

伝熱研究

1989
April
Vol. 28
No. 109

Journal of Heat Transfer Society of Japan

〈特集：企業における伝熱研究〉

- 21世紀に向けての企業における伝熱研究の展望 藤掛賢司
- I. 企業における基礎研究の実際
- 防災ロボットの熱防御 矢野歳和
山中晤郎
- 交通システムにおけるトンネル内熱流動解析 栗田興一、高谷幸司、大西 晶
- 鉄鋼プロセスにおける熱・流動解析 藤木俊介、広谷 精
- バイオプロセスにおける伝熱 箕浦忠行
- 流動層ゴミ焼却炉の伝熱 堤香津雄、館林 恂、古林和夫、岡田善嗣
- 流動層ボイラの層内水平伝熱管伝熱係数 阿部宣之
- II. 材料および機器開発における諸伝熱問題
- 空調機熱交換器用アルミニウム表面処理フィン材の開発 清谷明弘、堀田泰志
- 鉄鋼製造プロセスにおける加熱技術開発 林 順一、秋元 純
- バーナ開発における伝熱問題 秋山 巖、金田博志
- 半導体製造工程の伝熱問題 平沢茂樹
- III. 寒冷地でのフィールド・実用研究——北海道の例
- 煙突の結露・結氷被害と防止対策 月館 司、釜田幹男、外田昭七
- ヒートパイプを使用した永久凍土低温貯蔵庫 土谷富士夫、了戒公利、望月正孝
- 地中熱源ヒートポンプの研究開発 西岡純二
- ソーラヒートポンプメタン発酵システムにおける熱収支 金山公夫、馬場 弘、佐藤雅紀、佐久間忠秋
- IV. 企業における伝熱研究の将来展望
- 企業の伝熱技術者からみた伝熱研究の現状と将来 岩淵牧男
- 東芝における伝熱研究 根井弘道
- エネルギー関連機器開発と伝熱 門谷暁一

〈国際会議報告〉

第109回米国機械学会冬季年会 "109th ASME Winter Annual Meeting" に出席して

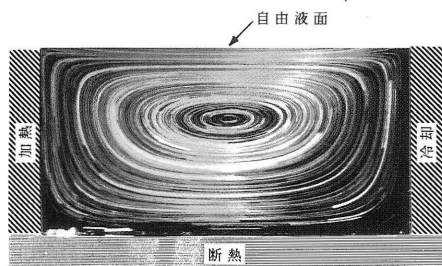
中村秀夫

日本伝熱研究会第27期（昭和63年度）役員

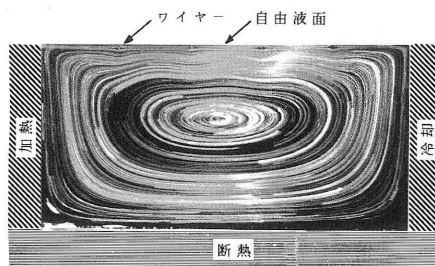
会 長		平 田 賢（東 大）
副 会 長	（無任所） （事務担当）	藤 掛 賢 司（豊田中研） 越 後 亮 三（東工大）
地方連絡幹事	北 海 道 東 北 関 東 東 海 北陸信越 関 西 中国四国 九 州	金 山 公 夫（北見工大） 太 田 照 和（東北大） 笠 木 伸 英（東 大） 新 井 紀 男（名 大） 玉 木 恕 乎（信州大） 高 城 敏 美（阪 大） 須 藤 浩 三（広島大） 藤 井 丕 夫（九 大）
幹 事 （23名）	斎 藤 凵（室工大） 稻 村 隆 夫（東北大） 藤 田 尚 毅（岩手大） 一 宮 浩 市（山梨大） 平 澤 茂 樹（日立） 北 村 健 三（豊橋技大） 竹 内 正 紀（福井大） 鳥 越 邦 和（タイキン） 牧 野 俊 郎（京 大） 佐 古 光 雄（広島大） 太 田 治 彦（九 大） 曾 田 正 浩（三菱重工）	杉 山 憲一郎（北大） 宍 戸 郁 郎（宮工技） 有 富 正 憲（東工大） 上 松 公 彦（慶應大） 加 藤 征 三（三重大） 滝 本 昭（金沢大） 石 原 勲（関西大） 藤 井 照 重（神戸大） 矢 田 順 三（京都工繊大） 水 上 紘 一（愛媛大） 上 宇 都 幸 一（大分大）
監 査（2名）	香 川 達 雄（香川栄養学園）	波 江 貞 弘（船 研）
「伝熱研究」編集委員長		宮 本 政 英（山口大）
第26回日本伝熱シンポジウム準備委員長		永 井 伸 樹（東北大）

液晶マイクロカプセルによる
マランゴニ対流の可視化

石川島播磨重工業(株)
技術研究所 エネルギー機器部

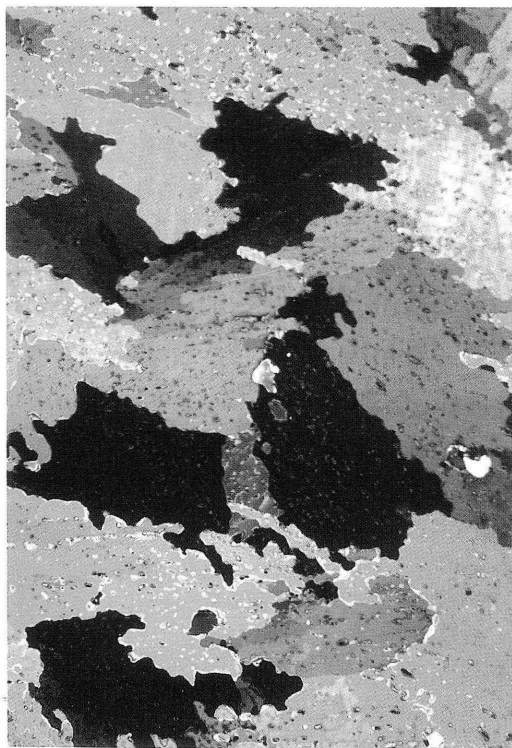


(A) 自由液面を分割しない場合

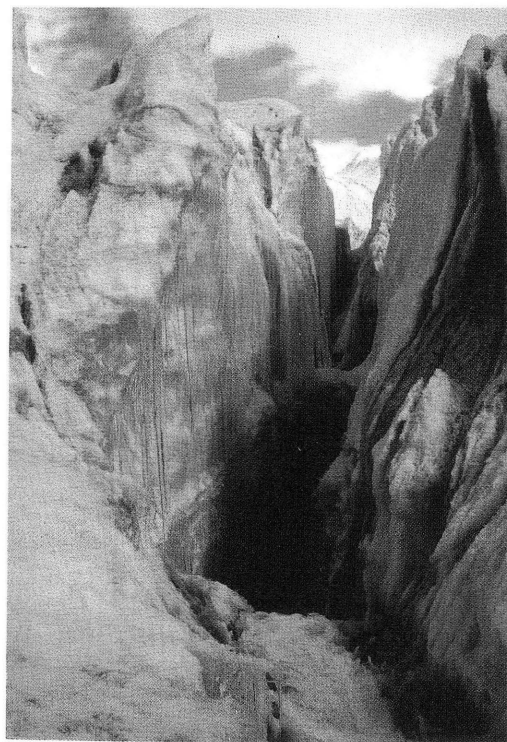


(B) 自由液面を分割した場合

二次元矩形セル(高さ5ミリ、幅10ミリ)内のマランゴニ対流の流れと温度を液体に混入した液晶マイクロカプセルで同時に可視化した写真である。セルの両側を加熱・冷却することにより自由液面に温度勾配をつけマランゴニ対流を発生させた。自由液面を分割することにより、マランゴニ対流が抑制され、等温線の曲がり小さくなっていることがわかる。



1. オホーツク海の海氷断面の偏光写真
(北海道大学低温科学研究所流氷研究施設 石川正雄技官提供)



2. 西崑崙山脈ゴウチャ氷河のクレバス
(北見工業大学一般教育等物理学 高橋修平教授提供)

伝 熱 研 究

目 次

<特集：企業における伝熱研究>

特集にあたって	編集委員会	1
21世紀に向けての企業における伝熱研究の展望 第27期副会長	藤掛賢司（豊田中研）	2

I. 企業における基礎研究の実際

防災ロボットの熱防御	矢野歳和（石播）	6
交通システムにおけるトンネル内熱流動解析	山中晤郎（三菱電気）	13
鉄鋼プロセスにおける熱・流動解析	栗田興一、高谷幸司、大西 晶（住友金属）	22
バイオプロセスにおける伝熱	藤木俊介、広谷 精（協和発酵）	42
流動層ゴミ焼却炉の伝熱	箕浦忠行（神戸製鋼）	49
流動層ボイラの層内水平伝熱管伝熱係数	堤香津雄、館林 恂、古林和夫、岡田善嗣（川崎重工）	55
宇宙における熱技術（宇宙熱発電用熱エネルギー貯蔵）	阿部宣之（電総研）	62

