiative Transfer in Complicated System

円山 重直 (東北大学流体科学研究所)

Shigenao MARUYAMA (Institute of Fluid Science,
Tohoku University)

1. はじめに

新しい学問領域として、複雑系や複雑性についての議論が盛んに行われている。複雑系 (complex system) や複雑性 (complexity) については諸種の定義があり必ずしも明確に確立されているわけではないが、現象が本質的に複雑であるために、カオス的に振舞ったりある種の法則性をもつ挙動を示すものを指すようである。素過程を積み上げることによって現象が説明できるという従来の学問体系とは異なった新しいパラダイムとして提唱されている。

ふく射伝熱は微視的観点からも巨視的観点からも取り扱いが複雑で、多くの伝熱研究者が出来れば避けて通りたい分野のようである。特に、ふく射性ガスが系に含まれると、ふく射伝熱の素過程が量子力学の領域にも及ぶため、なおさら煩雑になってしまう。

では、形状や熱条件が複雑な系におけるふく射伝熱は、複雑系なのだろうか。答えはノーである。将来この分野が複雑系として扱われることも考えられるが、線形の電磁波の重ね合わせで記述できる現在のふく射伝熱は、本質的に複雑系ではない。

素過程は明快であるが、パラメータが膨大なために、ふく射伝熱解析を工学で実用上利用可能な解析手法にするためには多くのモデル化が必要である。そこで、本稿では「複雑な系 (complicated system)」におけるふく射伝熱について扱う。つまり、ふく射伝熱の素過程からそれを記述する諸種のモデル化について述べ、工業的に利用可能なふく射伝熱の解析手法について紹介する。

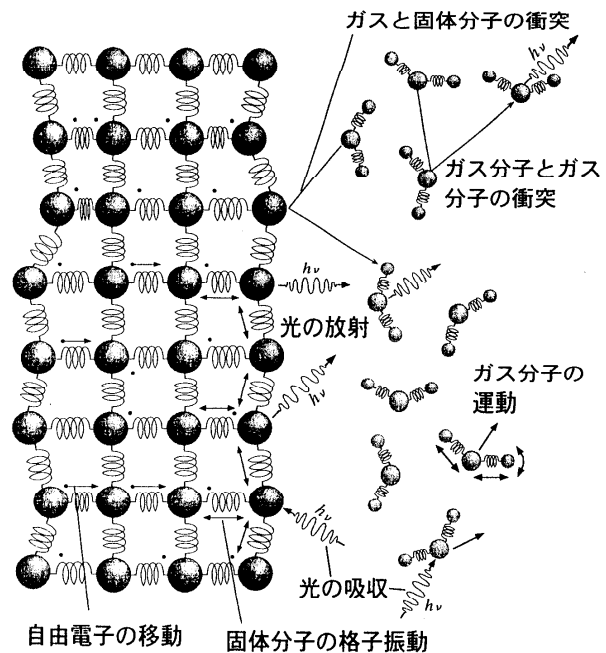


図 1: 固体と気体分子の集合と電磁波との相互関係

2. ふく射伝熱の素過程

有限温度の物体は、内部エネルギーを持つ。内部エネルギーは物体を作り上げているたくさんの分子・原子の不規則・複雑運動である一つのエネルギー形態である。いま、図 1 に示すような気体分子と固体分子の集団を考える。分子集団は、近傍の分子と振動を繰り返し、長時間経た後に一定状態になる。この状態が熱平衡状態である。微視的に見ると分子同士はエネルギーの授受を行っているが、熱平衡状態で巨視的なエネルギーの移動は無くなる。

一方、物質を構成する原子は電荷を持っているので、原子が振動することによって電磁波を放射する。

したがって、物質中の荷電粒子が電磁波を出すことなしに、物質の力学的相互作用のみで平衡状態を保つことは不可能である。もし、図1の分子集団を、物質と内部の運動エネルギーだけ遮断し、電磁波を透過する物質で隔離すると、原子中の電荷の振動により電磁波が放出されるので、系の内部エネルギーが減少する。系が熱平衡状態に保たれるためには、電磁波も空間に閉じ込める必要がある。このような熱平衡状態における空洞からの放射がプランクの黒体ふく射⁽¹⁾である。熱平衡状態では巨視的なエネルギーの移動はないから、伝熱現象も起こらない。熱ふく射は熱平衡状態にある物体から放射される電磁波であるから、ふく射伝熱は明らかな矛盾を含むことになる。

この矛盾を解決するために、局所熱平衡の概念を導入する。いま、十分数の多い粒子で構成されている局所粒子集団を考える。この局所粒子集団は互いに衝突や干渉を繰り返しながら、その衝突の時間間隔に比べてゆっくりと内部エネルギーが変化する。この時、粒子の各自由度ごとの平均エネルギーは等しく、その分布はボルツマン分布をしている。このような場合、系は局所熱平衡にあるという。

局所熱平衡系では温度分布が一様でないので熱の移動は起こるが、その変化は物質の内部運動の緩和時間に比べて緩やかであり、系内の粒子群は各時間で熱平衡状態になっている。従って、局所熱平衡状態の物体から放射される電磁波も熱平衡状態の熱ふく射と見なすことができる。

3. ふく射の素過程における複雑さ

3.1 ふく射性ガス

二酸化炭素や水蒸気、メタン等のふく射性ガスは赤外線領域のふく射を吸収・放射する。このようなガス分子は、図1に示すように、分子間の結合が電磁波によって振動することと分子自身が回転する時の運動量変化が赤外域の電磁波のエネルギーと同一であるために起こる現象である。従って、このガス分子による吸収・放射は電磁波の波長に強く依存する。

ガスの回転運動や振動によるエネルギー変化が電磁波の吸収バンドとなるが、それは量子効果によって飛び飛びの値をとる。単独ガス分子の吸収波長は一定であるが、ガス分子自身が運動することによるドップラー効果や分子相互の衝突による周波数変化により吸収波長に広がりを生じる。これが、Doppler

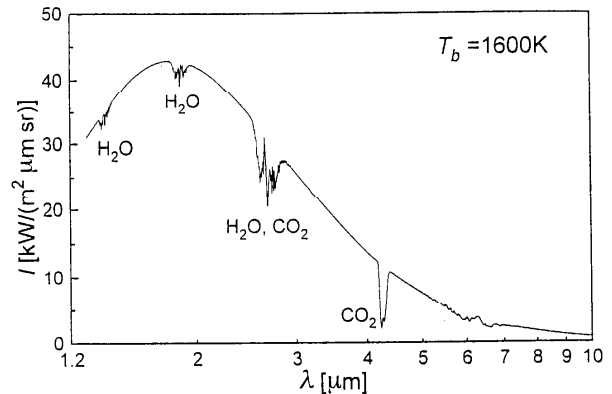


図2: 二酸化炭素と水蒸気を含む空気層を透過した黒体ふく射

及び Lorentz 広がりである。

図2は、1600Kの黒体ふく射が空気層を透過したときのふく射強度を荒い分解能($\Delta\eta = 10 \text{ cm}^{-1}$)の分光器で測ったものである。図2の $4.3\mu\text{m}$ の吸収バンドを細かい分解能で計測すると、図3aとなり、さらに詳細なデータベースを用いて計算すると図3cのようになっている。気象データの解析で用いられるデータベース HITRAN⁽²⁾では常温域の二酸化炭素の吸収線が60,802本存在し、その吸収線広がりや温度や気圧によって変化する。

これらの吸収スペクトルを考慮して単色ふく射伝熱を解析すれば、その積分として伝熱量が計算できる。この単色計算を厳密に行う限りにおいてふく射の輸送方程式は厳密に満足されている。しかし、図3cの分解能で計算することは、現在のスーパーコンピュータを以ってしても容易なことではない。

これらの、困難さを克服する手段として古典的な Hottel のガス放射率のチャート⁽³⁾がある。これは、ガスの吸収率を測定し、等温ガス塊の放射率をガス温度と光路長の関数として表したものであり、等温の半球ガスの放射率を計測したものではない。このチャートはふく射伝熱量の簡単な推定には便利であるが、ガスのふく射率が物性値として普遍的に存在するかの錯覚を与えるので注意が必要である。実在ガスは遥かに複雑な吸収バンド構造をしている。最近では、Hottel のチャートの精度は最近のガスモデルと比較して精度が低いことも指摘されている⁽⁴⁾。

ふく射に対するガスの透過率や放射率を実用的な波長分解能で解析する場合には、種々のガスモデルが導入される。工業上利用できるモデルとして、Ed-

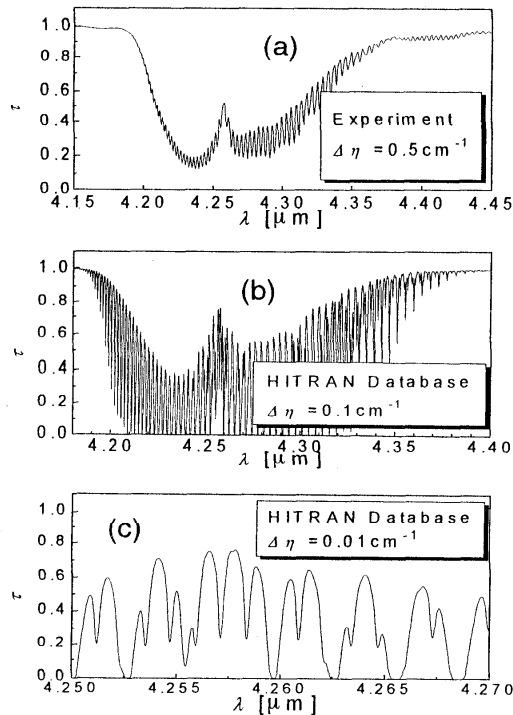


図 3: 二酸化炭素の $4.3\mu\text{m}$ 吸収バンドの微細スペクトル構造

wars らが纏めたガスモデル⁽⁵⁾が用いられている。常温近傍のガスのふく射特性とモデル化については Goody と Yung⁽⁶⁾によって広範囲な議論がされている。

ふく射伝熱解析が実用的に可能な波長分解能でのガスの吸収率は Beer の法則を満足せず、ガス吸収や放射の普遍的な量であるべき単色吸収係数 κ [m^{-1}] がふく射が伝播する光路長の関数となってしまう。従って、ガスモデルを使う場合には、ふく射伝熱のテキストで扱われているふく射性媒体のふく射エネルギー輸送方程式がそのまま適用できない。

ふく射性ガスの伝熱を効率的に計算するために CK 法 (Correlated-k Method)⁽⁷⁾や WSGG モデル (Weight-Sum of Gray-Gas Model)⁽⁸⁾が提唱されている。特に、CK 法概念を用いると比較的少ない波長分割でふく射の輸送方程式で使われる単色減衰係数や吸収係数をそのまま導入できるので、散乱媒体を含むふく射性ガスにも適用できる利点がある⁽⁹⁾。

3.2 媒体による電磁波の散乱

ふく射は電磁波なので吸収されるだけでなく物体と相互に干渉してその進行方向を変える。物体のス

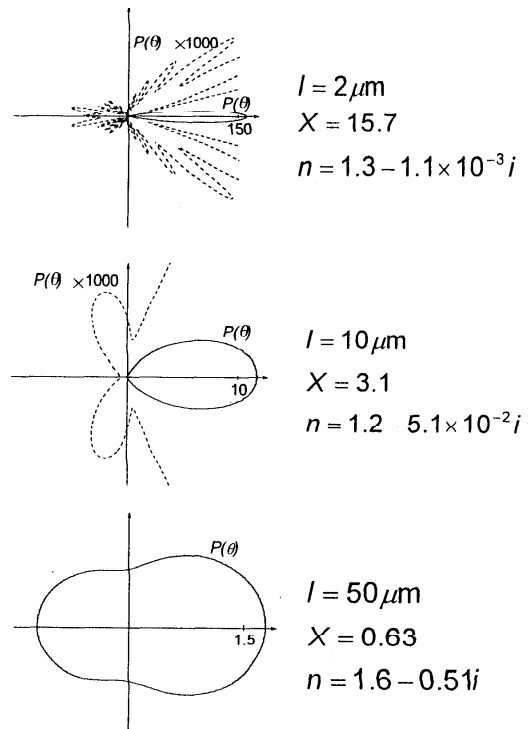


図 4: 直径 $10\mu\text{m}$ の水滴の各波長における位相関数

ケールが電磁波の波長より大きい場合は屈折や反射として認識される。微粒子や繊維媒体のようにふく射の波長と同程度か小さいスケールの物体では電磁波の回折や反射・屈折が区別できない。電磁波が物体との相互作用で方向を変える現象を散乱という。この領域では、ふく射を波動として扱うことが必要となる。

断熱材や火炉におけるふく射伝熱、さらに地球環境に及ぼす雲やエアロゾルの影響などに電磁波の散乱は重要である。粒子に電磁波が照射されたとき、どのように電磁波が方向を変えるかを表したものが位相関数 $P(\theta)$ である。これは、電磁波の伝播を記述する Maxwell の波動方程式を解くことによって求められる。球や無限円柱などの単純な形状については Maxwell の波動方程式の解が解析的に得られている^{(10),(11)}。

図 4は直径 $10\mu\text{m}$ の水滴が電磁波照射を受けた時の散乱に対する位相関数 $P(\theta)$ を Mie 理論⁽¹¹⁾によって計算したものである。これは、入射電磁波の波長と液滴直径およびその波長における水の複素屈折率 $n = n - ik$ から導出できる。位相関数は、波長によって著しく異なった様相を示していることがわかる。

ふく射強度は位置と方向の関数なので、媒体にあらゆる角度で入射するふく射に対して図4の散乱を考慮しなければいけないので、ふく射伝熱の解析には前節とは異なった煩雑性が生じる。一般に、放射・吸収・散乱性媒体のふく射伝熱は放射・吸収性媒体に比べて解析が著しく困難になる。断熱材や衣服のように媒体が繊維で構成される場合もふく射伝熱の対象として重要である⁽¹²⁾。散乱の位相関数は繊維の方向にも依存するので、媒体の指向性も考慮する必要がある。

波長に比べて十分大きな固体面の反射・吸収特性は、物体を構成する粒子や電子と電磁場の振動によってある程度説明できる⁽¹³⁾。この場合、ガスで見られるような量子効果は常温域では顕著に表れない。実在面のふく射特性は、物体の状態だけでなく酸化膜や汚れによって大きく変化するので、純物質のふく射特性が工業的に用いられている材料に適用できることは希である。物体面の反射は波長スケールの表面形状にも依存するので、表面荒さを記述する数値モデルが提示されている⁽¹⁴⁾。

4. 複雑形状物体間のふく射エネルギー交換

4.1 解析対象の複雑さと実用伝熱解析

前章までは、ふく射伝熱の素過程における複雑さを考えてきたが、工業上重要な解析対象となる形状は複雑な形状をしている場合が多い。図5に示すように、教科書で扱われている比較的単純な形状についてふく射伝熱解析を行うことは難しくないが、それを少しでも逸脱すると取り扱いが極端に難しくなってしまう。工学上の対象となる形状は、これらの例より遥かに複雑なので、それらの扱いはいっそう煩雑になる。

ふく射伝熱でも原理的に任意形状に適用可能は手法は多く提出されているが、実際それらの手法を有限要素法で扱われる形状の様な物体に適用しようとすると実用上不可能な場合も多い。本章では、形状の複雑な物体間のふく射伝熱の扱い方を述べ、次章で、ふく射性媒体も含む統一的な手法について解説する。

4.2 電磁波伝播過程におけるスケール効果

物体のスケールが、電磁波の波長に比べて非常に大きい時、電磁波の伝播はふく射束として取り扱うことができる。この領域で、電磁波の伝播は幾何光学で解析でき、物体間のふく射エネルギーの伝播も

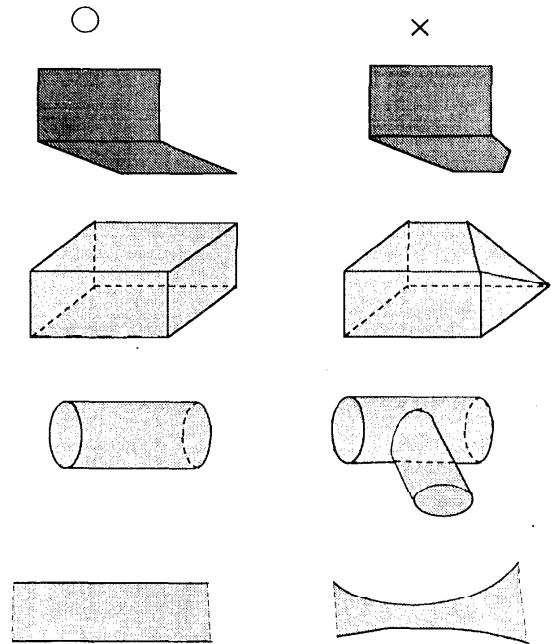


図5: ふく射伝熱で解析が簡単な形状と難しい形状

物体の形状やふく射物性で定まり、物体と電磁波との回折現象や、電磁波相互の干渉などは無視できる。

対象とする物体や取り扱う系の大きさが電磁波と同程度の大きさになると、ふく射エネルギーの伝播は、もはやエネルギー束としての取り扱いが出来なくなり、3.2節で示したように、電磁波を波動として取り扱うことが必要となる。波動光学（または物理光学）と呼ばれる領域である。この領域では、電磁波相互の干渉や偏光、波動と物体との干渉効果が著しく現われる。ただし、惑星間物質による光散乱のように、対象とする物体のスケールが大きい時でも、光の角度変化が小さい場合には、波動光学的考察が必要である。

幾何光学が適用出来る物体間の巨視的ふく射エネルギー交換の解析に、しばしば形態係数が用いられる。形態係数は、従来から物体の形状と物体間の位置関係のみの関数、つまり幾何学的量として扱われてきた⁽¹⁵⁾。幾何学量としての形態係数の定義では、表面が鏡面の時のように拡散面と異なる場合に取り扱いが難しくなる。そこで、形態係数本来の物理的意味に立ち帰り、次の定義を導入する。

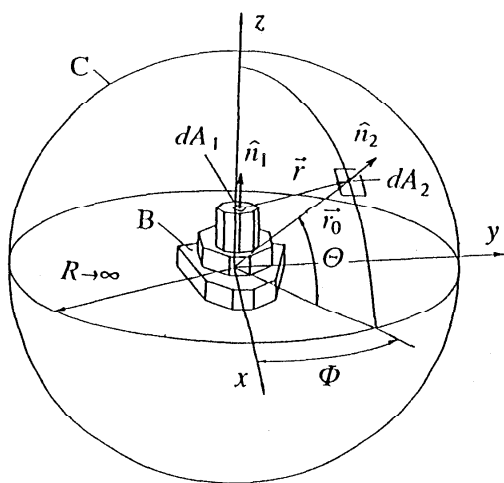


図 6: 単一物体からのふく射モデル

形態係数 $F_{i,j} \equiv$

$$\frac{\text{表面 } A_j \text{ に到達するふく射エネルギー}}{\text{表面 } A_i \text{ から放射されるふく射エネルギー}} \quad (1)$$

上式で定義の形態係数は、もはや形状のみの関数ではなく、面 A_i の放射特性の関数でもある。

4.3 任意黒体間のふく射エネルギー交換

物体面間のふく射エネルギー交換に形態係数を用いる場合、単純な形状の形態係数については非常に多くある⁽¹⁶⁾。しかし、これらの古典的手法を実際の複雑形状に適用しようとすると、不可能な場合が多い。計算可能な場合でも、非常に煩雑な計算が必要となる。

物体が黒体で均一温度の時、任意形状物体のふく射伝熱が比較的容易に計算可能である⁽¹⁷⁾。

図 6 に示すように、温度 T_1 で有限の大きさをもつ任意形状黒体 B と、それを囲む半径 R の球面 C を通過するふく射エネルギーを考える。立体角 $d\omega$ が一定の場合には、球面 C の半径 R が変化しても単位時間当たり放射されるふく射エネルギー量 dQ は変化しない。 $R \rightarrow \infty$ の極限を考えると、B から周囲に放射される単位時間当たりのふく射エネルギー量 Q は次式となる⁽¹⁷⁾。

$$Q = \frac{\sigma}{\pi} T^4 \int_{-\pi/2}^{\pi/2} \int_{-\pi}^{\pi} \left[\int_B \cos \phi_1 dA_1 \right] \times \cos \Theta d\Psi d\Theta \quad (2)$$

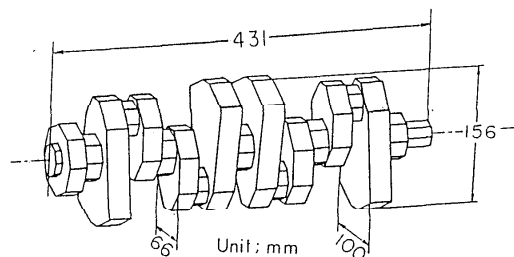


図 7: 自動車用クランクシャフトの多面体モデル

上式右辺の [] の積分は、 $\vec{r}_0(\Theta, \Psi)$ と垂直な平面上に物体 B を投影した時の全投影面積に相当する。この投影面積は、現在発達しているコンピュータグラフィックの手法を用いて容易に計算できる。

既存のふく射解析の多くは面要素間の形態係数を基礎に解析しているが、任意形状三次元物体では形態係数を定義するための基準面積も明確に定められない場合が多い。そこで、物体形状に固有の値をとるパラメータとして、式 (2) 中の積分をふく射有効面積 A^R として次式で定義する⁽¹⁷⁾。

$$A^R = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi/2}^{\pi/2} \int_{-\pi}^{\pi} \left[\int_B \cos \phi_1 dA_1 \right] \cos \Theta d\Psi d\Theta \quad (3)$$

かくて温度 T_1 の等温黒体 B を囲む球面 C が温度 T_∞ の等温黒体面で構成される時、B から C へのふく射伝熱量 Q は次式によって簡単に表わされる。

$$Q = \sigma(T_1^4 - T_\infty^4)A^R \quad (4)$$

つまり、 A^R は物体 B と周囲環境との直接交換面積⁽³⁾ に相当する。

任意形状三次元物体の黒体ふく射伝熱の例として、図 7 に示す自動車用クランクシャフトの多面体モデルを考える。このクランクシャフトの有効ふく射面積 A^R [m²] を計算した結果を図 8 に示す。 A^R は、投影面積を求めるための画面分割数 n_z 、 n_y と、式 (3) の積分を求めるための球座標の分割数 n_θ 、 n_ϕ の増大とともに急激に一定値に収束することがわかる。このように、物体形状が複雑な場合でも、画面要素数が比較的少ないにもかかわらずふく射有効面積を精度よく表わすことができる。また、本節の手法はピンフィン放熱器⁽¹⁸⁾ などの複雑形状に対しても適用可能である。

4.4 鏡面を含む任意形状面間のふく射伝熱

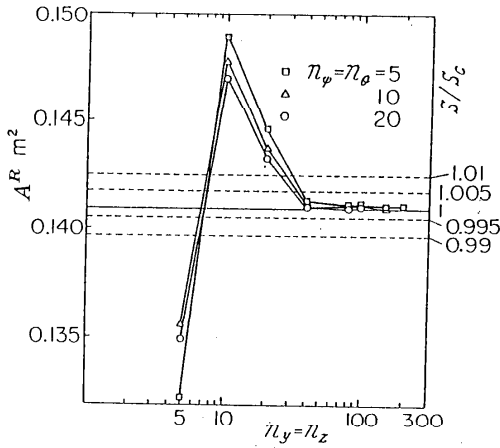


図 8: クランクシャフトの有効ふく射面積 A^R

灰色体のふく射伝熱解析法は、多くの伝熱の教科書に記述されているように、種々の手法がある⁽²¹⁾。現在は、コンピューターが発達し、大規模なマトリクス計算が容易になっているため、個々の問題に対して別個に考える解析的な手法よりは、有限要素法や境界要素法のように、あらゆる形状に適用できる汎用性のある手法が有効であろう。

そこで本節では、Hottel のゾーン法⁽³⁾を進展させ、灰色・拡散面に適用可能な任意形状三次元物体面間のふく射伝熱解析法⁽¹⁹⁾について述べる。

物体面が完全な乱反射面であることは少なく、反射特性に指向性をもつ場合が多い。特に金属や半導体の多くは鏡面反射が顕著である。本節では、任意形状の灰色散乱面、鏡面または鏡面・散乱面の複合面が混在する系のふく射伝熱のモデル化と解析法^{(19),(20)}を示す。

本節では図 9 に示す反射モデルを考える。つまり、面要素が灰色で鏡面と拡散面の複合面である場合を考える。 A_i に入射したふく射は、鏡面反射成分と乱反射成分に分けられるから、全放射率 ϵ_i 、全吸収率 α_i 、全反射率 ρ_i 、全鏡面反射率 ρ_i^S 、全乱反射率 ρ_i^D の関係は次式となる。

$$1 - \epsilon_i = 1 - \alpha_i = \rho_i = \rho_i^S + \rho_i^D \quad (5)$$

ここで、 ϵ, α, ρ は物体温度やふく射の入射角によらず一定としている。

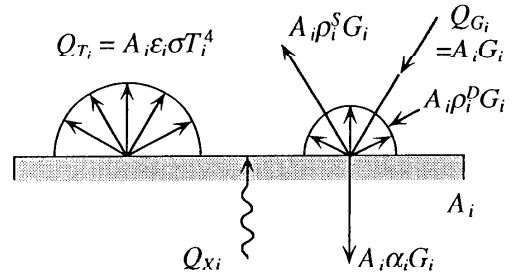


図 9: 鏡面・乱反射面モデルとふく射エネルギー収支

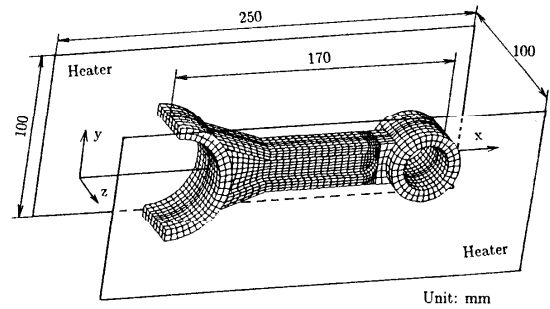


図 10: 自動車用コネクティングロッドのふく射モデル

このような鏡面を含んだふく射伝熱は、解析が複雑になり実際の計算は単純形状のみに限られていた⁽²¹⁾。本節では、形態係数本来の意味、式 (1)、にたちかえり、次式で示す吸収形態係数 $F_{i,j}^A$ と乱反射形態係数 $F_{i,j}^D$ を次のように定義する⁽¹⁹⁾。

$$F_{i,j}^A \equiv \alpha_j F_{i,j}, \quad F_{i,j}^D \equiv \rho_j F_{i,j} \quad (6)$$

