

ISSN 0910-7851

# 伝熱研究

Journal of The Heat Transfer Society of Japan

1996 October  
Vol. 35 No. 139

〈小特集：防災と伝熱〉

ISSN 0918-9963

**THERMAL SCIENCE AND ENGINEERING**

Vol. 4

No. 4

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 理 事 (編集出版) 北 海 道 東 海 (企 画) 北 陸 信 越 中 国 四 国 (総 務) 九 州 監 評 員	長 (編集出版) (企 画) (総 務) 早 坂 洋 史 (北 大) 熊 田 雅 弥 (岐 阜 大) 金 子 邦 彦 (東 大) 青 木 和 夫 (長 岡 技 大) 森 岡 齋 (徳 島 大) 松 木 健 次 (シ ャ ー プ) 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 東 北 部 会 長 関 西 部 会 長 関 東	越 後 亮 三 (東 工 大) 荻 野 文 丸 (京 大) 曾 田 正 浩 (三 菱 重 工) 斎 藤 彬 夫 (東 工 大) 増 岡 隆 士 (九 工 大) 太 田 照 和 (東 北 大) 松 尾 篤 二 (三 菱 重 工) 笠 木 伸 英 (東 大) 戸 田 三 郎 (東 北 大) 中 島 健 (神 戸 大) 五十嵐 喜 良 (東 北 電 力) 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 敏 夫 (日 本 電 装) 大 河 誠 司 (東 工 大) 三 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 正 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 人) 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〉

- 洒落のすすめ ..... 前田昌信 (慶應義塾大学理工学部システムデザイン工学科) ..... 1  
均一さを追及して ..... 柳謙一 (三菱重工業株式会社技術本部広島研究所) ..... 4

### 〈会議報告〉

- 国際伝熱会議アセンブリ委員会に出席して  
..... 平田賢 (芝浦工業大学), 荻野文丸 (京都大学) ..... 7

### 〈小特集：防災と伝熱〉

- 小特集「防災と伝熱」にあたって ..... 第35期編集委員会 早坂洋史 (北海道大学) ..... 8  
火砕流温度と火山災害 ..... 谷口宏光 (大阪府教育センター),  
荒巻重雄 (日本大学文理学部応用地学科), 鎌田桂子 (神戸大学理学部地球惑星学科),  
馬越孝道 (九州大学島原地震火山観測所), 中田節也 (東京大学地震研究所) ..... 11  
マグマ水蒸気爆発と伝熱 ..... 山元孝広 (工業技術院地質調査所地質部) ..... 21  
道路火災における輸送現象 ..... 石田博樹 (長岡工業高等専門学校) ..... 27  
強風下の市街地大火における火災気流に関する風洞実験 ..... 佐賀武司 (東北工業大学) ..... 35  
Three Dimensional Simulations of Fire Plume Dynamics  
..... H.R. Baum, K.B. McGrattan and R.G. Rehm (National Institute of Standards and Technology) ..... 45  
火災現象の熱的モデリング ..... 長谷見雄二 (建設省建築研究所第五研究部防火研究室) ..... 53  
1996年のモンゴル国の森林・草原火災の調査結果概要 ..... 山下邦博 (消防庁消防研究所) ..... 60  
実験とコンピューター・シミュレーションによる火災旋風の研究  
..... 佐藤晃由 (消防研究所), K.T. Yang (University of Notre Dame) ..... 65  
ガス抜き細管上に形成された火炎について  
..... 酒井規公子 (名古屋大学大学院工学研究科地圏環境工学),  
須川修身 (東京理科大学火災科学研究所) ..... 72

### 〈伝熱シンポジウム国際セッション〉

- Thermal-Fluids Engineering Research Activities at The National University of Singapore (NUS)  
..... S.H. Winoto (Department of Mechanical and Production Engineering,  
The National University of Singapore) ..... 77  
Heat Transfer Research Activities in Taiwan  
..... G.J. Hwang (Department of Power Mechanical Engineering, National Tsing Hua University) ..... 80

### 〈研究トピックス〉

- 冷蔵庫内構造検討への数値解析の適用  
..... 多久島朗, 周防五月 (シャープ株式会社エネルギー変換研究所) ..... 85

## 〈賛助会員紹介〉

ダイキン工業（株）機械技術研究所 ..... 蛭子毅（ダイキン工業（株）機械技術研究所） ..... 86

## 〈編集後記〉

第35期副会長（編集出版担当） 萩野文丸（京都大学）

第35期編集委員会委員長 増岡隆士（九州工業大学） ..... 90

## 〈お知らせ〉

行事カレンダー .....	91
日本伝熱学会学術賞・技術賞・奨励賞公募のお知らせ .....	92
第34回日本伝熱シンポジウム研究発表募集 .....	94
東北支部・伝熱セミナーのご案内 .....	96
日本伝熱学会関西支部・講演討論会のご案内 .....	96
第10回輸送現象国際会議論文募集要項 .....	97
第34回燃焼シンポジウム .....	97
第2回複雑乱流場の熱輸送シンポジウム 「人間－環境系のシミュレーションとその最新動向」のご案内 .....	98
第31回空気調和・冷凍連合講演会講演募集 .....	98
Oji International Seminar on New Approach toward Low-Temperature and Air-Conditioning Engineering without Fluorocarbon Refrigerants .....	99
第5回微粒化シンポジウム .....	100
「伝熱研究」会告の書き方 .....	100
「伝熱研究」原稿の書き方 .....	101
事務局からの連絡 .....	102
日本伝熱学会，入会申込み，変更届用紙 .....	103

## 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](mailto: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](mailto: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.35, No.139, October, 1996**

**CONTENTS**

**<Essay>**

- Invitation to Dandyism  
Masanobu Maeda (Department of System Design, Keio Univ.) ..... 1
- Uniformity of Temperature and Heat Transfer  
Ken-ichi Yanagi (Hiroshima Research & Development Center,  
Technical Headquarters, Mitsubishi Heavy Industries, LTD.) ..... 4

**<Report>**

- Report on Assembly for International Heat Transfer Conferences 1996 Meeting  
Masaru Hirata (Shibaura Institute of Technology) and Fumimaru Ogino (Kyoto University) ..... 7

**<Special Issue: Heat Transfer of Multicomponent Systems>**

- Preface to Special Issue: Disaster Prevention and Heat Transfer  
Hiroshi Hayasaka (Hokkaido University) ..... 8
- Temperatures of Pyroclastic Flows and Volcanic Disasters  
H. Taniguchi (Science Education Institute of Osaka Prefecture),  
S. Aramaki (Department of Earth Sciences, Nihon University),  
K. Suzuki-Kamata (Department of Earth and Planetary Sciences, Kobe University),  
K. Umakoshi (Shimabara Earthquake and Volcano Observatory, Kyushu University),  
and S. Nakada (Earthquake Research Institute, University of Tokyo) ..... 11
- Phreatomagmatic Explosions and Heat Transfer  
Takahiro Yamamoto (Geology Department, Geological Survey of Japan) ..... 21
- Transport Phenomena in the Fire on the Fuel-Spilled Road  
Hiroki Ishida (Nagaoka National College of Technology) ..... 27
- Wind Tunnel Test of Fire Gas Flow of Big Fire in Urban Area under Strong Wind  
Takeshi Saga (Tohoku Institute of Technology) ..... 35
- Three Dimensional Simulations of Fire Plume Dynamics  
H.R. Baum, K.B. McGrattan and R.G. Rehm (National Institute of Standards and Technology) ..... 45
- Thermal Approach to Modeling Fire Phenomena  
Yuji Hasemi (Fire Safety Division, Building Research Institute, Ministry of Construction) ..... 53
- 1996 Mongolian Forest and Steppe Fires  
Kunihiro Yamashita (National Research Institute of Fire and Disaster) ..... 60
- Experimental and Numerical Study of Fire Whirls  
Kohyu Sato (National Research Institute of Fire and Disasters)  
and K.T. Yang (University of Notre Dame) ..... 65

Jet Flames Ejected from a Gas Purging Pipe Kikuko Sakai (Nagoya University) and Osami Sugawa (Center for Fire Science and Technology, Science University of Tokyo) .....	72
--	----

**<International Session in the 33rd National Heat Transfer Symposium of Japan>**

Thermal-Fluids Engineering Research Activities at The National University of Singapore (NUS) S.H. Winoto (Department of Mechanical and Production Engineering, The National University of Singapore) .....	77
Heat Transfer Research Activities in Taiwan G.J. Hwang (Department of Power Mechanical Engineering, National Tsing Hua University) .....	80

**<Research Topics>**

Application of Numerical Analysis to Domestic Refrigerator Akira Takushima and Satsuki Suho (Sharp Corporation, Energy Conversion Laboratories) .....	85
--	----

**<Profile of Industrial Member>**

Research and Development Profiles for Mechanical Engineering Laboratory, Daikin Industries, Ltd. Takeshi Ebisu (Mechanical Engineering Laboratory, Daikin Industries, Ltd.) .....	86
--	----

<b>&lt;Postscript by The Editor&gt;</b> .....	90
---	----

<b>&lt;Announcements&gt;</b> .....	91
------------------------------------	----

## 洒落のすすめ

*Invitation to Dandyism*

前田 昌信 (慶應義塾大学理工学部  
システムデザイン工学科)

*Masanobu MAEDA (Department of System Design,  
Keio Univ.)*

### 仕事と遊び

学問のすすめならぬ、お洒落のすすめとは不謹慎。まずは、野人の眩きと心得てお読み戴ければ幸いである。仕事は楽しいか?というありふれた問い掛けから考えよう。仕事は天命であり、面白いとか楽しいというものではない。仕事に対しては、特に、学問は神聖なものであり、真摯であるべきであると言う。その考え方は至極真つ当な意見であり、なかなか抗弁を許さない重みを持っている。そして一方、楽しみ、遊びは別に息抜きにすれば?と慰めてもくれる。

両者は別のもので共存できないものなのだろうか?遊びにせよゲームとなれば誠に真剣とならねば負けて悔しい思いをする。言い訳に、楽しんだからいいとか、楽しむためのもの、そんなに一生懸命する必要がある?などという論調が新聞を飾る。最初の発言者の真意が曲げられ伝わっているものと思うが、ゲームをしてくれた相手に大変失礼な事だと思う。遊びにもルールがあり、その中でルールぎりぎり頭と体を目一杯使ってやったという充実感は、こんどこそという思いはあっても負けて己を知り、さわやかなものだ。逆説的には仕事に遊びがあってはいけないか?楽しんではいけないか? 近年(自分も歳取って同類項になったようにもおもうが)若い者には仕事に使命感がなくなったと嘆く人がおられるのに気づく。神の啓示とか、自分で何なにのためと思わぬ限り人に命ぜられた使命感など、欧米の影響を大きく受けている現代の世代には無縁のものとなってしまっているのだろう。

これまで科学技術の分野において日本は著しい速さで歩んで来たが、現在、いや、ここ10年、15年悩んでいるのは具体的に与えられる目標、使命もなく、混沌、前人未踏の領域に先頭きって入って行けるかどうかと言うことであろう。長年冒険を好まず、ひたすら舗装された大道を走ることを考えて設計されたような車はラフロードに向かない。砂地や

凸凹の野山を遊び心を以て走ろうと考えられたバギー、四駆の得意なフィールドになる。

人の気づかなかった事、新しいことに手を染めるのは当然失敗も多いだろうし、冒険的精神と勇気がいる。これまでの流れの延長の処ではなく、一見不連続とも見える発想のジャンプが必要となるのではないのだろうか。勿論、今までの正道と言われた路を歩んで突き詰めたところに光はあるが、なにも皆が歩くことはない。突如、袋小路にならないとは言いきれない。神のみぞ知る、である。人は迷い、立ち止まる。この道は続いている。誰かが行った路は安心して歩ける。しかも、急いで。具体的にどうしたとはっきりわからなくても、誰かが作る事に成功したと聞くだけで他でも同じものを作ってしまうという現実を見聞きするにつけ、自ら未踏の領域への挑戦の気持ちを持ち続け、トリガーをひく事が重要であると思う。ただ、水盃で戦に出るような悲愴なものにしたくない。若い馬力のある人たちと共に歩める夢のある道の一つ二つ見つけることができばと思う。それは遊び心(冗談とは異なる..)の中からも得られるだろう。それは洒落の世界でもある。

### 一途

いつも面白い話ありませんか?などと言われ、つい載せられて一生懸命つまらない話を書いてしまうので多くの方に筆者はいい加減な奴と思われているふしもあり、不徳の至りと大いに反省をしている。本人の口から言うのもおこがましい事ではあるが、本性は至極真面目で少し神経質、時に石橋をたたいて渡らない優柔不断、鈍重一途、というと物理的に言えば慣性が大きいということですか?と美しい評価を戴くこともある。自分の思っていることと評価はしばしば逆のケースがある。自分の性格をこうではないかと分かり始めると自身に反抗して逆の行動(勿論、人一倍の努力が必要で、それだけ計算された行動)にできるものと思われる。

これはいけないと気付く小さいながら失敗、挫折が無数にある。ルールだといってあまり真面目にとことんやると、なぜか、良かれと思った事が不調に終わることがある。人間関係がその代表であり、一定の間隔、遊びをおいて置かねばならぬことに気づく。幼い頃誰しもがやっただろう隠れんぼは本質的に遊びである。子供のときに(大人になってもそうかも知れない)隠れるときにどきどきしたものである。鬼になって探すほうはタッチされるとまた鬼にならねばならない。鬼と言われるのも言葉の響きからして良くないものである、鬼になると悲しくて、泣いて帰る子もいた。勿論、遊びに入れてもらえなくなり、復帰に時がかかり、保証人の親が頭を下げて来ることもあったと記憶している。いい加減はいかんと言うことはすぐ判るが、一生懸命やって失敗する事もある。隠れるほうである。至極、真面目に、見つからない処に隠れて息をひそめること20分、あまり出てこないのだから家に帰ったと認定されて鬼が替わってゲームが進行することになる。そこへ出てきても物笑いだし、タイミングが悪いと家に帰ってはいけないと年長の子に叱られ、皆に白い目でみられ悔しい思いをする。自分は一生懸命やっているのと思うが、考えてみれば鬼の気持ちも考えず、皆が楽しむ条件を考えないとやはりはぐれものになる要因になるといたく反省したものである。

### スピーチ

イギリス人のスピーチ好きは皆様ご存じの処である。日本の宴会では乾杯は会の初めに一回、スピーチも司会の指名で、(実は話したくてうずうずしていても)いたしかたなくそれではという設定で始まる。彼らも勿論、そのようなケースもあるが、大概は、別に司会など居た記憶はなく、食事が進行し、適当な時期が来るとワイングラスをチンチンとフォークで叩き(これは正式のマナーで失礼ではないそうである)注意を促し、そこに居ない人にトーストをささげる、大概は女王のために!から始まるトースト(乾杯)をしてスピーチを始める。必ず起立してトーストと叫んでスピーチするので、或る会では15回のトーストを経験した。ここでも真面目に乾杯と翻訳して飲み干していたらかなり目が回った。スピーチは無縁のものと考えていると事になる。国際的な(大した事はない、2カ国以上の国籍の人が集まればインターナショナル)集まりで他に同国人が居ないと自動的にやらざるを得ないはめに

なる。英語がまずいなどは気にされないようで..それが嫌ならパーティに出なければ良いわけだが..なにせ、根が意地汚いもので飲み物があるとつい参加してしまう。

そこで、土地の方々に相談すると、なに、遊びだから硬く考える事はないさ。ネーティブでないから英語が多少まずいのは(失礼)或る程度しかたがない。参加する事さ、出来れば、2分に一度くらいジョークを飛ばせ、これは君にとって最も大切な事である。と、一番難しそうな要求をいとも簡単にのたまわれてしまった。なにがジョークだ、冗談にもならないと思いつつ、現地人にも判りそうな具象的な江戸小ばなしを2つ3つ混ぜて6、7分のスピーチをした。初舞台の漫才よろしくここはジョークでございと区切ってやったが、予想外に暖かい笑いが返ってきたのにはいたく感激した。勿論、自分でも面白くないと思ったところはハッハッハーとお愛想だろうが、冗談と判ったぜというような軽い笑いであったが、当地では外人である身にとって嬉しい笑いであった。皆様は積極的にチンチン、トーストをするのであるから真面目な話もオブラート(いまは使わないのでカプセルか..)に包んで出すもの、また、積極的に立って話す限り、話の面白さに責任をもたねばならないのだと理解した。洒落た話し方の先生にはいつもながらお呼びがかかる。まねはどうていできないが、当意即妙、座からの野次、合いの手を話に組み込んで、ひらりひらりと話を進める。フランスのシャンソン酒場の舞台にも共通する洒脱さだ。教養と頭の回転の速さが重要なファクターのようだ。日本にも寄席があるが、笑いを主目的に構成するのと真面目な話に笑いで飾るのとでは質的に比較には出来ないように思うのと、近年、くすぐり、ねたの品位の低下、人を傷つけかねない笑いをとるのは洒落ていないという点で残念な事である。冗談も言い回し、語り口で自分のスタイルを自負するところがあり、他人のねたを使うのを好まないようだ。かように、個々の人と話をするのと異なり複数の人に話しかける話し方、これは福沢諭吉翁がはじめて演説として日本に紹介したとされている。勉強不足かもしれないが、残念ながらジョークの件はかの福翁自伝にもなかったように思う。洒落と言う言葉をよく使った先生にしては遊びの部分が希薄で、洒落てないと、少々寂しく思う。



### 挑戦、瓢箪からの駒

研究に挑戦と叫んで見ても、さて現実には何で戦うか？当然ながら大学、研究機関においては研究費が最小限必要である事はいうまでもない。頭の上から大判、小判金貨が降ってくるようだと十中八九自由が少なく(勿論、いつも使い慣れた人は別として)千両箱に押しつぶされて怪我をするのが落ちであろう。自由、即ち、自分の考えによって資金を使える状況で十分な額の援助が欲しいのは万人の望みではある。

これにはいづくもプロポーザルを提出し、共感を呼ぶものに科学研究費が与えられるのがルールになっている。我々の基本的に頼りにする文部省科学研究費がその一つで、毎年勞せずに入られる方々もおられるかも知れないが、一般、特に私学にはなかなか受けるのが大変である。時に、科研費に当たるといふ表現を用いる。宝くじのような感覚であろうか。ついてますねえというのも同じ部類かも知れない。プロポーザルという能動的表現とは違い、受動的なものとして響く。それだけだろうか？何でも欧米のものを引き合いに出せば差し障りがないと思っていると怒られるかも知れないが、兎に角、彼らは自身、(仮名で書くと意味が違って変に響くかも知れないが...)ユニークであることを誇りに思う。口く、誰が考えても通常の手順を踏めば出来ることを提案してもスポンサーは付かない。夢と現実を繋ぐ橋こそストーリーになると言うのだ。

さて、スポンサーはスポンサーなりの結果を求めているのではないか、すぐ現実になりそうにないものには援助しないではないか。絵描きでも売れそうな人に画商がつ。しかし、本来は利を求めず、好きだというだけで援助をするパトロンが真の遊び、洒落というものではないかとの意見がある。まあ、そこまで行くには信頼関係が先だし、そんな財力と心の余裕のある、独断と偏見を以て事を行える個人が居なくなってしまう今日。共に夢を共有しようと言うのが最大の遊びであろう。夢は夢、現実だよと言われ

た超現実主義の時も過ぎ、このままでは閉塞した場をぐるぐる回るだけだと気づいた人は脱出を試みるだろう。行った先が良いとは限らないリスクは何処でも付きまとう。洒落っ気がないと何も出来ないと言われる所以だろうか。

文部省科学研究費もかなり以前から一部ではあるが萌芽的研究とか奨励研究とか夢を描いているプロポーザルに対し資金を出すようになってきた。瓢箪から駒と言うこともある。洒落の中から大したものが出るかもしれない。期待をしよう。

果報は寝て待てというが運は来ても捕まえられるかが問題とされ、稚児の前髪、(今ならパンクの鶏冠か?)すれ違う前につかめとの教えがある。実力を蓄えておかねば洒落にもならないということだろうか。努力と洒落は相入れないものと思っていたが、洒落者はかなり色々な意味での授業料を方々で払っているようである。まずそれでないと、難しい事をさりとやっけてのける訳には行かない。芸術も突き詰めるとシンプルさに至ると言う。ピカソのデフォルメも素人にも判る元の素晴らしいデッサンを見、無駄のない省略された線画に至る過程を見ると唸らざるを得ない。かぶれて、いきなり抽象画を描くのとレベルの違いがある。アインシュタインのノーベル賞は、はがき一枚分だと言われてもその前に山のような論文があるのを知るとむべなるかなと思う。一途、洒落心こそ昇華への道なのだろう。不粹と言われない工学者への脱皮こそ世界を広げるものと知る。

### 質問

して、結論は？ どうしたらその洒落者になれる？ その質問は洒落にならない。洋服でもユニフォームが好きな人も居るが、皆とおなじではね、と思う人は自分で選んだものを着る。自ら自己の主張もあって良いだろう。自分のスタイル、個性を作る事ではないだろうか？ ただし、自分の事は棚にあげ.. が結びの文言である。

## 均一さを追及して

### Uniformity of Temperature and Heat Transfer

柳 謙一 (三菱重工業株式会社技術本部広島研究所)  
Ken-ichi YANAGI (Hiroshima Research & Development Center,  
Technical Headquarters, Mitsubishi Heavy Industries, LTD.)

#### 1. とまって見える板

ある製鉄所に10年ぶりに訪れた。そこには、私の会社が納めた連続焼鈍炉がある。その炉を通して焼鈍された板が、まっすぐに、しかもあたたかも動いていないかのように見えた。すばらしい色であり高速で動いているのに止まって見えるほど板の形と色が全く均一なのである。この板は、やがては、表面に並鉛がめっきされ、塗装されてぴかぴかの傷一つない自動車になってゆくのだろう。

私は、三菱重工業の広島研究所に入社してから多くの時間を鋼板の製造にかかわる伝熱研究に携わって来た。その伝熱研究の基本にあったものは温度を均一にすること、さらに言えば均一な鋼板を作ることであったように思える。

#### 2. 物を作る伝熱

日本の工業は、生産性をあげることに1970年代に努力をし、さらに1980年代には製造される物の質を良くすることに大きな精力をつぎ込み、ノウハウを積み重ねて現在に至り、まだまだ、東南アジアとの格差を保っている。

鉄は熱いうちに打てと言われるように、鋼板の製造では鋼の温度を上げたり下げたりする。したがってそのプロセスで熱を伝えることがいろいろな方法でなされる。しかし、本質的には占来かわらず、火で加熱し、水や空気で冷やす方法が本流である。もちろん火の種が木炭から石炭を経て石油、ガスに移っているし、近年は少しづつ、ごく少しではあるが電気を使うようになってきている。冷却にいたっては、ほとんど水であり、空気である。

伝熱形態のもう一つの大きな特質は鉄と加熱冷却媒体との間に何も無いということである。ボイラのように管の壁はなく、水は板の表面にじゃぶじゃぶとかかり、しかも板の上を流れてゆく。加熱においても炎は板の上をなめる。このような伝熱形態が一番シンプルで経済的なのである。ただ困ったことに板の表面の状態によって熱の伝わり方が変わってくる

ことである。

このような伝熱形態は鉄だけでなく、紙やセメント、セラミックスやプラスチックなど固体の物を作るプロセスにおいてはほぼ同じである。

このように直接的な伝熱によって生産性を上げるために早く温度を上げ下げすることに努力をし、良いものを作るために、均一に温度を上げ下げし、さらに歩留りを良くするために、欠陥を皆無にする努力をしてきた。ここに物を作る機械における伝熱技術、伝熱工学研究の20年間の努力があり、私もその中にどっぷり浸かり、色々な工夫をこらして製造装置の開発をやって来た。このような観点から伝熱技術開発と装置開発について述べてみたいと思う。

#### 3. 三次元から二次元へ

生産性の向上の時代には、大きな鉄の塊に casting していたのを、連続 casting で直接板を作るようになった。すなわち、三次元的な塊から二次元的な帯状のものに変わったのである。これは伝熱の面から考えると伝熱の面積を大きくするという変化が起こったことである。古くはインゴットという厚さが3mもある形に固めていた。外側は固まっているのに中心部はまだ溶けている状態があり、全部固めるのに1日かかっていた。また、内部と表面の温度を同じにするために、それを炉の中に入れ火をたいてまた1日かけていた。熱容量に対し表面積が小さいので生産性が上がるはずはなく、日本ではいち早くこれを連続 casting に変えて厚さ300mmの板にした。厚さが1/10になったので表面積は10倍になり加熱冷却速度も10倍になり、内部との温度均一化という点から熱流動も上げられる。それで水を使って冷やすことが出来、冷却時間が20分になり、約100倍の早さになったわけです。

さらに、もう一つの生産性向上の大改革は、初めにも述べた連続焼鈍炉の採用です。鋼板は普通、薄い板に伸ばされたのちコイル状に巻取られる。これを850℃以上に上げて焼鈍するわけだが、昔は、コイルのまま外部からゆっくり加熱していた。このコ

イルの状態では表面積は $20\text{m}^2$ くらいであり、加熱冷却はやはり1日がかかりである。これを巻き戻して加熱冷却するようにしたのが連続焼鈍炉で、コイルの板の長さは $2000\text{m}$ 以上あり、表面積は $6000\text{m}^2$ 以上にもなる。また薄いため熱流束を上げてても均一に温度を保つことができ30秒で加熱冷却でき1000倍以上の早さになる。この2例とも100~1000倍という早さの変化が起こったわけである。もちろんこのようなことを可能にしたのは、材料の成分を含めての改良がなされたことは当然であるし、その方が鉄鋼業に大きなインパクトを与えています。

今述べたことは、板の厚さ方向の温度を問題にしています。しかし、1980年代からは、板の幅方向、長さ方向の温度の均一化、特に幅方向の均一化という問題と闘うこととなります。もちろん、板を薄くしたのだから長くなり、装置をコンパクトにするには早く温度の上げ下げをする、すなわち熱流束を大きくすることが必要で、その条件下で温度を均一にするという問題になるわけです。

#### 4. 均一化

板の温度を均一にする必要性は2つあります。まず、材料を作り上げるのにある温度で均一にする必要があること、次に、早く温度が変わるので不均一だと板が折れるなどの欠陥が発生する。またもっとややこしいことには、板の各部での温度上昇速度まで材質に関係することである。したがって昇温降温の過程でも板温は均一にする必要があります。

以上、板の均一化を述べましたが、板だけではなく加熱冷却や、板のめっきなどの表面処理をする装置の温度の均一化ということも、板温均一化や欠陥防止の上で大きな問題となり、その点も製鉄機械を作る伝熱技術者の努力の対象になります。

以下、少し例を上げてみようと思います。書こうと思うと次から次へと頭をよぎります。ざっと数えても20くらいは思いつきます。ここでは、それを全部とはゆきませんので、空気と水と炎と接触を使った板の加熱冷却、めっきの均一化などについて述べてみたいと思います。

##### 4.1 空気による冷却

空気を使った伝熱ではやはり吹き付けるのが一番熱流束が大きく取れる。帯状の板を冷やすのだから板を走らせて空気を吹き付けます。当然、板の走行

方向に直角のスリットからの噴流が、均一化には有利である。しかし、噴流が板にあたったのち板の端の方に排気してやるとだいたい板の端の温度が下がる。板幅が大きくなり距離が短くなるとこれを直すのは大変である。それに対してノズルの裏面に排気するなどの工夫をしました。

バーナからの熱ガスによる加熱についても全く同じことが言えます。このときはもうすこしやっかいで、ガス中のラジカルが板との反応を引き起こすので、表面品質の均一化の問題まで考えてやる必要があります。

##### 4.2 水による冷却

水もやはり吹き付けてやるのが一番良く、熱間圧延後の板に水道から出す水のような噴流をあてると、局部的には $10^8 \text{ kcal/m}^2\text{h}$ のオーダの熱流束になっているようである。

また、薄い板に、スプレイなどをあてて冷却するときは、 $500^\circ\text{C}$ 以下になってくると少しでも水の量に不均一があると、遷移沸騰領域に入る場所が不均一になり、すぐに板がこんぶのようになってしまう。板の低温領域で水を使いたいのが $500$ から $150^\circ\text{C}$ の間ではなかなか使いにくいものです。

スプレイの冷却でもう一つおもしろいのは、 $150^\circ\text{C}$ 以下でだんだん板温を下げてゆくと計測された表面温度が $100^\circ\text{C}$ 以下でも沸騰現象があるように見える。しかも材料によって違う。もちろん $100^\circ\text{C}$ 以下で沸騰するとは思えないが、スプレイの水滴の当たったところとそうでないところの局所的な温度差が大きいので、平均的表面温度が $95^\circ\text{C}$ くらいに下がっても沸騰のように見えるのでしょう。

##### 4.3 直接接触による加熱冷却

薄い板をロールに接触させて冷却する場合、局部的に接触の良いところと悪いところがあると板が収縮変形し、局部的に浮き上がる。そうすると、その部分は冷却されなくなり、接触しているところとの温度差がますます大きくなり、ついには板は折れてしまう。この接触の不均一の原因の一つにロールの変形がある。すなわちロールの中央部の温度が高くなりふくらむのである。

これを小さくするのに工夫がいろいろあります。まずロールの内部の胴の温度を均一にして変形をなくしておき、表面に熱媒(水)を通してその外に薄い膜状の伝熱面を作り、胴と繋いで一体にすれば、伝熱面を

フラットにすることができる。これをどう作るかは大変工夫がいる仕事でした。このように伝熱による温度分布をうまく利用するのも伝熱技術者の生きがいです。この方法は、他のいろいろな機械に利用しました。

#### 4.4 蒸着亜鉛めっき

めっきを均一につけるといふことで、真空中での蒸着めっきの均一化についての思い出を述べてみます。蒸着という、るつぼの亜鉛を加熱して蒸気を出し、その上に板を置くというのが普通です。そのとき、真空度が低いと窒素ガスなどが影響し、めっき物性が良くないので  $10^{-3}$  torr くらいでめっきを行うので蒸着速度も均一性も良くありません。

伝熱屋がこれを見たとき、これは凝縮現象だ。しかもイナートガスがある凝縮だと見ました。それなら、イナートガスを少なくすれば、亜鉛蒸気はいくら多くあっても良いではないか、めっきが早くなるのではないかと。そこで蒸気をどんどん供給してイナートガス(窒素)を抜けば、コンデンサと同じく亜鉛だけつくにちがいないと思い、 $10^{-3}$  torr を 1 torr まで 1000 倍上げてみました。たしかに、ちゃんと蒸着できます。それ以上だと凝縮熱が大きすぎて亜鉛が固体になりません。

さらに、1 torr ですと連続流体に近づいているので、コンデンサのようにダクトを通して亜鉛蒸気を通し、整流して吹き付けてコンデンス(蒸着)させることができます。又、もっと良いことに、ガスジェットのように排気にじゃまされず、板の端の 1mm まで均一につきます。伝熱屋も蒸着のような他分野を、伝熱現象だと見ることによって発想の転換ができるのではないかと思います。ここで書いてみました。

#### 5. 均一に対する姿勢

以上述べましたように私は温度を均一にすることに始終従事してきて、その間に伝熱屋としてのある特質を考えさせられたことがあります。これは、企業内での伝熱屋だけかもしれませんが、傾向的に存在すると思っています。それは計測点の数の事です。私は大学では空力をやっていたので、境界層中の流速分布など、10 点以上は計測していました。ところがおおげさに言って伝熱をやっている人(企業内)の計測点は管壁と流れの中の温度だけです。また、化学工学をやっている人は熱交の入口と出口

の温度だけです。板の温度を均一化するにはガスジェットの場合でも数十点の温度計測が必要です。熱を伝えるという目的を達成するには熱交の出入口温度で十分でしょう。しかし、均一という言葉が入ると、空力のロスがどこにあるかというのと同じく、どこに不均一の源があるかという観点から、計測点が多く必要になります。

もっと普遍的に言うと、学問分野での計測点のメッシュの違いが存在するようです。流力では運動方程式までですが、伝熱ではエネルギー輸送の方程式が追加され、化学では反応方程式がつけ加えられます。だんだんと現象が複雑になれば計測点を多くしても理解がなかなか追いつかないので点数が少なくなるのだと思います。伝熱でも、理解を進めるためにも計測点を多くしてゆく努力をしたいものだと考えています。伝熱と温度均一化との違いを考えながら思うことです。

#### 6. さらに均一化を追及して

私の最近の均一化の仕事は、今まで述べた面内での均一化から、薄い板や膜ではあるが、深さ方向(厚さ方向)の均一化の問題に移っています。これはもう表面からの伝熱ではどうしようもなく、電子線や電磁波などの波動を応用することになります。

たとえば、亜鉛めっき層に下地の鉄を拡散させるような場合、鉄の内部を先に加熱することも有効かもしれません。そのような場合、高周波の電気による誘導加熱を使えば板厚全体から発熱させられます。また、塗装したものを乾燥させる場合表面を先に加熱硬化させると内部の溶媒が蒸発して硬化膜をやぶり欠陥となります。下の鉄側から加熱することによってこれを防止できます。このためにやはり高周波誘導加熱を使いたいものです。

このように高速化、均一化を追及してゆくことがまだまだ続くと思います。もしかしたらシリコンの単結晶も 1000 倍の速さで作れるかもしれません。そのような場合、先駆者である鉄器文明の製鉄技術の近年の発展が何らかの役にたつのではないかと思います。伝熱技術で機器開発をして来た私の経験と意見を述べさせていただきます。



1996年度国際伝熱会議  
アセンブリ委員会に出席して

Report on Assembly

for International Heat Transfer Conferences 1996 Meeting

平田 賢 (芝浦工業大学), 荻野 文丸 (京都大学)  
Masaru HIRATA (Shibaura Institute of Technology)  
and Fumimaru OGINO (Kyoto University)

1996年5月28日, ローマの Jolly Midas Hotel で開かれた 1996年度国際伝熱会議アセンブリ委員会に出席した。この委員会は, アセンブリメンバーの各国を代表する2人ずつの委員で構成されており, 国際伝熱会議の歴史的経緯からこれまでは各国とも, 機械系と化学工学系を代表する委員を選出してきた。主要な議題は, 4年に1回開かれる国際伝熱会議の開催地や, 地域別の論文数の割り振りなどを決めることである。日本の機械系代表は, これまで故西脇仁一東京大学名誉教授, 甲藤好郎東京大学名誉教授と引き継がれ, 1991年より平田が, また化学工学系は故水科篤郎京都大学名誉教授の後, 荻野がお引き受けしている。

今回の出席者は, 会長 H.C. Simpson ('94 IHTC10 UK Brighton 会議組織委員長, 以下敬称略) が議長を務め, 幹事役が UK の G.F.Hewitt, Brazil が R.M.Cotta, Canada が P.J.Carreau と S.Y.Ahmed, China が S.M.Yang, France が M.Combarous と J.Taine, Germany が E.Hahne, India が S.P.Sukhatme, Israel が Y.Zvirin, Italy が G.P.Celata と M.Cumo, Japan が M.Hirata と F.Ogino, Korea が S.T.Ro と C.K.Choi, Netherland が A.A.M.Delil と C.J.Hoogendoon, Russia が A.I.Leontiev, U.S.A. が S.G. Bankoff, ほかに前会長として S.Sideman, R.J.Goldstein および次期事務局長の J.S.Lee といった顔ぶれであった。

会議はまず, 新メンバーとして Australasia を承認するかが諮られ, 承認された。次に, 前回の IHTC 10, Brighton 1994 会議 (August 14-18, 1994, Brighton, England) の報告が UK の Hewitt より行われた。総参加者数 45ヶ国より 814名, ほかに学生 74名, 産業セッションに 30名, 展示会のみ参加者 436名, 同伴者 115名。一般論文 505編 (ポスターセッション方式で発表されたが, 18人のポスターレビュアーにより 30分の報告が行われた), 一般キーノート論文 18編, 特別キーノート論文 12編, Open Poster Forum 62編のほか, ビデオ発表も企画されたが盛会すぎて部屋に人があふれ中止のやむなきに至った。また, 51ブースを使った展示会や講習会, 初めての産業

セッションなどを設けて産業界からの参加者を勧誘した。収入 234,151£ (内参加費収入 195,467£), 支出 145,943£, 運営費 14,000£, 差引剰余金 74,208£ などのデータが示された。

次に, 1998 IHTC11 の運営についての議論が行われた。開催地は前回の UK Brighton で行われたアセンブリ委員会で韓国と決定している。韓国代表の

Prof.S.T.Ro から IHTC11 の計画詳細が示され, 会場は韓国東岸の Kyongju (慶州) Hilton Hotel, 会期は 8月23日 (日) ~28日 (金) の由。IHTC11 組織委員長は, Prof.Sung Tack Ro, Seoul National University, 事務局長は, Prof.Joon Sik Lee, Seoul National University, Abstract 締切 June 1, 1997, Draft Manuscript 締切 October 1, 1997, Final Camera Ready Manuscript 締切 February 1, 1998 (注意: これらの締切日の設定は各国の論文委員会に任されており, 国ごとに多少の相違がある)。日本の論文割当数は前回より増え 90編となったが, この中に日本, パキスタンその他台湾, インドネシアなど東アジア (中国 (香港を含む), 韓国, マレーシア, シンガポールを除く) を含んでいる。参加費は可能な限り安くするよう多数の委員からの要請があった

続いて 2002年, IHTC12 の開催地については, Kiev, China, India, Italy, France, U.S.A. (Minneapolis / St.Paul) の立候補地の中から, Brighton のアセンブリ委員会でフランスと決定しているが, フランスの代表から, Aug.18 (日) ~23 (金), Grenoble にて開催したい旨のアナウンスがあった。

更に, 2006年, IHTC13 の開催地については, China, Italy, Minneapolis, Australasia の立候補があり, オーストラリアのシドニーへの誘致のための大部の資料が配布され, アピールがあった。ミネアポリスからも再度資料が配布された。これについては, 次回の韓国におけるアセンブリ委員会で決定する。

次回のアセンブリ委員会は, 1998年8月, 韓国の慶州で開かれる。なお 1998Kyongju IHTC11 の日本の論文委員会 (Scientific Committee) 委員長は九州大学藤田恭伸教授にお願いすることとなった。

(以上)

## 小特集「防災と伝熱」にあたって

Preface to Special Issue: Disaster Prevention and Heat Transfer

第35期編集委員会

早坂 洋史 (北海道大学)

Hiroshi HAYASAKA (Hokkaido University)

### 1. はじめに

1995年1月17日未明、淡路島北部を震源とするM7.2の阪神大震災が発生した。死者約6千名、全壊家屋約10万棟、道路被害約9千4百箇所の被害があり、神戸市だけでも約7千棟の家屋が火災で焼失した<sup>(1)~(4)</sup>。

この阪神大震災で、地震を初め土木・建築・火災などの関連学会所属の研究者・技術者は種々の衝撃を受けた。1.地震予知の困難さと予算や人員(特に、大学の研究者)の少ないことが再認識されたこと、2.日本の高速道路の橋脚の落下はないという神話の崩れたこと、3.あまりにも多くの建物が壊れてしまったこと、4.耐火構造物の増加、消火設備や方法の充実などで、もはや、地震後の都市での大規模火災や同時多発の火災は無いとの甘い期待は打ち砕かれたこと、などによる衝撃である。

このような地震や火災などの災害での諸現象と伝熱工学とは、全くかわり合いがないのか?伝熱工学は、災害の防止や低減に貢献できないものなのか?本特集号では、この観点から、災害のうち、伝熱と比較的関連のある、火災や火山の噴火などに伴う災害に関する論文をまとめてみた。これらの災害で発生する諸現象は、火災のように実物での実験が必要であったり、また、火砕流などのように、自然現象であるがため、通常の実験室で簡単には再現不可能なものが多い。これに加え、研究者数や研究費の少ないこともあり、これら災害の現象の特性や発生機構があまりよく解明されておらず、被害の低減策や防止策の確立があまり進んでいないのが現状である。本特集号をきっかけに、各種災害での諸現象の伝熱面からの考察が進み、災害による被害を最小限にするような防災技術の提案や開発などがなされますことを願っております。

### 2. 災害の種類とその特徴

#### 2.1 災害の分類

防災は、災害を防止することであり、災害とは、広辞苑によると、『異常な自然現象や人為的原因によって、人間の社会生活や人命に受ける被害』と書かれている。異常な自然現象として、地震、火山の噴火、台風などがすぐに思いつく。そこで、各現象の主原因は何かを考えながら、災害を分類しまとめたのが、表1である<sup>(5),(6)</sup>。表1より、地震、火山の噴火、台風などの自然災害の主原因は、地球内部のマントルの動き、大気圏や海洋での熱の流れ、太陽からのふく射エネルギーに起因していると考えられる。これに加え、人為的災害においても、人類のエネルギーの多消費から生じていると考えられる現象が少なくない。このことから、表1の各種災害の現象をよく理解するためには、伝熱や流れなどの考え方の必要なことがわかる。

#### 2.2 災害の特徴

災害の大きな特徴の一つは、小規模な現象の発生以外、成り行きのままに災害が進行し、人間のコントロールが及ばないことにある。表2に主な自然災害による放出エネルギーを示した<sup>(7)</sup>。放出エネルギーが比較的小さな台風に対して、台風の最大風力をヨウ化銀を散布して、弱める試みが1960年代に米国でなされたが、顕著な結果を得られなかった。台風よりも小さなエネルギーの火災の場合でも、最近のモンゴルの原野火災や、今後百年も燃え続けると危惧されている中国新疆ウイグル自治区の乱開発による炭田火災なども、自然に火が消えるのをただ待つしかないのが現状である。また、人為的災害の、例えば、直径数10mの燃料タンク火災や原油タンカの火災でも、初期消火に失敗すれば、タンク内の燃料が燃え尽きるのを、ただ待つだけという状態となることもある。

災害の大きな特徴の二つ目は、災害を引き起こすエネルギー量が大きくなったり、種々の条件が整うことで、災害の主現象に伴って、副現象が生じることにある。この結果、災害による被害は、相乗効果で大幅に拡大することが多い。例えば、小さな地震で

表1 災害の分類と諸現象<sup>(5),(6)</sup>

	主原因	主現象	併発（付随）現象
自然災害	地球内部（マントル）の動き （土壌圏での熱バランス）	地震	斜面崩壊・地滑り・なだれ・土石流・泥流・鉄砲水
		噴火	家屋倒壊・火災・都市火災（火災合流・火災旋風）
	気圏・水圏での熱バランス	台風	火山灰降灰・火砕流・マグマ水蒸気爆發
		竜巻	林野火災・住宅火災
		落雷	家屋倒壊・航空機の墜落
		ダウンバースト	フェーン現象・火災
	太陽の活動変動（黒点数）	地球の気候変動 （温暖・寒冷化）	津波・高波・豪雨・洪水 *太字は本小特集号 に掲載した災害
人為的災害	人口の増加・生活水準の向上 エネルギーの多消費	森林の破壊 （熱帯雨林）	異常気象 集中豪雨・豪雪・なだれ・寒波・熱波 海水温の高・低温化
	廃熱・CO <sub>2</sub> の排出	砂漠化	乾燥化、CO <sub>2</sub> 消費の低下=酸素生産量の低下
	酸性雨（酸化物の排出）	火災	農地の減少
	事故・放火・テロ・戦争	海洋汚染	都市火災（火災合流・火災旋風）
	廃棄物	放射能汚染	コンビナート火災・危険物の漏洩
	原子力事故	オゾン層破壊	住宅・ビル火災・タンク火災
	フロン等の排出		道路上での火災
			人類（全生物）の遺伝子への影響

表2 主な自然災害とエネルギー<sup>(7)</sup>

災害名称	放出（発生）エネルギー
台風	1日 5x10 <sup>19</sup> J
火山活動	
全世界年平均	約 10 <sup>19</sup> J
浅間山、桜島級	10 <sup>11</sup> ~ 10 <sup>13</sup> J
地震（最大級）	約 10 <sup>19</sup> J

は、ただの揺れておさまるが、大きな地震では、津波や山津波も併発することが多い。また、数軒程度の家屋火災ではあまり発生しない、火災合流や火災旋風という現象が、いったん生じると、火災の大形化と高温化により、延焼速度が増し、人的な被害が出やすくなる。関東大震災では、この火災旋風が避難場所を襲ったために、犠牲者の半分以上の3万5千人が被害を受けた<sup>(8)</sup>。次に、小規模な噴火の場合には、ガス、軽石、火山灰などは、別々の挙動を示しているものが、ある程度以上の規模の噴火では、これらが一団（混相流）となり、火砕流となって、山腹を高速度で下りおり、広範囲に被害をもたらす。土石流でも、ある程度以上の規模では、何トンもの巨大な岩を伴うことが多く、被害が大きくなる。

このように、多くの災害での主・副の現象の発生機構、成長機構、流動特性、伝熱特性、破壊特性に加え、災害の相乗効果の程度などは、よく解っていないのが、現状である。このため、いったん災害が発生すると、「自然のなすがまま」状態にならざるをえない。

### 2.3 火災による被害低減の重要性

災害の中で、火災は何故重要なのでしょう。1. 日本では、約10分間に1件（1日に150件）の割で、火災が頻繁に発生していること<sup>(9)</sup>。2. 火災の出火原因が、こんろ、たばこ、焚き火による出火を抜き、放火（放火疑いを含む）が第一位となっていること。これらの現状に加え、3. 大規模な都市火災は、1976年の酒田大火以来、発生しなかったが、阪神大震災後に生じたこと。以上の事実から、日本では、ある条件が揃えば、まだ、大規模な都市火災の可能性のあることがわかる。また、4. 日本の林野火災については、年平均4~5千件発生しており<sup>(10)</sup>、住宅への延焼もある。以上のように火災は、最も身近な災害であることがわかる。平常時では火災の規模の小さなうちの初期消火がうまく行われており、大事には至らないことが多い。しかし、地震後や放火・テロなどの異常な状況下や林野火災では、初期消火が不可能な場合もあり、有事の火災被害低減策の確立が

重要であることがわかる。

### 3. 災害と伝熱

伝熱研究の読者のほとんどは、阪神大震災後の住宅火災を、ヘリコプタによるTVの生中継で、ご覧になったことでしょう。多くの方々は、消防車はどうしたのか？消火用の水は無いのか？と疑問に思ったことでしょう。残念ながら現状では、住宅火災を消すには、多量の水で燃焼中の物体の温度を下げて消す手段が最も効果的で、特殊な化学物質の火災以外は、水による消火が一般的です。地震後の火災を想定した、水による消火のための大形の耐震消火槽の設置、海水の供給システム、飛行艇による海水散布法などの非常時の消火方法が確立されていなかったために、大きな都市火災となってしまいました。でも、火災の専門家は、阪神大震災後の神戸などの都市火災は、延焼速度が、従来の定説よりかなり遅く<sup>(4)</sup>、また、大きな火災合流や大規模な火災旋風が発生しなかったため、大惨事にならないで、幸運であったと指摘しています。

都市火災では、延焼速度が重要で、延焼速度の予測を元に消火体制を検討している。延焼速度は、ふく射・伝導・対流の各伝熱項である程度、説明することができる。例えば、道をはさんだ隣の建物では、主にふく射や対流で、火災家屋が倒壊し、隣の建物に接触すれば、主に伝導で延焼していく。ところが、ある程度の風速がある場合には、火の粉が風に乗って運ばれ、主に対流により、延焼速度が急増する。また、火災合流があると、火炎の大形化、高温化で、ふく射により、延焼速度が急増する。これに火災旋風が加わると、いままでになかったような、被害の生じる可能性が出てきます。

次に、火山の噴火に伴う、火砕流や水蒸気爆発を考えてみる。これらの発生機構や被害の低減策を考える際には、火砕流の場合は、高温の火山性ガスと火山灰や礫の固気二相流に対する特性を、マグマ水蒸気爆発の場合は、マグマと地下水などの水との凝固液二相流に対する特性を伝熱面からの考察を加えながらの考察の必要なのがわかる。

以上により、災害と伝熱には、結構深い関係のあ

ることがおわかり頂けたことと思う。

### 4. まとめ

災害の概要や特徴、伝熱と災害の関連について概説した。説明不足や文章表現の不適切な所なども、多々あると思いますが、お許し下さい。

この小特集を機会に、学会員の少しでも多くの方々が、ミクロな物理科学の研究の方向ばかりでなく、マクロな物理科学の研究の方へも目を向けられ、結果的に伝熱研究の調和のとれた発展がなされるよう祈っております。また、米国よりの寄稿も試みに行ったが、本誌の国際化や国内の研究者の意識高揚のためにも、許される範囲で今後の小特集でも、実施して頂きたいと思っている。

最後に、実規模実験や現場での計測・調査や解析などでお忙しいにもかかわらず、また、できるだけ伝熱ということを念頭に、ご執筆を頂いた著者の方々に心から敬意を表す次第です。

### 参考文献

- (1) 自治省消防研究所、兵庫県南部地震における神戸市内の市街地火災調査報告（速報）、1995.
- (2) 建設省建築研究所、平成7年兵庫県南部地震被害調査報告（速報）、1995.
- (3) 建設省建築研究所、平成7年兵庫県南部地震被害調査中間報告、1995.
- (4) 神戸市消防局、阪神・淡路大震災における消防活動の記録（神戸市域）、1995.
- (5) 地球環境工学ハンドブック編集委員会、地球環境工学ハンドブック、オーム社、1993.
- (6) 安全工学協会編、安全工学講座1「火災」、海文堂、1983.
- (7) 世界大百科事典、平凡社、1988.
- (8) 長谷見雄二、火事場のサイエンス、井上書院、1988.
- (9) ジャパン・アルマナック、朝日新聞社、1994.
- (10) 山下邦博、平成6年度日本火災学会研究発表会概要集、日本火災学会、p.204、1994.
- (11) 北後明彦、平成7年度火災学会講演討論会テキスト「地震と火災」、日本火災学会、1995.