II. 材料および機器開発における諸伝熱問題

空調機熱交換器用アルミニウム表面処理フィン材の開発	清谷明弘、堀田泰志（住友軽金属）	68
鉄鋼製造プロセスにおける加熱技術開発	林 順一、秋元 純（新日鉄）	78
バーナ開発における伝熱問題	秋山 巖、金田博志（バブコック日立）	84

半導体製造工程の伝熱問題	平沢茂樹（日立）	94
III. 寒冷地でのフィールド・実用研究——北海道の例		
煙突の結露・結氷被害と防止対策	月館 司、釜田幹男（道立寒研）	
	外田昭七（マルショウ製作所）	100
ヒートパイプを使用した永久凍土低温貯蔵庫	土谷富士夫（帯畜大）、了戒公利（清水建設）	
	望月正孝（藤倉電線）	109
地中熱源ヒートポンプの研究開発	西岡純二（北電総研）	117
ソーラヒートポンプメタン発酵システムにおける熱収支	金山公夫、馬場 弘（北見工大）	
	佐藤雅紀、佐久間忠秋（ホクレン農総研）	124
IV. 企業における伝熱研究の将来展望		
企業の伝熱技術者からみた伝熱研究の現状と将来	岩瀬牧男（三菱重工）	131
東芝における伝熱研究	根井弘道（東芝）	138
エネルギー関連機器開発と伝熱	門谷暁一（小松製作所）	148
<国際会議報告>		
第109回米国機械学会冬季年会“109th ASME Winter Annual Meeting”に 出席して	中村秀夫（原研）	160
<地方グループ活動報告>		
北海道研究グループ講演・見学会	金山公夫（北見工大）	164
中国・四国研究グループ講演会	須藤浩三（広島大）	166
九州研究グループ講演会	藤井丕夫（九大）	168
<編集後記>		
第27期「伝熱研究」編集後記	第27期編集委員長	宮本正英（山口大）
		169

<お知らせ>

第27期（昭和63年度）総会のお知らせ	171
第26回日本伝熱シンポジウム	172
サーマル・サマー・スクール『夢伝熱元年：新世代の鼓動』	183
第3回 ―混相流計測法の基礎―	187
計測における不確かさ解析の基礎と応用	188
混相流における最新の計測技術とシミュレーション手法	189
第2回寒地圏伝熱国際シンポジウム	190
日本熱物性研究会創立10周年記念セミナー	192
第8回混相流シンポジウム	193
第10回日本熱物性シンポジウム	195
IFHP/CIB/WMO International Conference on Urban Climate, Planning and Building	196
The Third International Symposium on Transport Phenomena and Dynamics of Rotating Machinery (ISROMAC-3)	197
鑄造、溶接、先進凝固プロセスのモデリングに関する第5回国際会議	199
「伝熱研究」の原稿のワープロ化のお願い	200
英文原稿のタイピングインストラクション	202
「熱工学の研究動向と熱技術の進展」	204

Journal of Heat Transfer Society of Japan

Vol. 28, No. 109, 1989

CONTENTS

<Special Issue : Heat Transfer Research in Industries>

Preface on the Special Issue	Editorial Board	1
A View of Heat Transfer Research in Industry for the Twenty-First Century Kenji FUJIKAKE (Toyota CRD Lab. Inc.)		2
I. Present Status of Fundamental Research in Industries		
Thermal Protection of Disaster Prevention Robot Toshikazu YANO (IHI)		6
Computer Simulation and Analyses of Heat and Air-Flows in Vehicle Tunnels Goro YAMANAKA (Mitsubishi Elec. Corp.)		13
Computer Aided-Simulation on Heat and Flow in Iron and Steel Industries Kouichi KURITA, Kouji TAKATANI and Akira OHNISHI (Sumitomo Metal Ind.Ltd.)		22
Some Problem of Heat Transfer in Bio-Process Shunsuke FUJIKI and Tadashi HIROTANI (Kyowa Hakko) ...		42
Heat Transfer in Fluidized Bed Refuse Incinerator Tadayuki MINOURA (Kobe Steel Ltd.)		49
Heat Transfer Coefficient for Horizontal Immersed Tube in Fluidized Bed Kazuo TSUTSUMI, Jun TATEBAYASHI, Kazuo FURUBAYASHI and Yoshitsugu OKADA (Kawasaki Heavy Ind. Ltd.)		55
Thermal Energy Technology in Space (Thermal Energy Storage for Space Solar Dynamic Power System) Yoshiyuki ABE (Electrotechnical Lab.)		62
II. Heat Transfer Problems related to the Development of Materials and Devices		
Recent Development in Hydrophilic Coatings on Aluminum Fin Stocks for Air Conditioning Units Akihiro KIYOTANI and Yasushi HOTTA (Sumitomo Light Metal Ind.Ltd.)		68
Development of Heating Technology in Steel Production Process Junichi HAYASHI and Jun AKIMOTO (Nippon Steel Corp.) ...		78

Heat Transfer Problem in Burner Development Iwao AKIYAMA and Hiroshi KANEDA (Babcock-Hitachi) ...	84
Heat Transfer in Semiconductor Processing Shigeki HIRASAWA (Hitachi Ltd.)	94
III. Field Test/Research in a Northern District, Hokkaido	
Prevention Methods of the Damage by Dew Condensation and Freezing in Chimneys Tsukasa TSUKIDATE, Mikio KAMATA (Hokkaido Cold Region Building Res. Inst.) and Shosichi SOTODA (Marusho Ltd.)	100
An Artificial Permafrost Storeroom using Heat Pipes Fujio TSUCHIYA (Obihiro Univ. of Agric. & Veter. Med.), Kimitoshi RYOUKAI (Shimizu Corp.) and Masataka MOCHIZUKI (Fujikura Ltd.).....	109
The Study and Development of Ground-Source Heat Pump Junji NISHIOKA (Hokkaido Elec. Power Co. Inc.).....	117
Heat Balance on a Solar-Heat Pump Methane Fermentation System Kimio KANAYAMA, Hiromu BABA (Kitami Inst. of Tech.), Masanori SATO and Tadaaki SAKUMA (Hokuren Fed. Agric. Co-op.).....	124
IV. Future Prospect of Heat Transfer Research in Industries	
Current Trend and Future in Industrial R & D Activities on Heat Transfer Problems Makio IWABUCHI (Mitsubishi Heavy Ind.)	131
A Review of Thermal-Hydraulic Research at Toshiba Corporation Hiromichi NEI (Toshiba Corp.)	138
Heat Transfer in the Development of Energy Related Equipments in a Company Kanichi KADOTANI (Komatsu Ltd.)	148
<Report on the International Conference>	
Impression of the 109th Winter Annual Meeting (WAM) of the American Society of Mechanical Engineers (ASME) Hideo NAKAMURA (Japan Atomic Energy Res. Inst.)	160
<Report on the Local Group Activities>	164
<Postscript by the Editor>	169
<Announcements>	171

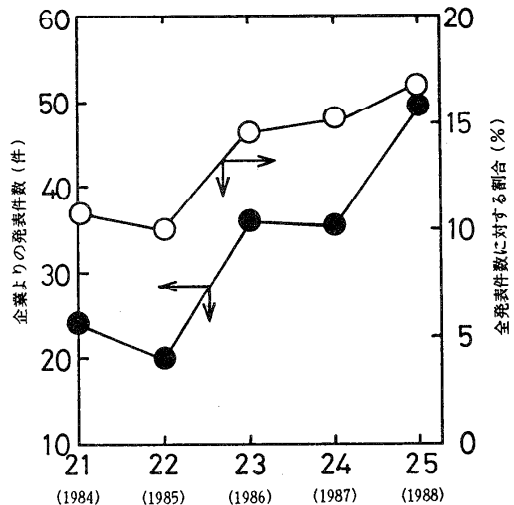
企業における伝熱関連の基礎及び実用研究の活発化状況を示すひとつの指標として、最近5回(1984-1988)の日本伝熱シンポジウムにおける企業側よりの発表件数(ただし、官学との共同研究は除く)の推移をみると、下図のごとくなり、発表件数と全発表件数に占める企業よりの発表件数割合がともに増加傾向にある。とくに、昨年(1988)の金沢でのシンポジウムでは、企業側が今日的あるいは未来テーマとして取り組んでいる技術や材料に絡んだ熱交換、宇宙、レシプロエンジン、半導体などに関する特別セッションが新たに企画されたこともあって、企業からの講演発表と参加者が急増した。

このような企業サイドの伝熱研究に対する盛り上がりを受け、第27期編集委員会では、昨年9月に1989年4月号(No. 109)の特集として、本特集テーマを取り上げることを決めた。編集方針としては、ここ数回の伝熱シンポジウムにおける企業からの発表のうちから読者の皆様に興味深いと考えられるテーマを分かり易く解説してもらうことを中心とするが、大学研究者や一般の読者にあまり知られていなく学術的には注目すべき伝熱に関連した研究、地域に密着した特有テーマ、新材料や高性能機器開発などに係わる伝熱問題、さらには、企業サイドの研究体制と将来展望を含む特集号とすることにした。また、取り上げる具体的なテーマと執筆者の選び方については、本特集の網羅すべき分野が広範囲にわたるため編集委員の主観に頼らざるを得ないとの企画方針で編集を進めました。