任意形状物体の $F_{i,j}^A, F_{i,j}^D$ の算出には、モンテカルロ法⁽²²⁾やコンピュータグラフィックスで用いられる光線追跡法が適用できる。放射光線追跡法の詳細については文献 (20) を参照されたい。

算出された $F_{i,j}^A, F_{i,j}^D$ を用いると、代数方程式を解くことにより任意加熱条件でのふく射伝熱解析ができる⁽¹⁹⁾。つまり、 $F_{i,j}^A, F_{i,j}^D$ の導入により、鏡面反射による煩雑さを回避し、拡散面のふく射伝熱解析と同一な手法を用いることが可能となる。

任意形状三次元物体面間のふく射伝熱の例として、図 10 に示す自動車用ガソリンエンジンのコネクティングロッドの多面体モデルを考える。コネクティングロッド表面は 2788 面の多面体で構成されている。

各面は断熱 ($Q_x = 0$) と仮定する。図 10 に示すように 1600 面に構成される温度 1000 K の等温ヒータ面 ($\epsilon = 1$) を置き、周囲環境は 0 K の黒体とした。

図 14 はコネクティングロッドの表面が鏡面 ($\rho^S = 0.9, \rho^D = 0, \epsilon = 0.1$) の時、表面温度分布を示したものである⁽¹⁹⁾。図 14 中、ヒータは省略してある。ヒータに面した表面とロッド中心部の溝部が高温で、両側面は低温である。クランクシャフト軸受け部側面 (左下側面) は特に温度が低い。同様な解析を拡散面 ($\rho^S = 0, \rho^D = 0.9, \epsilon = 0.1$) について行くと、鏡面の場合に比べて表面温度が高くなるが、特にロッド溝やピストンピン (図 14 右の穴) などの部分で鏡面の場合との差異が大きいことがわかる。

軸対称任意形状物体の解析例として、図 15 に示すようなチョコラルスキー法によるシリコン結晶成長装置を考える。るつぼ内のシリコンは、解析を簡略化するために固化しているものとし、装置は金属製円筒容器に納められている。ふく射伝熱計算は計 88 の円環面要素で構成されているモデルについて行った。ヒータは 1000 K の等温 ($\epsilon = 0.9$) の拡散面で金属製容器の下面と側面は断熱とし、上面は 300 K の等温としている。

図 15 の解析モデルにおいて汎用の有限要素法プログラムを用いて熱伝導解析を行い、本章のふく射伝熱解析と反復することによって、ふく射・伝導複合伝熱解析を行った⁽²⁰⁾。図 16 は、表面の定常温度分布と熱流束分布を示したもので、中心線を境にして拡散面の場合とシリコン表面と円筒容器を鏡面にした場合を表している。シリコン側面の熱流束は鏡面と拡散面の場合ともに小さい。また、るつぼの温度分布はどちらの場合も拡散面なので、大きな変化が認められないが、シリコンでは鏡面の温度分布が拡散面の場合に比べて若干低い値となっている。特にその差異は結晶下部で顕著である。

ふく射面から放射される熱ふく射線または光は、ふく射面の形状によって種々な指向特性を示す。黒体平面の放射特性は、等方であるが、黒体平面に鏡面で構成される反射面を組み合わせると、ふく射の放射特性に指向性を与えることができる^{(23),(24),(25)}。このように、等方性放射特性に指向性を与えるものとは逆に、物体からのふく射を幾何光学的スケールで制御することによって、均一なふく射場を得る試み⁽²⁶⁾がなされている。この様な鏡面を含む物体の放射解析にも光線追跡法は有効な手段となる。

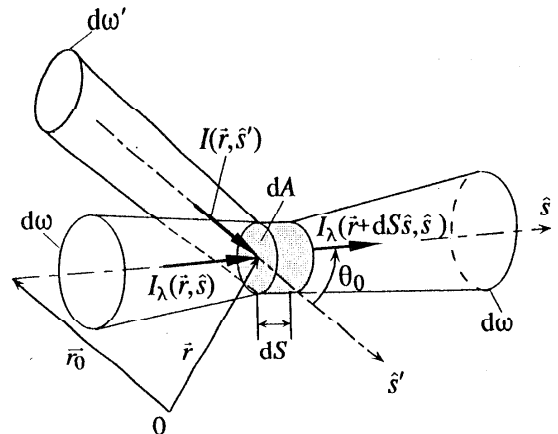


図 11: 微小要素中のふく射エネルギーバランス

5. ふく射要素法, REM², を用いた任意形状ふく射媒体と物体面のふく射伝熱解析法

前章では任意形状の鏡面や拡散面を含む任意形状灰色面間のふく射伝熱解析法を示した^{(19),(20)}が、著者らはこの概念を拡張することによって鏡面・拡散面の解析手法が任意形状のふく射性媒体にも適用可能であることを明らかにした⁽²⁷⁾。本章では、任意形状の多面体で構成される放射・吸収・散乱性媒体と任意形状多角形で構成される鏡面と拡散面またはそれらの複合面に対して、任意の熱条件下で統一的なふく射伝熱解析が可能な「光線放射モデルによるふく射要素法, Radiation Element Method by Ray Emission Model, (REM²)」^{(27),(28)}を述べる。

5.1 ふく射のエネルギーバランス

図 11 に示すように、位置ベクトル r における方向ベクトル s の単色ふく射強度を $I_\lambda(r, s)$ として、粒子などの散乱性媒体が分散しているふく射性媒体中に単色ふく射強度 $I_\lambda(r, s)$ [$\text{W m}^{-2} \text{sr}^{-1} \mu\text{m}^{-1}$] のふく射束が入射した場合を考える。粒子以外の空間は、ふく射性ガスなどの屈折率が n のふく射性媒体で満たされている。

入射したふく射は、微小体積 $dA \times dS$ 内に含まれる粒子とふく射性媒体によって吸収・散乱されるために減衰される。さらに、粒子と媒体自身が熱ふく射を放射しており、その中で s 方向成分が増幅される。また、全周方向から微小体積に入射する外来ふく射のうち s の方向成分が加算される $I_\lambda(r, s')$ の散乱による s 方向のふく射増幅成分 $dI_{\lambda, \text{scat}}^*$ は次式となる。

$$dI_{\lambda, \text{scat}}^* = \frac{ds}{4\pi} \int_{4\pi} \sigma_{s, \lambda} I_{\lambda}(\vec{r}, \hat{s}') P_{\lambda}(\hat{s}' \rightarrow \hat{s}) d\omega \quad (7)$$

ここで ω は立体角であり、 $\int_{4\pi} d\omega$ は全周方向の積分を表し、 P_{λ} は位相関数と呼ばれる角度の関数である。3.2節で議論したように、位相関数は粒子の粒径やふく射の波長、さらに粒子の複素屈折率に依存し、一般に散乱角に対して非常に複雑な関数となる。

したがって、ふく射エネルギーバランスが次式で表される。

$$\begin{aligned} \frac{dI_{\lambda}(\vec{r}, \vec{\omega})}{dS} &= -(\kappa_{\lambda} + \sigma_{s, \lambda}) I_{\lambda}(\vec{r}, \vec{\omega}) + \kappa_{\lambda} I_{b, \lambda}(T) \\ &+ \frac{\sigma_{s, \lambda}}{4\pi} \int_{4\pi} I_{\lambda}(\vec{r}, \hat{s}') P_{\lambda}(\hat{s}' \rightarrow \hat{s}) d\omega \quad (8) \end{aligned}$$

ここで、 κ_{λ} 、 $\sigma_{s, \lambda}$ [m^{-1}] は媒体の波長 λ の電磁波に対する吸収係数と散乱係数である。ただし、式(8)は繊維媒体のように異方性が強く、 κ_{λ} や $\sigma_{s, \lambda}$ がふく射入射方向 \hat{s}' に依存する場合は修正が必要である。

5.2 ふく射要素法による媒体と物体面の統一表示

式(8)を解いて位置と方向の関数であるふく射強度 $I(\vec{r}, \hat{s})$ を求めることになるが、式(8)は微積分方程式なので、特別な場合を除き解くことは難しい。そこで、解析をモデル化するために、以下の仮定を設ける。

1. ふく射要素内では温度、屈折率、単位体積当たりの発熱量は一定である。
2. ふく射性媒体中での散乱は等方性である。
3. 散乱されるふく射強度はその要素内では一定である。

図12に示すようにふく射要素を通過した光線の一部は吸収され一部は散乱される。この内散乱成分は、仮定(2)より等方散乱され仮定(3)により要素中に均一に分散される。従って、式(8)の右辺第3項は次式のように簡略化される。

$$\frac{\sigma_{s, \lambda}}{4\pi} \int_{4\pi} I_{\lambda}(\vec{r}, \hat{s}') P_{\lambda}(\hat{s}' \rightarrow \hat{s}) d\omega = \sigma_{s, \lambda} I_{\lambda}^D \quad (9)$$

ここで、 I_{λ}^D は要素内の平均散乱ふく射強度で、要素内ふく射強度のふく射成分と散乱成分を要素内と全周方向に平均化した値である。

減衰係数 $\beta_{\lambda} \equiv \kappa_{\lambda} + \sigma_{s, \lambda}$ 、アルベド $\Omega \equiv \sigma_{s, \lambda} / \beta_{\lambda}$ を定義することによって、式(73)は次式のようになる。

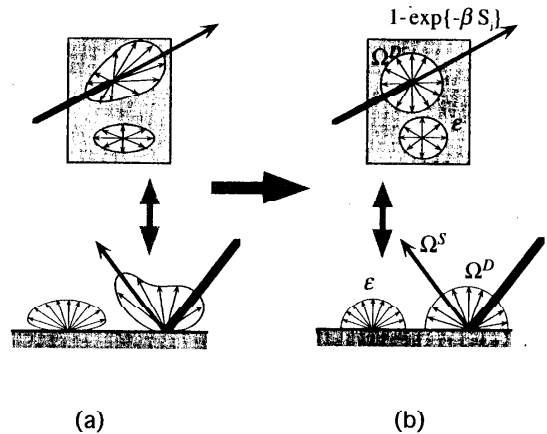


図12: ふく射性媒体の散乱と物体面の反射とのアナロジー

$$\frac{dI_{\lambda}(\vec{r}, \hat{s})}{dS} = \beta_{\lambda} [-I_{\lambda}(\vec{r}, \hat{s}) + (1 - \Omega) I_{b, \lambda}(T) + \Omega I_{\lambda}^D] \quad (10)$$

式(10)中の I_{λ}^D には媒体を通過するふく射成分は含まれない。この拡散散乱成分と通過するふく射成分との関係は、図12に示すように、固体面間の乱反射と鏡面反射との関係^{(19), (20)}と全く同様である。そこで、式(10)のアルベド Ω を拡散反射率も含む新たな量 Ω^D として再定義し、物体面に適用する鏡面反射率 Ω^S を新たに導入する。つまり、ふく射性媒体または不透明固体面で構成されるふく射要素 i が \hat{s} 方向に放射・散乱されるふく射エネルギー $dQ_{J, i, \lambda}(\hat{s})$ について、ふく射エネルギー式が次式で統一的に記述される。

$$\begin{aligned} dQ_{J, i, \lambda}(\hat{s}) &= A_i(\hat{s}) [(1 - \Omega^D - \Omega^S) I_{b, \lambda} + \Omega^D I_{\lambda}^D] \\ &\times [1 - \exp(-\beta_{\lambda} \bar{S}_i)] d\omega \quad (11) \end{aligned}$$

ここで、 \bar{S}_i は \hat{s} から見た要素の平均厚さである。固体壁面では $\beta_{\lambda} \bar{S}_i \gg 1$ とし、ふく射性媒体では $\Omega^S = 0$ とすることによって、プログラムの変更なしに固体面とふく射性媒体が記述できる。次式のふく射有効面積⁽¹⁷⁾を導入すると、

$$A^R \equiv \frac{1}{\pi} \int_{4\pi} A_i(\hat{s}) [1 - \exp(-\beta_{\lambda} \bar{S}_i)] d\omega \quad (12)$$

式(12)で定義されるふく射有効面積は、 $\beta_{\lambda} \bar{S}_i \gg 1$ の時、固体面ふく射要素の面積と一致する。ふく射性媒体のふく射要素の光学厚さが薄い場合、モンテ

カルロ法⁽²²⁾でよく用いられる微小体積からのふく射エネルギー量に関連づけられる。

最終的に、拡散ふく射エネルギー $Q_{J,i,\lambda}$ は、ふく射性媒体や不透明固体面に関わらず次式によって統一的に表される。

$$Q_{J,i,\lambda} = \pi(\epsilon_i I_{b,\lambda} + \Omega^D I_\lambda^D) A^R \quad (13)$$

5.3 減衰・吸収・散乱形態係数と光線放射モデル

著者らは、鏡面を含む任意形状面間のふく射伝熱解析に吸収・乱反射形態係数を導入し^{(19),(20)}、固体面間の汎用ふく射伝熱解析が任意形状・加熱条件で可能であることを示した。ここでも同様な考え方をふく射性媒体や固体面で構成されるふく射要素に拡張する。つまり、式(1)と同様に、以下の減衰形態係数を導入する。

減衰形態係数 $F_{i,j}^E$:

[ふく射要素 j に到達しその要素によって減衰されるふく射エネルギー]

/ [ふく射要素 i から放射されるふく射エネルギー]

式(6)に相当する吸収形態係数 $F_{i,j}^A$ 、散乱形態係数 $F_{i,j}^D$ は次式で定義される。

$$F_{i,j}^A \equiv \frac{\epsilon_j}{(1 - \Omega_j^E)} F_{i,j}^E, \quad F_{i,j}^D \equiv \frac{\Omega_j^D}{(1 - \Omega_j^E)} F_{i,j}^E \quad (14)$$

したがって、鏡面を含む物体間の伝熱と同様な手法により個々のふく射要素の温度、単位体積当たりの発熱量などを任意に与えた解析が可能となる。

実際に使用される工業モデルは、汎用の有限要素法要素生成パッケージなどによって、多角形要素や多面体要素にモデル化される場合が多い。これらのツールを使用できるように、本解析法では、ふく射要素を図13に示すような三角形、四角形、四面体、くさび型および六面体でモデル化している⁽²⁷⁾。

本数値解析法を既存の一次元問題の解析解⁽²⁹⁾や二次元問題⁽³⁰⁾、三次元問題⁽³¹⁾に適用し、既存解との計算精度の比較を行った。その結果、良好な数値解析精度が得られている^{(27),(28)}。

図17は、等温黒体に囲まれたふく射性媒体の温度分布を各要素からの放射光線本数を45本と3313本の場合で比較したものである⁽²⁸⁾。立方体の角部の温度分布が若干異なる以外、両者は良く一致している。モンテカルロ法では各要素から 10^4 オーダーの量子化されたふく射束を放射する場合も多い。それらに比べると、ふく射要素法は、著しく少ない放射光線数で良好な精度が得られていることから、種々の問

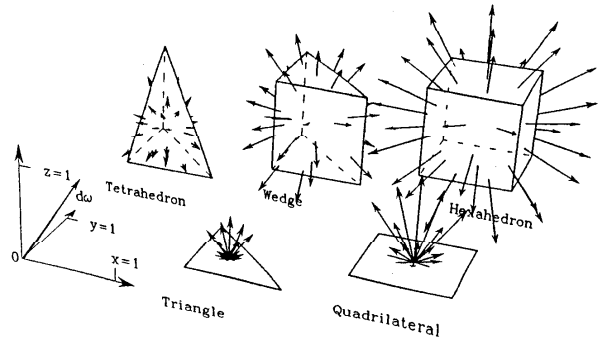


図13: 各種ふく射要素からの光線放射モデル

題に適用可能であると考えられる。さらに、本数値解析法はプログラムを高度にベクトル化することが可能で、ベクトルプロセッサを有するコンピュータを有効に使用することができる。

5.4 任意形状物体のふく射伝熱

任意形状物体解析の例として、立方体のふく射性媒体の中に球形の不透明等温物体がある場合を考える⁽²⁷⁾。立方体の辺長を $2\tau_0$ 、 $(\tau_0 = 1)$ とし、球形物体の直径は τ_0 とした。図19は、本解析で用いた1/8モデルを示している。図19のモデルは、136の多面体要素とそれを覆う140の不透明多角形要素で構成される。モデルの対称性を満足するために、3面には完全鏡面を張り付けてある。図20は、無次元温度 Φ の分布を示している。図中では、表面要素を取り去りふく射性媒体の温度のみを示した。

図18は、均一発熱する球状媒体を等温の正方形容器に囲まれている場合の無次元温度分布を示している⁽²⁸⁾。容器の温度条件は球対称ではないが、ふく射性媒体の温度分布はほぼ球対称となっていることがわかる。

核融合プラズマの研究に用いられている大型ヘリカル装置のプラズマ温度と壁面熱流束解析の一例を示す⁽³²⁾。図21は、その装置の外観図と解析に用いた1/10モデルを表わしている。真空容器の直径は11mで超伝導ヘリカルマグネットの溝が2本それぞれ1周で5回転している。

図21は、単位体積当たりの発熱量 q_v を仮定したときのプラズマの無次元温度 Φ と壁面の無次元熱流束

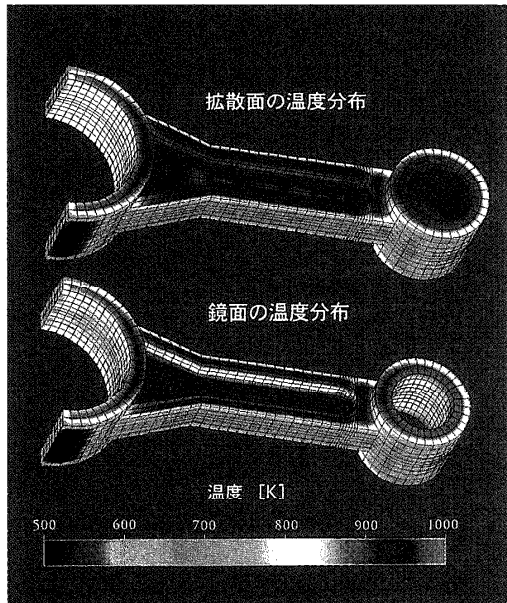


図 14: 鏡面または拡散面を持つコネクティングロッド表面の温度分布の比較

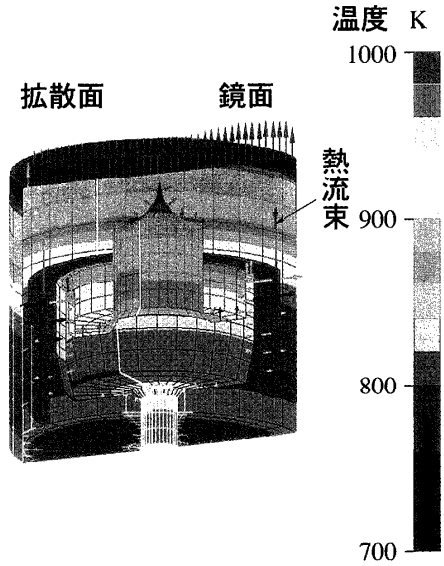


図 16: 複合伝熱モデルによる表面温度分布とふく射熱流束分布

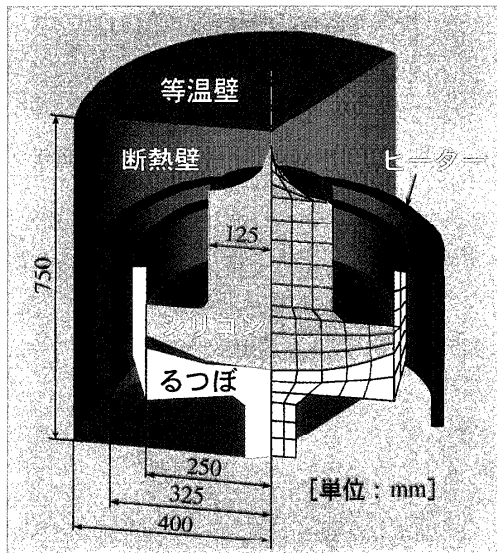


図 15: チョクラスキーシリコン結晶成長装置のふく射・伝導複合伝熱モデル

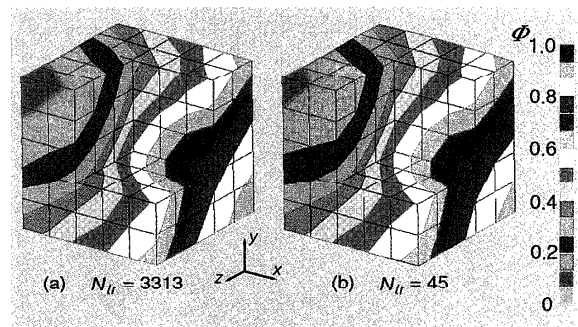


図 17: 立方体のふく射性媒体の温度分布に及ぼす放射光線本数 N_{tr} の影響

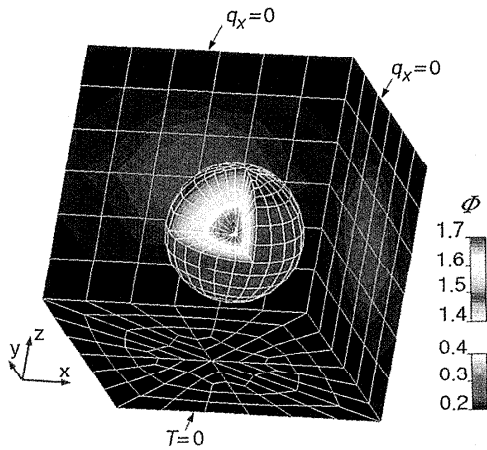


図 18: 球状発熱媒体と等温力形容器のふく射伝熱

- Participating Medium $\Omega^D = 0.5$ $q_x = 0$
- Diffuse Surface $\Omega^D = 0.5$ $T = 1000$ K
- Diffuse Surface $\Omega^D = 0.5$ $T = 0$ K
- Diffuse Surface $\Omega^D = 0.5$ $q_x = 0$
- Specular Surface $\Omega^S = 1$

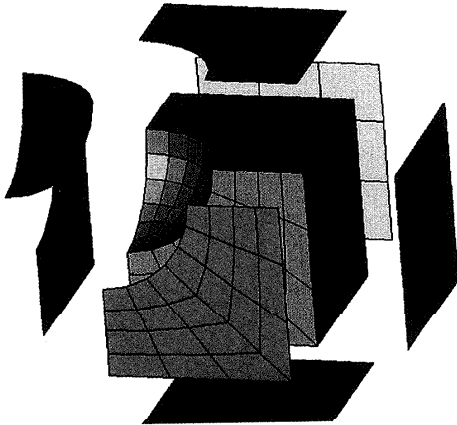


図 19: 球形空洞を含むふく射性媒体の 1/8 解析モデル

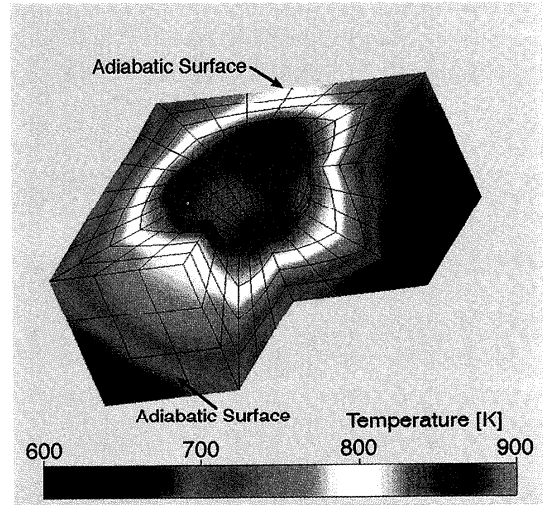


図 20: ふく射性媒体の無次元温度分布

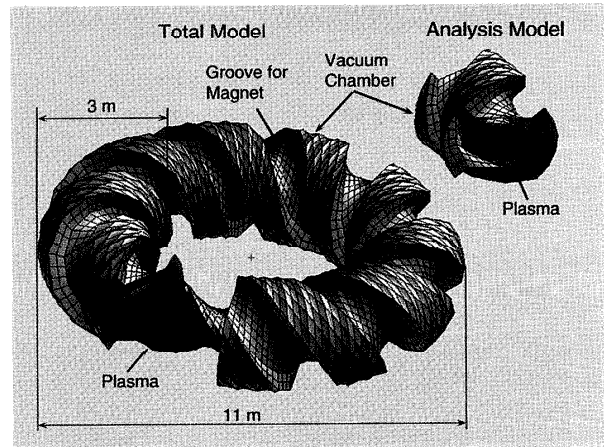


図 21: 大型ヘリカル装置の外観と 1/10 解析モデル

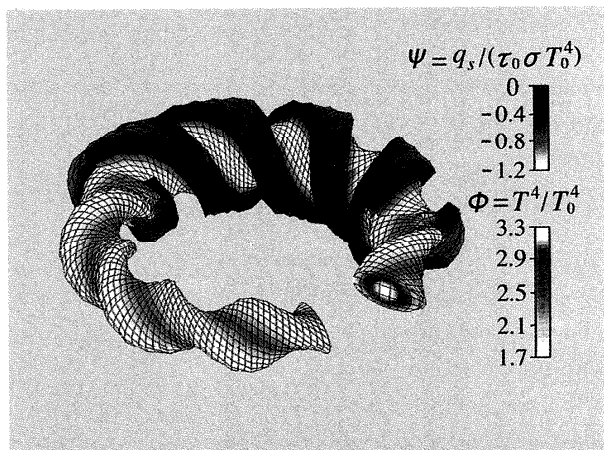


図 22: 大型ヘリカル装置の無次元プラズマ温度と壁面熱流束分布

Ψ を示している。プラズマの温度分布はプラズマ中央部で高い。壁面の熱流束は定義上負の値となっているが、ヘリカルマグネットの溝底部での熱流束が大きく、マグネットの溝側壁の角部で熱流束が小さいことがわかる。