## 火砕流温度と火山災害

*Temperatures of Pyroclastic Flows and Volcanic Disasters*

谷口 宏光 (大阪府教育センター)  
荒巻 重雄 (日本大学文理学部応用地学科)  
鎌田 桂子 (神戸大学理学部地球惑星学科)  
馬越 孝道 (九州大学鳥原地震火山観測所)  
中田 節也 (東京大学地震研究所)

### 1. はじめに

1990年11月17日、1万5千人の犠牲者をだした寛政4年5月21日の「島原大変肥後迷惑」から198年ぶりに、雲仙普賢岳で火山活動の再開が確認された。翌年の6月3日には比較的規模の大きな火砕流が発生し、43名の犠牲者と多数の住宅被害をだし、流下地域は荒廃にきした。それ以降も火砕流は頻発し災害を与え続け、火砕流 (pyroclastic flow) という言葉と保有する破壊力の大きさを国民に印象づけた。

火砕流による災害は、その高速高温の粉体の流れという性質に由来している。高速度という条件からは住宅や樹木の破壊、あるいは人体の損傷という災害が発生し、高温という条件からは対象物の焼損が生まれる。

主として、火砕流の有する危険性と、発生が相対的に低頻度である、という二つの理由によって、火砕流内部の温度、圧力、速度など、流れの基礎的性質は従来あまり明らかにされてこなかった。しかし火砕流はわが国において稀な現象ではない。しかも普賢岳火砕流よりはるかに規模の大きなものが古来より多数発生している。従って、このような流れの基礎的性質は、将来の火砕流被害を最小限に食い止めるためにも是非明らかにしておかなければならない事柄である。

本論文では普賢岳火砕流の温度とそれに起因する災害、および、関連する事項についてのレビューを試みる。なお、主として参考にした文献は末尾に掲げる。

### 2. 火砕流温度の定義

多様なサイズの固体粒子と気体とが共存し、しかも熱的平衡状態にあるとはかぎらない火砕流において、その“温度”にはいくつかの定義が存在する。まず、流走中の温度と流走停止後の堆積物の温度とにわけられる。流走中の温度に限った場合、広

い対象領域におけるマクロな平均温度があげられ、同時に家屋の火災や人体に対する損傷などの災害について考える場合、よりミクロなスケールで温度を考える必要がある。

流走中の温度について、本論中では以下のように3種類の温度に区分する。

#### a. 粒子温度

火山灰粒子はよりサイズの大きな粒子から粉碎されて生成する。その温度は生成時の母体粒子の温度、周囲の温度、生成後の経過時間やサイズなどによって様々に変化する。充分微細な火山灰粒子では、一定時間経過の後に周囲気体と局所熱平衡状態に達するが、粗粒な物ではより高温を保っている。ここでは粗粒な火山灰粒子の温度の内、確認される最高温度を指す。

#### b. 雰囲気温度

充分に微細な火山灰粒子は周囲気体と局所的熱平衡状態に達していると考えられ、その微細火山灰粒子+気体とからなる領域 (雰囲気) の温度を指す。

#### c. 見かけ温度

赤外線熱映像 (高温火山灰粒子からの赤外線と低温の雰囲気部分からの赤外線との寄与とが混在) によって得られる温度や、火砕流と試験物質との接触によって与えられる温度 (例; 金属や有機高分子の融解・軟化現象などを利用した場合)。後者で試験物質が十分に小さければ、雰囲気温度に一致する。

### 3. 火砕流の温度に関する報告事例

火砕流という現象が初めて認識されたモンブレ一火山1902年の噴火のとき、被災地で見いだされた金属・繊維製品などの熱変化に基づき温度推定が行われた。これが最初の報告例である。最近になって、流出後まもない火砕流堆積物の温度を直接測定した例がセントヘレンズ火山、ナルホエ火山などで報告されている。しかし、流走している火砕流そのものの温度を測定した例は知られていない。

火碎流の熱源は高温の溶岩破片であるため、火碎流がマグマ（地下にある液状岩石）の温度以上になることはありえない。マグマの温度は化学組成によって異なる。火碎流を発生させやすい $\text{SiO}_2$ に富む組成では750℃～1000℃程度である。これまで様々な方法で行われた火碎流堆積物の温度見積りについてのまとめを表1<sup>[2]</sup>に示す。温度は主として以下

る現象）、堆積物の熱残留磁気、そして堆積物中に取り込まれた木片の炭化、などの諸現象が利用されている。

#### 4. 普賢岳平成活動と火碎流災害の概要<sup>[3,4]</sup>

噴火に先立つこと1年前の1989年11月、島原半

表1 火碎流堆積物の温度推定結果 (Blong, 1984によるまとめ)

火山名	年代	温度 (℃)	測定・推定方法、備考
浅間火山	1783	～900	強い溶結程度より
オーガスティン火山、アラスカ	1975	400-600	直接測定
カルカル火山、パプアニューギニア	1979	～300	木が焦げている
駒ヶ岳火山	1929	390	直接測定
ラミングトン火山、パプアニューギニア	1951	～200	プラスチックの軟化
マヨン火山、フィリピン	1968	98	直接測定
モンプレー火山、マルチニーク島	1902	300-1075	金貨の変形、衣類に焼け焦げあり
セントヘレンズ火山、アメリカ	1980	300-750	直接測定、火口近傍では750-850
ナルホエ火山、ニュージーランド	1975	90	直接測定
スフリエール火山、セントビンセント島	1902	<300	衣類には焼け焦げが無い
スフリエール火山、セントビンセント島	1979	300-350	炭化木の赤外線吸収スペクトル
バンデリア火碎流堆積物、アメリカ	100万年前	550-800	溶結実験
ベスピオ火山、イタリア	79	～400	古地磁気、炭化木の赤外線吸収スペクトル

の3つの方法によって決められてきた。

##### a. 被災状況からの温度の推定

流路にあたる集落や森林などに残された火碎流による熱的影響をもとに推定する。モンプレー火山1902年の値は火碎流がセントピエールの町を襲ったときの温度であり、住居にあったガラス製品が変形していること、金貨は変形しているが溶融していないこと、などの現象を利用して決定している。また、パプアニューギニアのカルカル火山1979年の火碎流では、立木が焦げていることに注目して温度が見積もられた。

##### b. 火碎流堆積物の直接温度測定

堆積直後は危険であるため、直接温度測定は安全性が確認された後、堆積物中に温度計を挿入し行う。そのため、ここで測られる値は堆積直後より低くなる。

##### c. 室内実験に基づく温度推定

堆積物中に残された諸現象を実験的に再現することによって見積もる。具体的には、火碎流堆積物の溶結（高温のため堆積物粒子同士がくっつき固ま

島の西の橘湾の地下で群発地震が始まり、翌年1990年の7月には山頂直下で火山性微動が観測されるようになった。そして11月17日、普賢岳山頂東部の地獄跡火口と九十九島火口で噴火が開始した。最初は水蒸気爆発であり、しばらくして静まったが、翌年1991年2月には屏風岩火口を形成して噴火が再開した。噴煙の勢いは次第に強くなり、黒煙は500mの高さにまで上昇した。

5月中旬には山頂の変形が著しくなり、20日、地獄跡火口に溶岩ドームが確認された。火口には次々と新しいマグマが供給され、23日ごろから溶岩ドーム先端が崩壊しブロックが転落し始めた。24日早朝には最初の火碎流が発生し水無川上流を流れ下った。その後、溶岩ドームは火口の東壁を乗り越えて成長し、先端から次々に崩落、砕けた溶岩塊は粉碎されつつ火碎流となって水無川を流れ下った。26日には土木作業員が火碎流に巻き込まれて大火傷を負った。6月3日と8日には体積が $10^6 \text{ m}^3$ を越える大きな火碎流が発生して水無川を5km流下した。3日午後4時過ぎの火碎流は水無川中流にある北上木場まで達し、

避難勧告区域内で取材にあっていた報道陣や警戒のため詰め所にいた消防団員・警察署員など43名が火砕サージ（pyroclastic surge, 熱風, 本体を覆う希薄な流れ部分）の犠牲になり、179棟の家屋が焼失した。

溶岩ドームは1~4ヶ月毎にその湧き出し口の位置を変え、それに伴って火砕流の流下方向も変わった。火砕流は $10^3 \sim 10^4 \text{ m}^3$  規模のものが1日平均10回以上発生した。1991年8月下旬からはおしが谷に火砕流が入り始め、8月15日には3回目の大きな火砕流が発生した。火砕流本体はおしが谷から水無川に入って5.5km流下したが、火砕サージは大野木場に直進して多くの家屋を焼失した。1992年に入ると火砕流は南東の赤松谷にも流れ始めた。同年11月頃から溶岩ドームの成長と火砕流の発生頻度が低下し始め、1993年1月には火砕流発生のない日が続いた。その後、再び溶岩ドームの成長が再開した。6月23日から24日にかけて続発した大きな火砕流によって、450m×400mに成長した溶岩ドームの半分が崩れ、火砕流は4km流下して千本木で多くの家屋を焼失し、1名の新たな犠牲者を出した。図1-aは6月24日、千本木地域を襲った火砕流を示している。

溶岩の湧出速度はドーム誕生直後が約40万 $\text{m}^3$  /日と最も大きく、その後は時間と共に減少し、1993年に入ってから増加と減少を繰り返し、1995年2月までに13個の溶岩ドームが出現した。2月になるとドームの成長は止まり、火砕流も発生がとどえた。火山噴火予知連絡会は5月25日に噴火終息宣言を出した。この時まで湧出した溶岩の総量は $2 \times 10^8 \text{ m}^3$  に達する。溶岩ドームの最高点は元の山頂の高さを100m以上も上回って1485mに達した。火砕流堆積物の下流域では降雨のたびに土石流が発生し、大きな被害を生じた。

## 5. 普賢岳火砕流の物理計測<sup>[6,7,8,9,10,11]</sup>

火砕流災害は、火砕流の温度・圧力や継続時間などの物理条件に支配されている。物理条件に関する情報を得るためには、火砕流を外から観測する（地震計、空振計、VTR、赤外映像などによる）と同時に、内部において直接観測することが望まれる。しかし、後者については危険などの理由によって今まで試みられたことはなかったし、前者についてさえ観測例はきわめて少ない。

普賢岳火砕流は火砕流としては極めて小規模で、流走区域も比較的明らかであり、発生頻度が極めて高いという特徴を有していた。そのため十分な注意を払うなら、物理条件の計測は可能であると判断した。ただし、破壊力の大きな火砕流本体をさげ、火砕サージ部分にのみ着目した。火砕サージは本体に比べその破壊力は小さいものの、家屋や森林を破壊する十分な威力を有し（例えば1991年6月3日の北上木場における災害）、また、より遠方まで広く到達する性質がある。このため減災の立場からはとりわけ重要である。

火砕流の物理条件を決定するためには、多様な方法を考えることができる。しかし十分な準備期間がなかったため、パソコンやテレメーターなどを用いて時系列データを得ることは断念し、金属の変形や融解関係を利用して期間内の最大/最小値のみを計測した。計測対象として火砕流の圧力（動圧）、温度と火山灰粒子の速度を選んだ。

圧力計測には鉛板プラストメーターを使用した。この方法はすでにキャリブレーションが繰り返行われているため信頼度は高いが、次の2つの問題点がある。第1は地表から現地に行き設置しなければならず危険である、という点。これを解決するため、ヘリコプターから投下して設置するペネトレーター型の温度-圧力計を作成し設置した。第2はキャリブレーションは主としてTNT火薬による衝撃圧によって行われているのに対し、火砕流による圧力は流れによる動圧によるものである、と言う違いに由来している。そのため求められた値は可能性のある最大値を意味している。

温度計測には16種類の金属の融解温度を利用した温度計を製作し使用した。7種類のサイズの各金属片をワイヤーに通し、その消失関係から温度や高温継続時間を決定している。この温度計で決められる温度は雰囲気温度である。大きめの金属片には、粗い火山灰粒子が衝突することによって形成された衝突痕がしばしば観察された。衝突痕の中には、金属中にやや深めのピットが形成され、粒子の粉砕物が残存し、周囲金属が融解していることがある。この現象を利用して、衝突時点における高温火山灰粒子の最低温度を決定した。さらに赤外熱画像撮影装置を用いて、外部から火砕流の表面温度の計測を行った。

火砕流内部における火山灰粒子の運動速度を出すため、物性値既知の薄い金属板を準備し、そこに



図1-a 1993年6月24日千本木地区を流下する火碎流. 右手下の砂防用ダムや住宅との比較から規模が想像できる. (長崎フォトサービス提供)

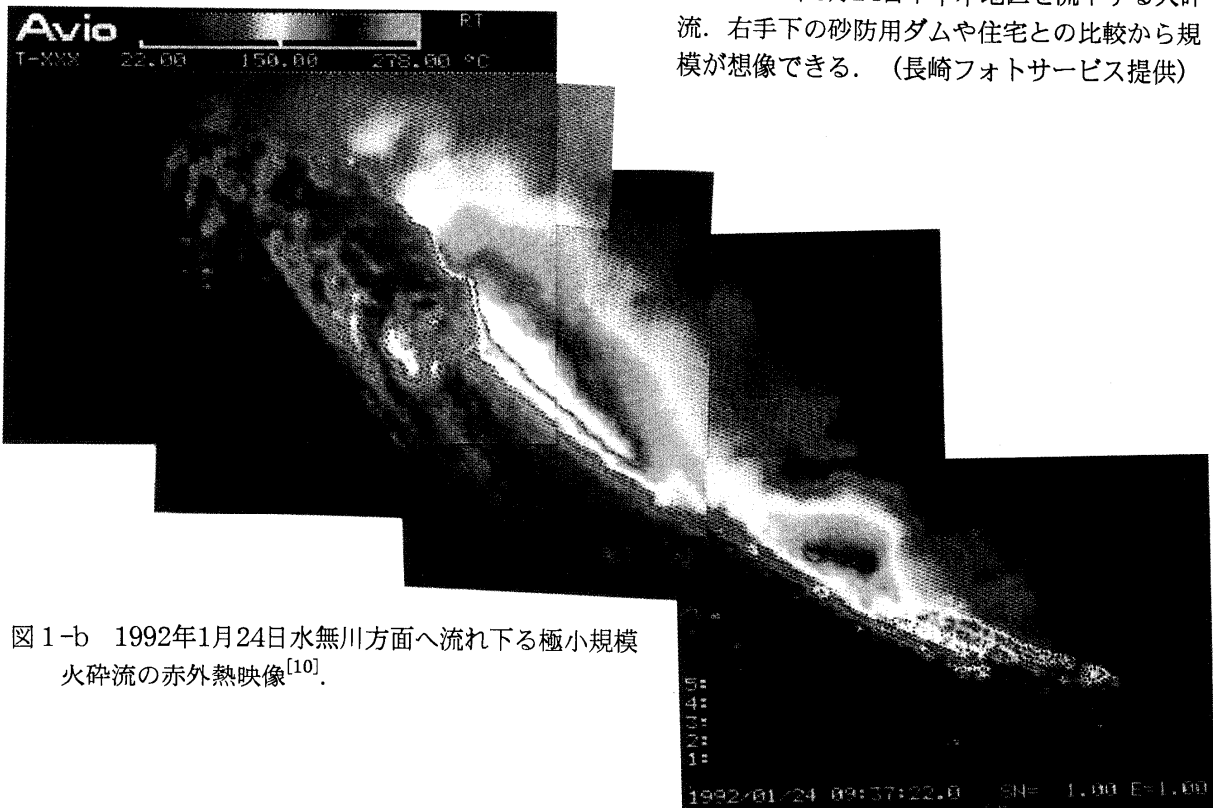


図1-b 1992年1月24日水無川方面へ流れ下る極小規模火碎流の赤外熱映像<sup>[10]</sup>.



残された低温火山灰粒子との衝突による痕跡の深さから速度を算出した。

計測機器の設置は1991年5月から1992年9月まで計6回にわたって行われ、その内の1回は自衛隊のヘリコプターからの投下によってなされた。火砕流の通過域から回収された機器は、微細（直径2mm以下、50 $\mu$ m付近が最高頻度）な火山灰によって薄くコーティングされ、金属光沢は失われ、火山灰粒子との衝突を示す多様な痕跡が残されていた。

図1-bは1992年1月24日、水無川方面にむけて山体斜面を流れ下る極小規模の火砕流（rockfall）の赤外熱映像を示している。また、計測結果は表2にまとめて示す。表中の1991年6月8日の値は、火砕流ではなく20時06分の爆発現象による爆風によるものと判断されている。そのためこのケースに限っては、爆風の過剰圧や爆発エネルギー量を算出することが可能であった。

短時間とはいえ決して無視することのできない値である。続いて火山灰粒子の速度を見る。得られた値は数10m/secから160 m/secであり、普賢岳火砕流自体の観測速度8m/sec～37m/secよりは有意に大きい。火砕サージの流れは乱流状態にあるため、個々の粒子の流れ方向への速度ベクトルは全体としての流動ベクトルに一致する必要はない。しかし、このような高速度をもたらすメカニズムは不明であり、後に再び言及する。

## 6. 普賢岳火砕流被災者による証言<sup>[1]</sup>

対人関係からみた火砕流の実態をより正確にとらえるため、1991年6月3日の火砕流に北上木場付近で遭遇された4名の方との面接調査を行った<sup>[1]</sup>。図2に、北上木場付近の樹木の被災状況に基づく分帯、4名の方の被災地点と避難経路などを示す。面

表2 流走中における普賢岳火砕流の物理計測結果<sup>[9]</sup>

月 日	位 置	距 離 (m)	高 度 差 (m)	圧 力 (bar)	温 度 (°C)		高 温 保 持 時 間 (sec)	粒 子 速 度 (m/sec)
					T <sub>a</sub>	T <sub>pmax</sub>		
1992/2/2	大野木場 <sup>(a)</sup>	4200	1100	0.00	/	/	/	20-40
1/7-7/29	岩床山 <sup>(b)</sup>	1600	600	<0.14	210	>660	約 60	数10
6/23	赤松谷 <sup>(c)</sup>	2000	970	<0.49	345	>420	/	40-160
9/25-27	赤松谷 <sup>(d)p</sup>	2000	970	/	345	/	60-240	/
9/25-27	赤松谷 <sup>(e)p</sup>	2000	970	/	345	/	15-60	/
4/2	板底 <sup>(f)p</sup>	2500	800	<0.15	<100	/	/	/
1991/6/8	垂木台地 <sup>(g)</sup>	2700	750	0.28	/	/	/	75

距離：溶岩ドームからの水平距離、高度差：溶岩ドームとの高度差、T<sub>a</sub>：火砕サージ中の雰囲気温度、T<sub>pmax</sub>：火砕サージ中の火山灰粒子の最高温度、高温保持時間：どれだけかの時間、T<sub>a</sub>を保ったか、粒子速度：火砕サージ中の火山灰粒子の速度、(a)：火砕サージは1 km 以内に接近、(b)：月日不明の火砕サージと一度接触、(c)：2時53分あるいは5時33分の火砕サージと接触、(d)：火砕サージと接触、火砕流の本体は1.5 m 付近まで接近、雰囲気温度を230°Cとした場合、高温保持時間は3分以上、(e)：dと同じ火砕サージと接触、火砕流本体から水平距離にして30m離れた10m高い位置、雰囲気温度を230°Cとした場合、高温保持時間は3分以上、(f)：4/22かも知れない、火砕サージと接触、(g)：20時06分の火山性爆風、爆発エネルギー量は5×10<sup>20</sup> erg、p：ペネトレーター型

ここでは表2の測定結果のうち、圧力と火山灰粒子の速度についてのみ簡単に触れ、温度については後ほどまとめて述べることにする。

まず動圧について見てみよう。記された数値はとるにたりない小さな値、という印象を与えるかも知れない。しかし、これを風の場合と比較すると危険な状況は理解しやすい。例えば0.05barの場合、風速85m/secの強風による動圧(0.045bar)に、0.1 barでは125 m/secの強風による動圧に匹敵し、

接調査結果の中から温度及びその効果に関連する事項を抜き書きすると以下のとおりである。

### (1) A氏夫妻

a. 火砕サージ到達後（数分後？）、南面の引き戸を開けかかると、熱風がどっと吹き込んできた。このため頭髪はザンバラになり、口内に砂が入り込んだ。二人で戸をすぐ閉めた。b. 灰混じりの熱風を少し吸い込んだが、その後体調に異常はきたさな

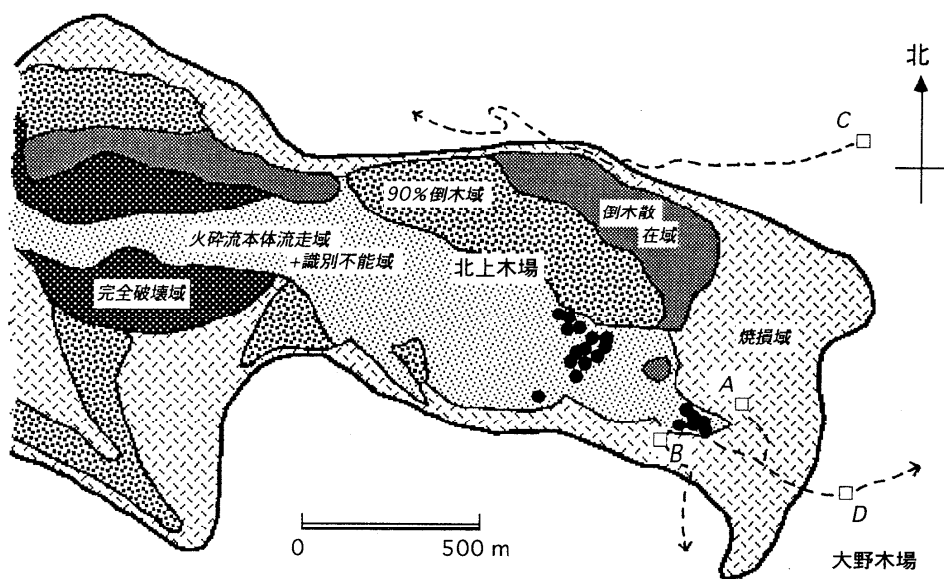


図2 北上木場周辺の1991年6月3日火砕流による被災状況の分帯（樹木に対する効果に基づく），犠牲者位置（●），証言者の被災位置（□）と避難経路（---）

かった。c. さらに1分くらい後に外に出たが、熱風が吹き込むことはなかった。d. 婦人はハイヒールを履いて外にでたが、15mくらい歩いたところで、初めて足元の熱さに気付いた。A氏は外へ出るとき、海水浴場で熱い砂浜へ踏み込むような熱気を感じた。e. 2人は薄く積もった灰を踏んで歩いたが、特に歩行困難の証言はなし。f. 南および西隣の家屋は燃焼中で、すでに骨組みが落ちかけていた。この時点で、夫妻の建物は、最西端の建物を除き発火していなかった。g. 屋外においてある車のバンパーは大きく変形していた。

## (2) B氏

a. サージが住宅に衝突後、(すぐに?) 玄関を開けると熱風(真っ黒な煙)、多分、砂と煙とが混ざったものが入り込んできた。b. 熱風が身体にあたり、半袖であったため、両腕に火傷を負った。後で皮膚がはがれた。c. その後、2階から窓ガラスを割り、入り込んできた黒煙によって腹に火傷を負い、あとで皮膚が剥がれた。d. (経過時間不明の後) 裸足で外に脱出したが、研修所は真っ赤に燃え上がっていた。e. 退避のルートに20cm位の厚さの火山灰が積もっていた。そこを歩くと、最初の2, 3歩で「熱いっ」と感じ、足の甲と裏が熱くてたまらなかった。f. 酒屋の前を通ったが、この時

点では燃えていなかった(その後、焼失)。この辺りにはもう灰が厚く積もっているようなことはなかった。g. 振り返ってみると、隣家のE氏宅が突然発火した。まるでガソリンをかけて火をつけたように、住居が爆発的に発火し、次に隣に密接している小屋が燃え出した。h. 自分の家はまだ燃えていないようであったが、翌日10時のテレビで自宅が燃えているのを見た。この時は、自分の家だけが燃えていた。おそらく火砕流が襲ったときから、かなり後で燃えたのではなかろうか。

## (3) C氏

a. サージが衝突した瞬間、小枝や小石があたる「パチパチ」という音がし、15秒間くらい真っ暗になったが、この間、音も光もおも感じなかった(窓ガラスは閉じていたので、少々の変化は分らなかったと思う)。b. 無線はずっと付けはなしだったが、(黒煙通過の間)電波の雑音は何も聞こえなかった。c. 黒煙通過後(数分以上経過)車外へ出るとムツとして生暖かく感じ、硫黄の臭いがした。

## (4) D氏

a. サージと接触後、目の前のフロントガラスに、小指かそれより小さい位の大きさの、赤く光つ

た小石がバチバチ当たっているのが見えた。b. 熱気を感じ、息苦しくなって頭の中が真っ暗になり、だんだん意識が遠のいて行く感じがした。c. 車の窓の上部の樋はプラスチック製だが熱で変形していた。内部のシートはビニール張りで、焼石が張り付いていた。d. 我々がひどい火傷を負わなかったのはクーラーが効いていたためではないかと考える。e. 私は首の後ろに軽度の火傷を負っていることがわかった。衣服で覆われていた部分は火傷を受けなかった。f. F氏宅まで灰の流れが到達し、側溝に届いていた塩ビの雨樋が変形していた。

### 7. 普賢岳火砕流の温度と災害

#### (1) 温度計測結果

まず、図1-bの極小規模火砕流の熱赤外映像について見てみよう。同図には第6ドームと名付けられた溶岩の先端から、水無川方面にむけて山体斜面を流れ下る極小規模火砕流の側面からみた温度分布が現われている。先端には崩落して行く岩塊からなる本体部分が明瞭に認められる。それに対し、ドームから左側部分にかけて、底を流れる本体とそれを覆う灰かぐら状部分とから構成されていることは疑えないが、境などは明瞭でない。最も温度の高い（～

278℃）領域は、急斜面の地点から出現しており、このことは崩落して行く岩塊の粉碎量が斜面で急増し、内部から高温融体部分が露出することに対応しているものと説明される。

次に、表2の直接計測結果を見てみよう。計測された値は火砕サージ内部の温度として100℃以下から345℃までを与えている。このような温度を図1-bに示した熱赤外映像による底部付近の温度と比較すると、同様かやや高めである。異なった流れを見ているため断定はできないが、熱赤外映像による温度分布は大局的には雰囲気温度の分布を示している、と考えると良いかもしれない。

一方、高温火山灰粒子の温度は細粒（0.1mmのオーダー）にもかかわらず、地表に現われた溶岩ドームの観測温度（～670℃<sup>[15]</sup>）とマグマの温度（斑晶晶出温度：850～900℃<sup>[4]</sup>）に基づき予想される高温溶岩の温度700～850℃に較べると、意外に高いように思える。何故なら、雰囲気温度を300℃、初期温度を800℃とした場合、直径100μmの球形火山灰粒子の中心温度が400℃以下にまで低下する時間は4 msec程度であり、一瞬の間だからである。例えば、粒子速度を計測値のなかの最高160m/secをとっても、1msecの間には、わずか0.64mしか移動しない。岩床山の場合、火砕流本体と計測地点と

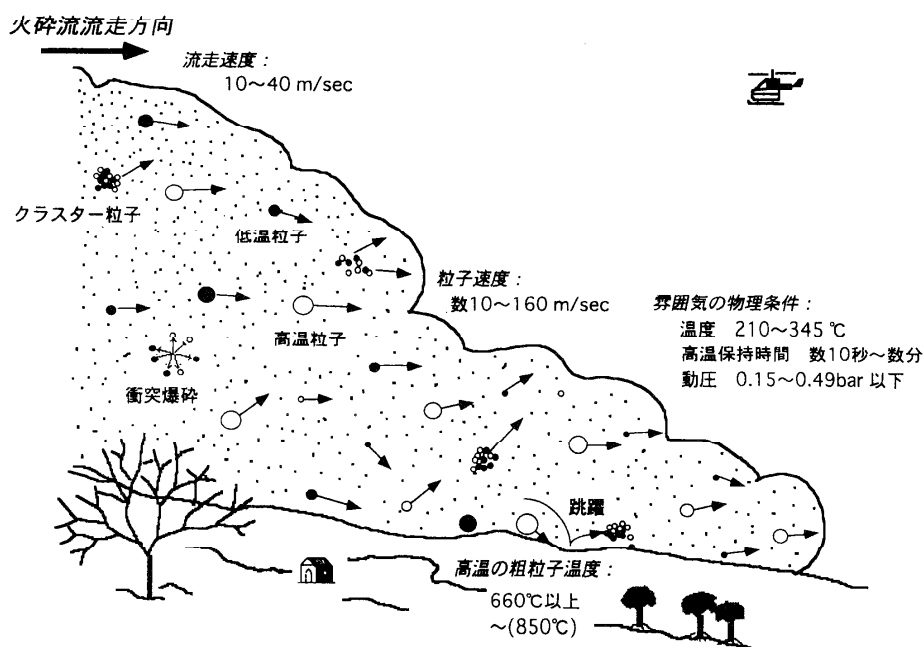


図3 普賢岳火砕流（火砕サージ）の物理状態概念図<sup>[9]</sup>

の距離は数100m以上離れており、大きなブロックからなる本体の破碎によってもたすことはできない。このような高温粒子を供給し続けるためには、火砕流本体に較べれば極めて細粒な碎屑物からなり希薄な流れである火砕サージ自らの中で高温粒子同士が衝突する、あるいは粒子と地表面との衝突-跳躍によってより微細な高温粒子が生産されていると考えなければならない。

このことが、先に示した粒子の速度が火砕サージの速度より早くなる理由なのではないだろうか。すなわち、火砕サージ中における微細粒子同士の衝突によっても内部から高压ガスが突出し<sup>[5]</sup>、これが火山灰粒子の運動速度を早め、そして放出される熱とガスがサージの運動を維持する原動力になっている、と理解しうる。

図3に、計測結果などをもとにした、火砕サージの概念図を示す。

(2) 有機高分子の熱分析による温度情報<sup>[1]</sup>

A氏夫妻及びD氏の証言には、車のバンパーや雨樋などの有機高分子製品に火砕サージが接触したときの現象が述べられている。このような現象からサージの温度についてどのようなことが理解されるのであろうか。

A氏夫妻宅の屋外に置かれていた小型乗用車の後部バンパー（ポリプロピレン製）は、着火の様子は認められないものの、軟化し大きく変形していた。

未使用のバンパー材料と塩化ビニール製の雨樋材料の熱膨張曲線の測定を行った。室温から直線的に膨張していたものが、前者の場合150℃で、後者の場合80℃で軟化現象をおこし見かけ上収縮へと向かう。このような軟化は高分子構造内の結晶部分の融解（+ガラス部分のガラス転移）によって発生する。一般に熱膨張曲線上における軟化現象は $10^{11} \sim 10^{12}$  poise程度のかかり“固い”状態で現われる。従って、バンパー部品が原形を保ちつつも大きく変形している様子は、A氏宅においてサージの見掛け温度が150℃を大きく超え、また、塩化ビニール製の樋が変形していた区域では、堆積物の温度が80℃を大きく超えていたことを示している。

図4にはバンパー材料の示差熱-熱重量分析結果を示す。約150℃に結晶部分の融解による吸熱ピークが見られ、続いて230℃から350℃にかけてブロードな発熱、そして350℃から460℃にかけて複数の顕著な吸熱ピークが見られる。重量変化曲線上における変化と併せて考えると、ブロードな発熱はポリプロピレンの酸化反応であり、その後の顕著な吸熱は熱分解反応によると判断される。460℃以上では熱分解反応も終了し、物はほとんど残らない。バンパー部品は変形しているものの、ほとんどそっくり残存していることはバンパーの温度が熱分解温度以上には達しなかったことを示している。また、この事実と、バンパー表面にも顕著な異常が認められないことから、サージの見掛け温度自体が熱分解温度

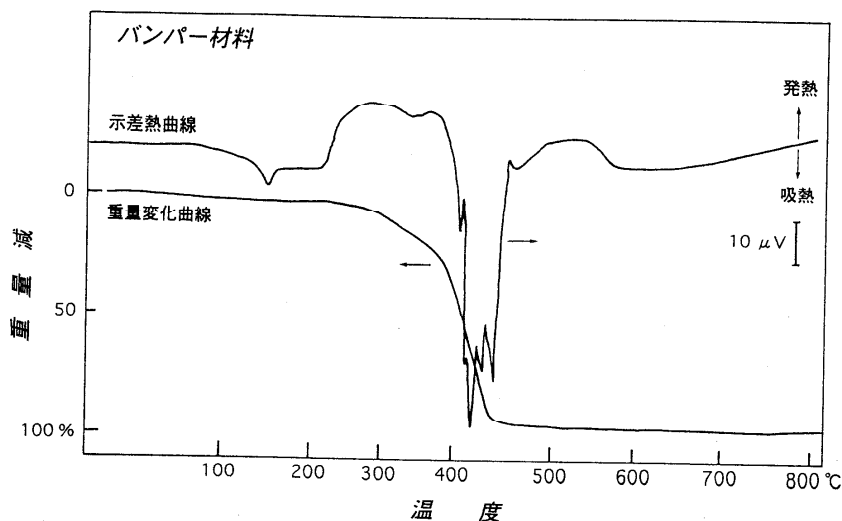


図4 被災した車のバンパー材の示差熱-熱重量分析<sup>[1]</sup>

以下、すなわち約350℃以下と判断される。従って、焼損領域にあるA氏夫妻宅付近において、流走中の火砕サージの見かけ温度は200～350℃程度であった。同様に、塩化ビニール製雨樋の示差熱分析・熱重量分析を行った。その結果、雨樋の変形が見られたF氏宅付近でのサージ堆積物の温度は100～250℃程度だったと推定された。

### (3) 被災者の証言から読み取れる温度情報<sup>[1]</sup>

証言から火砕サージの温度に関してどのような情報が得られるのだろうか。

最初に焼損領域内におけるA氏夫妻及びB氏の例について考えてみよう。先に記した車のバンパー材料の熱分析結果によると、A氏夫妻の住宅付近における火砕サージの見かけ温度は200～350℃に達していたと判断される。一方A氏夫妻の証言によると、“熱風”の見かけ温度と粒子温度とは身体に対して温度上昇による障害を与えない位冷えていたことを示している。人体の一部に対して放射熱を与えた場合、皮膚表面温度が45℃くらいから火傷が現われるとされている。このような矛盾は、接触がサージ到達後しばらく（数分？）経った後の経験であり、熱風は家屋内の低温な空気によって急速に希釈・冷却してゆき、更に、短時間の接触であったためA氏夫妻には熱傷害が現われなかったと考えられる。引き続き1分位の時間経過によってサージの通過は終わり、家屋内外の温度差も急速に小さくなって行ったことも推定される。一方、B氏の場合、サージから遮蔽されず、また、相対的に長時間接触していたため火傷を負ったものであろう。

次に焼損領域外の経験であるC氏とD氏との例について考える。火砕流に追い付かれ、接触したD氏の証言が興味深い。D氏によるa.の証言が正確だとすると、母体の高温粗粒子から粉碎・分離したばかりの高温（色の記述から判断して600℃前後には達していた）の小指かそれより小さい位の“小石”が存在したことになる。しかし緊急に避難しつつある車の中から高速度で飛んでいる粒子を見ることは困難のように思える。もしそうなら、この証言は内部が高温の粒子がフロントガラスに衝突し、粉々に砕け内部から高温部分が露出し、より細かい粒子が生産されるプロセスを見ているのではないかと考えられる。この場合、粒子のサイズとして“小指かそれより小さい位”と言うのは、ややオーバーエスティメートしている可能性がある。いずれにしても、こ

の地点での粒子温度は600℃前後以上あったことになる。一方、C氏の場合、小石がバチバチと衝突しているにもかかわらず、真っ暗で、光りを感じなかった。このことは遭遇地点が火砕流の主要な流走方向からはずれ、距離があり、到達までに粒子温度が500℃以下までに冷えてしまったため、と一応判断される。

### (4) サージによって発生した火災について<sup>[1]</sup>

空中写真判読によると、火災によって破壊された家屋の分布限界は樹木の焼損領域の外側限界にほぼ一致する。樹木の焼損の有無は、判読による上空からの樹木のコゲ茶色～茶色への変色によって判断している。そのため、樹木の葉部分が高温にさらされ変色したことは間違いはないが、樹皮や木部まで高温にさらされ焼損したかどうか、これだけでは正確に判断できない。しかし北上木場の倒木散在領域から焼損領域での観察によると、明らかに樹皮は焼け、また他から孤立し類焼しにくいと考えられる木柱さえ焼け焦げている。この観察に基づくと、少なくとも倒木散在領域から焼損領域にかけての地域では、サージの雰囲気温度が木材の引火温度（約300℃）以上に達していたことは確実である。

A氏夫妻及びB氏の証言から判断すると、焼損領域において家屋火災が現われた時間は火砕流接触後、分のオーダーから時間のオーダーとバラバラであった。焼損領域内に存在した家屋のほとんどは最終的には焼失してしまったが、何故、火災があらわれるまでの時間がこのように多様なのであろうか？

木造家屋の火災（～木材の着火）を例にとると、木材は雰囲気温度が400～470℃の発火点以上で自ら燃焼を開始する。しかし、もし高温の適当な着火源が存在するなら300℃前後でも火災は発生する。火災が現われるまでの時間に差があることは、焼損領域における雰囲気温度が必ずしも発火温度以上に達していなかったことを示しているように思える。このことは計測された雰囲気温度が木材の引火温度までは達しているにせよ、発火温度に較べれば有意に小さいことから支持される。火災は、火砕サージ雰囲気による引火温度までの上昇、高温（D氏の証言から>600℃）火山灰粒子の衝突による着火によって発生したことを示しているのかもしれない。

B氏によるg.の証言は、F氏宅において急激に燃焼規模の大きくなるフラッシュオーバーが発生した瞬間を表現しているらしい。窓ガラスなどを破って

侵入したサージの熱によってまず室内の燃焼しやすい物質から着火し、火災が拡大、フラッシュオーバーに至ったと考えると理解しやすい。F氏宅のフラッシュオーバーに引き続いて密接する小屋が燃え出した、との証言は、火砕サージによって引火温度まで達し燃焼性ガスを放出していた小屋が、F氏宅の火災によって着火したものと判断される。

これら火災の発生原因・経過の相違が火災出現への時間の多様性を生みだしたのではないだろうか。

## 8. まとめ

本論では1990年11月から1995年2月にかけて雲仙普賢岳で発生した火砕流の温度計測に関連する内容と、温度上昇を主たる原因として発生した災害に焦点を絞って解説を行った。簡単に言えば、本火砕流は $\sim 350^{\circ}\text{C}$ 程度の雰囲気をもち、その中に $660^{\circ}\text{C}$ を超える高温の粗い粒子が飛び回っている、と言う状態にあった。発生した住宅火災やその他の熱的効果は、このような温度状態で説明することができる。

## 文 献

1. 荒牧重雄, 谷口宏充 (1996) : 雲仙普賢岳 1991年6月3日の火砕流による被災者の証言から見た火砕サージの破壊力. 火山, (投稿準備中) .
2. Blong R.J. (1984) : *Volcanic Hazards*. Academic Press, pp. 424.
3. 井田喜明 編 (1996) : 雲仙普賢岳の噴火 - 新溶岩ドーム誕生と火砕流災害-. 月間地球号外 15 「雲仙普賢岳の噴火」, pp. 191.
4. Nakada S. and Fujii T. (1993) : Preliminary report of the activity at Unzen Volcano (Japan), November 1990-November 1991: Dacite lava domes and pyroclastic flows. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, 54, 319-333.
5. Sato, H., Fujii T. and Nakada, S. (1992) Crumbling of dacite lava and generation of pyroclastic flows at Unzen volcano. *Nature*, 360, 664-666.
6. Suzuki-Kamata K., Sangen K., Kamata H., Taniguchi H. and Nakada S. (1993) : Penetrator-type thermometer and blastmeter for detecting pyroclastic surges during eruptions at Unzen Volcano, Japan. *J. Natural Disaster Sci.*, 14, 1-8.
7. Taniguchi H. and Suzuki-Kamata K. (1993) : Direct measurement of over pressure of a volcanic blast on the June 1991 eruption at Unzen Volcano, Japan. *Geophys. Res. Lett.*, 20, 89-92.
8. 谷口宏充, 鎌田桂子, 中田節也, 三軒一義, 鎌田浩毅 (1992) : ペネトレーター方式による火砕サージの温度, 圧力, 粒子速度測定の試み—雲仙岳における投下実験—. 火山, 37, 147-151.
9. 谷口宏充, 中田節也, 鎌田桂子, 三軒一義, 鎌田浩毅, 松島 健 (1996) : 普賢岳火砕流の物理計測の試み. 月間地球号外 15 「雲仙普賢岳の噴火」, 112-117.
10. Umakoshi K., Shimizu H., Matsuwo N. and Ohta K. (1992) : Surface temperature measurements of lava dome and pyroclastic flows by infrared thermal video system. *Unzen Volcano the 1990-1992 Eruption* (Yanagi T. Okada H. and Ohta K. eds), The Nishinippon and Kyushu University Press, pp. 44-48.
11. Umakoshi K., Shimizu H., Matsuwo N., Matsushima T. and Ohta K. (1993) : Seismic observations and infrared thermal surveys of the 1990-1993 eruption of Unzen Volcano. *J. Natural Disaster Sci.*, 15, 63-67.

H. TANIGUCHI (Science Education Institute of Osaka Prefecture)

S. ARAMAKI (Department of Earth Sciences, Nihon University)

K. SUZUKI-KAMATA (Department of Earth and Planetary Sciences, Kobe University)

K. UMAKOSHI (Shimabara Earthquake and Volcano Observatory, Kyushu University)

S. NAKADA (Earthquake Research Institute, University of Tokyo)

## マグマ水蒸気爆発と伝熱

*Phreatomagmatic Explosions and Heat Transfer*

山元 孝広 (工業技術院地質調査所地質部)  
 Takahiro YAMAMOTO (Geology Department, Geological  
 Survey of Japan)

### 1. はじめに

火山噴火の恐ろしさは、83個もの活火山を抱える日本列島の住民にとって、もはや説明不要であろう。一方で、噴火の光景は衝撃的であり、見る者をとらえてはなさない不思議な魅力がある。火山噴火は、一言でいうと地下のマグマが地表へ噴出する現象である。噴火の原動力はマグマに含まれている揮発性成分であり、その大半はH<sub>2</sub>Oで構成されている。すなわち、マグマの保有する熱エネルギーが水蒸気を通して機械エネルギーに変換されることで、噴火が起こるのである。その変換の程度は、マグマの温度・水蒸気量・粘性などの内的要因と、火道の閉塞・地下水との接触などの外的要因とで決まると考えられている。本文では、特に最後の要因が深く関与する噴火について解説しよう。

浅海底や海岸部のように豊富な地下水が存在する湿潤地で噴火が起きた場合、地下水とマグマが反応して乾燥状態のマグマ噴火よりも爆発的な噴火をもたらすことが知られている。この種の噴火は、マグマ水蒸気爆発 (phreatomagmatic explosion) と呼ばれ、マグマの地表への上昇から噴火の終了に至る一連の現象の中の1フェーズとして発生する。最近の例では、三宅島1984年噴火や伊豆半島東方沖1989年噴火に伴ってマグマ水蒸気爆発が発生している。火山災害としてみたとき、マグマ水蒸気爆発で最も恐ろしいのは、しばしば火砕流を伴うことであろう。火砕流は、1990年から始まった雲仙普賢岳噴火で頻発したように (ただしこれはマグマ水蒸気爆発ではない)、高温の火山噴出物・火山ガス・空気の混合物が高速(>10 m/s)で斜面を流れ下る現象で、最も人的被害の大きい加害因子の一つである。マグマ水蒸気爆発の場合、本来は火砕流を伴わない比較的穏やかな噴火を起こす性質のマグマでも、うまく地下水と反応することによって、火砕流を伴うような爆発的な噴火に

変化することがあり、事前の災害予測を行ううえでその発生が重要になってくる。例えば、マグマ水蒸気爆発を繰り返すことで有名なフィリピン・ルソン島の湖上の火山タールでは、1911年噴火で発生したゲンブ岩マグマの火砕流により火口から10 kmの範囲が破壊され、約千名の死者が出ている。

本文では、マグマの基本的な物性から話を始め、マグマ水蒸気爆発を高温流体のマグマと低温低沸点流体の水との爆発反応ととらえ、そのメカニズムについて簡単に考える。

### 2. マグマの物性

マグマは、地球を構成する岩石が熔融状態にあるものである。その成分の半分ないし大半はSiO<sub>2</sub>で構成されており、その含有量に応じて少ない方からゲンブ岩・安山岩・デイサイト・流紋岩質マグマと呼ばれている。これらのマグマは地球内部に普遍的に存在しているわけではなく、マグマの発生条件がそろった特定の場所に局在しているものと考えられている。岩石学的・地球科学的考察によれば量的に最も卓越するゲンブ岩マグマはマントル物質が数%~10%程度溶けた液からつくられたと推定されている。重要な点はマグマが起源物質の全熔融で生じたわけではないことで、その

密度 $\rho$ , kg/m <sup>3</sup>	2.6x10 <sup>3</sup>
粘性率 $\eta$ , Pa s	10 <sup>2</sup> -10 <sup>4</sup>
比熱 $c$ , J/kg K	1.2x10 <sup>3</sup>
熱拡散率 $D$ , m <sup>2</sup> /s	5x10 <sup>-7</sup>
ガラス転移温度 $T_g$ , °C	730°

図1. ゲンブ岩マグマの物性

発生場においてリキダスを越えるような温度環境になかったことを意味している。従ってマグマの温度には自ずと上限があり、実際に地表に噴出したマグマの温度はソリダスをやや上回る程度であることが普通である。ゲンプ岩マグマの場合、その温度は1000~1200℃程度である。その他の物性値は図1にまとめているが、粘性率だけはソリダス付近の温度変化に敏感で100℃程度の温度低下でも4~5桁上昇する。

### 3. 溶岩-水相互反応

ここではマグマが地表に噴出して液体として流動する溶岩流と地表水との反応について解説する。温度が $T_m$ のゲンプ溶岩と $T_w$ の水の2液が直接接触したときの界面温度 $T_i$ は半無限伝導解を用いて次式のように与えられる (Fauske, 1973)。

$$T_i = \frac{T_m [k \rho c]_m^{1/2} + T_w [k \rho c]_w^{1/2}}{[k \rho c]_m^{1/2} + [k \rho c]_w^{1/2}}$$

ただし、 $k$ は熱伝導率、 $\rho$ は密度、 $c$ は比熱を、添字 $w$ は水を $m$ は溶岩をそれぞれあらわす。 $T_m$ を1200℃に $T_w$ を10℃とすれば $T_i$ は約720℃、 $T_m$ を1000℃としても $T_i$ は約600℃となる。これらの界面温度は、基本的にゲンプ岩のガラス転移温度よりも低く、マグマが水と接触すればマグマの表面にガラス質皮殻が直ちに形成されることを意味している。

ゲンプ岩溶岩流の海中への流入は海岸近くの火山、例えばハワイのマウナロア・キラウエア両火山で、数多く観察されている(図2)。このうち、1868年の溶岩流は入水時に大量の加圧水蒸気を発生させ大規模な二次爆発を起こしたことが記録されている。しかし、歴史事例ではむしろこの種の爆発は稀であり、ハワイの入水溶岩流は非爆発的に溶岩デルタを形成した例の方が圧倒的に多い(Peterson, 1976)。また、溶岩流の前進を人工的に阻止するため、しばしば溶岩流への放水が試みられているが(例えば三宅島1984年噴火や伊豆大島1986年噴火)、二次爆発の発生はこれまで報告されていない。従って、単に溶岩が水と接触しただけでは二次爆発は自発的に起きず、ガラス質皮殻の形成が爆発に結びつくような加圧水蒸気の発生を十分

噴火年	大規模二次爆発
1983-1992	○ (Nov 27, 92)
1969-1973	—
1960	—
1955	—
1950	—
1926	—
1919	○
1887	—
1868	○ (Puu Hou)
1859	—
1840	○
1823	—

図2. ハワイ島での溶岩流入水事件の歴史記録 (Peterson, 1976)

阻害しているものと考えられる。二次爆発が発生するためには、次章以下で説明するように、溶岩と地表水が相互混合するようなプロセス(溶岩内部の空洞への地表水の流入や溶岩流走過程での地表水の囲い込みなど)が必要である。

海中に流入した溶岩流はどれぐらいの速さで冷却するのであろうか。今、溶岩流の皮殻の厚さ $\delta$  (m)が単純に溶岩の熱拡散係数 $D$ だけで決まるとすると、

$$\delta = (D t)^{1/2}$$

厚さ1mの皮殻が形成するためには約23日の時間 $t$ が必要になる。実際の溶岩流では皮殻内の節理に沿って熱水対流系が発達するためこれほど単純に冷却が進むわけではないが、厚い溶岩流が完全に冷却するのに相当の時間が掛かることにはかわりはない。アイスランドの沖のヘイメイ島の1973年の噴火では、港に流れ込んだ厚い溶岩流を除去するために溶岩流の爆破が噴火直後に計画されたが、大規模な二次爆発の可能性が指摘され、計画は中止されたという(Colgate and Sigurgeirsson, 1973)。



#### 4. マグマ水蒸気爆発のメカニズム

マグマ水蒸気爆発は、すでに述べたように火道中のマグマと地下水との反応により、大量の高圧水蒸気が発生して起きる爆発的噴火現象である。その噴出物には急冷されたマグマ破片や、噴煙が多量の水蒸気で湿っていたことを示す各種の特徴が一般に認められ、マグマが地下水と反応することなく噴出した通常のマグマ噴火の産物とは全く異なっている。短時間に大量の水蒸気が生産されるためには、マグマから水へ急速に熱が移動することが必要で、いかにして高速の伝熱がもたらされるのかがこの現象を理解する鍵となろう。マグマと水の温度差を $\Delta T(K)$ 、熱伝達率を $h(W/m^2K)$ 、接触面積を $A(m^2)$ とすると、両者間の伝熱速度 $Q(J/s)$ は次式で表される。

$$Q = h A \Delta T$$

$Q$ が大きくなるためには、 $\Delta T$ か $h$ か $A$ が増大することが必要である。しかし、すでに説明したようにマグマの温度には制約条件があるので、爆発が起こるかどうにかかわらず $\Delta T$ はほぼ一定である。また、マグマと水の界面温度 $T_i$ も既に示したように大気圧下の水の自発核生成温度の理論値である $312.5^\circ C$ を大きく越えているので、両者の間には安定な蒸気膜が形成され、 $h$ が極端に大きくなることは期待できない。従って $Q$ が飛躍的に増大してマグマ水蒸気爆発が起きるためには、火道内部においてマグマと水の接触面積 $A$ が増加するプロセスが不可欠である。

マグマと外来水との爆発的反応は、熱工学で言うところの蒸気爆発(vapor explosion)現象に類似することが、従来から指摘されてきた(例えば Sheridan and Wohletz, 1983)。低温低沸点液体と高温高沸点液体の接触混合時に起きるこの爆発現象には、なるべく大きい温度差で膜沸騰がこわれ液-液接触が起こることと、高温液が細粒化して接触面積が増加することが不可欠であると考えられている(成合, 1978; 飯田・高島, 1988)。実際、高温液の細粒化はあらゆる素材の蒸気爆発で確認されており、マグマ水蒸気爆発もその例外ではない。従ってマグマ-水系においても、マグマの細粒化による表面積の増大が急速な蒸気発生に重要であることはまず間違いない。しかし、水は間隙水として地下に存在すること、マグマはガラス質皮殻で覆われることから、蒸気爆発で考えられている

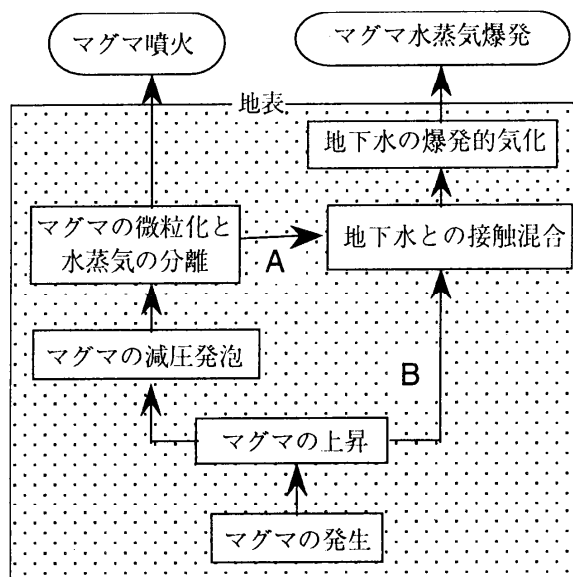


図3. マグマ水蒸気爆発の概念図

水蒸気膜の崩壊と液-液接触がどれほどの役割を果たしているのかは良く分からない。

マグマ水蒸気爆発を総合的にモデル化するためには、まず火山体内部の水理状況と火山噴火のダイナミクスの2つが同時に理解されなければならない。特に、地下水と接触・混合する直前のマグマの状態は、減圧によるマグマの発泡現象に依存している。そのため実際の火山噴火では、噴火地点の地下水理状況とマグマの性質(特に含水量)の多様な組合せを反映した接触モードが有り得よう。具体的には、微粒化したマグマ粒子とガスからなる混相流と湿った母岩との接触モードと(A)、未発泡の液体マグマと間隙水に富む湿った母岩との接触モード(B)を端成分とした系列が考えられる(図3)。しかしながら、マグマ水蒸気爆発を支配する物理過程、特に火道近傍の地下水の挙動、母岩とマグマとの混合過程や、マグマの発泡破碎過程については、現状では十分理解されているとは言えない。ここではモデル化に当たっての基本的な問題点を列記することにする。

#### 5. マグマの発泡破碎と外来水の気化

マグマ上昇の本質的な駆動力は浮力であろう。特にマグマの密度と地殻の密度が釣り合ったマグマ溜まりから、マグマを地表まで上昇させるに

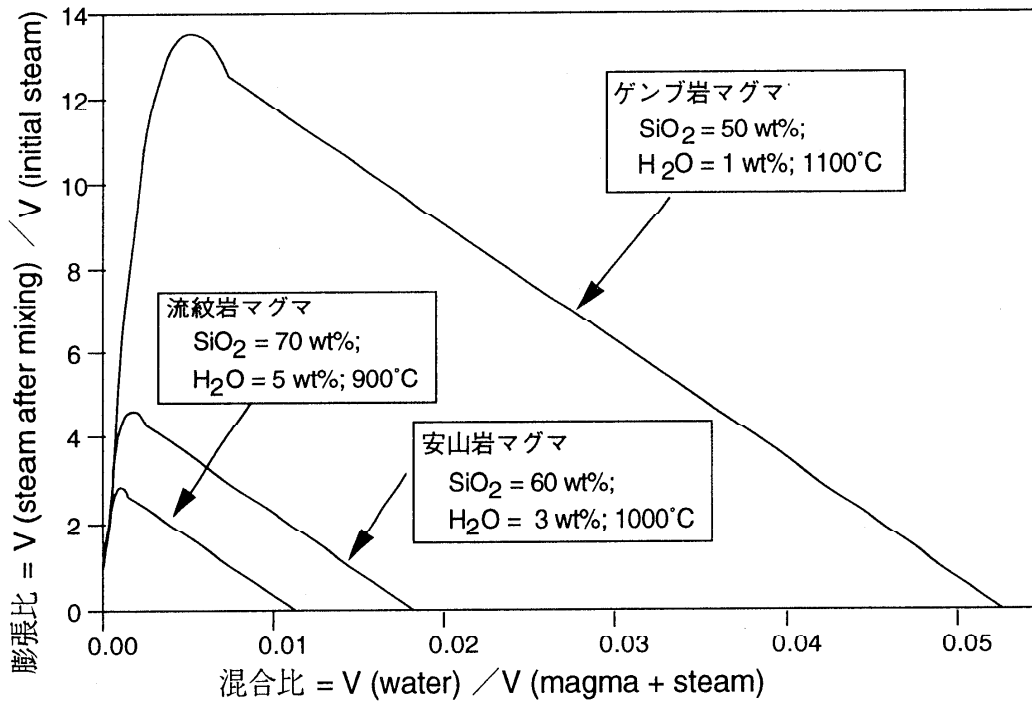


図4. 発泡破碎したマグマと水との混合による水蒸気量の変化

は、揮発性成分の発泡による密度の減少が重要になってくる。しかも、減圧によって成長した気泡内の圧力とマグマの外側との圧力差がマグマの破壊強度を越えた時点で、マグマは破碎され、気泡内のガスが低圧側に飛び出してくる。通常の乾燥状態で起こるマグマ噴火はこのようにして発生するものであり、揮発性成分濃度が大きいほど噴火の爆発力は大きくなる。その主成分であるH<sub>2</sub>Oのマグマ中の濃度は、伊豆大島1986年噴火や三宅島1984年噴火のような溶岩噴泉で特徴づけられるゲンブ岩マグマで1%程度、桜島で活動中のブルカノ式噴火を起こす安山岩マグマで3%程度、大規模な軽石噴火を起こす流紋岩マグマで5%前後と見積もられている(篠原, 1990)。

マグマが減圧過程で自発的に微粒化し表面積の爆発的増加をもたらすことは、混合した地下水への急速伝熱を可能にする点で、マグマ水蒸気爆発のトリガーとして有望なプロセスに見える。ここでは、マグマの発泡破碎で生じたマグマ粒子と水蒸気からなる混相流に火道へ流れ込んだ液体の水が取り込まれる場合を考えよう。混相流中のマグマ粒子は十分に微粒化しており、水蒸気と熱平衡

にあるものとする。また、混相流の速度は通常、数10~数100 m/sあるので、取り込まれた水はそのウェーバー数から径数mm以下に微粒化すると見られ、直ちに混相流と熱平衡になろう。水と混合した混相流は断熱的に膨張するとすると、大気圧下での混合前と混合後の水蒸気の体積比(膨張比)は、混合体積比を横軸に図4のようになる。取り込まれる水の温度は10°Cで、比熱を $4.2 \times 10^3$  J/kg K, 気化熱を $2.3 \times 10^6$  J/kg K, 水蒸気の比熱を $2.0 \times 10^3$  J/kg Kとして計算した。ゲンブ岩・安山岩・流紋岩の温度と水蒸気量はそれぞれ常識的な値とし、マグマ中の揮発性成分は水蒸気だけからなるとしている。図4を見て直ちに理解できることは、含水量の少ないゲンブ岩マグマほど、外来水と混合することによって混相流の体積が大きく膨張できることであろう。逆に、含水量が多い流紋岩マグマの場合は、水との混合による冷却の効果が大きく、混相流の大幅な体積増加が期待できない。このことは本来穏やかな噴火活動をするゲンブ岩マグマほど外来水と接触混合することで噴火様式が急変し、激しいマグマ水蒸気爆発を起こし易いことを意味している。一方、元々爆発的噴火を起こ

し易い流紋岩マグマの場合は、発泡破碎後に外来水と混合しても、乾燥状態より爆発的になることは難しい。

図4の混合過程では、発泡破碎によってマグマが十分微粒化していることを仮定している。それゆえ、マグマの微粒化が不完全なときには、当然混相流の膨張比は図4よりも小さくなる。ゲンプ岩マグマの場合も、含水量が小さくなればなるほど、マグマの発泡破碎深度は浅くなり、爆発そのものは弱く、生産されるマグマ粒子も粗くなるものと予想される。それゆえ、マグマの発泡破碎が、実際にマグマ水蒸気爆発のトリガーとして有効に作用するためにはその含水量に下限値があるものと考えられる。しかし、マグマの発泡破碎のサイズ分布を定量的に予測するモデルはまだなく、マグマ水蒸気爆発での最適含水量がどれほどであるのかは具体的に良く分からない。

#### 6. マグマと湿った母岩の相互混合

浅海底下の未固結堆積物や孔隙水に富んだ未固結火砕物で満たされた火道中を液体マグマが上昇する際には、流体界面そのものが元々不安定で、マグマの流動によりおこる相互混合が爆発を触発するとの考えが一般に受け入れられている。実際の噴火でどの様な不安定が支配的であるのかはよく分からないが、少なくとも板状の液体マグマの貫入時に起こる流体境界の不安定はヴィスカスフィンガリングとみなせ、次式の $\alpha$ が正の場合に不安定化が起こり得る (Pollard et al., 1975)。

$$\alpha = 2\pi(\mu_s - \mu_m)V_m / \lambda(\mu_s + \mu_m)$$

ただし、 $\lambda$ は貫入面のゆらぎの波長、 $\mu_s$ は母岩の粘性、 $\mu_m$ はマグマの粘性、 $V_m$ はマグマの貫入速度である。式から明らかなようにゆらぎが成長するためには貫入したマグマの粘性が母岩のそれよりも低くなければならない。従って、この種の混合は低粘性のゲンプ岩マグマで期待でき、デイサイトや流紋岩質の高粘性マグマでは起こりにくい。どのような母岩とマグマの組合せで相互混合が効果的に進行するのかは、今後明らかにしていく必要がある。

マグマ中への含水砕屑物の閉じ込めが起これば、孔隙水が突沸し気化する過程で、両者の混合は加速され、その結果、大量の高圧水蒸気の発生

が期待できる。特に火道中の一部で生じた圧力波が系を伝播する過程で十分なマグマの流体力学的な破碎をもたらすならば、マグマの表面積は飛躍的に増大し、高速伝熱が可能になる。実際、蒸気爆発実験で生産される破碎粒子は非常に細粒(63 $\mu\text{m}$ 以下)であり、球形や表面が入り組んだ形態の粒子が多い (Wohletz, 1983)。形態の類似した火山灰は実際の噴出物からも見いだされており、マグマ-水間の流体力学的破碎を示す重要な証拠と見なされている。ただし、全てのマグマ水蒸気爆発がこの種の火山灰を生産しているわけではなく、急冷破碎で生じたブロック状の形態の火山灰を生産した事例の方が圧倒的に多い。

#### 7. 火道近傍の地下水の挙動

マグマが地下の帯水層に上昇してくると、短期間のうちに加熱された部分では液体の体積膨張により間隙圧が急上昇する。孔隙水気化時の圧力上昇の最大値( $\Delta P$ )は、Delaney (1982)によると次式で見積られる。

$$\Delta P \sim B(\kappa/\omega)^{1/2} / \beta$$

ただし、 $B$ は熱膨張の無次元数、 $\beta$ は砕屑物の圧縮率で、 $\kappa$ と $\omega$ は熱および孔隙流体の拡散率である。この高圧状態は母岩の浸透率に応じた速度で解消されていくが、地表付近の帯水層内では通常浸透率を持つ母岩を破壊するのに十分なマグマ貫入による圧力上昇が期待できる (Delaney, 1982)。実際、1990年に始まった雲仙普賢岳噴火がそうであったように、マグマ噴火に先行する水蒸気爆発 (phreatic explosion) は特に珍しい現象ではない。

噴火の原動力が揮発性成分の発泡による浮力の獲得であるのと逆に、地表付近にあるマグマが揮発性成分を放出し密度が増加すれば負の浮力が作用することになる。従って火道中の脱ガスマグマは、最終的に地殻内に逆流せざるを得なくなる。一方、火道周辺の地下水は上記のようになんらかの形で加圧された状態にあるので、マグマの逆流時の火道内の急速減圧は、火道壁の崩壊と外来水の火道への流入を導き安い。例えば、伊豆東方沖1989年海底噴火(図5)では、7月11日に火山性微動を伴うマグマの海底下への注入が起き、海底面が隆起して手石海丘が形成された。この新海丘は同月13日のマグマ水蒸気爆発で吹き飛ばされたが、

その噴出物は加熱軟化した海底下の含水母岩と冷却固結しかけた本質ゲンプ岩のみからなり、熔融状態のマグマ本体は地殻内に逆流したものと考えられている (Yamamoto et al., 1991)。すなわち、この海底噴火は加熱された母岩と地下水が火道内の減圧により破壊・攪伴され高圧水蒸気を生じて起きたものである。

#### 8. まとめ

マグマ水蒸気爆発は、マグマと間隙水に富む母岩との間の安定した界面がトリガーにより壊れる過程で、マグマから間隙水への高速伝熱により高圧水蒸気が発生して起こる噴火現象である。爆発のトリガーとしてはマグマの発泡破碎、マグマと湿った母岩との流体境界の不安定、間隙水の急加熱による母岩の破壊、火道内の減圧による地下水の流入などがある。しかし、実際にマグマと地下水が反応している場での母岩の浸透率や含水率等の諸性質、外来水との反応における封圧や発泡破碎の定量的な見積も十分には行われていない。今後は火山独自の接触モードでの実験や解析をさらに進めていく必要がある。

#### 文献

- Colgate, S.A. and Sigurgeirsson, T., 1973, *Nature*, 244, 552-555.
- Delaney, P.T., 1982, *J.Geophys.Res.*, 87(B9), 7739-7756.
- Fauske, H.K., 1973, *Nucl.Sci.Eng.*, 51, 95-101.
- 飯田嘉宏・高島武雄, 1988, *ながれ*, 7, 203-211.
- 成合英樹, 1978, *日本機械学会誌*, 81, 55-60.
- Peterson, D.W., 1976, *Andean and Antarctic Volcanology Problems*, Internat.Assoc. Volcanol.Chem.Earth's Inter.Sp.Ser., 172-189.
- Sheridan, M.F. and Wohletz, K.H., 1983, *J. Volcanol.Geotherm.Res.*, 17, 1-29.
- 篠原宏志, 1990, *火山*, 34, S99-S110.
- Pollard, D.D., Muller, O.H. and Dockstader, D.R., 1975, *Geol.Soc.Amer.Bull.*, 86, 351-363.
- Wohletz, K.H., 1983, *J.Volcanol.Geotherm.Res.*, 17, 31-63.
- Yamamoto, T., Soya, T., Suto, S., Uto, K. Takada, A., Sakaguchi, K. and Ono, K., 1991, *Bull.Volcanol.*, 53, 301-308.