本特集は、藤掛副会長による「21世紀に向けての企業における伝熱研究の展望」に引き続く各論4部から構成されている。第I部では、ロボット、交通システム、鉄鋼・化学工業プロセス、バイオ、宇宙など、恐らく読者の多くがあまりご存じない分野の基礎研究の現状をご寄稿願った。第II部は、半導体製造や機器・プロセス開発など企業先行型テーマ、ついで第III部は、寒冷地に特有な伝熱問題とし、北海道におけるいくつかのユニークな実用研究をご紹介いただいた。最後の第IV部は、3社の方から官学側への要望をも含めて企業における独特の研究体制、将来の伝熱研究について意見をお寄せいただいた。この特集により現在および今後の企業サイドの伝熱研究トレンドの一端が理解され、皆様の基礎研究のシーズや問題解決のヒントとしても役立つものと期待しております。

おわりに、いずれの執筆者の方々もたいへん多忙なスケジュールのなかで本特集への執筆をご快諾いただき、短い期間にまことに興味深い内容に仕上げてください、心より感謝申し上げます。

最近5回のシンポジウムにおける企業からの発表状況



21世紀に向けての企業における伝熱研究の展望

藤掛 賢司（豊田中研）

昨年12月の幹事会（於東工大）の帰りの電車の中で、編集委員長より「企業における伝熱研究」の特集を出すので、「全般的な企業における伝熱研究の将来展望」の記事が欲しい、ついでには副会長（無任所）という立場からも是非書いて欲しいという依頼があった。しかし、異業種の将来展望が把握できない以上、その伝熱研究の将来展望に触れることはおよそ無理であることを御説明し納得いただいたものと思っていた。その数日後、文書により同様主旨の依頼を受けたので、編集委員長の御期待を無にするにしのびず、拙文を書かせていただくことにしたことを、先ず御理解いただきたい。

大部分の企業では技術予測、市場予測を行い、それを基に中長期計画を策定し、毎年見直している。近年、ユーザの多様化、技術の複合化など、先が非常に読み難い要素が増加してきたために将来予測が増々困難になってきているが、それでもなんとか技術の潮流と社会情勢の変化を予測し、不透明さの大きい中長期計画を各企業とも策定しているのが実状ではないかと思う。技術の潮流として、情報化、エレクトロニクス化、新材料、新分野として宇宙、海洋、バイオなどがニュース誌を賑わしていることは御承知の通りである。このような技術の潮流、新分野における伝熱研究の現状と将来展望は本誌に満載されているので、予測される社会情勢の変化と技術の成熟化に伴い企業として無視し得ないし、また、伝熱研究にも関連するエネルギーの問題と感性の問題に触れ、責務を果たしたことにさせていただく。

1. CO₂による地球温暖化問題とエネルギー

CO₂による地球温暖化が危惧されはじめてから久しい。しかし、最近、世界各地から大洪水、大旱魃、異常な高温あるいは低温、エルニーニョ、ラニーニャ現象など、異常気象の報道が相次ぎ、これが、あたかもCO₂による地球温暖化の前兆であるかの如き報道もあって、にわかにCO₂問題がクローズアップされて来たように思われる。カナダのトロントでの「大気の変動に関する国際会議（1988.6）」では先進国CO₂放出削減目標—2005年までに省エネとエネルギー転換によりCO₂放出量を現状より20%削減する。最終目標は現状の50%以上削減とする。—が提言された。この提言は世界的に大変な反響を集めた。米国では「国家エネルギー政策法案」が上院に提出された（1988.7）。この法案はエネルギー・資源委員会に付託されたが、大気へのCO₂排出量を2000年までに1988年水準の20%削減するという内容である。同じく「地球環境保護法案」（1988.7）が環境・公共事業委員会に付託された。これには自動車からの

CO₂ 排出量を段階的に削減し、2010年までに現状の75%に削減するという厳しい内容になっている。また、本年7月パリサミット（先進国首脳会議）ではフロン問題、CO₂ 問題などの環境問題が最重要議題になったとの報道もある。

一方、我が国では竹下首相の提唱により、本年9月中旬に東京で「地球環境保全に関する世界会議（仮称）」が開催されるのをはじめ、各省庁で各種の研究会、懇談会が開催されている。たとえば、通産省の「温室効果問題検討委員会」、「地球環境問題に対する技術貢献の研究会」（工技院）、「地球的問題に関する連絡会」（資源エネルギー庁）をはじめ、環境庁の「地球的規模の環境問題に関する懇談会」、「地球環境問題関係省庁連絡会議」、「地球温暖化問題検討会」、文部省の「環境科学特別研究」、科技庁の「地球温暖化に対する科学的知見の評価調査会」、日本学術会議の「人間活動と地球環境特別委員会」等数多い。

1979年6月に米国大統領の諮問委員会から発表された膨大な調査報告「The Global 2000 Report to the President - Entering the Twenty-First Century」によれば、大気中のCO₂ 濃度の増加には、化石燃料の燃焼がおもに寄与しており、この燃焼量は過去30年にわたって、毎年4.3%の割合で増加している。化石燃料の燃焼により放出されるCO₂ のうち、約半分が大気中に残存し、残りの半分は植物や海洋に吸収されたり、その他のプロセスで大気から除去される。国立科学アカデミの地球物理研究委員会が当時もっとも完璧だとされた気候モデルを用いて予測した結果によれば、「大気中のCO₂ が2倍になるだけでも、中緯度地域の低層の大気平均気温は約2-3℃上昇し、地球全体の降水量は7%増加する。2150年から2200年に予想されるCO₂ 濃度の増加は、地球全体の平均気温を6℃以上引き上げるかもしれない。これは現在と、7000万年から1億年前の中生代の暖かな気候との温度差に匹敵するものである。」そして、気温の上昇による海水の熱膨張、氷山、氷河の溶解による海面の上昇による陸地の減少と、降水量増加による耕地の表土流出により、食糧生産の減少等憂慮すべき状況になることを警告している。一方、このレポートでは大気中に浮遊する細塵のうち人工源による細塵が増加の傾向にあるため、地球表面に到達する太陽エネルギーが減少し、CO₂ による温暖化と相殺するのではという推測を否定している。つまり、工業社会における物質燃焼に起因したたぐいの細塵が増加したとしても、雲のアルベドに変化を与えないものであるなら宇宙空間から眺めた地球の放射特性は変化しないであろう。……………しかし、いろいろの細塵や硫黄化合物の放出が進み、地球的規模で気候変化を与える程度にまで増大するにいたったとするならば、気候の問題というよりも、人類の健康上の観点からして耐えきれないであろうと述べている。この報告書が出て既に10年弱経過した。最近の異常気象はこの報告の警告が徐々に現実のものになってきたのかは明らかでないが、いずれにしても地球規模の問題を解析し、予測する技術はまだ未熟であり、真相は誰にもわかっていないと思われる。しかし、科学的裏付けがないままに、規制だけが先行するのが世の常である。衆知のように自動車のエミッションは各国で非常に厳しく規制されているが、今だにNO_x、HC、パティキュレートなどの生体への影

響がはっきりわからないのが実状である。

CO₂ による地球の温暖化の問題は本章の冒頭で述べたように各国で、化石燃料の燃焼によるCO₂ 排出量を削減しようとする法規制が検討されており、科学的裏付けがないまま法規制のみが先行することもあり得る。したがって、我が国としても、官民の研究開発部門が協力して、CO₂ の地上固定技術と、より一層の省エネルギー技術、エネルギー転換に伴う技術開発を強力に進めなければならない。

統計資料（1983年）によると各国の年間CO₂ 排出量（単位トン）は米国1,138×10⁶、ソ連911×10⁶、中国 440×10⁶、日本 224×10⁶ と我が国は世界第4位となっている。我が国のCO₂ 排出量をエネルギー別寄与率としてエネルギー消費量をもとに試算してみると、石油 67%、石炭21%、LNG11%、その他 1%となり、産業別では製造業38.3%、電力・ガス27%、運輸23%、民生10.7%、その他 1%となる。

CO₂ 排出削減規制の問題は今後、各国で慎重に検討され、いずれ何らかの規制が実施に移されるものと思われる。企業としてはどのような規制が実施されようとも、十分それに耐えられるだけの技術を開発しておく必要がある。そのためには伝熱、燃焼研究をもとにした省エネルギー技術により、化石燃料の使用量を削減するとともにCO₂ 排出量の比較的多い石炭・石油からCO₂ 排出量の比較的小さいLNG、あるいはCO₂ 排出のない核燃料、太陽エネルギーなどへの転換が必要となってくる。ちなみに、自動車用燃料としてガソリンをLNGにかえた場合、試算によるとCO₂ 排出量は約23%減少する。このことから、前述のトロントでの国際会議あるいは米国上院のCO₂ 削減20%に関する議案は地球上で使用されている石炭・石油をLNGに代えるだけで達成可能とも言える。

従来、化石燃料については埋蔵量、生産量、コストの面からエネルギー転換の時期が論じられてきたが、CO₂ 問題はその時期よりももっと早い時期にエネルギー転換が必要であることを暗示している。そのため、企業側としては、省エネルギー技術の開発・改良、エネルギー変換効率を向上させる技術・システムの開発、太陽エネルギーなどの代替エネルギー利用技術の開発・改良に今まで以上に力を入れる必要があり、それに関連した伝熱研究に力を入れなければならなくなってきた。