ふく射要素法は、解析モデルをふく射要素に分割するとき、解の収束性などによる形状の制約がほとんどなく、かつ体積要素と平面要素を区別しないで解析可能である。従って、既存の熱伝導や対流伝熱、応力解析などと組み合わせた複合伝熱解析が容易である。

6. 今後の展開：ふく射の素過程と工業モデルにおける複雑さの融合

第5章でも示したように、ふく射要素法は基本的に等方散乱媒体にのみ適用可能である。散乱性媒体は、3.2節で議論したように、非等方散乱の場合が多い。しかし、 δ 関数を用いた近似によって強い前方散乱媒体や後方散乱媒体にも精度良く適応できる⁽³³⁾ことが明らかとなっている。

3.1節で議論したように、二酸化炭素などのふく射性ガスは、分子の内部運動が量子化されているために複雑な単色吸収率を示す。これを伝熱解析が可能な波長分解能に分割すると、ガスは見かけ上Beerの法則が成りたらず、吸収係数が光学距離で異なってくる。このようなガスについても適当なバンドモデルを導入することによって、ふく射要素法が適用できる⁽³⁴⁾。

光学厚さが薄く媒体に平行光線が入射する場合の非等方散乱性媒体のふく射伝熱解析をふく射要素法で行うことも可能であるが、計算精度が若干低下する。このような場合は、DOM(Discrete Ordinates Method)⁽³⁵⁾が有効である。しかし、複雑形状物体にDOMを用いるとRay Effectなどの問題が生じてくる。

光や電磁波を放射・吸収・散乱するふく射性媒体や物体間でのエネルギー交換に関しては、古くから研究されている複合伝熱問題^{(36),(37)}を始め、多孔質体を用いたふく射変換体⁽³⁸⁾や燃焼促進⁽³⁹⁾、能動熱遮断^{(40),(41)}、ふく射伝熱の逆問題⁽⁴²⁾などの話題や実用上の興味深い話題が多い。

これらの現象を説明し工業上利用できるようにするには、ふく射の素過程の複雑さを克服し、複雑な工業モデルに適用出来る汎用解析法が今後重要になってくるだろう。形状や熱条件が複雑な系における

ふく射伝熱は、本質的に複雑系 (complex system) ではない。しかし、素過程の複雑さも起因して、研究者やエンジニアがふく射伝熱に対する適切な処置を意識的に無視するのに十分なくらい複雑である。

謝辞 本稿の図面の作製には、東北大学流体科学研究所 菱沼信夫技官の助力を得た。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- [1] Plank, M., The Theory of Heat Radiation, Dover, New York, (1959).
- [2] Rothman, L.S., et al., J. Quant. Spectrosc. Radiant. Transfer, Vol. 48, p. 469, (1992).
- [3] Hottel, H.C. and Sarofim, A.F.: Radiative Transfer, McGraw-Hill, (1967).
- [4] 円山, 日向野, Taine, J., 第17回日本熱物性シンポ講論集, p.467, (1996).
- [5] Edwards, D.K., Advances in Heat Transfer, Vol. 12, p. 115, (1976).
- [6] Goody, R.M. and Yung, Y.L., Atmospheric Radiation, 2nd Ed., Oxford, New York, (1989).
- [7] Goody, R.M., et al., J. Quant. Spectrosc. Radiant. Transfer, Vol. 18, p. 539, (1989).
- [8] Denison, M.K. and Webb, B.W., ASME J. Heat Transfer, Vol. 115, p. 1004, (1994).
- [9] 円山, 宇角, 相原, 第32回日本伝熱シンポ講論集, Vol.2, p.591, (1995).
- [10] van de Hulst, H.C., Light Scattering by Small Particles, Dover, New York, (1981).
- [11] Bohren, C.F. and Huffman, D.R., Absorption and Scattering of Light by Small Particles, John Wiley & Sons, New York, (1983).
- [12] 山田, 黒崎, 機論, Vol.59, No.566B, p.3187, (1993).
- [13] Brewster, M.Q., Thermal Radiative Transfer and Properties, John Wiley & Sons, New York, (1992).
- [14] 牧野, 加賀, 機論, Vol.58, No.553B, p.2827, (1992).
- [15] 甲藤, 伝熱概論, 養賢堂, (1985).

- [16] Howell, J.R., A Catalog of Radiation Configuration Factors, McGraw-Hill, New York, (1982).
- [17] 円山, 相原, 機論, Vol.53, No.491B, p.2187, (1987).
- [18] 相原, 円山, 小早川, 機論, Vol.53, No.488B, p.1307, (1987).
- [19] Maruyama, S., Numerical Heat Transfer, Part A, Vol.24, p.181, (1993).
- [20] 円山, 相原, 機論, Vol.59, No.566B, p.3202, (1993).
- [21] Siegel, R. and Howell, J.R., Thermal Radiation Heat Transfer, 2nd Ed., Hemisphere, (1981).
- [22] 谷口ほか4名: パソコン活用のモンテカルロ法による放射伝熱解析, コロナ社, (1994).
- [23] Perlmutter, M. and Howell, J.R., Trans. ASME, J. Heat Transfer, Vol.85, No.3, p.282, (1963).
- [24] Masuda, H., Trans. ASME, J. Heat Transfer, Vol.102, No.3, p.563, (1980).
- [25] 金山: 機論 (2部), Vol.37, No.299, p.1378, (1971).
- [26] Maruyama, S., ASME, J. Heat Transfer, Vol.115, No.2, p.492, (1993).
- [27] Maruyama, S. and Aihara, T., ASME, J. Heat Transfer, Vol.119, No.1, p.129, (1997).
- [28] Maruyama, S. and Aihara, T., Radiative Transfer- I, Begell House, New York, p.153, (1997).
- [29] Heaslet, M.A. and Warming, R.F., Int. J. Heat & Mass Transfer, Vol. 8, p. 979, (1965).
- [30] Crosbie, A.L. and Schrenker, R.G., J. Quant. Spectrosc. Radiant. Transfer, Vol. 31, p. 339, (1984).
- [31] Larsen, M.E. and Howell, J.R., Trans ASME J. Heat Transfer, Vol. 107, p, 936, (1985).
- [32] Maruyama, S. and Higano, M., J. Energy Conversion and Management, (1997), (in Press).
- [33] Maruyama, S., Int. J. Heat & Mass Transfer, (Submitted).
- [34] 円山, 第34回伝熱シンポ講論集, (掲載予定), (1997).
- [35] Fiveland, W.A., ASME J. Heat Transfer, Vol. 106, p. 699, (1984).
- [36] 黒崎, 機械の研究, Vol.34 No.1~Vol.35 No.10, (1982-1983)
- [37] 上宇都, 第32回伝熱シンポ講論集, Vol. 2, p. 595, (1995).
- [38] 越後, 機論, Vol.48, No.435B, p.2315, (1982).
- [39] 花村, 足立, 越後, 機論, Vol.62, No.596B, p.1629, (1996).
- [40] 円山, 相原, Viskanta, R, 機論, Vol.56, No.524B, p.1140, (1990).
- [41] 円山, 航空宇宙学会誌, Vol. 43, No. 495, p257, (1995).
- [42] 工藤, ほか3名, 機論, Vol.62, No.600B, p.3131, (1996).

Duke 大学を訪ねて

A Visit to Duke University

池上 康之 (佐賀大学海洋温度差エネルギー実験施設)
Yasuyuki IKEGAMI (OTEC Laboratory, Saga University)

私は、1996年3月7日から1997年1月6日までの10ヶ月間、文部省在外研究員として、米国のDuke大学で研究する機会を得ました。短い期間の滞在でしたが、特に、今後このような経験を持たれる若手研究者の方々の参考になればと思い、その一部を報告させていただきます。

在外研究のチャンスを得てまず必要なのが研究機関の決定です。私は折角の機会であるので多くの諸先生方に相談しました。私の希望は、伝熱関係でアクティビティのある若手研究者と一緒に研究することでした。その中で私が一番惹かれたのが、Duke大学のJ. A. Jones Professor Adrian Bejanです。研究の分野が広く、“現象”から“システム”まで手がけて、卓越した研究業績も論文だけに留まらず多くの本を出版されています。出発前は、どのような研究体制のもと、どのような研究姿勢で研究に取り組んでいるのかが、興味津々でした。推薦していただいた先生のご厚意もあり、Bejan教授は快く受け入れを承諾してくださいました。

Duke大学は、米国の南東部に位置するNorth Carolina(NC)州にあります。NCは、昔から家具やたばこ産業などが盛んで、今でも米国で裕福な方の州ですが、緑が多く自然豊かな典型的な南部の地です。なかでも1903年ライト兄弟が初めて飛行したKill Devil Hillが有名で、NCの車のナンバープレートには、初飛行の絵と共に“First in Flight”と書かれています。

Duke大学は、NCの州都であるRaleigh市の隣町Durham市内に位置し、このDurham市、Raleigh市とChapel Hill市の3都市に囲まれたResearch Triangle Park(RTP)の中核をなす私立大学です。このRTP地域にはDuke大学の他に、Raleigh市にNorth Carolina State University、Chapel Hill市に米国最初の州立大学であるUniversity of North Carolina at Chapel

Hill(UNC)があります。米国ではDuke大学、Michael Jordanの出身地でもあるUNCなどバスケットが盛んな地としても有名ですが、これらの大学は学問的にも高く評価され、米国大学のランキングでは常に上位に位置しています(U.S. News誌の97年版でDuke大学4位、UNCは25位)。特に3大学とも医学分野が有名で、米国でもこれだけ優秀な大学が密接しているのも珍しいと聞いています。このためRTPではバイオ・メディカル関係の研究開発が盛んで、米国の有名な製薬会社の研究所も多く、大学はこれらの会社から多くの研究資金の援助を得ています。また、ここ10年RTP地域は、IBMなどコンピュータや通信関連の企業で著しい発展を遂げ、注目をされてきました。最近では、RTP地域は第二のシリコンバレーと考えられています。RTP周辺は、比較的低い物価と高い技術力を持った労働人口の多さなどから、ビジネスの将来性、生活環境の良さ共に北アメリカでもっとも評判の高い所として、多くの雑誌にも取り上げられています。最近、日本の企業もRTPに非常に注目しているようです。既に、この地域にはHitachi America, LTD、Kobe Steel USAなど30以上の日系企業が立地しています。この傾向は今後も続くと思われています。

前置きが長くなりましたが、Duke大学は、1838年に設立された総合大学で、学部学生および大学院生がそれぞれ約6,500人と計13,000人程度の学生数です。なかでも前述のように医学部が著名で、他には法学部、経済学部なども高く評価されています。医学部は、建物の規模及び資金の上で特に大きく、医学部と他の学部、と言った感じです。このような中で工学部は、あまり目立たない存在で、他学部に負けないような大きな飛躍を目指しているようです。工学部はDepartment of Biomedical Engineering、Department of Civil and Environmental Engineering、Department of

Electrical and Computer Engineering、Department of Mechanical Engineering and Materials Science (MEMS)の計4学科からなります。医学部の影響からか、工学部のなかでもBiomedical Engineeringは、米国内で非常に高い評価を受けています(U.S. News 誌、Biomedical Engineering 部門で2位)。というのも研究が、医学部と共同で行われ、研究交流がとて活発のようです。また、Biomedical Engineering以外の学科でも医学部と連携して研究を進めている研究者が多く、MEMSのスタッフ24名のなかでも4名ほどの教官がBiomedical Engineering関連の研究を行っています。この分野は、今の米国で一番元気がある分野の一つのような気がします。

MEMSのなかで熱・伝熱関係の教官は、A. Bejan教授をはじめ、C. M. Harman教授、G. Chen助教授、L. E. Howle助教授らが中心です。他教官の中にも、特に材料関係の教官の中にMicroスケールの伝熱やPorousの伝熱を扱っている研究者も多いようです。材料関係は、先ほどのようにRTP地域の特徴として、半導体関連の研究に携わっている研究者がほとんどです。G. Chen助教授も、micro- and nanoscale materialでの伝熱問題について精力的に研究を行っています。

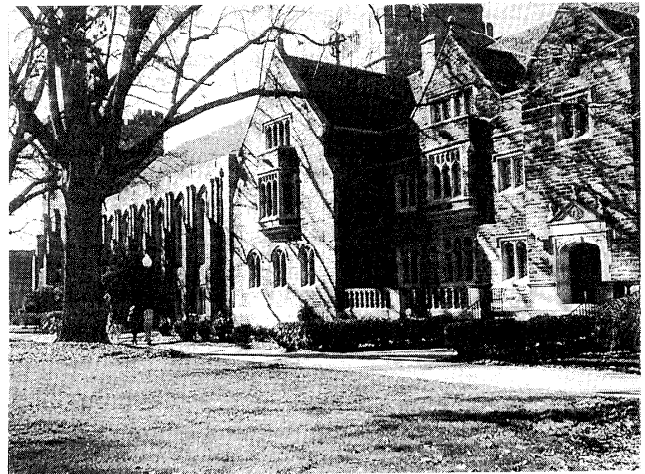
Bejan教授は、工学部のパンフレットの中で"Dr. Bejan is one of the most prolific professor-authors in the Department of MEMS at Duke's Engineering School, as well as one of the most distinguished."と記載されているように、大学のBejan教授への期待は極めて高いように感じました。Bejan教授は、1984年にDuke大学に赴任し、1989年よりJ. A. Jones Professorとして任用されています。Bejan教授の研究分野は、natural convection、combined heat and mass transfer、convection in porous media、transition to turbulence、melting、solidification、condensation、fouling、second law analysis、solar energy conversionなどと広範囲に渡っています。研究業績は、これまでの260編以上の論文と代表的な著書として下記の本を出版しています。

- ・ Advanced Engineering Thermodynamics, Wiley, New York, 1988.
- ・ Convection in Porous Media, Springer-Verlag,

New York, 1992, with D. A. Nield.

- ・ Heat Transfer, Wiley, New York, 1993.
- ・ Convection Heat Transfer, 2nd Ed., Wiley, New York, 1995.
- ・ Entropy Generation Minimization, CRC Press, Boca Raton, FL, 1996.
- ・ Thermal Design and Optimization, Wiley, New York, 1996, with G. Tsatsaronis and M. Moran.

なかでも、Heat Transferは韓国をはじめブラジルなどで翻訳されているそうです。一方、私が滞在中、Bejan教授の研究室は、博士課程学生の3人の



Perkins Library



Bejan教授と筆者(Bejan教授の部屋で)

みでした。研究スタッフは少ないですが、Bejan 教授の闊達で陽気な人柄から研究室の雰囲気はいつも明るく活気に満ちています。しかし、こと研究に対しては、極めて厳しく、かつ想像以上にアクティビティでした。一言で言うと、「休むことなく全力で走り続ける」と言った感じです。そのような状況のなかで、Bejan 教授のとて家族を大切にすることの優しさと心のゆとりには、敬服しました。なお、Bejan 教授のもとで研究した日本人は、金沢大学工学部の木村繁男先生に継いで私が 2 人目となります。

私は、Bejan 教授が近刊した *Entropy Generation Minimization (EGM)* の考え方に非常に興味を持ち、特にエネルギーシステムの最適化に関して私がこれまで行ってきた手法との融合を試みました。そこで、今回は EGM にさらに新しい考え方を導入して研究を行いました。詳細は、論文で公表する予定です。

Duke 大学には、日本人が在外研究員などを含めて約 60 名程度在籍していますが、その多くが医学部、経済学部および法学部です。工学部には、Scholar として私だけでした。NC は、CA などの観光地と違って、情報が格段に乏しく、私は現地に知人が全くいなかったため情報収集には大変苦労しました。地図もなかなか手に入らない状態です。そのような状況で Internet はかなり重宝しました。しかし、渡米してから私を一番救ってくれたのは、Bejan 教授の研究室と Duke 大学の International House(IH)のスタッフの方々でした。特に IH のスタッフの方々は、年間 600 人以上の海外からの研究者に対応しているにも係わらず、アパート探しから、家具探し、車探しまで、とことん親身になって付き合ってくださいました。日本では考えられない体制です。IH では、International Scholar を対象に、毎週金曜日の昼間には Coffee Hour for the International Community、毎週土曜日の夜には International Association Event として各種パーティを主催しています。IH は、留学生を対象に ML を管理しており、各種情報から、Moving Sale まで大変役立ちました。

一方、家族連れで渡米するとどうしても必要になるのが日本食材などの情報です。このような情報は、やはり日本人からしか入手できません。私は、

たまたま IH 主催の Orientation で医学部の日本人 Scholar の方と出会いました。その方から日本人によって作成された「Durham の歩き方'95 版」という冊子の孫コピーを頂きました。総数 70 ページ以上からなり、日本人のための住宅情報、子供のための学校情報、医療情報、ショッピングおよびレストラン情報などが詳しくまとめてあります。なかには、「日本から持ってきた方がいいもの、必要ないもの」、「子供の習い事」まで載っています。これは、Fuqua School of Business の日本人一年生の方々に来年の新入生用に作成している「生活マニュアル」だそうです。これまで伝統として継続しているのも決まった日本企業の方々が毎年一定割合で入学しているためだそうです。このような情報誌があることを渡米前から知っていれば、私の多くの不安は随分解消されていたものと思います。今後在外研究の機会を得られた方は、このような情報が事前に入手出来るように、より積極的に情報収集されることをお勧めします。このような情報が、Internet によってもっと入手しやすくなるといいのですが。

米国においては、一般に報じられているように、多くの大学の教官が、自分の給与も含めて、研究費およびスタッフの手当などを自分で獲得しなければなりません。その厳しさは、想像以上で、資金獲得が研究と共に研究者の Top Priority と言っても過言ではないように見えます。これには善悪の両面があると思いますが、米国で各研究者が自分の足で立たなければならない、また立っている原動力になっているような気がします。各大学も、それを支えるために多くの努力を行っています。Duke 大学では、その一つに、Office Research Support より A4、6 ページ程度の「Funding Alert」という冊子を平均月 2 回の割合で全スタッフに配布しています。HP (<http://delphi.mis.duke.edu/ors/start.html>)でも一部公開されていますので、興味がある方は、覗いてみてください。

雑駁な原稿になってしまいましたが、少しでも若手研究者の方々の参考になれば幸いです。最後に、このような貴重な機会を与えていただいた編集委員の方々に感謝申し上げます。

三浦工業(株)
MIURA CO., LTD.

川上 昭典 (三浦工業(株)技術部)
Akinori KAWAKAMI (Technical Department,
MIURA CO., LTD.)

1. はじめに

三浦工業(株)は、昭和34年5月、愛媛県松山市に設立された。図1に本社の外観を示す。主な業務として小型貫流ボイラの設計、製造から販売、メンテナンスまで一貫して取り組んでいる。

近年の環境問題が重要視される中、固定発生源であるボイラからのNOx排出量低減の要求は増すばかりである。従来のボイラにおけるNOx生成は、燃焼室内のバーナ近傍の高温域と考えられ、その低減方法は各種低NOxバーナ、あるいは排ガス再循環等で、その低減率は50%程度が限界とされていた。

今回のノンファーンレスボイラはいわゆる燃焼室を持たないボイラとの意味で、ガス燃料の特性を最大限に活かしたものである。予混合バーナに対面して水管群を配置、火炎温度と同時に高温域の滞留時間を低減することでサーマルNOx生成量を抑制した。NOx値は従来比1/4以下(30ppm以下)、加えて設置面積も1/2以下と大幅なコンパクト化を達成した。

ここでは、燃焼反応と伝熱作用の組み合わせ、すなわち「燃焼しながら伝熱する」という全く新しい形態のノンファーンレスボイラ開発の一部をトピックスとして紹介する。

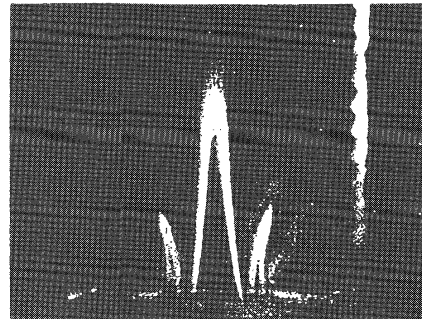


図1 本社の外観

2. ノンファーンレスボイラの開発

2.1 高負荷予混合燃焼技術

燃焼火炎温度を出来るだけ低く抑えながら、高温域の滞留時間を短くするため、水管群に密接する形で予混合バーナを設けた。ここでの詳述は省略するが、ガス燃料と空気の混合に工夫を凝らした予混合バーナは、蒸発量2000kg/hを供給する大容量化とターンダウン1:2に対応する安定した火炎の分割形成と逆火防止(クエンチング)機能を持つメタルタイプのコルゲートバーナを開発した。図2にコルゲートバーナとその分割火炎の一例を示す。バーナ面負荷は、従来のセラミックバーナの3.5~4.5MW/m²に対し、実に14MW/m²にまで高めることが可能となった。



コルゲートバーナの分割火炎

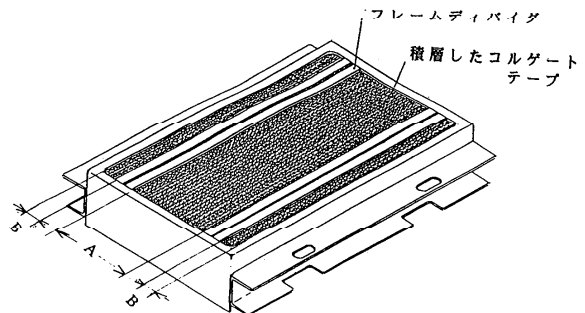


図2 コルゲートバーナと分割火炎形成の状態

2.2 ノンファーネス化と NOx 生成機構

水管群にバーナを近付けて対面させた場合、燃焼反応はどこで完結するのか、NOx 生成領域はどこか、を検証するため、缶体とバーナの間を断熱距離 L_d を設けた特性を図 3 に示す。 L_d の増加に伴い、NOx 濃度は燃焼室を設けた従来のボイラの NOx 値付近まで増加した。この傾向は燃焼ガス温度とこの温度下での燃焼ガス速度による滞留時間を Zeldovich 式に適用して推定した NOx 濃度の計算値と良く一致した。

$L_d=0$ がノンファーネスに対応し、燃焼量が増大すると NO 生成が盛んな高温域の滞留時間が短くなることによって NOx 濃度は低減するが、燃焼ガスが水管群に入った場合にも燃焼反応が抑制されるものと考えられる。実測した燃焼ガス温度分布から、実験的に求めた水側の受熱量からの伝熱計算によって求めた燃焼率（供給燃焼量に対する燃焼量）の燃焼ガスの流動方向変化を図 4 に示した。これを見ると始めの数列まで燃焼反応が継続しており、伝熱計算上も熱発生量を考慮して評価する必要があることがわかる。

更に、NOx 生成量の 95% 以上を占める NO 生成量を Zeldovich 式を適用し、伝熱計算から求めた燃焼ガス温度分布、速度分布から水管群内の NO 生成量分布を予測した。その結果は図 5 の通り、実測値とほぼ一致することがわかった。

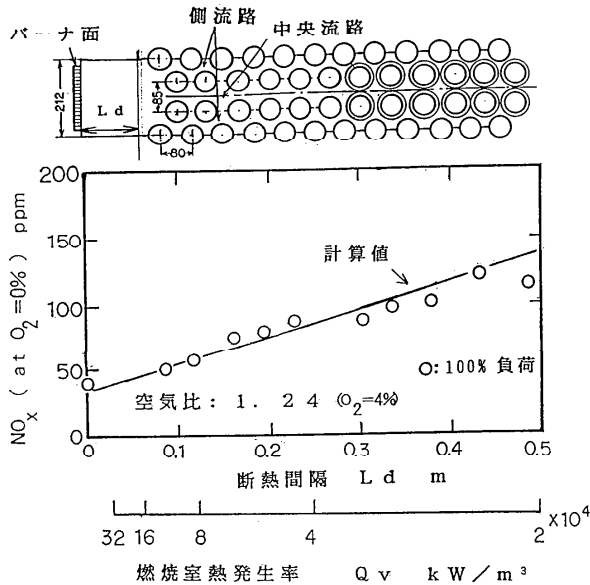


図 3 燃焼室空間が NOx 排出量に及ぼす影響

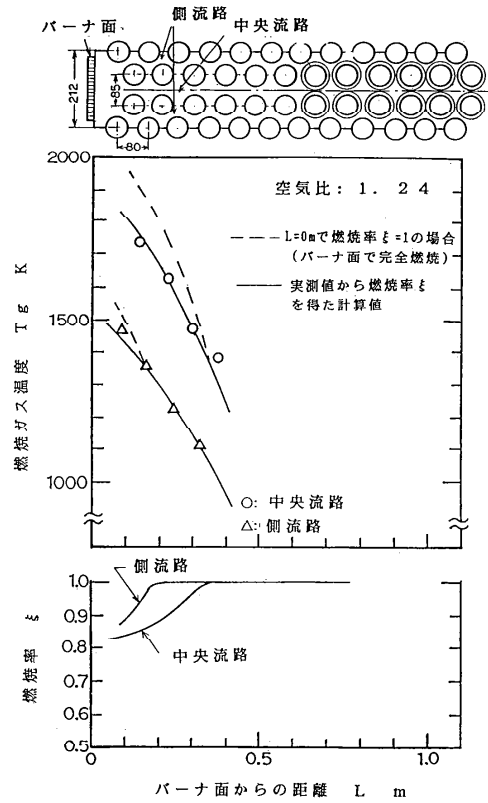


図 4 燃焼ガス流動方向の温度分布、および燃焼率の変化

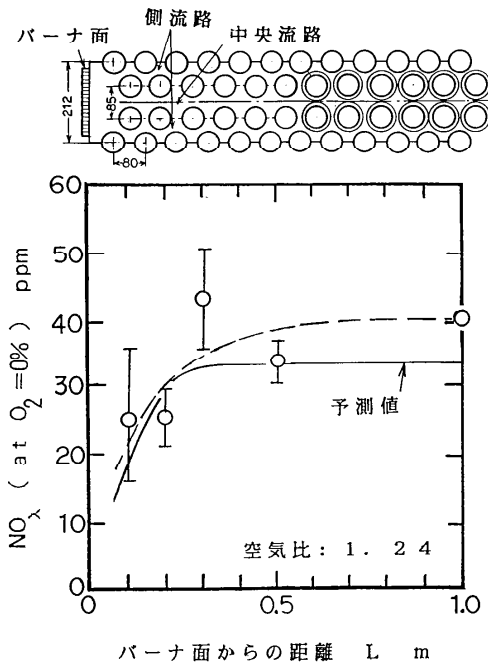


図 5 Zeldovich 式による NO 生成量の予測値と実測値の比較

2.3 ノンファーンレスボイラの NOx 排出特性

今回のノンファーンレスボイラと従来の燃焼室のある小型ボイラの NOx 排出特性を図 6 に示す。通常の適正燃焼範囲においては、従来の 95ppm に対し、ノンファーンレスボイラは 25ppm とおよそ 1/4 と大幅な低減を可能にした。

2.4 ノンファーンレス化によるコンパクト性

今回のノンファーンレスボイラと従来の燃焼室のある小型ボイラの缶体断面を図 7 に示す。蒸発量 2000kg/h にて容積は従来比 1/2 の大幅なコンパクト化を実現すると同時に、このノンファーンレスボイラの商品としての特徴は、図 8 のような複数台の密着設置が可能となった。蒸発量 2000kg/h×4 台のノンファーンレスボイラ設置の場合、従来比でボイラ室 1/2 以下の省スペースを達成した。

3. おわりに

ここでは、ガス燃料専焼のノンファーンレスボイラの最大の特徴である「燃焼しながら伝熱する」という開発の一部を紹介したが、このメカニズムはバーナの燃焼反応との関わりが大きく、特に燃焼ガス流動の前段における伝熱作用解析に関しては実験的検証の部分が残されている。この技術は蒸発量 60～2000kg/h の幅広い小型貫流ボイラのシリーズ化を計り、順調に生産台数を伸ばしているしだいである。

4. 参考文献

- (1) O. Tanaka et. al., "Reduction of NOx Emission by Combined Arrangement of Burner and Water tubes", Proceedings of the 2nd JSME-KSME thermal engineering conference (1992-10).