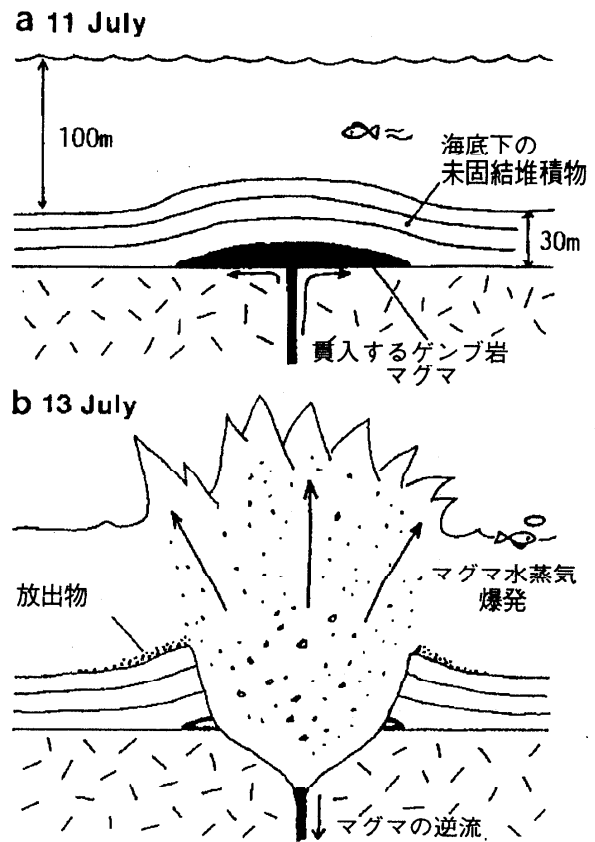


図5. 伊東沖1991年海底噴火のモデル (Yamamoto et al., 1991)

## 道路火災における輸送現象

*Transport Phenomena in the Fire on the Fuel-Spilled Road*

石田 博樹 (長岡工業高等専門学校)

Hiroki ISHIDA (Nagaoka National College of  
Technology)

### 1. 緒言

交通事故により車両から燃料が道路に流出した場合、あるいは、燃料貯蔵タンクの損壊により燃料が地面に流出した場合に、燃料が浸潤したその道路や地面で、万一、火災が発生すれば、人的、物的に大きな被害をもたらす大災害となることは直ちに予測できる。

1960年(昭和35年)10月26日、兵庫県西宮市において、LPGタンクローリが横転し、流出したLPGに着火し、道路周辺が爆発炎上し、大災害になった。1979年(昭和54年)7月11日、東名高速道路の日本坂トンネルの中で発生した玉突事故による火災による大災害は、今日でも記憶に新しい。1985年(昭和60年)5月6日、東京都目黒区柿の木坂において、タンクローリが横転し、大量の液体燃料が道路に流出し、運悪く着火したために、その市街地で大規模な道路火災が発生し、大きな被害が出た。また、湾岸戦争において、燃料貯蔵タンクや油井が爆撃を受けて損壊し、流出した燃料が周囲の地面に浸潤し、着火し、大火災が発生した場面も、記憶に新しい。

液体燃料が浸潤した道路あるいは地面に着火した場合、道路(地面)に沿って火炎はどのように広がるのであろうか。道路(地面)上における火炎の拡がり現象においては、どのようなパラメータが支配的なのであろうか。さらに、道路火災による被害を低減するためには、道路やその周辺環境の整備にどのような要件が必要なのであろうか。

液体燃料が流出し浸潤した多孔質の地面上における火炎の拡がり現象は、本格的には、約10年前から、筆者を含めた主に日本人研究者により、研究が開始され、実験室規模の現象については、今日、大体の輪郭がわかってきた。[1-5] ここでは、当然予想されるように(通常の燃焼現象と同じく)、熱と流れと物質移動を含む輸送現象が深く関連しあっている。ここでは、そうした分野を専門とし、

得意とする伝熱工学の研究者諸兄からの有益な御教示を期待しつつ、今までの研究内容を概観することにする。

### 2. 研究の内容

実験室規模における研究では、道路(地面)のモデルとして、ガラスビーズ層がよく用いられる。液体燃料が浸潤した道路あるいは地面に着火した場合に、多孔質の地面に沿って伝播する火炎の挙動に大きく影響を与える主要な因子を列挙すると、次のようになる。

- (1) 流出燃料の引火温度と道路面(地面)温度との高低関係
- (2) 火炎周囲(道路周辺)の気流
- (3) 燃料の流出量(流出面積)
- (4) 道路面(地面)の空隙率
- (5) 道路面(地面)の傾斜角度

この他、燃料の化学的物性、道路面(地面)の材質や施工具合、燃料流出後の経過時間、等がある。

道路面(地面)に沿って火炎が伝播するためには、当然のことながら、伝播する火炎先端の前方の道路面上に可燃範囲の燃料濃度が生成されていなければならない。即ち、燃料が流出(浸潤)した後の道路面における可燃範囲の燃料濃度の生成の速度や範囲は火炎の拡がり速度と火炎の規模を直接支配する。従って、燃料の流出量、道路(地面)温度が流出燃料の引火温度よりも高いか低いか、道路面上の気流の特性、さらに、道路面が多孔質であるかないか、が火炎の挙動や火災の規模を決定する最大の直接要因といえる。

#### 2-1: 地面温度が流出燃料の引火温度よりも低い場合 [3]

Fig.1は、長さ100cm、幅5cm、深さ2cmの定温容器(25°C)にガラスビーズを満たし、液

体燃料 ( n-Decane, 引火温度 46 °C) を浸潤させ、ガラスビーズ層の表面の一端に着火させた後に、伝播する火炎の直接写真である。ビーズ径の大小、即ち、空隙の大小は、ビーズ層の表面への燃料供給速度に直接影響を与えるために、道路 (地面) 温度が流出燃料の引火温度よりも低い場合には、火炎の規模と伝播速度を支配する最大の因子である。

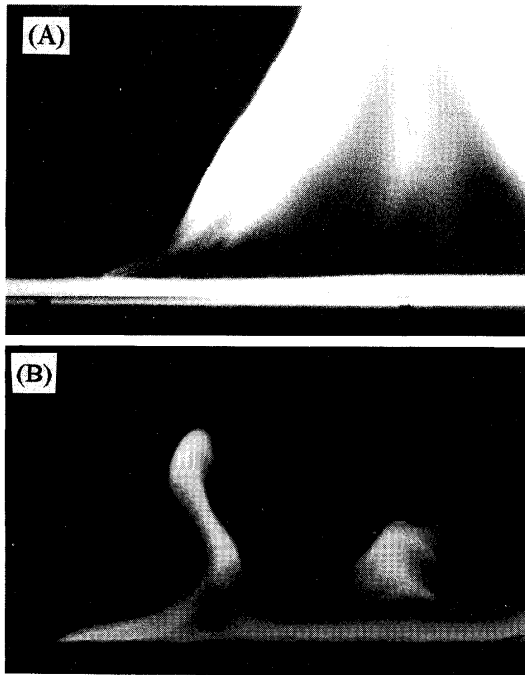


Fig. 1 :Direct Photographs of Spreading Flame. Beads Diameter; (A) 0.1 mm, (B)1.0 mm

Fig. 2 は、火炎の伝播距離と経過時間との関係を示す。ビーズ径が小さい (空隙が小さい) 場合は、火炎の伝播速度はほぼ一定であるが、ビーズ径が大きい (空隙が大きい) 場合には、火炎伝播速度が着火後の経過時間とともに次第に低下し、伝播火炎の先端が脈動を始め、遂には、しばしば、立ち消えする。燃料が浸潤した、比較的粗いガラスビーズ層の表面に沿う気流の中における伝播火炎の安定性については、火炎の先端近傍に形成される特異な逆流領域の役割が重要であると指摘した研究例もある。[ 6、8、9 ]

Fig. 3 は、平均火炎伝播速度に対するビーズ径とガラスビーズ層温度の影響を示す。ビーズ径の増大とともに、火炎の平均伝播速度は著しく減少し (ビーズ径の減少とともに、火炎の平均伝播速度は

著しく増大し)、また、ビーズ層温度の上昇による火炎伝播速度の増大の効果は、ビーズ径が大きい場合には顕著ではなくなることが分かる。

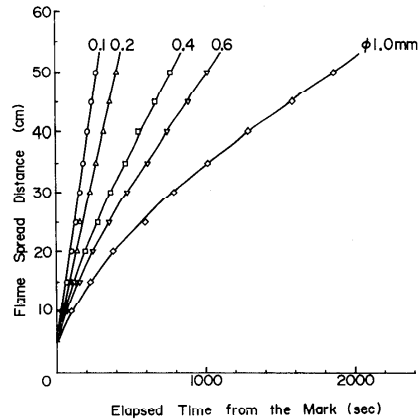


Fig. 2 Relationship between flame spread distance and elapsed time with variation in beads diameter; the mark exists 5 cm away from the ignition position at one end of the tray; beads temperature 40 °C, horizontal spread; fuel n-decane.

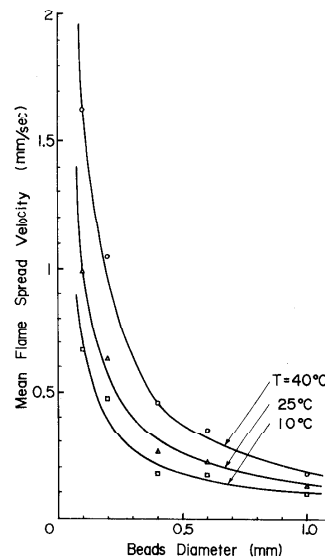


Fig. 3 Effect of beads diameter on flame spread velocity in horizontal spread; fuel n-decane

これらの結果は、地面の温度が流出燃料の引火温度よりも低い場合には、地表面における燃焼による燃料消費速度と地面内からの燃料供給速度との大小関係のバランスが火炎の挙動に大きな影響を与えること、即ち、地面上の火炎伝播現象を詳細に解明するためには、火炎から地面への支配的な伝熱形態の検討に加えて、地面内における毛管上昇効果を

含む詳細な燃料輸送過程の解明が重要であることを示している。火炎が伝播する際の地面内の燃料の挙動については、詳細な研究例がある。[5] なお、ビーズ径がより一層大きくなった(空隙が大きくなった)場合には、砂利が敷かれている道路上の水たまりを想像すれば、容易に予測できるように、しだいに通常の液面上の火炎伝播現象に近づき、即ち、火炎先端に先行する表面流がガラスビーズにより阻止されないために、火炎伝播速度は再び増大することになる。また、ビーズ径が著しく小さくなった(空隙が小さくなった)場合には、通常の可燃性固体面上の火炎伝播現象に近づき、火炎伝播速度は固有値に近づくことになる。

Fig. 4は、傾斜した地面上の火炎伝播における、地面内の燃料輸送の模式図である。温度計測の実験によれば、伝播火炎の先端直下のビーズ層の表面近傍の温度は、液体燃料の沸点よりも遥かに高い。即ち、火炎直下のビーズ層の表面近傍では、燃料が既に気化しており、地面内から地表面への燃料輸送現象の解明のためには、温度勾配のある多孔質固体内の毛管上昇効果に加えて、固体内の空隙内で部分的に気化を伴う液体燃料の輸送、即ち、空隙が気相と液相からなる不飽和状態である多孔質内の燃料輸送過程を検討する必要がある。最近、これに関係した優れた研究が報告されている。[12, 13]

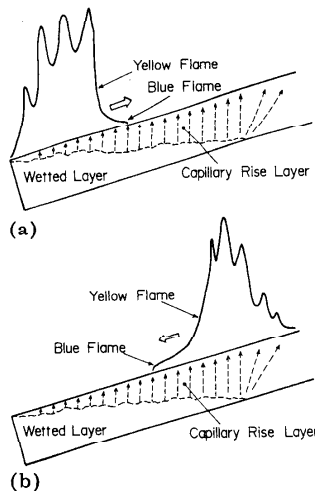


Fig. 4 Schematic diagram of fuel supply by capillary rise effect to beads bed surface during flame spread (a) upward and (b) downward.

Fig. 5は、空隙が比較的大きい傾斜した地面上における火炎の伝播距離と経過時間との関係の典型例である。上方伝播では、火炎から未燃表面への伝熱効果が大きく、始めは火炎の伝播が速い。しかし、加熱された未燃表面への地面内からの燃料供給(一部、気化を伴う)が遅れるために、火炎はしだいに遅くなり、しばしば立ち消える。一方、下方伝播では、始めは地表面への燃料の供給が遅れるために火炎は遅いが、しかし、未燃表面では毛管上昇効果による燃料供給速度が大きく、火炎はしだいに速くなる。上方と下方の火炎伝播におけるこうした違いは、地面内から地表面への燃料の輸送過程の変化(毛管上昇と蒸発)と、その変化の時間的方向が逆であるためである。

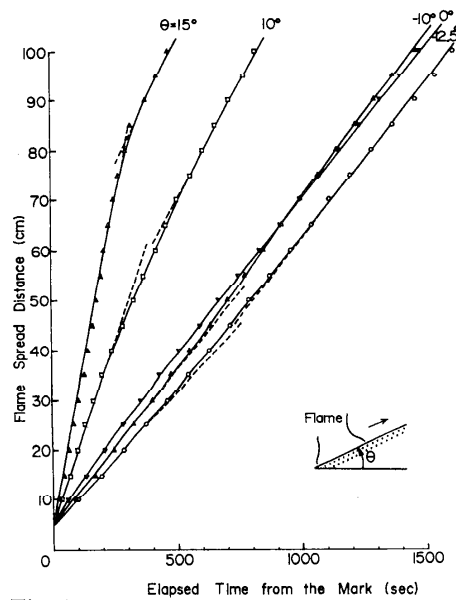


Fig. 5 Relationship between flame spread distance and elapsed time with variation of surface inclination angle; beads bed temperature 25 °C; beads diameter 0.2 mm; fuel n-decane.

また、ガラスビーズ層の表面に金属粉を散布して表面の熱伝導率を大きくすると、表面を伝播する火炎の先端からの伝導熱損失が大きく、火炎伝播速度が低下する。即ち、多孔質固体の表面の熱伝導率の増加は火炎伝播速度を低下させる。[3]

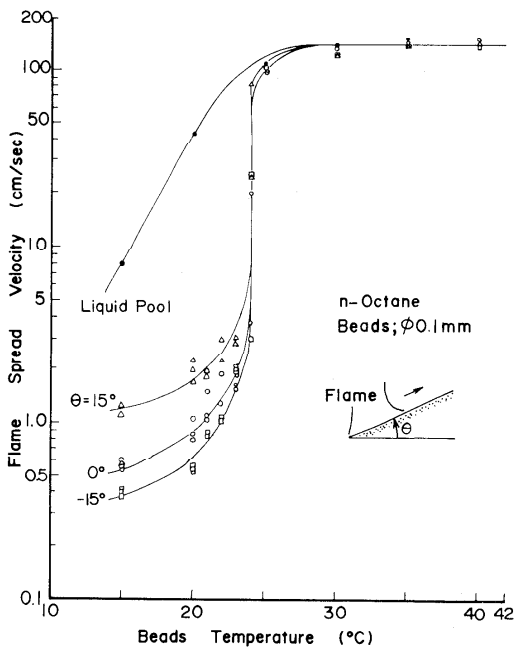
液体燃料が浸潤した多孔質固体の表面に沿った火炎の拡がり現象は、伝熱工学の研究対象の立場から、このように大変に興味深いものである。

2-2: 地面温度が流出燃料の引火温度よりも高い場合 [4]

一方、地面の温度が流出燃料の引火温度よりも高い、即ち、通常の引火性の高い燃料が地面に浸潤した場合には、火炎の拡がり現象はどう変わるであろうか？ 地面上に生成した濃度勾配を有する層状の可燃性混合気の中を火炎が伝播することになり、地面（道路面）の形状、空隙率、傾斜角度、熱伝導率といった因子は、火炎の挙動には殆ど影響を与えず、地面上の気相の条件のみに支配される火炎の伝播現象となることが予測される。[1、2]

しかし、実際はそう単純ではない。液体燃料として **n-Octane** (引火温度  $15^{\circ}\text{C}$ ) を用いた実験の結果は、ガラスビーズ層が燃料の引火温度以上であっても、燃料の化学量論比温度 ( $24^{\circ}\text{C}$ ) よりも僅かに ( $3、4^{\circ}\text{C}$ ) 高温になるまでは、やはり、地面内からの燃料供給速度と火炎の伝播に伴う燃料消費速度との大小関係のバランスが火炎の挙動に大きく影響を与えること、即ち、ビーズ層の温度、空隙率、傾斜角度等が火炎の挙動に大きく影響を与えることを明らかにした。

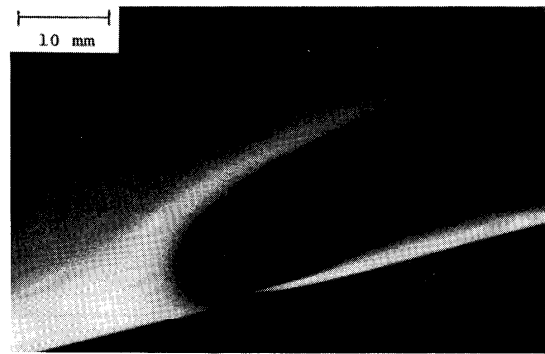
**Fig. 6** は、火炎の伝播速度に対するガラスビーズ層の温度と傾斜角度の影響を示す。ガラスビーズ層の温度が燃料の化学量論比温度 ( $24^{\circ}\text{C}$ ) よりも  $3、4^{\circ}\text{C}$  以上高くなると、もはや気相の条件のみに支配される火炎伝播現象となり、ガラスビーズ層の影響を受けなくなることが分かる。



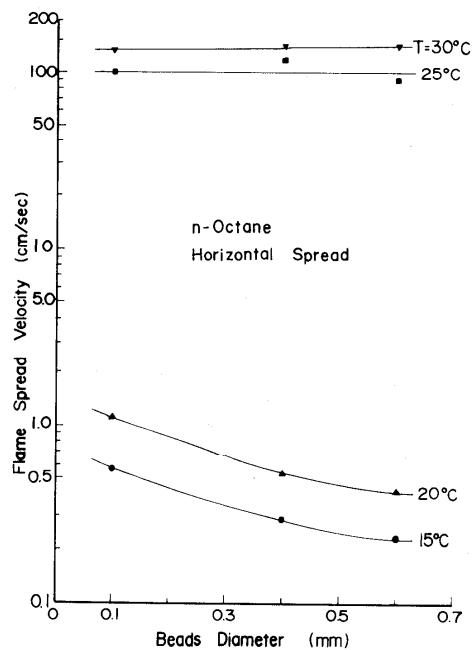
**Fig. 6** Effect of the beads bed temperature on the flame spread velocity; beads diameter 0.1 mm.

**Fig. 7** は、地面上に生成した濃度勾配を有する層状の可燃性混合気の中を、下方に伝播する火炎のシュリーレン写真である。火炎の前方にある層状の可燃性混合気の生成状態が伝播火炎の挙動を支配することを強く示唆している。

**Fig. 8** は、火炎の伝播速度に対するビーズ層の粒径の効果（空隙の大きさの効果）を示す。ビーズ層の温度が引火温度以上であっても、燃料の化学量論比温度 ( $24^{\circ}\text{C}$ ) 以下では、**Fig. 3** の結果と同様に、毛管上昇効果による燃料供給速度が火炎の伝播速度を支配すること、しかし、化学量論比温度よりも十分高くなると、気相の条件に強く支配される火炎伝播現象となり、粒径の影響を受けないことが示されている。



**Fig. 7** Schlieren photograph of downward propagating flame; inclination angle  $15^{\circ}$ , beads bed temperature  $35^{\circ}\text{C}$ , beads diameter 0.1 mm.



**Fig. 8** Effect of the beads diameter on the horizontal flame spread velocity.



実際の道路上の燃料流出事故に伴う火炎の伝播が2次元であることから、これまでの一方向火炎伝播の研究成果を踏まえて、さらに、軸対象の自由な火炎伝播についても研究された。[7]

Fig. 9は、n-Decaneの浸潤したガラスビーズ層(20°C)の表面上における軸対象の自由火炎伝播の直接写真である。

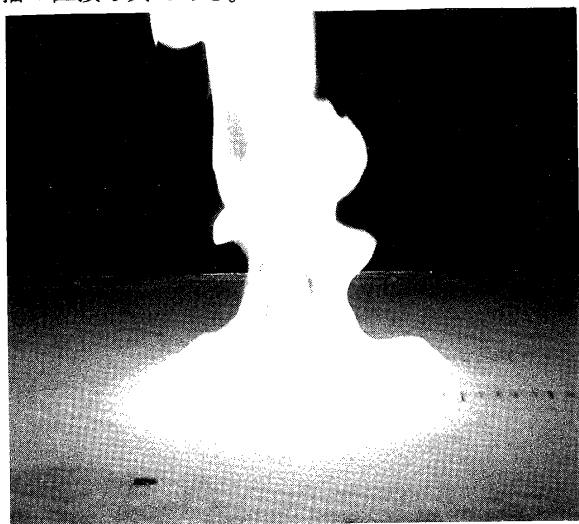


Fig. 9 : Direct Photographs of Free Spreading Flame. Beads Diameter; 0.1 mm

Fig. 10は、火炎の基部の直径の時間変化をしめす。着火後の初期段階では、火炎の半径方向の拡がり速度は、加速性があることがわかる。しかし、火炎柱が大きく発達した場合における火炎基部の拡がり速度については、未だに研究例がない。

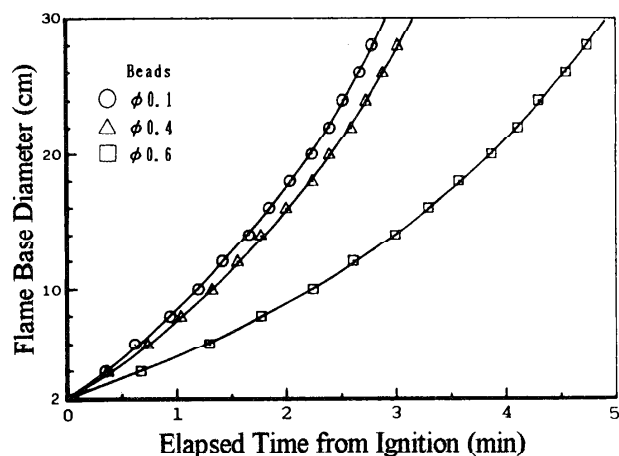


Fig. 10 : Flame Base Diameter as a function of Elapsed Time

Fig. 11は、可視化実験により得られた、発達する火炎柱の周囲の気流の様子を示す。火炎柱が発達するにつれて、浮力の効果が大きくなり、さらに周囲の気体の entrainment も促進されるために、火炎柱は気体力学的に不安定となり、大きく振動を開始する。

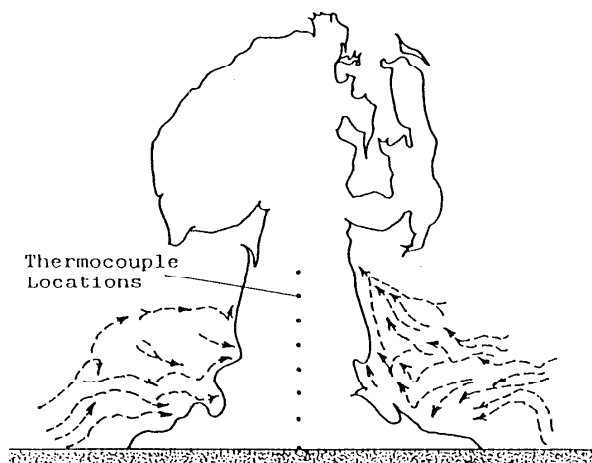


Fig. 11 Visualized Flow Pattern of Flame Induced Convection around Flame Pillar.

Fig. 12と Fig. 13は、それぞれ、発達する火炎基部の直径と高さの比の変化、また、火炎柱の発達に伴う火炎の高さの振動数の変化を示す。実験式が示すように、火炎柱の発達に伴って変化する火炎の平均的な高さや、火炎の高さの振動数は、しだいに火炎基部の直径によってほぼ決まる一定値に近づく。これらは、より大きな火炎についても確認されており、また、フルード数を考慮した理論的検討でもこれらと同様な関係式が得られている。

これらの現象は、燃料タンクの火災や液面燃焼、即ち、一般のプール火災に共通することであり、火炎柱の周囲における防災の観点から、重要な研究課題であるために、古くから多くの研究例がある。今日では、プール火炎の基部の安定化機構や火炎柱内部の熱的・化学的構造、火炎柱からの熱放射の特性等について、特にアメリカと日本の火災研究者達により、詳細な研究が進行中である。

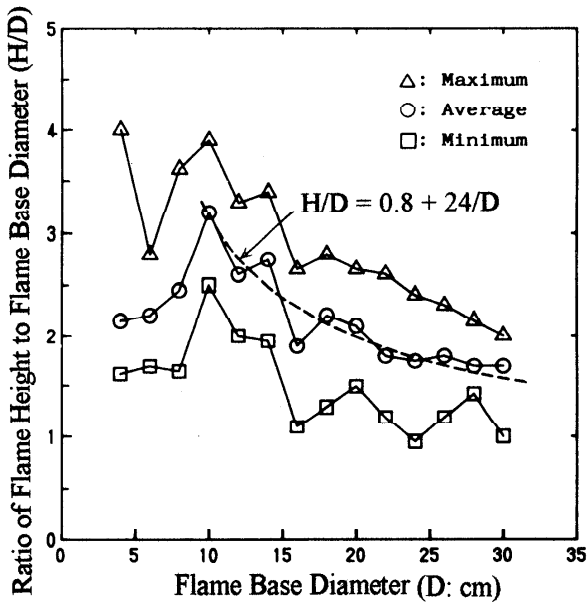


Fig. 12 : Ratio of Luminous Flame Height to Flame base Diameter (H/D) as a function of (D)

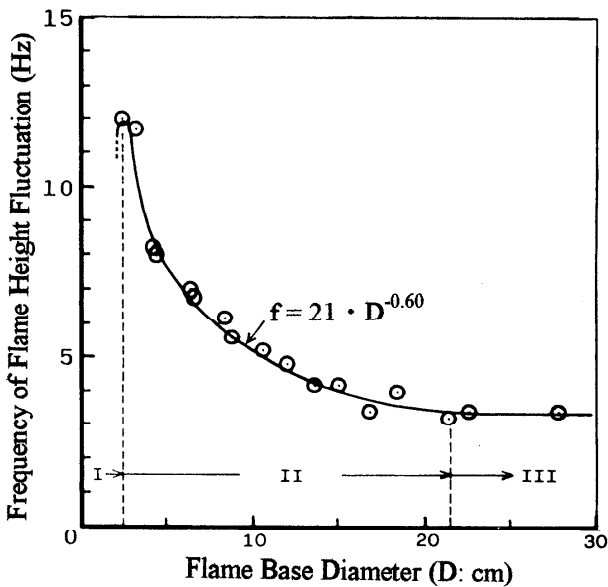


Fig. 13 : Frequency of Flame Height Fluctuation (f:Hz) as a function of Flame Base Diameter (D:cm)

今日、さまざまな利点のために、排水性のアスファルト舗装道路の建設が広がっている。そのような道路における、燃料流出後の火炎の拡がり現象、またさらに、燃料が流出した雪に覆われたアスファルト道路上における火炎の拡がり現象も研究された。[10、11]

Fig. 14 は、燃料が流出した排水性のアスファルト舗装道路上における火炎の拡がり現象をまとめたものである。燃料の引火温度が道路面温度よりも高い場合には、熱損失と路面への燃料供給の遅れにより、仮に着火が起きたとしても、火炎はすぐに消える。道路の内部の空隙が大きく、毛細管上昇による燃料の輸送ができないためである。一方、燃料の引火温度が道路面温度よりも低い場合には、燃料流出領域に生成した層状の可燃性混合気中を火炎が伝播し、燃料流出領域の全域が火炎に覆われるが、それは長続きせず、道路面の空隙から発生する燃料ガスの着火が間欠的に続くのみであり、火炎が燃料流出領域以外へ拡がることはない。空隙が大きく、毛細管上昇効果による燃料輸送ができない場合の多孔質固体の表面における燃焼の機構は興味深い研究課題である。

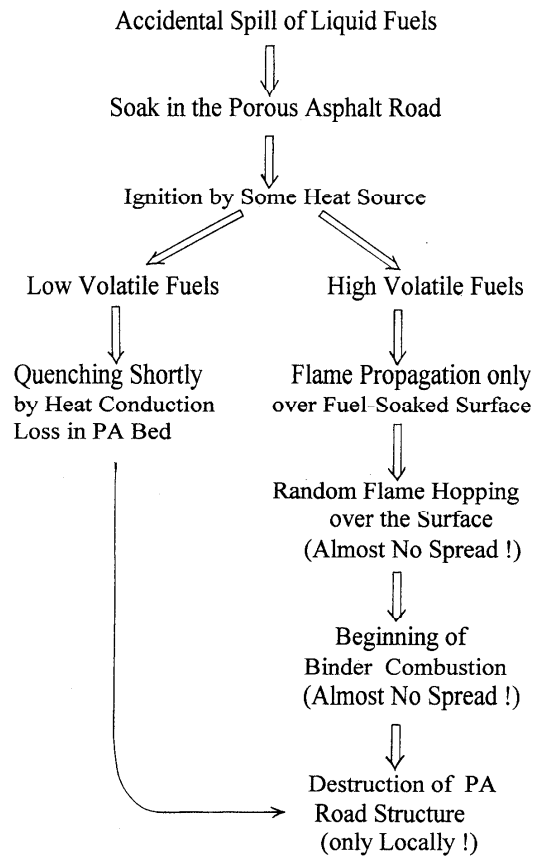


Fig. 14 : Summarized Process of Flame Behavior on the Fuel-Soaked Porous Asphalt Road.

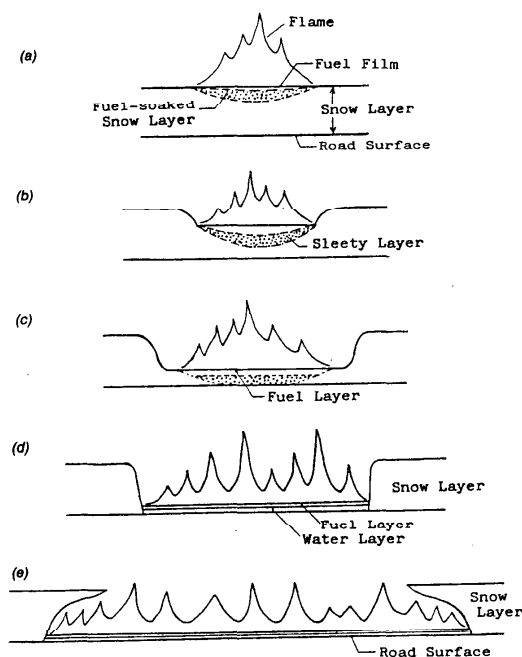


Fig. 15 : Schematic Illustration of Flame on the Fuel-Soaked Snow Layer on the Road.

Fig. 15 は、ガソリンが流出し吸収された雪道における、火炎の拡がりの様子の模式図である。燃料を吸収したシャーベット状の雪の上で燃焼が続くが、燃料の流出量が少ない場合には、(b)の段階で、火炎が立ち消えする。シャーベット状の雪の層の中から水とは混じらないガソリンがどのような機構で表面に輸送されてくるのかは、全く研究例がなく、未知である。また、雪道における(d)以後の火炎の拡がり機構の研究も始まったばかりであり、現在、その詳細は未知である。これらは、火炎からの複雑な伝熱形式と周囲の融雪の機構を含む輸送現象の興味深い研究課題である。[10、11]

### 3. 今後の課題

主に日本人研究者により本格的に開始された、液体燃料が浸潤した地面上における火炎の拡がり現象の研究により、今日までに、その現象を支配する多くの重要な因子が明らかにされて来た。

しかし、今までの研究成果をもとに、道路火災の防止、あるいは、それによる被害を最小限に留めるために、それでは道路やその周辺環境にどのような現実的な対策が必要であろうか、と改めて問い直してみると、依然として大きな課題が横たわっている

ことを痛感させられる。

即ち、今までの研究は殆ど全て、実験室における比較的小規模な現象を対象としており、スケール効果の研究が全く遅れていることが分かる。スケール効果の検討を欠いた火災の研究など、文字通り、画龍点睛を欠くものであろう。トンネル道路内における燃料流出事故による火災に至っては、日本では、今日でも基礎研究さえ十分とは言えない。1994年10月、スウェーデンのボロスで開かれたトンネル火災の国際会議のプログラムの内容は、ユーロトンネルと同様な長大な海底トンネルを有するこの日本にも、そうした基礎研究の重要性を強く訴えているといえよう。

阪神大震災は、Fire Induced Flow、即ち、火災旋風の威力がいかに巨大であるかを、見事に教えてくれた。筆者自身の僅かな体験でも、アスファルト道路上にガソリンが流出し、拡がった後に着火した場合の火炎の規模と勢いは、想像を遥かに越える恐ろしいものであった。こうした事実の前に立つと、箱庭のようなモデル実験における小さな火炎のみによる研究からの結論では、火災現象の研究としては、いかにも心許ないことを知らされる。

今後の研究課題の焦点は、特に防災の観点に立つならば、先ず第一に、こうしたスケール効果を考慮した道路上の火炎の挙動と、それに影響を与える、熱と流れを中心とする輸送現象を解明することであろう。幸いに、計算機の性能の最近の著しい向上と、今日の計算機科学の目覚ましい進歩は、世界の火災研究者にも一層の勇気を与えている。

### 4. 結言

約10年前から、筆者を含めた主に日本人研究者により本格的に開始された、液体燃料が浸潤した多孔質の地面上における火炎の拡がり現象の研究を Review してきた。現象を支配する多くの重要な因子が、今日、少しずつ明らかにされて来てはいるが、その現象に対するスケール効果の研究は未だに全く遅れていると言わなければならない。その打開のためには、火災現象の研究への、熱と流れを含む輸送現象の解明を専門とする伝熱工学研究者のより多くの参入によるチームワークが不可欠であることを、ここに改めて強調したい。

火災現象も、燃焼現象である以上、熱と流れと、化学反応を伴う物質移動の、典型的な複合現象であ

る。アメリカの火災研究者の中には、気体力学や伝熱工学の研究者から転身した者が少なくない。一方、この日本では、そうした例がまだまだ少ない。国内外の火災関係の学会に出席する度に、日本における火災研究の中で、熱と流れと物質移動を含む輸送現象の解明を得意とする伝熱工学研究者と火災研究者とが、もっともっと固いスクラムを組んだならば、どんなにより素晴らしく、より大きく日本の火災研究が進展することか、と痛感する。また、それは、日本における伝熱工学の学問分野と、その研究者自身にとっても、研究の視野の一層の拡大をもたらすに違いない。

伝熱学会は、燃焼学会の2倍以上、火災学会の4倍以上の大きな会員数を擁する。燃焼現象、火災現象に直接関する日本人研究者の一人として、伝熱工学の研究者諸兄の火災研究への積極的な、より多くの参入を期待したい。

## 5. 参考文献

- (1) M. Kaptein and C.E. Hermance: Horizontal Propagation of Laminar Flames Through Vertically Diffusing Mixtures Above a Ground Plane, Proc. 16th Symp. on Combustion (International), The Combustion Institute, Pittsburgh, PA, p.1295-, (1976)
- (2) M.J. Murphy: Flame Spread Rates Over Methanol Fuel Spills: Combustion Science and Technology, vol.42, p.223-, (1985)
- (3) H. Ishida: Flame Spread over Fuel-Soaked Ground, Fire Safety Journal, vol.10, p.163-, (1986)
- (4) H. Ishida: Flame Spread over Ground Soaked with Highly Volatile Liquid Fuel, Fire Safety Journal, vol.13, p.115-, (1988)
- (5) K.Takeno and T.Hirano: Behavior of Combustible Liquid Soaked in Porous Beds during Flame Spread, Proc. 22nd Symp. on Combustion (International), The Combustion Institute, Pittsburgh, PA, p.1223-, (1988)
- (6) T. Suzuki et al.: Flame Spread over Fuel-Soaked Sand in an Opposed Air Stream, Proc. of the Second International Symp. on Fire Safety Science, p.199-, (1989)
- (7) H. Ishida: Initiation of Fire Growth on Fuel-Soaked Ground, Fire Safety Journal, vol.18, p.213-, (1992)
- (8) T. Suzuki et al.: Behavior of the Reverse Flow in Front of the Leading Flame Edge Spreading over Fuel-Soaked Sand in an Air Stream, Proc. of the Third International Symp. on Fire Safety Science, p.227-, (1992)
- (9) 田中昭人 他: 気流に対向して燃え広がる火炎の先端付近の流れの詳細、第32回燃焼シンポジウム講演論文集、p.319-, (1994)
- (10) 石田博樹 他: 液体燃料が流出した排水性舗装道路上の火炎の拡がり現象、第2回ポーラスアスファルト研究会論文集、(1995)
- (11) H. Ishida et al.: Flame Spread over Fuel-Spilled and/or Snow-Covered Asphalt Road, Journal of Fire Sciences, vol.14, p.50-, (1996)
- (12) 赤堀 他: 不飽和粒子層内に置かれた加熱平板上の気流熱伝達、第33回日本伝熱シンポジウム講演論文集、p.665-, (1996)
- (13) 青木 他: マイクロ波加熱による粒子層の乾燥、第33回日本伝熱シンポジウム講演論文集、p.129-, (1996)

## 強風下の市街地大火における 火災気流に関する風洞実験

*Wind Tunnel Test of Fire Gas Flow of Big Fire  
in Urban Area under Strong Wind*

佐賀 武司 (東北工業大学)

Takeshi SAGA (Tohoku Institute of Technology)

### 1. はじめに

強風下における大火発生の危険性や大地震時における同時多発火災の危険性が日本各地の市街地に潜在している。大火時の延焼防止と避難空間等の都市の防災施設の安全性向上のために、ソフト・ハードの両面からの防災対策の検討が必要であると考ええる。

阪神・淡路大震災では、防災面からみた都市のあり方とともに、避難収容施設と災害時の初期対応（防災活動と防災情報等）の重要性があらためて指摘されたところである。現在、都市では災害に備え市街地の各所に避難場所の指定を行なっている。避難場所が災害時に真に有効であるのか、避難場所のハード面からの安全性と住民の避難移動の観点からのソフト面の検討<sup>1, 2)</sup>が、あらためて震災の教訓として求められている。また、震災復興の都市計画には災害に強いまちづくりとともに、火災火流からの防御方法<sup>3, 4)</sup>等のハード面の検討が都市空間の基本構造の形成の上に重要となってきたと考える。

この火災火流からの防御方法の検討のためには都市大火の火流の性状について基礎的な知見を得る必要がある。このために大規模な実験<sup>5)</sup>も行われてきているが、実際のところ実験条件も限定される上に測定にも困難がともない、検討のためのデータは限られたものとなっている。今後もこの種の実験を実施していくことは大切であるが、他方では市街地大火の火災流を模型実験や数値実験によって再現し検討することも必要であると考ええる。

本稿は地域模型を用いた燃焼実験や数値実験によって市街地火災を再現し、火災気流に関する基礎的な知見を得る目的で行なわれた既往の研究を紹介するとともに、筆者が行なっている市街地火災を風洞実験によって再現する基礎的な試みについて記述するものである。

最初に、本稿では強風下における火災を考察して、火災気流の解析における火災家屋ならびに火災域等の熱発生源のモデルについて述べる。次に火災域のモデルとしての線状・帯状熱源からの熱気流の温度

分布等の解析についてとり挙げる。最後に、風洞実験によって市街地火災を再現するための相似則とともに、延焼遮断帯の効果に関する検討例を記述する。

### 2. 市街地大火時における炎上地区と実験モデル

#### 2.1 市街地大火の延焼要因と強風下の火災気流

大火災にいたる火災の拡大を隣接建物への延焼要因<sup>6)</sup>から見ると、火災発生の初期は火災家屋の窓等の開口部から火災が噴出し、この火災からの放射熱によって隣接建物が受熱、あるいは火災や熱気流が直接建物の外壁等に接触して延焼することが一般的である。

このように隣接建物への火災の熱的影響は放射型加熱か、火の粉の飛散も伴った火炎流や熱気流による対流型加熱によって及ぶが、火災の拡大に伴い隣接建物の防火力が不足し、あるいは隣棟間隔が狭ければ簡単に延焼することになる。風がない場合は放射型加熱が卓越することになるが、これを主因とする延焼は防火的に無処理の、即ち裸木造の建物火災に見られた。近年大規模な裸木造建物についてはRC造化が進み、防火的建物が多くなってきており、火災となっても火災が巨大な放射面となるような単体の建物は少なくなってきている。従って、この型の延焼は少なくなってきたと言える。

強風下の火災では放射型加熱と対流型加熱による延焼が同時に起こると考えられる。一般に住・商業地区では中低層建物が混在していることもあり風の流れは複雑である。現在の市街地の風環境を考えると建物外壁の防火力は向上しつつあるものの、隣棟間隔は狭いので対流型加熱の影響を受け易く、延焼の危険性は低減していないと考えられる。

もし強風下で延焼火災となり、消防の機会を失うことになるなら、短時間に数棟の建物へ同時に延焼し、風下からの消火は火炎流や熱気流に、あるいは煙に阻まれ不能となるから、火炎流と火の粉の飛散を主因とする延焼火災となり、容易に大火の様相を呈する大火災となるものと推測される。

1976年、酒田市では22.5haの住・商業地域(風向きに直交した幅約230~340m、風下へ長さ約860mのほぼ長方形の地域)が焼失するという大火が発生した。強風下の密集地域で大規模な木造建物が火元であった上に、中低層建物が混在する地域の風環境が火災気流と延焼の方向を複雑にし、消防活動を困難にしたことも火災の進行過程の中に見いだされる。<sup>7)</sup>

日本の各都市では建物の不燃化が進み、非常に防火的な町になってきて大火発生危険がなくなったという声がある。だが強風下の火災発生や大地震時の同時多発性火災では今なお消防力を越える火災延焼が予測される。環境の変化に対応した大火発生防止のための都市構造に関する検討はなお続けられる必要がある。

## 2.2 火災延焼の前線と同時炎上地区

大火の延焼動態図をみると風下に向かって延焼が早く、風横側、風上側の順に遅くなっていて、一般に同時刻の火災延焼の前線は卵型の曲線をなして風横に幅を広げながら燃え広がっていく。この燃え広がり示す延焼速度に関する研究は浜田<sup>8)</sup>、堀内<sup>9)</sup>によってなされ、地域の建物などの構成を平均化して、正方形( $a \times a$ )の平面形を有する建物が均等な隣棟間隔( $d$ )で配置された市街地モデルを仮定し、延焼速度・距離や延焼面積の算定式を示している。

ここで、大火の延焼動態図や算定式などで示される延焼の前線に注目して、大火の炎上地区の一般的な延焼パターンを考える。

強風下で延焼火災に発展すると、比較的短時間に風横側にも延焼が起こり、風下に燃え広がりながら扇状に拡大していく。風下に延焼の前線が大きく広がると風下に面して火災が長く林立して、その風下に流れる火災流の幅 $L_y$ は非常に大きくなる。風横側から見ると、風下方向にかなりの幅 $D$ にわたって同時に炎上している家屋群があって、延焼が進むに従い炎上地区が風下に移動し、風上に残炎地区が広がっていくと推察される。炎上地区からの火災や熱気流は風に吹き倒されて風下地区の家屋の屋根上や路上を流れて、主として対流型加熱によって風下地区に燃え広がっていくと考えられる。

## 2.3 大火時の火災気流に関する実験モデルの仮定

強風下の火災が大火の様相を呈してきて、同時炎上地区は風下方向( $x$ 軸方向)に幅 $D$ をもって延焼の前線(火先線)を広げ、幅 $L_y$ (風向きに直角方向を $y$ 軸とする)の火災流となって風下方向に流れている場合を考える。

延焼の前線は風横方向に大きく広がると、火災流の幅 $L_y$ は炎上地区の風下方向の幅 $D$ に比べ、かなり大きくなると考えられる。

この延焼の前線は風下に凸状の曲線を成しているが、 $L_y$ が大きいので近似的に直線とみなすと、風向きに直交して長辺寸法 $L_y$ で風下方向に短辺寸法 $D$ をとる長方形の炎上地区が仮定される。さらに、 $L_y$ が非常に大きくなって、無限に長い帯状の炎上地区とみなされ、火災の温度分布等が $y$ 方向に大きく変化しないとすれば、この現象は近似的に2次元問題として扱えることになる。

以上のように、この問題の簡易な検討を考慮して延焼パターンを考察すると、大火の同時炎上地区は風下方向に幅 $D$ で風向きに直交する長い帯状の領域と仮定された。大火に関する解析や風洞実験では、この帯状の火災燃焼の領域について、無限線状熱源、あるいは帯状熱源として置き換え、火災気流を2次元的に扱う場合の熱源モデルとしている。

## 3. 風の中の線状熱源からの熱気流の温度分布

有風時の市街地火災についての本格的な研究は概ね1950年代以降となっている。火災気流に関する研究では、火災家屋や火災域を線状熱源と仮定して幾多の研究成果が出されている。

強風時の市街地の大火災における火流の性情に関しては藤田金一郎博士の研究がある。藤田の研究方法は、炎上する家屋から発生する熱が市街地の乱れた風によって拡散されつつ風下に運ばれていくとし風下の熱量分布を求め、さらに、強風下の火災で数棟の建物が同時に炎上することを想定して延焼安全限界距離等を検討している。<sup>10) 11)</sup>このときの研究は1963年以降の同氏の「都市大火対策の理論体系に関する研究」<sup>3)</sup>につながり、一つの火災気流論の体系をなしている。

### 3.1 横井による温度分布式の誘導

前述の藤田の考え方を基本として、風の吹く場に無限線熱源を仮定し拡散方程式を考察して、熱気流の温度分布式を求めたのが横井の論文<sup>12)</sup>である。これは大火時の同時炎上区域を地面上に無限に延びた直線とし、風は風速 $u$ (m/s)の強さでこの線に直角に吹いているものと仮定するものである。

拡散方程式については、熱の渦動拡散係数 $K_x$ 、 $K_z$ は、風が余り弱くなければ $x$ 方向に熱が拡散される速度は風速 $u$ によって運ばれる速度に比べて小さいから、 $K_x$ を無視して $K_z$ を $K$ とし、かつ定常状態を

考え、 $u, K$ を定数として解くべき式を次式とした。

$$u \frac{\partial \theta}{\partial x} + w \frac{\partial \theta}{\partial z} = K \frac{\partial^2 \theta}{\partial z^2} \quad (1)$$

ここに、 $\theta$ ：熱気流の温度上昇値。 $w$ ：熱気流の鉛直方向速度。 $K$ ： $z$ 方向の熱拡散係数  
解法等は省略するが、風下温度分布式として次式を与えている。

$$\theta = \frac{Q_0}{C_p \rho \sqrt{\pi K u x}} \frac{1}{1 + \Phi(X)} \cdot \exp \left\{ -\frac{u}{4Kx} \left( z - \frac{w}{u} x \right)^2 \right\} \quad (2)$$

$$\text{ただし } \Phi(X) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^X \exp(-\lambda^2) d\lambda$$

$$X = (w/2) \sqrt{x/Ku}$$

$$Q_0 = \int_0^\infty C_p \rho \theta u dz$$

ここに、 $Q_0$ は火線の風下 $x$ の距離において $yz$ 面に平行な鉛直面内で $y$ 方向の単位幅を単位時間に通過する全熱量。 $C_p, \rho$ は熱気流の比熱、密度である。

横井はこの理論式の検証にあたり、海岸において、杉薪を燃料とした細長い熱源(海風方向に直角に、長さ約4m、幅0.5m)を設け無限線状熱源の代用とした実験を実施している。実験結果は、式(2)に実験値をあてはめて $K$ と $Q$ を検討し、火線の長さが短すぎて実験は不十分であったが $K=800\text{cm}^2/\text{sec}$ を得ている。