2. 技術の成熟と感性

企業における製品が、人間生活に関連している以上、ユーザに受け入れられるものであることが必要条件となる。車、家庭用電気製品などを持たなかった時代から、それを持ったときの喜びの時代に移り、今や日本は経済的に豊かになり、これらの製品の大部分を各家庭が所有できるようになった。そして、より機能的で、より省エネルギー的で、デザインの良いものへと買替えが進んでくると、つぎは、より快適で、より心地良いと言った人間の感性に訴える製品が求められるようになる。

乗用車の場合、人のモビリティを唱える走る機能としての車から、安全で操作性の良い車へと進歩し、経済的にも魅力ある車へと変遷した。最近ではスタイル、色のほかに、音色、快適な温熱感、走り感、乗り心地と言ったこまやかな感性の追及された車が好まれるようになってきた。つまり、車に限らず、人間生活に密着した製品であるかぎり、技術ばかりでなく、人間の感性をも含めた幅広い思考が要請されるようになってきた。感性工学とは「人間の感性を解析することによって、その特性を製品技術に取り込み、製品の多くの特性の中に感性に適合する要素を実現する技術」と定義される。

企業での研究開発、製品開発に携わる人たちは、まずユーザーズを熟知することが必要であることは言うまでもないが、人間工学にも精通していることが要求される時代になってきた。たとえば、車あるいは住宅における快適温熱環境を実現させるためには、まず人間の温熱感覚を知らなければならない。暑くも寒くもない温熱的には無感な状態が快適な温熱環境であろうか、必ずしもそうとは言えない。人間の視覚、聴覚、嗅覚、味覚、温熱感覚は生命維持の必要性からか、変化に極めて敏感である。にもかかわらず、定常状態には極めて鈍感である。たとえば、室に入ったとき匂いを感じても、しばらく室内に居ると感じなくなることは日常体験することである。人間の感覚が変化に敏感であることからか、人間の求める快適な状態とは大体の場合変化を伴った状態である。快適な温熱環境では気流の温度、風速がある程度ランダムに変化することが好ましいことが最近の研究から判ってきた。たとえば、家庭用扇風機ではマイコン組込み式で、風速、首振りがランダムに変化するものが最近多くなってきた。つまり、一定の風速に長時間晒されると極めて不快になることが判ってきたからである。また、車のシートでも、以前はシートと人体との接触面圧の分布を実測し、一様な面圧分布になるようなシート形状にすることにより疲れを少なくしようとした。しかし、その結果は、かえって疲労を増加させることが判ってきた。つまり、人間は腰掛けて運転しているときも、寝ている時のようにかなり体を動かしており、お尻が自由に動かせないと疲労するようである。

技術が成熟し、かつ厳しい競争社会のなかで企業が生き延び、発展して行くためには、人間の細やかな感性を限りなく追及し、それを製品に反映することが必要となってきた。そのために、人間の特性、仕組みを解析することが増々重要になってくる。企業における伝熱研究においても、また、伝熱製品の開発においても人間特性を無視し得ない時代になりつつある。一方、最近、超L S I、超々L S Iと増々集積化が進んでいるI Cも、集積度を増加させる壁の一つに冷却の問題があることは御承知の通りである。これも人間の脳の神経細胞が毛細血管によって温度制御されていることから、その仕組みを解明し、それを模倣することが今後模索されていくだろう。そのためのマイクロ伝熱も企業にとって重要な研究課題である。

防災ロボットの熱防御

矢野歳和

(IHI：石川島播磨重工業)

1. はじめに

企業の業種やその企業独自の基本的な方針により、企業の研究開発の形態は異なる。現在、著者はメーカーで研究開発業務に従事している。そこで、企業での研究形態の一例を示す。我々はその研究内容によって、自主研究、事業部共同研究及び外部受託共同研究などに分類している。

まず、自主研究はシーズ志向であり、将来に芽が出そうなテーマを選定して実施するもので、若手が中心になる場合が多い。次に、事業部共同研究はニーズ志向であり、近い将来に製品や商品として事業化を考えているもの、及び現実の製品の改良や品質の向上など、事業部が直接必要とするテーマについて共同で実施する。ただし、現実には研究対象によって両者の目的が共通することがあり、自主研究と事業部共同研究の境界が明確でない場合がある。また外部受託共同研究は国、大学、事業団などの公的機関、電力会社や他社などからの受託研究および共同研究など、自社以外の機関と連携して実施する研究である。

ここで述べる防災ロボットの熱防御に関する研究開発は外部受託共同研究の一つである。

2. 防災ロボット研究の経緯

昭和59年、メーカーなど18社および2団体により極限作業ロボット技術研究組合が設立され、通産省工業技術院大型工業技術研究開発制度によるプロジェクト（大プロ）の「極限作業ロボット」の研究開発を受託した。この極限作業ロボットとは、放射線、高水圧、高温などの環境下で人間に取り代わり作業するロボットであり、それぞれ原子力・海洋・防災の三分野において点検・保守・救援活動を迅速に行うことを目指し、実用原子力発電施設作業ロボット（原子力ロボット）、海底石油生産施設支援ロボット（海洋ロボット）および石油生産施設防災ロボット（防災ロボット）の研究開発を開始した。

図1に、上記のうちの一つである防災ロボットの概念図を示す。このロボットは主に石油生産施設などにおいて点検、保守などの日常作業および消火、災害拡大防止、災害など事故時の緊急状況探索などの災害対策作業を人間に代わって実施する機能を有する。

防災ロボットの研究開発には4社1団体が参加し、IHIはマニピュレーション作業技術と耐性技術を担当した。ここで耐性技術とは、石油生産施設などでの火災等を想定したとき防災ロボットが災害環境に耐え得るための技術であり、主なものとしては耐熱性、防爆性、防爆耐圧性、耐煙性、耐食性及び密封性などがある。これらの耐性技術を個々に検討した結果、最も

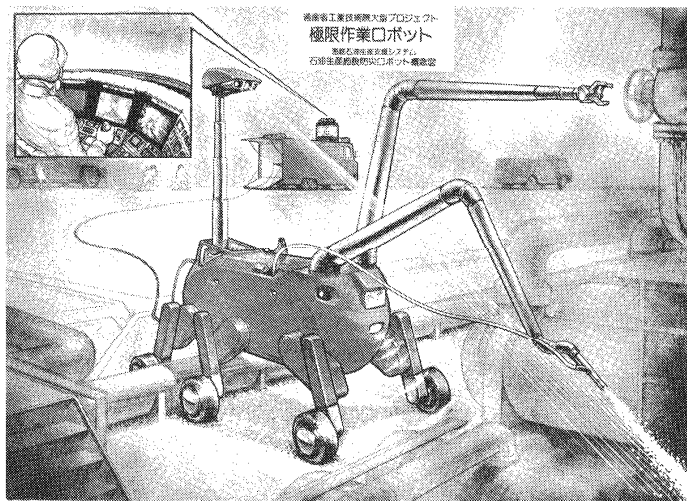


図1 防災ロボットの概念図

厳しい条件は火災等による高温雰囲気であり、そのためこのロボットには耐熱性が最も要求されることから、著者らは防災ロボットの熱防御に関する研究開発に着手した。

次に、耐熱仕様について述べる。火災現場等で活動するロボットに装備する電子機器や駆動部などを正常に作動させるためには、ロボット内部の温度を60℃以下に維持する必要がある。そこで防災ロボットの目標仕様は、放射加熱雰囲気において 800℃で3分間および 400℃で30分間の耐熱特性を持つことであり、なおかつロボットとして機能するためには冷却構造が薄くて軽量であることが必要である。

そこで、このプロジェクトの耐熱技術に係わる担当者が分担し、熱防御法について調査検討した。熱防御法は既知のように熱の伝導、対流、放射を如何に防止するか依存しており、その方法として断熱材、断熱タイル、自然対流、強制対流および表面処理による反射などがあり、また相変化による融解熱や蒸発潜熱を利用する方法として蓄熱材、ヒートパイプ、アブレーション（融解蒸発）およびトランスピレーション（しみ出し）などによる冷却法がある。以上の方法にはそれぞれ長所と短所があるが、ロボットのための薄くて軽量の冷却構造となるとトランスピレーション冷却方式が最適であると考えた。一方、熱防御法の調査から、ロケットノズル、超音速機のリーディングエッジおよびガスタービンのブレードなどにトランスピレーション冷却法を用いて高温雰囲気中で使用する例が見られた。以上の結果を総合し、冷却材として水を用い、蒸発潜熱が大きく沸点も比較的低い水の特徴を生かしたトランスピレーション冷却方式を採用することになった。

3. ロボット冷却構造の検討

防災ロボットの熱防御にトランスピレーション冷却方式を適用することを考え、その外皮材

として、ステンレス鋼を素材とする焼結繊維、焼結粉末、焼結メッシュ、フェルトおよびその繊維による織物、さらにセラミックスペーパーやシリカ繊維の布などの多孔質材を候補に上げた。これらの多孔質材を透水試験により透過率を求めた結果によると、候補となる多孔質材は、ロボット運用上に必要とされる水頭圧力条件下での流出流量が大き過ぎ、逆に透過率の小さい材料