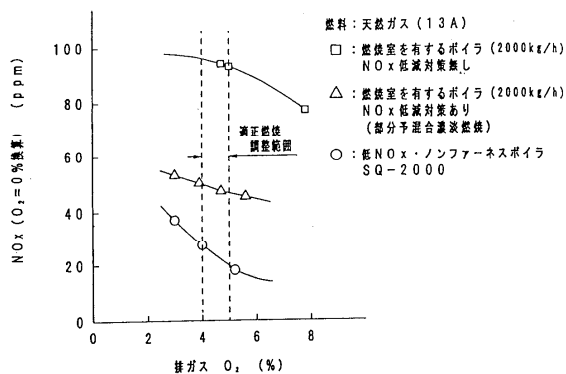
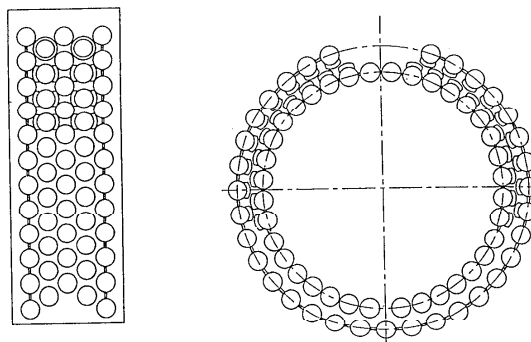


図 6 空気比による NOx 排出量の比較



(a) ノンファーンレスボイラ (b) 従来小型ボイラ

図 7 水管配置の比較 (蒸発量 2000kg/h)

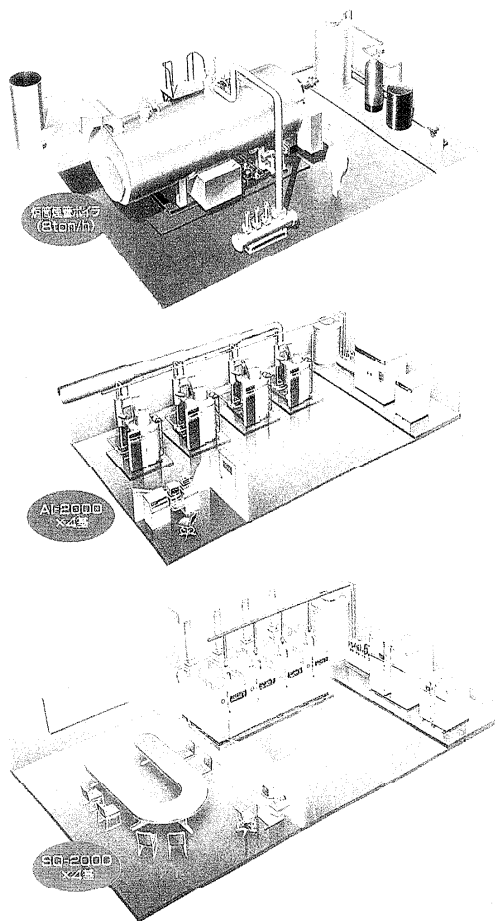


図 8 丸ボイラと従来の小型ボイラおよびノンファーンレスボイラの多缶設置状況模式図 (当社比)

行事カレンダー

	開催日	行事名(開催地)	申込締切	原稿締切	問合せ先	掲載号
1997年						
5月	21(水) ~23(金)	第34回日本伝熱シンポジウム (宮城, 宮城第一ホテル)	'97.1.24	'97.3.14	伝熱シンポジウム準備委員会事務局 橋爪 秀利 Tel: 022-217-7902, Fax: 022-217-7900 E-mail: sympo@hll.nucle.tohoku.ac.jp http://fates.nucle.tohoku.ac.jp/sympo	Vol.35, No.139
6月	2(月) ~6(金)	The 4th World Conference on Experimental Heat Transfer, Fluid Mechanics and Thermodynamics (ベルギー, ブリュッセル)	Abstract '96.3.4	'96.7.19	東京工業大学工学部 黒崎 晏夫 Tel: 03-5734-2540, Fax: 03-5734-2945	Vol.34, No.135
	16(月) ~19(木)	International Symposium on Heat Transfer Enhancement and Energy Conservation (中国, 広州)	Abstract '96.7.31	'96.10.20	九州大学機能物質科学研究所 本田 博司 Tel: 092-583-7787, Fax: 092-583-7882	Vol.35, No.138
7月	28(月) ~8/1(金)	3rd International Thermal Energy Congress (Kitakyushu)	Abstract '97.2.1	'97.4.30	Congress Secretary/ 3rd ITEC Ms H. Okabe (AINEC Co., Ltd.) Tel: 092-852-1575, Fax: 092-845-5135 E-mail: ainec@jms09.jeton.or.jp	Vol.35, No.138
9月	8(月) ~11(木)	Eleventh Symposium on Turbulent Shear Flows (Grenoble, France)	Abstract '96.11.15	'97.5.15		Vol.35, No.138
	9(火) ~12(金)	International Symposium on Air Conditioning in High Rise Buildings '97 (Shanghai, P. R. China)	Abstract '97.3.31	'97.5.31	Tokyo Institute of Technology Professor Kunio Hijikata Tel: 03-5734-3172, Fax: 03-3729-0628	Vol.36, No.140
	30(火) ~10/4(土)	8th International Topical Meeting on Nuclear Reactor Thermal-Hydraulics (京都, 国立京都国際会館)	Abstract '96.6.15	'96.12.15	東京電力(株) 原子力研究所 滝沢 昭彦 Tel: 045-585-8946, Fax: 045-585-8958 E-mail: nereth-8@rd.tepco.co.jp http://www.rd.tepco.co.jp/nereth-8/	Vol.35, No.137
11月	5(水) ~7(金)	日本機械学会平成9年度熱工学講演会 (茨城, 工業技術院筑波研究センター)	'97.6.10	'97.8.15	筑波大学構造工学系 成合 英樹 Tel: 0298-53-5256, Fax: 0298-53-5207 E-mail: nariai@kz.tsukuba.ac.jp	Vol.36, No.141
	30(日) ~3(水)	第10回輸送現象国際会議 (京都, 京都市ササケパーク)	Abstract '97.1.15		輸送現象国際会議事務局 鈴木 健二郎 Tel: 075-753-5250, Fax: 075-753-5851 E-mail: ksuzuki@htrans.mech.kyoto-u.ac.jp	Vol.35, No.139
1998年						
6月	8(月) ~12(金)	International Symposium on Heat and Mass Transfer in Biological and Medical Engineering (Kusadasi, Turkey)	伝熱研究 参照	伝熱研究 参照	筑波大学構造工学系 石黒 博 Tel: 0298-53-5267, Fax: 0298-53-5207 E-mail: ishiguro@kz.tsukuba.ac.jp	Vol.36, No.141
8月	23(日) ~28(金)	第11回国際伝熱会議 (韓国, 慶州)	Abstract '97.6.2	'97.10.1	九州大学工学部 藤田 恭伸	Vol.36, No.140

第34回日本伝熱シンポジウム

(平成9年5月21日～23日)

主催 日本伝熱学会
共催 日本機械学会、日本原子力学会
化学工学会 他

【開催日】

平成9年5月21日(水)～5月23日(金)

(5月20日(火) レクチャーコースを開催)

【講演会場】

宮城第一ホテル(仙台市宮城野区榴岡1-2-45)

JR仙台駅東口より徒歩約3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(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は含みません)

【講演論文集】

○シンポジウム参加者(会場受付にてお受け取り)

日本伝熱学会員: 無料(1セット)

非 会 員: 8,000円(1セット)

○シンポジウム不参加者

日本伝熱学会員: 無料(1セット)で後日郵送

非 会 員: 8,900円

(1セット・送料込み)で後日郵送

○追加注文

会場受け取り: 8,000円(1セット)

後 日 郵 送: 8,900円(1セット)

【懇親会】

日 時: 5月22日(木) 18:30～20:30

(大変申し訳ございませんが、前月号でのご案内より

30分早くなっておりますのでご注意ください)

会 場: 宮城第一ホテル

【参加申込方法】

前月号に挟み込みの郵便振替用紙を各人1名につき1枚づつご使用になり、通信欄に「氏名(ふりがな)、会員・会員外の別、勤務先又は学校名、参加費、懇親会費(ご夫妻・お子様連れでのご参加の場合にはその旨を明記して下さい)、講演論文集(有料分)、払込合計金額」をご記入の上、その合計金額をご送金下さい。参加証は前日・当日受付にてお渡し致します。また、原則として領収書の発行を省略し、郵便振替払込兼受領書をもってかえさせていただきます。

【事前申込締切】

平成9年5月6日(火)(消印有効)

【申込み先】

郵便振替口座 02260-7-1397

第34回日本伝熱シンポジウム準備委員会

【参加・講演の問い合わせ先】

〒980-77 仙台市青葉区荒巻 東北大学大学院

工学研究科量子エネルギー工学専攻

第34回日本伝熱シンポジウム準備委員会事務局

橋爪 秀利

電話: 022-217-7902

Fax: 022-217-7900

E-mail: sympo@hll.nucle.tohoku.ac.jp

【レクチャーコース】

日 時: 5月20日(火) 13:30～18:00

会 場: 宮城第一ホテル

定 員: 150名

参加費: 一般 2,000円, 学生 1,000円

(当日、会場で申し受けます)

申込方法：参加をご希望の方は、氏名、所属、一般・
学生の別、連絡先を明記の上、5月8日(木)
までに

東京大学 飛原英治 宛

FAX: (03)3815-8356 又は

E-mail: hihara@mech.t.u-tokyo.ac.jp

にてお申込みください。

講義1：「情報処理と伝熱工学」中山 恒 殿
(University of Maryland 教授)

電子機器から生体に至る多様な情報処理系を視野に取
り、情報処理に伴うエネルギー消費の機構を解説する。
次に、物理空間における信号伝達系、エネルギー供給系、
熱排出系の配置が情報処理性能にとっていかに重要かを
述べる。処理性能を最高にするこれらの系の最適配置
からハードウェアの形態が決まる。情報処理系の今後
の発展と、これに必要な伝熱工学研究を展望する。

- (1) 情報処理に要するエネルギー
- (2) ハードウェア形態論
- (3) 冷却技術の現状
- (4) 将来展望－微小と多数からなるシステム－

講義2：「熱的快感性を評価する」田辺 新一 殿
(お茶の水女子大学助教授)

快適性は何故よく最近話題にあげられるのか、その背
景に関して解説を行う。特に、ライフスタイルの変化お
よび居住水準に変化に関して述べる。また、熱的快感
性とはどのように定義されるのかを事例をあげて説明
を行い、熱的快感性の基礎となる理論を解説する。温
熱環境の6要素に関する基礎を述べ、人体の感覚を含
めて快適性の評価をどのように行うかを解説する。国
際的な動向も含め説明した後に、最近行われている熱
的快感性の評価手法であるサーマルマネキンや数値解
析手法に関して解説を行う。最後に今後の住宅におけ
る快適性に関してエネルギー問題を含めて総括する。

- (1) 居住水準とライフスタイル
- (2) 熱的快適とは何か？
- (3) 温熱環境の6要素
- (4) 快適性評価指標
- (5) 局部不快感
- (6) サーマルマネキン
- (7) 数値サーマルマネキン

【フロンティアフォーラム】

日 時：5月22日(木) 16:50~18:20

会 場：宮城第一ホテル(D室)

○テーマ1：「分子レベルでの高励起状態エネルギー伝
達現象とその応用」

企画者 水野 彰(豊橋技術大学)

○テーマ2：「生体内における熱・物質・電磁波の輸送・
伝播」

企画者 山田 幸生(工業技術院機械技術研究所)

満淵 邦彦(東京大学国際・産学共同研究セ
ンター)

石黒 博(筑波大学構造工学系)

谷下 一夫(慶應義塾大学理学部)

○テーマ3：「分子伝熱のフロンティア研究の出発」

企画者 井上剛良(東京工業大学)

丸山茂夫(東京大学)

小原 拓(東北大学)

問い合わせ先 東京大学生産技術研究所

西尾 茂文

電話：03-3402-6231

Fax：03-3401-6575

【国際セッション】

日 時：5月22日(木) 16:50~18:20

会 場：宮城第一ホテル(C室)

○Heat Transfer Activities in Australia

Beattie David 氏(Australian Nuclear Science &
Technology Organisation)

○Heat Transfer Activities in Canada

Arun S. Mujumdar 氏(McGill University)

〒980-77 仙台市青葉区荒巻 東北大学大学院

工学研究科量子エネルギー工学専攻

第34回日本伝熱シンポジウム準備委員長

戸田 三朗

電話：022-217-7901

Fax：022-217-7904

【第34回日本伝熱シンポジウムプログラム】

次ページ以降をご参照下さい。

第1日 5月21日(水)

<<A室>>

【層流伝熱Ⅰ】 8:50~10:30

- 座長 山口 義幸(都立大)、黒田 明慈(北大)
- A111 槽円管群まわりの流れと熱伝達の数値解析
太田 照和(東北大工)、*豊谷 彰彦(日立造船)
吉川 浩行(東北大工)
- A112 強制対流熱伝達の境界積分表示と伝熱最適化問題への応用
*桃瀬 一成(阪大基礎工)、佐生 清(阪大院)
木本 日出夫(阪大基礎工)
- A113 Pulsatile Flow Past a Thermally Participating Cylinder: a Regenerator Model
*Krishnamurthy MURALIDHAR(京大工)、鈴木 健二郎
- A114 フィン付き管の伝熱特性に関する三次元定常数値解析(第3報)
*大西 元(京大院)、稲岡 恭二(京大工)
中部 主敬、鈴木 健二郎
- A115 二重管内における液体ナトリウム流量急減に伴う過渡強制対流熱伝達
*竹内 右人(京大理工研)、畑 幸一
塩津 正博(京大)、櫻井 彰(未来研)

【層流伝熱Ⅱ】 10:35~12:15

- 座長 杉山 均(宇大)、三松 順治(岐阜大)
- A121 ねじりテープを挿入した直円管内の層流および強制対流熱伝達の解析
*青山 善行(愛媛大工)
- A122 磁性流体プラグを利用した液体振動による熱輸送システム
*佐藤 剛(山形大学院)、高橋 一郎(山形大工)
- A123 3次元球状液滴内表面張力対流のスペクトル法による解析
*戸谷 剛(北大院)、黒田 明慈(北大工)、工藤 一彦
- A124 遠心浮力をともなう回転管内層流熱伝達
*石垣 博(航技研)
- A125 平行平板流路の強制対流熱伝達におよぼす圧縮性の影響
浅古 豊(都立大工)、*山口 義幸

【熱伝達の促進・制御Ⅰ】 13:00~15:00

- 座長 島田 了八(石巻専修大)、千田 衛(同志社大)
- A131 円形衝突噴流熱伝達の移行に関する研究
*一宮 浩市(山梨大工)、竹間 勝一(山梨大院)
功刀 賢彰(原研)
- A132 断続的吹き出しを有する乱流境界層内の熱伝達
*鈴木 洋(広島大工)、日野本 博幸(広島大)
兼光 健一(広島大院)、菊地 弘(広島大工)
- A133 下向き伝熱面による臭化リチウム水溶液への水蒸気吸収促進
*姫野 修廣(信州大織)、日向 滋、桐田 勇治(信州大院)、小林 弘典(信州大学)
- A134 Influence of Gaps between Side Walls and Ribs on the Heat Transfer in the Straight Rib-Roughened Duct
*Robert KIML(農工大院)、望月 貞成(農工大工)
村田 章(農工大BASE)

- A135 縮小流路における円柱フィン群内の流れと熱伝達
*ハジカ カル(農工大工)、望月 貞成
村田 章(農工大BASE)
- A136 噴流により生成される縦渦の熱・流動特性(第3報)
*東尾 篤史(京大院)、陳 韋、Jeffrey S. ACTON
稲岡 恭二(京大工)、中部 主敬、鈴木 健二郎

【熱伝達の促進・制御Ⅱ】 15:05~17:05

- 座長 一宮 浩市(山梨大)、望月 貞成(農工大)
- A141 キャビテーション気泡の存在する超音波場のエネルギー散逸に関する研究
中川 勝文(豊橋技科大)、*遠藤 正志(豊橋技科大院)
- A142 プール内非定常熱輸送に及ぼす仕切板の影響
*稲田 茂昭(群馬大工)、須藤 和弘(群馬大院)
Wen-Jei Yang(ミシガン大)、栄 軍(群馬大院)
- A143 超音波による水平円柱の伝熱促進
*朱 寧(静岡理工大)、加藤 征三(三重大工)
- A144 界面活性剤添加による抵抗軽減と伝熱促進
*佐藤 公俊(岐阜大院)、三松 順治(岐阜大工)
熊田 雅弥
- A145 マイクロカプセル化相変変化物質スラリーを用いた強制対流熱伝達実験
*久保 真治(原研)、秋野 昭夫、田中 周
長島 昭(慶大)
- A146 トルネード効果による伝熱・流動特性
*谷 寛之(東工大学)、鈴木 祐二(東工大工)
小澤 由行(高砂熱学工業)

【熱伝達の促進・制御Ⅲ】 17:10~19:10

- 座長 青山 善行(愛媛大)、鈴木 洋(広島大)
- A151 バヨネットチューブ内Uターン部対流熱伝達特性
持田 あけの(北大工)、中村 啓一(北大院)
*青木 康修、渡辺 桂史、工藤 一彦(北大工)
黒田 明慈
- A152 円管内に縦渦を発生させた場合の流動および熱伝達特性
*瀬名波 出(琉球大工)、渡辺 信二(琉球大院)
屋我 実(琉球大工)、親川 兼勇
- A153 繊維質添加流動水の管内流動抵抗及び熱伝達
稲葉 英男(岡山大工)、*春木 直人(岡山大院)
堀部 明彦(岡山大工)、尾崎 公一
- A154 熱伝達促進現象に対する局所細分割法の適用
*石田 秀士(阪大基礎工)、木本 日出夫
- A155 円柱群と平板のすきまが平板の熱伝達に及ぼす影響
*松本 亮介(関西大工)、吉川 進三(同志社大工)
福馬 弘之(同志社大院)、千田 衛(同志社大工)
- A156 加振伝熱面上の環状衝突噴流熱伝達
一宮 浩市(山梨大工)、*松島 康浩(山梨大院)

<<B室>>

【噴流・せん断層の流動と制御】 8:50~10:30

- 座長 中川 勝文(豊橋技科大)、竹内 正紀(福井大)

- B111 正方形柱の抵抗軽減と伝熱促進(傾き角45°の場合)
五十嵐 保(防衛大)、*筒井 敬之
- B112 チャネル乱流に対する壁面の正弦振動変形の影響
*三戸 陽一(東大院)、笠木 伸英(東大工)
- B113 不足膨張を伴う空気の衝突噴流による熱伝達の実験的研究(複数
平行ノズルの場合:ノズル直径、ノズルピッチなどの影響)
*澁谷 寿彦(仙台工大)、郡司 陽介(東北学院大工院)
庄司 幸嗣(東北学院大)、佐藤 恭三
- B114 円形衝突噴流熱伝達に及ぼすスタブの影響
*檜和田 宗彦(岐阜大工)、田中 真太郎(岐阜大工院)
田中 光三(岐阜高専)、親川 兼勇(琉球大工)
- B115 軸対称励起噴流の渦輪挙動と衝突熱伝達
*栗間 諄二(山口大工)、高松 大輔(山口大院)
宮本 政英(山口大工)、平田 賢(芝浦工大)
- 【物体周りの自然対流 I】10:35~12:15
座長 日向 滋(信州大)、姫野 修廣(信州大)
- B121 水平円板よりの共存対流熱伝達
*竹内 正紀(福井大工)、木村 照夫、永井 二郎
戸口 哲朗(福井大院)、宮永 俊晴(三機工業)
- B122 上方が拘束された水平加熱平板上自然対流の流動と伝熱
*北村 健三(豊橋技科大工)、浅川 智幸(豊橋技科大院)
- B123 傾斜加熱平板上自然対流の流動と熱伝達
*木村 文義(姫路工大工)、北村 健三(豊橋技科大工)
松尾 学(姫路工大院)、藤原 良樹(姫路工大工)
- B124 鉛直平板よりの自然対流熱伝達に及ぼす形状効果
竹内 正紀(福井大工)、木村 照夫、永井 二郎
*林田 勝也(福井大院)
- B125 水平円筒周りの自然対流乱流境界層への周囲境界条件の影響に
ついて
*服部 康男(電中研)、柏木 栄介、山川 秀次
- 【物体周りの自然対流 II】13:00~14:00
座長 工藤 一彦(北大)、廣瀬 宏一(岩手大)
- B131 エアレーションによる自然対流伝熱制御
高橋 一郎(山形大工)、*菊池 昭洋(山形大)
小野 文人
- B132 温度依存性のある比熱を持つ流体の自然対流熱伝達
*田中 周(原研)、久保 真治、秋野 詔夫
- B133 液体ナトリウム中の4角配列水平円柱バンドルからの自然対流
熱伝達
*畑 幸一(京大工研)、塩津 正博(京大)
竹内 右人(京大工研)、濱 勝彦
櫻井 彰(未来工研研)
- 【密閉空間内の自然対流 I】14:05~15:25
座長 宮本 政英(山口大)、高橋 一郎(山形大)
- B141 VOF法による任意形状流路における熱流動の数値解析(閉空間
内の自然対流への応用)
*白川 英観(九大院)、高田 保之(九大工)
黒木 虎人、伊藤 猛宏
- B142 偏心した水平二重円管内の水の自然対流熱伝達
廣瀬 宏一(岩手大工)、*八戸 俊貴(岩手大院)
- B143 垂直加熱・冷却壁による水-固体微粒子懸濁液の二重拡散対流
岡田 昌志(青学大)、立野 昌義
矢野 聡(青学大院)、*大山 和也(青学大)
- B144 CAES-G/Tの空洞内における熱流体現象に関する基礎的研究
吉田 英生(東工大工)、多田 茂、越後 亮三
*大石 安志(東工大)
- 【密閉空間内の自然対流 II】15:30~16:50
座長 北村 健三(豊技大)、鈴木 立之(富山県立大)
- B151 真空破断条件下における核融合炉真空容器内の置換流挙動
*高瀬 和之(原研東海)、功刀 資彰(原研那珂)
関 泰
- B152 密度成層内の2成分気体混合過程
*武田 哲明(原研)
- B153 回転平板による密閉容器内の熱伝達の促進と抑制
*木村 照夫(福井大工)、竹内 正紀、永井 二郎
片岡 芳章(福井大院)、吉田 哲也
- B154 矩形容器内に置かれた円筒回りの水の冷却過程
*笹口 健吾(熊本大工)、桑原 功治(熊本大院)
浅井 隆史(熊本大学)
- 【密閉空間内の自然対流 III】16:55~18:55
座長 岡田 昌志(青学大)、木村 照夫(福井大)
- B161 鉛直二平板の加熱と冷却による安定密度成層水溶液の混合機構
*日向 滋(信州人職)、姫野 修廣、櫻井 正幸
岩佐 昌征、土方 啓志郎(信州大院)
- B162 同心直方体間の自然対流
*舟渡 裕一(富山県立大)、鈴木 立之
- B163 水平温度勾配下における二重拡散対流セル間の物質移動
西村 龍夫(山口大工)、緒方 保之(山口大工院)
*作良 総俊
- B164 等温の二壁面、天井面、床面よりなる取合いの熱伝達特性
小林 定教(島根大総理工)
*萩原 文男(三菱冷熱工業(株))
- B165 円筒容器内パネル対流の経験的固有直交展開に関する研究
*畠山 潔子(名古屋大院)、吉本 隆行
辻 義之(名古屋大)、大久保 興平、玉置 昌義
久木田 豊
- B166 密閉容器内における自然対流形成過程の非定常数値解析
*土屋 敏明(計算流体研)、武田 邦彦(芝浦工大)
桑原 邦郎(宇宙研)
- << C室 >>
- 【生体と食品の伝熱 I】 8:50~10:10
座長 山田 純(山梨大)、幾世橋 広(東北大工)
- C111 生物体凍結のシミュレーション実験
多田 幸生(金沢大工)、*棚田 順子(金沢大院)
荻 春(金沢大工)、林 勇二郎