### 3.2 P.H.Thomasによる熱気流の次元解析

直接に火災の研究を目的にしたものではないが、火災気流の問題に基本的関係を与える検討として注目されるP.H.ThomasやA.O.Rankine等の研究がある。

この研究は、英国で戦争中の1943~1944年に、飛行場の滑走路上の霧を人口的に消滅させる目的で行われたもので、滑走路上に平行して線状の熱源を作り、その熱で路上高さ 約30mの範囲までの霧を散らす可能性について検討するものであった。

Rankine<sup>13)</sup>は風洞の中でブタンのバーナーを水平に、風向きに直角方向へ線状に配置して、風速やブタンの燃焼速度を色々変えた場合について風下温度分布を測定し、実験結果を実大の場合に役立てた。

またThomas<sup>14)</sup>は、この風洞実験のデータをもとにして、線状熱源からの熱気流について次に述べる解析によって風下温度の関係式を明らかにしている。

Thomasは「1)温度上昇値は小さいので、熱気流内の密度の違いは無視する。2)熱気流の乱れのスケールと強さは熱的安定度によって主として決まり、地面の摩擦は余り影響しない。3)熱気流内での粘性力は

無視する。」と仮定して次式を与えている。

$$U_0 \frac{\partial \theta}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial z} \left\{ \frac{K}{C_p \rho} \frac{\partial \theta}{\partial z} \right\} \quad (3)$$

ここに、 $U_0$ は風洞内の一般風速、 $\theta$ は温度上昇値。 $C_p, \rho$ は熱気流の比熱、密度。 $K$ は拡散係数。 $K$ は、混合距離 $l \sim x(\tan \alpha)^p$ と浮力の影響を考慮して次の2式を与えている。

$$K_1 / (C_p \rho) = c_1 x (\tan \alpha)^p \cdot (g \theta x \tan \alpha / T_0)^{1/2} \quad (4)$$

$$K_2 / (C_p \rho) = c_2 x (\tan \alpha)^p \cdot [ \{ g(x \tan \alpha)^2 / T_0 \} | \partial \theta / \partial z | ]^{1/2} \quad (5)$$

ここに、 $g$ は重力加速度、 $T_0$ は風の絶対温度  
熱気流は地表面より上方に拡散角 $\alpha$ で $x \tan \alpha$ の幅 $b_x$ で拡散する温度分布を仮定して解いている。  
解法は省略するが、式中で、次の流速に関する無次元数 $\Omega$ 、温度に関する無次元数 $\Phi$ を定義している。

$$\Omega = U_0 / (Qg / C_p \rho T_0)^{1/3} \quad (6)$$

$$\Phi = \Delta \theta \cdot x / (Q^2 T_0 / C_p^2 \rho^2 g)^{1/3} \quad (7)$$

Thomasが示した無次元数による温度分布式を整理して表すと次のようになる。

$$\Phi = C_1 \cdot \Omega^{-a} \cdot F\{\eta\} \quad (8)$$

$$\text{ただし、} \eta = z / b_x = C_2 \cdot (z/x) \Omega^b$$

$$a = (2p-1)/(2p-4), \quad b = -3/(2p-4)$$

式(6)を用いた場合は

$$C_1 = (15/8)(30c_1^2)^{-1/(4-2p)}$$

$$C_2 = (30c_1^2)^{-1/(4-2p)}$$

$$F\{\eta\} = (1 - \eta^2)^2$$

また、式(7)を用いた場合は

$$C_1 = (312/125)(312c_2^2)^{-1/(4-2p)}$$

$$C_2 = (312c_2^2)^{-1/(4-2p)}$$

$$F\{\eta\} = (1 - \eta^{3/5})^3$$

この温度分布式は主軸線が地表面にあつて風下上方に拡散しながら温度が低下することを表している。だが、実際には主軸線が地表面より風下上方に上昇する。そこでThomasは、式中の $a, b$ が $p$ に無関係に $a + b = 1$ の関係で、また混合距離 $l$ が $x$ に比例するなら $p=0$ であるとして、上式を拡張して線状熱源の風下温度の鉛直分布を表す一般関係式として次式を示している。

$$\Phi = C \cdot \Omega^{-a} \cdot F\{(z/x)\Omega^b\} \quad (9)$$

$$a = 1/4, \quad b = 3/4, \quad a + b = 1$$

$F\{\}$ は関数形

### 3.3 Rankineと横井の風洞実験による検証

Rankineは、前述した風洞での燃焼実験のデータに

ついて式(9)を適用した結果、 $a=1/4$ 、 $b=3/4$ より  $a=-0.14$ 、 $b=3/4$ とした方が測定値の散らばりが少なくなると述べている。一方、これに関連する国内の研究として横井<sup>15)</sup>は風洞の中に線状の鉄製容器(幅1cm、高さ3cm、長さ85cm)の長辺を風向きに対して直角に設置し、これにメタノールを入れ燃焼させ線状熱源とする実験を実施した。横井は風下温度はThomasの式(9)で表されるとし、主軸温度と主軸位置の関係は次のようになるとしている。

$$\Phi_M \Omega^{1/4} \approx 2.0, \quad (z/x) \Omega^{3/4} \approx 0.1 \quad (10)$$

$$\text{ただし、} \Omega = U_o / (Qg / C_p \rho T_o)^{1/3}$$

$$\Phi_M = \Delta\theta_M x / (Q^2 T_o / C_p^2 \rho^2 g)^{1/3}$$

$\Delta\theta_M$ は任意位置 $x$ における主軸温度

これより、主軸温度 $\Delta\theta_M$ と主軸位置 $z_M$ は

$$\Delta\theta_M = (2/x) (Q^3 T_o / C_p^3 \rho^3 g U_o)^{1/4} \quad (11)$$

$$z_M = (x/10) (Qg / C_p \rho T_o U_o^3)^{1/4} \quad (12)$$

で表され、主軸線が水平面となす傾き角 $\alpha$ は

$$\tan \alpha = 0.1 (Qg / C_p \rho T_o U_o^3)^{1/4} \quad (13)$$

となる。Rankineと横井の実験の相違は、風の乱れなどの風速条件や、熱源並びにその設置状況等の相違が影響していると考えられるが、風速(無次元風速 $\Omega$ )が大きくなると、Rankine実験では無次元温度 $\Phi$ が大きくなり、横井実験では小さくなっていることが異なっている。

#### 4. 風の中の帯状熱源からの熱気流の温度分布

前章の研究は、風のある場に線状熱源を仮定し、理論的に熱気流の温度分布の関係式を得、実験的に熱気流の一般的特性を明らかにするものであった。これらの検討は式の適用を考慮して熱源付近を除く燃焼の影響の少ない領域に限られ、熱源の形状等について考慮されていなかった。そこで筆者は前述の研究と同様に、熱気流の流れを2次元的に考えるが熱源の奥行幅 $D$ (帯幅)の寸法効果を考慮するということから線状熱源に対して帯状熱源とし、この熱源からの熱気流の関係式は簡易な仮定のもとに、現象に支配的な物理法則を考察しながら基本式の誘導を試み温度分布式等を得た。<sup>16, 17)</sup>

##### 4.1 熱気流の温度分布の関係式の誘導

###### (1) 基本式

次の式(14)~(16)は強風によって拡散する熱気流について流体の基本則を考察して表したものである。

式(14)は強風の場合は熱気流の流速の水平成分は風の流速と同程度とみて、熱気流の流量変化は風と熱気流との境界面で生じる巻込み空気量によるとし

て表した質量収支式である。式(15)は熱気流の $z$ 方向への運動量の寄与を考慮して、運動量の変化と浮力とのつりあいから運動量保存を表したもので、熱気流の密度差は主軸値(熱気流の主軸値に関するものは添字 $M$ をつける)にかえて表している。また、式(16)は熱気流の熱量収支式を変形し、浮力 $\times$ 流速=一定の形でエネルギー保存を表したものである。

$$U [db/dx] = \alpha w \quad (14)$$

$$U [d(bw)/dx] = I (\Delta\rho_M g b / \rho_M) \quad (15)$$

$$IU (\Delta\rho_M g b / \rho_M) = F (\text{一定}) \quad (16)$$

ここに、 $U$ ; 熱源上に吹いてくる風の流速と熱気流の水平方向の速度成分を代表する。 $w$ ; 熱気流の鉛直方向の速度成分。 $b$ ; 熱気流の拡散幅。 $g$ ; 重力加速度。 $\alpha$ ; 熱気流への巻込み空気流に対する連行係数。 $I$ ; 熱気流の温度分布に関する連行係数。 $\Delta\rho_M$ ; 熱気流外の風の密度 $\rho$ と熱気流の主軸線上の密度 $\rho_M$ との差。 $Q_o$ ; 熱気流が単位時間に単位幅当たりを持ち運ぶ熱量 $\propto Q$ (帯状熱源における発生熱量)。 $C_p, \rho$ ; 熱気流の定圧比熱、密度。 $T_o$ ; 風の絶対温度。

この基本式を解くにあたって実際の熱源位置と異なった場所に仮想熱源( $x_o, z_o$ )を想定する。これにより解析にあたって仮定が成立しない領域の影響については仮想熱源の取り扱いの中に入れて考える。

$w, b$ は、仮想熱源 $x = x_o$ で $b = 0$ として解くと、

$$w = (F/U^2) (x - x_o) / b \quad (17)$$

$$b = \alpha^{1/2} (F/U^3)^{1/2} (x - x_o) \quad (18)$$

また、式(17)は式(18)により

$$w/U = \alpha^{-1/2} (F/U^3)^{1/2} \quad (19)$$

で表される。ここで式(16)の $F$ については熱源を代表する値を用いて定義するために、左辺との対応を考え、火災の温度上昇値 $\Delta\theta_H$ 、火災の上昇速度 $W_z$ 、並びに火災の拡散に比例するものとして、火災の上昇高さ $L_z$ を選び、次の無次元数による式で表す。ただし、 $I_H$ は火災の温度分布に関する連行係数。

$$\begin{aligned} F/U^3 &= I [( \Delta\theta_H g b / T_o ) / U^2] \\ &= I_H \cdot v_z \cdot l_z \cdot F_{ru}^{-2} \\ &= I_H \cdot v_z^3 \cdot l_z \cdot F_{rw}^{-2} \end{aligned} \quad (20)$$

ただし、 $v_z = W_z / U$ 、 $l_z = L_z / D$

$$F_{ru} = U / (g \Delta\theta_H D / T_o)^{1/2} \quad (21)$$

$$F_{rw} = W_z / (g \Delta\theta_H D / T_o)^{1/2}$$

ここに、流速比 $v_z$ 、火災高さ比 $l_z$ と $F_{ru}, F_{rw}$ の内部フルード数の無次元数を定義する。

式(18)(20)より、熱気流の拡散幅に関する式は

$$b = C_b \cdot v_z^{1/2} \cdot l_z^{1/2} \cdot F_{ru}^{-1} \cdot (x - x_o)$$



$$=C_b \cdot v_z^{3/2} \cdot l_z^{1/2} \cdot Fr_w^{-1} \cdot (x-x_o) \quad (22)$$

ただし、 $C_b = (\alpha/I_H)^{1/2}$ に相当する係数。

式(20)(22)より、熱気流の主軸温度に関する式は

$$\begin{aligned} \Delta\theta_M/\Delta\theta_H &= C \cdot v_z^{1/2} \cdot l_z^{1/2} \cdot Fr_u \\ &\cdot \{(x-x_o)/D\}^{-1} \\ &= C \cdot v_z^{-1/2} \cdot l_z^{1/2} \cdot Fr_w \\ &\cdot \{(x-x_o)/D\}^{-1} \quad (23) \end{aligned}$$

ただし、 $C = (I_H^{1/2}/I)\alpha^{-1/2}$ に相当する係数。

熱気流の主軸傾き角 $\beta$ については、式(23)から

$\Delta\theta_M \doteq \Delta\theta_H$ のとき  $(x-x_o)/D = L_x/D = l_x$ として、この位置における主軸線の高さを近似的に火炎の上昇高さ比 $l_z$ に等しいとおき次式で表す。

$$\begin{aligned} \tan\beta &= l_z/l_x \\ &= C_t \cdot v_z^{-1/2} \cdot l_z^{1/2} \cdot Fr_u^{-1} \\ &= C_t \cdot v_z^{1/2} \cdot l_z^{1/2} \cdot Fr_w^{-1} \quad (24) \end{aligned}$$

ただし、 $C_t = \alpha, I, I_H$ からなる係数

以上の各式中には、 $v_z, l_z$ などの燃焼域における値が含まれているので、次項ではこれらの値と風速の関係を明らかにする。

## (2) 火炎のスケールに関する考察

### (a) 燃焼域の関係式について

燃焼域では、温度 $\Delta\theta_H$ 、流速 $W_H$ とし、火炎先端部では、温度 $\Delta\theta_L$ 、流速 $W_L$ (火炎軸方向流速 $W_A$ 、 $x, z$ 方向流速 $W_x, W_z$ として各流速を代表する)、火炎の長さ $L$ (熱源より火炎先端部までの距離 $L_A$ 、火炎先端部までの水平、鉛直距離 $L_x, L_z$ を代表する)とし、前章でThomasが示した風速に関する無次元数と同様の $\Omega$ を定義して次式の関係におく。

$$Fr_w = \frac{W_L}{(\Delta\theta_H g D / T_o)^{1/2}} = C_w \cdot l^{1/2} \quad (25)$$

$$Fr_u = \frac{U}{(\Delta\theta_H g D / T_o)^{1/2}} = C_u \cdot \Omega^m \cdot l^{p+1/2} \quad (26)$$

ただし、 $C_w, C_u$ は定数。  $l = L/D$

$$\Omega = U / (Qg / C_p \rho T_o)^{1/3}$$

これより流速比、火炎温度を表す式を得ると

$$\begin{aligned} v = W_L/U &= (C_w/C_u) \Omega^{-m} l^{-p} \\ &= (C_w C_u^{-1}) \Omega^a Fr_u^b \quad (27) \end{aligned}$$

ただし、 $a = -m/(2p+1), b = -2p/(2p+1)$

$$c_1 = -1/(2p+1)$$

$$\Delta\theta_H = C_v^{-2} \left[ \frac{1}{D} \left( \frac{Q^2 T_o}{C_p^2 \rho^2 g} \right)^{1/3} \right] \Omega^{2-2m} \cdot l^{-(2p+1)} \quad (28)$$

で、さらに $l$ について書き直すと次の各種無次元数で組み合わされた式が得られる。

$$\begin{aligned} l = L/D &= C_v^{c_2} \Omega^c Fr_u^d = C_v^{c_2} A^e Fr_u^f \\ &= C_v^{c_2} B^g Fr_u^h \quad (29) \end{aligned}$$

ただし、 $A = \Delta\theta_H D / (Q^2 T_o / C_p^2 \rho^2 g)^{1/3}$

$$B = Q / (C_p \rho U \Delta\theta_H D)$$

$$c = -2m/(2p+1), \quad d = 2/(2p+1)$$

$$e = c/2, \quad f = c+d, \quad g = -c/3$$

$$h = (2/3)c+d, \quad c_2 = -d$$

式(29)は熱源の燃料が同一ならば、発生熱量 $Q$ は燃焼速度 $R$  (kg/m/s)で代表され、火炎の温度は可燃物に依存するとして式から除くと、次式でも表せる。

$$\begin{aligned} l = l/D &= C_v^{c_2} [U / (Rg/\rho)]^{1/3} c \cdot Fr^d \\ &= C_v^{c_2} [D / (R^2/\rho^2 g)]^{1/3} e \cdot Fr^f \\ &= C_v^{c_2} [R / (\rho U D)]^g \cdot Fr^h \quad (30) \end{aligned}$$

ただし、 $Fr = U / (gD)^{1/2}$  : フルード数

### (b) 既往の実験結果に基づく関係式の検討

火炎のスケール等について、P.H.Thomasら<sup>18)</sup>の研究によると、木材クリブの燃焼実験の結果として、火炎長 $L_A$ 、火炎の上昇高さ $L_z$ は次式で表されるとしている。(本稿の記号にかえて示す)

$$\begin{aligned} l_A = L_A/D &= 70(R^2/\rho^2 g D^3)^{0.43} \cdot Fr^{-0.22} \\ &= 70[D / (R^2/\rho^2 g)]^{1/3} \cdot Fr^{-0.22} \quad (31) \end{aligned}$$

$$l_z = L_z/D = 56 [R/\rho U D] Fr^{0.26} \quad (32)$$

ただし、 $R$ ; 木材クリブの風向に直角方向の単位幅当たりの燃焼速度(kg/m/sec)。  $D$ ; 木材クリブの風向方向の幅(m)。  $U$ ; 一般風速。  $Fr = U / (gD)^{1/2}$

式(31)(32)の各式は、前項で誘導した式(30)を用いると一つにまとめることができる。言いかえると、共通の無次元数で構成された式に変形できる。以上のことから、式(30)によって前式は整理され、火炎寸法に関する式は次のように表される。

$$\begin{aligned} l_A = L_A/D &= 70[U / (Rg/\rho)]^{1/3} \cdot Fr^{2.36} \\ &= 70[D / (R^2/\rho^2 g)]^{1/3} \cdot Fr^{-0.22} \\ &= 70[R/\rho U D]^{0.86} \cdot Fr^{0.64} \quad (33) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} l_z = L_z/D &= 56[U / (Rg/\rho)]^{1/3} \cdot Fr^{2.26} \\ &= 56[D / (R^2/\rho^2 g)]^{1/3} \cdot Fr^{-0.74} \\ &= 56[R/\rho U D] \cdot Fr^{0.26} \quad (34) \end{aligned}$$

ここで、この実験的關係を用いて式(25)(26)で定義した $m, p$ を、式(30)により $l_A, l_z$ について求めると次のようになっている。

$$l_A: \quad m = 1.29/1.18, \quad p = -0.09/1.18 \quad (35)$$

$$l_z: \quad m = 3/2.26, \quad p = -0.13/2.26 \quad (36)$$

### (3) 熱気流の温度分布式についての考察

流速比 $v$ と火炎のスケール $l$ に関する式(27)(29)は $z$ 方向の流速比 $v_z$ 、スケール $l_z$ で定義し、式(23)

(24)に代入して、主軸温度分布式、主軸傾き角の式を書き直すと次のようになる。

$$\Delta\theta_M/\Delta\theta_H = C_0 \{ \Omega^a Fr^b (x-x_0)/D \}^{-1} \quad (37)$$

$$\tan\beta = C_t \cdot \Omega^{-c} \cdot Fr^{-d} \quad (38)$$

ただし、 $a=3m/\{2(2p+1)\}$ ,  $b=-(p+2)/(2p+1)$

$$c=m/\{2(2p+1)\}, d=p/(2p+1)$$

$C_0, C_t=C, C_w, C_v$ からなる係数

また、式(37)は式(28)を用いると次式にも書き直せ、主軸温度に関する無次元数 $\Phi_{XM}$ が定義される。

$$\Phi_{XM} = \Delta\theta_M(x-x_0)/(Q^2 T_0/C_p^2 \rho^2 g)^{1/3} = C_0 \cdot \Omega^{-e} \cdot Fr^{-f} \quad (39)$$

ただし、 $e=-2+\{3m/2(2p+1)\}=-2+a$

$$f=3p/(2p+1)=2+b$$

以上のことから、風の中の熱気流の鉛直方向の温度分布式として、式(38)(39)より次の形をとると考える。

$$\Phi_X = \Omega^{-e} Fr^{-f} \cdot G\{[z/(x-x_0)]\Omega^e Fr^d\} \quad (40)$$

ただし、 $G\{\}$ は関数形。 $\Phi_X$ は任意位置の温度上昇 $\Delta\theta$ に対する無次元温度である。

$$\Phi_X = \Delta\theta(x-x_0)/(Q^2 T_0/C_p^2 \rho^2 g)^{1/3}$$

また、式(37)~(40)の式中の指数は式(36)の $m, p$ を用いると $a\sim f$ の値は次のようになる。

$$a=9/4, b=-2.195, c=3/4$$

$$d=-0.065, e=1/4, f=-0.195 \quad (41)$$

ここに、風の中の熱気流の主軸温度、主軸傾き角、ならびに鉛直方向の温度分布の関係式が得られたが、火災温度 $\Delta\theta_H$ は、風速や熱源の発生熱量等の可燃物の特性に依存するとし式中からのぞき、 $Fr$ はフルード数 $Fr$ に置き換えられると考える。

#### 4.2 熱気流の温度分布の風洞実験による検証

本節では前述の誘導した関係式について、風洞実験による検証と風下温度分布式について述べる。

実験方法等の詳細は省略するが、風洞装置(鉄板製:幅50cm,高さ150cm,長さ748cm)は、送風部、市街地風と相似になるように風速の鉛直分布を調整するための粗度要素を配置した助走区間、熱源を設置した風速温度等の測定部によって構成している。ただし、測定部は建物等がない平坦地としている。

帯状熱源としては、帯幅 $D=5, 10, 15, 20$ cmの4種類の鉄製容器(高さ $h=5$ cm,短辺寸法=帯幅 $D$ ,長辺寸法 $\cong 50$ cm)を用いてメタノール燃焼による熱源としている。風洞内の風速の強弱は、熱源中心より風上へ $x=-75$ cm,風洞平板上より上方へ $z=100$ cm位置での風速測定値 $U(-75, 100)$ で与え、風洞内の基

準風速としている。実験の風速条件は、 $U=75, 100, 150, 200, 250, 300$ cm/secの6ケースで、補足的に350, 400, 450cm/secの実験を行なっている。

#### (1) 実験結果

##### (a) 主軸温度分布

熱気流の主軸温度の関係式(37)について、 $\Delta\theta_H$ は、 $U$ や $Q$ に依存すると考え式から除き、また仮想熱源は仮定せず $x_0=0$ とし次式で検討する。

$$(\Delta\theta_M/T_0) \cdot \{\Omega^a \cdot Fr^b\} = C_0 (x/D)^{-1} \quad (37a)$$

ただし、 $a=9/4, b=-2.195$  (式(41)による)

上式は燃焼域から十分離れた風下の主軸温度の関係を与えるものであるが、燃焼領域まで適用して実験的關係をみると、図-1になる。分布は考察した無次元数で良くまとまり、ほぼ三つの領域に分けられる。図上の直線の式は燃焼発熱の領域、燃焼の影響を受けながら拡散領域に移り変わる遷移域、並びに風に吹かれて流れる熱気流の拡散域として表す。

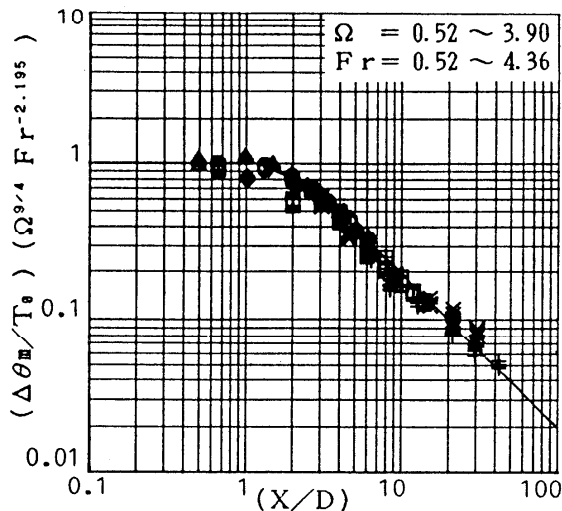


図-1 主軸温度分布

$$\left. \begin{array}{l} \text{○燃焼域 } 1.2 \geq (x/D) \\ (\Delta\theta_M/T_0) \cdot \{\Omega^{9/4} \cdot Fr^{-2.195}\} = 1 \\ \text{○遷移域 } 1.2 < (x/D) < 3 \\ (\Delta\theta_M/T_0) \cdot \{\Omega^{9/4} \cdot Fr^{-2.195}\} \\ = 1.1(x/D)^{-1/2} \\ \text{○拡散域 } 3 \leq (x/D) \\ (\Delta\theta_M/T_0) \cdot \{\Omega^{9/4} \cdot Fr^{-2.195}\} \\ = 1.9(x/D)^{-1} \end{array} \right\} \quad (42)$$

次に式(39)についても前述と同様に書き直して、 $\Phi_{XM} = \Delta\theta_M x / (Q^2 T_0 / C_p^2 \rho^2 g)^{1/3}$ として  $\Phi_{XM} \cdot \Omega^e \cdot Fr^f = C_0$  (39a) ただし、 $e=1/4, f=-0.195$  (式(41)による)

とし、実験的検討から次式が得られた。

$$\left. \begin{aligned} \text{○ 燃焼域 } 1.2 \leq (x/D) \\ \Phi_{XM} \cdot \Omega^{1/4} Fr^{-0.195} = (x/D) \\ \text{○ 遷移域 } 1.2 < (x/D) < 3 \\ \Phi_{XM} \cdot \Omega^{1/4} Fr^{-0.195} = 1.1(x/D)^{1/2} \\ \text{○ 拡散域 } 3 \leq (x/D) \\ \Phi_{XM} \cdot \Omega^{1/4} Fr^{-0.195} = 1.9 \end{aligned} \right\} (43)$$

また上式の無次元数の定義を変えて示すと  
 $\Phi_{DM} = \Delta\theta_M D / (Q^2 T_o / C_p^2 \rho^2 g)^{1/3}$  として

$$\left. \begin{aligned} \text{○ 燃焼域 } 1.2 \leq (x/D) \\ \Phi_{DM} \cdot \Omega^{1/4} Fr^{-0.195} = 1 \\ \text{○ 遷移域 } 1.2 < (x/D) < 3 \\ \Phi_{DM} \cdot \Omega^{1/4} Fr^{-0.195} = 1.1(x/D)^{-1/2} \\ \text{○ 拡散域 } 3 \leq (x/D) \\ \Phi_{DM} \cdot \Omega^{1/4} Fr^{-0.195} = 1.9(x/D)^{-1} \end{aligned} \right\} (44)$$

となる。また、直接に主軸温度を求める式に書き直すと次のようになる。

$$\Theta = D \cdot \Omega^{1/4} Fr^{-0.195} / (Q^2 T_o / C_p^2 \rho^2 g)^{1/3}$$

として

$$\left. \begin{aligned} \text{○ 燃焼域 } 1.2 \leq (x/D) \\ \Delta\theta_M = \Theta^{-1} \\ \text{○ 遷移域 } 1.2 < (x/D) < 3 \\ \Delta\theta_M = 1.1\Theta^{-1} \cdot (x/D)^{-1/2} \\ \text{○ 拡散域 } 3 \leq (x/D) \\ \Delta\theta_M = 1.9\Theta^{-1} \cdot (x/D)^{-1} \end{aligned} \right\} (45)$$

(b) 風下温度の鉛直分布

風下温度の鉛直分布式(40)の実験的検討は  $x_o=0, z_o=-h$  として  $z$  座標の原点を熱源容器の表面上(高さ  $h=5\text{cm}$ ) におき直し次式で行なった。

$$\Phi_x \cdot \Omega^c \cdot Fr^f = G\{(z/x)\Omega^d \cdot Fr^d\} \quad (40a)$$

ただし、 $G\{\}$  は関数形、 $c=3/4, d=-0.065$   
 $e=1/4, f=-0.195$  (式(41)による)

上式は主軸温度の検討で得た式(43)を考慮すると燃焼の影響を受けない  $(x/D) \geq 3$  における温度の鉛直分布を与えている。実験の風速条件は  $\Omega=0.55 \sim 3.9 (Fr=0.52 \sim 4.36)$  で実施しているが、実験値の分布は  $\Omega \geq 1$  でまとまる傾向にある。実験の代表例として  $D=20\text{cm}$  の実験を図-2に示す。

また、燃焼域、遷移域の温度の鉛直分布については、式(44)を考慮して実験値の分布をみると、図-3, 4となる。燃焼域では温度変動が大きく  $\Omega$  による分布の相違が認められないが、遷移域では弱風の  $\Omega < 1$  で分布から大きくはずれる傾向にある。

(c) 熱気流の主軸傾き角

前項の風下温度の鉛直分布図のピーク値は主軸温

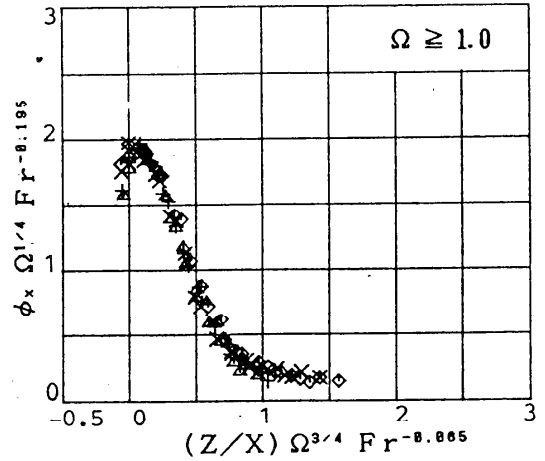


図-2 温度の鉛直分布  $D=20\text{cm}, x/D \geq 3$

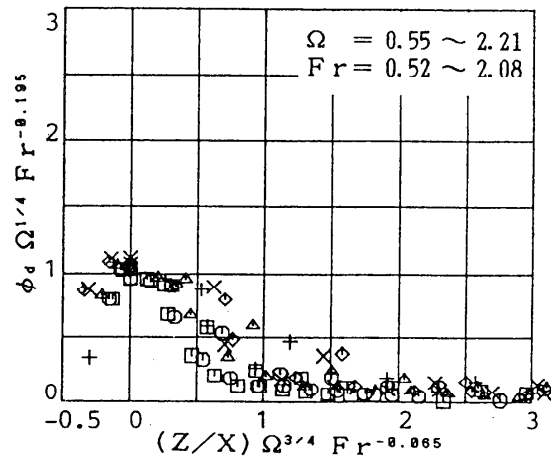


図-3 温度の鉛直分布  $D=20\text{cm}, x/D < 1.2$

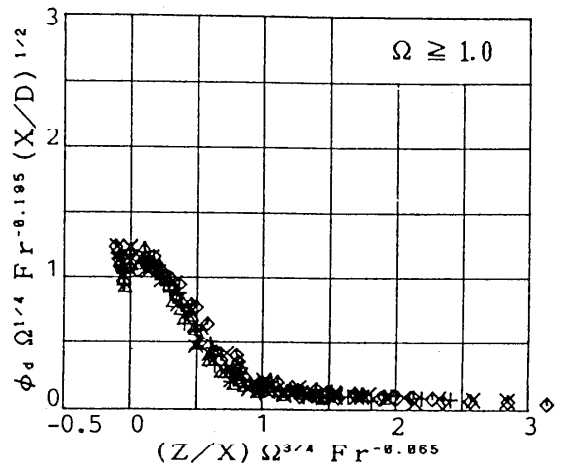


図-4 温度の鉛直分布  $D=20\text{cm}, 1.2 < x/D < 3$

度とみて良いから、主軸温度のとり位置はほぼ

$$(z/x)\Omega^{3/4}Fr^{-0.065} \doteq 0.1 \quad (38a)$$

である。上式を主軸傾き角式(38)で表すと

$$\tan\beta = C_t \cdot \Omega^{-c} \cdot Fr^{-d} \quad (38b)$$

ただし、 $C_t \doteq 0.1$  ,  $c = 3/4$  ,  $d = -0.065$

である。なお、実験では温度変動に伴い主軸温度の位置も変動するので直接に主軸温度を測定できないが、得られた平均温度の最高値を主軸温度とし、その位置は前述の鉛直分布図から求めることとした。温度の変動は燃焼域で $\pm 10\%$ 、拡散域で $\pm 5\%$ 程度で、関係式に対して実験的に与えた定数もその程度の変動があるものとなっている。

## (2) 強風下の帯状熱源からの熱気流の温度分布式

帯状熱源からの熱気流の温度の鉛直分布について実験的検討の結論として、強風の場合である $\Omega \geq 1$ の実験をまとめると次のようになる。

○燃焼域  $1.2 \leq (x/D)$

$$\Phi_D \cdot \Omega^{1/4} \cdot Fr^{-0.195} \\ = \text{EXP}[-\{(z/x)\Omega^{3/4}Fr^{-0.065} - 0.1\}^2]$$

○遷移域  $1.2 < (x/D) < 3$

$$\Phi_D \cdot \Omega^{1/4} \cdot Fr^{-0.195} (x/D)^{1/2} \\ = 1.1 \text{ EXP}[-3\{(z/x)\Omega^{3/4}Fr^{-0.065} - 0.1\}^2]$$

○拡散域  $3 \leq (x/D)$

$$\Phi_D \cdot \Omega^{1/4} \cdot Fr^{-0.195} (x/D) \\ = 1.9 \text{ EXP}[-4\{(z/x)\Omega^{3/4}Fr^{-0.065} - 0.1\}^2] \quad (46)$$

本章では前章のThomasの線状熱源の解析で誘導された $\Omega$ 、 $\Phi$ と共通の無次元数が定義され、さらに熱源の寸法効果として $Fr$ 数を加えて、上式のような熱源風下に3領域に分けられて温度分布式が得られる。

## 5. 耐火建物群の延焼遮断効果の検討

### 5.1 風の中の熱気流の相似則<sup>19)</sup>

有風時の市街地火災に対する相似条件としては市街地風に対する相似と火災に対する相似が必要である。市街地風の研究によると、風洞実験の相似条件は(a)模型の幾何学的相似とともに(b)建物にあたる風の相似が必要であるとし、風洞内の流れを現実の流れと相似にするために、平均風速と乱れ強さの鉛直分布の相似、乱れのスケールの相似を挙げている。

(c)火災に対する条件は、前述の市街地風と相似のもとに、火災域からの上昇気流との相似と火災の発生熱に対する相似が考えられる。

火災によって温度上昇した空気は、浮力 $F_b$ を受けて上昇し、火災炎上地区の風上から吹いてくる風速

$u$ の風によって風下に移動しながら冷たい空気と混合する。流れは乱流と考えられるから、粘性力の影響は慣性力 $F_i$ に比べ二次的と考えられるので無視する。ここに、浮力と慣性力はこの現象に支配的であるとして、その比をとると

$$Fr_u^2 = F_i/F_b = u^2/(\Delta\theta g l/T_o) \quad (47)$$

である。また火災域からの発生熱は帯状熱源を仮定し、発生熱量 $Q$  (kcal/m/s)は輻射等による熱損失がなく全て熱気流に伝えられると仮定して

$$Q = C_p \rho u \Delta\theta l \quad (48)$$

とおく。以上の2式はこの現象に支配的物理法則と考えて、それぞれの式から $\Delta\theta$ 、 $u$ を消去すると

$$Fr_u^{2/3} = u/(Q g/C_p \rho T_o)^{1/3} \quad (49)$$

$$Fr_u^{-2/3} = \Delta\theta l/(Q^2 T_o/C_p^2 \rho^2 g)^{1/3} \quad (50)$$

とも表せる。式(49)(50)は前章の $\Omega$ 、 $Fr$ 、 $\Phi$ に相当する形をとって示される。

以上の式が相似条件であるとするならば、実大と模型における現象の一致を考え、実大、模型の各物理量に $f$ 、 $m$ をつけてその関係を表すと、

$$\Omega_f = \Omega_m \quad \text{または} \quad Fr_f = Fr_m \quad (51)$$

$$\Phi_f = \Phi_m \quad (52)$$

また、各量の関係を具体的に書くと次のようになる。

$$[\rho_m/\rho_f]^{1/3} [u_m/u_f] [Q_m/Q_f]^{-1/3} = 1 \quad (53)$$

$$[\rho_m/\rho_f]^{2/3} [\Delta\theta_m/\Delta\theta_f] [l_m/l_f] \cdot [Q_m/Q_f]^{-2/3} = 1 \quad (54)$$

延焼危険や火災気流からの防熱・避難等の検討には、炎上地区からの熱気流の温度を知る必要がある。従って、模型実験から実際の火災における温度分布を予測しようとする場合、模型実験と実際の火災が対応する位置(縮尺 $S = l_m/l_f$ )で温度分布が同一、即ち $\Delta\theta_m = \Delta\theta_f$ 、かつ $\rho_m = \rho_f$ となった方が都合が良い。ここで、式(53)(54)に $\Delta\theta_m = \Delta\theta_f$ 、 $\rho_m = \rho_f$ を代入して整理すると

$$[l_m/l_f] = [u_m/u_f]^2 = [Q_m/Q_f]^{2/3} \quad (55)$$

となる。火災時の風速と発生熱量並びに炎上家屋等の規模が推定されるならば、縮尺 $S = l_m/l_f$ に従い風洞実験の条件として風速 $u_m = u_f S^{1/2}$  発生熱量 $Q_m = Q_f S^{3/2}$  が決められ、実験により温度分布が推定できることになる。

### 5.2 延焼遮断帯周辺における熱気流の温度分布

相似則の検証には、実大火災規模の実験が必要である。だが、今のところ測定上の問題もあり今後の課題として残されている。本稿では相似比率は小さいが式(55)の条件下においた発生熱量の異なる模型実験を実施し、相似則の検証とともに延焼遮断帯と

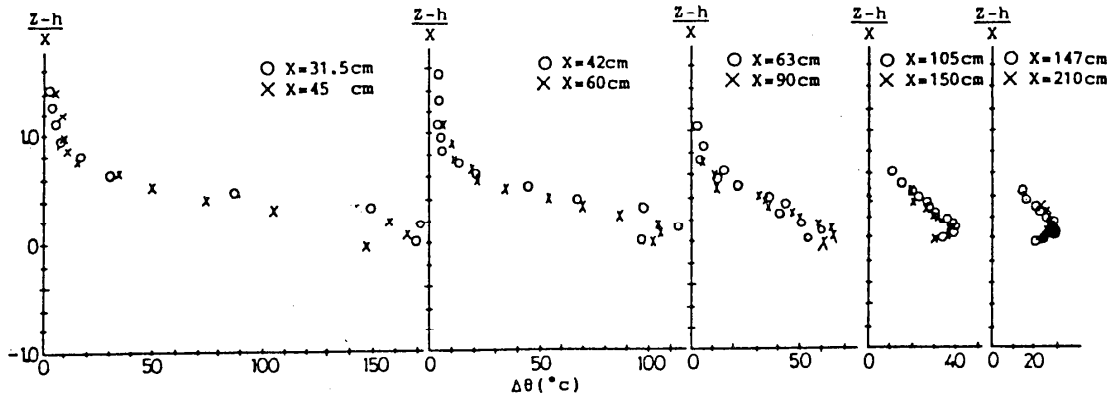


図-5 温度の鉛直分布分布 建物模型なし平坦地 ○熱源小 $D=5\text{cm}$  ×熱源大 $D=10\text{cm}$

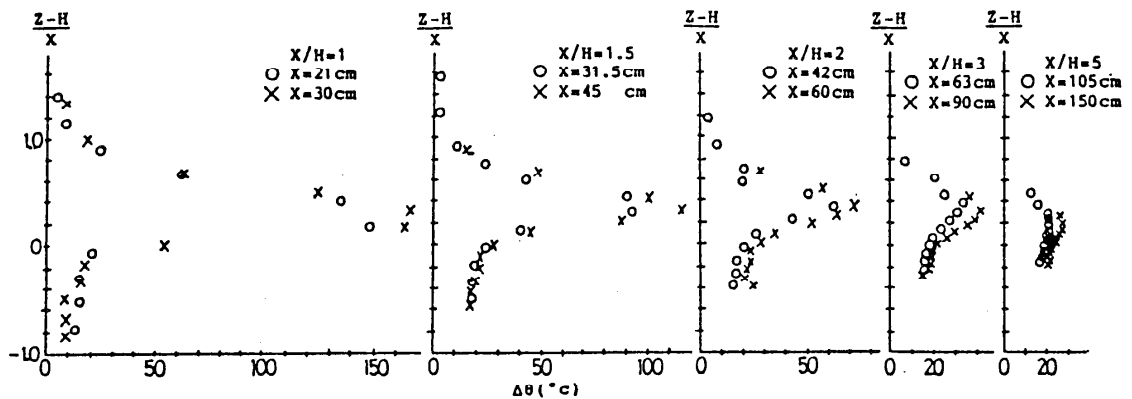


図-6 温度の鉛直分布 建物模型1列 (位置 $x/H=1$ ) ○熱源小 $D=5\text{cm}$  ×熱源大 $D=10\text{cm}$

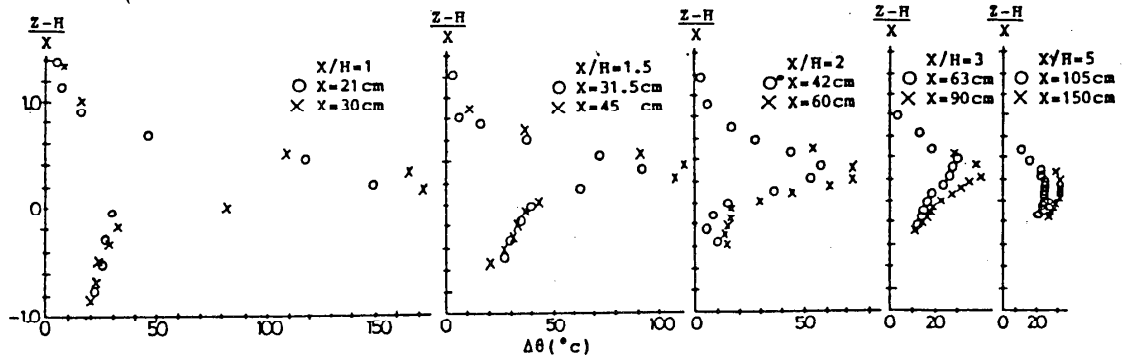


図-7 温度の鉛直分布 建物模型2列 (位置 $x/H=1,2$ ) ○熱源小 $D=5\text{cm}$  ×熱源大 $D=10\text{cm}$

した耐火造建物周辺の温度分布の検討例を述べる。

(1) 実験方法

実験は前章と同一風洞を用い、帯状熱源としては発生熱量小には帯幅 $D=5\text{cm}$ 、高さ $h=5\text{cm}$ の熱源を、発生熱量大には帯幅 $D=10\text{cm}$ 、高さ $h=7\text{cm}$ の熱源を用いる。また熱源の風下には、延焼遮断帯(ビル防火帯)を想定して、熱源小のときは高さ $H=21\text{cm}$ 、風向

方向へ奥行き幅 $W=4.5\text{cm}$ 、長さ $L=50\text{cm}$ の建物模型(コンクリート製)を設置し、熱源大のときは高さ $H=30\text{cm}$ 、風向方向への奥行き幅 $W=6.0\text{cm}$ 、長さ $L=50\text{cm}$ の建物模型としている。以上の熱源大小の寸法比は縮尺 $1/200$ と $1/140$ の模型実験として $S=0.7$ としたが、熱源の帯幅と発生熱量の関係から、帯幅の寸法は相似条件に対して近似的となっている。

熱源と建物模型の配置の条件は、1)熱源の風下に建物模型がない平坦地の場合。2)熱源中心を原点 $x=0$ として、その風下 $x=H$ の位置に建物模型を1列設置した場合。3)風下 $x=H$ と $x=2H$ の位置に建物模型を各1列づつ設置した場合。4)風下 $x=H$ と $x=3H$ の位置に建物模型を各1列づつ設置した場合の4ケースで、風速条件は熱源大小でそれぞれ3段階に変え式(55)の関係においている。

## (2) 実験結果の考察

実験結果の代表例として、ほぼ式(55)の条件下にある熱源小の風速 $U_m=86\text{cm/s}$ 、熱源大の風速 $U_f=105\text{cm/s}$ の温度の鉛直分布をとりあげる。

図-5は熱源の風下に建物などがなく平坦地である場合で、熱源大小の温度分布は同一になっている。図-6は熱源の風下 $x=H$ の位置に建物模型がある場合で、建物の位置での温度分布は左側の図で示される。 $(z-H)/x > 0$ は、建物の上方の温度を示し、 $(z-H)/x < 0$ は建物の風下背面の壁体表面付近の気流温度を示している。熱源小の温度はやや低いが、全体的に熱源大小の温度分布は同一になっていると認められる。図-7は熱源の風下 $x=H$ と $2H$ の位置に建物模型がある場合である。建物間に挟まれた領域の温度分布は $x/H=1.5$ に示される分布で上方から地表面へ熱気流の下降流があって渦域ができ、鉛直方向 $z=0\sim H$ の間の温度は一様に上昇する傾向にある。熱源の風下 $x=H$ と $3H$ の位置に建物模型がある場合の温度分布図は省略したが、建物間に挟まれた領域の温度分布は、前述と同様に熱気流の渦域ができ、温度は一様に上昇するが、建物間の距離が広くなっただけ、熱気流の下降が容易になり前述の実験より高い温度となっている。

延焼遮断帯としての建物は熱気流の高温域を上空にあげ遮断効果は期待できるが、避難上問題となる下降気流があり注意が必要となっている。

図-6~7で熱源小の温度がやや低いことで共通していたが、実験では熱量比が少し小さく式(55)を満足しなかったことによっている。なお、建物間隔を $3H$ 、 $4H$ にした補足実験でも同様に相似条件式(55)を満足することが確認されている。

## 6. おわりに

市街地大火防止策や消防活動、並びに住民の安全な避難を検討する上で、火災気流の温度分布の予測が重要であると考えます。

本稿は既往の研究を参照して、この温度分布を知

る方法として有風時の線状、並びに帯状熱源からの熱気流の温度分布式について述べ、さらに市街地火災を風洞実験で再現し防災対策を検討する方法について基礎的検討例を記述した。

## 参考文献

- 1) 佐賀武司、植田公明：災害時の避難場所について(仙台市の場合) 東北工業大学紀要(I 理工学編)第3号(1983) p.55~66
- 2) 植田公明、佐賀武司：災害に関する住民の意識構造 東北工業大学紀要(I 理工学編)第6号(1986) p.99~116
- 3) 藤田金一郎：都市大火対策の理論体系に関する研究 建築雑誌Vol.97, No.1197(1982) p8~11
- 4) 佐賀武司、藤田金一郎：大震災時におけるヘリコプターの運用限界に関する研究報告書 東京消防庁(1975) p.25~61
- 5) 関根 孝：面状火源の風下温度と熱気流に関する実験的研究(1981) p.1~48
- 6) 藤田金一郎：建築防火工学原論 総合防災出版(1969) p.24~25
- 7) 酒田市：酒田大火記録と復興のあゆみ 酒田建設部(1977) p.1~6
- 8) 浜田 稔：火災の延焼速度について 火災の研究(1951) p.35~44 日本保険料率算定会編 東京大震災への対応 -主として現状及び将来の避難計画(1974)日本損害保険協会 p.56~71
- 9) 堀内三郎：都市消防力の決定方法に関する研究 日本火災学会論文報告集(1960)「建築防火」(1972) 朝倉書店
- 10) 藤田金一郎：均等乱れの熱量分布計算例 日本建築学会研究報告 第14号(1951)
- 11) 藤田金一郎：大火災の火流延焼距離の計算 日本建築学会研究報告 第20号
- 12) 横井鎮男：大火の熱の風下に於ける拡散に就て 日本建築学会論文報告集第46号 p92~96(1953)
- 13) A.O.Rankine: Experimental Studies in Thermal Convection Proc.Phys.Soc.63 Part5(1950)
- 14) P.H.Thomas: Some Observations of The Effect of Wind on Line plumes Fire Research Note No.510(1962)
- 15) 横井鎮男：線熱源の風下における温度分布(第1報 熱源の高さが床上3cmの場合) 日本火災学会論文集 第13巻 第2号(1965)
- 16) 佐賀武司：強風下における帯状熱源からの熱気流の風下温度分布 強風下の市街地大火における火災気流の温度分布に関する基礎的研究 日本建築学会構造系論文報告集 第408号 p99~110(1990)
- 17) 佐賀武司：無風時における帯状熱源からの上昇熱気流の温度流速分布 市街地大火における火災気流に関する基礎的研究 日本建築学会計画系論文報告集 第411号 p165~176(1990)
- 18) P.H.Thomas, R.W.Pickard, H.G.H.Wraight: Fire Res. Note, No.516(1963) P.H.Thomas: Forestry, XL, No.2 p.146(1967)
- 19) 佐賀武司：強風下における大火の風洞実験に関する相似則 東北工業大学情報処理技術研究所紀要EOS Vol.2 No.1, (1989)

---

## Three Dimensional Simulations of Fire Plume Dynamics

H.R. Baum, K.B. McGrattan and R.G. Rehm  
(National Institute of Standards and Technology)

---

### Abstract

The velocity and temperature fields of fire plumes are studied theoretically and computationally using the authors' large eddy simulation techniques. A version of the Navier-Stokes equations specialized to the study of fire dynamics is used as the basis for the analysis. No empirical turbulence modeling parameters are introduced into the computations. These simplifications permit high resolution solutions to the three dimensional time dependent Navier-Stokes to be directly compared with experimental correlations of both the time averaged and transient properties of an isolated vertical plume. Computed mean centerline velocity and temperatures are shown to be in close agreement with McCaffrey's correlations. The methodology is then applied to the study of a large pool fire in an aircraft hangar with a complicated roof geometry. A simple cell masking scheme permits the inclusion of the building geometry into the calculation without sacrificing computational efficiency. The plume structure in the hangar is compared with the isolated plume properties. The overall temperature distribution induced in the hangar is also presented.

KEYWORDS: *Buoyant Convection, Computational Fluid Dynamics, Fires, Fire-Induced Flows, Plumes*

### 1 Introduction

The fire plume is the single most important object of study in fire science. It provides the radiant energy source that generates the gasified fuel from the condensed phase needed to sustain the fire. It also serves as the heat pump which both entrains air into the active combustion zone and then circulates the combustion products through the surrounding enclosure. It is the latter role that is of interest here. Although the central role of the fire plume has been recognized for some time, there is still much uncertainty about the plume structure. Indeed, Zukoski [1] gives a recent summary of the state of knowledge of mass entrainment into isolated fire plumes. There is clearly no consensus on any simple formula or graphical correlation for this most basic of plume quantities. Much of this uncertainty arises from the experimental and conceptual difficulty associated with determining the outer plume boundary. McCaffrey [7] developed centerline mean velocity and temperature correlations that are consistent with a large body of ex-

perimental data [8].

When the plume interacts with the enclosure geometry, the concept of an isolated plume becomes more difficult to sustain. Hiroomi *et al.* [2] have demonstrated systematic changes in observed plume structure as a result of confinement in tall, narrow enclosures. Bilger [3] has advocated the use of field models, in particular those based on  $k - \epsilon$  models of turbulence, to study issues of this type. Although there has been much progress using this approach to study fire induced flows in enclosures, most of the effort has concentrated on regions outside the plume itself. An excellent example of this is the analysis of the the experiments of Steckler *et al.* [5, 6] by Kerrison *et al.* [4]. The disadvantage of using such an experiment as a test of fire-induced flow models is that it is difficult to determine how much the  $k - \epsilon$  model, the choice of boundary condition, the representation of the enclosure geometry, or the experimental data contribute to those discrepancies between computed and measured results.

The present work uses the large eddy sim-

ulation techniques developed by the authors to study the fire plume both as an isolated entity and in a realistic enclosure environment. The purpose is twofold — to contribute to the understanding of fire plume dynamics and to demonstrate the power of the large eddy simulation technique. The absence of boundaries, the fact that a reasonable (albeit imperfect) data base exists for an isolated plume, and the fact that an explicit turbulence model is not used in the present approach, makes this an attractive problem to consider. The choice of the enclosure fire scenario mentioned below demonstrates that this methodology can be applied to problems of practical interest. In the next section, the three dimensional transient Navier-Stokes equations specialized to fire scenarios are presented. The numerical techniques used to solve them are briefly outlined. Following this, high resolution solutions for a purely buoyant fire plume are presented and compared with McCaffrey's centerline correlations. Finally, the methodology is applied to the analysis of a pool fire in an aircraft hangar. The spatial resolution is high enough to have the plume resolved nearly as well in this complex geometry as in the isolated plume case. The two plumes are compared, and the effect of the enclosure is shown. A concluding section discusses the future prospects for this approach to fire dynamics.

## 2 Mathematical Model

We consider a thermally expandable ideal gas driven by a prescribed heat source. The motion of the fluid is governed by the equations written in a form suitable for low Mach number applications [9]

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot \rho \mathbf{u} = 0 \quad (1)$$

$$\rho \left( \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + (\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u} \right) + \nabla p - \rho \mathbf{g} = \nabla \cdot \boldsymbol{\sigma} \quad (2)$$

$$\rho c_p \left( \frac{\partial T}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla T \right) - \frac{dp_0}{dt} = \dot{q} + \nabla \cdot k \nabla T \quad (3)$$

$$p_0(t) = \rho \mathcal{R} T \quad (4)$$

Here, all symbols have their usual fluid dynamical meaning:  $\rho$  is the density,  $\mathbf{u}$  the velocity vector,  $\boldsymbol{\omega}$  the vorticity,  $p$  the pressure,  $\mathbf{g}$  the gravity vector,  $c_p$

the constant-pressure specific heat,  $T$  the temperature,  $k$  the thermal conductivity,  $t$  the time,  $\dot{q}$  the prescribed volumetric heat release,  $\mathcal{R}$  the gas constant equal to the difference of the specific heats  $\mathcal{R} = c_p - c_v$ , and  $\boldsymbol{\sigma}$  the standard stress tensor for compressible fluids. Notice in the energy conservation equation that the spatially and temporally varying pressure has been replaced by an average pressure  $p_0$  which depends only on time. This is done to filter out acoustic waves.

The divergence of the flow  $\nabla \cdot \mathbf{u}$  is a very important quantity in the analysis to follow, and it is readily found by combining Eqs. (1) and (3) and using the equation of state (4)

$$p_0 \nabla \cdot \mathbf{u} + \frac{1}{\gamma} \frac{dp_0}{dt} = \frac{\gamma - 1}{\gamma} (\dot{q} + \nabla \cdot k \nabla T) \quad (5)$$

where  $\gamma = c_p/c_v$ . Integrating Eq. (5) over the entire domain yields a consistency condition for the background pressure  $p_0(t)$ . The background pressure can be expressed in terms of a background temperature  $T_0(t)$  and density  $\rho_0(t)$

$$p_0 = \mathcal{R} \rho_0 T_0 \quad (6)$$

These spatially averaged quantities play the same role that ambient conditions do in the Boussinesq approximation. Perturbations to each are represented by the relations

$$T = T_0(t)(1 + \tilde{T}) \quad ; \quad \rho = \rho_0(t)(1 + \tilde{\rho}) \quad (7)$$

The perturbation values are thus simply related

$$(1 + \tilde{T})(1 + \tilde{\rho}) = 1 \quad (8)$$

Defining  $T_0$  and  $\rho_0$  through the adiabatic process

$$\frac{\rho_0}{\rho_\infty} = \left( \frac{p_0}{p_\infty} \right)^{1/\gamma} \quad (9)$$

allows the energy equation to be expressed in terms of the perturbation temperature  $\tilde{T}$  and the divergence

$$\frac{\partial \tilde{T}}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla \tilde{T} = (1 + \tilde{T}) \left[ \nabla \cdot \mathbf{u} + \frac{1}{\gamma p_0} \frac{dp_0}{dt} \right] \quad (10)$$

Note that the temperature and density perturbations are not necessarily small, and the Boussinesq approximation is not used.