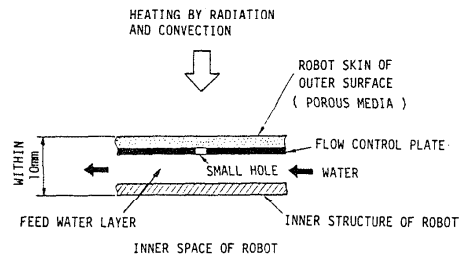


図2 ロボット冷却構造概念図

では水中の不純物により流路を閉塞する恐れがあることが明らかになった。そこでロボットの熱防御には、何らかの方法で適切な給水量が得られるよう流量を制御する必要がある。その一つとして、小口径オリフィスを用いその口径、数および系の圧力を制御することにより流量を調整する方法を考案した。図2に防災ロボットの冷却構造の概念図を示す。

4. 耐熱予備試験⁽¹⁾

まず、ロボット冷却構造の水平平板モデルを用いて加熱試験を実施した。加熱方法の一つは電気ヒータを、他の一つはガスバーナを使用した。前者は主に放射伝熱による加熱であり、後者は主に対流伝熱による加熱である。

電気ヒータ加熱試験では、供試体の有効加熱面形状は幅40mm 長さ100mmであり、供試体は電気炉で一定温度に加熱され、電気炉内で発生した水蒸気は空気加熱器で高温にした空気と置換

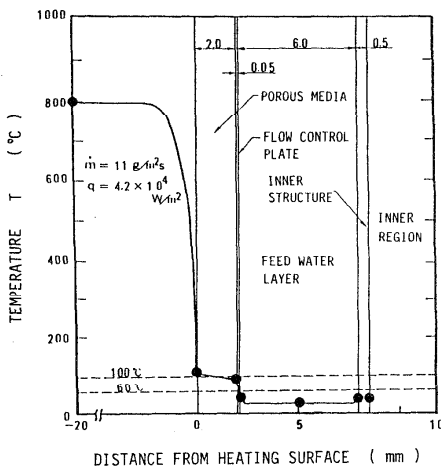


図3 冷却構造内温度分布（電気ヒータ加熱）

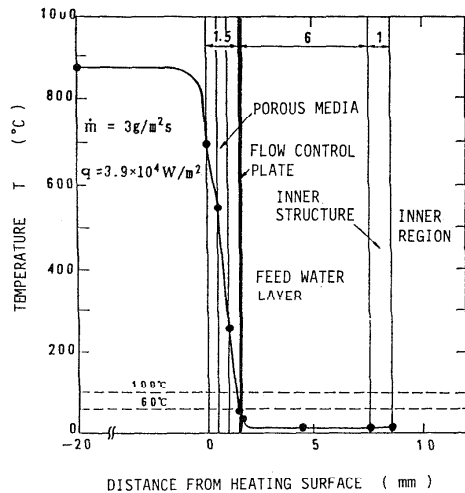


図4 冷却構造内温度分布（ガスバーナ加熱）

する方法を用いた。また、ガスバーナ加熱試験では、供試体の有効加熱面の形状は直径43mmの円形であり、プロパンガスを燃焼させ、多孔質材を下側から加熱した。

図3に電気ヒータ加熱で得られた冷却構造内温度分布の実験結果の一例を示す。この図から、電気炉壁温度が約800℃で、多孔質材表面温度は100℃、その内面は70℃、流量制御板の内側は50℃、給水層内では20℃、そしてロボット内部に相当する部分では温度が60℃以下に維持されていることがわかる。ここでトランスピレーション冷却に費やされる水の量は非常に少なく、多孔質材へ供給された水はこの内部で蒸発し、冷却に充分寄与することがわかる。

図4にガスバーナ加熱による冷却構造内温度分布の一例を示す。この図では多孔質外表面温度は約700℃と非常に高くなっているにも拘らず、給水層内温度は20℃以下に維持されている。つまり、ロボット内部の温度も60℃以下の低い温度に保たれ、この冷却方法は実用に十分耐えることを示している。このとき、外皮の非常に薄い多孔質材内部では透水量に応じて、それぞれ水、二相流および過熱蒸気の層が分布するものと考えられる。

図5に、以上の結果をまとめ多孔質外表面温度 T_w と多孔質への透水量 \dot{m} の関係を示す。実験条件は、電気ヒータまたはガスバーナの温度を約800℃とし、熱流束 q はともに約 $4 \times 10^4 \text{ W/m}^2$ である。この図から、 \dot{m} が $50 \text{ g/m}^2\text{s}$ 以上では多孔質材の表面で水はサブクール状態であり、 \dot{m} が50から $8 \text{ g/m}^2\text{s}$ までは水と蒸気の二相となり、 \dot{m} が $8 \text{ g/m}^2\text{s}$ 以下のときは過熱蒸気となっていることが推測できる。これらの実

験から、水平平板モデルによる冷却構造の外皮材中では、外部からの流入熱が水の顕熱上昇と蒸発潜熱に変換され、その結果、内部への透過熱量が非常に小さくなる。

以上、水平方向に保持した小さな平板モデルを用い、トランスピレーション冷却が防災ロボットの熱防御に適用可能であることを実験的に示した。

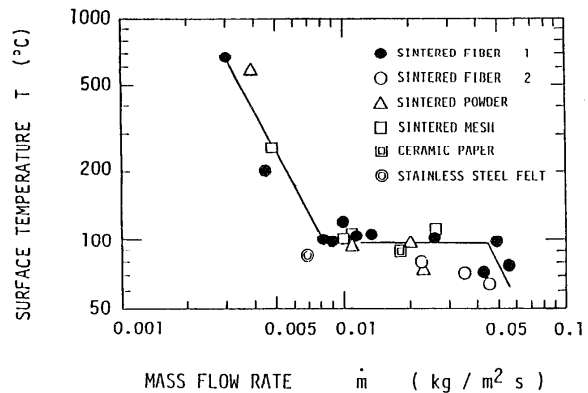


図5 多孔質外表面温度と透水量の関係

5. マニピュレータモデル試験⁽²⁾

次に、この冷却方式を防災ロボットに適用するためには、垂直方向を含むあらゆる方向においてもトランスピレーション冷却が有効に機能することを確認する必要がある。

火災現場近傍で活動し作業する防災ロボットでは、マニピュレータが最も厳しい高温条件に曝される可能性があるため、特に耐熱特性を要求される。そこでロボットのマニピュレータに関し比較的大きい円筒状の供試体を用いた研究開発を実施した。マニピュレータの円筒モデル

として腕の剛な直線部である固定部と、関節に相当する可撓（かとう）部のモデルをそれぞれ別個に作成した。図6にマニピュレータの固定部を、図7にその可撓部の試験モデルを示す。

固定部はマニピュレータの軽量コンパクト化を計るため、固定部内面材をマニピュレータ構造材として共用し、固定部内面材と流量制御板の間をハニカム構造として剛性を高め、その間を冷却材流路とした。流量制御板はトランスピレーション冷却の透水量を制御するための小孔を多数持ち、その外側に水に対して濡れ性があり、かつ断熱特性の優れた給水材を巻き、最外周は多孔質の外皮材とする多層の冷却構造とした。