第34回日本伝熱シンポジウム

- C112 玉ねぎ表皮組織を用いた細胞内凍結機構の研究
鶴田 隆治(九工大)、*石本 優子(九工大)
増岡 隆士(九工大)
- C113 生体材料の細胞外凍結過程におけるミクロ構造
石黒 博(筑波大構造)、小池 一人(筑波大院)
*堀水 貴(筑波大学)、尾山 朋宏(筑波大院)
喜多 弘美
- C114 生体凍結保存における前処理過程の設計法
*白樫 了(東大工院)、棚澤 一郎(東農工大)
- 【生体と食品の伝熱Ⅱ】 10:10~11:10
座長 鶴田 隆治(九工大)、石黒 博(筑波大)
- C121 積分球による散乱体の光学定数測定
*水野 祥(理科大)、山田 幸生(機技研)
谷川 ゆかり、牧 博司(理科大)
- C122 逆問題光CTアルゴリズムと実験的検証
Ivo W. KWEE (機技研・ロッドン大学)
Sergei G. FROGKUFIN (機技研・NEDO)
谷川 ゆかり(機技研)、*山田 幸生
- C123 低侵襲レーザー加熱治療法開発のための基礎研究
幕内 雅敏(東大医)、橋本 大定(東京警察病院)
庄司 正弘(東大工)、横谷 定雄、渡辺 誠
*田嶋 顕一郎(東大工院)、三宅 昌幸(東大工学)
- 【ふく射伝熱Ⅰ】 11:15~12:15
座長 馬場 弘(北見工大)、宮永 俊之(電中研)
- C131 自己断熱型ガス-ガス熱交換器の研究
*富村 寿夫(九大機能研)、呉 芹(九大総理工院)
藤井 丕夫(九大機能研)、越後 亮三(東工大)
- C132 間接加熱炉の伝熱解析
*中村 泰久(東邦ガス)、青木 修一
- C133 セラミックチューブ鍛造炉におけるピレット昇温特性シミュレーション
*青木 修一(東邦ガス)、中村 泰久
- 【ふく射伝熱Ⅱ】 13:00~14:20
山田 悦郎(秋田大)、横峯 健彦(九大)
- C141 ふく射要素法REM2を用いた非灰色・非等方性散乱媒体のふく射伝熱(一次元モデルによる検証)
円山 重直(東北大流体研)
- C142 統計狭域バンドモデルを用いたCO₂-H₂O-N₂混合気の単色放射率解析
円山 重直(東北大流体研)、*日向野 三雄
Jean TAINE (Ecole Centrale Paris)
- C143 ガスふく射伝熱に及ぼす狭域バンド内非一様性の影響
*岡本 達幸(阪大工)、武藤 哲雄(阪大院)
高城 敏美(阪大工)、田中 友啓
- C144 住空間への適用を目的とした熱放射環境シミュレーション-その1: 曲面状の鏡面を含む空間-
*宮永 俊之(電中研)、中野 幸夫、大沼 敏治
前田 幸司郎(電力計算センター)
- 【ふく射伝熱Ⅲ】 14:20~15:40
- 座長 富村 寿夫(九大)、牧野 俊郎(京大)
- C151 直交選点法による環状流路内ふく射・強制対流共存問題に対する数値解析
*金丸 邦康(長大工)、茂地 徹
- C152 赤外線リフロー炉内におけるプリント配線板の熱解析
*内田 浩基(富士通研)、作山 誠樹、渡辺 勲
名取 勝英、河原田 元信、赤井 礼治郎(富士通)
- C153 炭素繊維シート空気式集熱器の性能解析および実験
*姜 希猛(北見工大)、馬場 弘、金山 公夫、遠藤 登
- C154 非灰色色ふく射伝熱高速解析手法の開発
工藤 一彦(北大工)、黒田 明慈
*石橋 伸哉(北大工院)
- 【ふく射物性】 15:45~17:25
座長 三浦 隆利(東北大)、日向野 三雄(東北大)
- C161 金属のあらい表面におけるふく射反射の角度特性とその伝熱パラメータ表現
牧野 俊郎(京大工)、*中村 彰成(京大院)
森 周一(京大)
- C162 温度変動を伴うふく射性ガス層の全射出率
*上宇都 幸一(大分大工)
- C163 半導体レーザー赤外線吸収を用いた温度測定法に関する研究
*中田 武男(阪大工)、堂浦 康司(阪大院)
小宮山 正治(阪大工)、高城 敏美(阪大院)
- C164 ソーラポンド塩水溶液の入射光と吸収性質の相関-入射光の表面反射及び透過軌跡を考慮して-
*李 相一(北見工大)、金山 公夫、馬場 弘、遠藤 登
- C165 水および塩水溶液の主として可視域における吸収に関する物理化学的考察
*梁 華(北見工大)、金山 公夫、馬場 弘、遠藤 登
- 【熱物性値と測定法Ⅰ】 17:50~19:10
座長 高城 敏美(阪大)、長坂 雄次(慶大)
- C171 非線形効果をを用いた熱物性値の多角的計測法
中別府 修(東大工)、*崎山 幸紀(東工大学)
- C172 HLRW地層処分緩衝材としての珪砂充填圧縮固化ペントナイトの温度伝導率測定
*幾世橋 広(東北大工)、坂野 且典(鹿島技研)
- C173 光音響法による金属はくの熱物性計測に関する研究
*吉田 篤正(岡山大工)、尾前 靖(岡山大院)
鷲尾 誠一(岡山大工)
- C174 普遍的熱伝導方程式を用いた短パルス・レーザー加熱における媒質中の温度応答評価
*唐 大偉(静岡大工)、荒木 信幸
- <<D室>>
- 【二相流のモデル化と数値解析Ⅰ】 8:50~10:30
座長 芹澤 昭示(京大)、竹村 文男(機械研)
- D111 乱流境界層流中の飛散球形粒子に働く流体力の評価
*黒瀬 良一(九大工)、小森 悟

- D112 容器内成層流の自然対流
 7ナル ベンガムト (計算流体研)、桑原 邦郎 (宇宙研)
- D113 9速度セルラオートマトン法による衝撃波の数値シミュレーション
 *小林 朋能 (山形大院)、松隈 洋介 (山形大)
 阿部 豊、安達 公道
- D114 MARSによる3次元気泡発生シミュレーション
 *功刀 資彰 (原研)
- D115 旋回羽根による垂直管内上昇二相流の気液分離と液膜排出機構
 *横堀 誠一 (東芝)、工藤 義明、秋葉 美幸
 飛松 敏美、斎藤 健彦
- 【二相流のモデル化と数値解析II】 10:35~12:15
- 座長 刑部 真弘 (東京商船大)、片岡 勲 (京大)
- D121 シリコンオイル中における球形気泡の抵抗係数
 *竹村 文男 (機械技研)、矢部 彰
- D122 加熱面上の非定常落下液膜流の数値シミュレーション
 *阿部 豊 (山形大工)、川路 正裕 (トヨタ大工)
- D123 二相流エジェクタの二次元流動解析
 中川 勝文 (豊橋技科大)、*武内 裕嗣 (豊橋技科大院)
 中嶋 聖晴
- D124 固液二相流数値解析のための相間相互作用係数の定式化
 *池田 太一 (北陸先端大)、山中 政憲 (武田薬品)
 柘植 英夫 (東北大院)、古畑 朋彦 (東北大工)
 青木 秀之、三浦 隆利
- D125 管内同軸二相流の乱流構造の変化 (多重スケールk-εモデルによる数値解析)
 *早川 啓朗 (慶大院)、佐藤 洋平 (慶大理工)
 菱田 公一
- 【二相流の流動と伝熱I】 13:00~15:00
- 座長 安達 公道 (山形大)、高木 周 (東工大)
- D131 等方性乱流中の固体粒子群による熱輸送過程のDNS及びLES
 *佐藤 洋平 (慶大理工)、菱田 公一
- D132 固液二相衝突噴流における固体粒子のラグランジュ的挙動に関する研究
 *町田 エトガ- 明男 (横浜国大院)、鳥居 薫 (横浜国大)
 西野耕一、遠藤 良輔 (横浜国大院)
- D133 パルス流動層熱交換器の流動・伝熱特性
 *西村 顕 (名大工)、出口 清一、松田 仁樹
 架谷 昌信
- D134 円筒ドラム内の気固間流動・伝熱現象の離散要素法によるモデル化
 *佐直 順治 (東北大工)、森藤 崇行、北村 祐一郎
 古畑 朋彦、三浦 隆利
- D135 垂直環状管路内気液二相流の気体プラグ上昇速度 (第2報)
 小泉 安郎 (工学院大)、*田口 和人 (工学院大院)
 宮下 徹 (工学院大)
- D136 循環流動層ライザー内の放物線型紐状粒子群分布
 *武内 洋 (北工研)、ビアンコ A.、幡野 博之 (資環研)
- 【二相流の流動と伝熱II】 15:05~16:25
- 座長 小泉 安郎 (工学院大)、阿部 豊 (山形大)
- D141 表面波を伴う流下液膜の流動および伝熱特性
 *宮良 明男 (佐賀大理工)
- D142 透明伝熱管を用いた微小重力場の管内強制流動沸騰熱伝達 (第3報、環状流域における二相強制対流熱伝達に及ぼす重力の影響の解析)
 *井上 浩一 (九大工院)、大田 治彦 (九大工)
 藤山 寛 (長崎大工)、吉田 駿 (九大工)
- D143 二相流体排熱ループのシステム特性に関する研究
 *小川 直也 (東芝)、大橋 幸夫、小森 實
- D144 チムニを有する沸騰自然循環ループの流動不安定現象 (第3報: 入口絞りの影響)
 *古谷 正裕 (電中研)、稲田 文夫、安尾 明
- 【二相流の流動と伝熱III】 16:25~17:45
- 座長 横堀 誠一 (東芝)、森 英夫 (九大)
- D151 気泡を含む流れの乱流構造 (気泡間の相互干渉と気泡周囲流の乱れ)
 *藤原 暁子 (慶大院)、前川 宗則
 菱田 公一 (慶大理工)、前田 昌信
- D152 希薄気泡流の画像処理計測
 *西山 徹 (筑波大院)、文字 秀明 (筑波大構工)
 松井 剛一
- D153 気泡混入ヘッダ管の流動特性
 *濱田 朋起 (東京商船大院)、土師 生也 (東京商船大)
 刑部 真弘
- D154 固気混相流を用いた原子力推進についての研究
 *宮戸 直亮 (京大工)、片岡 勲、芹澤 昭示
- 【粒子層における伝熱I】 17:50~19:10
- 座長 佐藤 勲 (東工大)、平田 雄志 (阪大)
- D161 浮遊粒子群による熱輸送機構の解明
 *内藤 善之 (岐阜大院)、熊田 雅弥 (岐阜大工)
- D162 超音波定在音場中の粒子の挙動に関する研究
 *野村 信福 (愛媛大)、村上 幸一、越智 順二
 吉川 幸紀 (愛媛大院)
- D163 流動層内水平円管周りの熱伝達に及ぼす粒子間力の影響
 宮本 政英 (山口大)、*イルハフ F (山口大院)、角田茂利
 加藤 泰生 (山口大)、栗間 諄二
- D164 水蒸気を吸着するゼオライト充てん層内の熱および物質伝達の特性
 *濱本 芳徳 (九大院)、森 英夫 (九大工)、吉田 駿
 米丸 晃
- << E室 >>
- 【電子機器の冷却I】 8:50~10:30
- 座長 辻 俊博 (名工大)、伏信 一慶 (東工大)
- E111 Natural Convection in Fin Arrays with Enclosed Boundaries
 *Jie Wei (東工大)、井上 剛良

第34回日本伝熱シンポジウム

- E112 電子機器筐体内に実装されたLSIパッケージ群のスリット噴流冷却
*近藤 義弘(日立機械研)、松島 均、小松 利広
- E113 ファン付き平板ヒートシンクの冷却性能に及ぼすファン取付高さの影響
*川村 圭三(日立機械研)、松島 均、中島 忠克
- E114 真空中における超電導磁気軸受浮上フライホイールロータの過渡温度上昇解析
*持田 あけの(北大工)、工藤 一彦
橋笠 博正(四国総研)、那須 秀俊
- E115 コルゲートフィン型ヒートシンクの冷却特性
*田坂 誠均(住友金属工業)、篠原 健治郎
小山 健(住友精密工業)、林 千博(住友金属工業)

【電子機器の冷却II】10:35~12:15

- 座長 田坂 誠均(住友金属)、松島 均(日立機械研)
- E121 人工キャピティを有する模擬チップの浸漬沸騰冷却
*久保 秀雄(九大総理工院)、高松 洋(九大機能研)
本田 博司
- E122 加熱突起付き鉛直平行平板間の自然対流(モアレ干渉法による温度場の計測)
*下間 昇(関西大院)、石原 勲(関西大工)
松本 亮介、新井 泰彦
- E123 ヒートパイプによるノートブックPCの冷却方法
*魏 啓陽(成蹊大工)、前沢 三郎、小島 康(富士通)
山崎 直哉、茂木 雅博
- E124 3次元カードスタックプロセッサの熱伝導冷却
*大竹 賢二(東工大)、黒崎 昂夫(東工大)
佐藤 勲、伏信 一慶、中山 恒(Univ.of Maryland)
- E125 ヒートパイプとファンを用いたハイブリッドCPU冷却システム
望月 正孝(アツタ)、*高宮 明弘、益子 耕一
後藤 和彦、斎藤 祐

【沸騰凝縮利用機器】13:00~14:20

- 座長 高島 武雄(横国大)、高松 洋(九大)
- E131 混合液の沸騰過程における生成蒸気濃度に関する研究
宇高 義郎(横国大工)、*高橋 克章(横国大院)
坪井 孝夫(横国大工)
- E132 限定空間内の気泡の成長・崩壊およびそれに伴う液体の挙動に関する数値解析
*洪 海平(九大工)、近藤 一成(九大院)
吉田 駿(九大工)、堀尾 美明(九州松下電器)
- E133 蒸発グループ型ヒートシンク(熱除去能力に関する研究)
西尾 茂文(東大生研)、*永石 幸治(東大院)
- E134 実排ガスをを用いた凝縮伝熱
*矢木 清之(東京商船大院)、石田 和彦
伊東 次衛(東京商船大)、土師 生也、刑部 眞弘

【ヒートパイプ・熱サイフォンI】14:25~15:45

- 座長 清水 昭比古(九大)、川口 清司(アツタ)

- E141 密閉二相熱サイフォンの凝縮部熱伝達に関する研究(非凝縮性ガスの効果)
神永 文人(茨城大工)、*橋本 宏之(茨城大院)
松村 邦仁(茨城大工)
- E142 浸透ヒートパイプの熱輸送限界(溶解度限界)
*一法師 茂俊(熊大工)、井村 英昭(熊大工)
田上 理((株)日之出水道機器)
- E143 蛇行細管ヒートパイプの熱伝達と可視化
*高橋 修(京大工)、河原 全作、芹澤 昭示
河野 益近、赤池 久輝(アトロクス(株))
- E144 二相二重管熱サイフォン内の流動と熱伝達に及ぼす管径比の影響(サブクール沸騰の場合)
*吉田 正道(有明高専)、井村 英昭(熊本大工)
松川 真也(有明高専)

【ヒートパイプ・熱サイフォンII】15:45~17:05

- 座長 阿部 宜之(電総研)、望月 正孝(アツタ)
- E151 マランゴニ効果を利用したマイクロアクチュエータに関する基礎的研究
*吉田 英生(東工大)、郭 建裕(東工大)
小林 健一(東工大)、越後 亮三
- E152 自動車用積層放熱コアを用いた小型沸騰冷却器(ヒートパイプ方式との比較)
*鈴木 昌彦(アツタ)、川口 清司、長賀部 博之
大原 貴英
- E153 自動車用積層放熱コアを用いた小型沸騰冷却器(冷媒流循環と冷却性能)
鈴木 昌彦(アツタ)、川口 清司、*長賀部 博之
大原 貴英
- E154 振動制御型熱輸送管(層流速度分布崩壊の影響)
申 興泰(KIST)、西尾 茂文(東大生研)
呉 性済(三星電子)、*瀧田 義治(東大工院)

【ヒートパイプ・熱サイフォンIII】17:10~19:10

- 座長 山川 紀夫(岩手大)、小林 健一(東工大)
- E161 気泡駆動型熱輸送管(流動様式と熱輸送モデル)
*細田 稔(東大工院)、西尾 茂文(東大生研)
白樫 了(東大工院)
- E162 気泡駆動型熱輸送管(熱輸送特性に関する実験)
西尾 茂文(東大生研)、細田 稔(東大工院)
*永田 真一(東大生研)、渡辺 慶太(芝浦工大学)
- E163 金網ウィックを設置したヒートパイプの熱輸送限界
*野田 英彦(九大工)、東田 淳(九大院)
宮武 修(九大工)
- E164 開放型サーモサイフォン内の伝熱特性に関する実験的研究
*今井 悦也(筑波大院)、菱田 誠(千葉大工)
椎名 保顕(原研)
- E165 振動型ヒートパイプのカオス特性
前沢 三郎(成蹊大工)、*和泉 智水(成蹊大院)
中島 亮輔、魏 啓陽(成蹊大工)
- E166 ヒートパイプの原理を応用した熱駆動ポンプ
前沢 三郎(成蹊大工)、*熱田 匡昭(成蹊大院)
茂手木 剛、魏 啓陽(成蹊大工)

<< F 室 >>

【蒸発伝熱と遷移沸騰】 8:50~10:50

- 伊藤 正昭(日立)、鎌田 長幸(八戸高専)
- F111 遷移沸騰に関する研究(気泡微細化の観察)
*佐藤 英明(東理大院)、石丸 淳二
鈴木 康一(東理大)、鳥飼 欣一
- F112 冷媒の水平管内沸騰熱伝達における管径の影響
飛原 英治(東大工)、*斉藤 静雄
劉 勝芳(元東大院)、青山 幸義(東大)
- F113 噴霧液滴の慣性を利用した蒸発促進(第3報)
*吉田 圭一(慶大院)、荒井 清志
菱田 公一(慶大理工)、前田 昌信
- F114 オーガナイズドモーションにより誘起される蒸気爆発のトリガー現象(II)
杉山 憲一郎(北大工)、五月女 文憲(北大院)
*松場 賢一
- F115 気泡微細化沸騰における気泡の挙動と温度変動
*片桐 健光(東北大院)、熊谷 哲(東北大工)
島田 了八(石巻専修大理工)
- F116 真空中での非平衡蒸発に関する基礎研究
*神通 晶(東北大院)、原 和正(東北大学)
勝村 幸博(東北大工)、橋爪 秀利、戸田 三朗

【沸騰凝縮における伝熱促進I】 10:55~12:15

- 座長 宇高 義郎(横国大)、杉山 憲一郎(北大)
- F121 電解気泡による飽和プール核沸騰熱伝達促進に関する研究
*中山 昭男(九州産大)
- F122 液体中におかれた狭いすき間内への衝突噴流沸騰熱伝達
*鎌田 長幸(八戸高専)
- F123 自由粒子層による沸騰伝熱の高性能化に関する研究
飯田 嘉宏(横国大工)、*高島 武雄
露木 敏勝(東女医大看護)
- F124 高性能凝縮器用伝熱管の開発
*辻本 聡一郎(大阪ガス(株))、水野 宏一、斉藤 道雄

【沸騰凝縮における伝熱促進II】 13:00~14:20

- 座長 井上 晃(東工大)、森 康彦(慶応大)
- F131 非共沸混合冷媒対応伝熱管の高性能化(第1報:理論的検討)
*鹿園 直毅(日立機械研)、伊藤 正昭、内田 麻理
畑田 敏夫
- F132 非共沸混合冷媒対応伝熱管の高性能化(第2報:実験的検討)
*内田 麻理(日立機械研)、伊藤 正昭、鹿園 直毅
畑田 敏夫、大谷 忠男(日立電線システムズ研究所)
- F133 遺伝的アルゴリズムを用いた薄膜の安定構造解析
*宮崎 康次(東工大院)、井上 剛良(東工大)
- F134 対称形状内面溝付管による3成分非共沸混合冷媒の伝熱促進
蛭子 毅(伊持工業)、*藤野 宏和、鳥越 邦和

【凝縮伝熱】 14:25~16:25

- 座長 飯田 嘉宏(横国大)、千葉 陽一(一関高専)
- F141 蒸気流動がある場合の鉛直面上の膜状凝縮
上原 春男(佐大)、*木下 英二(鹿大)
杉本 一章(佐大院)
- F142 水平フィン付き管群におけるHCFC-123/HFC-134aの凝縮
(フィン形状の影響)
*本田 博司(九大機能研)、高松 洋、高田 信夫
竹前 要輔(九大総理工院)
- F143 滴状凝縮過程における水平円管まわりの局所熱流束
*佐々木 文幸(岩手大院)、泉 正明(岩手大工)
山川 紀夫
- F144 3成分混合冷媒の管内凝縮特性の予測計算法
小山 繁(九大機能研)、李 相武(九大院)
*佐藤 一尚
- F145 亜臨界領域における炭酸ガスの体積力対流凝縮(凝縮面が短い場合)
*石原 勲(関西大工)、奥野 勝利(関西大院)
松本 亮介(関西大工)
- F146 気相均一核生成の分子動力学
*秦岡 顕治(名大院)、松本 充弘(名大工)

【自然エネルギーと地球環境関連の熱物質伝達I】

16:30~17:50

- 座長 梅宮 弘道(山形大)、綾 威雄(船研)
- F151 都市温暖化と快適性評価に関する研究
*山田 昇(東北大院)、齋藤 武雄(東北大工研)
- F152 太陽エネルギー利用海水淡水化システムの実証試験
*西川 博樹(慶大院)、土屋 智久(慶大)
樽崎 祐三(荏原製作所)、神谷 一郎
佐藤 春樹(慶大理工)
- F153 凝縮過程を利用したガス吸収の促進
龍本 昭(金沢大工)、*小東 宏次(金沢大院)
多田 幸生(金沢大工)、松田 理(石川高専)
- F154 コージェネレーション用熱電発電器の開発
武石 雅之(三菱重工)、*柳田 尚志
林 秀和(大阪ガス)、藤本 洋

【自然エネルギーと地球環境関連の熱物質伝達II】

17:50~19:10

- 座長 佐藤 春樹(慶応大)、菱田 公一(慶応大)
- F161 ハイドレートを伴う液体CO₂の溶解機構とその熱力学的考察
*田部 豊(東工大院)
平井 秀一郎(東工大炭素循環セ)、岡崎 健
土方 邦夫(東工大)
- F162 二酸化炭素ハイドレート膜強度の計測
*鈴木 亨(筑波大院)、綾 威雄(船舶技研)
山根 健次、成合 英樹(筑波大構造工)
- F163 析出CO₂ハイドレート層の熱伝導率
*綾 威雄(船舶研)、山根 健次、成合 英樹(筑波大)
- F164 1日当りの日照時間と1日当りの日射量の関係
*馬場 弘(北見工大)、金山 公夫、遠藤 登

第2日 5月22日(木)

<<A室>>

【乱流構造と伝熱Ⅰ】 8:30~10:10

- 座長 河村 洋(東理大)、廣田 真史(名大)
- A211 同期発生渦の平板上での崩壊過程における非定常熱流動現象
三松 順治(岐阜大工)、*川田 将嗣(岐阜大院)
浜田 勉(岐阜大学)
- A212 界面活性剤溶液噴流中での運動量および物質移動
*黒瀬 剛秀(慶大院)、台坂 恒
前田 昌信(慶大理工)
- A213 スパン方向に温度勾配を有する平行平板間乱流の直接数値シミュレーション
*松原 幸治(新潟大院)、小林 睦夫(新潟大工)
前川 博、坂井 隆浩(新潟大院)
- A214 遷移領域における乱流熱伝達のシミュレーション
*裴 昌謙(名工大生産システム)
飯田 雄章(名工大機械)、長野 靖尚
- A215 低プラントル数流体の乱流自然対流の数値計算
*鎌倉 勝善(富山高専)、尾添 紘之(九州大機能研)

【乱流構造と伝熱Ⅱ】 10:15~11:55

- 座長 功刀 資彰(原研)、長野 靖尚(名工大)
- A221 湾曲だ円断面管路内の乱流構造計測
杉山 均(宇都宮大工)、秋山 光庸
*波辺 岳男(日立製作所)、加藤 洋幸(宇都宮大院)
- A222 粗面をもつ正方形流路内の乱流熱伝達
*廣田 真史(名大工)、藤田 秀臣
板倉 昭三(名大院)、湯浅 裕行
- A223 不溶性液滴によるクエット液乱流の変化
野根 健(日新電機)、*西野 正人(京工織大院)
田中 清(京工織大)、萩原 良道
- A224 ファイバLGMを用いた壁面せん断応力統計量の計測
*古川 貴之(慶大院)、小尾 晋之助(慶大理工)
益田 重明
- A225 温度差を有する水平混合層における速度・温度同時計測
*佐藤 一穂(東大院)、笠木 伸英(東大工)
鈴木 雄二