**FIGURE 1: Instantaneous snapshot of a pool fire calculation performed on a  $96 \times 96 \times 96$  grid. The contours correspond roughly to the boundaries of the continuous flame, intermittent region and plume. The square burner is length  $D^*$  on each side, with the height of the domain rising about  $12D^*$ .**

Next, we simplify the momentum equation. The pressure is composed of three components, the background  $p_0(t)$ , the hydrostatic, and a per-

turbation to the hydrostatic  $\tilde{p}$

$$p(\mathbf{r}, t) = p_0(t) - \rho_0(t)gz + \tilde{p}(\mathbf{r}, t) \quad (11)$$

where  $z$  is the vertical spatial component. We subtract off the hydrostatic pressure gradient from the momentum equation (2), and then divide by the density to obtain

$$\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \frac{1}{2} \nabla |\mathbf{u}|^2 - \mathbf{u} \times \boldsymbol{\omega} + \frac{\nabla \tilde{p}}{\rho} - \frac{\rho - \rho_0}{\rho} \mathbf{g} = \frac{\nabla \cdot \boldsymbol{\sigma}}{\rho} \quad (12)$$

To simplify this equation further, the density in the pressure term is assumed ambient, and then the term  $|\mathbf{u}|^2/2$  is combined with the perturbation pressure  $\tilde{p}/\rho_0$  and written as a total pressure,  $\mathcal{H}$ . This approximation assumes that the buoyancy generated vorticity dominates the baroclinic contribution caused by the non-alignment of perturbation pressure and density gradients. This is not a good approximation at the small scales where the actual combustion heat release takes place. However, at the resolvable scales this is nothing more than the assumption that these are buoyancy dominated flows. If the coefficient of viscosity is assumed constant, the momentum equation can be written

$$\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} - \mathbf{u} \times \boldsymbol{\omega} + \nabla \mathcal{H} + \tilde{T} \mathbf{g} = \nu \left( \frac{4}{3} \nabla (\nabla \cdot \mathbf{u}) - \nabla \times \boldsymbol{\omega} \right) \quad (13)$$

For most applications, the effective kinematic viscosity coefficient  $\nu$  represents dissipation on length scales below the resolution limits of the calculation. The effective Reynolds number is high enough to permit direct simulation of convective motion over a spatial range of two orders of magnitude for a three-dimensional calculation.

The fire is represented by introducing a large number of Lagrangian elements which release heat as they are convected about by the thermally induced motion. Since the fluid motion determines where the heat is actually released, and the heat release determines the motion, the large scale features of the coupling between the fire and the smoke transport are retained. It should be noted, however, that the heat release rate is *not* predicted, but is an input parameter in the computer programs implementing this model. The smoke is simulated by tracking the convected elements after the

fuel burnout is completed. A specified percentage of the fuel consumed is assumed to be converted to smoke particulate. Thus, a knowledge of the spatial distribution of the Lagrangian elements is equivalent to a specification of the smoke particulate density at any instant of time. This "thermal element" model, which represents the combustion heat release as a large number of point sources convected by the resolvable flow field, is in fact a simple combustion model in its own right. It is consistent with more detailed combustion theories currently in use, and it permits the use of experimental data from fire experiments in a way that does not violate the consequences of those theories. A more detailed discussion of this model can be found in Ref. [12].

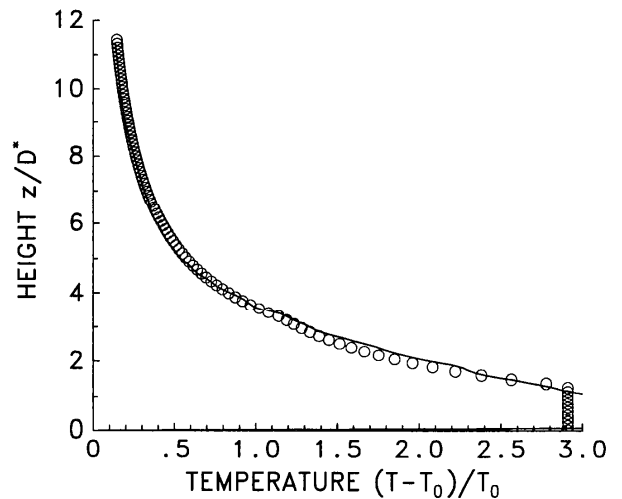
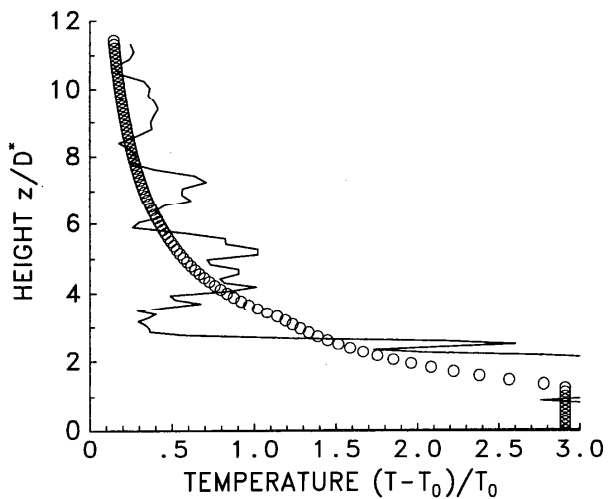
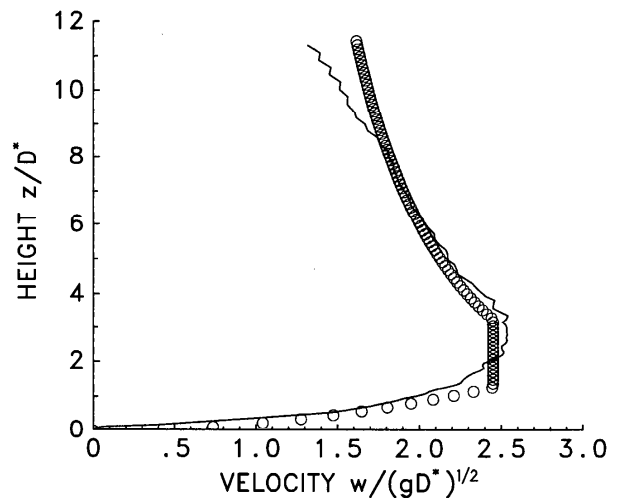
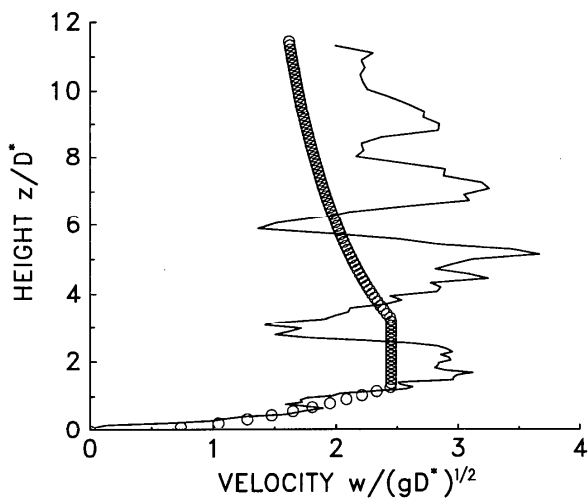
In summary, the equations which are solved numerically are the energy equation (10), the momentum equation (13), and a Poisson equation for the total pressure, obtained by taking the divergence of Eq. (13). This linear elliptic equation is solved with the use of an FFT-based fast direct solver. The background pressure, temperature and density are found from Eqs. (5), (6) and (9). Each of the conservation equations emphasize the importance of the divergence and vorticity fields, as well as the close relationship between the thermally expandable fluid equations [9] and the Boussinesq equations for which the authors have developed highly efficient solution procedures [10, 11]. These are applied directly to the equations presented here with minor modifications and no loss in performance. The only changes from earlier methodology are a return to a uniform rectangular grid with blocks of cells masked to simulate internal boundaries; and the use of a second order Runge-Kutta scheme to advance the velocity and temperature fields in time. The speed and accuracy of this technique enable calculations on current generation workstations which involve over a million computational cells, yielding the spatial range of two orders of magnitude for a three-dimensional calculation.

### 3 Isolated Fire Plume

We first consider an isolated fire plume generated by a pool fire. The minimum length scale that must be resolved here is the plume structure scale  $D^* = (Q/\rho_0 c_p T_0 \sqrt{g})^{2/5}$ . Since  $D^*$  is roughly comparable to the plume diameter near the base, the plume dynamics can only be accurately simulated if the resolution limit is about  $0.1D^*$ . Indeed, for an isolated plume, this is the only length scale that must be considered. This can be seen both from the dimensionless form of McCaffrey's plume correlations [8] and by considering the dimensionless form of the Navier-Stokes equations for this problem. In fact, if the equations discussed above are made non-dimensional with  $D^*$  as length scale,  $\sqrt{gD^*}$  as velocity scale,  $\sqrt{(D^*/g)}$  as time scale, and  $T_0$  as temperature; all the physical constants disappear from the inviscid terms in the equations. Only Reynolds and Prandtl numbers appear in the viscous stress and heat conduction terms. In all computations, the Reynolds number is chosen to be high enough so that the inviscid terms dominate the large scale structure. The need to accomplish this and also allow the viscous terms to provide dissipation at the resolution limit is the ultimate reason that high spatial and temporal resolution are required.

Figure 1 shows an instantaneous snapshot of three temperature contours obtained from a  $96 \times 96 \times 96$  cell simulation. The contours correspond to the boundaries of the continuous flame, intermittent flame, and plume zones as defined in Ref. [8]. The Reynolds number was 12,000 for this simulation, based on the height of the computational domain. Note that Fig. 1 is an instantaneous snapshot of the fire, and that time averages of the output of this kind of simulation must be produced in order to make quantitative comparison with most experimental data. Indeed, it is the fact that the *results* of the simulation can be averaged in a routine way while the *equations* of fluid mechanics cannot is the basis of the whole approach presented here.

Figure 2 shows the instantaneous vertical centerline velocity and temperature profiles superimposed on the steady-state correlation of McCaffrey (circles). The oscillations are primarily due

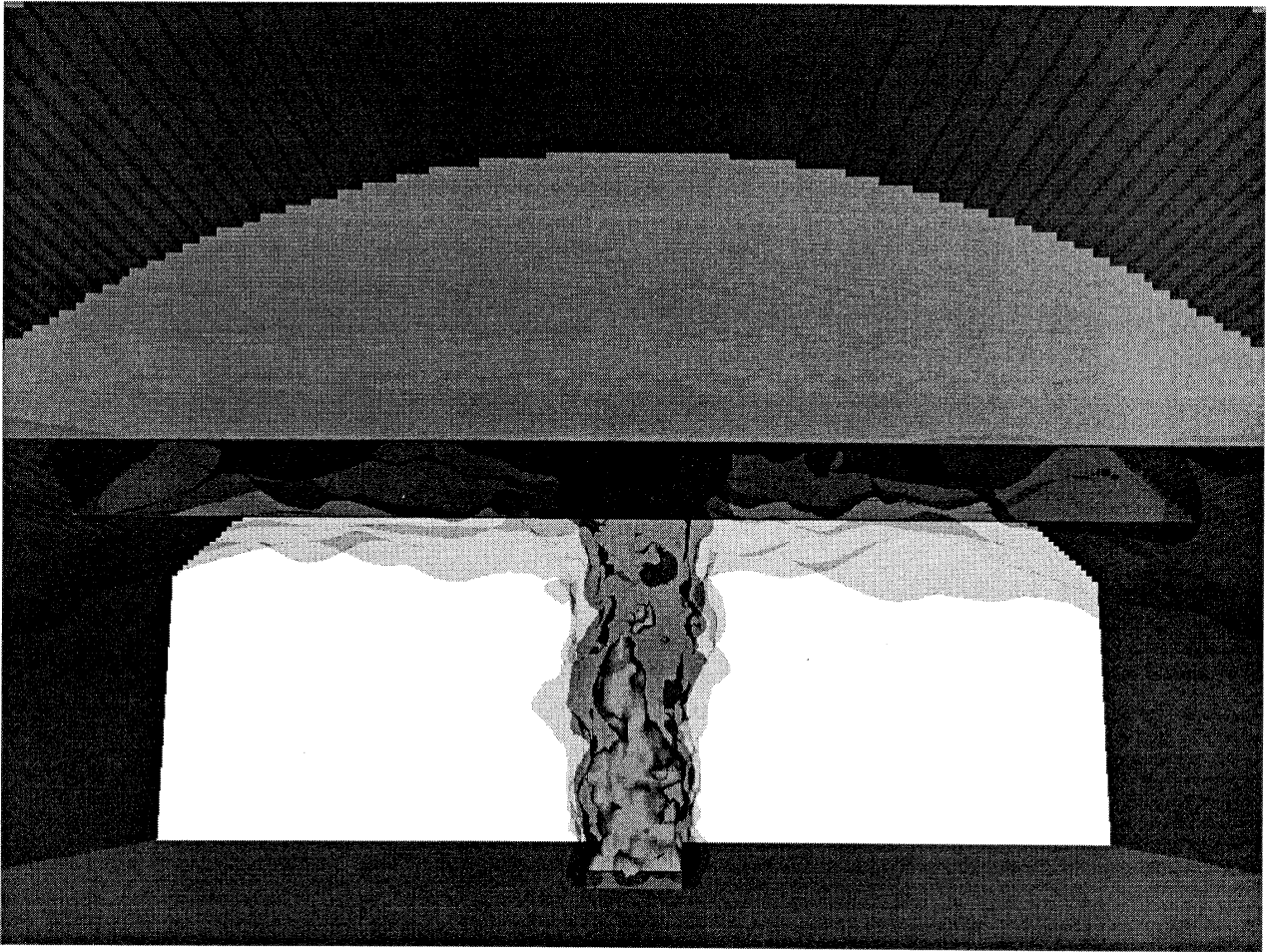


**FIGURE 2: Instantaneous centerline velocity and temperature profiles for the pool fire simulation shown in Fig. 1.**

**FIGURE 3: Time-averaged centerline velocity and temperature profiles for the pool fire simulation shown in Fig. 1.**

to the large toroidal vortices generated at regular intervals at the base of the fire, which then rise asymmetrically. Note that the flow is not even remotely axially symmetric, and the centerline is defined only by the geometry of the pool at the base of the plume. Figure 3 shows the corresponding time averaged quantities (solid lines) and McCaffrey's centerline correlations. The *time averaged* flow is symmetric and in excellent agreement with the correlations. The only deviations are at the bottom of the plume where the thermal elements are turned on instantaneously without any preheat as they leave the pool surface, and at the top where the computational "hood" exerts some upstream

influence on the plume. Otherwise, the boundaries of the computational domain are open. At these open boundaries, the perturbation pressure is assumed zero. This is a reasonable approximation at the side boundaries, but less so at the top. Various strategies have been explored to properly set the conditions at the top, but in most instances, there is usually a solid ceiling or a hood drawing the combustion products up at some specified flow rate.



**FIGURE 4: Instantaneous snapshot of a fire plume simulation in a 22 m high aircraft hangar at the U.S. Naval Air Station in Keflavik, Iceland. The width of the building is 45 m, and 45 m of its length is included in the calculation. The actual length of the building is about 75 m.**

#### 4 Aircraft Hangar Fire

Next, we consider a simulation of one of a series of fire tests performed in a 22 m high aircraft hangar at the U.S. Naval Air Station in Keflavik, Iceland [13]. The hangar has a floor approximately 75 m by 45 m in extent, and a barrel vault ceiling that is divided into five 15 m sections by draft curtains. The three center sections are represented in a simulation that consists of a 3 m square JP-5 jet fuel fire located in the geometric center of the hangar. Figure 4 displays instantaneous temperature contours corresponding to those in Fig. 1 approximately 30 s into the simulation. The computations were performed on a  $180 \times 180 \times 90$  cell grid (roughly 25 cm resolution); perhaps the largest CFD-based computation of a problem in

fire research. They required  $3.2 \times 10^{-6}$  seconds per time step per grid cell on a Cray-90 supercomputer. Fifty seconds of relatively steady burning were simulated. The Reynolds number based on the height of the hangar is 14,000. The high resolution calculations were undertaken to ensure that the fire plume in the hangar was resolved to about the same spatial resolution employed in the isolated plume case. Since  $D^*$  is more than an order of magnitude smaller than the hangar width, the computational requirements for this problem were quite high. In fact, there are not many CFD computations in *any* applied field where this dynamic range of length scales has been studied in a fully transient three dimensional simulation. One side benefit of the high resolution requirement is

that curved surfaces such as the hangar roof can be readily simulated with little loss of accuracy and no loss of computational efficiency. The grid is sufficiently dense so that no point on the curved boundary is more than one half percent of the enclosure height from the nearest computational boundary. Note that much larger enclosures can be simulated so long as the fires of interest are correspondingly larger, and that no small scale geometry need be accounted for. The task of simulating a relatively small fire in a large enclosure is much more difficult. It is usually assumed that the enclosure geometry has little effect once the ratio of  $D^*$  to a suitable geometric scale is small enough.

The plume calculated for the hangar scenario is very close to the classical isolated plume up to the point where the stable hot layer begins to interact with the plume. The plume was assumed to lose thirty-five percent of the chemically released energy through radiation that is lost to the system. These are exactly the assumptions made for the isolated plume study and are implicit in the correlations presented in Ref. [8]. The hangar is thus sufficiently large compared with the fire for the interactions reported in [2] to be unimportant. The placement of the fire in the center of a large space with the outer doors closed undoubtedly contributed to the lack of influence of enclosure geometry on plume dynamics. Clearly, the presence of draft curtains played little role in the plume dynamics. Their principal effect was to confine the formation of the upper layer at this stage in the fire development.

## 5 Conclusion

The computations shown above demonstrate that the large scale fire dynamics and smoke movement generated by realistic fire scenarios can be accurately calculated directly from the Navier-Stokes equations. The dynamic range of the spatial and temporal resolution achieved is comparable to those used in fundamental studies of the structure of homogeneous turbulence, and greater than that currently employed in predictions of the global atmospheric circulation [14]. At present, the main limitations on the utility of the present approach for problems of practical interest have more to do

with the incorporation of other physical processes into the large eddy simulations than with further improvements to the description of turbulent mixing. The most important of these within the context of large scale transport phenomena is thermal radiation. Efforts to incorporate radiative transport in a manner consistent with the large eddy simulations described above are currently underway.

## References

- [1] Zukoski, E.E., 1994, "Mass Flux in Fire Plumes", in *Fire Safety Science—Proceedings of the Fourth International Symposium*, International Association for Fire Safety Science, pp. 137–148.
- [2] Hiroomi, S., Sugawa, O., Kurioka, K., and Takahashi, W., 1994, "Plume Behavior in a Confined Tall and Narrow Space—as One of Sub-Models of Plume for an Atrium Fire—", *Fire Safety Science—Proceedings of the Fourth International Symposium*, International Association for Fire Safety Science, pp. 551–562.
- [3] Bilger, R.W., 1994, "Computational Field Models in Fire Research and Engineering", *Fire Safety Science—Proceedings of the Fourth International Symposium*, International Association for Fire Safety Science, pp. 95–110.
- [4] Kerrison, L., Mawhinney, N., Galea, E.R., Hoffman, N., and Patel, M.K., 1994, "A Comparison of Two Fire Field Models with Experimental Room Fire Data", *Fire Safety Science—Proceedings of the Fourth International Symposium*, International Association for Fire Safety Science, pp. 161–172.
- [5] Steckler, K.D., Quintiere, J.G., and Rinkinen, W.J., 1982, "Flow Induced by a Fire in a Compartment", *Nineteenth Symposium (International) on Combustion*, The Combustion Institute, Pittsburgh, pp. 913–920.
- [6] Steckler, K.D., Baum, H.R., and Quintiere, J.Q., 1984, "Fire Induced Flows Through

- Room Openings”, *Twentieth Symposium (International) on Combustion*, The Combustion Institute, Pittsburgh, pp. 1591–1600.
- [7] McCaffrey, B.J., 1979, “Purely Buoyant Diffusion Flames – Some Experimental Results”, NBSIR 79-1910, National Bureau of Standards, Gaithersburg, Maryland.
- [8] Baum, H.R. and McCaffrey, B.J., 1989, “Fire Induced Flow Field – Theory and Experiment”, *Fire Safety Science – Proceedings of the Second International Symposium*, Hemisphere, New York, pp. 129–148.
- [9] Rehm, R.G. and Baum, H.R., 1978, “The Equations of Motion for Thermally Driven, Buoyant Flows”, *Journal of Research of the NBS*, Vol. 83, pp. 297–308.
- [10] McGrattan, K.B., Rehm, R.G., and Baum, H.R., 1994, “Fire-Driven Flows in Enclosures”, *J. Comp. Phys.*, Vol. 110, pp. 285–291.
- [11] Baum, H.R., Ezekoye, O.A., McGrattan, K.B. and Rehm, R.G., 1994, “Mathematical Modeling and Computer Simulation of Fire Phenomena”, *Theoretical and Computational Fluid Dynamics*, Vol. 6, pp. 125–139.
- [12] Baum, H.R., McGrattan, K.B. and Rehm, R.G., 1996, “Large Eddy Simulations of Smoke Movement in Three Dimensions”, *Conference Proceedings of the Seventh International Interflam Conference*, Interscience Communications, London, pp. 189–198.
- [13] Notarianni, K.A., Davis, W., Lowe, D., and Laramée, S., 1996, “Analysis of High Bay Hangar Facilities for Detector Sensitivity and Placement”, *Conference Proceedings of the Seventh International Interflam Conference*, Interscience Communications, London, pp. 487–496.
- [14] Lorentz, E.N., 1993, *The Essence of Chaos*, University of Washington Press, Seattle.

## 火災現象の熱的モデリング

*Thermal Approach to Modeling Fire Phenomena*

長谷見 雄二 (建設省建築研究所  
第五研究部防火研究室)

*Yuji HASEMI (Fire Safety Division, Building Research  
Institute, Ministry of Construction)*

### 1. はじめに

火災の拡大は、熱・物質移動、化学反応、熱変形などが相互に影響しあいながら進行する複雑な現象である。その事情は、火災に関する諸問題の根元である燃焼現象でとりわけ顕著に現れていて、化学的過程としての燃焼反応が燃焼領域への酸素供給に支配される一方、酸素供給は、燃焼発熱によって形成される自然対流に依存するというように、関係する個々の過程を単独に切り出しただけでは、全容が把握できない。

それだけなら、自然対流がかかわる他の多くの伝熱現象にも共通していようが、現象解析をどう進めようかと考えると、火災には他にもいろいろ特質がある。例えば、燃焼現象を扱うといっても、ロケットやエンジンの燃焼のように、燃料が特定できるわけでもなければ、燃焼を規定する酸素供給などの条件が制御されているわけでもない。そのうえ、初期条件もはっきりとはしていないのが普通である。建物火災の燃焼性状を規定する主な条件が室内の可燃物や開口部の開閉条件であることは今日、常識になっているが、持ち込まれる可燃物は居住者によってひどく違って、その状態も、毎日、毎時間のように変化している。

工学のほとんどの分野では、明確な初期・境界条件のもとで、性質が明確に把握された物質がどのように振る舞うかを予測することを通じて、設計や製品開発が進められている。予測のためのモデル化も、当然その応用を視野に入れて方針づけられるから、与えられた条件のもとで高い精度で現象を予測できるモデルが賞揚されたきた。しかし、防災で扱われる現象のような「望まれない現象」については、そのような理論体系は、有効に機能しないことが多い。

防災工学における現象予測では、災害の契機となる現象を規定する条件をはっきりとは特定できない以上、現象の予測精度の向上に限界があることは認

めたうえで、それでも予測可能な何らかの条件を手がかりにして現象を記述して、現象の進み方を方向として支配する要因を誤りなく把握するというようにモデルを編成することが重要である。火災のモデル化の研究が本格化したのは、国際的に見ても第二次世界大戦後のことであるが、本稿では、これまでのモデル化の研究成果を省みて、こうした思想のもとに展開されて古典的な位置づけを与えられつつある事例を紹介したい。

### 2. 火災成長のシナリオ

本題に入る前に、モデリングの対象とする現象の大体のイメージと防火安全上の問題の性質の理解を助けるために、室火災の成長過程を概観しておこう。

図1は、出火から室内全体に燃焼が及ぶまでの室火災の様子をまとめてみたものである。出火後、着火物上に現われた火災は、煙を生成しつつ、放射で室内を予熱し、内装や他の可燃物の表面が高温になると着火を生じて、延焼する。壁のような垂直面に着火したり、大型の可燃物が炎上すると、燃焼拡大は目にみえて顕著になる。燃焼拡大が著しく急激になり、室全体の燃焼に移行する過渡的な過程が、フラッシュオーバーである。こんな風に戯画化すること自体、一種のモデリングを行っていることにほかならないが、図式的に言えば、フラッシュオーバーを境にして、防火安全対策の要点は、出火空間の人命安全性から、建築全体を対象とする煙拡大防止・延焼防止・構造躯体保護に移るということになる。

このように火災成長のシナリオを設定して、火災拡大抑制の技術的指針を考えてみると、

- (1) 出火源・家具等の燃焼抑制  
内装等に対する加熱を抑制し、延焼を防止させる。
- (2) 内装の燃焼拡大防止  
内装の着火防止性能を高めたり、着火後の燃焼拡大を抑制して、在室者の避難安全の確

保と火災盛期への移行を遅延させる。

(3) 火災盛期における室外への延焼防止

区画部材に耐火性を持たせて、周壁が燃え抜けないようにしたり、外壁・開口部を防火的に補強して、開口噴出火炎等による延焼を防止する。

などとなろう。問題をさらに単純化すると、

(1) については、可燃物等が燃えた時の火炎の加熱源としての性質によって評価ができ、(2) は、内装表面の着火・火炎伝播性状が問題である。(3) については、火災による周壁などの加熱条件が判明すれば、計算や部材の試験による評価が可能になっており、室内温度の予測などが、モデリングに求められる中心的な課題となる。そこで、火災成長の過程で節目とみなされる典型的な現象として、火炎、火炎伝播、室火災盛期性状の3つを取り上げてみよう。

3. 火炎の巨視的性状のモデリング

燃焼物上に形成される火炎は、燃焼拡大の直接の原因となったり、煙の生産源となるので、火炎からの放射熱、火炎の高さ、温度分布、煙流量などの予測は、防火安全上、重要な意義がある。

火災時に現われる火炎は、一般に乱流拡散火炎である。市街地火災では強風下の火炎性状が問題になるが、室火災を対象する時は、無風と想定するのが一般的である。このような火炎の性状について、まとまった実験的知見を最初に報告したのは Hottel (1948, 文献1) であるが、機械工学で研究されていた予混炎や層流拡散火炎に比べると、火災時の火炎形状は不規則で、時間的な変動も大きい。このため、火災時の火炎の性質を数量的に表現したり、測定する方法はなかなか確立しなかった。

火災を対象とする火炎のモデリングの展望を開いたのは、Thomas (1961, 文献2) による次元解析であろう。Thomas は、火炎の高さなど、幾何学的特徴は力学的に決定され、火炎中の反応過程は捨象できると仮定して、火炎高さ $L_f$ と燃焼速度の次元的关系を誘導し、目視観測した火炎でその妥当性を検証した。すなわち、燃焼物表面から噴出する燃料ガスの慣性力と燃焼領域の高温による浮力の比が火炎の大きさを決定すると仮定すると、火炎高さ $L_f$ 、火源寸法 $D$ 、発熱速度 $Q$ 、燃料ガスの噴出速度 $u$ の間に、次の関係が成り立つと期待される。

$$L_f/D = f(u^2/Dg\beta\theta) = f(Q^2/D^5) \quad (1)$$

但し、 $g$ は重力加速度、 $\beta$ は体積膨張率、 $\theta$ は温度である。(1) 式は、燃焼物が何であれ、火炎形状は発熱速度と寸法だけで予測できることを主張している。これは、火炎の巨視的性状を問題とする限りでは、燃焼物の組成を把握する必要がないこと、また巨大な火災であっても、 $Q^2/D^5$ が一致するように模型実験を行えば火炎性状を予想できることを意味しており、それまでは実火災の経験に依存していた火災対策を、工学的に大きく前進させる契機となる考え方であった。

もっとも、この考察は極めて直観的で、これが成り立つためには、

- (1) 火炎中の温度は燃焼物によらず、大して変わらない
- (2) 燃焼による発熱速度は、空気の巻き込み条件と一対一に対応する

などの条件が必要であるが、これが良い近似で成り立つことが示されたのは、実はずっと後のことである。むしろ、このモデルが非常に成功したため、その前提条件の検証に目が向けられたというべきであろう。(1) 式は一種の Froude 数モデルであるが、今日では、発熱速度と換算し易いように無次元数を整理し直して、 $Q^* = Q/\rho_0 C_p T_0 g^{1/2} D^{3/2}$  (文献3) を使う例が多い。 $Q^*$ は無次元発熱速度等とよばれ、線火源 ( $Q^*_l = Q_l/\rho_0 C_p T_0 g^{1/2} D^{3/2}$ 。但し、 $Q_l$ は単位幅当り発熱速度、文献4)、長方形火源 ( $Q^*_{mod} \equiv Q/\rho_0 C_p T_0 g^{1/2} AB^{3/2}$ 。A, Bは長方形の縦横辺長、文献5)等のバリエーションがあるが、火炎形状だけでなく、例えば図2のように、火炎上の温度・流速分布等を整理するパラメータとしても利用される(文献5)。

さて、(1) 式を利用すると、火炎の形状に関する様々な性質を理論的に予想することができる。例えば、発熱速度が大きくなって火炎が火源に比べて非常に大きくなると、火炎先端では、「火源がどんな形・寸法だったか忘れてしまっている」はずだから、火炎高さに対する火源寸法の影響は消失するであろう。一方、火炎高さが火源寸法より非常に小さくなると、火炎先端から「火炎全体を見渡すことができなくなる」から、火炎高さは、もはや火源全体の発熱速度には直接依存せず、発熱密度、即ち $Q/D^2$ に支配されるようになる予想できる。(1) 式から、 $L_f \propto Q^{*n} \cdot D \propto (Q^n/D^{5n/2-1})$ という関数形を仮定して、これらの予想が満足されるように $n$ の値を決めると、



i)  $Q$ が $D$ に比して大きい場合,  $n=2/5$

$$L_f/D \propto (Q/D^{5/2})^{2/5},$$

すなわち

$$L_f \propto Q^{2/5} D^0 \quad (2)$$

ii)  $Q$ が $D$ に比して小さい場合,  $n=2$

$$L_f/D \propto (Q/D^{5/2})^2,$$

すなわち

$$L_f \propto Q^2 \cdot D^{-4} \quad (3)$$

なる関係が容易に誘導される(文献2)。(2), (3)式は、火炎高さが発熱速度にどのように依存するかを示すものとして重要であるが、火炎高さが発熱速度の実験的關係を整理すると図3の通りで(文献6)、この予測が裏付けられていることがわかる。このうち、発熱速度が小さい領域で火炎高さが発熱速度の二乗に比例することが実験的に確認されたのは、Thomasのモデルが提出されて四半世紀以上たった1980年代後半のことであった(Cox, 文献7)。因みに、線火源では、発熱速度が大きいと、火炎高さは単位幅当り発熱速度の2/3乗に比例するようになるが、これも、線火源用の無次元発熱速度から(1)式に相当する $L_f/D = (Q^2/D^3)^n$ を導いたうえ、上と同じ考察を加えれば容易に誘導することができる(文献4)。こうしたモデルの考え方をフルに活用するには各種可燃物の発熱速度の測定が必要であるが、火災環境に近い開放的な雰囲気中で発熱速度が測定できるようになったのも1980年代である。それは、燃焼熱は、材料によってかなり違うかもしれないが、「燃焼で消費される酸素単位質量当たり発熱量は材料が何であっても、ほぼ13.1kJ/gで大差がない」という性質(Thorntonの法則)を活用して酸素消費量から発熱速度を推定する手法が実用化されたからである(文献8)、実は、Thomasの乱流火炎モデルも、先に述べたように、この性質を暗黙の前提としていたのである。

#### 4. 壁面上の火炎伝播現象のモデリング

固体表面上の火炎伝播は、壁などの可燃表面上に着火して、火炎に覆われる領域が徐々に拡大する現象である。この現象については、1950年代に von Karman など、流体力学分野で実績を挙げた研究者が解析を試みた(文献9)、見通しのよいモデルを得るに至らず、1968年に de Ris が提示した層流火炎伝播の熱的モデル(文献10)が、火炎伝播に関するその後の研究を方向づける役割を果たした。von Karman らは、燃料の供給機構を考慮する必要が小

さい気相火炎伝播の概念にこだわって火炎自体の挙動に注目して現象を解析しようとしたが、de Risは、むしろ、燃料供給面の拡大がこの現象の鍵であると考へて、図4のように、熱分解領域先端付近の熱収支構造を解析し、火炎伝播速度を定式化した。de Risのモデルを文章表現すれば、火炎伝播は、「熱分解領域前方の未燃表面が、火炎や個体内熱伝導などで加熱されて、ある温度(熱分解温度)に達すると、熱分解領域先端が移動する」結果として起こるわけであり、「火炎伝播速度」とは、火炎そのものの先端でなく、熱分解領域先端の移動速度として促えられる。

de Ris 以後、固体表面上の火炎伝播に関する研究のほとんどは、基本的には、この考え方に立脚している。de Ris 型の火炎伝播モデルでは、火炎から固体表面への熱流を流体力学的にモデル化し、固体内部の熱伝導方程式と連立させて、固体表面の熱収支を解くという手順になるが、層流火炎では、熱伝導が主たる伝熱過程となるため、火炎に関する運動方程式とエネルギー方程式は、式の構造・境界条件ともに本質的には同等となって、理論解析が容易かつエレガントになる(文献11,12等)。1980年頃までは、層流火炎伝播のモデル化が活発に研究され、乱流火炎伝播の研究は稀だったが、その一つの原因は、相流解析のエレガントさのためであろう。乱流火炎伝播の研究が活発になるのは1980年代中頃からである。

固体表面上の火炎伝播現象の例として、火災時に現実に起こる可能性があつて、防火安全上も脅威と考えられる典型的な場合として、壁面上方への火炎伝播を考えてみよう。

まず、壁表面付近の熱収支を考えると、図5のように、火炎・熱気流から入射熱が、鉛直方向の固体内熱伝導より遥かに大きくなるので、熱分解領域先端より上方の表面温度 $T_w$ は、高さごとに、表面入射熱流束を畳み込み積分すれば求まる。即ち、着目する高さを $x$ とすると、

$$T_w(x,t) - T_0 = \int_0^x q_w''(x,t-\xi) \cdot \phi(\xi) d\xi \quad (11)$$

$q_w''$ は表面の入射熱強度である。入射熱に対する表面温度のインパルス応答 $\phi(t)$ は、壁が半無限固体で近似できるものとすれば、 $\phi(t) = 1/(\pi k \rho c t)^{1/2}$ である。時刻 $t$ における熱分解領域先端の位置は、(11)式の $T_w$ に着火温度 $T_{ig}$ を代入して、

$$T_{ig} - T_0 = \int_0^t q_w''(x, t - \xi) \cdot \phi(\xi) d\xi \quad (12)$$

とし、これを  $x$  について解けば求まる。このような問題は、畳み込み積分で入出力関係が記述される線形系モデルの応用問題としても興味深いものであるが、積分に含まれる変数である  $x$  についても、 $t$  についても implicit な表現となっている方程式を解くのは、一般論としてはなかなか困難である。この問題の解法で、一定の成功を取めたものとしては、これまでに、次の3通りが知られている。

- a) 固体を差分分割することによる数値計算 (文献 13,14 等)
- b) 特定の条件における畳み込み積分の解析解法 (文献 4,15)
- c) 火災伝播速度に関する積分方程式への変換 (文献 16,17,18,19 等)

このうち、a) は、火災伝播が起こる固体表面上にグリッドを切って、各グリッドの表面温度を、着火温度に達するまで数値計算するという、de Ris の考え方をそのままプログラム化したもので、その内容は改めて説明する必要もないだろう。原理としては最も精緻に現象を予測できるが、一般の建築材料(多くは複合材料や混合物である)では、実用的な方法では測定困難な各種物性データを必要とする。b) は、(12) が解析的に解ける条件や近似を見つけて、その解を求めるというオーソドックスなアプローチである。de Ris が求めたのも層流火災伝播の定常解であるが、定常解ならば、(12) 式に  $d\tau = dx_p / V_p$  を代入して、 $V_p$  について解けば良い。乱流については、定常解の他、指数関数的に拡大する場合等の解が得られているが、一般解が得られる見通しはたっていない。c) は、解析解によりながら、その適用範囲を拡大しようというもので、時刻  $t$  に  $x_p(t)$  の位置にある熱分解領域先端が火災先端の位置  $x_f(t)$  に達するには  $\tau$  の時間(一定)がかかると仮定して、火災伝播速度を次のように定式化する。

$$V_p = \{x_f(t) - x_p(t)\} / \tau \quad (13)$$

ここで、 $x_p(t)$  は、

$$x_p(t) = x_{po} + \int_0^t V_p(\xi) d\xi \quad (14)$$

で表され、 $x_f(t)$  も、火災高さが単位幅当たり発熱速度に比例すると近似できれば、

$$\begin{aligned} x_f(t) &= K \cdot Q(t) + x_b(t) \\ &= K \left[ \int_0^t V_p(\xi) q(t - \xi) d\xi + Q_0 \{1 - U(t - t_b)\} \right] \\ &\quad + \int_0^{t-t_b} V_p(\xi) d\xi \end{aligned} \quad (15)$$

ここに、 $Q_0$  は口火となる火源の単位幅当たり発熱速度、 $q(t)$  は、材料表面に引火して  $t$  秒後の単位面積当たり発熱速度、 $U(t)$  は Heaviside の単位関数である。炭化する材料や壁紙のように薄い材料では、下方から次第に燃え尽きてしまうことがあるため、材料が着火から燃え尽きるまでの時間を  $t_b$  とし、時刻  $t$  における燃え尽き点の到達高さ(換言すれば熱分解領域下端)を  $x_b(t)$  で表している。(13) 式に (14)、(15) 式を代入すると、Volterra型積分方程式が誘導でき、その解は、例えば、演算子法によって求めることができる。

図6は、燃焼発熱が着火直後には鋭いを生じるが、次第に発熱が低下する木材のような材料を想定して、 $q(t) = q_0 \cdot e(-t/t_c)$  なる関数形を与えてこれを解き、材料の燃焼特性を表す  $\tau, q_0, t_c$  と解の様相の関係を整理したものである(文献19)。但し、横軸は、 $K$  を発熱量に対する火災高さの比( $K = 0.02$ )として、 $a = K \cdot q_0$  で表わしてある。領域IIIは、ピーク発熱速度が大きく、着火時間も短い材料で、いったん表面に着火すると、燃焼は加速度的に拡大し、決して燃え止まらない。領域IIのうち、 $\alpha = 0$  で示す点線より下方では、着火直後は激しく燃え広がるが、いつかは燃焼拡大は減速されて燃え止まる。この領域では、室火災として著しい拡大を示すかどうかは、出火源の大きさと空間の大きさの相対的な関係次第とみて良いだろう。点線  $\alpha = 0$  より上方では、燃え広がりは最初から緩慢で、最後には燃え止まってしまう。

図6で  $x_{poff}/x_{po}$  で注記した曲線は、こうして燃え止まる高さ ( $x_{poff}$ ) を、出火源から立ち上がる火災の高さ ( $x_{po}$ ) で割った値である。このような曲線が引けるということは、「壁に着火した時、燃え止まる高さは様々な条件に影響されるが、火源の大きさに対する燃え止まり高さの比率は、材料特性だけで予測できる」ことを示している。この  $x_{poff}/x_{po}$  の曲線群に注意してみると、点線  $\alpha = 0$  より上方では曲線がまばらなのに対して、点線  $\alpha = 0$  より下方では、材料特性を表す縦横両軸のパラメータが僅かに動いても、 $x_{poff}/x_{po}$  の値は桁違

いに変化してしまっている。内装材料には品質のばらつきがあり、出火源の性質もそう高い精度では把握できないことを考えると、このことは、領域Ⅱの点線  $\alpha=0$  より下方では、いつか燃え止まるとはいつても、燃え止まる高さを、技術として受け入れられる常識的な精度で予測するのがほとんど不可能なこと、また、もし条件が僅かでも危険側にずれた場合、燃え止まる高さは桁違いに高くなってしまふことを意味している。この点で、この領域は、いくら燃え止まりが予想されるからといって、その信頼性はごく乏しいと評価せざるを得ない。図6は、放射加熱を材料表面に与えて単位面積当り燃焼発熱と着火時間を測定するだけで得られる物理量で、火災伝播性状の質的な特徴を予測できる点で冒頭に述べた防災向きの予測手法であるといえるのである。数値計算では、計算する人によほどのセンスがないと、このような特質まで把握することはできない。

### 5. 盛期区画火災のモデリング

室単位の火災性状は、火災のモデリングの中で、最初に着手された問題である。室火災性状のモデリングの必要性は、19世紀末～20世紀初期に米国で、鉄骨や鉄筋コンクリートによる高層建築が出現して、建築火災に対する技術的対策が必要になった時に発生し、1920年代には、米国の Ingberg が、火災荷重の概念に基づく耐火設計を考案している。火災時の温度はある標準曲線に従って上昇し、火災継続時間は室内の可燃物量(それを室面積で割ったのが火災荷重である)で決まるとというのが Ingberg の考え方で、現在の各国の耐火構造の規格の多くは、この考え方を踏襲している。

しかし、可燃物が多いほど火災が長く続く傾向があるとするのは良いとして、燃焼速度は可燃物量と直接には結びつかないはずである。1950年代に、関根は、室火災における燃焼速度は自然換気による酸素供給速度で決まると考えて、理論的に、開口部の面積  $A(\text{m}^2)$  と高さ  $H(\text{m})$  から燃焼速度  $R(\text{kg}/\text{分})$  を求める式

$$R = 6.0AH^{1/2} \quad (17)$$

を誘導した(文献21)。燃焼速度が(17)式で計算されれば、盛期火災の継続時間は、火災室の可燃物総量を  $R$  で割れば求まる。火災荷重は、ほぼ用途によって決まるから、建物の用途と開口の寸法体系が決まれば、火災継続時間が予測でき、構造部材に必

要な耐火性能が設計できることになるわけである。(17)式では、木材が燃焼すると仮定されているが、Thomasは、やや遅れて、力学的な着想で室火災実験の結果を次元解析的に整理し、実験式として、(17)式にごく近い  $R = 5.5AH^{1/2}$  を誘導した(文献22)。さらに川越・関根(1963, 文献23)は、火災盛期を対象として、室の熱収支式にこの関係を代入して、火災室の温度変化の様相を計算するプログラムを開発した。これは火災の進展過程をシミュレーションして一定の成功を収めた初の試みであり、コンピュータを火災研究に応用したおそらく最初の研究であったが、これによって、火災時の室内温度は、開口条件などによってかなり異なることが明らかになってきた。以後、 $AH^{1/2}$  は、火災盛期性状を支配する基本的なパラメータとして、換気因子なる呼称で知られている(図7, 文献24)。

関根-Thomasのモデルは、多くの実験によって支持されたが、これらの研究が発表された1950年代末期は、欧米で火災現象の研究方法が試行錯誤的に模索されていた時期であった。ロケットや内燃機関相手のモデル化の考え方では火災を扱いきれないことはすでに気づかれており、この研究が、火災の工学的研究の規範として、後の火災科学の展開に及ぼした影響は大きい。火災盛期性状に以後の研究のほとんどは、燃焼が換気に支配されない条件にも適用できるように修正、精緻化するといった性格のものになっているが、この方向のモデルの研究は、むしろ、こうしたモデルで予測される火災性状・加熱条件を入力条件として、構造部材の高温挙動や煙流動性状を予測するモデルの開発など、防火安全技術の工学的形成を指向する分野で活発になっている(例えば、文献25, 26, 27)。

### 6. おわりに

本稿では、火災現象を、防災対策の特質に合うようにモデル化するには、どのようにアプローチする必要があるかについて、事例の紹介を通じて紹介した。同じ燃焼でも、燃焼を有効利用しようとする場合と火災を比較すると、同じ現象でも、予測のインプットとしてどのような情報が利用でき、何をアウトプットしたいかによって、モデル化や理論構成の方針を変えなければならないということを実感せざるを得ない。

ここで紹介したモデルは、火災安全の分野では概ね確立された考え方ということができようが、詳細

に見ると、これらで説明しきれない現象も報告されていないではない。例えば、火炎高さが(1)式のような考え方で決まるとすると、発熱速度が同じなら、燃料ガスが軽い方が重い場合より噴出時の運動エネルギーが大きくなって火炎高さが大きくなるはずであるが、 $Q^*$ が小さい領域では、むしろ、その逆になったりしている。

火炎伝播は、現在活発に研究されている分野であり、ここで述べたモデルも、確立された古典的なものというには時期尚早かもしれない。(13)式のような簡明な考え方も、最近の研究によれば、厳密に成り立つのは、解析解も得られるごく限られた場合でしかないことが明らかにされている(文献28)。このような限界が、本質的に重要かどうかは、今後に解明すべき重要な課題である。また、関根-Thomasの盛期火災モデルが実験的に検証されたといったが、比較されている実験で測定されているのは、分解速度であって、燃焼速度ではない。分解速度と開口因子の間を直接結びつける理論的根拠があるわけではないという点では、このモデルは、その評価の高さにもかかわらず、未だに厳密に検証されたわけではないのである。にもかかわらず、ほとんどの実験では、分解速度は開口因子にほぼ比例することが報告されている(例えば文献29)。その機構の正確な理解は、むしろ今後の研究課題といえよう。

#### [参考文献]

- Hottel, H. C. et al, Proceedings of the 3rd Symposium on Combustion and Flame and Explosion Phenomena, 1949.
- Thomas, P.H., Webster, C.T., Raftery, Combustion and Flame, 5, p.359, 1961.
- Cetegen, B.M., Zukoski, E.E., Kubota, T., "Entrainment and flame geometry of fire plumes", NBS-GCR-82-402, 1982.
- Hasemi, Y., Proceedings of the 1st International Symposium on Fire Safety Science, 1985.
- Hasemi, Y., Nishihata, M. Proceedings of the 2nd International Symposium on Fire Safety Science, 1985.
- 長谷見雄二、火事場のサイエンス、井上書院、1988.
- Cox, G., Chitty, R., Combustion and Flame, 60, p.219, 1985.
- Grayson, S.J., Babrauskas, V. ed., Heat Release in Fires, Elsevier, 1992.
- von Karman, T., Penner, S.S., Selected Combustion Problems, Butterworths Scientific Publications, 1953.
- de Ris, J.N., Proceedings of the 12th Symposium (Intern'l) on Combustion, 1968.
- Fernandez-Pello, A. C., Hirano, T., Combustion Science and Technology, 32, p.1, 1983.
- Fernandez-Pello, A.C., in Cox, G. ed, "Combustion Fundamentals of Fire", Academic Press, 1995.
- Delichatsios, M. A., Mathews, M. K., Delichatsios, M.M., Proceedings of the 3rd International Symposium on Fire Safety Science, 1991.
- Mitler, H.E., Steckler, K.D., "SPREAD - A model of flame spread on vertical surfaces", NISTIR 5619, 1995.
- Hasemi, Y., Yoshida, M., Nohara, A., Nakabayashi, T., Proceedings of the 3rd International Symposium on Fire Safety Science, 1991.
- Saito, K., Quintiere, J.G., Williams, F.A., Proceedings of the 1st International Symposium on Fire Safety Science, 1985.
- Karlsson, B., Modeling fire growth on combustible lining materials in enclosures, Ph.D Thesis, Lund University, 1992.
- Baroudi, D., Kokkala, M., VTT Publications 89, 1992.
- Hasemi, Y., Yoshida, M., Yasui, N., Parker, W.J., Proceedings of the 4th International Symposium on Fire Safety Science, 1994.
- Ingberg, S.H., Quarterly of NFPA, Vol. 22, 1928.
- 関根孝, 建築研究報告, 第27号, 1959.
- Thomas, P.H., Fire Research T.p., FRS, No. 7, 1967.
- Kawagoe, K., Sekine, T., BRI Research Paper, 11, 1963.
- Harmathy, T.Z., Fire Technology, Vol. 8, 1972.
- Mitler, H.E., Rockett, J. A., NBSIR 87-3595, 1987.
- 田中哮義, 日本火災学会論文集, 第29~30巻, 1979, 1980.
- Hagglund, B., FOA Rapport C 20673-2.4, 1986.
- Delichatsios, M.A., Delichatsios, M.M., Chen, Y., Hasemi, Y., Combustion and Flame, Vol.102, p357, 1995.
- 大宮喜文, 佐藤雅史, 田中哮義, 若松孝旺, 日本建築学会構造系論文報告集, 472号, 1995.