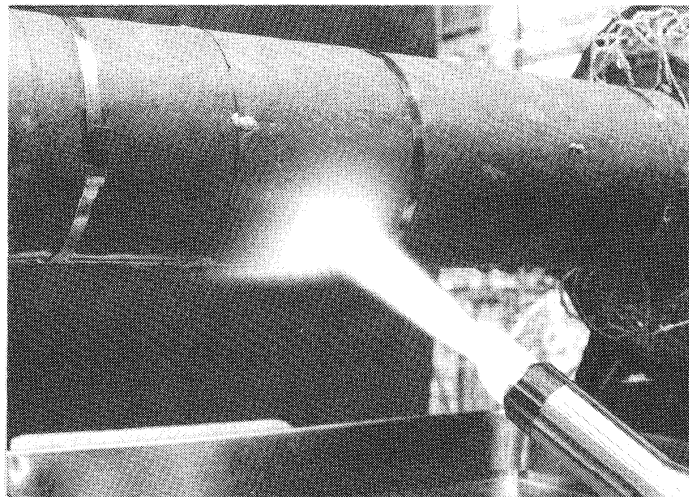


図6 試験モデル固定部局所加熱試験

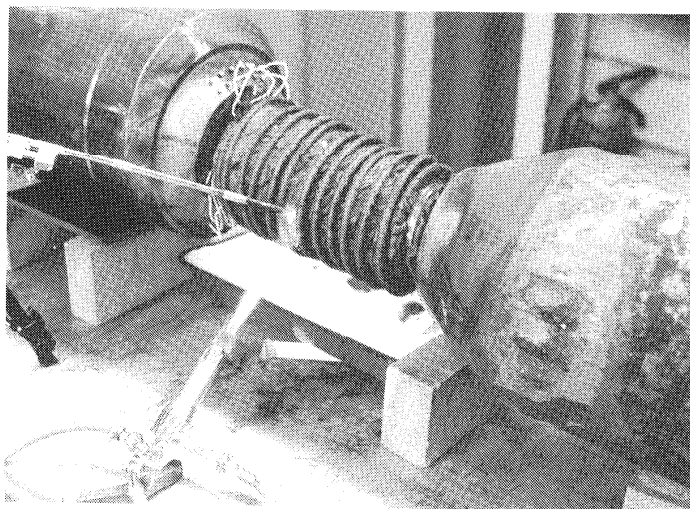


図7 試験モデル可撓部局所加熱試験

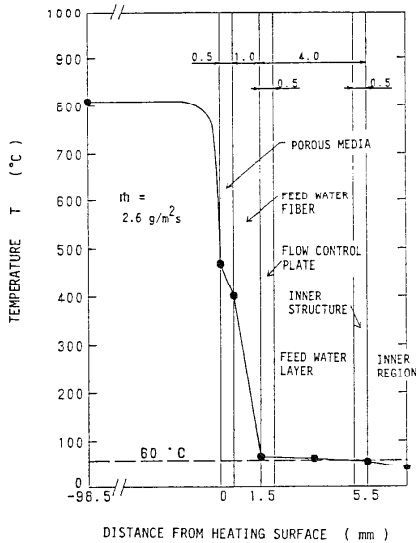


図8 固定部冷却構造内温度分布

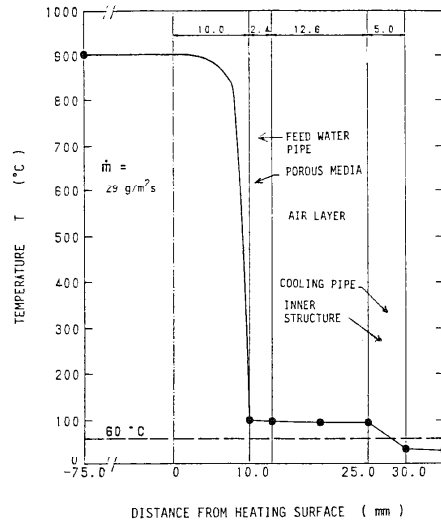


図9 可撓部冷却構造内温度分布

可撓部は、透水量を制御するための小孔を持つコイル状の給水管を骨格とし、これを包む形で外側に多孔質の給水材を、さらにその外側を多孔質の外皮材を巻きつけてトランスピレーション冷却を行う構造とし、外観はちょうちん状である。給水管はコイル状であるため曲げトルクは小さく、関節として十分機能する構造とした。

加熱試験は主に電気炉を用いて実施した。ただし、図6および7は固定部と可撓部についてガスバーナを用いた局所加熱の一例である。

図8に電気炉加熱による固定部の最上部での冷却構造内温度分布を示す。この条件は最も透水量が少なく厳しい条件で得られた結果である。この図でも電気炉表面温度が800°Cのとき、外皮材表面温度は約500°Cであるが内面材内側の温度は60°C以下となっている。この条件より透水量が多くなると外皮材の温度も低くなり、従って内面材内側の温度もかなり低くなる。つまり、第4節の耐熱予備試験での温度分布と同様の結果が得られ、重力の影響を最も受けると考えられていた円筒モデルの最上部においても十分な冷却が行われることが実証できた。

図9に同じく電気炉加熱による可撓部の最上部での冷却構造内温度分布を示す。この図から、固定部で得られた結果と同様の結論を導くことができる。

以上、マニピュレータ円筒モデルを用いて試験を行った結果、しみ出しの位置や供試体の形状に関係なく、トランスピレーション冷却が防災ロボットの熱防衛に適用可能であることを実験的に示した。

6. トランスピレーション冷却の応用

以上本報では、防災ロボットの熱防御にトランスピレーション冷却を用いる方法について検討し実証した。これは冷却材に水を用い、その蒸発潜熱が大きいことを有効に利用する方法である。この方法は、麻で作られた消防ホースからは水がほど良くにじみ出ているため、火災現場などでもホースが焼損しないことが古くから経験的に知られていることに対応している。

防災ロボットの熱防御法は、トランスピレーション冷却と多孔質材とを組合せ、透水量（水の消費量）を最少とする条件で、高温雰囲気でもロボット内部を低い温度に維持できる方法である。

この熱防御法の応用としては、消防服、防火頭巾や防火カーテンなどの消防・防火用品、耐火金庫などの貴重品保管庫、コンピュータなど情報中枢の耐火、はしご消防車の届かない超高層ビルや地下の防火設備と緊急避難室、病院や厨房・台所などの防火安全設備など、種々の装置やアイデアに対して適用可能である。

今後、わが国の社会資本の蓄積に伴い、都市の超高層化や地下の利用、および情報の高度化が進展し、安全と情報中枢の確保に対する要求は増々大きくなると予想されている。

一方、水あるいは他の液体を用い、その蒸発潜熱を有効に利用する適用例として、NASAのスペースシャトルの打ち上げと再突入時の熱制御など宇宙関連機器に用いられており、同様の方法は現在わが国でも開発に着手しているスペースブレン（宇宙往還機）の熱制御にも適用可能である。

そこで今後、防災ロボットの熱防御で用いたトランスピレーション冷却法は、防火、防災と宇宙関連機器など多くの分野で何らかの形で活用できるものと期待できる。

参考文献

- (1) 矢野、松島、淵上、「トランスピレーション冷却による防災ロボットの熱防御」、第25回日本伝熱シンポジウム講演論文集（1988）pp. 187-189.
- (2) 極限作業ロボット研究開発成果発表会予稿集、極限作業ロボット技術研究組合、昭和63年6月、pp. 273-278.

1. はじめに

過密化する大都市における大量輸送手段としての地下鉄網や都市間の自動車道路網の最近の発達が目まましいものがある。

大都市の人口急増に伴って必要となる大量輸送手段としては、地上の空間利用に著しい制約を伴うため必然的に地下利用に繋がり、地下鉄建設が世界的にも活発化している。従来、日本では地下鉄は“夏は涼しく、冬は暖かい”が定説であった。このため地下トンネル環境の維持のための積極的な換気設計の必要性も少なく、かつ地下鉄建設は諸外国の例を含めても涼冷な比較的高緯度地域が多く、したがって大規模の換気方式の採用は少なかった。しかし、最近ではホンコン、シンガポールといった高温・多湿の低緯度地域における建設が増加する他、我が国においてもハイアメニティ化への要求の高まりのため地下鉄車両の冷房が不可欠にもなっている。車両搭載の空調機からの排熱は、乗客数に比例した列車運行回数の増大による車両電機品からの発熱量とあいまって、トンネル内への放熱量を急増させ、特に夏期のトンネル環境を悪化させている。その改善には空調機の適正な選定やトンネル換気制御系のトータル設計が望まれ、それには地下鉄環境の熱・流体シミュレーション技術が必要となってくる。

一方、山間部を多く有する日本の国土事情から自動車道路の建設にもトンネルはしばしば採用される。最近のモータリゼーションの普及に伴った交通量の増大とトンネルの長大化は、トンネル換気制御の重要性を一層高めている。現在では排ガス処理を中心とした正常な交通時のトンネル換気制御法はほぼ確立されていると言える。しかし、昨今の交通量の増大に伴ってトンネル内の自動車衝突事故等による火災は年々規模が大きくなる傾向にある。トンネル建設の経済性をも考慮した非常時の換気制御は、トンネル内のマイクロな煙流動等の把握により木目の細かい制御技術が確立されねばならない。

このような状況の中で、地下鉄環境の改善や道路トンネルの安全性向上の観点から熱流体技術がどのように活用されているかを当社の取組み事例から紹介していく。

2. 列車走行時の地下鉄トンネル内の熱流動解析⁽¹⁾

2-1. 狙い

地下鉄トンネル内を列車が走行するとき、列車ピストン作用によりトンネル内には列車

$$\text{換気風圧}\Delta Pf = (P1-P2) + (P2-P3) + (P3-P4) \quad (1)$$

によって与えられる。

一方、トンネル各部での風速 V は、 ΔPf に対するトンネルや換気孔内での摩擦損失やトンネルと換気孔との間の分岐・合流損失等とのバランスにより決り、ここでは非定常のベルヌーイ式に基づいて解析された。尚、換気孔に機械換気が設置されている場合はその送風機の発生風圧が付加されることになる。

列車からの発熱としては列車走行のための電気機器と空調機（冷房機）からの排熱がある。通常見られるような（自冷式）抵抗器を搭載した車両では、車両電動機に入力された電力の大部分は制動時の発電ブレーキの発生電流に変換され、それは熱容量の大きい抵抗器からの発熱として放出される。このため、抵抗器からの発熱は時間的にほぼ一様とみなすことができ、本シミュレーションでは1列車を編成する各車両から均一で、かつ時間的に定常な排熱があると仮定された。

②非定常温度解析によるトンネル壁の熱授受

車両からの発熱は列車風の温度を上昇させることによってトンネル壁を加熱し、土中へと漏洩する。一方、風の温度がトンネル壁よりも低い場合には壁（土中）よりトンネル内に熱を放出することとなる。土中への蓄熱は半年単位の中期の環境変化に影響を与え、夏と冬での空調機能力の選定に配慮を要する場合が出てくる。短期的には列車走行の周期と一致してトンネル壁の極く表面（熱伝導を差分法により計算した結果、大略3cm程度）に限定された熱の呼吸現象が生じることとなる。