【乱流構造と伝熱Ⅲ】 13:50~15:10

- 座長 小林 睦夫(新潟大)、佐藤 恭三(東北学院大)
- A231 抵抗低減流れにおける成層の存在と熱伝達特性
*川口 靖夫(機技研)、台坂 恒(慶大院)
矢部 彰(機技研)、菱田 公一(慶大理工)、前田 昌信
- A232 DNSによるDPIVの高精度化
店橋 護(東工大工)、宮内 敏雄
*福島 誠(東工大学)
- A233 PVC法による乱流のcoherent微細構造の同定
宮内 敏雄(東工大工)、店橋 護
*岩瀬 識(東工大学)、江部 淳(東工大院)、松岡 慶

- A234 高濃度界面活性剤添加水溶液による管摩擦抵抗低減と高効率熱輸送
*今成 正雄(日立機械研)、梁取 美智雄
平松 正義(中部電力電気利用技研)、春日 智子

【乱流構造と伝熱Ⅳ】 15:15~16:35

- 座長 笠木 伸英(東大)、二宮 尚(宇大)
- A241 平均せん断による乱流構造が運動量・熱輸送の素過程に及ぼす影響
*岩月 元臣(名工大院)、飯田 雄章(名工大)
長野 靖尚
- A242 逆圧力勾配乱流境界層のスケール則
*保浦 知也(名工大院)、若杉 知寿
辻 俊博(名工大)、長野 靖尚
- A243 安定温度成層乱流場におけるパッシブスカラーとアクティブスカラーの乱流拡散の相違
*長田 孝二(九大工)、小森 悟
- A244 波状流界面上に発達する水平矩形ダクト内乱流の研究
*武田 健二(名大院)、辻 義之(名大)、玉置 昌義
久木田 豊、近藤 昌也(原研)、中村 秀夫

<<B室>>

【微小重力下での流動と伝熱】 8:30~10:10

- 座長 東 久雄(航技研)、藤井 照重(神戸大)
- B211 重力加速度によって半導体溶液中に誘起される濃度変動
*前田 浩二(東洋大院)、前川 透(東洋大工)
松本 聡(NASDA)、加藤 浩和、依田 真一
木下 恭一(NASDA・NTT)
- B212 低重力下でのスプレー冷却(広範な流量密度域における伝熱特性評価、第三報)
*吉田 顕一(慶大院)、加藤 貴久(慶大学)
岡 利春(石播重工)、阿部 宜之(電総研)
森 康彦(慶大理工)、長島 昭
- B213 微小重力を利用した均質組成化合物半導体結晶の育成
*松本 聡(NASDA)、福田 守(東洋大院)
前川 透(東洋大工)、加藤 浩和(NASDA)
依田 真一、木下 恭一(NASDA・NTT)
- B214 液柱内の3次元非軸対称振動型Marangoni対流の数値解析
*今石 宣之(九大機能研)、安廣 祥一
- B215 微小重力下で浮遊する液滴の位置・速度制御法の開発
工藤 一彦(北人工)、黒田 明慈、*佐藤 崇(北大院)

【電場・磁場・電荷移動下での伝熱Ⅰ】 10:15~11:55

- 座長 太田 照和(東北大)、恩田 和夫(豊技大)
- B221 管内強制対流熱伝達に対する電気流体力学的(EHD)効果のシミュレーション解析
*長谷川 雅人(筑波大院)、矢部 彰(機技研)
成合 英樹(筑波大構造)
- B222 誘電性流体内のイオン伝導に関する研究
*芳賀 正和(福井高専)

- B223 電場による気泡生成促進に関する実験的研究
 Floriana D. STOIAN (Politehnica Univ. of Timisoara)
 *高野 清 (東大生研)、棚澤 一郎 (東京農工大)
 西尾 茂文 (東大生研)
- B224 水平平板上における二次元電析のカパシタ
 *下本 豪紀 (静大)、奥谷 仰、長谷 隆
- B225 磁場による液体ガリウムの自然対流伝達促進実験
 *田川 俊夫 (九大総理工院)、尾添 紘之 (九大機能研)
- 【電場・磁場・電荷移動下での伝熱Ⅱ】 13:50~15:10
- 座長 尾添 紘之 (九大)、伊藤 衛平 (豊技大)
- B231 高周波高電界付与による着霜制御
 *野崎 智洋 (岐阜大工)、岡本 賢一郎、熊田 雅弥
- B232 放電によるメタン改質の研究
 土方 邦夫 (東工大)、*吉高 恵美 (東工大院)
 小川 邦康 (東工大炭素循環セ)
- B233 放電化学反応によるメタン/水からのメタノール直接合成と反応機構
 *山田 展栄 (東工大院)、棚谷 悦 (東工大学)
 小川 邦康 (東工大炭素循環セ)、岡崎 健
- B234 方形波パルス無声放電を用いた非平衡プラズマ化学反応のシリコン酸化膜CVDへの応用
 *石丸 和博 (岐阜高専)、岡崎 健 (東工大炭素循環セ)
- 【電場・磁場・電荷移動下での伝熱Ⅲ】 15:15~16:35
- 座長 岡崎 健 (東工大)、芳賀 正和 (福井高専)
- B241 交番磁場と流動する炭酸カルシウム水溶液による起電力発生に関する研究
 *篠平 大輔 (東京理科大連機院)
 矢部 彰 (機械技研、東京理科大)
 竹村 文男 (機械技研)、牧 博司 (東京理科大)
- B242 放電・化学動力学計算による排煙脱硝過程の理論的考察
 *伊藤 衛平 (豊技大)、恩田 和夫
 間野 隆 (豊技大大学院)、村上 義信
- B243 GaAsデバイス内の電流特性に対するデバイス内温度分布の影響
 伏信 一慶 (東工大)、*館上 敦 (東工大院)
 黒崎 晏夫 (東工大)、佐藤 勲
- B244 並進運動する液滴の電場による流動変化
 *佐藤 広美 (青森開短大)、梶 信藤 (能開大)
 森 康彦 (慶大)

<<C室>>

- 【熱物性値と測定法Ⅱ】 8:30~10:30
- 座長 荒木 信幸 (静岡大)、吉田 篤正 (岡大)
- C211 クラスレート生成系における表面張力の動的変化の検知
 *川崎 暢哉 (慶大院)、柴田 貴光 (慶大学)
 長坂 雄次 (慶大理工)
- C212 接触熱抵抗の分子動力学モデリング (力学的変形と熱伝導)
 *若林 英信 (京大工)、山内 勇一郎 (京大院)
 牧野 俊郎 (京大工)

- C213 平板直接法による小さな平板の熱伝導率測定
 *藤野 淳市 (福岡大)、本田 知宏、山下 宏幸
- C214 ポリウレタンフォーム断熱材の熱伝導率解析
 *曾 重仁 (NEDO)、中島 雅祐 (IHI技研)
 山口 方士、大森 隆夫
- C215 Gibbsアンサンブル法によるシリコンの相平衡シミュレーション
 *本田 尚丈 (慶大院)、長坂 雄次 (慶大理工)
- C216 フォトサーマル赤外検知法による傾斜機能材料の熱物性値評価の研究(第2報: Ni/ZrO₂系FGMの測定)
 *佐藤 務 (慶大院)、牛久 哲 (慶大学)
 長坂 雄次 (慶大理工)

【計測技術とデータベースⅠ】 10:35~11:55

- 座長 加藤 征三 (三重大)、本田 知宏 (福岡大)
- C221 ホログラフィックPIVによる熱流動場の3次元計測法の開発
 *山口 一喜 (慶大院)、前田 昌信 (慶大理工)
- C222 二色UFによる多点温度計測法の開発
 *榊原 潤 (筑波大構構)、R. JADRIAN (イリノイ大)
- C223 感温液晶を用いた温度計測~温度同定法としての最近傍点探索法の検討~
 荻野 文丸 (京人工)、稲室 隆二
 斉藤 泰司 (京大炉)、*水田 敬 (京大院)
- C224 赤外線ふく射からの微粒子濃度測定
 鈴木 利夫 (東北学院大工)、*五辻 鍊 (東北学院大院)
 大島 亮一郎 (東北学院大工)

【計測技術とデータベースⅡ】 13:50~15:10

- 座長 藤川 重雄 (富山県立大)、早坂 洋史 (北大)
- C231 三次元温度速度同時計測のための感温粒子の試作
 *二宮 尚 (宇大工)、秋山 光庸、杉山 均
- C232 2色放射温度計の原理を利用した赤外線温度画像システム
 山田 純 (山梨大)、黒崎 晏夫 (東工大)
 大高 唯晴 (山梨大学)
- C233 二色分光放射温度計の構築とその数値シミュレーションに関する研究
 *稲垣 照美 (茨大工)、岡崎 友範
- C234 サーモグラフの最小検知寸法に関する研究
 *黒川 賢 (NEC三栄)、稲垣 照美 (茨城大)
 安久 正紘、岡本 芳三 (東亜大)

【計測技術とデータベースⅢ】 15:15~16:35

- 座長 秋山 光庸 (宇大)、滝田 謙一 (東北大)
- C241 赤外線非破壊診断へ向けた熱伝導の逆問題と数値シミュレーションに関する研究
 稲垣 照美 (茨城大工)、*石井 敏満 (原研東海)
 岩本 利克 (茨城大工学)、衛藤 基邦 (原研東海)
 岡本 芳三 (東亜大工)
- C242 熱伝導の逆問題解析に基づく熱計測
 *朱 寧 (静岡理工大)、加藤 征三 (三重大工)
 桑原 宏成 (静岡理工大)

第34回日本伝熱シンポジウム

- C243 メタノール蒸気の非平衡凝縮係数の測定(温度・数密度に対する3次元表示)
*藤川 重雄(富山県大工)、小谷 正直(富山県大院)
- C244 インターネットで公開されている伝熱関連のデータベースの利用法に関する研究
小林 健一(東工大)、*鳥井 俊介(東工大)

<<D室>>

【粒子層における伝熱II】 8:30~10:10

- 座長 加藤 泰生(山口大)、笹口 健吾(熊本大)
- D211 セル内固気二相衝突噴流の伝熱促進効果(セル内を循環する粒子の温度挙動の可視化)
黒崎 晏夫(東工大)、佐藤 勲、*岩橋 崇(東工大)
- D212 流動層内の粒子混合挙動の検討
黒崎 晏夫(東工大)、佐藤 勲、*金田 互(JETP)
金子 宇内(東工大)
- D213 粒子層における沸騰に関する研究
*赤堀 匡俊(長岡技科大)、青木 和夫(長岡技科大)
服部 賢、小林 高行(川崎重工業)
- D214 流動層熱交換器における粒子-伝熱面接触時の非定常熱伝導
山田 純(山梨大)、黒崎 晏夫(東工大)、佐藤 勲
*長原 則尚(山梨大)
- D215 反応による熱物性値の変化を伴う多孔質粒子層の伝熱
*藤岡 恵子(阪大院)、平田 雄志(阪大基礎工)

【融解・凝固I】 10:15~11:55

- 座長 林 勇二郎(金沢大)、泉 正明(岩手大)
- D221 水平氷層の温度・濃度複合融解
*菅原 征洋(秋田大)、藤田 忠
- D222 壁面に衝突した液滴の流動解析(濡れ面積の予測)
*深井 潤(九大工)、田中 充(九大院)
宮武 修(九大工)
- D223 蒸発による水滴の冷却と凍結挙動の検討
佐藤 勲(東工大)、黒崎 晏夫
*柿本 恭宏(東工大)
- D224 任意の温度分布をもった2次元加熱壁面上での接触融解現象
*岡 峰夫(富士電機総研)
- D225 水平矩形流路内におけるスラッシュアイスの融解熱伝達
*川南 剛(北大院工)、福迫 尚一郎、山田 雅彦

【融解・凝固II】 13:50~15:10

- 座長 稲葉 英男(山口大)、菅原 征洋(秋田大)
- D231 マッシュー域の形成と成長モデル
*義岡 秀晃(富山商船高専)、古市 平(金沢大院)
林 勇二郎(金沢大工)
- D232 三成分系溶液のマイクロ凝固
林 勇二郎(金沢大工)、*國峰 寛司(明石高専)
義岡 秀晃(富山商船高専)、鈴木 俊晴(金沢大院)
- D233 微細液滴の生成・凝固挙動
山田 雅彦(北大院工)、福迫 尚一郎
*福田 奨(千代田化工)、山本 春樹(旭川高専)

- D234 マイクロカプセル化相変化物質スラリー熱媒体(4)過冷却の低減
*秋野 詔夫(原研)、中野 文彦、久保 真治
長島 昭(慶大)
鷺谷 昭二郎(日本マイクロカプセル)、中西 真行

【融解・凝固III】 15:15~16:35

- 座長 平田 哲夫(信州大)、深井 潤(九大)
- D241 振動・攪拌場における水溶液の凍結挙動
山田 雅彦(北大院工)、福迫 尚一郎
*沢田 逸郎(北大院)、河部 弘道(専修大道短大)
- D242 冷却円管に到達した霧層の昇華による除霜
稲葉 英男(岡山大工)、堀部 明彦、尾崎 公一
*高本 直樹(岡山大院)、今井 誠士(松下冷機)
- D243 分子動力学法を用いた氷の結晶成長シミュレーションに関する研究
*矢崎 丈裕(東工大)、大河 誠司(東工大)
斎藤 彬夫
- D244 噴霧気流中におかれた細線まわりの着氷挙動と着氷限界熱流束(第3報:液滴径の影響)
*鷺 耕二(釧路高専)、山岸 英明
福迫 尚一郎(北大工)

<<E室>>

【ヒートポンプ・冷凍・空調I】 8:30~10:10

- 座長 長崎 孝夫(東工大)、渡辺 藤雄(名大)
- E211 臭化リチウム水溶液の水蒸気吸収における表面張力不安定に関する研究
*藤田 勇(東大院)、飛原 英治(東工大)
- E212 冷媒の水平蒸発管におけるポストドライアウト熱伝達に関する研究
*森 英夫(九大工)、吉田 駿、大石 克巳
福田 健一(九大院)、閻 革
- E213 油を含む冷媒の水平蒸発管内熱伝達係数の予測式
*松永 崇(久留米高専)、吉田 駿(九大工)
- E214 混合冷媒の水平管内における蒸発熱伝達特性
*山本 泰司(三菱電機)、宮村 幸雄、名迫 賢二
松本 和夫、大隅 正人
- E215 熱回路網法による空調用熱交換器の蒸発器性能の予測
*加賀 邦彦(三菱電機先端総研)
山田 賢一(三菱電機住環研)
古藤 悟(三菱電機先端総研)
吉田 孝行(三菱電機住環研)

【ヒートポンプ・冷凍・空調II】 10:15~11:55

- 座長 池上 康之(佐賀大)、高田 保之(九大)
- E221 着霜現象に及ぼす冷却面姿勢の影響
*大久保 英敏(玉川大)、斎藤 修、平原 俊哉
- E222 自己加熱再生方式・回転式除湿器の性能解析
*田中 宏史(福岡工大)
- E223 エアコン用蒸発器における過熱領域の把握
*一色 正男(東芝)、望月 貞成(農工大)
村田 章、鈴木 秀明(東芝)

- E224 熱音響冷凍管内の圧力波とスタック位置
*原 利次(日本工大)、大嶋 丈晴(日本工科大学)
関根 俊和
- E225 音響共鳴管内のスタックの温度分布
*河本 明(東芝)、小澤 守(関大工)
有川 富貴(関大院)
- 【ヒートポンプ・冷凍・空調Ⅲ】 13:50~15:10
- 座長 小澤 守(関西大)、吉澤 善男(東工大)
- E231 スターリングサイクル熱交換器の性能に関する実験的検討
柳生 寿美夫(外大)、*福山 雄二
一色 尚次(東工大)、佐藤 勲
- E232 乾式プレート蒸発器を用いたアンモニア冷凍システムに関する研究
池上 康之(佐賀大理工)、平尾 泰博(前川製作所)
隈部 信之(佐賀大院)、*須藤 岳(佐賀大院)
上原 春男(佐賀大理工)
- E233 非共沸混合冷媒と空気の対向流熱交換器によるエアコンディショナーのCOP向上(第2報)
*渡辺 激雄(中部電力)、長 伸朗
- E234 CO₂を冷媒とする給湯用ヒートポンプサイクルの特徴について
*斎川 路之(電中研)、シトラヴァー ヨハネス(ミュンヘン工大)
橋本 克巳(電中研)
- 【ヒートポンプ・冷凍・空調Ⅳ】 15:15~16:35
- 座長 飛原 英治(東大)、村田 章(農工大)
- E241 酸化マグネシウム/水系ケミカルヒートポンプの高温化に関する研究
加藤 之貴(東工大原研)、*高橋 風太(東工大院)
吉澤 善男(東工大原研)
- E242 細隙流路を用いた吸気器における熱・物質伝達に関する研究
*上原 伸基(東工大院)、長崎 孝夫(東工大総理工)
土方 邦夫(東工大)、松下 英俊(東工大院)
- E243 臨界域CO₂ヒートポンプサイクルの実験研究
*橋本 克巳(電力中央研究所)、長谷川 浩巳
斎川 路之、岩坪 哲四郎
- E244 活性炭/アルコール系吸着ヒートポンプの熱・物質移動促進と伝熱解析
*金森 道人(中部電力)、平松 正義
渡辺 藤雄(名大工)、松田 仁樹、架谷 昌信
- << F 室 >>
- 【直接接触・ミスト冷却Ⅰ】 8:30~10:10
- 座長 多田 幸生(金沢大)、奥山 邦人(横国大)
- F211 スプレーフラッシュ蒸発の機構と特性
瀧本 昭(金沢大工)、*中川 陽子(金沢大院)
林 勇二郎(金沢大工)
- F212 落下液滴による高温表面の温度変動(液滴温度の変化の影響)
*関根 郁平(苫小牧高専)
- F213 すず水によるベーストリガー蒸気爆発実験
*落水 美和(筑波大学)、江頭 靖貴(筑波大院)
松村 邦仁(筑波大工)、成合 英樹(筑波大構造工)
- F214 水中における溶融錫の蒸気爆発と圧力波の干渉
*田中 泰吾(筑波大院)、江頭 靖貴
小林 康徳(宇宙科研)、橋本 博文(筑波大構造工)
成合 英樹
- F215 中性子ラジオグラフィによる溶融金属と水との直接接触伝熱現象の可視化(第1報)
*西 義久(電中研)、古谷 正裕、木下 泉
竹中 信幸(神戸大学)、松林 政人(原研)
- 【直接接触・ミスト冷却Ⅱ】 10:15~12:15
- 座長 菊地 義弘(広島大)、瀧本 昭(金沢大)
- F221 原子間力顕微鏡を用いた微小接触面における熱・電子輸送の解明
*中別府 修(東大工)、井下田 真信(東工大院)
井上 剛良(東工大工)
- F222 蒸気インジェクターノズルの流動特性
*浅野 等(神戸大工)、藤井 照重、竹中 信幸
永江 信也(神戸大院)
- F223 蒸気吸収を伴う噴流気泡の熱・物質伝達
鴨志田 隼司(芝浦工大)、*岡田 拓也(芝浦工大院)
阿形 幸信(新菱冷熱)
- F224 液中内におけるドライアイスの昇華
*澤田 壮之(長岡技科大)、青木 和夫(長岡技科大)
服部 賢、有波 亮(長岡技科大)
- F225 剪断水流に接する液-液界面上の包接水和物生成挙動
*望月 高昭(都立航空高専)、森 康彦(慶大理工)
- 【膜沸騰・極小熱流束Ⅰ】 13:50~15:10
- 座長 服部 賢(長岡技科大)、茂地 徹(長崎大)
- F231 二酸化炭素の臨界点近傍における界面現象
*乃波 純(東北大院)、竹下 博実(東北大工)
相原 利雄(東北大流体研)、小原 拓
- F232 圧力波下の蒸気膜を隔てた液液界面挙動と熱的微粒化機構に関する研究
*井上 晃(東工大)、李 相烈
- F233 垂直円柱における強制対流膜沸騰熱伝達(1)
塩津 正博(京大)、*濱 勝彦(京大エネ研)
- F234 垂直円柱における強制対流膜沸騰熱伝達(2)
*塩津 正博(京大)、濱 勝彦(京大エネ研)
- 【膜沸騰・極小熱流束Ⅱ】 15:15~16:35
- 座長 横谷 定雄(東大)、塩津 正博(京大)
- F241 蒸気膜の整合崩壊に伴う圧力パルス
*佐古 光雄(広島大工)、福永 成徳(広島大工院)
明吉 穰(広島大工学)、菊地 義弘(広島大工)
- F242 有限長の垂直円柱まわりの膜沸騰熱伝達(第2報:沸騰特性の予測)
*茂地 徹(長崎大)、山田 山昭、桃木 悟、金丸 邦康
- F243 有限長の垂直円柱まわりの膜沸騰熱伝達(第3報:解析と実験との比較)
*山田 山昭(長崎大)、茂地 徹、桃木 悟、金丸 邦康

第34回日本伝熱シンポジウム

- F244 水平円筒まわりの過冷膜沸騰における蒸気膜の安定限界 (過冷液内の周期的熱伝導を考慮した解析)
*高松 洋 (九大機能研)、山城 光、本田 博司

第3日 5月23日 (金)

<< A室 >>

【はく離流における伝熱 I】 8:30~10:10

- 座長 五十嵐 保 (防衛大)、萩原 良道 (京工繊大)
- A311 鈍頭平板まわりの乱流熱伝達
太田 照和 (東北大工)、*田代 史世 (東北大院)
- A312 後向きステップまわりの乱流熱伝達
太田 照和 (東北大工)、*博 紅光 (加研)
- A313 オリフィスを有する矩形流路内の凍結挙動
山田 雅彦 (北大院工)、福迫 尚一郎
*呉 益 (北大院)
- A314 後向きステップ流れの再付着領域における伝熱機構 (はく離せん断流の特性)
*古市 紀之 (岐阜大院)、八賀 正司 (高山短大)
熊田 雅弥 (岐阜大工)
- A315 脈動流場におけるくぼみ付き流路内の物質移動促進
西村 龍夫 (山口大工)、*岡 直樹 (山口大工院)
国次 公司 (山口大工)

【はく離流における伝熱 II】 10:15~11:55

- 座長 藤田 秀臣 (名大)、吉川 浩行 (東北大)
- A321 プラフボディまわりの流動と熱伝達
*橋口 真宜 (計算流体研)、アハム ベタソル
桑原 邦郎 (宇宙研)
- A322 剥離流領域におかれた円柱まわりの熱伝達特性に関する研究
*武田 清之 (秋田高専)、相場 眞也
- A323 長方形断面柱をおいた平行平板間流路内の熱伝達 (壁面熱流束変動と可視化による流れの同時測定)
*中川 慎二 (同志社大院)、平出 篤志
千田 衛 (同志社大工)、吉川 進三
- A324 可視化・計測による不安定な馬蹄渦構造の研究
鶴野 省三 (防衛大学校)、*松口 淳 (防衛大学校理工)
- A325 管群の熱伝達に及ぼす付着スケールの影響
太田 照和 (東北大工)、*楊 開新 (東北大院)

【乱流のモデル化と数値シミュレーション】 12:40~14:40

- 座長 石垣 博 (航技研)、西村 龍夫 (山口大)
- A331 代数応力モデルによる曲がり円管内乱流の数値解析
杉山 均 (宇都宮大工)、秋山 光庸
*篠原 康則 (宇都宮大院)、人見 大輔
- A332 非等方k-εモデルによる正方形断面管内二次流の予測計算
*竹内 敦彦 (新潟大院)、小林 睦夫 (新潟大工)
松原 幸治 (新潟大院)、前川 博 (新潟大工)
- A333 低から中プラントル数流体の平行平板間乱流熱伝達のDNS
*大坂 光一 (東理大院)、阿部 浩幸
河村 洋 (東理大理工)、山本 稀義 (航技研)

- A334 乱流coherent微細構造のReynolds数依存性
*店橋 護 (東工大工)、宮内 敏雄
池田 淳 (東工大学)

- A335 せん断自由な乱流への非等方渦粘性モデルの拡張
*須賀 一彦 (豊田中研)

- A336 改良2層モデルによる乱流熱伝達解析 (第一報、速度場2層モデルの構築)
*服部 博文 (名工大)、葛西 孝昭 (名工大院)
長野 靖尚 (名工大)

【燃焼における伝熱 I】 14:45~16:05

- 座長 稲村 隆夫 (弘前大)、基上 洋 (東北大)
- A341 超音速流中に置かれた円柱の水素による膜冷却効果
*滝田 謙一 (東北大工)
- A342 水素・空気乱流予混合火炎の局所構造
宮内 敏雄 (東工大工)、店橋 護
*名田 讓 (東工大院)、今村 征寛
- A343 熱循環型セラミックバーナーの希薄燃焼における伝熱シミュレーション
*毎原 玲香 (名大院)、篠田 昌久 (名大高温研)
小林 敬幸、新井 紀男
- A344 数値解析による単一コークス塊の焼成現象の推算
*宮内 寛太 (東北大院)、青木 秀之、三浦 隆利

【燃焼における伝熱 II】 16:05~17:05

- 座長 新井 紀男 (名大)、宮内 敏雄 (東工大)
- A351 小型プール火災での熱の流れ
*早坂 洋史 (北大工)、西村 健太 (北大院)
工藤 祐嗣
- A352 Ti-Al系金属間化合物の燃焼合成
*花村 克悟 (岐阜大工)、加藤 丈晴 (岐阜大院)
- A353 高温ガス中における芳香族炭化水素のすす生成挙動の解明
*久枝 穰 (東北大工)、林 慎治、青木 秀之
三浦 隆利

<< B室 >>

【回転場の流動と伝熱】 8:30~10:30

- 座長 稲垣 照美 (茨大)、宮下 博理 (東北学院大)
- B311 円筒容器内の水平な加熱回転円板上の対流熱伝達
廣瀬 宏一 (岩手大工)、*保坂 和郎 (岩手大院)
横山 孝男 (山形大工)
- B312 管軸に垂直な軸まわりに回転する正方形管内乱流熱伝達のLES
*村田 章 (東京農工大BASE)
望月 貞成 (東京農工大工)
- B313 貫流を伴う回転キャビティ内の熱伝達特性
*齊藤 弘順 (農工大院)、望月 貞成 (農工人工)
村田 章 (農工大BASE)
- B314 永久磁石式渦電流リタータの熱伝達の促進
吉田 英生 (東工大工)、小林 健一、越後 亮三
*伊海 佳昭 (東工大学)
山田 忠治 ((株)いすゞ中央研究所)