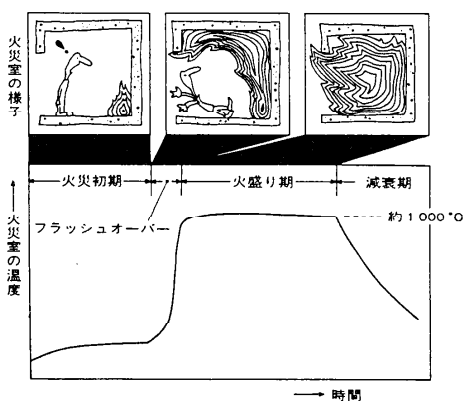


図1 室内の火災の拡大の様子

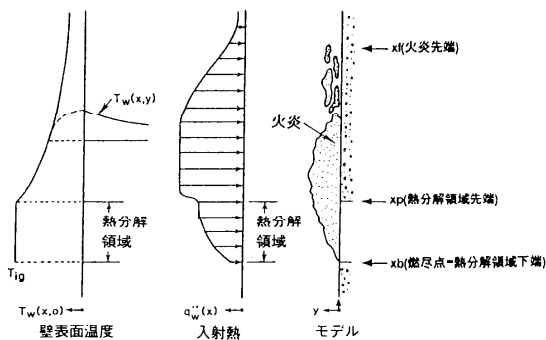


図5 壁面上の上方火炎伝播の熱的モデルの考え方 (文献4)

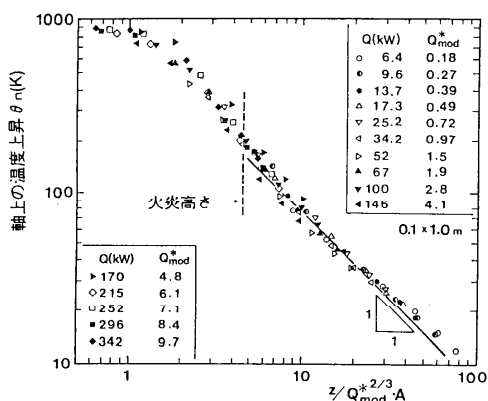


図2 線火源上の火炎軸上温度と  $Q_{mod}^{*2/3} \cdot A$  で無次元化した高さ  $z$  の関係 (Aは火源の幅、文献5)

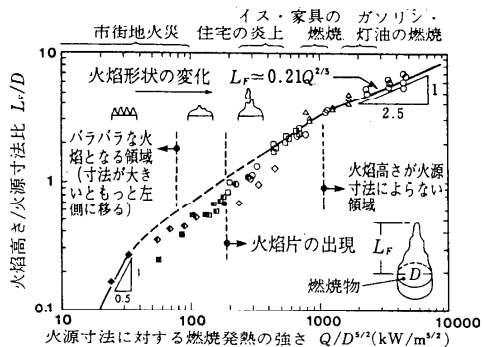


図3 発熱速度と火炎高さの関係 (文献6)

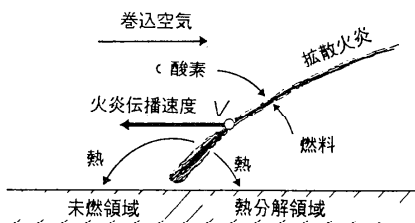


図4 de Risの固体表面火炎伝播モデルの考え方 (文献10)

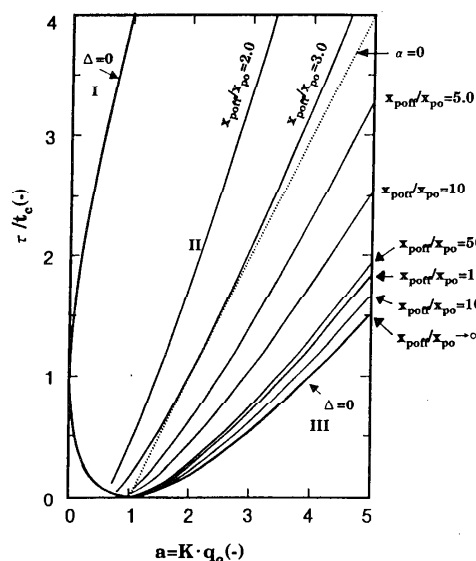


図6 火炎伝播性状の分類 (Baroudi-Kokkala diagram) (口火となる火源が持続する場合)

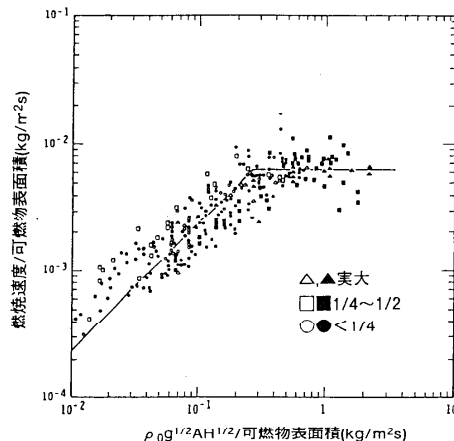


図7 開口因子  $AH^{1/2}$  と燃焼速度の関係 (Harmathyによる、文献24)

## 1996年のモンゴル国の 森林・草原火災の調査結果概要

1996 Mongolian Forest and Steppe Fires

山下 邦博 (消防庁消防研究所)

Kunihiro YAMASHITA (National Research Institute of  
Fire and Disaster)

### 1. はじめに

モンゴル国において1996年2月下旬から6月初旬にかけて多数の大規模の森林・草原火災が発生し、広い範囲が長期間にわたって燃え続けた。全焼損面積は1000万ha以上にも及び、世界の森林・草原火災と比較して記録的な大きさとなった。モンゴル国は1992年2月に新憲法を制定し、国名をモンゴル人民共和国からモンゴル国に変更し、社会主義国家から自由民主国家へ移行した。政治の民主化と経済の自由化を目指した改革が急激に進んでいるものの、過去に物資の提供の大半を依存してきた旧ソ連の崩壊により、工場用機械設備、パーツ、日用品及び石油製品の供給が激減し、これによってモンゴル国の産業は大打撃を被った。さらに、物資不足と価格自由化が重なって物価が高騰し、国の経済と市民生活が圧迫されてきた。大規模の森林・草原火災がこのような状況下で発生したために、火災が国民に与えた影響は甚大であり、わが国にも消防技術協力の打診があった。この打診に対応すべく7月中旬にモンゴル国に赴き、森林・草原火災の発生状況、消防活動状況、地形や水利事情等について調査を行なった。ここではその調査結果の中から主に森林・草原火災の発生状況と消防活動状況について紹介する。

### 2. モンゴル国の自然環境

#### 2.1 地勢と植生

モンゴル国は、中央アジア高原に位置し、東西2392km、南北1259kmにのびる細長い形をなし、国土面積は156万6500km<sup>2</sup>で日本の約4倍の面積を有する。国土の80%は標高1000m~3000mにあり、平均標高は1580mである。地形は、ほぼ北部と西部の山岳地、南東部の平原、および全土に散らばる小丘によって構成されており、そのほとんどは草原でおおわれている。山岳地には森林が、また南部の「ゴビ」には砂漠がみられる。

おもな山岳地は、西部のモンゴルアルタイ山脈、北部のフブスグルの山々、中央部のハンガイ山脈とヘンタイ山脈、そして、南部のゴビアルタイ山脈で

ある。山地は全体的になだらかな地形をしており、また、降水量が比較的多い北東斜面は樹木でおおわれているのに対し、南斜面には樹木はない。ヘンタイ山脈は当国の北東部に位置し、国土の河川を北極海にむかう河川、太平洋にむかう河川、中央アジアの閉鎖性排水盆地に流れる河川とに分けられる。この山脈は高山型の地形がなく、丸みを帯びた山々が連なり、徐々に高度を下げて東部の平原へとつながっている。

モンゴル国の植生帯は6つに分けられる。植生帯の第1は高山帯で、ハンガイ、モンゴルアルタイ、フブスグルの山々の峰が該当する。ここには樹高の低いまばらな針葉樹が分布し、さらに標高の高いところには苔や地衣類からなる山地性のツンドラがある。第2は山岳・タイガ帯で、その典型的な例はヘンタイの北西斜面フブスグルの山々にみられ、20-25cmの高さの均質な針葉樹が密生しており、主なものはシベリアアカマツ、シベリアカラマツ、シベリアトウヒ、シベリアトドマツなどである。第3は森林性ステップ帯で、山の北側斜面はカラマツやカバノキの森林が生育する。これは南側斜面は常に乾燥しているが、北側斜面は春まで雪が残るためである。直径28cm以上の100年生の森林が伐採され、建築用材として利用されている。これらの森林は、低温と乾燥のため成長が遅く、また更新もむずかしいので、残されているわずかな森林の保存が課題とされている。第4は純草原帯で、東部の平原が最も典型的で、ハネガヤなどからなる草原が広がっており、部分的にマメ科の灌木も生育している。第5は砂漠・ステップ帯で、「巨大湖」と「湖谷」の陥没地形を通して中央ゴビに分布している。第6は砂漠帯で、ゴビ(モンゴル語で、草の成長が悪い荒地の意味)地方に分布し、おもに岩石砂漠からなり、砂の砂漠はごく小面積を占めるにすぎない。ゴビの植物群落は貧弱で、植被も極めて少ない。

#### 2.2 モンゴル国の気象

モンゴル国土のほぼ中央を年平均気温零度の線が横切っており、永久凍土の分布の南限と一致している。この国の天候は典型的な大陸性気候のため、空

気はたいへん乾燥している。春にもっとも乾燥し、湿度が50%以下になる。一方、気温の低下する冬と、降水量が多くなる夏には湿度が高くなる。

降水量は季節によっていちじるしく変動し、一般に、夏の三か月間に年降水量の70%が降り、冬にはわずか数%しか降らない。1996年の森林・草原火災はモンゴル国北部で発生しており、これらの火災は北部地域の気象条件に影響されたと考えられる。北部地域の気象データが入手できなかったことから首都ウランバートルのデータから1996年の前半期の気象条件の特徴を検討した。

#### (ア) 気温

首都ウランバートルの1月から6月までの日平均気温は月日の経過とともに気温が上昇しているが、かなりの変動がみられる。平年(平均)と比較して気温が高い期間は1月上旬、4月下旬、5月中旬から6月上旬までで、気温が低い期間は2月中旬、3月中旬から4月中旬にかけての時期である。平年では日平均気温が0℃以上になる時期は4月上旬以降であるが、1996年では4月の初めの気温は低く、約2週間遅れて平均気温が0℃以上になった。4月下旬には気温が10℃以上のこの時期として暖かい日が続いた。

#### (イ) 湿度

首都ウランバートルの1月から6月までの日平均湿度の変化を図1に示す。平年では1月の湿度は約80%で、月日の経過とともに減少して5月中旬に最低となり、6月以降は増加する傾向にある。5月中旬には湿度は50%程度まで下がる。1996年の1月上旬の湿度は70%で平年よりも10%も低く、湿度が平年よりも20-30%も低い時期が半年近くも続いた。特に3月初旬から6月下旬にかけて湿度が低い。その中でも火災が多発した4月と5月の2か月間をみると平均湿度は30%となり、湿度が60%以上の日はわずかに3日で、30%以下の日は29日もあった。このように4月と5月では湿度が異常に低い日が続いた。

#### (ウ) 降水量

首都ウランバートルの降水量は1月から3月には少なく、4月から6月にかけて増加するが、月別降水量はたかだか10mm前後である。1996年の降水量をみると1mm以上の降雨のあった日は、1月に4日、2月に0日、3月に2日、4月と5月ではわずかに1日であった。このように1996年には雨の降る日がほとんどなく、降ってもわずかに数mm程度の少ない雨量であった。

#### (エ) 降雪量

降雪量に関するデータは入手できなかったが、民

間防衛庁の職員の話では1996年には降雪が少なく、平年の半分以下であったという。たとえ降雪があっても風に吹き飛ばされて部分的に吹溜りができるが、平坦地には積もらないとのことであった。降雪があれば森林・草原火災はほとんど発生しない。積雪のない時期が長く続き、火災が発生しやすい気象条件が形成された。

### 3. 森林・草原火災

#### 3.1 モンゴル国全土の火災発生状況

1996年のモンゴル国の最初の森林・草原火災は2月23日に首都ウランバートルから東方600-900km離れたドルノド県で発生した。この年の4月10日から全土で暖かい日が続く、強い風が吹き始めた。その結果、前年と比較して多くの森林・草原火災が発生し、速いスピードで広い範囲に燃え広がった。4月25日の時点で、130件以上の火災が12県95郡で発生し、一部の火災は鎮圧できたものの44件の火災はまだ燃え続けた。5月3日から6月10日現在までの全火災の移り変わりを表1に示す。この表によると5月3日までに発生した火災は275件であり、フブスグル県、ブルガン県、アルハンガイ県、セレンゲ県、トフ(中央)県の順に多い。一方、5月4日から6月10日までの期間内に発生した火災は108件で、この期間中に発生した火災はセレンゲ県に圧倒的に多く、ついで、フブスグル県、中央県、ザブハン県、ヘンタイ県の順である。このように火災の多発場所は月日の経過とともに異なった。最終的にすべての火災を鎮圧するまでに3か月以上かかった。

全火災の発生場所は図2に示す通りで、赤色の箇所が焼失範囲である。火災の発生場所はモンゴル国の北部全体にはほぼ均一に分布している。火災はロシア及び中国との国境付近にも分布しており、一部の火災はロシア国内で発生し、モンゴル国に延焼してきたものもあった。逆に、モンゴル国で発生した火災がロシアあるいは中国に延焼したのものもあった。この図をみると大規模森林・草原火災の延焼方向は南西から北東、あるいは北東から南西の方向にのびている点に特徴が見られる。これは、この時期における強風の卓越風向に影響されたものと推定される。ドノルド県の火災は5月3日までに発生したものが殆どであるが、この地域の火災は異常に広く延焼した。一方、モンゴル国北西部のウブス県やフブスグル県の火災1件あたりの焼損面積は比較的小さい。この違いは、草原火災と森林火災、地形によるものと考えられる。モンゴル国全土の火災は、6月10日時点でほぼ鎮圧できた。6月5日に集計し

た各県の火災の増加状況を表1に示す。火災による死者は25名であり、ドルノド県(9人)、セレンゲ県(6人)、ウブス県(6人)、アルハンガイ県(3人)、中央県(1人)で死者が出た。負傷者は61人でヘンタイ県(37人)、ドルノド県(22人)、セレンゲ県(1人)、ブルガン県(1人)で発生した。移動式建物ゲルの焼失は175棟で、ドルノド県(80棟)、ヘンタイ県(44棟)、ブルガン県(37棟)、セレンゲ県(15棟)、ウブス県(13棟)、フブスグル県(13棟)の順に多い。全焼損面積の大きい県は、ドルノド県、ヘンタイ県である。これらの県では草原の割合が高い。一方、全焼損面積の中で森林の割合が高い県は、ザブハン県、セレンゲ県、ブルガン県、フブスグル県、ホルホン県などである。

### 3. 2 セレンゲ県の森林火災

#### 3. 2. 1 セレンゲ県

セレンゲ県は人口約10万人、面積4400万haで、ロシア国境に近く、17の郡を有する。県内の中央部をハンガイ山脈やヘンタイ山脈を源とするセレンゲ川、オルホン川、ユロー川などが流れ、これらの川は合流して流れバイカル湖まで達する。この県は農業県であり、全国の麦の50%を生産している。そのほかにこの県では石炭、金、鉄などの鉱物も生産している。全面積の60%は森林であり、木材工場が多い。北京からモスクワに通じるシベリア鉄道がセレンゲ県を走っており、県都スフバートル市はいちばん国境に近い町で、ロシアとの交易で栄えてきた。この地域では植林を専門に行う会社を中心となて1年間に14km<sup>2</sup>の植林を行い、この18年間に180km<sup>2</sup>の広い範囲にわたって植林を進めてきた。

#### 3. 2. 2 火災拡大状況と消防活動

この県では3月2日から6月20日までに全部で69件の火災が発生した。スフバートル市及びアルタンブラク地区の近くで発生した。この地域の標高は700m-1500mで、全体的に緩やかな斜面である。火災の焼失面積は16万haに及び、香川県に匹敵する。図中の左側の火災は、ゲル内に150mあったストーブの灰から出火したもので、その火災により14,000haの範囲が焼失した。右側の火災は、ロシア国内で発生したものがモンゴル国内に延焼したものである。この火災の南側の焼け止まり線の位置は不明である。前述のストーブから発生した火災は速く拡大した。

5月13日にはこの地方で平均風速14.4m/sの強風が吹いた。消火活動に当たった人の話では、2時間に22kmも拡大した。単純に計算すると平均延焼速度は時速11kmに達する。火災は強風下で一

気に拡大し、燃焼形態はすぐに地表火から樹冠火となり、手がつけられなかった。初期消火の時期を失し、火災が大規模化した理由は、草丈が60-70cmもあり、異常に乾燥し、しかも強風が吹いたことによる。

消火活動は300人程度の地域住民と県、郡、民間防衛庁の職員及び林業関係者も加わって行った。移動式建物(ゲル)と家畜を寒さから防ぐための畜舎を守ることに重点をおいて延焼防止を図った。活動内容は、トラクターによる臨時防火線の構築、迎え火、火たたきなどである。使用した機具は車30台、トラック7台、馬28頭、トラクター数台である。牧民は日常的に馬を使っており、それを火災が発生する前のパトロール、火災が発生した後の通報や消火活動に利用した。アルタンブラク地区からユロー村に通じる道路があり、この道路に沿って地域住民や民間防衛庁の職員が消火活動を実施した。そのために、この道路で火災の拡大を阻止できた。この地域では飛び火火災が発生して火災の拡大が速く、6名の地域住民は消火活動中に火に囲まれて死亡した。焼失した面積の80%の樹木は回復できないほどの被害を受けた。アルハンガイ県など火災発生前ではモンゴル国気象庁が消火のために航空機や砲撃砲により空中に触媒を散布して雨を降らせた地域もあった。この方法は高価であり、火災が大規模化した地域では上空まで火災煙が到達し、降雨戦術の効果がでなかった。セレンゲ県では降雨作戦を実施しなかった。

森林草原火災の消火活動の指揮・命令は県知事等が行なうが、複数の県にまたがって延焼する場合には民間防衛庁が統括して行なう。森林・草原火災の消火は活動範囲が広範囲であるために、民間防衛庁の職員のほか役場の職員、付近住民、警察消防隊、森林関係者が行なった。森林火災が多発する期間は、民間防衛庁、自然保護庁、気象庁が空中からのパトロールを行なってきた。従来には湿度が30%以下になるとヘリコプターを用いたパトロールが行なわれるが、経済状態が悪化してからはその回数は少なくなった。火災通報は現地の発見者からの通報に依存している。火災現場が人家から遠い場合には広範囲に燃え広がってから発見されることが多かった。また、火災を発見しても通報する手段がないために火災が拡大した。

民間防衛庁の職員は、車両で現場に行くかあるいは飛行機・ヘリコプターで現場付近に降下して消火活動を実施する。民間防衛庁の活動隊は常にパラシュートの降下訓練を実施していた。北部森林地域では河川があるが、氷がとけるのは4月半ば以降で



あり、それ以前では叩いて消す方法を取っている。消火活動は、棒の先にゴム製シート等を結んで火を叩いて消す方法、背負い式の水のうを使う方法、スコップによる土かけ消火が主であった。機材が不足しているために、参集した住民の多くは木の枝や衣服を脱いで叩いて消火した。森林部分の消火は空中からの消火が必要で有ると思われるが、モンゴル国では空中消火体制を確立していない。草原部分の消火は広範囲で有ったり、風速や風向、乾燥度、及び斜面等の地形により延焼速度が左右される。森林部では車両が進入するための道路は林道が整備されておらず、また、風倒木があり、進入出来なかった。このため、森林火災の消火は人海戦術でも困難で、燃焼域が森林の外にある草原に達してから消火する方法を採用した。火叩きでは完全消火はできず、人家、家畜小屋への延焼を食い止めることに重点をおいた活動が行なわれた。

焼け止まり要因は、人力による消火もあるが、降雨や自然鎮火が大部分で、河や道路で焼け止まった区域は全体の20%位であった。森林草原火災が大規模となった場合には人工降雪、降雨の方法も取られた。この方法は経費の問題もあり、実施回数は少なかった。森林内に防火帯が設けられることもあるが、維持管理がされないために、延焼阻止の役目を余り果たさなかった。

なお、森林・草原火災用に民間防衛庁が装備している資機材は次の通りである。

- (ア) 背負い式水のう
- (イ) 送風型消火器
- (ウ) 迎え火用火付け器
- (エ) 斧、釜、鋤、
- (オ) 刈り払い機
- (カ) チェーンソー
- (キ) 火叩き棒、熊手

日本と異なってモンゴル国では火災防御のために迎え火を実施しており、それに必要な火付け器も不足していた。また、消防車両は絶対数が不足しており、あっても1970-80年代のもので老朽化しており、使用できるものは少なかった。

#### 4. まとめ

1996年のモンゴル国の森林・草原火災について関係機関におけるヒアリングと火災現場調査を行なった。調査期間が短くて詳細なデータを入手できなかったもののヘリコプターを利用した広域の調査を行い、被害地域の面積、地形、道路・水利事情を確認し、火災発生状況と消防活動状況を把握することが出来た。以下にその結果の概要を示す。

#### (1) 火災発生状況と地域性

2月から6月にかけてモンゴル国の北部・東部で多数の大規模の森林・草原火災が発生した。最初の草原火災は2月23日にドルノド県で発生し、その後、4月10日以降に急激に暖かくなり、乾燥した強風が吹いて森林・草原火災が急増した。火災がほぼ鎮圧できた6月10日には全火災件数は383件、焼失面積は1019万haに及んだ。

森林の多いブルガン県、ヘンタイ県、フブスグル県では森林火災、草原が広がる東部のドルノド県では大規模の草原火災となった。これらの火災の消火のために約5万人の消防隊員が出動した。火災により全国で25名の死者と61名の負傷者が出た。加えて広大な森林が焼失し、移動式建物ゲルや畜舎が焼失した。

#### (2) セレンゲ県の火災と消防活動

ロシア国境に近いセレンゲ県でも69件の火災が発生した。一部の火災はロシア国内から発生し、モンゴル国内に延焼した。5月14日には強風が吹き、飛び火火災が発生して時速10kmに及ぶ速いスピードで拡大した。この県内の焼損面積でも香川県に匹敵する広さであった。一旦延焼拡大した火災に対しては消火する人手が少なく、消火資機材としても満足なものが少なく、森林・草原火災への対応が困難であった。

#### (3) 森林パトロールの困難性

これまで湿度が30%以下になると森林火災の発生危険性が高いことからヘリコプターや飛行機により森林パトロールを行い、火災を発見後ヘリコプターで現地に行き、パラシュートで降下して消し止める方法を確立している。しかし、異常乾燥と強風が重なる日が多くあったもののヘリコプターや飛行機によるパトロールは、高い経費と燃料不足のために数回程度しか実施できなかった。

#### (4) 必要な消防資機材

モンゴル国では森林・草原火災に対して消防用資機材の整備、消防組織の増強、消防関係法令の整備、人材の育成を図ろうとしている。広大な森林と草原で火災に対応するには早期に発見し、確実に通報できる無線の整備と森林・草原火災に適した背負い式水のう(ジェットシュータ)、送風型消火器、迎え火用火付け器などを整備していくことが必要である。

#### 参考文献

- (1) 外務省監修：アジア・オセアニア各国要覧：東京書籍
- (2) 青木信治・橋本勝：入門・モンゴル国：平原社

表1 火災の発生経過（6/10現在） [件数]

県名 \ 月日	5/3	5/8	5/20	5/27	5/30	6/4	6/10
ドルノド県	16	16	16	16	16	16	16
ヘンタイ県	26	27	28	28	32	33	33
中央県	21	23	29	30	32	32	32
ブルガン県	47	47	49	51	51	51	53
セレンゲ県	28	31	39	41	42	43	69
フブスグル県	70	70	76	85	86	87	87
アルハンガイ県	30	32	33	35	37	37	37
オボルハンガイ県	3	3	3	4	4	4	4
ザブハン県	10	10	12	19	21	21	21
ウブス県	16	17	18	21	21	21	21
その他	5	8	9	10	10	10	10
計	272	284	312	340	352	355	383

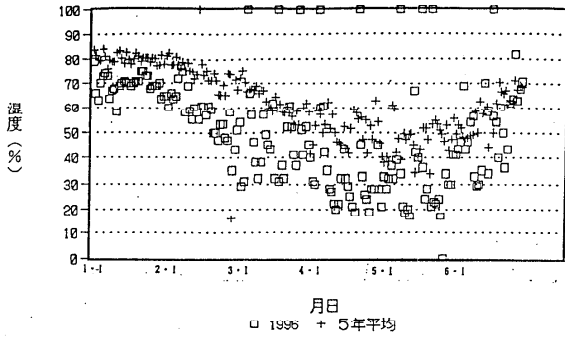


図1 ウランバートル市の日平均湿度  
(過去5年平均)

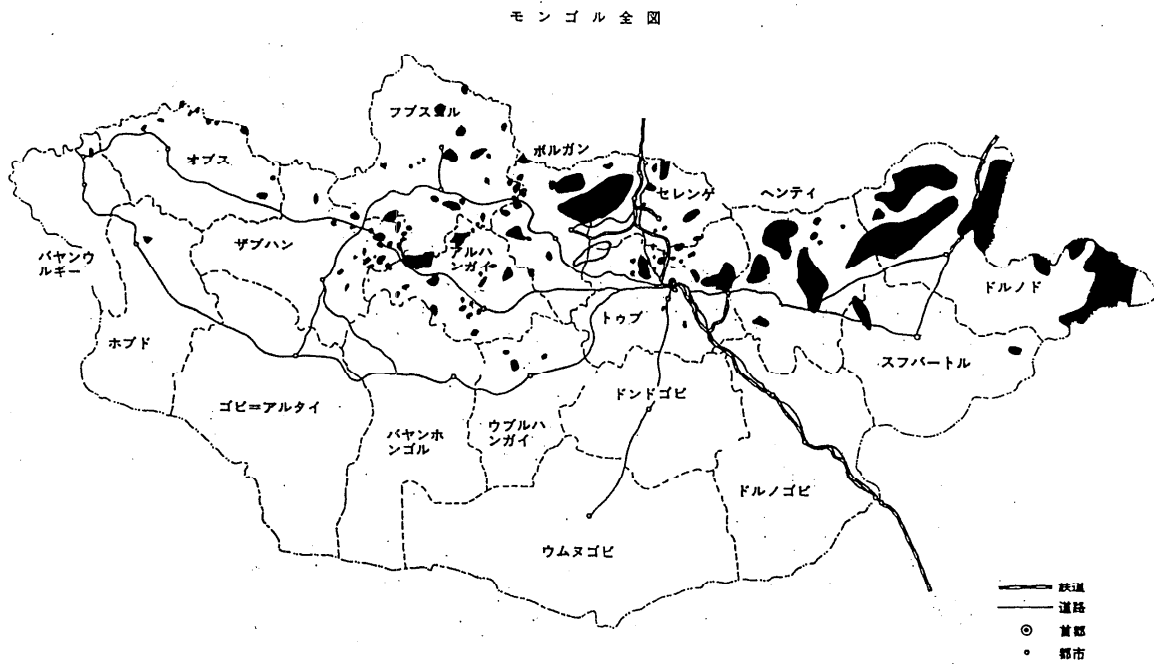


図2 森林・草原火災の発生場所

実験とコンピューター・シミュレーションによる  
火災旋風の研究

Experimental and Numerical Study of Fire Whirls

佐藤晃由 (消防研究所),

K.T. Yang (University of Notre Dame)

Kohyu SATO (National Research Institute of Fire and Disasters)  
and K.T. YANG (University of Notre Dame)

1. はじめに

広域森林火災や震災等による大規模火災では、火災旋風が発生することがあり、かつて関東大震災<sup>1)</sup>やハンブルグ等の爆撃火災<sup>6)</sup>において大規模な被害を生じたことが知られている。このような大規模な火災旋風には、広域的な地形の影響や前線等の気象配置、さらに地球の自転に伴うコリオリ力等が影響するが、実験室における研究では、このような大規模な外力による火災旋風の再現は困難である。

このような超大規模な火災旋風ではなく、比較的小規模な火災の場合でも、瞬間的に火災旋風が発生し、燃焼を加速することが知られている<sup>4, 10, 16)</sup>。このような各種火災旋風に対し、火災旋風の発生・拡大機構を解明するため、これまで実験室において火災旋風に関する各種模型実験(参考文献参照)が行われてきた。それらは概ね次の3種からなる。

(1) 回転系

モーターにより回転する垂直円筒金網の中心に置かれた燃焼炎に対し、回転金網により生じる空気流により人工的に回転気流場を作用させ、炎の旋回を生じさせる<sup>8, 25, 26)</sup>。火災旋風を形成させるための円筒金網の最適回転速度等が調べられている。しかし、この系の人工回転気流場での火災旋風が、実際のどのような状況の火災旋風現象へ対応するか、やや現実感が少ない。

回転金網による回転気流ではなく、燃焼炎をのせた台を回転させる方法で旋回炎を形成する方法も用いられた<sup>26)</sup>。この回転系では、地球の自転によるコリオリ力の対応も考えられるが、規模の差異の点において難がある。

(2) 静止ダクト系

垂直に立てた円筒または角型ダクトの床の中心に燃焼炎を置き、円筒・ダクトの側面にガイドベインと複数の縦スリットを設ける。燃焼炎の上昇気流に伴い、このスリットから、水平方向の燃焼炎への自己誘導巻き込み気流が流入する。ガイドベインの角度により、この自己誘導気流は燃焼炎の接線方向に回転力を発生させ、旋回火災炎が生じる<sup>13, 14, 18, 19, 33)</sup>。

<sup>34)</sup>。この場合も、円筒やダクト内での火災が実際のどのような状態に対応するかが問題である。

しかしながら、筆者らの垂直角型ダクトの研究で<sup>38, 39)</sup>では、4枚の垂直壁の間に隙間を有する垂直ダクトから、1枚または2枚の壁を取り去った2枚または3枚の壁(U型またはL型配置)の中に置いた燃焼炎の場合にも、火災旋風が発生することを明らかにした。このようなL型またはU型に配置された建物間で火災が発生する状況は現実的にも有り得る。

(3) 外気風系

複数の独立した燃焼炎または単一の燃焼炎に送風機により、人工的に外気風を作用させると、火災旋風が発生する<sup>19, 20, 32)</sup>。関東大震災の被服廠跡地<sup>1)</sup>に対応させ、L型の燃焼域を設け、これに送風する場合も行われた。しかしながら、これらの場合、火災旋風は燃焼炎から外れた風下側に発生し、火災旋風の発生する場所は偶発かつ瞬間的となり、再現性や継続時間に難がある。

このように、火災旋風の基礎的現象は、各種模型実験で把握できるとしても、実際の規模の火災旋風とは相似則の観点から規模の差異が大きすぎる難点がある。このため、大規模かつ実際の状況に対応する火災旋風の諸現象の解明には、コンピューター・シミュレーションが有効である。

これまで、筆者らは、上述のように実験の再現が困難である大規模火災旋風現象をコンピューター・シミュレーションにより解明することを目的とし、その基礎として、上記の小型模型実験のうち、垂直円筒、及び燃焼源を囲む4枚の垂直壁により構成される角型ダクトとそれぞれの板の間隙から流入する空気流により形成される旋回火災炎の性状を実験及び3次元数値シミュレーションにより調べてきた。さらに、実際の状況に対応し、L型またはU型に繋がる建物の壁付近で発生する火災旋風の性状を調べてきた。ここでは、これまでの研究の結果と、ダクト内火災旋風の発生・拡大及び伝熱機構を検討した結果について述べる。

## 2. 垂直円筒・角型ダクト模型実験及び数値シミュレーション

### 2.1 垂直円筒内の火災旋風

ここでは、高さ90cm x 直径36cmの垂直円筒を用い、円筒表面に幅4cmのスリットを4箇所対称に設け、スリットにおけるガイドベインにより、円筒の床中心においた燃焼炎の接線方向に流入気流を向け、炎の回転を生じさせた。図1に、直径8cmの容器に入れた灯油燃焼炎による旋回炎の状況を示す。また、図2に外気中での自然燃焼炎の場合と円筒内での旋回燃焼炎の場合の燃料重量減少の時間変化を示す。外気中とダクト内での炎の長さ、及び燃料蒸発速度は約3倍程度異なる。さらに、図3に、この垂直円筒内での旋回熱気流の3次元数値シミュレーション結果を示す。

### 2.2 垂直角型ダクト内の火災旋風

図4に垂直角型ダクト内(H=1.8m, 断面:69cm x 69cm, 間隙=10cm)で発生する灯油(容器径D=8cm)の旋回燃焼炎の形成過程(写真は壁の1枚のガラス越しに撮影)を示す。燃焼炎ははじめ、約3秒の周期で軸が傾いたまま回転し、液面温度と炎の温度上昇とともに、急に垂直に直立した旋回炎を形成する。この炎の軸が傾いた回転の周期はヘプタン炎では、やや早く2.5秒程度で灯油よりやや早く、安定直立旋回炎に至るまでの時間はヘプタンの方がはるかに早い。

次に、耐火レンガを積み重ねた角型ダクト(断面:37cm x 37cm)の壁の間に2.5cmずつの間隙を設け、ダクトの床の中心にn-ヘプタンを入れた容器(D=12cm)を置き、壁の高さ(H)を変えた場合の旋回燃焼炎の状況を図5に示す。炎の周囲が壁で囲まれ、その隙間から流入する空気により回転力を与えられると安定に旋回を継続し、図6に示すように燃料蒸発速度も増加する。

図7に高さ180cm、断面:75cm x 75cmの角型垂直ダクト(各板の間隙=5cm)の床中心に、n-ヘプタンを入れた容器(D=12cm)を置き、ダクトの間隙を変えた場合の旋回燃焼炎を示す。この場合、炎の先端はダクト上方にまで伸び、外気中自然燃焼の場合の約3.5倍になっている。この場合、炎の温度、輻射量及びプリュムの上昇速度、間隙から流入する空気の数値も同様に増大している。隙間の大きさを25cm、40cm、55cmに広げた場合、旋回炎の長さは短くなる。

図8に、井桁組み木材クリブの自然燃焼炎とダクト内旋回燃焼炎の状況を示す。また、図9に両者の場合の木材重量減少速度の比較を示す。木材燃焼の

場合、外気中自然燃焼の場合に比べて、炎の長さ重量減少速度は約2倍程度の火災旋風を形成している。

さらに、これらの模型実験に対応する数値シミュレーションを行った角型ダクトの状況を図10に示す。図11に実験(図7のgap=5cm)で測定された直立旋回燃焼炎の軸上温度分布(o印)とシミュレーション結果(実線)を示す。図12に水平断面の温度及び風速分布の数値計算結果を示す。

### 2.3 ダクト内での火災旋風の発生・成長機構の考察

筆者らは、上述の研究結果に対応して、火災旋風の発生・成長機構を次のように考察した。

[着火直前及び直後]

(1) 液体燃料(灯油、n-ヘプタン)を入れた容器を垂直角型ダクトの中央に置き、燃料に着火。

(2) 着火直後は、外気中での自然燃焼の炎の状態と同じ。

[燃焼の幼少期]

(3) ダクトからプリュムの流出に伴い、ダクト4隅の隙間から、炎へ巻き込まれる空気が流入する。

(4) この時点では、隙間から流入する気流ジェットは壁沿いに流れ、燃焼炎はジェットに引き寄せられ、炎の軸は傾き、ダクトの中心軸のまわりを傾いたまま、周期的な首振り運動を繰り返す。

(5) 灯油の場合、着火にも、着火後も、首振り回転をするまでにも、やや時間がかかる。首振り回転の周期は、同じ大きさの容器に入れた灯油の場合、n-ヘプタンの場合よりやや長い。

[燃焼の成長期]

(6) 燃料温度及び炎の温度が上昇し、従ってプリュムの浮力の増加による上昇速度の増大とともに、炎へより多くの空気が巻き込まれ、隙間からダクト内へ流入する空気量が増加する。

(7) 炎への巻き込み空気量の増加とともに、wall jetの幅も増大し、炎への接線方向の力も増大するため、軸が傾いて回転していた炎は次第に直立してくる。直立に至る時間は、n-ヘプタンの場合の方が、灯油の場合よりはるかに短く、灯油の燃焼炎の温度上昇に時間がかかることを示す。

(8) 炎の中心軸のダクト中心軸に対する角度は減少し、瞬間的に、炎は直立し、回転する。

(9) 炎の温度はさらに上昇し、密度の低下とプリュムの浮力の増加、及びダクト内への隙間からの流入空気量が増大する。同時に、炎から放出される輻射の量も増大する。

(10) 炎の温度上昇に伴う炎から燃料液面へ流入する輻射及びダクトの壁から反射し、液面へ流入する輻射の量の増大により、燃料液面の温度が上昇し、蒸

発速度が増大する。

(11) 液面付近では、蒸発した燃料の蒸気濃度が増大し、炎は大量の未燃状態の燃料ガスを含んだまま上昇する。このため、液面に近い炎基部の温度はやや低い。

[安定燃焼期]

(12) 外気中での自然燃焼の場合、上方に行くに従い、速度は減少し、拡散していくが、ダクト内での旋回燃焼では、ダクト隙間から流入する空気が炎の接線方向に対して、巻き込まれ炎は回転しながら上昇し、炎は拡散しない。しかし、周囲の壁が低い場合、旋回炎の上方は拡散する。

(13) 燃料の蒸発速度は、n-ヘプタン（容器径D=12cm）の場合、外気中の自然燃焼の場合と比べて約3.5倍程度に増加する。この増加の度合いはダクト（高さ（H）=1.8m、ダクト断面=75x75cm）の隙間の大きさに依存し、3cmから15cmの間で最も大きい。隙間が30cmでは、2.5倍程度になる。また、灯油の場合、n-ヘプタンの場合よりやや小さい。

(14) 炎表面（flame sheet）において、未燃ガスと巻き込み空気が混合し、炎の長さは著しく長くなる。燃料の蒸発速度の増加と炎の長さは、ほぼ比例し、蒸発速度が3倍の時、炎の長さも自然燃焼の場合の約3倍になる。

(15) ダクトの隙間から流入する空気量は、隙間底部で大きく、上方へ行くに従い小さくなる勾配になっている。このため、炎の回転はねじりを生じ、ヘリカル構造になる。

(16) 固体燃料（井桁組み木材クリブ）の場合、重量減少速度と炎の伸長の度合いは、液体燃料の場合より小さい（n-ヘプタンの3.5倍に対して、木材では2倍）が、木材燃焼炎でも旋風が生じ、燃焼が加速される。

### 3. U型及びL型壁付近で発生する火災旋風

上記の垂直円筒や角型ダクト内での火災旋風は、実際の市街地火災の状況への対応が乏しいことから、周囲が囲まれた4方向の壁から1枚または2枚の壁を取り去り、より実際の状況に近いL型及びU型の壁付近で発生する火災旋風について調べた。実験は、20m x 20m x 10m（H）の建物内に、高さ1.8m x 0.9mの板（木材または不燃ボード）でL型またはU型の壁を垂直に置き、隙間を約5cmにした。

L型及びU型の壁の場合、床中央及びその付近のほとんどの場所では、火災旋風は発生しなかった。特に、壁が開いている側のU型、L型の壁の隅付近で旋回燃焼炎が発生し、10秒から30秒程度

安定的に直立し、その後大きく傾いたまま回転したり、自然燃焼と同様に燃焼した。また、再び直立し旋回を開始した。まれに、1枚の壁の場合にも短時間火災旋風が発生した。

図13に、1枚の壁（手前側）を取り除いたU型の壁の右手前隅において、直径12cmの容器でヘプタン炎の旋回燃焼炎が形成された場合と、2枚の壁を取り除かれたL型の壁の右手前隅において、直径12cmの容器でヘプタン炎の旋回燃焼炎が形成された場合の状況を示す。図14にU型の壁付近における旋回熱気流のシミュレーション結果を示す。

図15に、L型壁（H=115cm, W=92cm）付近に20cm x 20cmの角型容器でヘプタンを燃焼させた場合の火災旋風の各種形態変化を示す。炎の高さは最大200cm程度まで伸び、かなりの轟音を発生する。継続時間は概ね数十秒で、旋回燃焼が自然燃焼に移行したり、再び直立旋回燃焼に移行したりした。

周囲が囲まれた角型ダクトの場合、実際の建物の配置とその内部の空間での火災発生と火災旋風の形成は現実性が少ないが、U型やL型の建物配置は都市内に数多くあり、実際にも高層ビル市街地ではビル風が吹いており、このような状況で大規模火災が発生すれば、火災旋風が形成される可能性がある。

### 4. まとめ

本研究では、垂直角型ダクト内の燃焼炎について、模型実験を行い、火災旋風の性状及び形成過程を考察した。さらに、コリオリ力や気象的圧力分布を考慮に入れた大規模火災旋風のコンピューター・シミュレーションを行うための準備として、模型実験に対応する各種数値シミュレーションを行った。

### 参考文献

- 1) 寺田寅彦：“大正12年9月1日2日の旋風について”，震災予防調査会報告，第100号戊，185（1925）
- 2) Hissong, J.E.：“Tornado Started by an Oil Fire”，Science America, December, 450（1926）
- 3) McNea, F.：“Fire Effects of Big Nuclear Bombs”，U.S. Department of Defence, Office of Civil Defence, Bulletin 3, 5（1961）
- 4) Dessens, J.：“Man-Made Tornadoes”，Nature, 193, 13（1962）
- 5) Rose, W.G.：“A Swirling Round Turbulent Jet”，J. Applied Mechanics, 29, 615（1962）
- 6) Ebert, C.：“Hamburg's Firestorm Weather”，NFPA Quarterly, January, 253（1963）
- 7) Countryman, C.M.：“Mass Fire Characteristics in

- Large Fires", *Fire Tech.*, 1, 303 (1965)
- 8) Emmons, H.W. et al. : "The Fire Whirl", 11th Symposium (International) on Combustion, The Combustion Institute, 475 (1966)
  - 9) Lee, S.L. : "Axisymmetric Turbulent Swirling Natural Convection Plume", Part1, *Journal of Applied Mechanics*, 33, 647 (1966)
  - 10) Lee, S.L. et al. : "Formation of Multiple Fire Whirls", 12th Symposium (International) on Combustion, The Combustion Institute, 265 (1969)
  - 11) Morton, B.R. : "The Strength of Vortex and Swirling Core Flows", *Journal of Fluid Mechanics*, 38, 315 (1969)
  - 12) Nielsen, H.J. et al. : "Origin and Properties of Fire Whirls", Technical Report of IIT Research Institute, Illinois Institute of Technology, 1 (1969)
  - 13) 橋房夫他 : "炎のたつまき", 日本火災学会予稿集 (春), 59 (1969)
  - 14) 山下邦博他 : "火事旋風の性状について", 日本火災学会予稿集 (秋), 36 (1969)
  - 15) Byram, G.M. et al. : "The Modeling of Fire Whirlwind", *Forest Science*, 16, 4, 386 (1970)
  - 16) Morton, B.R. : "The Physics of Fire Whirls", *Fire Research Abstracts and Reviews*, National Academy of Sciences, p.1 (1970)
  - 17) Countryman, C.M. : "Fire Whirls - Why, When and Where", Report of Pacific Southwest Forest and Range Experiment Station, Forest Service, U.S. Department of Agriculture (1971)
  - 18) 守屋忠雄他 : "火災旋風まわりの風速および圧力測定結果", 日本火災学会予稿集, 40 (1971)
  - 19) 山下邦博 : "火災旋風の発生に関するモデル実験について", 日本火災学会予稿集, 43 (1972)
  - 20) 相馬清二 : "大火災に伴う竜巻", 日本火災学会誌, 24, 55 (1974)
  - 21) Lee, S.L. et al. : "Gross Vortex Activities in a Simple Simulated Urban Fires", 15th Symposium (International) on Combustion, The Combustion Institute, 157 (1974)
  - 22) 山下邦博 : "火災旋風", 日本火災学会誌, 24, 49 (1974)
  - 23) 山下邦博 : "火災旋風の発生とその対策", 日本火災学会誌, 28, 6 (1978)
  - 24) Muraszew, A. et al. : "The Fire Whirl Phenomenon", *Combustion and Flame*, 34, 29 (1979)
  - 25) 佐藤佳子他 : "火災旋風の小型模型実験", 安全工学発表会予稿集, 63 (1981)
  - 26) Kuwahara, K. et al. : "Thermal Convection Caused by Ring-Type Heat Source", *Journal of Physical Society of Japan*, 51, 11, 3711 (1982)
  - 27) 佐藤研二他 : "火災旋風における熱気流の挙動", 日本火災学会予稿集, 61 (1982)
  - 28) Emori, R.I. et al. : "Model Experiment of Hazardous Forest Fire Whirl", *Fire Tech.*, 319 (1982)
  - 29) 広部良輔他 : "火災旋風に関する研究", 安全工学シンポジウム予稿集, 101 (1984)
  - 30) 長谷見雄二 : "火焰コアをもつ火災旋風のモデリング", 日本建築学会論文集, 352, 119 (1985)
  - 31) 星野常雄他 : "大規模火災時における熱エネルギー消散の過程と火災旋風についての一考察", 日本火災学会誌, 34, 3, 32 (1986)
  - 32) Soma, S. et al. : "Reconst. Fire Whirl Using Scale Models", *Comb. & Flame*, 86, 269 (1991)
  - 33) 佐藤晃由 : "円筒内での旋回火災気流に関する研究", 日本火災学会予稿集, 86 (1995)
  - 34) 佐藤晃由 : "旋回火災気流に関する研究", 平成7年度安全工学シンポジウム予稿集, 125 (1995)
  - 35) 佐藤晃由他 : "模型による火災旋風の実験と数値計算", 安全工学発表会予稿集, 131 (1995)
  - 36) 水藤寛他 : "実大規模火災旋風の3次元数値シミュレーション", 同上, 129 (1995)
  - 37) Saito, K. et al. : "Fire Whirl Enhanced Combustion", *Proc. ASME/JSME Fluid Eng.* (1995)
  - 38) 佐藤晃由, K.T. Yang : "直交壁付近で発生する旋回炎", 日本火災学会予稿集, 138 (1996)
  - 39) K. Satoh and K.T. Yang : "Experimental Observations of Swirling Fires", 1996 International Mechanical Engineering Conference and Exhibition, Atlanta (1996)
  - 40) 佐藤晃由, K.T. Yang : "ダクト内火災旋風の実験と数値シミュレーション", 平成8年度安全工学シンポジウム予稿集 (1996)
  - 41) Satoh, K. : "Numerical Study and Experiments of Fire Whirl", *Proc. INTERFLAM*, 393 (1996)



図1 円筒内の灯油燃焼炎（容器直径8cm）による  
旋回炎

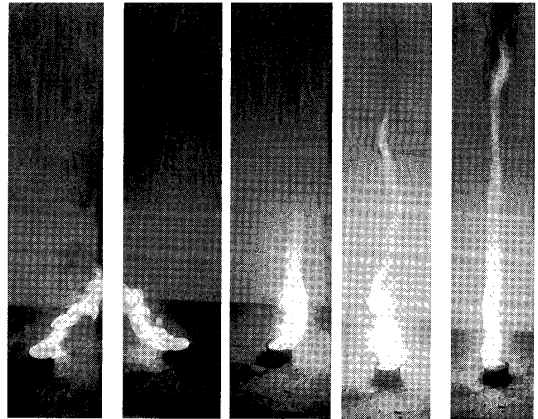


図4 角型ダクトにおける灯油（D=8cm）の  
旋回燃焼炎の形成過程

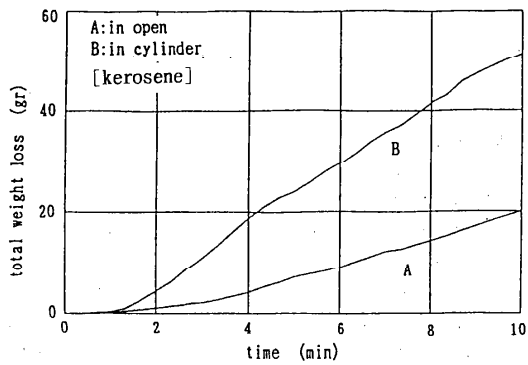


図2 外気中自然燃焼炎と円筒内旋回燃焼炎の  
燃料重量減少の時間変化

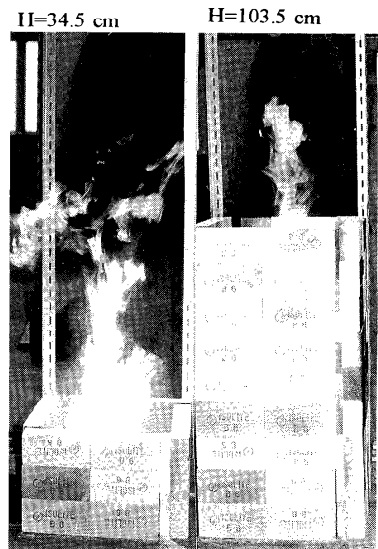


図5 角型ダクトの壁の高さの変化と  
ヘプタンの旋回燃焼炎

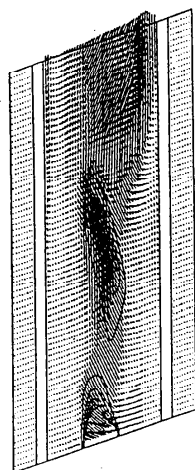


図3 垂直円筒内での旋回熱気流の  
3-D 数値シミュレーション結果

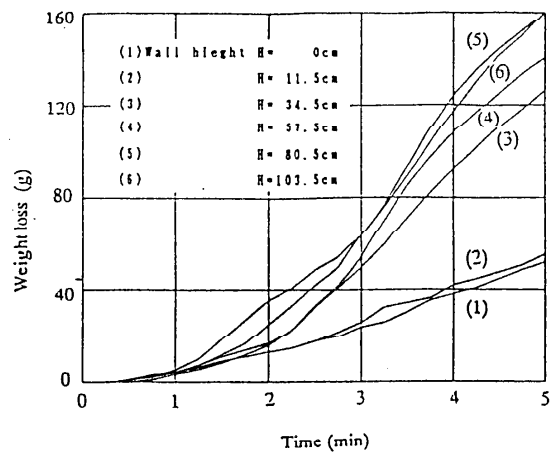


図6 角型ダクトの壁の高さと  
ヘプタン燃料蒸発速度

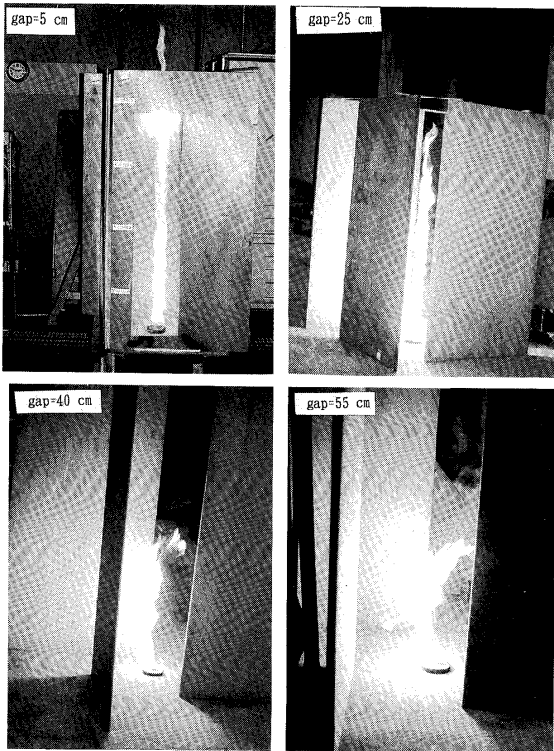


図7 角型ダクトの壁間の隙間を変えた場合のヘプタン燃焼炎

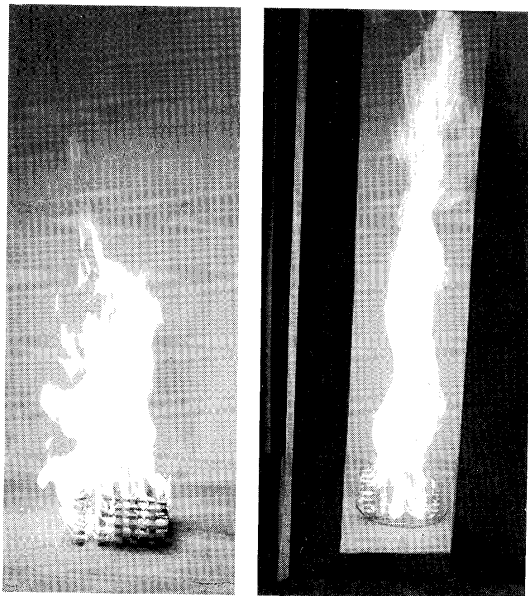


図8 井桁組み木材クリブの外気中での自然燃焼炎 (左) とダクト内での旋回燃焼炎 (右)

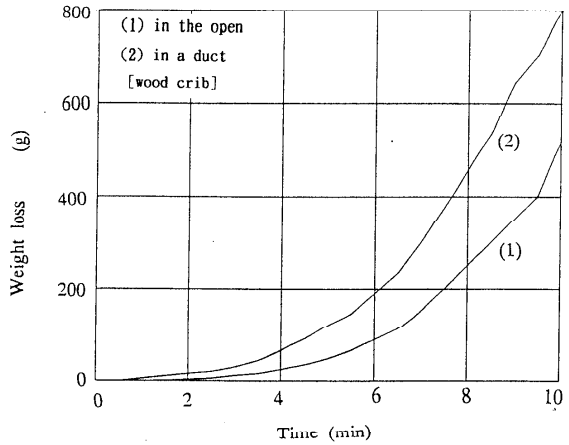


図9 井桁組み木材クリブの外気中での自然燃焼 (1) とダクト内での旋回燃焼 (2) の重量減少

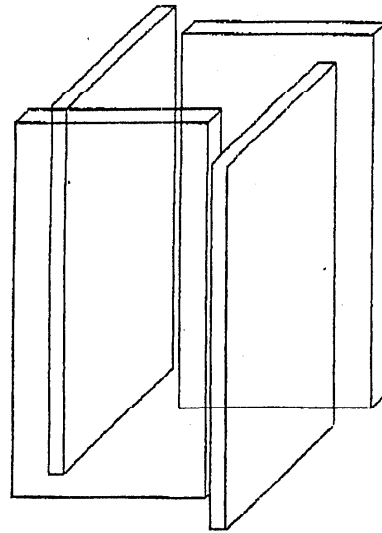


図10 数値シミュレーション用ダクト

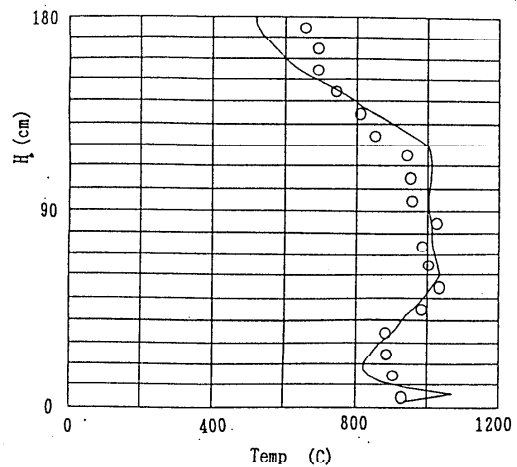


図11 直立旋回燃焼炎の軸上温度分布の実験とシミュレーション結果



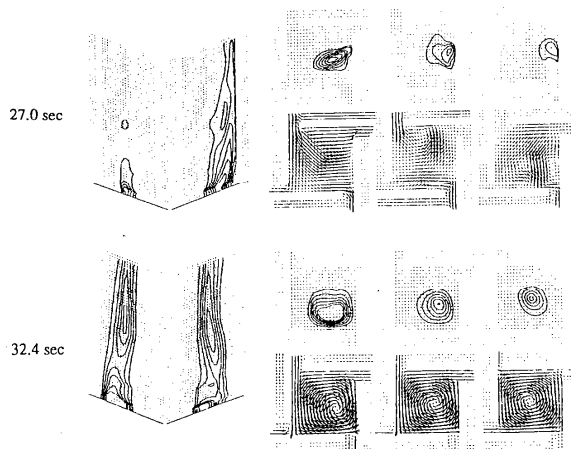


図12 傾いた回転から直立旋回に至る熱気流のシミュレーション結果

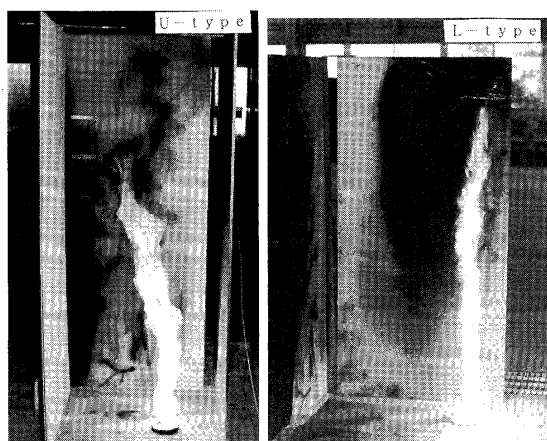


図13 U型壁（左）とL型壁（右）付近での旋回燃焼炎

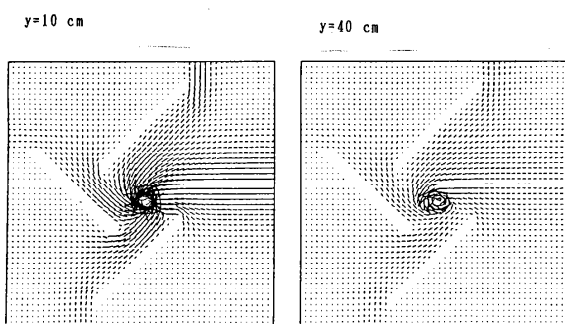


図14 U型壁付近での旋回熱気流のシミュレーション結果  
(水平断面図 Y=10cm, Y=40cm)

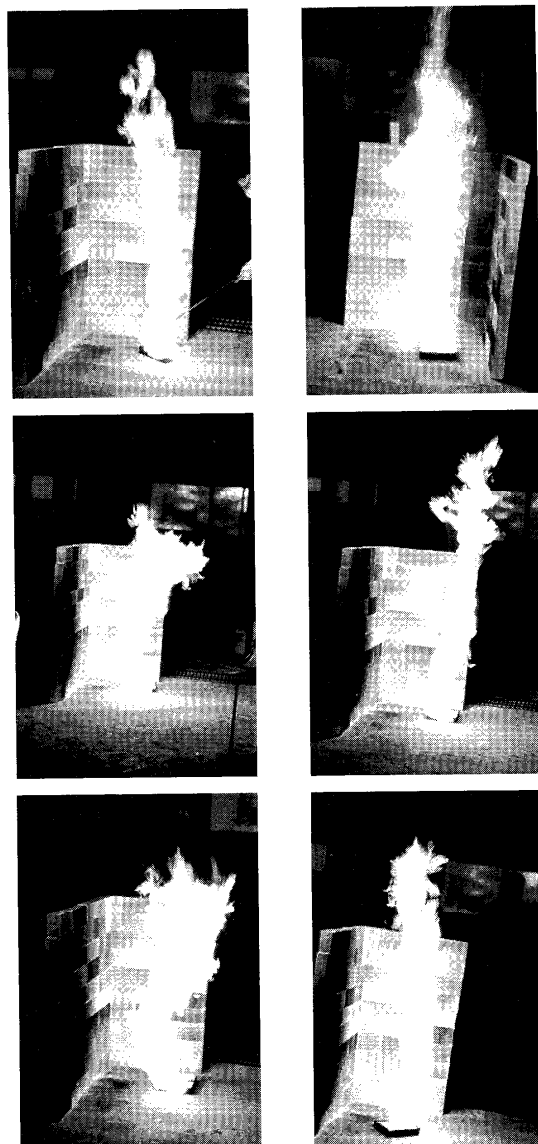


図15 L型壁付近でのヘプタン旋回燃焼炎の形態変化  
(容器径：20cm × 20cm)