本シミュレーションでは短期的な評価を目的とし、計算規模の膨大化を避けるため、トンネル壁面温度 T_w は列車の通過周期に相当した単振動とみなされた。

$$T_w = B \sin(\omega t + \Phi) \quad (1)$$

通常、地下鉄トンネル壁は地下水の浸透のため濡れており、トンネル壁の熱の授受計算の精度向上には濡れ面である壁の扱いに注意を払わねばならない。ここでは、計算の簡略化のため相対湿度が一定であるという仮定のもとに、空気比熱を修正し、潜熱補正を行った。また、トンネル壁とトンネル風との熱伝達では円管内の熱伝達係数の式を用いた。

2-3. シミュレーション結果

ホンコン地下鉄MTRC（写真1）の車両・トンネル構成の一例を表1に示す。シミュレーションにあたっては列車は図3の走行曲線に従って走行し、その場合のトンネル風量 Q と各車両回りの空気温度の時間的変化が図4と5に得られた。図中、CASE1は通常走行する場合、CASE2は列車がトンネル内で信号停止した場合に相当する。車両搭載の電機器と空調機からの発熱はホンコン地下鉄の基本計画に沿ってそれぞれ1432kWと1496kWとされた。低緯度に位置するホンコン地下鉄の一つの特質がこの空調機の過大な能力であり、高温多

風（トンネル換気風）が発生することはよく知られている。この列車風はプラットホームや階段に立つ乗客の安全性に係わる他、駅舎の空調機能力の適正選定や列車搭載の電気機器・空調機の正常動作の確保にも影響する。特に、列車搭載の電気機器・空調機からの排熱は非定常的に走行する列車によって生じる列車風の中に放熱され、一部はプラットホームへ、一部はトンネル換気孔を経て外気に放出される。また温度上昇した列車風がトンネル壁を暖め、熱は土中へも移動する。このため、トンネル内の熱流動シミュレーションにより短期的には車両回りの温度分布とトンネル換気風量の把握により、車両電機品の信頼性評価とより正しい駅舎空調負荷知ることができる。また長期的には土中蓄熱の定量的評価と環境変化の予測が可能となる。

2-2. 解析モデル

図1には、N本の換気孔を持つトンネル内をA駅からB駅に向けて規定の速度曲線にしたがって走行する列車を想定し、それによって生じる列車風の風量・温度ならびに土中への熱漏洩に関する解析モデルを示す。解析はいずれも非定常問題として扱われ、①列車ピストン作用による列車風の解析、②トンネル壁を介した熱の授受を考慮した温度解析、からなっている。

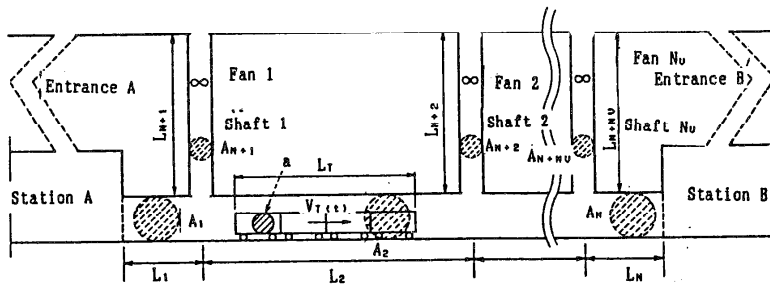


図1 列車走行シミュレーションの解析モデル

①列車ピストン作用によるトンネル換気風の解析

トンネル内を列車が走行する場合、列車の前、後部では断面積の急変により、また列車とトンネル内壁の両表面における流体摩擦により圧力損失が発生し、これが列車ピストン作用を発生させる換気源となる。図2にはこの算出モデルを示し、トンネル風 V_t は、

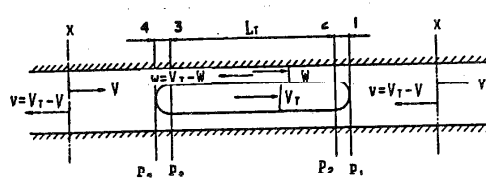


図2 列車ピストン作用の算出モデル

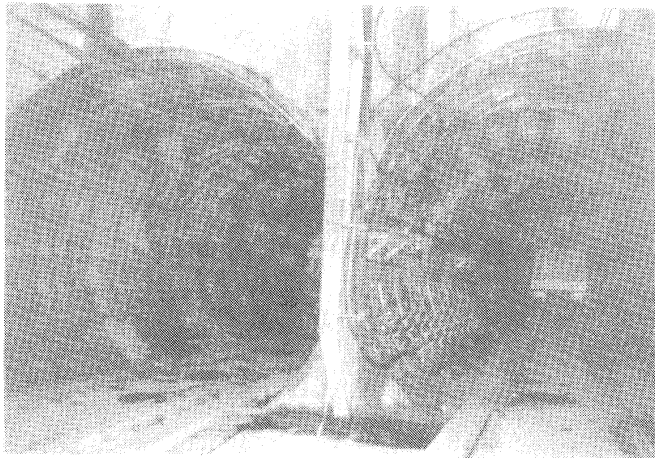


写真1 ホンコン地下鉄MTRC

表1 ホンコン地下鉄の
車両・トンネル構成

	Section	Length
Tunnel 1	17.3 m ²	50 m
2	17.3 m ²	690 m
3	17.3 m ²	50 m
Shaft 4	2.0 m ²	10 m
5	2.0 m ²	10 m
Car Section	9.5 m ²	—
One Car Length		22.5 m
Car Peripheral Length		10.9 m

湿地帯での快適性の維持と環境劣化の促進とのトレードオフが評価されねばならない。因みに、日本の地下鉄用空調機の能力はこの1/3程度である。

通常走行の場合(図4)、列車の周囲空気温度は駅Bへ入構する直前に最大52.5℃に達することがわかる。通常車両用空調機の凝縮器(室外器)の周囲温度は約55℃を上限として設計されているため、この解析結果は高温環境下での空調機の正常動作についての問題を提起している。

列車がトンネル内に一時停車する場合(図5)、換気風量Qは列車の減速に対応して減少する一方、車両発熱は時間的に一定とした計算上の仮定のため車両回りの空気温度は著しく高くなり、再発進の後には最高80.4℃にもなることが分る。しかし、空調機は凝縮器(室外設置部)周囲温度が高くなると動作停止する保護装置のため、現実にはこのような高い温度にまで上昇することはない。

このシミュレーションでは各換気孔の風量も得られることから、駅プラットフォームに流入する熱エネルギーと換気孔より外気に放出される熱エネルギー等を定量的に評価することができ、従って駅の空調負荷計算の高精度化とそれに基づいた機器設計が可能となる。

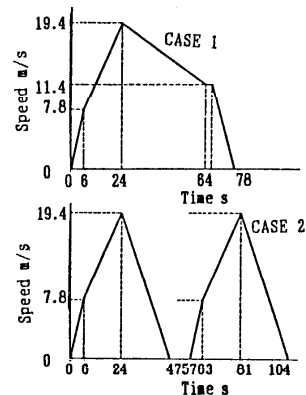
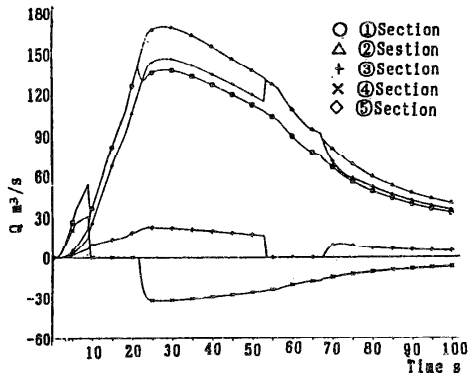


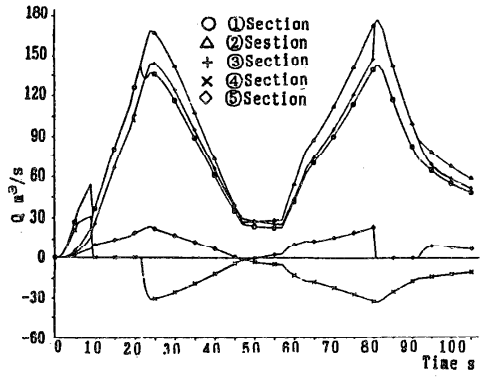
図3 列車走行曲線

CASE 1: 通常走行

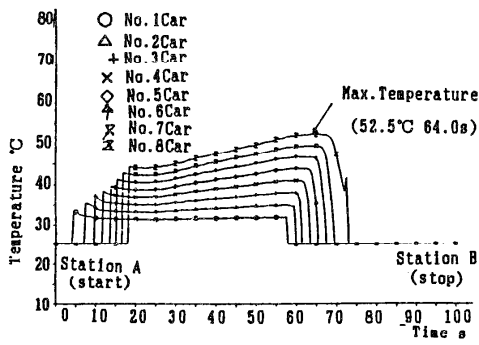
CASE 2: 一時停止



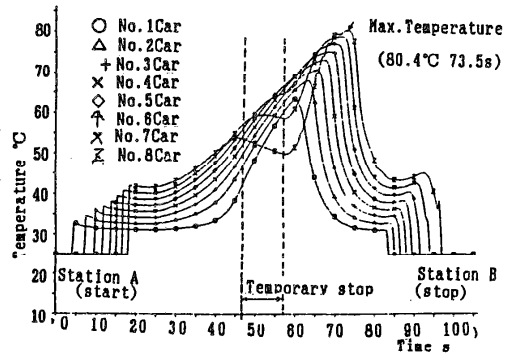
(a) 各セクションの風量変化(CASE 1)