- B315 エンジンとしての相対論的天体磁気圏
*新田 伸也(名大高温球)、新井 紀男
座長 能登 勝久(神戸大)、金丸 邦康(長崎大)
- B316 加熱した回転円板上の自然対流場における速度と温度の同時測定
荻野 文丸(京大工)、稲室 隆二
斉藤 泰司(京大炉)、*斉藤 敦彦(京大工院)
【多孔質内の伝熱Ⅰ】 10:35~11:55
座長 吉田 英生(東工大)、宮田 嘉明(東京ガス)
- B321 繊維質多孔質層の熱および物質移動
*河合 洋明(北海道工大)、岡垣 理
福迫 尚一郎(北大院工)
- B322 多孔質乱流への内部幾何構造の影響
*高津 康幸(九工大)、増岡 隆士
山口 哲哉(九工大)
- B323 積層多孔質層内の自然対流の揺動
増岡 隆士(九工大)、*谷川 洋文、鶴田 隆治
山崎 祐光(九工大院)
- B324 多孔質体を応用した高負荷除熱機器の開発
*江原 真司(東北大院)、藤沢 隆広(東北大学)
戸田 三朗(東北大工)、橋爪 秀利、勝村 幸博
【多孔質内の伝熱Ⅱ】 12:40~14:20
座長 青木 和夫(長岡技科大)、花村 克悟(岐阜大)
- B331 液体飽和多孔質体の凍結による定常流動過程
*宮田 嘉明(東京ガス)
- B332 多孔質体内 Post-Forchheimer 流に関する研究
*桑原 不二朗(静大工)、亀山 吉朗(静大院)
中山 顕(静大工)
- B333 極微細流路内の熱伝達特性(一測定法の提案)
*水上 浩(東芝)、松浦 康次(東京農工大)
村田 章(東京農工大工)、望月 貞成
- B334 多孔質体内二相流の数値解析
*ニッ井 雅文(静大院)、桑原 不二朗(静大工)
井上 昌彦(静大院)、中山 顕(静大工)
- B335 繊維系有機吸着剤の水蒸気脱着に関する研究
稲葉 英男(岡山大工)、尾崎 公一、堀部 明彦
*下山 力生(岡山大院)
【複合対流伝熱Ⅰ】 14:25~15:45
座長 板谷 義紀(名大)、藤井 丕夫(九大)
- B341 強制・自然複合対流下にある直列二円柱まわりの流動と熱伝達
*アブラウ(広島大院)、藤江 勲哉(広島大)
鈴木 洋(広島人工)、菊地 義弘
- B342 加熱された水平円管流の乱流遷移
*小泉 博義(電通大)、山家 兼人(電通大院)
- B343 円柱後流の双子渦挙動に与える正浮力の影響
*能登 勝久(神戸大工)、松下 陽一(神戸大院)
中島 健(神戸大工)
- B344 障害物後流の旋回渦による気体巻き込みに関する研究Ⅱ
菅原 啓法(東北大・学)、*熊沢 達也(東北大院)
戸田 三朗(東北大工)、橋爪秀利、勝村幸博
- 【複合対流伝熱Ⅱ】 15:45~17:05
座長 能登 勝久(神戸大)、金丸 邦康(長崎大)
- B351 超流動ヘリウムにおけるエントロピー伝搬
*今 英明(東洋大院)、石井 孝治
前川 透(東洋大工)
- B352 SO₂酸化反応を伴う触媒表面上の熱伝達
*広井 透(名大工)、板谷 義紀、松田 仁樹
架谷 昌信
- B353 Cz結晶成長過程における融液の温度振動(第2報)
*山元 崇(京大院)、シュミット ヤス(京大工)
アケル ウルズ(三洋電機)、中部 主敬(京大工)
鈴木 健二郎
- B354 CZ法低プラントル数流体の流れ現象測定
*東 久雄(航技研)、吉原 正一、大西 充
江守 智之(横国大)、鳥居 薫
<<C室>>
- 【分子熱流動Ⅰ】 8:30~10:10
座長 橋本 博文(筑波大)、前川 透(東洋大)
- C311 磁気共鳴イメージングによる温度・流速分布の同時計測
*小川 邦康(東工大炭素循環セ)、當房 誠(東工大学)
入口 紀男(シマズ旭)
平井 秀一郎(東工大炭素循環セ)、岡崎 健
- C312 高電圧極短パルスプラズマの構造形成機構
*岡崎 健(東工大炭素循環セ)、安田 真一(東工大院)
平井 秀一郎(東大炭素循環セ)
- C313 自由分子流域における傾斜基板のカパレジ
*木下 淳一(静大)、長谷 隆
- C314 薄膜プロセス装置内の流れと表面反応のMCシミュレーション
*加藤 征三(三重大工)、上野 篤司(三重大院)
寺尾 裕介(三重大院)
- C315 希薄気体中の粒子に働く熱泳動力の評価
*結城 和久(九大総理工院)、日下部 智之
清水 昭比古(九大総理工)、横峯 健彦
- 【分子熱流動Ⅱ】 10:15~11:55
座長 中別府 修(東大)、松本 充弘(名大)
- C321 定常拡散の分子動力学シミュレーション
*河原 治(富山高専)
- C322 光熱変換機構の量子分子動力学的研究
*芝原 正彦(東大院)、小竹 進(東洋大工)
- C323 メゾスコピック多電子系における単電子トンネル現象
*児玉 勇司(東洋大院)、前川 透(東洋大工)
- C324 分子動力学の熱流束
*小竹 進(東洋大工)
- C325 Effects of Molecular Vibration on Solid Surface Energy Transfer
*T.N.ZOLOTOUKHINA(原研)、小竹 進(東洋大)
- 【分子熱流動Ⅲ】 12:40~14:40

- 座長 松本 杜平(機械研)、丸山 茂夫(東大)
- C331 気液平衡状態に関する分子動力学的研究
中館 博(東北大院)、勝村 幸博(東北大工)
橋爪 秀利、戸田 三朗
- C332 電解質水溶液の表面の分子動力学
*大宮司 啓丈(東大院)、飛原 英治(東大工)
- C333 気液界面の分子境界条件と非平衡物質伝達
鶴田 隆治(九工大)、*田中 弘之(九工大)
増岡 隆士(九工大)
- C334 磁性コロイドのマイクロストラクチャー解析
*森本 久雄(東洋大院)、前川 透(東洋大工)
- C335 クーロン反発型コロイド分散系の動特性
*宗像 佳克(東洋大院)、前川 透(東洋大工)
石川 正道(三菱総研)
- C336 気液界面における液体水の構造
*小原 拓(東北大流体研)、小田桐 大(東北大院)
相原 利雄(東北大流体研)
- 【分子熱流動Ⅳ】 14:45~16:05
- 座長 河原 治(富山高専)、小川 邦康(東工大)
- C341 不凍化タンパク質の付着した氷表面の結晶成長の分子動力学シミュレーション
スライ・グランド(筑波大院)、松本 杜平(機械技研)
*矢部 彰(機械技研&筑波大)
中込 和哉(富山医薬大)、竹村 文男(機械技研)
- C342 分子動力学法による固体壁面上の気泡核生成
丸山 茂夫(東大工)、*木村 達人(東大工学)
山口 康隆(東大工院)
- C343 固体面上の液滴の非平衡分子動力学シミュレーション
丸山 茂夫(東大工)、*倉重 俊武(東大工院)
山口 康隆
- C344 固体上の微小液滴における分子の拡散現象
*松本 杜平(機械技研)
- 【分子熱流動Ⅴ】 16:05~17:25
- 座長 井上 剛良(東工大)、芝原 正彦(東大)
- C351 マイクロ波照射による凝縮過程制御の研究
*弘津 聡史(筑波大院)、橋本 博文(筑波大構造工)
青木 功(東大工)
- C352 分子動力学シミュレーションによるフラーレン生成機構モデル
*山口 康隆(東大工院)、丸山 茂夫(東大工)
- C353 FT-ICRによるクラスターの質量分析
丸山 茂夫(東大工)、*林 秀明(東大工院)
吉田 哲也(東大工学)、井上 満(東大工)
- C354 TOF質量分析装置によるクラスターのレーザー解離
丸山 茂夫(東大工)、*木村 大(東大工院)
山本 愛彦(東大工学)、井上 満(東大工)
- <<D室>>
- 【融解・凝固Ⅳ】 8:30~9:50
- 座長 斎藤 彬夫(東工大)、稲田 孝明(機械研)
- D311 平行平板間流路における熔融樹脂の凝固・結晶化過程の予測に関する研究
*谷口 雅巳(三菱重工業)、青木 美昭、平尾 康彦
相原 利雄(東北大流体研)
- D312 スタッドレスタイヤによる氷層の摩擦融解
*藤田 忠(秋田大)、菅原 征洋
中川原 勝美(秋田大学)
- D313 相変化を伴う材料表面の数値解析
*勝村 幸博(東北大工)、橋爪 秀利、戸田 三朗
- D314 球カプセル型潜熱エネルギー貯蔵タンクの蓄熱・放熱シミュレーションに関する研究
*山田 健一(東北大院)、齋藤 武雄(東北大工研)
- 【融解・凝固Ⅴ】 9:50~10:50
- 座長 今石 宣之(九大)、矢部 彰(機械研)
- D321 偏荷重を伴う接触融融に関する研究
*熊野 寛之(東工大)、斎藤 彬夫、大河 誠司
柴田 康二(東工大)、山田 雄一
- D322 氷の融解シミュレーションにおける諸条件の影響
*姜 塚東(東工大)、大河 誠司、斎藤 彬夫
- D323 Heat Transfer from the Moving Heat Source of Arbitrary Shape
*Sergei A. FOMIN(東北大工研)、齋藤 武雄
- 【蓄熱蓄冷Ⅰ】 10:55~11:55
- 座長 金山 公夫(北見工大)、佐々木 章(秋田高専)
- D331 水の過冷却解消に及ぼす超音波の影響
*稲田 孝明(機技研)、神生 直敏(北海道工試)
矢部 彰(機技研)、田中 誠、小澤 由行(高砂熱学)
- D332 微細潜熱蓄熱材混合水溶液と熱媒体空気泡との直接接触熱交換
稲葉 英男(岡山大工)、堀部 明彦、尾崎 公一
*藤崎 将彦(岡山大院)
- D333 架橋ポリエチレン粒子充填潜熱蓄熱槽の放熱特性
稲葉 英男(岡山大工)、*李 中民(岡山大院)
堀部 明彦(岡山大工)、尾崎 公一
- 【蓄熱蓄冷Ⅱ】 12:40~14:40
- 座長 齋藤 武雄(東北)、梁取 美智雄(日立機械研)
- D341 クラスレート水和物の生成を伴う水中ノズルからの液滴生成挙動
加藤 雅博(慶大院)、*飯田 智之(慶大学)
森 康彦(慶大理工)
- D342 冷却液体との接触界面における水溶液の凍結と離脱
*平田 哲夫(信州大工)、石川 正昭
万尾 達徳(高砂熱学)、藤井 泰樹(信州大院)
- D343 水平円管群周りの水溶液の凍結現象
石川 正昭(信州大工)、平田 哲夫
*金田 健(信州大院)、浅野 文規(信州大学)
- D344 大容量氷蓄熱システムの冷却取出し特性(ガスタービン吸気冷却システムへの適用)
*渡辺 裕(東芝)、新宮 肇、後藤 功一、吉野 仁
玉谷 修三(東京電力)、中津 雪絵

D345 逆転流動層における水平加熱円管周りの強制対流熱伝達

山田 雅彦(北大院工)、福迫 尚一郎
*渡辺 健司(富士通)、河合 洋明(道工大)

D346 温度選択蓄熱槽による自然エネルギーの蓄熱実験
*遠藤 登(北見工大)、金山 公夫、馬場 弘
岡本 淳(北見工大)

【蓄熱蓄冷Ⅲ】 14:45~16:05

座長

小川 清(日大)、大河 誠司(東工大)

D351 球カプセル内の自然対流/接触複合融解の数値解析
*保科 栄宏(東北大院)、齋藤 武雄(東北大工研)

D352 氷水移送を伴う水蓄熱装置に関する研究
*野間 毅(東芝)、山下 勝也、八文字 孝幸
三嶋 直輝、関田 早苗、岩片 基樹

D353 炭素繊維を添加した潜熱蓄熱材の伝熱特性
*大森 広美(九大工)、深井 潤、大石 明(九大院)
児玉 芳一、宮武 修(九大工)

D354 潜熱蓄熱・フラッシュ蒸発ハイブリッドシステムの性能
宮武 修(九大工)、*北村 伸(九大院)
野田 英彦(九大工)、永里 康広(九大院)

【蓄熱蓄冷Ⅳ】 16:05~17:05

座長 秋野 詔夫(原研)、山田 雅彦(北大)

D361 球形カプセル内で潜熱蓄熱材が融解する際の熱伝達
*梁取 美智雄(日立機械研)、今成 正雄
本間 隆(北電総合研)、渡辺 恭吾
小泉 博義(電通大)

D362 内壁温度分布を考慮した円筒カプセル内接触融解の解析
*星 朗(東北大工研)、齋藤 武雄

D363 球カプセル型潜熱エネルギー貯蔵システムに関する実験的研究
*齋藤 武雄(東北大工研)、文 鐘勲(慶北産業大)

<< F 室 >>

【生産加工プロセスにおける流動と伝熱Ⅰ】 8:30~10:10

座長 足立 岳志(石巻専修大)、平澤 茂樹(日立機械研)

E311 高周波加熱FZ法単結晶育成過程に関する実験的研究
*宗像 鉄雄(機技研)、棚澤 一郎(農工大)

E312 スプレー冷却時のクエンチ点に及ぼす諸因子の影響
*東海林 成人(住友金属)、原口 洋一、播木 道春

E313 高温炉内に噴霧される金属塩水溶液の乾燥および微粒子形成機構
*小林 潤(名大院)、出口 清一(名大)、板谷 義紀
松田 仁樹、架谷 昌信

E314 銅合金の連続鋳造に対する凝固と流動の連成解析の適用
*竹内 勝彦(神戸製鋼所)、三宅 俊也、仲山 公規
石飛 秀樹、大迫 淳一

E315 モーター用アルミ合金フレームの接触熱抵抗
*高橋 研二(日立機械研)、桑原 平吉、川崎 伸夫
小俣 剛(日立産業機器)、須川 英一郎

【生産加工プロセスにおける流動と伝熱Ⅱ】 10:15~11:55

座長 高橋 研二(日立機械研)、横山 孝男(山形大)

E321 一方向凝固過程における対流制御と結晶成長
西村 龍夫(山口大工)、*小谷 和雅(山口大工院)

E322 両側非等温プレス成型されたガラス製品におけるひけの実験的検討
*龍腰 健太郎(旭硝子(株))、黒崎 晏夫(東工大)
佐藤 勲、佐藤 安雄(旭硝子(株))

E323 プラスチックフィルムのインフレーション成形に関する熱流動解析
*赤池 治(名工大、三菱化学)、辻 俊博(名工大)
長野 靖尚

E324 エキシマレーザーによる高分子材料のアブレーションに関する基礎的研究(第2報)
石黒 博(筑波大構造)、*山本 博之(筑波大院)
野口 英明(筑波大学)、菊池 薫(機械技研)
山田 幸生

E325 液状高分子ポリマーの流動先端部における非定常熱流動現象
三松 順治(岐阜大工)、*川瀬 長隆(岐阜大院)
片山 裕(岐阜大学)

【生産加工プロセスにおける流動と伝熱Ⅲ】 12:40~13:40

座長 宗像 鉄雄(機技研)、塚田 隆夫(東北大)

E331 液相メタノール合成反応における触媒層厚さの影響
*劉 秋生(機械技研)、竹村 文男、矢部 彰
梶山 士郎(三菱ガス化学)、梶田 敏夫、中村 賢司

F332 スピア周りに固化層に関する研究
横山 孝男(山形大工)、*佐藤 敦(山形大院)
羽生田 孝(世紀(株))、小関 範一

E333 溝付基板における銅スパッタ膜の流動現象解析
*平澤 茂樹(日立機械研)、斉藤 達之(日立デセ)
山口 日出

【高性能コンパクト熱交換器Ⅰ】 13:45~15:05

座長 前沢 三郎(成蹊大)、小山 繁(九大)

E341 シャーパターンのもつ長方形流路内の局所熱(物質)伝達
廣田 真史(名大工)、*藤田 秀臣
Ahmad Syuhada(名大院)、吉田 尚史(名大工)
荒木 慎二(名大院)、田中 雅(中部電力)

E342 オフセットフィン熱伝達に及ぼすフィン配置のずれの影響
*水野 昌幸(IHI)、堀 政義、工藤 一彦(北大工)

E343 フラットフィンチューブ型熱交換器における流れと熱伝達(第3報:修正フィン効率の提案)
畠 冠南(日立工業)、*大久保 栄作、蛭子 毅
鳥越 邦和

E344 超高温用高性能セラミック熱交換器に関する研究(流動層内のフィン管群の熱伝達)
*姫路 裕二(岐阜大院)、熊田 雅弥(岐阜大工)

【高性能コンパクト熱交換器Ⅱ】 15:10~16:30

座長 熊田 雅弥(岐阜大)、蛭子 毅(日立工業)

- | | |
|---|---|
| <p>E351 触媒機能を有するフィンにおける反応・伝熱特性(第1報:吸熱反応を伴う場合の理論解析)
*奥山 邦人(横浜国大工)、小川 敦嗣(横浜国大院)
飯田 嘉宏(横浜国大工)</p> <p>E352 触媒機能を有するフィンにおける反応・伝熱特性(第2報:メタノール分解反応を伴う実験)
奥山 邦人(横浜国大工)、*小川 敦嗣(横浜国大院)
飯田 嘉宏(横浜国大工)</p> <p>E353 混合冷媒HFC134a/HFC123のプレートフィン蒸発器内の熱伝達特性
*屋良 朝康(九大機能研)、廣石 晃久(九大総理工院)
小山 繁(九大機能研)</p> <p>E354 ガス制御型サーモサイフォン式熱交換器
魏 啓陽(成蹊大工)、*大倉 成幸(成蹊大院)
奥田 史郎、前沢 三郎(成蹊大工)</p> | <p>F331 沸騰の数値モデル
*庄司 正弘(東大工)、田嶋 顕一郎(東大工院)</p> <p>F332 水中における水銀面の超高速レーザ加熱--圧力発生と界面挙動--
*上野 一郎(東大工院)、伊藤 浩二(東大工研)
井上 満(東大工)、庄司 正弘</p> <p>F333 高速加熱される平面伝熱面上の揺らぎ核生成後の急速蒸発過程
飯田 嘉宏(横国大工)、奥山 邦人
*澤 公博(横国大院)</p> <p>F334 Lennard-Jones混合液体における気泡生成の分子シミュレーション
*金城 友之(名大院)、松本 充弘(名大工)</p> <p>F335 微小発熱体からの沸騰熱伝達
*山本 紀彦(東工大院)、高木 周(東工大)</p> <p>F336 管群沸騰のボイド構造の数値解析
藤田 恭伸(九大工)、*白 強、日高 澄具
藤本 貫行(九大院)</p> |
|---|---|

<< F室 >>

【限界熱流束Ⅰ】 9:30~10:30

- 座長 成合 英樹(筑波大)、竹中 信幸(神戸大)
- F311 種々の液体中の異なる形状をもつ発熱体における広範囲なサブクール度および系圧力下に対するプール沸騰臨界熱流束(Part 1:実験結果)
*福田 勝哉(神戸商船大)、畑 幸一(京大理工工研)
塩津 正博(京大)、櫻井 彰(未来材料研)
- F312 種々の液体中の異なる形状をもつ発熱体における広範囲なサブクール度および系圧力下に対するプール沸騰臨界熱流束(Part 2:その機構)
*櫻井 彰(未来材料研)、塩津 正博(京大)
畑 幸一(京大エネ理工工研)、福田 勝哉(神戸商船大)
- F313 ねじりテープ挿入管沸騰熱伝達における圧力と温度変動
*鈴木 伸寿(東北大院)、熊谷 哲(東北大)

【限界熱流束Ⅱ】 10:35~11:55

- 座長 水上 紘一(愛媛大)、福田 勝哉(神戸商船大)
- F321 超高熱負荷面の衝突噴流冷却における限界熱流束の研究(第2報:非定常熱入力の効果)
*松下 英俊(東工大院)、井上 晃(東工大)
有富 正憲、李 相烈
- F322 垂直狭隘環状流路内気液二相流の流動機構(フラクティングと限界熱流束)
小泉 安郎(工学院大)、*西田 浩(工学院大院)
大竹 浩靖(工学院大)、安濃田 良成(原研)
- F323 流動脈動下における限界熱流束特性の一般化表示
*梅川 尚嗣(関大工)、小澤 守、光永 有(関大院)
三島 嘉一郎(京大研)、日引 俊、齋藤 泰司
- F324 強制流動沸騰の限界熱流束機構に関する研究(一様加熱管における壁温と熱流束の変動)
*横谷 定雄(東大工)、渡辺 誠
煎谷 輝伸(東大工学)、庄司 正弘(東大工)

【核沸騰Ⅰ】 12:40~14:40

- 座長 本田 博司(九大)、花岡 裕(室蘭工大)

【核沸騰Ⅱ】 14:45~16:45

- 座長 鴨志田 隼司(芝浦工大)、戸田 三朗(東北大)
- F341 複数の小孔からなる開口部を有する水平環状すきま内におかれた円管の沸騰熱伝達
*土田 一(秋田高専)、相場 眞也
- F342 急減圧による液体窒素の沸騰現象に関する実験的研究
*森越 義和(室蘭工大院)、渡辺 敏見
花岡 裕(室蘭工大)、戸倉 郁夫
- F343 非凝縮性気体を含む液体の減圧沸騰開始
水上 紘一(愛媛大工)、竹田 誠(パナソニック日立)
*向笠 忍(愛媛大工)
- F344 白金表面からの水およびエタノールの沸騰開始
*水上 紘一(愛媛大工)、古谷 英樹(愛媛大院)
阿部 文明(愛媛大工)、向笠 忍
- F345 核沸騰特性への汚れの影響
*土師 生也(東商大)、丁 福来(東商大院)
刑部 真弘(東商大)
- F346 気泡生成の非線形特性
庄司 正弘(東大工)、*久島 弘太郎(東大工院)
阿部 憲幸(東大工学)

第34回日本伝熱シンポジウム(仙台)

時刻	A 室	B 室	C 室	D 室	E 室	F 室
8:30						
9:00	8:50~10:30 【層流伝熱Ⅰ】 A11(5件)	8:50~10:30 【噴流・せん断層の流動と制御】 B11(5件)	8:50~10:10 【生体と食品の伝熱Ⅰ】 C11(4件) 10:10~11:10 【生体と食品の伝熱Ⅱ】 C12(3件)	8:50~10:30 【二相流のモデル化と数値解析Ⅰ】 D11(5件)	8:50~10:30 【電子機器の冷却Ⅰ】 E11(5件)	8:50~10:50 【蒸気伝熱と凝移沸騰】 F11(6件)
12:00	10:35~12:15 【層流伝熱Ⅱ】 A12(5件)	10:35~12:15 【物体周りの自然対流Ⅰ】 B12(5件)	(休憩5分) 11:15~12:15 【ぶく射伝熱Ⅰ】 C13(3件)	(休憩5分) 10:35~12:15 【二相流のモデル化と数値解析Ⅱ】 D12(5件)	(休憩5分) 10:35~12:15 【電子機器の冷却Ⅱ】 E12(5件)	(休憩5分) 10:55~12:15 【沸騰凝縮における伝熱促進Ⅰ】 F12(4件)
13:00	13:00~15:00 【熱伝達の促進・制御Ⅰ】 A13(6件)	13:00~14:00 【物体周りの自然対流Ⅱ】 B13(3件) (休憩5分) 14:05~15:25 【密閉空間内の自然対流Ⅰ】 B14(4件)	13:00~14:20 【ぶく射伝熱Ⅱ】 C14(4件) 14:20~15:40 【ぶく射伝熱Ⅲ】 C15(4件)	昼食(12:15~13:00) 13:00~15:00 【二相流の流動と伝熱Ⅰ】 D13(6件)	13:00~14:20 【沸騰凝縮利用機器】 E13(4件)	13:00~14:20 【沸騰凝縮における伝熱促進Ⅱ】 F13(4件)
15:00	(休憩5分) 15:05~17:05 【熱伝達の促進・制御Ⅱ】 A14(6件)	(休憩5分) 15:30~16:50 【密閉空間内の自然対流Ⅱ】 B15(4件) (5分休憩) 16:55~18:55 【密閉空間内の自然対流Ⅲ】 B16(6件)	(休憩5分) 15:05~16:25 【二相流の流動と伝熱Ⅱ】 D14(4件) 16:25~17:45 【二相流の流動と伝熱Ⅲ】 D15(4件)	(休憩5分) 14:25~15:45 【ヒートパイプ・熱サイフォンⅠ】 E14(4件) 15:45~17:05 【ヒートパイプ・熱サイフォンⅡ】 E15(4件) (5分休憩) 17:10~19:10 【ヒートパイプ・熱サイフォンⅢ】 E16(6件)	(休憩5分) 14:25~16:25 【凝縮伝熱】 F14(6件)	(5分休憩) 16:30~17:50 【自然エネルギーと地球環境関連の熱物質伝達Ⅰ】 F15(4件) 17:50~19:10 【自然エネルギーと地球環境関連の熱物質伝達Ⅱ】 F16(4件)
17:00	(5分休憩) 17:10~19:10 【熱伝達の促進・制御Ⅲ】 A15(6件)	(2.5分休憩) 17:50~19:10 【熱物質値と測定法Ⅰ】 C17(4件)				