## ガス抜き細管上に形成された火炎について

*Jet Flames Ejected from a Gas Purging Pipe*

酒井 規公子 (名古屋大学大学院工学研究科地圏環境工学)

須川 修身 (東京理科大学火災科学研究所)

*Kikuko SAKAI (Nagoya University)*

*and Osami SUGAWA (Center for Fire Science and Technology,  
Science University of Tokyo)*

### 概 要

燃料ガスボンベに設置されたガス抜き管からの噴出したガスが火炎を形成した場合を想定し、噴出ガス量および噴出口高さを変化させ、噴出火炎の高さ、幅、管口からの火炎までの浮き上がり高さ、地表面への放射熱量について、無次元発熱速度が $10^3 \sim 10^5$ 範囲において観察及び測定を行った。無次元火炎高さとの相関を求め、種々の条件下での火炎形状についての推定する実験式の提案を行った。また火炎から地表面へ放射される放射熱量を算出するのに必要な形態係数についても検討し、実測値との比較を行った。

#### 1. はじめに

LPガスの供給形態は、欧米ではバルク方式(小型ローリーが住宅に設置された約1000kg容量のボンベに直接充填)が中心となっているが、日本では20~50kgボンベでの配送が主である。住宅地におけるローリーからのガス充填は保安規制によって行えない現行制度上の制約があるが、バルク方式の導入によって、安定供給・配送の合理化などによる人手不足の解消とコスト削減を通して一層の保安対策の向上が検討されている。バルク方式は近隣火災を想定した火災安全対策の検討が必要である。バルク方式用ボンベの周辺に模擬火災を作り、雰囲気温度やボンベの内圧の測定がなされ、ボンベが火災時に爆発を起こさない事が実地検証されている[1]。加熱された場合、安全弁の作動によってガスの放出が行われる。放出ガスは周辺の火災炎で引火し、噴出火炎(Jet Flame)を形成する事が想定されるので、噴出火炎に対する火災安全の検討が必要である。そこで、火災安全対策の基礎的知見の整備のため噴出火炎の性状について実験調査研究を行った。

### 2. 実験

#### 2-1. 火炎形状を相似にして実験を行うための前準備

実施時にはガス噴出量や吹き出し管の口径が種々変化する事が想定される。そこで無次元表現による火炎形状を記述するモデル式の構築が必要である。火炎温度は化学反応で支配的に決まるので、反応についての相似則は無視し、火炎形状について相似則を踏まえた縮尺模型実験を行う。

実規模の大容量ガスボンベに設置されるガス抜き細管からプロパンガスが噴出するときの噴出速度は約952.7g/sと推定され、プロパンの燃焼熱量を約46.45kJ/gとし完全燃焼するとすれば、火炎の発熱量は約44.25MWと推定される。

#### 2-2. 測定条件

実験は、噴出火炎の形状が風の影響を受けないように屋内実験場(床面17.2m×64.4m×高さ12m)で行った。実験用燃料ガス(い号液化石油ガス)はボンベをホットバスで暖めながら供給し、流量調節弁・ガス流量計を通して制御・計測しつつ鉛直上向きに設置したパイプ(模擬ガス抜き細管)より放出した。放出ガス流量は、100ℓ/min、200ℓ/minおよび400ℓ/minに設定し、流量は10秒毎に質量流量計で測定しつつ設定値となるよう制御した。噴出口の高さは地表面より200mm、700mmおよび1700mmとした。ガスの流量、噴出口の高さ、管径、推定される無次元発熱速度を表1に示す。

#### 2-3. 測定と観察

噴出火炎の温度は、火炎中心軸に沿ってK型熱電対で地面より1m、2m、3m、4m、5m、6m、および7mの高さで測定した。模擬ボンベの表面と内部の温度、模擬ボンベの内圧力も測定した。放射熱量は、地上145mm高さに水平模擬地面を設け、ガス抜き細管の中心から0.1m、0.27m、0.71m、1.1m、1.27m、1.71m、1.9mおよび2.9m離れた位置で10秒毎に測定した。

火炎形状はビデオカメラで北側と東側から記録した。測定開始前に10m(高さ)×3m(幅)の三次元空間内に基準点(50cm間隔)を設け、これを画像に取り込み画面空間上のスケールとした。このスケールを用いて火炎高さ、幅、浮き上がり高さを連続し

た300画面から読みとり、平均値、最大・最小値および偏差値を求めた。

### 3. 結果及び考察

#### 3-1. 噴出火炎の高さと幅

噴出管口から噴出火炎先端までを火炎高さ  $Ha$  とした。 $Ha$  の標準偏差は最高火炎高さ値の約10%であり、 $10^3 < Q^* < 10^5$  の範囲で噴出火炎の平均高さはその最高火炎高さの約80%に相当していた。 $10^0 < Q^* < 10^2$  の範囲において拡散火炎が示す最高高さとその平均値はおおよそ1:0.5であるが、噴出火炎は1:0.8であり火炎の間歇域が小さい。火炎幅  $W_f$  の標準偏差は約20%であった。ここで  $Q^*$  は無次元発熱速度 [2] である。火炎高さ  $Ha$  を管径  $D$  によって無次元化し、無次元火炎高さ  $Ha/D$  で表現した。図1に無次元火炎高さと無次元発熱速度の関係を示す。最高火炎高さは  $Ha/D = 9.61Q^{*1/3}$ 、最小火炎高さは  $Ha/D = 6.69Q^{*1/3}$  で相関された。平均火炎高さは  $10^3 < Q^* \leq 6.7 \times 10^4$  の範囲で、

$$Ha/D = 8.14Q^{*1/3} \quad (1)$$

と記述される。このべき数 (1/3) 値は McCaffrey が [3] 提示した値より大きい。

火炎の幅を同様に無次元火炎幅  $W_f/D$  とし、無次元発熱速度  $Q^*$  との相関は、

$$W_f/D = 1.92Q^{*1/3} \quad (2)$$

と表わされる。以上の事から、噴出火炎の特性火炎長さ、即ち火炎高さおよび火炎幅は、無次元発熱速度  $Q^*$  の1/3乗に比例して増加することがわかった。

#### 3-2. 火炎の浮き上がり高さ

管口の噴出部でのレイノルズ数  $Re$  は  $10^4 \sim 10^6$  と推定され、ガス抜き管上に形成された火炎は管口に付着せず、浮き上がり火炎を形成した。火炎の管口からの浮き上がり高さも、火炎高さと同様の手法で記録画像から読みとった。1/8Bパイプ ( $6.5 \times 10^{-3} \text{m}\Phi$ ) にガス流量  $180 \text{ l/min}$  から  $200 \text{ l/min}$  で供給すると着火直後から火炎の浮き上がりが観察され、次第に火炎底面が高位置に移動し、安定した非付着火炎を形成せず吹き消えた。この時の噴出速度はプロパンガスの音速約  $250 \text{ m/sec}$  を越えていた。ガス流量を  $160 \text{ l/min}$  に設定した場合、短時間 (約4分間) 火炎の浮き上がりが生じた後、安定した非付着火炎とはならず消炎した。管口から火炎底部までの垂直距離を浮き上がり高さ  $h$  とし、無次元化した  $h/D$  と無次

元発熱速度  $Q^*$  との相関を図2に示す。 $10^3 < Q^* < 10^5$  の範囲において、

$$h/D = 1.39 \times 10^{-2} Q^{*3/5} \quad (3)$$

と記述された。

#### 3-3. 火炎の中心軸にそった上昇温度

熱量で基準化した火炎高さ  $Ha/Q^{2/5}$  の値が  $0.02 \sim 0.1$  の範囲では、上昇温度  $\Delta T$  はほぼ一定値  $850 \text{ K} \sim 950 \text{ K}$  を示した。この上側の火炎柱領域では、火炎中心軸に沿った  $\Delta T$  は  $Ha^n$  (ここで  $n = -3/2 \sim -5/3$ ) に比例した減衰を示した。McCaffrey [4] は  $10^0 < Q^* < 10^2$  における拡散火炎の中心軸に沿った上昇温度  $\Delta T$  は、間歇火炎域内 ( $0.08 < Z/Q^{2/5} < 0.2$ ) で  $(Z/Q^{2/5})^{-1}$  に比例した減少性状を持つ事を示している。噴出拡散火炎が間歇的に存在する範囲は、 $0.2 < Ha/Q^{2/5} < 0.4$  の範囲であった。 $Q^*$  が  $10^3$  以上の範囲での噴出拡散火炎の上昇温度  $\Delta T$  は  $(Ha/Q^{2/5})^{-1}$  で示される減少を示さないが、火炎柱領域では  $\Delta T$  は高さの  $-3/2 \sim -5/3$  乗に比例した減少を示した。実規模の大容量ガスボンベから生じる噴出火炎が示す温度を実用的に推定する方法が火災安全設計には必要である。任意の管径と任意の発熱速度を設定した場合にも任意の高さに於ける上昇温度  $\Delta T$  を推定する必要がある。そこで  $Ha/Q^{2/5}$  を  $(Ha/D)/Q^{2/5}$  として無次元化し無次元発熱速度の相関を図3に示す。この図から間歇火炎および火炎柱領域の上昇温度の垂直方向の減衰は、

$$\Delta T = 1600 ((Ha/D)/Q^{2/5})^{-2/3}, (Ha/D)/Q^{2/5} \geq 2 \quad (4)$$

と記述された。

#### 3-4. 放射熱量

図4は模擬地表面での放射熱量の水平分布の代表例である。この図に見るように放射熱は火源火炎に近いところでは平坦な分布を示し、管径の12~15倍離れた付近から急激に減衰した。想定されるボンベや他の可燃物へ放射される熱量を推定するために、以下の仮定を設け試算し、測定値と比較する。

##### 仮定

- 火炎は上方に広がる細身の円錐型で近似できるとし、平均的火炎高さ  $Ha$ 、幅  $W_f$  を用いて表すことができるとする。これらの値は図3と4に示したように、管径  $D$  と無次元発熱速度  $Q^*$  値を用いて推定可能とする。
- 火炎の代表温度は中心部の温度であるとみなし、任意高さでの温度は3-3.に記述した実験式によって推定可能とする。

- 火炎形状は、円柱の積み重ねとしてモデル化した場合（円柱モデル）と傾斜面を持つ円錐台の積み重ねとした場合（円錐台モデル）の二形状とする。円柱モデルは垂直および水平側面のそれぞれから放射されるとして形態係数を求める。（図5参照）
- 火炎中心軸よりターゲット側に在る火炎厚みと、軸より後方に在る火炎厚みは同じと考えられ、火炎中心軸を基準に考えれば火炎厚み分の増加と減衰の双方の放射熱量の寄与があるので、これらは互いに打ち消し合うと仮定し、火炎厚みがもたらす放射熱量は無視できるとした。
- 火炎の放射率  $\epsilon=0.7$  [5] とし、ターゲット（ここでは放射熱量計）の吸収率は1とする。
- 火炎の先端高さの標準偏差は平均火炎高さの10%程度であるから、放射熱量を推定する場合の火炎高さは平均火炎高さの90%とする。火炎の幅  $W_f$  は平均的の火炎の高さの90%の位置、即ち  $0.9H_a$  の位置に現れるとする。

熱放射を受けるターゲットへの放射熱量の推定は  $0.9H_a$  の高さから始め噴出火炎の底部まで微小高さ毎に推定し積分した。火源となるパイプからの模擬地面に沿った水平距離に対する放射熱量を点綴し図5に示す。計算値と測定値を比較すると、円柱モデルの方が円錐台モデルよりも測定値の一致がよい。火炎の外周部分は乱れており、放射面が様々な方向を持つと考えられる。この状況を火炎外周面が垂直と水平の2面を持つとしたモデルの方が、固定した傾斜方向面を持つ円錐台モデルよりも、測定値に近い推定値を与える。火炎の外周面を固定面とした場合には受熱放射熱量を過小評価することになると考えられる。図5に示す形態係数と火炎温度の実験式(3)および(4)を組み合わせた簡易計算法によって、ガス抜き細管から燃料ガスが噴出され拡散火炎を形成した場合の放射熱量を予測する事が出来た。

#### 4. 結論

ガス抜き細管からの噴出した火炎の高さ・幅は、無次元発熱速度  $Q^*$  が  $10^3 < Q^* < 10^5$  の範囲で  $Q^{1/3}$  に比例していた。噴出速度が音速を超えない範囲において火炎の浮き上がり高さは無次元発熱速度  $Q^{3/5}$  に比例していた。

噴出火炎の中心軸に沿った上昇温度は高さ方向の減衰が見られない領域（火炎の底部）と、高さ

の  $-3/2 \sim -5/3$  乗に比例して減少する間歇火炎域及び火炎柱域の2つの領域に分けられた。 $Q^*$  が  $10^2$  より小さい間歇火炎域では火炎軸に沿った温度減衰は高さの  $-1$  乗に比例して減衰するが、 $Q^*$  が  $10^3$  より大きな噴出火炎では、このような減衰性状は見られなかった。しかし、火炎柱領域における  $\Delta T$  の減衰は高さの  $-5/3$  乗（あるいは  $-3/2$  乗）に比例して減衰し、 $Q^* < 10^2$  の場合と同様の性状を示した。

火炎近傍の可燃物あるいは地上面へ発散される放射熱量を推定するため、噴出火炎の形状を積層円柱でモデル化し形態係数を求めた。このモデルは垂直側面と円柱の底部の水平面の両方の放射面を持つ形態となる。この形態モデルと火炎軸に沿った温度を用いて算出した放射熱量と測定値の一致は良好であった。Mudan [6] は火炎を円柱と近似し、垂直面と水平面の形態係数の自乗の和の平方根を採ることによって地上面に達する最大放射熱量の推定を行っている。この方法は、例えば石油タンクが炎上した場合のような極めて大きな火炎からの放射熱量の推定 [7] に用いられている。乱れを持つ火炎面を垂直面と水平面の2面が在るとして、相乗平均あるいは自乗和の平方によって近似すれば、乱れを持つ火炎面からの放射熱量の推定には良好な結果を与えると思われる。近似的に形態係数を与えて放射熱量を算定する場合、モンテカルロ法よりも結果の見通しが良く簡便である。

#### 5. 謝辞

この研究は高圧ガス保安協会より実験研究費を受けて行った。実験を行う上でご協力をいただいた三浦孝磨氏（高圧ガス保安協会）に感謝いたします。

#### 6. 参考文献

- [1] Technical Report on "Tank Temperatures exposed to Wood Crib Fires", Kohatsu-Gas Hoan Kyoukai (KHK: High Pressure Gas Safety Association) Report (1994) in Japan
- [2] Zukoski, E.E., Kubota, T., and Cetegan, B. "Entrainment in Fire Plumes", Fire Safety Journal, vol.3, pp.107-121, (1980/81)
- [3] McCaffrey, B.J. "Flame Height", Section 1/Chapter 18, The SFPE Handbook of Fire Protection Eng., First Edition, SFPE and NFPA, (1988)
- [4] McCaffrey, B.J. "Purely buoyant diffusion flame flames : some experimental result", NBSIR79-1910,

- (1979)
- [5] Tien, C.L., Lee, K.Y., and Stretton, A.J., "Radiation Heat Transfer", Section 1/Chapter 5, The SFPE Handbook of Fire Protection Eng., First Edition, SFPE and NFPA, (1988)
- [6] Mudan, K.S. "Thermal radiation hazards from hydrocarbon pool fire", Progress in Energy and Combustion Science, Vol.10, No.1, p59-80, (1984)
- [7] Max-R Pallavicini "Fire Risk Assessment and Its Applications", Proc. Inter. Seminar on Fire Safety Frontier", October, Hehei, P. R. China (1995)

使用記号

- $D$ : 管径 (m)
- $Ha$ : 管口から火炎先端までの高さ (m)
- $h$ : 管口から浮き上がり火炎底部までの高さ (m)
- $\Delta T$ : 室温からの上昇温度 ( $^{\circ}C, K$ )
- $Q^*$ : 無次元発熱速度  $Q^* = Q / \rho C_p T_{\infty} \sqrt{g D D^2}$  (-)
- $\rho$ : 雰囲気気密度 ( $kg/m^3$ )
- $g$ : 重力加速度 ( $m/sec^2$ )
- $W_f$ : 火炎幅 (m)
- $C_p$ : 雰囲気気比熱 ( $kJ/kg \text{ deg}$ )
- $Q$ : 発熱速度 (kW)
- $T_{\infty}$ : 雰囲気気温度 (K)
- $\epsilon$ : 放射率 (-)

表1. 実験条件

実験番号	ガス流量 (l/min)	ガス抜き細管呼径 $D$ および $\phi$ (mm)	噴出口高さ (mm)	無次元発熱速度 $Q^*$ (-)
1	100	1/8B, 6.5mm	700	$3.99 \times 10^4$
2	200→180→160	1/8B, 6.5mm	700	$6.39 \times 10^4$
3	100	3/8B, 12.7mm	700	$7.48 \times 10^4$
4	200	3/8B, 12.7mm	700	$1.50 \times 10^4$
5	300	3/8B, 12.7mm	700	$2.25 \times 10^4$
6	400	3/8B, 12.7mm	700	$2.99 \times 10^4$
7	100	1B, 27.6mm	700	$1.07 \times 10^3$
8	200	1B, 27.6mm	700	$2.15 \times 10^3$
9	400	1B, 27.6mm	700	$4.30 \times 10^3$
10	400	1/4B, 9.2mm	200	$6.70 \times 10^4$
11	200	1/4B, 9.2mm	200	$3.35 \times 10^4$
12	100	1/4B, 9.2mm	200	$1.68 \times 10^4$
13	400	3/8B, 12.7mm	200	$2.99 \times 10^4$
14	200	3/8B, 12.7mm	200	$1.50 \times 10^4$
15	100	1/2B, 16.1mm	200	$4.14 \times 10^3$
16	200	1/2B, 16.1mm	200	$8.27 \times 10^3$
17	400	1/2B, 16.1mm	200	$1.65 \times 10^3$
18	400	1B, 27.6mm	200	$4.30 \times 10^3$
19	400	3/4B, 21.6mm	200	$7.93 \times 10^3$
20	200	3/4B, 21.6mm	200	$3.97 \times 10^3$
21	100	1/8B, 6.5mm	1700	$3.99 \times 10^4$
22	400	1/4B, 9.2mm	1700	$6.70 \times 10^4$
23	200	1/4B, 9.2mm	1700	$3.35 \times 10^4$
24	100	1/4B, 9.2mm	1700	$1.68 \times 10^4$
25	400	3/8B, 12.7mm	1700	$2.99 \times 10^4$
26	200	3/8B, 12.7mm	1700	$1.50 \times 10^4$
27	400	1/2B, 16.1mm	1700	$1.65 \times 10^4$
28	200	1/2B, 16.1mm	1700	$8.27 \times 10^3$
29	400	3/4B, 21.6mm	1700	$7.93 \times 10^3$
30	200	3/4B, 21.6mm	1700	$3.97 \times 10^3$
31	400	1B, 27.6mm	1700	$4.30 \times 10^3$

注) 実験 2 は、ガス流量が 200l/min のとき消炎が観察されたので、ガス流量を 200l/min から 160l/min に変化させた。

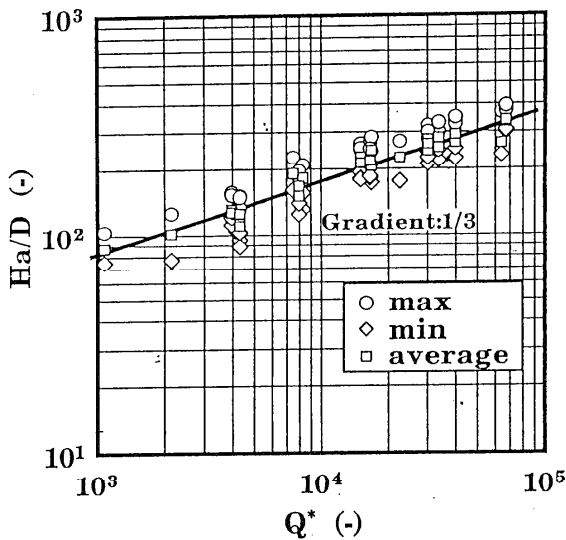


図1. 無次元火炎高さ  $Ha/D$  と無次元発熱速度  $Q^*$  の関係。火炎高さ  $Ha$  は管径  $D$  によって規格化した。

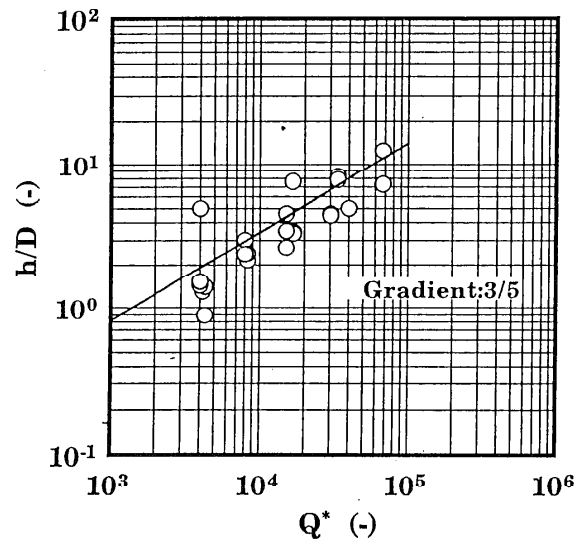


図2. 無次元浮き上がり高さ  $h/D$  と無次元発熱速度  $Q^*$  の関係。浮き上がり高さ  $h$  は噴出口から火炎底部までの垂直距離で採り、管径  $D$  によって規格化した。

Flow Rate : 100 L/min  
 Pipe Length : 700mm  
 Inner Diameter(cm) : 1/8B(0.065cm)

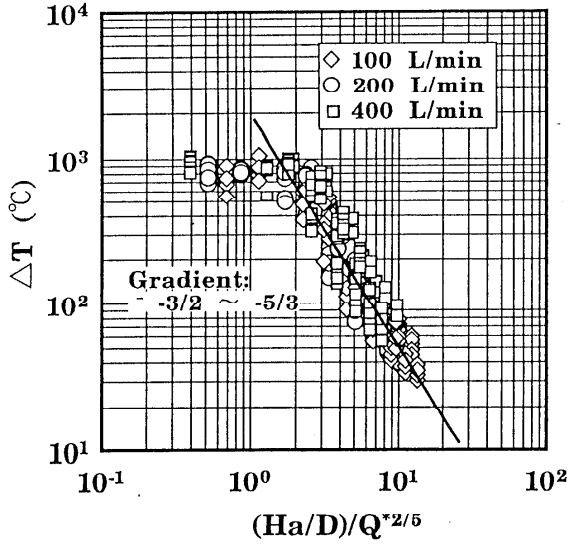


図3. 火炎および火炎柱の火炎中心軸に沿った雰囲気温度からの上昇温度  $\Delta T$  の垂直上方への減衰性状。垂直距離は管径によって無次元化し、無次元発熱速度で規格化も行った無次元高さで表現。

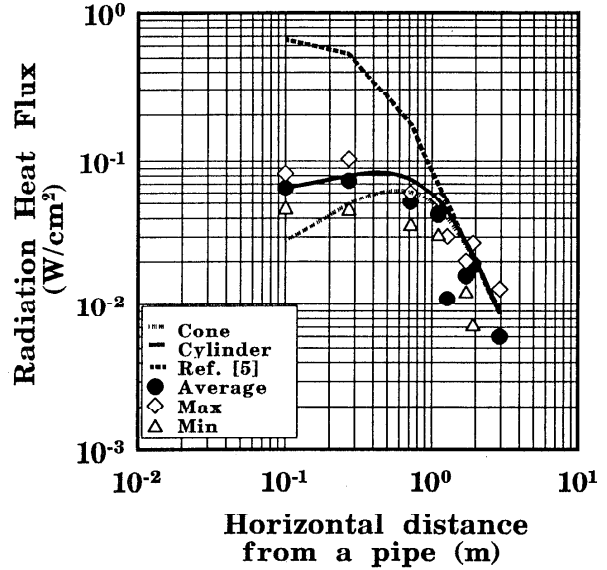


図4. 放射熱量の測定値と計算値。点綴は実測値、曲線は計算値。最も上側の曲線は ref. [5] に基づいて火炎を1つの円柱と見なした場合。他の計算値は図5に示したような円錐台状の火炎形状を採った。ターゲット面は垂直上向きとした。

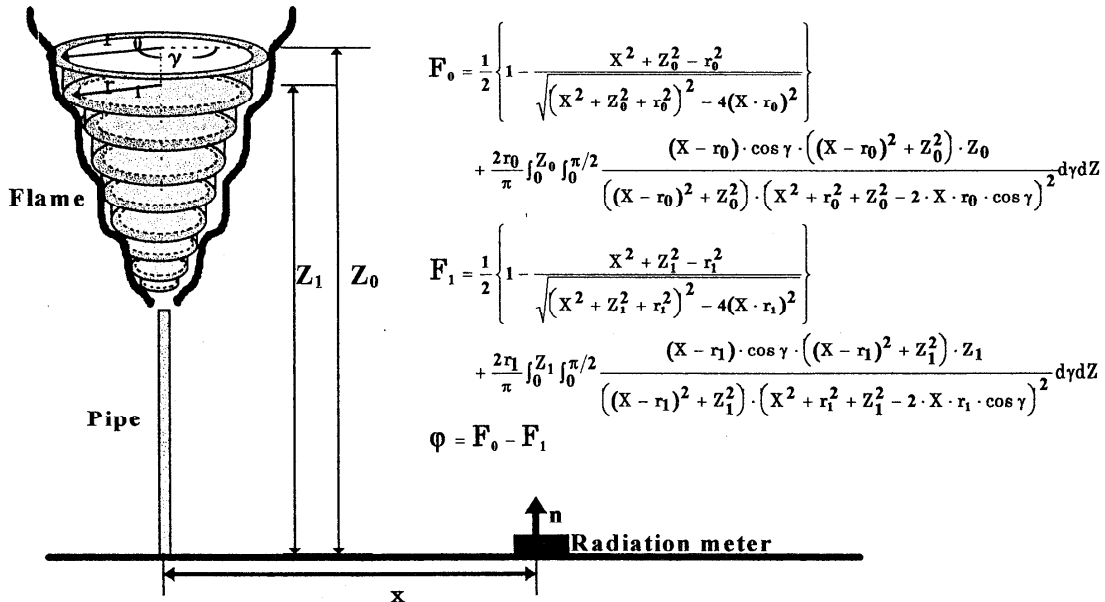


図5. 円柱型火炎モデルと形態係数の算出式。火炎は積層円柱としてモデル化した。各円柱の下面はリング状で水平面をもつ。

---

## Thermal-Fluids Engineering Research Activities at The National University of Singapore (NUS)

S.H. WINOTO

(Department of Mechanical and Production Engineering,  
The National University of Singapore)

---

### ABSTRACT

In this lecture, an introduction to the National University of Singapore and a brief overview of the research activities and facilities in Thermal-Fluids Engineering will be presented. It is hoped that this information can help establish collaborative research work in this particular discipline, between NUS and some universities or institutions in Japan.

### BACKGROUND INFORMATION

The National University of Singapore (NUS) inherits its rich academic tradition from a lineage of distinctive predecessor institutions which includes the the University of Malaya (1949), the University of Singapore (1962) and Nanyang University (1955).

The University's roots go all the way back to a Medical School set up in July 1905 which represented the first successful venture in higher education in Singapore. The institution later became known as the King Edward VII College of Medicine (1921).

The National University of Singapore was established in August 1980 with the merger of the University of Singapore and Nanyang University. The campus, occupying some 150 hectares, is located at Kent Ridge in the western part of Singapore and about 12 km from the city centre. The University now has 8 Faculties: Architecture and Building, Arts and Social Sciences, Business Administration, Dentistry, Engineering, Law, Medicine, and Science, and 4 Postgraduate Schools: Medical Studies, Dental Studies, Management Studies, and Engineering.

A Faculty consists of some Departments, for example, the Faculty of Engineering consists of 5 Departments: Chemical Engineering, Civil Engineering, Electrical Engineering, Industrial & Systems Engineering, and Mechanical & Production Engineering. There are a total

of 53 Departments within the University with a total student enrolment exceeding 20000 (as at 1 January 1996), which consists of more than 17000 undergraduates and more than 3000 postgraduates.

### THE DEPARTMENT OF MECHANICAL & PRODUCTION ENGINEERING

The Department of Mechanical & Production Engineering provides both undergraduate and postgraduate programmes which have been carefully designed to provide students with a comprehensive engineering education.

In early 1977, the Department moved to its present location at Kent Ridge. The Department is now well established with 65 academic staff members who graduated from well known and prestigious universities. There are 6 Divisions in the Department: Applied Mechanics Division, Control Division, Fluid Mechanics Division, Manufacturing Division, Material Science Division, and Thermodynamics & Heat Transfer Division.

Since the purpose of this lecture is to present a brief overview of the research activities in Thermal-Fluids Engineering at the National Universities of Singapore, only the Fluid Mechanics and Thermodynamics & Heat Transfer Divisions will be described separately in more details in the followings.

### RESEARCH ACTIVITIES AND FACILITIES IN THE FLUID MECHANICS DIVISION

The Fluid Mechanics Division has 10 staff members whose research activities can be categorised as follows:

#### Turbulence Measurements

- Concave surface boundary layer flows
- Turbulence close to air-liquid interface
- Turbulent jets and wake flows
- Turbulence measurements of flow with large-

eddy-break-up device

#### **Bio-Fluid Dynamics**

- Fluid dynamics of artificial heart valves
- Fluid dynamics of arteries, veins and respiratory systems

#### **Computational Fluid Dynamics**

- Direct simulation of turbulence
- Flow over flexible/compliant surfaces
- Fluid transient pressure surge analysis
- Thermally-influenced fluid flow
- Vortex calculation of flow past bluff bodies

#### **Experimental Techniques**

- Effects of turbulence length scales on hot-wire measurements
- Near wall effects on hot-wire and skin friction measurements
- Particle image velocimetry

#### **Bluff Body Aerodynamics**

- Active control on von Karman vortex shedding
- Flow past a rotating cylinder
- Flow past one or more cylinders with various cross-sectional shapes
- Flow past transversely oscillating cylinders
- Wind loads on tall buildings

The Fluid Mechanics Laboratory is one of the largest laboratories in the Faculty of Engineering. It houses a towing tank of 18 m (L) x 1.8 m (W) x 1.0 (D), a circulating water channel of 1.2 m (L) x 0.4 m (W) x 0.6 m (D), and seven subsonic wind tunnels. The largest wind tunnel has two working sections: 1.0 m x 2.0 m and 1.6 m x 2.8 m. This tunnel is ideal for studies of flow around buildings and landscapes, dynamic analysis of slender bodies and dispersion of pollutants. It can also be used for fundamental studies into the structure of wake-flows and turbulent boundary layers. The other tunnels come in various sizes of working sections, ranging from 0.6 m x 1.0 m section to 0.46 m x 0.46 m and 0.33 m x 0.33 m sections.

The various measuring instruments in the laboratory include a vast array of hot-wire anemometers with several CTA unit capable of measuring and resolving velocities in three directions. A back-scattered two-colour component laser Doppler anemometer (LDA) system with accessories and linked up to a micro-computer for ease of

operation is also available for non-invasive fluid flow measurements. The LDA can be mounted on a computer-controlled traversing mechanism for movement of its measuring probe to any desired location. A recently developed particle image velocimetry (PIV) system is set up with two different image processing cards and a video camera which is capable of tracking many particles simultaneously in a fluid flow enabling both the elucidation of the instantaneous velocity field and length scale distribution. Instruments for pressure measurement include a wide range of pressure transducers and scannivalves (for acquisition of many pressure readings). All the data acquired can be analysed digitally using micro-computers in the laboratory, or coupled to spectrum analysers for real time analysis. Some storage scopes are also available to aid in the analysis of collected data.

Some specialized equipment pertaining to bio-fluid research work is also available in the laboratory, such as the mechanical lung ventilator and simulator and the physiological unsteady flow simulator. Also available is a test-rig for investigating pressure transients.

### **RESEARCH ACTIVITIES AND FACILITIES IN THE THERMODYNAMICS & HEAT TRANSFER DIVISION**

The Thermodynamics & Heat Transfer Division has a total of 10 staff members. The focus area of the division is energy technology. Both applied and basic research is conducted in the area of energy conservation in buildings and industry, industrial heat transfer processes, and combustion and fuels. The current research activities include computational and experimental work in the following areas:

#### **Energy Conservation in Buildings**

- Energy analysis and modelling of buildings
- Thermal performance of building materials and systems
- Building automation systems for airconditioning
- Humidity control in airconditioned spaces

#### **Energy Conservation in Industry**

- Design and analysis of heat pump systems for drying applications
- Design and analysis of solar thermal systems
- Heat transfer enhancement in flow passages and



heat exchangers

#### **Industrial Heat Transfer Processes**

- Heat transfer analysis in electronic packaging
- Heat transfer in machining and welding processes

#### **Combustion and Fuels**

- Fundamental flame studies
- Turbulent heat transfer in combustion applications
- Combustion characteristics and emission of non-conventional fuels
- Smoke movement and fire safety

The Thermodynamics & Heat Transfer Division has three laboratories which are fully equipped with the necessary facilities for research as well as teaching activities.

The Heat Transfer Laboratory has an Infra-red Thermal Imaging System which provides a non-intrusive technique for qualitative and quantitative temperature determination. The infra-red sensor of the system records a picture of an object based on its radiation heat emission due to temperature. Software for digital processing of the image for a variety of requirements is available. The Thermal Imaging System can be used in the field through a portable processing unit which has an image recording facility for subsequent processing. Some typical applications of this system are the assessment of heat leakage through building materials and insulations, the detection of overheating components in electrical circuits, and very accurate estimation of surface temperature profile and emissivity of objects. The other specialized equipment available in the laboratory include a high speed camera (of up to 8000 frames per second), a high resolution video recording and processing facility, a laser Doppler anemometer, a gamma-ray spectrometer for two-phase flow studies, instruments for estimating solar insolation, and an apparatus for measuring thermal conductivity of porous materials. A host of data logging and acquisition devices, temperature and heat flux calibrators, and various flow meters are also available.

The Thermodynamics Laboratory provides a full range of facilities for the testing of internal combustion engines. Engine test beds are available for parametric studies of petrol and Diesel engine performance, and diagnostic

training. The characteristics of combustion of fuels, flame behaviour, and monitoring and assessment of hydrocarbon and gas emission levels can be studied with the specialised apparatus in the laboratory. Test units of a small-scale industrial steam turbine and boiler plant, a gas turbine and a centrifugal air compressor are also available.

The Air Conditioning and Refrigeration Laboratory houses a thermal environmental-controlled chamber which is used for comfort studies in air conditioned spaces. The chamber is capable of simulating required combinations of environmental humidity and temperature as necessary. An industrial-scale testing facility is available for evaluation of the performance of air-conditioning chillers and heat pumps. The characteristics of the commercial chillers and heat pumps can be carefully monitored under a variety of operating load conditions for rating purposes.

#### **DISCUSSION AND CONCLUSIONS**

A brief introduction to the National University of Singapore and an overview of the research activities and facilities in the Fluid Mechanics and Thermodynamics & Heat Transfer Divisions, at the Department of Mechanical & Production Engineering have been presented.

NUS has also established formal links with more than 60 well known overseas institutions/universities in the USA, Canada, Belgium, Denmark, France, Germany, Norway, Sweden, The Netherlands, UK, Australia, New Zealand, Hong Kong, India, Japan, South Korea, Taiwan and the PRC.

Institutions/universities in Japan which have formal framework for collaboration with NUS are: The Japan Society for the Promotion of Science, Tokyo Institute of Technology, Waseda University, Faculty of Dentistry and Graduate School of Dentistry of Tokyo Medical and Dental University, Faculty of Engineering of Kyoto University, Graduate School of International Management of International University of Japan, Institute of Industrial Science of University of Tokyo, and School of Medicine of Nagasaki University.

It is hoped that this information can help establish more collaborative research work especially in Thermal-Fluids Engineering discipline, between NUS and some other universities or institutions in Japan.

## HEAT TRANSFER RESEARCH ACTIVITIES IN TAIWAN

G.J. HWANG

(Department of Power Mechanical Engineering,  
National Tsing Hua University)

---

### Abstract

This paper presents the status on the heat transfer research activities in Taiwan. The main research funds of university research comes from projects of the National Science Council (NSC). The industrial and application oriented researches are through the Ministry of Economic Affairs and Ministry of Transportation. There are 21 graduate schools offering Master degree in ME, and 10 of them offering Ph.D. The personnel and research areas will be described. NSC has set up 18 measures for promotion of research. Taiwan has held annually five conferences that accept papers of thermal-fluids engineering. This paper also lists and discusses the publications of papers from Taiwan in some typical international journals. To carry out meaningful researches and improve the quality of papers, one has to promote the communication in international heat transfer societies, and with the related industries.

### BRIEF HISTORY OF TAIWAN

Taiwan with a total area of 36,000 km<sup>2</sup> has a total population of 21 million concentrated on the west coast of the island. Recently, the people of Taiwan have elected their president under the military threat of China. Although some aborigines have been living in this island for thousand years, little is known of Taiwan's earliest history. When the Ming dynasty in the Chinese mainland came to an end, Portuguese sailors landed on the island in 1517, and called it Ibla Formosa, what means 'Beautiful Island.' The Dutch invaded the island in 1624 and settled in the South. Spaniards settled in the North, and were driven away by the Dutch in 1641. Soon after that Cheng Chengkung (also known as Koxinga) expelled the Dutch from the island in 1661.

Immigration to the island began in the 17th century when people from the Fujian Province fled from Famine

and persecution on the mainland. The Manchus invaded Taiwan in 1683 and Taiwan became a part of Fujian Province. In the 19th century, the population had risen to approximately 2.5 million. Taiwan became a separate province of China in 1887, and Taipei was the capital. In 1895, Manchus handed over Taiwan to Japan because the lost of Korea war. In 1945, China regains Taiwan after World War II. The civil war between the communists and the KMT separates the PRC on the mainland and ROC on Taiwan.

### GOVERNMENTAL FUNDING AGENCIES

National Science Council found in 1959 is the major governmental funding agency that supports the basic researches in science, engineering, agriculture, biology and the medical science, and humanity and social science. The Engineering Division consists of subdivisions of mechanical, civil, electrical, and chemical engineering and the other related disciplines. The thermal fluids engineering group including heat transfer, fluid mechanics, and combustion is under the mechanical engineering subdivision. The majority of research projects of NSC are proposed by university professors.

The science and technology advisory boards in Ministry of Economic Affairs and Ministry of Transportation finance industrial or application oriented researches. Energy committee in MOEA also supports the energy related researches. The major portion of funding of MOEA and MOT goes to the ITRI, an independent nonprofit research and development organization, only a small portion goes to Universities.

### UNIVERSITY AND RESEARCH INSTITUTES IN TAIWAN

As shown in Fig. 1, there are 21 graduate schools that offers Master degree in mechanical engineering. These schools are scattering around the west coast of Taiwan

island. Ten of them offer Ph.D. As shown in Table 1, the names of these schools are listed from northern part of Taiwan to the South. The total numbers of professors, Master students, and Ph.D. students in mechanical engineering are 529, 1973, and 552, respectively. Roughly speaking, about 1/4-1/3 of professors and students are major in the thermal-fluids engineering. National Taiwan University has the largest ME graduate program in Taiwan. National Cheng Kung University is the second one. National Tsing Hua University is the number four, slightly greater than the number 5, our neighbor National Chiao Tung University. Two private schools, TTIT and CYCU also offer Ph.D. in ME. Usually, it takes two years to finish the Master degree with thesis that is compulsory in Taiwan. The time required for a Ph.D. is about 4-6 years. Some part time Ph.D. students may take longer than six years to finish their course work, preliminary examination, and the thesis.

#### MEASURES FOR PROMOTION OF RESEARCH

One cannot say that there was absolute no scientific activity in Taiwan during the period of Japanese occupation from 1895 to 1945. As I know, some research activities in medical science and agriculture have been reported, but no research in basic science and engineering has been found in that time. The National Science Council of Taiwan established in 1959 has set up the research policy covers all fields of scientific researches. To strengthen the research power, 18 measures are taken for the promotion of research activities of Universities, Research Institutes, and National Laboratory [1].

- Measure 1: Subsidizes the recruit of research chair, and fellows.
- Measure 2: Subsidizes domestic researchers for study abroad.
- Measure 3: Subsidizes the recruit of researchers from China.
- Measure 4: Subsidizes the researchers for short term study in China.
- Measure 5: Subsidizes the bilateral symposia with China.
- Measure 6: Subsidizes undergraduate students for project research.
- Measure 7: Finances the NSC research projects.
- Measure 8: Subsidizes researchers for excellent

performance.

- Measure 9: Offers scholarships for Ph.D. students.
- Measure 10: Subsidizes research assistantship for projects.
- Measure 11: Subsidizes the publication of domestic journals.
- Measure 12: Helps the patent and copy right application [2].
- Measure 13: Helps researchers for technology transfer [2].
- Measure 14: Subsidizes the joint research projects with industrials.
- Measure 15: Supports the participation of international symposia.
- Measure 16: Subsidizes the invitation of well-recognized persons.
- Measure 17: Subsidizes the organization of international symposia.
- Measure 18: Subsidizes the over sea scholars for short term visit.

The NSC can also pays the page charge for the publication of papers written from the results of NSC funded research projects. The travel expense should be applied separately, and you may get it at most once every fiscal year. The Ministry of Education and University may also subsidize the travel expense for international symposia, at most once every fiscal year. The allowance can be part of budget of industrial research project, that can be part of professor's salary with a certain amount of upper bound.

#### RESEARCH AREAS OF THERMAL FLUIDS ENGINEERING IN TAIWAN

Researches in thermal fluids engineering includes heat transfer, fluid mechanics, and combustion. It combines with the other fields in mechanical engineering is under the Division of Engineering. Currently, the research areas of heat transfer in Taiwan emphasizes the following areas [3]: materials processing related transport phenomena; high power electronic cooling; high performance heat exchangers; thermal environmental control engineering; software development for computer aided design. Fluid mechanics research covers: fluid machinery; transportation related fluid mechanics problem; micro-machinery related fluid mechanics problem; wind engineering related fluid

mechanics problem; software development. Combustion research includes: fuel and combustion characteristics; automotive and motor cycle IC engines; furnace and burner; fire study.

### CURRENT RESEARCH PROJECTS IN THERMAL FLUIDS ENGINEERING

Table 2 shows the NSC funded research projects in thermal fluids engineering [3]. The number of projects funded are 107 and 136, in fiscal years of 1995 and 1996, respectively. In 1995, The number of projects in heat transfer is 41, the number in fluid mechanics is 21, and the number in combustion is 45. In 1996, the number of projects in heat transfer is 69, the number in fluid mechanics is 14, and the number in combustion is 45. We have more emphasis in applied research recently. The number of projects increases in the period of 1995 and 1996 in materials processing related heat transfer problem, electronic cooling, thermal environmental control engineering (TECE), and engine studies. Due to the promotion of some over sea scholars and local needs, the projects in TECE related air conditioning, compressor, refrigerants, and energy storage has formed four research groups. Similarly, three research groups in engine studies have been organized. The study on micro-scale heat transfer and fluid mechanics has become popular recently. A separate fund is allocated on this topic.

The heat transfer researches in the Thermofluids Division in Energy & Resources Lab., ITRI are carried out by 10 persons including 2 Ph.D. They emphasize the researches on the following areas [4]:

1. Air side performance for heat exchangers,
2. Tube side performance of alternative refrigerants,
3. Computer aided heat exchanger design software,
4. Expansion device,
5. System performance of small air-conditioning units (window/split-type) using alternative refrigerants (R407C & R410A).

### HEAT TRANSFER CONFERENCES AND SYMPOSIA IN TAIWAN

There are five conferences held annually that accept the presentation of heat transfer, fluid mechanics, and combustion papers. The first one is the National Conference of Theoretical and Applied Mechanics

organized by the Society of Theoretical and Applied Mechanics. The second one is the National Conference of Mechanical Engineering organized by the Mechanical Engineering Society. The third one is the National Heat Transfer Conference organized by the Thermal-Fluids Engineering Division of Mechanical Engineering Society. The fourth one is the National Conference of Combustion Science, Technology and Application. The last one is the Conference on Computational Fluid Mechanics held by the Aerospace Engineering Society. The first two have been held regularly in Winter, the third is in Summer, and the fourth and the last ones are in Spring. There are about 70 to 100 papers in thermal-fluids engineering in each conference. The conference venue are rotating around the island. The fund expenses of these conferences is partially supported by government and partially donated by industry. Only a small portion is from the registration fee.

### PUBLICATIONS IN INTERNATIONAL AND DOMESTIC JOURNALS

One of index to see the performance of researchers is to examine the publications in Journals. Several international journals from 1991 to 1995 in heat transfer, fluid mechanics and combustion have been selected in the present study. Publications by the researchers from USA, Canada, Japan, Korea, and China are also included in the list. USA is selected because it has the largest amount of publications in the world. The reasons for the selections are givens as follows. Canada has about the same population as that in Taiwan. Japan is the most developed oriental country. Korea is the most energetic country in Asia. China is the most populated country and on the opposite side of Taiwan Strait. It is known that quality of the paper is always more important than the numbers. The number of paper merely indicates how hard you work to carry out the research.

Table 3(a) shows the number of papers for ASME Journal of Heat Transfer. The total number of paper in 1991-1995 is 712. Canada, Japan, and Taiwan have about the same amount of quantity. Table 3(b) lists the publication of International Journal of Heat and Mass Transfer. Taiwan has published a large amount of papers in this Journal particular in 1993. A similar performance has been observed in Numerical Heat Transfer as shown in Tables 3(c) and (d).

Table 3(e) depicts the publication in Journal of Fluid Mechanics. Canada and Japan publish more than 13 papers from Taiwan in these years. Table 3(f) shows the publications in the Journal of Fluid Engineering. Taiwan publishes 17 paper in this Journal. Concerning the publications in Combustion, Taiwan has 16 papers in Combustion and Flame as shown in Table 3(g). Japan has 33 papers in this Journal. Table 3(h) shows the paper presented in the International Symposium on Combustion in 1992 and 1994. Japan contributes 33 papers. Only a small amount of papers contributed by Canada, Korea, China and Taiwan.

There are three journals published that accept the papers in thermal fluids engineering. The Journals are Proceedings of National Science Council, Journal of Society of Mechanical Engineering, Journal of Mechanics. The first and the third ones are published quarterly. The second one is published bimonthly.

**CONCLUDING REMARKS**

The heat transfer researches in Taiwan started in early 1970, only a small number of paper published annually. After 25 year efforts of individuals with the encouragement of NSC, the fruitful results of heat transfer research have been observed. What is left to be done in the future. One has to carry out more meaningful research and improve the quality of publication. To achieve this ends, one has to promote the communication in the international heat transfer societies and the communication with the related industries.

**ACKNOWLEDGMENTS**

The author would like thank the Heat Transfer Society of Japan for providing the chance for presentation of the paper at the 33rd National Heat Transfer Symposium of Japan. The author also like to thank the Ph.D. student Mr. S.C. Tzeng and the other students in my laboratory for their patience in preparing some of materials for the paper.

**REFERENCES**

1. "Collection of Measures and Regulations of National Science Council," NSC, Taipei, Taiwan, ROC, June, 1995. (in Chinese)
2. "Operation Manuals of Patent, Copy Right and Technology Transfer Application, National Science Council," NSC, Taipei, Taiwan, ROC, April, 1993. (in Chinese)
3. "Research and Development Plan for Thermal Fluids Engineering (Heat Transfer, Fluid Mechanics and Combustion)," Prepared by Thermal Fluids Subdivision of Mechanical Engineering, Division of Engineering, NSC, Taipei, Taiwan, ROC, December, 1995. (in Chinese)
4. "Heat Transfer Research Activities in the Thermofluids Division in Energy & Resources Lab., ITRI," Personal communication with Dr. Chi-Chuan Wang, ITRI, Hsinchu, Taiwan, ROC, April, 1996. (in Chinese)

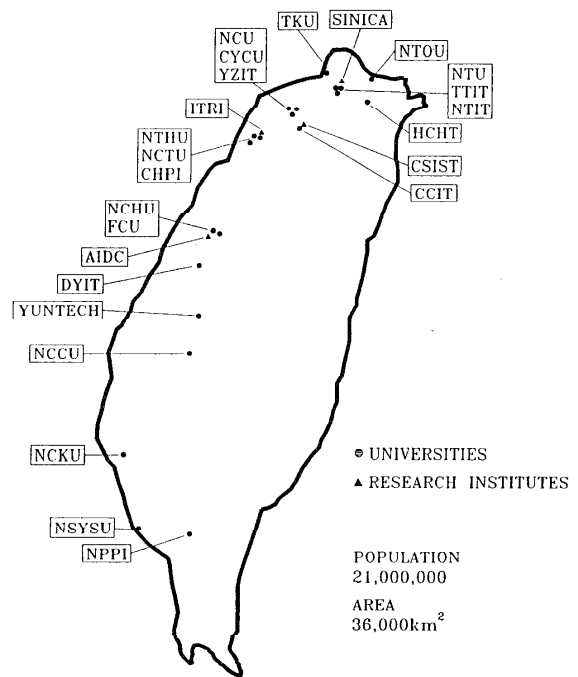


FIG.1 UNIVERSITIES AND RESEARCH INSTITUTES IN TAIWAN

Table 1 GRADUATE PROGRAMMES IN MECHANICAL ENGINEERING

April, 1996

中文校名	英文校名	專任師資	M.Sc.	Ph.D.
國立海洋大學	NTOU	21	38	0
國立臺灣大學	NTU	54	281	104
國立臺灣工業技術學院	NTIT	46	63	46
大同工學院	TTIT	14	57	10
淡江大學	TKU	18	48	0
華梵人文科技學院	HCHT	14	14	0
元智工學院	YZIT	17	76	0
中原大學	CYCU	15	90	18
中正理工學院	CCIT	39	66	22
國立中央大學	NCU	37	209	58
國立清華大學	NTHU	32	169	79
國立交通大學	NCTU	30	166	77
中華工學院	CHPI	15	40	0
國立中興大學	NCHU	24	101	0
逢甲大學	FCU	17	54	0
大葉工學院	DYIT	12	26	0
國立雲林技術學院	YUNTECH	18	40	0
國立中正大學	NCCU	8	61	0
國立成功大學	NCKU	47	206	91
國立中山大學	NSYSU	28	145	47
國立屏東技術學院	NPPI	23	23	0
<b>Total</b>		<b>529</b>	<b>1973</b>	<b>552</b>

Table 2 NSC Funded Research Projects in Thermal Fluids Engineering

Heat Transfer	1995	1996
Materials Processing	15	19
Electronic Cooling	3	11
Heat Exchanger	3	1
Thermal Control	13	32
Computer Software	1	3
Others	6	3
<b>Subtotal</b>	<b>41</b>	<b>69</b>
Fluid Mechanics	1995	1996
Fluid Machinery	4	2
Transportation	1	2
Micro Machinery	—	3
Wind Engineering	1	—
Computer Software	6	4
Others	9	3
<b>Subtotal</b>	<b>21</b>	<b>14</b>
Combustion	1995	1996
Fuel and Combustion	13	14
Engines	20	31
Furnace	9	7
Fire Study	2	1
Others	1	—
<b>Subtotal</b>	<b>45</b>	<b>53</b>
<b>Total</b>	<b>107</b>	<b>136</b>

Table 3 Journal paper publications

1991-1995 美加及東亞四國熱流論文在相關期刊發表情形

(a) ASME Journal of Heat Transfer

YEAR	篇數	USA	Canada	Japan	Korea	China	Taiwan
1991	160	113	5	7	3	2	8
1992	160	120	3	11	0	2	7
1993	162	104	13	6	4	1	6
1994	106	75	6	2	1	2	4
1995	124	83	6	9	2	1	13
總篇數	712	495	33	35	10	8	38
百分比(%)		69.52	4.63	4.92	1.40	1.12	5.34

(b) International Journal of Heat and Mass Transfer

YEAR	篇數	USA	Canada	Japan	Korea	China	Taiwan
1991	256	97	16	15	10	10	18
1992	297	122	11	18	4	5	21
1993	405	149	20	18	15	9	43
1994	314	122	10	20	11	8	32
1995	262	92	7	17	6	6	25
總篇數	1534	582	64	88	46	38	139
百分比(%)		37.94	4.17	5.74	3.00	2.48	9.06

(c) Numerical Heat Transfer Part A: Applications

YEAR	篇數	USA	Canada	Japan	Korea	China	Taiwan
1991	58	29	4	1	0	4	3
1992	52	31	2	2	1	1	5
1993	25	11	2	3	0	0	4
1994	108	66	14	3	3	2	11
1995	76	26	16	5	1	0	12
總篇數	319	163	38	16	5	7	35
百分比(%)		51.09	11.92	5.01	1.56	2.19	10.97

(d) Numerical Heat Transfer Part B: Fundamentals

YEAR	篇數	USA	Canada	Japan	Korea	China	Taiwan
1991	31	17	1	1	0	0	2
1992	34	19	3	1	0	0	1
1993	52	30	4	0	2	1	2
1994	26	17	0	0	3	0	4
1995	53	16	9	1	4	1	8
總篇數	196	99	17	3	9	2	17
百分比(%)		50.51	8.67	1.53	4.59	1.02	8.67

(e) Journal of Fluid Mechanics

YEAR	篇數	USA	Canada	Japan	Korea	China	Taiwan
1991	338	177	9	8	1	3	5
1992	350	188	7	9	1	1	6
1993	347	161	9	7	2	0	0
1994	359	166	11	8	0	3	1
1995	389	174	12	9	1	0	2
總篇數	1783	866	48	41	5	10	14
百分比(%)		48.57	2.68	2.30	0.28	0.56	0.79

(f) Journal of Fluid Engineering

YEAR	篇數	USA	Canada	Japan	Korea	China	Taiwan
1991	98	65	5	6	3	1	1
1992	97	58	5	11	3	0	2
1993	99	64	4	9	2	1	5
1994	97	61	5	10	3	1	4
1995	85	59	4	5	2	0	5
總篇數	476	307	23	41	13	3	17
百分比(%)		64.50	4.83	8.61	2.73	0.63	3.57

(g) Combustion &amp; Flame

YEAR	篇數	USA	Canada	Japan	Korea	China	Taiwan
1991	159	108	3	17	1	0	4
1992	98	62	4	4	0	2	2
1993	127	75	3	8	0	0	2
1994	90	43	1	7	3	0	5
1995	143	87	3	6	0	1	3
總篇數	617	375	14	37	4	3	16
百分比(%)		60.97	2.26	5.99	0.65	0.49	2.59

(h) The International Symposium on Combustion

YEAR	篇數	USA	Canada	Japan	Korea	China	Taiwan
1992	225	119	0	15	0	0	1
1994	328	78	3	18	3	1	2
總篇數	553	197	3	33	3	1	3
百分比(%)		35.62	0.54	5.97	0.54	0.18	0.54

## 冷蔵庫内構造検討への数値解析の適用

Application of Numerical Analysis to Domestic Refrigerator

多久島 朗, 周防 五月

(シャープ株式会社エネルギー変換研究所)

Akira TAKUSHIMA and Satsuki SUHO

(Sharp Corporation, Energy Conversion Laboratories)

### 1. はじめに

最近の家庭用冷蔵庫は、使いやすさの面からミッドフリーザータイプが主流になりつつある。このタイプの冷蔵庫では、冷凍室背部に設けられた冷却器からの冷気をファンによってダクトを通して冷蔵室に導き、ダクトに設けられた吹出口から冷気を吹き出すといった構成になっている。ところが、冷蔵室が上部にあるという構造上の問題から、冷蔵室に温度分布が生じやすいという課題があった。そこで、冷蔵室内の温度分布を均一化させることを目的として、数値解析を適用してダクト構造を検討した結果について報告する。

### 2. 熱流体数値解析

図1には解析を行った冷蔵室の内部構造および冷気流れについて示した。解析は、流れを3次元非圧縮性流体とし、 $k-\epsilon$ 乱流モデル、1次精度風上差分を用い、浮力を考慮して、定常解析で解を求めた。また内部壁には対数則、外部壁は熱伝達条件を適用し、またダクト流入部は速度、温度を規定、流出部は圧力規定とした。

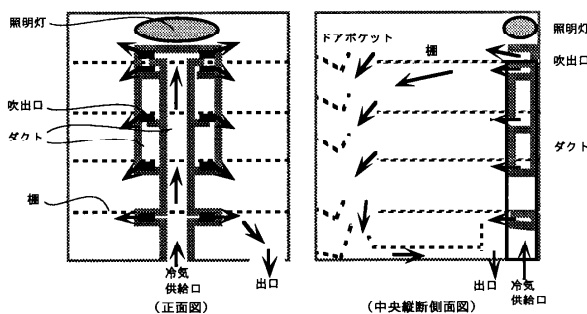


図1 冷蔵室の内部構造

図2に冷蔵室の中央縦断面における温度コンター図を示す。最上段上部に温度が高い領域が現れている。得られた温度分布は、実測結果と定性的によく一致することを確認している。

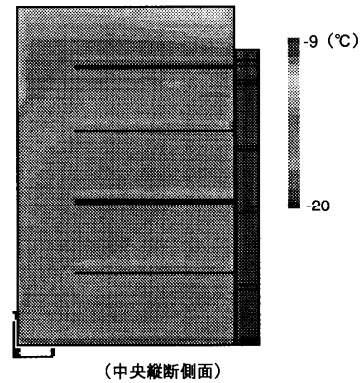


図2 冷蔵室内の温度分布

そこで、図3に示すダクト構造について数値解析を行った。図4の中央縦断面の温度コンター図から、最上段上部が冷えにくい課題が改善され、庫内全体の温度分布が均一化することが分かった。

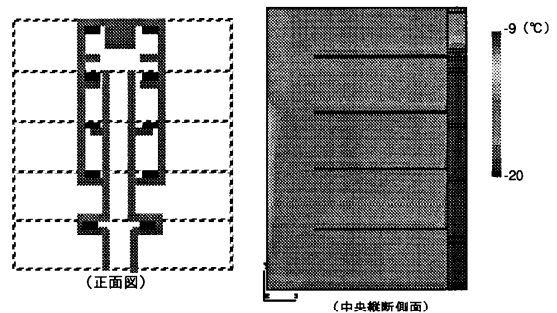


図3 新ダクト構造 図4 新構造での温度分布

### 3. まとめ

冷蔵庫の庫内温度分布の改善を目指し、ダクト構造の検討に数値解析を適用した。ダクト設計のような多くのパラメータを検討する必要がある場合には、試作・実験を行うことは多くの時間と手間が必要である。定性的ではあるが、設計の指針を示すものとして、熱流体数値解析を有効に活用できた。

賛助会員紹介  
ダイキン工業（株）機械技術研究所

Research and Development Profiles

for Mechanical Engineering Laboratory, Daikin Industries, Ltd.