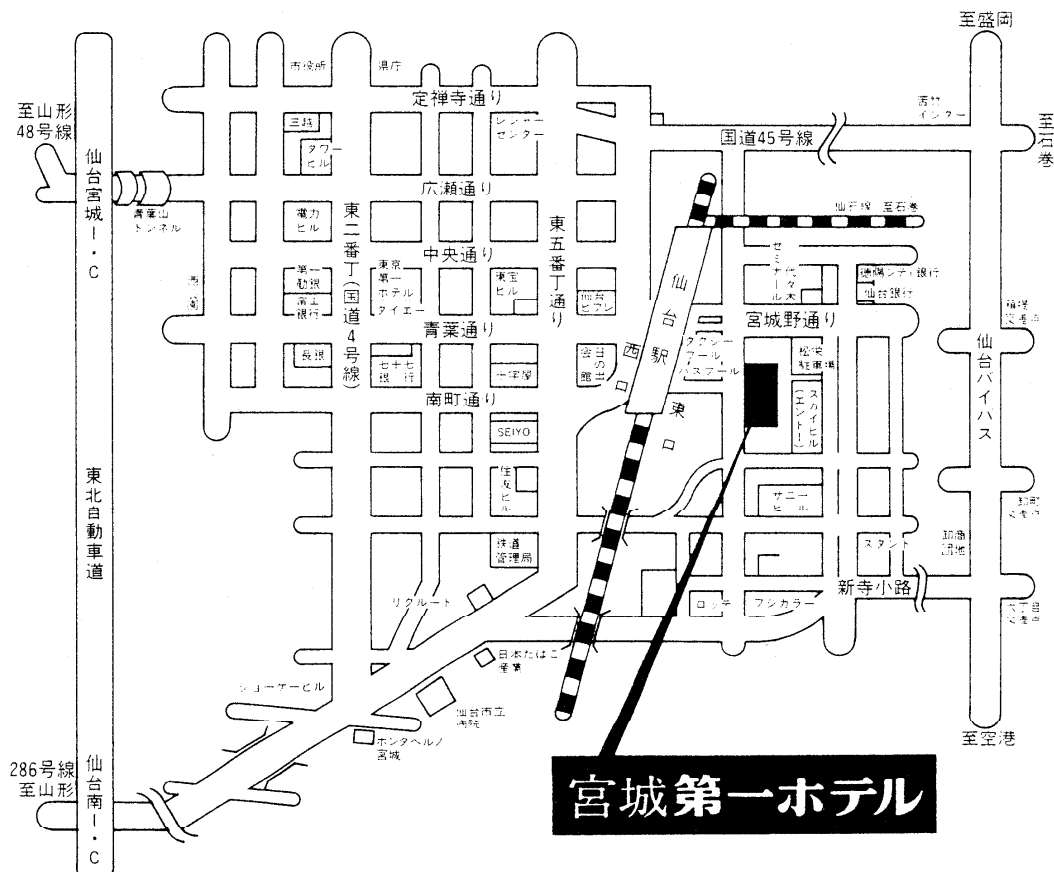
第34回日本伝熱シンポジウム

第34回日本伝熱シンポジウム(仙台)

時刻	第2日目(5月22日(木))				
	A室	B室	C室	D室	E室
8:30	8:30~10:10 【乱流構造と伝熱Ⅰ】 A21(5件)	8:30~10:10 【微小重力下での流動と伝熱】 B21(5件)	8:30~10:30 【熱物性値と測定法Ⅱ】 C21(6件)	8:30~10:10 【粒子層における伝熱Ⅱ】 D21(5件)	8:30~10:10 【ヒートポンプ・冷凍・空調Ⅰ】 E21(5件)
9:00					
10:00	10:15~11:55 【乱流構造と伝熱Ⅱ】 A22(5件)	10:15~11:55 【電場・磁場・電荷移動下での伝熱Ⅰ】 B22(5件)	10:35~11:55 【計測技術とデータベースⅠ】 C22(4件)	10:15~11:55 【融解・凝固Ⅰ】 D22(5件)	10:15~11:55 【直接蒸発・ミスト冷却Ⅱ】 F22(5件)
12:00				昼食(11:55~12:40)	
13:00				総会 12:40 13:40	
15:00	13:50~15:10 【乱流構造と伝熱Ⅲ】 A23(4件)	13:50~15:10 【電場・磁場・電荷移動下での伝熱Ⅱ】 B23(4件)	13:50~15:10 【計測技術とデータベースⅡ】 C23(4件)	13:50~15:10 【融解・凝固Ⅱ】 D23(4件)	13:50~15:10 【ヒートポンプ・冷凍・空調Ⅲ】 E23(4件)
17:00	15:15~16:35 【乱流構造と伝熱Ⅳ】 A24(4件)	15:15~16:35 【電場・磁場・電荷移動下での伝熱Ⅲ】 B24(4件)	15:15~16:35 【計測技術とデータベースⅢ】 C24(4件)	15:15~16:35 【融解・凝固Ⅲ】 D24(4件)	15:15~16:35 【蒸発・極小蒸気流Ⅰ】 F23(4件)
					15:15~16:35 【蒸発・極小蒸気流Ⅱ】 F24(4件)
					16:50~18:20 フロンティアフォーラム
					16:50~18:20 国際セッション
					(休憩1.5分)
					18:30 ~ 20:30 懇親会

第34回日本伝熱シンポジウム(仙台)

時刻	A室	B室	C室	D室	E室	F室
8:30	8:30~10:10 【はく槽流における伝熱Ⅰ】 A31(5件) (休憩5分)	8:30~10:30 【回転場の流動と伝熱】 B31(6件) (休憩5分)	8:30~10:10 【分子熱流動Ⅰ】 C31(5件) (休憩5分)	8:30~9:50 【融解・凝固Ⅳ】 D31(4件) 9:50~10:50 【融解・凝固Ⅴ】 D32(3件) (休憩5分)	8:30~10:10 【生産加工プロセス における流動と伝熱Ⅰ】 E31(5件) (休憩5分)	9:30~10:30 【限界熱流束Ⅰ】 F31(3件) (休憩5分)
8:50	10:15~11:55 【はく槽流における伝熱Ⅱ】 A32(5件)	10:35~11:55 【多孔質内の伝熱Ⅰ】 B32(4件)	10:15~11:55 【分子熱流動Ⅱ】 C32(5件)	10:55~11:55 【蓄熱蓄冷Ⅰ】 D33(3件)	10:15~11:55 【生産加工プロセス における流動と伝熱Ⅱ】 E32(5件)	10:35~11:55 【限界熱流束Ⅱ】 F32(4件)
9:00						
10:00						
12:00	12:40~14:40 【乱流のモデル化と 数値シミュレーション】 A33(6件) (休憩5分)	12:40~14:20 【多孔質内の伝熱Ⅱ】 B33(5件)	12:40~14:40 【分子熱流動Ⅲ】 C33(6件)	昼食 (11:55~12:40)	12:40~13:40 【生産加工プロセス における流動と伝熱Ⅲ】 E33(3件) (休憩5分)	12:40~14:40 【核沸騰Ⅰ】 F33(6件) (休憩5分)
13:00	14:45~16:05 【燃焼における伝熱Ⅰ】 A34(4件)	14:25~15:45 【複合対流伝熱Ⅰ】 B34(4件)	14:45~16:05 【分子熱流動Ⅳ】 C34(4件)	14:45~16:05 【蓄熱蓄冷Ⅲ】 D35(4件)	13:45~15:05 【高性能コンパクト 熱交換器Ⅰ】 E34(4件) (休憩5分)	14:45~16:45 【核沸騰Ⅱ】 F34(6件)
15:00	16:05~17:05 【燃焼における伝熱Ⅱ】 A35(3件)	15:45~17:05 【複合対流伝熱Ⅱ】 B35(4件)	16:05~17:25 【分子熱流動Ⅴ】 C35(4件)	16:05~17:05 【蓄熱蓄冷Ⅳ】 D38(3件)	15:10~16:30 【高性能コンパクト 熱交換器Ⅱ】 E35(4件)	
17:00						



- JR仙台駅東口より——徒歩約3分
- 仙台宮城インターより——車で約20分
- 仙台南インターより——車で約25分
- 仙台空港より——車で約40分

日本機械学会平成9年度熱工学講演会 講演募集 (本会協賛)

開催日：1997年11月5日(水)、6日(木)(以上講演会)、7日(金)(研究機関の見学)

会場：工業技術院筑波研究センター共用講堂(茨城県つくば市梅園)

募集テーマ：「一般セッション」熱工学の全分野

「オーガナイズドセッション(セッション内容に関する問い合わせ先)」

- (1) 新しい熱物性測定技術と標準データ・データベース
(馬場哲也(計量研):Tel. 0298-54-4053, baba@nrlm.go.jp)
- (2) エレクトロニクスの伝熱・熱物性(平澤茂樹(日立):Tel. 0298-32-4111, hira@mcrl.hitachi.co.jp)
- (3) 最新熱計測(リモートセンシング, 超高温, 高精度技術を含む)
(小野晃(計量研):Tel. 0298-54-4111, ono@nrlm.go.jp)
- (4) 環境調和型燃焼技術(地域環境保全, エンジンなどを含む)
(大屋正明(資環研):Tel. 0298-58-8200, oya@nire.go.jp)
- (5) 水素エネルギー技術(濱純(機械研):Tel. 0298-58-7080, hama@mel.go.jp)
- (6) 生体・医用熱工学(山田幸生(機械研):Tel. 0298-58-7055, yamada@mel.go.jp)
- (7) 新冷媒・冷凍空調・室内環境(松尾一也(日立):Tel. 0298-32-4111, matsuo@merl.hitachi.co.jp)
- (8) 熱電変換・熱電冷却(神本正行(電総研):Tel. 0298-54-5280, kamimoto@etl.go.jp)
- (9) 地球環境保全技術・再生エネルギー技術(田中忠良(電総研):Tel. 0298-54-5397, tatanaka@etl.go.jp)
- (10) 高度熱回収・熱輸送・熱利用技術(広域エネルギーシステム技術を含む)
(矢部彰(機械研):Tel. 0298-58-7079, yabe@mel.go.jp)

講演申込締切日：1997年6月10日(火) 講演原稿提出締切日：1997年8月15日(金)

講演論文集：通常の論文集のほか、そのCD-ROM化版も発行します。

問い合わせ、研究発表申込書請求及び講演申込先：

〒305 茨城県つくば市天王台1-1 筑波大学構造工学系 成合英樹
(Tel/Fax: 0298-53-5256 Fax: 0298-53-5207 E-Mail: nariai@kz.tsukuba.ac.jp)

平成9年度熱流体フォーラム講演会開催のご案内

第1回 5月17日(土) 午後1時~午後5時

「21世紀のエネルギーと燃焼」 近畿大学教授 水谷 幸夫 先生

「環境共生型エネルギーシステムの構築に向けた技術開発」 名古屋大学教授 架谷 昌信 先生

第2回 7月19日(土) 午後1時~午後5時

"Applications of Modern Multidimensional Measurement Methods" Prof. R. J. Adrian (University of Illinois)

"Experimental and Computational Studies of Oscillatory Flow Past Cylinders" Prof. P. W. Bearman (Imperial College)

第3回 10月23日(木) 午後3時~午後5時

「地球温暖化と気候変動の研究」 北海道大学教授 松野 太郎 先生

第4回 12月6日(土) 午後1時~午後5時

「熱流体乱流モデルの最近の進展」 名古屋工業大学教授 長野 靖尚 先生

「生体細胞の凍結における生死と伝熱」 金沢大学教授 林 勇二郎 先生

場所：芝浦工業大学本館43教室

※なお、聴講料は熱流体フォーラム会員・学生は無料、一般(非会員)は6,000円となります。

お問い合わせ先：芝浦工業大学機械工学科 流体力学研究室

熱流体フォーラム事務局

TEL 03-5476-2409/FAX 03-5476-3077

INTERNATIONAL CENTRE FOR HEAT AND MASS TRANSFER
BIOTRANSPORT'98
INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON
HEAT AND MASS TRANSFER IN BIOLOGICAL AND MEDICAL ENGINEERING
June 8- 12, 1998 Kusadasi, Turkey

The main objective of the Symposium is to bring together scientists and engineers from around the world involved in bioheat and mass transfer research and to provide a relaxed atmosphere for in-depth discussion and exchange of the state-of-the-art of related theory, experiments, and applications. The sessions are as follows: 1) Heat and mass transport in tissue engineering processes, 2) Energy based surgical modalities: microwave, ultrasound, radio frequency, laser, cryosurgery, 3) Thermally coupled phenomena in living systems: laser tissue optics; hyperthermia cancer therapy; burn injury processes; tissue and organ cryopreservation, 4) Mass transport limited function in the design and operation of artificial organs, 5) Measurement and modeling of the thermal influence of blood perfusion in living tissues; thermal methods to measure blood perfusion, 6) Microscale heat and mass transport phenomena in biological systems, 7) Design for commercial scale tissue processing protocols, 8) Temperature-triggered drug delivery in living tissues

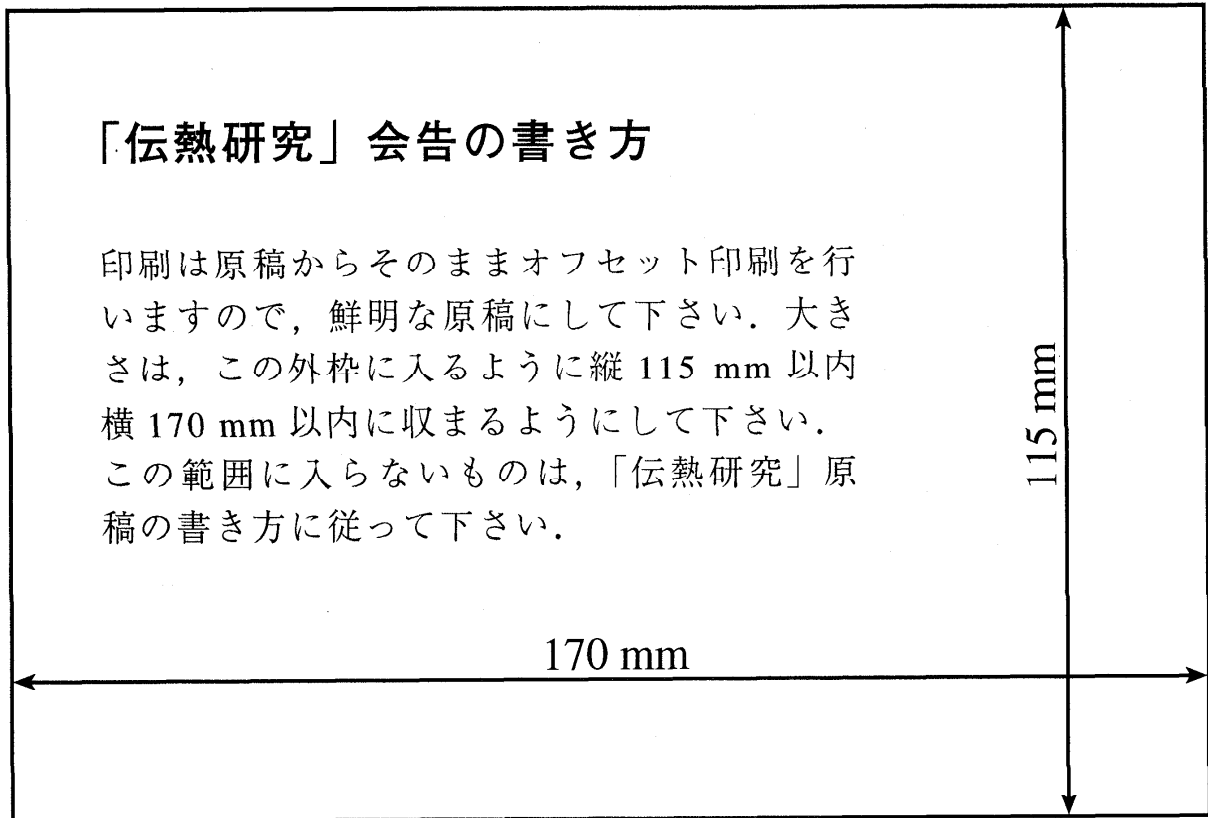
DEADLINES

- | | |
|--------------------------------|---|
| <i>Stand-up Presentations:</i> | * October 1, 1997: Preliminary Application Form due to ICHMT Secretariat |
| | * November 15, 1997: Four copies of full paper due to K.R. Diller |
| | * May 31, 1998: Final camera ready copy of paper due, plus an Extended Abstract |
| <i>Poster Presentations:</i> | * March 31, 1998: Four copies of Extended Abstracts due to K.R. Diller |
| | * May 31, 1998: Final camera ready copy of Extended Abstract |

ADDRESSES AND NUMBERS

Chairman: Professor Kenneth R. DILLER
 Biomedical Engineering Program
 The University of Texas at Austin ENS 612
 Austin, TX 78712-1084, USA
 Tel: +1-512-471-7167, Fax: +1-512-471-0616
 E-mail: kdiller@mail.utexas.edu

ICHMT Secretariat: Professor Faruk ARINC
 Mechanical Engineering Department
 Middle East Technical University
 06531 Ankara, Turkey
 Tel: +90-312-210-1429, Fax: +90-312-210-1331 or 1266
 E-mail: arinc@metu.edu.tr



「伝熱研究」原稿の書き方

30

42 mm

(1行)
(2行)
(3行)
(4行)
(5行)
(6行)
(7行)
(8行)

伝熱 太郎 (伝熱大学)

1. 「伝熱研究」用原稿の標準形式

用紙サイズ：A4 縦長 (210mm×297mm), 横書き

余白サイズ：上余白 30 mm, 下余白 30 mm
左余白 20 mm, 右余白 20 mm

コ ラ ム：2 段組とします。

1 コラム長 80 mm, コラム間隔 10 mm

活字サイズ：10 ポイント (10×0.3514=3.514 mm) の
全角文字を標準とします。英文字・
数字には半角文字が好ましい。

1 行の字数：1 段あたり 23 文字程度

行 送 り：15 ポイント (15×0.3514=5.271 mm)

1 頁あたり 45 行となります。

2. 「伝熱研究」用原稿作成上の注意

(1) 印刷は原稿からそのままオフセット印刷で行いますので、この点を考慮の上、写真・図表等には特に注意して鮮明なものをご使用ください。

(2) 原稿枚数は原則として最大 10 枚 (図表込み) を越えないでください。

(3) 原稿は出力フォーマットに従って作成の上編集委員会までご送付ください。

(4) 図表は、原稿内に直接張り込んでください。

(5) 原稿の頁数は各頁の上すみに青鉛筆で薄く 1/8, 2/8 のように記入してください。

(6) 本手引きの各種寸法及び文字数等は、お手持ちのワープロの機能によっては、必ずしもこれらを満足できないかもしれません。このような場合には適宜これにできるだけ近くなるように、原稿をおつくりくださいますようお願い申し上げます。

(7) 本文の体裁・項目の分け方などは、自由にお書きください。

15 ポイント行間

15 ポイント行間

題目の部分は、編集委員会で作成いたしますので、8 行の空白 (=42 mm) を用意しておいてください。また、表題・氏名・所属の和文および英文は別紙にご用意下さい。なお、2 頁目以降は、最初の行から 2 段組で本文をお書きください。

22.5 ポイント行間あるいは半行を挿入

22.5 ポイント行間あるいは半行を挿入

その他の事項

・可能ならば、字体に関しては、本文には明朝体を使用し、見出しにはゴシック体を使用してください。

20

20

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。

【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	本会に特に功勞のあった者で、総会において推薦された者	8,000円 但し、 70才以上は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。

- 「伝熱研究、THERMAL SCIENCE AND ENGINEERING」を郵送します。
(本年度発行予定：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
- 「日本伝熱シンポジウム講演論文集」を無料でさしあげます。
・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(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、事務局宛にファックスまたは郵送で送り下さい。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JISコー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

【会員増加と賛助会員口数増加のお願い】

個人会員と賛助会員の増加が検討されています。会員の皆様におかれましても、できる限り周囲の関連の方々や団体に入会をお誘い下さるようお願いいたします。また、賛助会員への入会申込み受付におきまして、A(3口)、B(2口)、C(1口)と分けております。現賛助会員におかれましても、できる限り口数の増加をお願いいたします。

【会費納入について】

会費は当該年度内に納入してください。請求書はお申し出のない限り特に発行しません。会費納入状況は事務局にお問い合わせ下さい。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になります。

(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いたします。

【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、至急納入をお願いします。特に、平成7年度以降の会費未納の方には「伝熱研究・THERMAL SCIENCE AND ENGINEERING」の送付を停止しており、近く退会処分が理事会で決定されます。

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)

- 入会届、変更届、退会届の受付
- 会費納入の受付、会費徴収等
- 会員、非会員からの問い合わせに対する応対、連絡等
- 伝熱シンポジウム終了後の「講演論文集」の注文受付、新入会員への「伝熱研究・THERMAL SCIENCE AND ENGINEERING」発送、その他刊行物の発送
- その他必要な業務

(所在地)

〒113 東京都文京区湯島2-16-16
社団法人日本伝熱学会
TEL,FAX:03-5689-3401
(土日、祝祭日を除く、午前9時～午後5時)

(注意)

- 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欄やファックス等の書面にてお願いいたします。
- 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。

〒152 東京都目黒区大岡山2-12-1 東京工業大学 工学部
機械科学科 斎藤彬夫
TEL:03-5734-2167、3308 FAX:03-5734-2167、2893

日本伝熱学会正会員・学生会員入会申込み・変更届用紙

- (右の該当に○を記入) 1. 正会員・学生会員入会申込書
2. 変更届 (書面による届出のみ受付け)
(注意) ・楷書体で明瞭に記入
・氏名にふりがなを付す
・通信文は余白に記入
・申込み時に郵便振替にて会費納入

0	申込年月日	1	9	9	年	月	日
1	会員資格	正・学					
2	氏名						
3	ふりがな						
4	生年月日	1	9	年	月	日	
5	* 名称						
6	勤務先						
7	〒						
8	所在地						
9	学校						
10	TEL						
11	FAX						
12	〒						
13	自宅						
14	住所						
15	TEL						
16	通信先**	勤務先・自宅					
17	学位						
18	最終出身校						
19	卒業年次	T・S・H					
20	専門分野	← (下記の専門分野の番号)					
21	学生会員の場合：指導教官名***	印					

- 専門分野
1: 自然対流 2: 強制対流 3: 熱伝導 4: 凝縮 5: 沸騰・蒸発 6: 混相流
7: 物質移動 8: 反応・燃焼 9: 放射 10: 熱物性 11: 熱交換器 12: 流動層
13: 蓄熱 14: 冷熱 15: 内燃機関 16: ガスタービン 17: 蒸気機関 18: 原子力
19: 太陽熱 20: 環境 21: その他 ()
例: 電子機器の冷却, 生体伝熱, 分子動力学等

*) 学生会員入会申込者は学校名, 学部, 学科, 研究室名, 学年 (M2, D3 など) を記す。
**) 郵送物発送先として通信先を必ず記入する。
***) 学生会員入会申込者は, 指導教官の署名・捺印を受ける。

日本伝熱学会 賛助会員新規入会申込み届用紙

- *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。

0	申込年月日	1	9	9	年	月	日
1	会員資格	賛助会員					
2	代表者氏名						
3	ふりがな						
4	名称 (所属)						
5	代表者勤務先						
6	〒						
7	所在地						
8	TEL						
9	FAX						
10	口数	共通・専用					
11	口数	口					

日本伝熱学会入会のご案内

- 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。
- 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)
[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。送料は無料です。
- 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完納された会員に限り当該年度のものも無料で差しあげます。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, あらかじめ承知おき下さい。
- 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おります。簡単な書式の領収書をご用意できますが, それ以外の場合は貴社ご指定の書式をご送付下さいませようお願いいたします。

申込書送付先: 〒113 東京都文京区湯島2-16-16
社団法人日本伝熱学会事務局 TEL, FAX: 03-5689-3401
会費の払込先:
(1) 郵便振替の場合一郵便振替口座 001604-14749 社団法人日本伝熱学会
(2) 銀行振込の場合一第一勧業銀行 大岡山支店 普通預金口座 145-1517941 社団法人日本伝熱学会
(3) 現金書留の場合一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. 36, No.141

1997年4月発行

THERMAL SCIENCE AND ENGINEERING

ISSN 0918-9963

Vol. 5, No. 2

April, 1997

発行所 社団法人 日 本 伝 熱 学 会

〒113 東京都文京区湯島2-16-16

電話 03(5689)3401

Fax. 03(5689)3401

郵便振替 00160-4-14749

Published by

The Heat Transfer Society of Japan

16-16, Yushima 2-chome, Bunkyo-ku,

Tokyo-113, Japan

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

伝熱研究 VOL. 36, NO. 141

〈随想〉

この数ヶ月間の出来事について 岐美 格 (京都大学) 1

〈レビュー特集〉

レビュー特集号の編集にあたって

..... 第35期編集委員会 太田照和 (東北大学), 片岡勲 (京都大学) 3

乱流熱伝達の DNS と LES 河村洋 (東京理科大学) 4

代替冷媒の開発と熱物性研究に関する最近の進展

..... 渡部康一 (慶應義塾大学理工学部システムデザイン工学科) 16

沸騰熱伝達の促進と機構 藤口恭伸 (九州大学工学部機械エネルギー工学科) 27

複雑な系におけるふく射伝熱 円山重直 (東北大学流体科学研究所) 40

〈世界のホットユース〉

Duke 大学を訪ねて 池上康之 (佐賀大学海洋温度差エネルギー実験施設) 53

〈賛助会員紹介〉

三浦工業(株) 川上昭典 (三浦工業(株)技術部) 56

THERMAL SCIENCE AND ENGINEERING Vol.5, No.2

1. Control of Condensation Process by Microwave Irradiation (in Japanese) 1
Hirotzu S., Hashimoto H. and Aoki I.
2. Thermal Analysis of Portable Electronic Equipment 7
Hisano K., Iwasaki H. and Ishizuka M.
3. Molecular Dynamic Behavior under Light Irradiation 13
Shibahara M. and Kotake S.