蛭子 毅（ダイキン工業（株）機械技術研究所）  
Takeshi EBISU (Mechanical Engineering Laboratory,  
Daikin Industries, Ltd.)

1. はじめに

空調・冷凍技術は、人間社会のニーズのみならず資源・エネルギー等のマクロ環境動向変化にこれまでいくども遭遇する中で、いくつかの革新的技術を創造し、今日見られるような社会に受容される技術へと成長を続けてきた。ダイキン工業・機械技術研究所は、かかる革新的技術に対応し、空調を主力事業とする当社の空調新技術開発を担う基盤組織として、大阪府・堺市に1973年設立された。設立当初は空調用熱交換器をはじめとする空調機の構成要素を主たる研究対象とする数十名規模の体制であったが、近年の空調機器の著しい普及拡大に歩調を合わせ、現在は約200名の研究員を擁する組織となり、当社の空調を中心とする機械技術全般に関わる研究開発に取り組んでいる。大阪府堺市の当社・金岡工場内にある機械技術研究所の外観を図1に示す。



図1 ダイキン工業機械技術研究所外観

当社の主力事業は図2に示すマルチエアコンに代表される業務用及び家庭用空調機器であり、そのため機械技術研究所における研究テーマも新しいタイプの空調機とその要素技術に関連するものが多くを占めている。これらの研究テーマの中で、伝熱分野に属する

ものについて概観すると、これまでの空調機の技術開発が、冷暖房エネルギー効率の向上と快適な作業空間の創出を目的として推進されてきた背景から、空調用熱交換器の高性能化に主な焦点が当てられてきている。特に1970年代後半のオイルショックを契機とする省エネルギー技術開発への挑戦は、対流を中心とする高度な伝熱促進技術の社内保有を促し、現在では高性能な空調用空気熱交換器を多くの空調機器に搭載している。

他方、近年のヒートポンプ空調機の顕著な普及拡大は夏期の電力需要の不均衡を誘因し、かつ成層圏オゾン層破壊につながるとされるフロン系冷媒の生産・

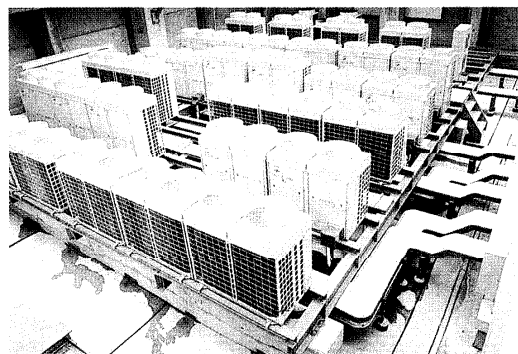


図2 業務用マルチエアコン  
(上図：室内機 下図：室外機)



使用削減が国際的に合意されるなどの状況下において、当研究所では資源・エネルギー事情と地球規模の環境問題を課題とした伝熱研究開発テーマにも積極的に取り組んでいる現状にある。

以下では、上述した空調用空冷熱交換器及びエネルギー関連伝熱研究テーマについて概説するとともに、空調外の取組みとして当研究所における極限技術研究テーマについても紹介する。

## 2. 空調機用熱交換器の研究開発

当社の主力事業である業務用・家庭用空調機に搭載される空気熱交換器に関して、高効率化・小型化を目的とした伝熱促進技術の要求は恒久的技術課題であり、当研究所でもこの種の伝熱研究に積極的に取り組んでいる。近年の熱交換器高性能化のトレンドは伝熱管の細径化によるコンパクト化・静音化であり、これを達成するためにはフィン・スリット形状と伝熱管配置の最適化が伝熱研究課題として求められている。図3に空調用フィン&チューブ熱交換器に用いられるアルミ製フィンの熱流動解析結果の一例を示す<sup>(1)</sup>。我々は空気熱交換器の細径化による性能向上化技術の限界を見極めるために、数値解析及び実

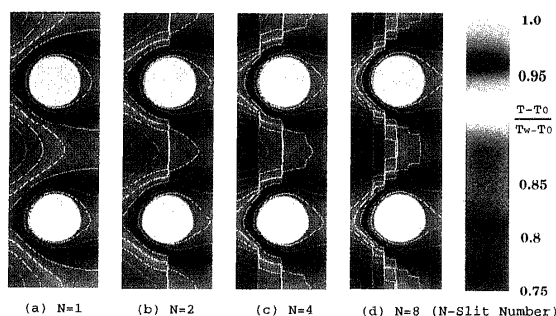


図3 フィン表面熱流動解析結果

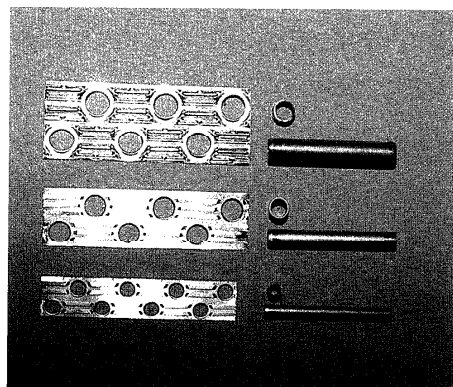


図4 細径伝熱管使用熱交換器

験の両面からの研究を行っており、図4に見られるようにφ4mm伝熱管までの細径化をこれまでに達成している。

ところで、地球規模の環境意識の高まりの中で、冷凍・空調機器の代替フロン冷媒使用に伴う技術開発が近年加速化して進められている。ダイキン工業は冷媒と空調機の製造・販売を両方行っている世界で唯一のメーカーであることから、この種の問題に対する取組みは最重要課題であり、熱交換器についても代替冷媒の伝熱特性の評価や新型伝熱管の開発など多くの伝熱研究課題に取り組んでいる。図5に当研究所で用いている代替冷媒の伝熱特性評価装置の外観を示す。本装置は圧縮機を用いずに冷媒を循環させるため、あらゆる種類の代替冷媒の蒸発・凝縮時の伝熱特性を測定することが可能であり、これまでに多くの伝熱データを公表してきている<sup>(2)</sup>。本分野における研究では、空調機に広く用いられているHCFC-22の代替候補である2成分または3成分混合冷媒の伝熱促進技術の開発が刻下の急務となっている。

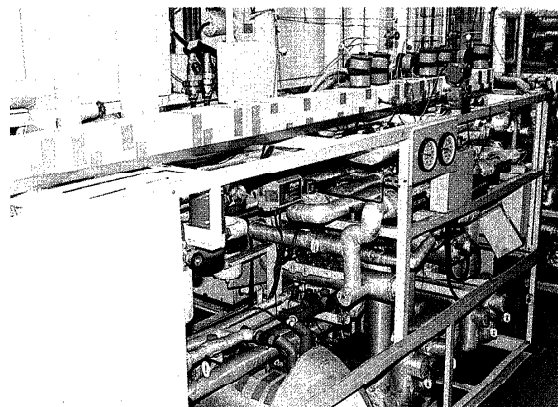


図5 代替冷媒伝熱性能評価試験装置

他方、従来のフィン&チューブ熱交換器に替わる空気熱交換器として我々は細線の前縁効果による伝熱促進を最大限に利用するメッシュフィン型熱交換器を開発した。図6及び図7にメッシュフィン熱交換器の概観と従来熱交換器との性能比較結果をそれぞれ示す。本熱交換器は細線状フィンと細径(φ4)伝熱管によって構成されており、現行のフィン&チューブ熱交換器の伝熱性能を凌駕する結果が得られている<sup>(3)</sup>。実製品搭載のためには製造コストの問題が残されているが、昨今の加工・材料技術の急速な進歩がこのハードルを近い将来克服するものと期待している。

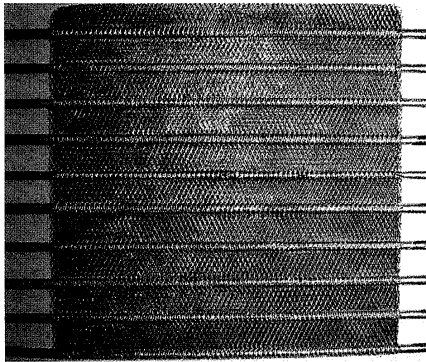


図6 メッシュフィン型熱交換器

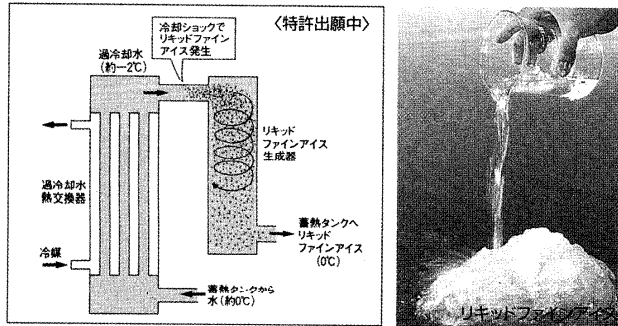


図7 メッシュフィン熱交換器と従来熱交の性能比較

### 3. エネルギー問題への取組み

省資源・エネルギーの訴求課題は空調機器に対しても例外ではなく、特に夏期の電力需要ピークに及ばず空調機の寄与度は多大であり、その是正手段としての氷蓄熱空調システムに関する研究開発を当研究所では行っている。

図8に当社の開発した氷蓄熱システムの構成図を示す。本システムは氷を伝熱管周りに生成させるステイック型ではなく、過冷却水を用いて効率よく氷を生成・融解するダイナミック型を採用している。上述した過冷却水の制御に関して、伝熱的な観点からの研究が行われ、過冷却水生成器内において流れを乱すことなく伝熱促進を図ることを可能とする伝熱管が開発され、特許公開<sup>(4)</sup>されている。

他方エネルギーの多様化を背景として、当研究所でも、(社)日本ガス協会が通産省の補助金を受けて実施した「家庭用超小型ガス冷房機器技術開発事業」への参加を機として、ガスをエネルギー源とする空調機器の開発を行っている。図9は上記事業の中で開発したアンモニア吸収式ガス冷房機の試作機概観である。本

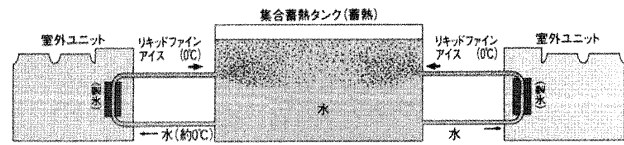


図8 ダイナミック型氷蓄熱システム

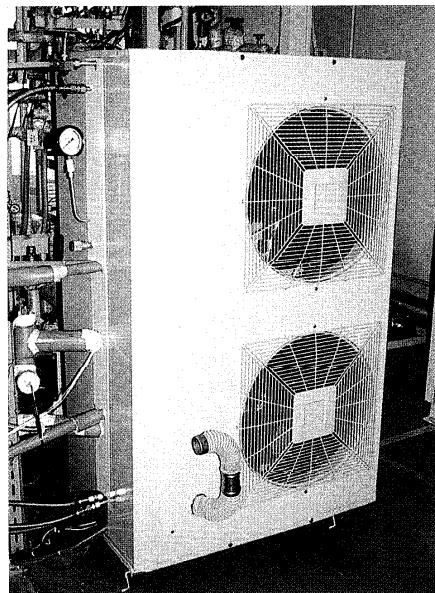


図9 小型アンモニア吸収式冷温水機試作機

試作機は吸収式ガス冷房機としては非常に高いエネルギー効率 (COP=0.68) が得られており、さらなる高性能化の技術開発が行われている。

またNEDOの委託を受けた省エネルギーセンターからの再委託研究として「エネルギー都市プロジェクト」の要素技術である熱輸送・貯蔵技術開発にも当研究所では取り組んでおり、高性能メタノール分解反応器の研究を行っている。

4. 「超」・「極」分野への取組み

当研究所では極低温分野への取組みとして、これまでに当社で培った超高真空クライロポンプ及び4K極低温冷凍機などの技術を応用して、リニア車両用GM冷凍機の開発を手がけている。図10に本冷凍機の概観を示す。本冷凍機は8W/4.5K以上の能力を達成する極めて高性能な冷凍機であり<sup>(6)</sup>、H9年から実施されるJR山梨実験線のテスト車両に搭載される予定である。

また超音速飛翔体の空力加熱に関する研究もなされており、図11は実験で得られた飛翔体周りの温度分布の一例である。本研究は超音速域における飛翔体の空力設計への応用を目的としてなされたものであり実用に供されている<sup>(7)</sup>。

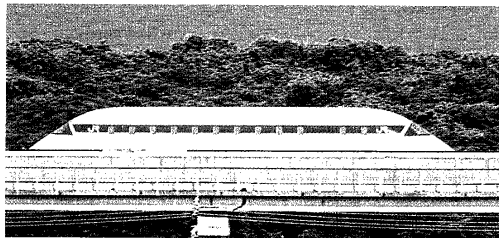


図10 リニア車両用GM冷凍機ユニット

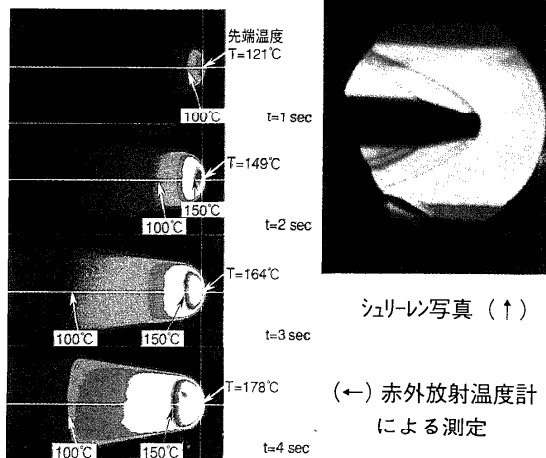
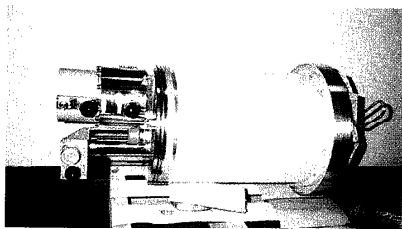


図11 超音速飛翔体周りの温度分布

5. おわりに

本稿では当研究所における伝熱分野に関する代表的な研究開発について概説した。事業分野との関係上、限られたフィールドの研究にのみ携わっている事が多く、異分野からの情報や知識が流入する機会が少ないことが新たな創造性を持った製品開発を進める上での課題であると認識している。

しかしながら熱交換器技術に見られるように空調技術も複雑化し従来技術と周辺技術の融合が求められる現状にある。そのために学会活動や企業間活動を積極的に拓げることによって、伝熱技術のさらなる向上を図っていきたいと考えている。

6. 付記

現在、当社全体での伝熱学会員の数は11名である。当研究所への連絡は以下の通り。

〒591 大阪府堺市金岡町1304  
ダイキン工業(株) 機械技術研究所  
蛭子 毅

TEL.: 0722-57-8517 FAX: 0722-50-1900

e-mail: ebisu@lab.daikin.co.jp

[参考文献]

- (1) Torikoshi, K. and G. N. Xi, "A Numerical Study on Flow and Thermal Fields in Finned Tube Heat Exchangers", ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition, HTD-Vol. 317-1, (1995) 453-458.
- (2) Ebisu, T. and K. Torikoshi, "Heat Transfer and Pressure Drop Characteristics of R134a, R32 and a Mixture of R32/R134a inside a Horizontal Tube", ASHRAE Transactions, Vol.2, (1993) 90-96.
- (3) Torikoshi, K. et al., "Heat Transfer and Friction Performance of a Mesh Finned Heat Exchanger", Prod. 10th International Heat Transfer Conference, The Industrial Sessions Papers, (1994) 93-98.
- (4) 特開平4-332391 ダイキン工業株式会社
- (5) 谷口ら, "アンモニア吸収式ガス冷房機の開発", 第30回空気調和・冷凍連合講演会講演論文集, (1996) 157-160.
- (6) 藤本ら, 「リニア車両用GM冷凍機の開発(その2)」, 第49回低温工学・超電導学会講演集(1993) 35.
- (7) 川添ら, 「高速飛翔体の空力加熱に関する研究」, 弾道学研究会誌, 第4号, (1995) 47-49.

編集後記

Postscript by The Editor

第35期副会長（編集出版担当）

荻野 文丸（京都大学）

第35期編集委員会委員長

増岡 隆士（九州工業大学）

Fumimaru OGINO (Kyoto University)

and Takashi MASUOKA (Kyushu Institute of Technology)

紅葉の深まる好季節となり、ますますご健勝のこととお喜び申し上げます。

最近、本誌「伝熱研究」には、随想、賛助会員紹介、行事カレンダー欄等の新しい企画がスタートしています。編集委員会では、本誌をできるだけ幅広いものとし、技術情報や会議・会告欄の充実も目指したいと考えております。現在は、諸外国の研究[状況]の紹介、留学体験記、人物往来等を中心とした「世界のホットニュース」欄の新設を計画しています。小特集に限らず、講義、解説、レビューを充実させたいとも考えています。各種記事の積極的なご提供をお願いいたしますとともに、このような企画あるいは今後の新企画等についてのご意見をお寄せ頂ければ幸いです。

また「伝熱研究」誌の体裁を整える努力も継続しております。A4版2段組みになって3年が過ぎようとしています。頁のヘッダーやフッターを工夫するなどの改善も試みています。この「伝熱研究」の新体裁に関連しては、いくつか編集委員会としてお願いがございます。

- (1) 原稿につきましては、2段組みのフォーマットによる御寄稿をお願いいたしたく(p.101の「原稿の書き方」をご参照ください)、とくに図表等のレイアウトも含めて、原稿本体はそのまま印刷できる形に準備して下さいをお願いいたします。編集作業の時間的制約のため、図表の大きさやレイアウトの変更は、かなりの困難を伴いますので、ぜひこの点のご協力をお願いする次第です。
- (2) 各原稿の表題、著者、著者所属等の各記事のタイトル部分は、現在編集委員会で作成しております。この場合、タイトル部分の

スペースにご留意くださり、また表題、著者、著者所属機関等の英文表記をお忘れなくご連絡ください。

- (3) 「伝熱研究」会告原稿は、原則としては半頁に圧縮して下さいようお願いしております（「会告原稿の書き方」参照）。より詳細な情報は、WWWの伝熱学会ホームページ(<http://www.mes.titech.ac.jp/htsj.html>)に掲載させて頂いております。なお、このホームページ用の原稿作成のためにも、原稿は正原稿とともに、フロッピーあるいはe-mailにて頂きたく、ご協力くださいますようお願いいたします。

第35期「伝熱研究」編集委員会の各号担当は、下記の通りです。

10月号 (No.139)	早坂洋史 (北大)
1月号 (No.140)	松尾篤二 (三菱重工)
4月号 (No.141)	太田照和 (東北大)
	片岡 勲 (京大)
7月号 (No.142)	西尾茂文 (東大)
	高田保之 (九大)
随想・長期企画	熊田雅弥 (岐阜大)
研究トピックス	門谷暁一 (コマツ)
WWWホームページ	鈴木祐二 (東工大)
世界ホットニュース	片岡 勲 (京大)
	高田保之 (九大)
	鈴木祐二 (東工大)
賛助会員紹介	増岡隆士 (九工大)
編集委員長	増岡隆士 (九工大)

(Tel : 093-884-3139, Fax : 093-883-2524)

E-mail : masuoka@mech.kyutech.ac.jp)

積極的なご提案、ご意見をお寄せください。

## 行事カレンダー

	開催日	行 事 名	会場 (開催地)	問合せ先	掲載号
1996年					
11月	22(金)	日本伝熱学会関西支部・講演討論会	神戸大学 (兵庫)	ダイキン工業(株) 機械技術研究所 蛭子 毅 Tel: 0722-57-8517, Fax: 0722-50-1900 E-mail: ebisu@lab.daikin.co.jp	Vol.35, No.139
	27(水) ~29(金)	第17回日本熱物性シンポジウム	通産省工業技術院 (茨城)	日本熱物性シンポジウム実行委員会 Tel: 0298-54-4166, Fax: 0298-54-4039	Vol.35, No.138
	27(水) ~29(金)	第34回燃焼シンポジウム	広島国際会議場 (広島)	第34回燃焼シンポジウム事務局 Tel: 0824-24-7562(西田), 7566(吉崎) Fax: 0824-22-7193	Vol.35, No.139
12月					
	1(日) ~5(木)	分子スケール/ミクロスケール伝熱の材料プロセス その他の分野への応用に関する国際シンポジウム	横浜シンポジア (神奈川)		Vol.34, No.135
	24(火) ~25(水)	第5回微粒化シンポジウム	慶應義塾大学 (神奈川)	日本液化微粒化学会事務局 徳岡 直 静 Tel: 045-563-1141 (Ex.3196) Fax: 045-563-5943	Vol.35, No.139
1997年					
1月	23(木)	第2回複雑乱流場の熱輸送シンポジウム 人間-環境系のシミュレーションとその最新動向	日本建築学会ホール (東京)	名古屋工業大学工学部機械工学科 辻 俊 博 Tel: 052-735-5333, Fax: 052-735-5347 E-mail: tsuji@heat.mech.nitech.ac.jp	Vol.35, No.139
2月	2(日) ~7(金)	The 1st Pacific Symposium on Flow Visualization and Image Processing	(Hawaii, USA)	<a href="http://www.cc.tuat.ac.jp/~psfvip-1/">http://www.cc.tuat.ac.jp/~psfvip-1/</a>	Vol.35, No.136
4月	22(火) ~24(木)	第31回空気調和・冷凍連合講演会	総評会館 (東京)	第31回空気調和・冷凍連合講演会係 Tel: 03-3359-5231, Fax: 03-3359-5233	Vol.35, No.139
5月	21(水) ~23(金)	第34回日本伝熱シンポジウム	宮城第一ホテル (宮城)	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 <a href="http://fates.nucle.tohoku.ac.jp/~sympo">http://fates.nucle.tohoku.ac.jp/~sympo</a>	Vol.35, No.139
6月	2(月) ~6(金)	The 4th World Conference on Experimental Heat Transfer, Fluid Mechanics and Thermodynamics	(バルバドス, ノリエツセル)	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)	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)	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)		Vol.35, No.138
	30(火) ~10/4(土)	8th International Topical Meeting on Nuclear Reactor Thermal-Hydraulics	国立京都国際会館 (京都)	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: nreth-8@rd.tepco.co.jp <a href="http://www.rd.tepco.co.jp/nreth-8/">http://www.rd.tepco.co.jp/nreth-8/</a>	Vol.35, No.137
11月	30(日) ~3(水)	第10回輸送現象国際会議	京都市サテライトパーク (京都)	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

## 日本伝熱学会 学術賞・技術賞・奨励賞 公募のお知らせ

日本伝熱学会の内規に基づき、学術賞、技術賞、および奨励賞が設けられています。つきましては、下記の要領に沿って本年度の募集を行いますので、自薦、他薦を問わず応募下さいますようお願い申し上げます。

### 記

#### 1. 対象となる業績

- ・学術賞の対象は、原則として、最近5回の日本伝熱シンポジウムにおいて発表し、Thermal Science and Engineering 誌またはその他の国内外で審査のある論文集に掲載された優秀な伝熱研究論文とする。
- ・技術賞の対象は、公表された優秀な伝熱技術とする。
- ・奨励賞の対象は、原則として、最近2回の日本伝熱シンポジウムにおいて優秀な論文を発表した若手研究者で、発表時に大学院生、またはこれに準ずる者（大学卒業後5年以内の者）とする。
- ・学術賞および奨励賞の対象資格は、原則として本会会員に限る。
- ・学術賞は2件程度、技術賞は1件程度、奨励賞は4件程度とする。

#### 2. 選考方法

- ・学術賞・技術賞・奨励賞の選考は、「表彰選考委員会」が「学術賞・技術賞・奨励賞に関する覚書」によって行う。
- ・表彰選考委員は、公募の他に学術賞・技術賞・奨励賞候補を推薦することができる。

#### 3. 提出書類

所定用紙「日本伝熱学会学術賞・技術賞・奨励賞 申請・推薦書」 1通  
論文抜刷または技術内容参考資料 6部  
日本伝熱シンポジウム講演論文集抜刷 6部

#### 4. 提出先

〒606-01 京都市左京区吉田本町  
京都大学大学院工学研究科化学工学専攻  
荻野文丸宛  
TEL 075-753-5561 FAX 075-761-3779

5. 提出期限：平成9年1月10日（金） 必着

6. 問い合わせ先：提出先に同じ

日本伝熱学会学術賞・技術賞・奨励賞  
申請・推薦書

申請・推薦者氏名 \_\_\_\_\_ 印

論文題名または： \_\_\_\_\_

技術名 \_\_\_\_\_

刊行物名または： \_\_\_\_\_

技術内容 \_\_\_\_\_

(論文抜刷または技術内容参考資料 6 部添付)

受賞候補者 (氏名・勤務先・職名・代表者の連絡先住所、Tel.No、Fax.No、本会会員資格の有無、氏名には振り仮名をお付け下さい)

代表研究者： \_\_\_\_\_

共同研究者： \_\_\_\_\_

関連研究の伝熱シンポジウム発表

論文題名： \_\_\_\_\_

講演発表：第 \_\_\_\_\_ 回シンポジウム講演論文集 \_\_\_\_\_ 頁 (抜刷 6 部添付)

申請・推薦理由： \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_

注) 不要の文字を消して下さい。

第34回日本伝熱シンポジウム研究発表募集

- ・開 催 日 平成9年5月21日(水)～5月23日(金)  
(5月20日(火)にプレシンポジウム講座を開催予定)
- ・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
- ・研究発表申込締切 平成9年1月24日(金) 必着
- ・論文原稿締切 平成9年3月14日(金) 必着
- ・研究発表申込先 〒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  
ホームページ : <http://fates.nucle.tohoku.ac.jp/~sympo>

【シンポジウムの形式】

- ・一般申し込みによるセッション形式で実施し、講演時間は1題目につき20分(講演時間約10分)の予定です。

【研究発表申込方法】

- ・次ページに印刷されている研究発表申込書(コピー可)に必要事項を記入し、申込整理費3千円を郵便振替でご送金の上、その払込票兼領収書のコピーを添えてお申し込み下さい(本号挟み込みの振替用紙をご利用下さい)。
- ・セッション分類表から発表内容が属する項目(大分類と小分類)を選んで必ずご記入下さい。
- ・講演発表申込は、講演者1名につき1題に限ります。また、大学等研究機関の研究室単位で申込をされる場合には、**1研究室当たりの発表件数の上限を5件**とさせていただきます。
- ・発表の採否・セッションへの振り分けは準備委員会にご一任願います(採用しない場合にはご連絡致します)。

【論文】

- ・講演論文集は原寸大のオフセット印刷で作製致します。論文の長さは、1題目当たりA4用紙2ページとし、1ページの文字数が2段組み×片側26字×文字60行=3120字です。
- ・執筆要項は、伝熱研究の1997年1月号に記載致します(発表申込者宛にはお申し出のないかぎりお送り致しませんのでご注意ください。形式は前回のシンポジウムと同様です)。

【ご注意】

- ・研究発表申し込み後の取り消しは、準備と運営に支障を来しますのご遠慮下さい。
- ・論文原稿の題目と著者名が申込書と相違しないよう、研究発表申込書の控えをお手元にお残し下さい。
- ・ご不明な点がございましたら準備委員会事務局にお問い合わせ下さい。

第34回日本伝熱シンポジウム準備委員会委員長  
戸田 三朗

セッション分類表

I、大分類														
A 強制対流	B 自然対流	C 沸騰	D 凝縮	E 物質移動	F 融解・凝固	G 混相流	H ふく射	I 熱伝導	J 熱交換	K 熱機器	L 熱物性	M 反応・燃焼	N 分子熱流動	O その他
II、小分類														
(1) 層流伝熱	(2) 乱流構造と伝熱	(3) はく離流における伝熱	(4) 噴流・せん断層の流動と制御	(5) 乱流のモデル化と数値シミュレーション	(6) 密閉空間内の自然対流	(7) 物体周りの自然対流	(8) 複合対流伝熱	(9) 熱伝達の促進・制御	(10) 回転場の流動と伝熱	(11) 微小重力下の流動と伝熱	(12) 多孔質内の伝熱	(13) 電場・磁場・電荷移動下での伝熱	(14) 核沸騰	(15) 限界熱流束
(16) 遷移沸騰	(17) 沸騰・凝縮における伝熱促進	(18) 膜沸騰・極小熱流束	(19) 二相流のモデル化と数値解析	(20) 二相流の流動と伝熱	(21) 直接接触伝熱	(22) ミスト冷却	(23) 蒸発伝熱	(24) 凝縮伝熱	(25) 融解・凝固	(26) ふく射伝熱	(27) ふく射物性	(28) 燃焼における伝熱	(29) 粒子層における伝熱	(30) 熱物性値と測定法
(31) 計測技術	(32) 沸騰凝縮利用機器	(33) ヒートパイプ・熱サイフォン	(34) ヒートポンプ・冷凍・空調	(35) 高性能コンパクト熱交換器	(36) 蓄熱蓄冷	(37) 電子機器の冷却	(38) 生産加工プロセスにおける流動と伝熱	(39) 生体と食品の伝熱	(40) 自然エネルギー利用	(41) 都市・地球環境に関する熱物質伝達	(42) その他			



第 3 4 回日本伝熱シンポジウム研究発表申込書

講演題目	和 文		
	英 文		
著者名（フルネーム） （講演者に*印）	所属・勤務先 （省略形）	伝熱学会 会員資格	会員外の方は所 属学協会と資格
和文			
英文			
和文			
英文			
和文			
英文			
和文			
英文			
和文			
英文			
和文			
英文			
セッション分類（次ページの分類表参照、Ⅰ-1、Ⅱ-1、-2は必ずご記入下さい） Ⅰ. 大分類（A~O）： 1. (     )、 2. (     )、 3. (     ) Ⅱ. 小分類（1~41）： 1. (     )、 2. (     )、 3. (     )			
キーワード（英語で4つ程度） (                                     )     (                                     ) (                                     )     (                                     )			

講演者連絡先			
住所	〒		
氏名			
電話		FAX	
E-mail			
準備委員会記入欄	受付番号	受付日	/ /

論文執筆要項の郵送	要（特別な理由のない方はご遠慮ください）	不要
-----------	----------------------	----

## 東北支部・伝熱セミナーのご案内

日本伝熱学会・東北支部では下記要領で、秋期伝熱セミナーを開催いたします。多忙のこととは存じますが、多数参加下さいますようお願い申し上げます。

- ★日 時：平成8年11月16日(土)～17日(日)1泊2日、(17日の朝食後解散)
- ★場 所：秋田温泉プラザ 〒010 秋田市添川字境内川原142-3 TEL(0188)33-1919
- ★参加費：会員および非会員11,000円、学生8,000円(宿泊費、懇親会費、予稿集代を含みます)
- ★日程およびプログラム

### ○11月16日(土)

- 13:00～13:10 開会挨拶 伝熱学会理事 太田照和(東北大学)
- 13:10～13:50 「流路内突起物まわりの流れと熱伝達の数値解析」  
中島 円(東北大学大学院博士課程)
- 13:50～14:30 「被服材料の有効熱伝導率」  
高橋 カネ子(秋田大学)
- 14:30～15:10 「円管まわりの伝熱促進について」  
相場 真也(秋田高専)
- 15:30～16:10 「分子動力学による熱流体解析」  
小原 拓(東北大学流体科学研究所)
- 16:10～17:00 「Zメカエンジンの燃焼メカニズム」  
吉澤 保夫(吉喜工業株式会社)
- 18:30～20:30 夕食と懇親会

★申し込み：10月31日(木)までに参加費(現金書留)を添えて、下記までお申し込み下さるよう、お願い致します。

〒010 秋田市手形学園町1-1、秋田大学鉱山学部機械工学科 菅原征洋  
TEL(0188)89-2346(直通)、FAX(0188)37-0405(共通)

## 日本伝熱学会関西支部・講演討論会のご案内

関西支部では若手技術者・研究者による講演を中心とした討論会(関西支部企画委員会及び若手の会共催)を下記要領にて開催いたします。多数ご参加下さいますようお願い申し上げます。

- 日 時：平成8年11月22日(金)13:00～17:00
- 場 所：神戸大学 滝川記念学術交流会館 [兵庫県神戸市灘区六甲台町1-1 (078-881-1302)]  
(阪急電車「六甲」またはJR西日本「六甲道」各駅から、市バス36系統で「神大 文・理・農学部前」下車)

### 講演内容：

- |                           |           |       |
|---------------------------|-----------|-------|
| 「高温予熱空気における低Nox化技術」       | (株)神戸製鋼所  | 西村 真  |
| 「減圧水蒸気式LNG気化器の開発」         | 住友精密工業(株) | 池田 誠道 |
| 「エアコンの省エネルギー技術」           | 松下電器産業(株) | 横山 昭一 |
| 「時間平均の概念はダメですよ!!!」        | 神戸大学工学部   | 池田 裕二 |
| 「不安定流動研究の視点—高速増殖炉から流動層まで」 | 関西大学工学部   | 小澤 守  |

参加費： 無料

懇親会： 講演討論会終了後、懇親会を予定しております。是非ご参加下さい。

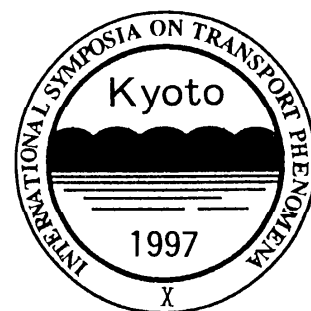
(17:00～ 会費：御一人様1500円予定)

参加申込： 氏名、所属、連絡先(TEL、FAX、e-mail)と懇親会への出欠をご記入の上、11月8日まで下記までお申し込み下さい。

ダイキン工業(株) 機械技術研究所 蛭子 毅

TEL: 0722-57-8517 FAX: 0722-50-1900 e-mail: ebisu@lab.daikin.co.jp

## 第10回輸送現象国際会議 論文募集要項



会議名称： 第10回輸送現象国際会議

The 10th International Symposium on Transport Phenomena  
(略称 ISTP-10)

開催期日： 1997年11月30日(日) - 12月3日(水)

開催場所： 京都市リサーチパーク (〒600 京都市下京区中堂寺南町17)

分野： 輸送現象に関連する熱科学・プロセス工学分野の基礎研究および応用研究

アブストラクト投稿要領：

研究目的、結果および結論を含み、研究の範囲と内容が評価できる英文約 1,000 Words のアブストラクト(論文タイトル、キーワード5個、連絡者名、所属、住所、電話およびファックス番号、e-mail アドレスを明記のこと)を下記宛郵送のこと。

アブストラクト投稿期限：

期限 1997年1月15日

アブストラクト送付先：

〒606-01 京都市左京区古田本町  
京都大学工学研究科機械工学専攻気付  
第10回輸送現象国際会議(ISTP-10)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

## 第34回燃焼シンポジウム

主催 日本燃焼学会

共催 日本伝熱学会ほか

会期 1996年11月27日(水) ~ 29日(金)

会場 広島国際会議場 [広島市中区中島1-5 TEL: 082-242-7777]

特別講演 11月27日(水) 9:40~10:40 「燃焼研究の論理」 東京大学大学院工学系研究科教授 平野敏右

招待講演 11月28日(木) 18:00~18:40 「Recent Advances in Group Combustion in Fuel Spray」 by Professor H. H. Chiu (I. A. A. National Cheng Kung University)

一般講演 下記のセッションを開催、発表数232件

「層流炎」「乱流炎」「着火」「火炎安定性」「窒素酸化物」「化学反応」「数値解析」「超音速燃焼」  
「微小重力燃焼」「廃棄物燃焼」「液体燃焼」「すす・燃焼排出物」「石炭燃焼」「金属・固体燃焼」  
「燃焼合成」「燃焼器」「エンジン燃焼」「騒音・振動」「デトネーション」「触媒燃焼」「火災」「計測

ワークショップ 11月27日(水) 18:30~20:30

「燃焼工学における数値計算の役割」「燃焼計測における誤差評価」「燃焼を利用した材料・物質合成」

参加費 一般 5,000円(当日申込 6,000円) 学生 2,000円

講演論文集 当日受取 4,000円 事前郵送 5,000円

懇親会 11月28日(木) 19:00~21:00 広島国際会議場内 会費 6,000円(当日申込 7,000円)

申込方法 所定の参加登録申込用紙での事前申込みを原則とします。事前申込み締め切り 10月19日(土)。日本燃焼学会会員は「燃焼研究」第105号をご覧ください。講演申込者の方は、執筆要項郵送時の同封書類をご覧ください。それ以外の方は、下記シンポジウム事務局へ参加登録申込書、郵便振替用紙、宿泊等案内書および申込書をご請求下さい。折り返し所定の用紙を送付いたします。

申込先 〒739 東広島市鏡山1-4-1 広島大学工学部第一類内 第34回燃焼シンポジウム事務局  
電話：0824-24-7562(西田)、7566(吉崎) FAX：0824-22-7193

日本伝熱学会・日本建築学会合同企画  
第2回複雑乱流場の熱輸送シンポジウム

## 「人間-環境系のシミュレーションとその最新動向」のご案内

人間-環境系のシミュレーション技術は、人体のモデリング、数値流体解析(CFD)の分野を初めとして、近年その発展には目覚ましいものがあります。本シンポジウムは、伝熱工学、建築環境工学分野を代表される方々に、人体のモデル化、室内における人間-環境系、都市と人間に関わる研究の最新動向をご講演頂き、快適性と省エネルギー、都市化と環境問題などに関わる諸問題の解決と研究交流の促進を図るために開催するものです。奮ってご参加下さいますようご案内申し上げます。

日時 平成9年1月23日(木) 13時30分~17時  
場所 日本建築学会ホール(東京都港区芝5-26-20)  
JR山手線田町駅下車徒歩5分

### 講演題目および講演者

1. 人体熱放散のモデル化  
・人体熱モデルの開発 中島 健 (神戸大学工学部 機械工学科)  
・不均一な熱環境における人間の快適性評価と熱収支 堀越哲美 (名古屋工業大学工学部 社会開発工学科)
2. 室内空間と人間  
・自動車空調の技術課題と将来動向 青木博史 ((株)豊田中央研究所 機械1部伝熱研究室)  
・建築室内の温熱環境と予測手法 近藤靖史 (武蔵工業大学工学部 建築学科)
3. 都市空間と人間  
・都市温暖化と人間の快適性評価 齋藤武雄 (東北大学工学部 機械航空工学科)  
・都市の土地利用と気候変化 持田 灯 (新潟工科大学工学部 建築学科)

参加費(講演資料含、当日申し受け致します)

会員 3,000円 学生 2,000円 一般 5,000円

問合せ先 名古屋工業大学工学部機械工学科 辻 俊博  
〒466 名古屋市昭和区御器所町

Tel: 052-735-5333 Fax: 052-735-5347 Email: tsuji@heat.mech.nitech.ac.jp

## 第31回空気調和・冷凍連合講演会 講演募集

共催 日本機械学会、空気調和・衛生工学会、日本冷凍協会(幹事学会)

協賛(予定) 日本伝熱学会ほか

開催日 平成9年4月22日(火)、23日(水)、24日(木)

会場 総評会館 [千代田区神田駿河台3-2-11 電話 03-3253-1771]

応募資格 講演発表者(登壇者)は、共催学協会のいずれかの会員であることが必要です。

申込方法 講演希望者は、葉書またはFAXにて「第31回空気調和・冷凍連合講演会申込書請求」と標記し、  
①氏名、②送付先(郵便番号付記、勤務先の場合は所属部課・学部・学科名まで詳細に記入)、  
③申込請求件数、④所属学協会・会員資格、以上を明記の上お早めにご請求ください。請求があり次第、講演申込書をお送りいたします。

申込締切日 平成9年1月10日(金) 必着 (消印有効ではありません)

原稿締切日 平成9年2月21日(金) 必着 (消印有効ではありません)

参加登録費 一般2,000円(参加1名分、当日会場にて徴収いたします) 学生は無料

講演時間 1題あたり講演15分、討論5分、計20分(予定)

原稿用紙 A4版(白紙に20字×50行×2段=2000字詰め原稿用紙4枚(図、表、写真を含む))

申込先 〒160 東京都新宿区三栄町8番地 三栄ビル4階

(社)日本冷凍協会 第31回空気調和・冷凍連合講演会係

電話 (03)3359-5231(代表) FAX (03)3359-5233

## ANNOUNCEMENT

Oji International Seminar

on

### NEW APPROACH TOWARD LOW-TEMPERATURE AND AIR-CONDITIONING ENGINEERING WITHOUT FLUOROCARBON REFRIGERANTS

Sponsored by the Japan Society For Promotion of Science  
and the Fujihara Foundation of Science

Tuesday, September 16 - Friday, September 19, 1997

Hotel New Oji

Tomakomai-city, Hokkaido, Japan

Oji International Seminar is sponsored by the Japan Society for Promotion of Science (J.S.P.S.) and the Fujihara Foundation of Science. This seminar will deal with the technologically most urgent field of "New Approach Toward Low-Temperature and Air-Conditioning Engineering Without Fluorocarbon Refrigerants," and will be held in Tomakomai-city (which is close to Chitose International Airport and Sapporo), Hokkaido, Japan, September 16-19, 1997. The objective of this seminar is to provide an opportunity for exchanging ideas and information on recent development and future scope in the research. Lectures will be given by invited participants from the United States, Europe and Asian countries as well as Japan. It is planned that about fifteen guests will be invited from the United States and Europe, several from the Asian countries and about twenty from Japan. A range of subjects to be covered will include the following:

1. Heat Transfer Performance of Multi-component Refrigerants
2. Thermophysical Properties of Multi-component Refrigerants
3. New Developments in Multi-component Refrigerant Cycle
4. Heat Transfer Technology for Compactness of Absorption Cycle
5. Promotion of Heat and Mass Transfer in Adsorption Cycle
6. Developments and Problems in New Refrigerants
7. Heat and Mass Transfer in Frosting and De-frosting
8. Formation of Slush Ice and Its Application to Energy Storage
9. Energy-saving Technology in Air Conditioning

Inquiries regarding the seminar should be directed to the organizers of this seminar at the following addresses.

Professor Shoichiro FUKUSAKO  
Division of Mechanical Science  
Graduate School of Engineering  
Hokkaido University  
N-13 W-8, Kita-ku, Sapporo 060, Japan  
Tel.(011)706-6424, Fax.(011)706-7889  
E-mail: fukusako@cygnus.mech2.hokudai.ac.jp

Professor Kunio HIJIKATA  
Department of Mechanical Astronautics  
Faculty of Engineering  
Tokyo Institute of Technology  
2-12-1 Ookayama, Meguro-ku,  
Tokyo 152, Japan  
Tel.(03)5734-3172, Fax.(03)3729-0628  
E-mail: khijikat@mes.titech.ac.jp

第 5 回 微粒化シンポジウム

シンポジウム開催と講演募集のお知らせ

第 5 回微粒化シンポジウム

<< 未来を拓く微粒化技術 >>

主 催 日本液体微粒化学会・ILASS-Asia・日本エネルギー学会  
協 賛 日本伝熱学会 他 3 2 学協会

1. 開催趣旨 微粒化に関する研究成果や研究開発中に生じた問題点や解決策を報告して、従来技術の熟成と萌芽的な研究を通して微粒化技術の未来を拓き新展開を図るものであり、これからの研究の発展や問題の解決に役立つ場を提供することを目的としています。
2. 開催日時 期 日：平成 8 年 1 2 月 2 4 日（火）－2 5 日（水）  
場 所：慶應義塾大学 理工学部 矢上台校舎 [横浜, 日吉]
3. 講演申込 申込締切：平成 8 年 1 0 月 1 2 日（土）  
原稿締切：平成 8 年 1 1 月 1 8 日（月）
4. 参加申込 事前参加申込締切：平成 8 年 1 2 月 9 日（月）
5. 参加費 会員 6,000 円（事前申込 5,000 円） 非会員 9,000 円（同 8,000 円）  
学生 2,000 円 懇親会 5,000 円（学生は無料）
6. 問合せ先 〒 223 横浜市港北区日吉 3-14-1 慶應大学 理工学部 機械工学科内  
日本液化微粒化学会 事務局 [担当] 徳岡直静  
Tel. 045-563-1141 Ex.3196 Fax. 045-563-5943

「伝熱研究」会告の書き方

印刷は原稿からそのままオフセット印刷を行いますので、鮮明な原稿にして下さい。大きさは、この外枠に入るように縦 115 mm 以内 横 170 mm 以内に収まるようにして下さい。この範囲に入らないものは、「伝熱研究」原稿の書き方に従って下さい。

115 mm

170 mm

## 「伝熱研究」原稿の書き方

伝熱 太郎 (伝熱大学)

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

42 mm

### 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、伝熱に関する学識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	本会に特に功労のあった者で、総会において推薦された者	0円
推薦会員	本会の発展に寄与することが期待できる者で、当該年度の総会において推薦された者	0円

## 【会員の特典】

会員は本会の活動に参加でき、次の特典があります。

- 「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」を無料で差しあげます。  
・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事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6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対応、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)  
 ・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	住所						
14	自宅						
15	TEL						
16	通言先**	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						
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: 冷凍・空調 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

0	申込年月日	1	9	9	年	月	日
*ご記入に際しての注意 日本伝熱学会からの郵送物は代表者にお送りしておりますので, 代表者の所属に変更 がありましたら, 書面にて事務局宛ご連絡下さるようお願いいたします。							
1	会員資格	賛助会員					
2	代表者氏名						
3	ふりがな						
4	名称 (所属)						
5	代 表 者						
6	〒						
7	所在地						
8	勤務先						
9	TEL						
10	FAX						
11	口数	共通・専用					

日本伝熱学会入会のご案内

1. 本学会の会計年度は毎年4月1日から翌年3月末日までです。
2. 賛助会員の会費は1口30,000円/年で, 申し込みは何口でも結構です。申し込み口数により, 次のように分けておられます。  
 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。申し込みは, 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をお送りさせていただきます。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。
3. 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, それ以外の場合には貴社ご指定の書式をご送付下さいませようお願いします。  
 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
4. 会費の払込先:  
 (1) 郵便振替の場合ー郵便振替口座 00160-4-14745 社団法人日本伝熱学会  
 (2) 銀行振込の場合ー第一勧業銀行 大岡山支店 普通預金口座 145-1517941 社団法人日本伝熱学会  
 (3) 現金書留の場合ー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. 35, No.139

1996年10月発行

THERMAL SCIENCE AND ENGINEERING

ISSN 0918-9963

Vol. 4, No. 4

October, 1996

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. 35, NO. 139

### 〈随想〉

- 洒落のすすめ ..... 前田昌信 (慶應義塾大学理工学部システムデザイン工学科) ..... 1  
均一さを追及して ..... 柳謙一 (三菱重工業株式会社技術本部広島研究所) ..... 4

### 〈会議報告〉

- 国際伝熱会議アセンブリ委員会に出席して  
..... 平田賢 (芝浦工業大学), 荻野文丸 (京都大学) ..... 7

### 〈小特集：防災と伝熱〉

- 小特集「防災と伝熱」にあたって ..... 第35期編集委員会 早坂洋史 (北海道大学) ..... 8  
火砕流温度と火山災害 ..... 谷口宏光 (大阪府教育センター),  
荒巻重雄 (日本大学文理学部応用地学科), 鎌田桂子 (神戸大学理学部地球惑星学科),  
馬越孝道 (九州大学島原地震火山観測所), 中田節也 (東京大学地震研究所) ..... 11  
マグマ水蒸気爆発と伝熱 ..... 山元孝広 (工業技術院地質調査所地質部) ..... 21  
道路火災における輸送現象 ..... 石田博樹 (長岡工業高等専門学校) ..... 27  
強風下の市街地大火における火災気流に関する風洞実験 ..... 佐賀武司 (東北工業大学) ..... 35  
Three Dimensional Simulations of Fire Plume Dynamics  
..... H.R. Baum, K.B. McGrattan and R.G. Rehm (National Institute of Standards and Technology) ..... 45  
火災現象の熱的モデリング ..... 長谷見雄二 (建設省建築研究所第五研究部防火研究室) ..... 53  
1996年のモンゴル国の森林・草原火災の調査結果概要 ..... 山下邦博 (消防庁消防研究所) ..... 60  
実験とコンピューター・シミュレーションによる火災旋風の研究  
..... 佐藤晃由 (消防研究所), K.T. Yang (University of Notre Dame) ..... 65  
ガス抜き細管上に形成された火炎について  
..... 酒井規公子 (名古屋大学大学院工学研究科地圏環境工学),  
須川修身 (東京理科大学火災科学研究所) ..... 72

### 〈伝熱シンポジウム国際セッション〉

- Thermal-Fluids Engineering Research Activities at The National University of Singapore (NUS)  
..... S.H. Winoto (Department of Mechanical and Production Engineering,  
The National University of Singapore) ..... 77  
Heat Transfer Research Activities in Taiwan  
..... G.J. Hwang (Department of Power Mechanical Engineering, National Tsing Hua University) ..... 80

### 〈研究トピックス〉

- 冷蔵庫内構造検討への数値解析の適用  
..... 多久島朗, 周防五月 (シャープ株式会社エネルギー変換研究所) ..... 85

### 〈賛助会員紹介〉

- ダイキン工業(株) 機械技術研究所 ..... 蛭子毅 (ダイキン工業(株) 機械技術研究所) ..... 86

## THERMAL SCIENCE AND ENGINEERING Vol.4, No.4

1. Frequency Characteristics of Induction Melting Furnace with Coke Packed-Beds ..... 1  
(in Japanese)  
Akiyama T., Niu M., Takahashi R. & Yagi J.
2. Numerical Simulation and Experiment of an Unsteady Thermal Polymerization ..... 11  
Process of Styrene in a Laminar Tubular Reactor  
Nagasako T., Shimada M., Katayama K. & Okuyama K.
3. An Experimental Study on a Process for Producing Vapor Growth Carbon Fiber ..... 21  
Using Ultrafine Iron Catalyst Particle Method  
-Effects of Operational Conditions on Configuration of Products- (in Japanese)  
Fujimoto N. & Koyama S.