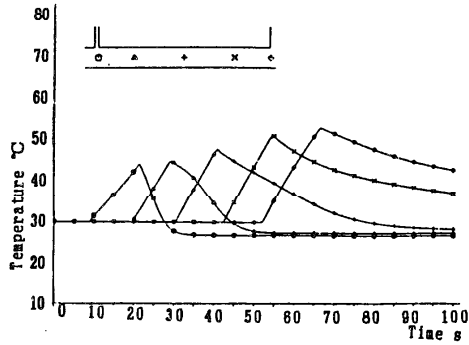
(a) 各セクションの風量変化(CASE 2)



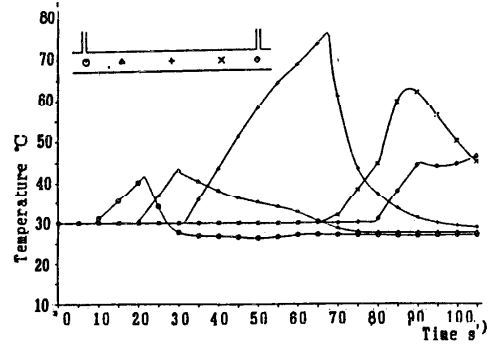
(b) 列車周りの温度変化(CASE 1)



(b) 列車周りの温度変化(CASE 2)



(c) トンネル内部の温度変化(CASE 1)



(c) トンネル内部の温度変化(CASE 2)

図4 トンネル換気風シミュレーション
(CASE 1 : 定常走行時)

図5 トンネル換気風シミュレーション
(CASE 2 : トンネル内一時停止時)

3. 三次元数値解析による自動車トンネル火災シミュレーション^(2, 3)

3-1. 狙い

平常時の道路トンネルの換気設計技術は、従来の水力学的な手法によりエンジニアリング・レベルでは完成の域にあるといえる。異常時（例えば火災時）においても、従来より種々の換気方式が提案されているが、東名自動車道・日本坂トンネルの火災事故を初めとして、交通量の増大により大惨事の可能性も高まっているため、一層の研究が必要となっている。

近年の道路トンネルは、最近建設された我が国で最長の自動車トンネルである関越トンネル（10.9km）のように、長大化する傾向にある。一方、経済性の面からは、建設コストの急騰を避けるためトンネルの掘削断面を小さくする方向にあり、従来の換気方式（横流方式）に限界が見えてきている。

安全性と経済性を両立させる換気制御には、より綿密な解析と設計技術が必要となる。特に、火災時には水力学的なオーバーオール評価ではなく、三次元で非定常の微視的な煙と熱の流動解析に基づくミクロな設計技術が要求されている。

火災時の高温の気流と煙の拡散から人間が安全に避難できるかは、換気孔と送風機の適正な設置に加えて、トンネル断面内の気流、温度そして煙の分布状態を把握することにより木目の細かい制御することに依存している。このような観点から熱流体の基礎方程式の非定常、三次元乱流数値計算を最大限に活用することを試みた。

3-2. 縦流換気方式における火災時の流動解析

①縦流換気方式

縦流換気とはトンネル内のジェットファン等によりトンネル軸に沿った換気風を発生さ

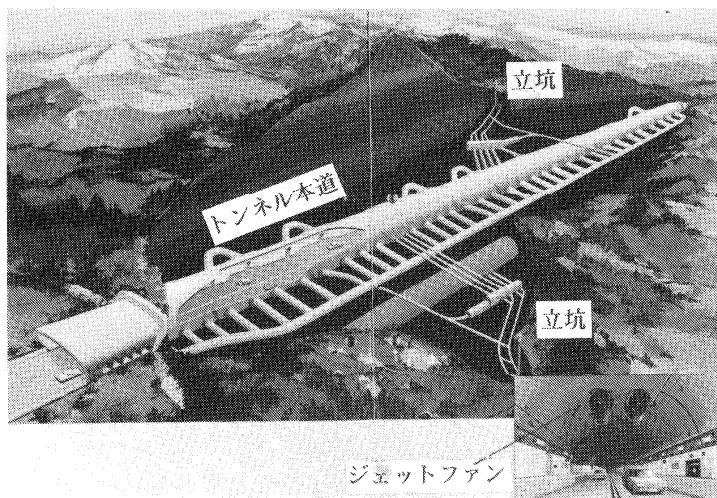


写真2 縦流換気方式（関越トンネルのカタログ⁽⁴⁾より）

せる方式（写真2）であり、換気風はトンネル出入口と山頂にまで繋がった立坑から給排される。最近の道路トンネルでは、交通量を初めとしてトンネル風速、COや煤煙濃度等の高度な監視制御システムとそれに基づく防災システムが設けられている。

②基礎方程式と計算モデルの検証

よく知られた熱流体基礎方程式（連続式、運動量保存式、エネルギー保存式）に加えて、火災時の煙挙動をシミュレートするため煙濃度の保存式を用いて三次元・非定常解析を行った。乱流モデルとしては、乱流エネルギー k とその散逸速度 ϵ の2方程式乱流モデルの一般形とトンネル壁近傍での壁関数による速度分布を用いた。

熱流体数値計算の最近の進展には目覚ましいものがあるが、流体现象の全てに通じる一般的なモデルの確立には至っていない。ここで用いた乱流モデルの妥当性や差分格子の適正化等のチェックのため、火災による熱発生を電気ヒータによる加熱板により模擬した小形模型実験を行った（写真3）。

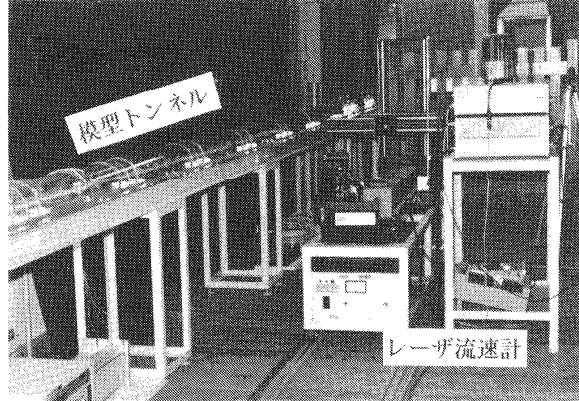


写真3 模型トンネル実験の状況

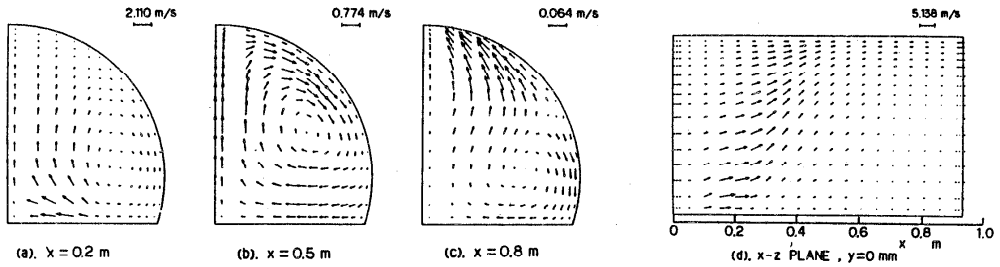
この模型実験ではレーザー流速計による非接触のトンネル内の気流速度分布や熱電対によるその温度分布が計測され、数値計算結果との比較によりその精度を検証した。

③トンネル内流動シミュレーションの結果

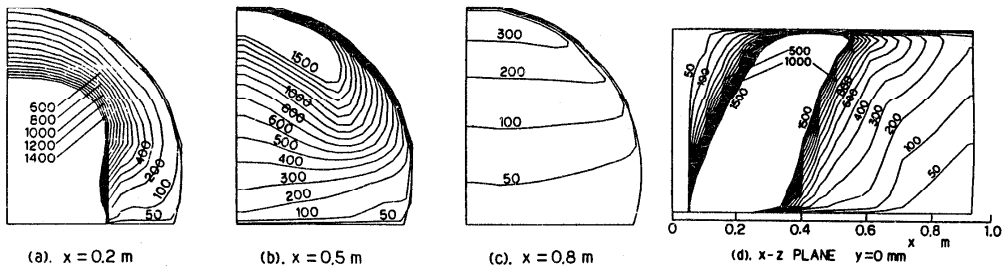
直径171 mm、長さ920 mmのモデル道路トンネルにおいて、ガソリン（発熱量 $H_g = 48600$ kJ/kg）が12.2kWの発熱のもとに燃焼した火災現場を想定し、ガソリン1 kg当り減光率濃度発生係数 $D_c = 820$ 1/s · m²/kg の煙が発生したことを仮定する。この場合、トンネル入口での気流速度が0.7 m/s 時におけるトンネル断面内の気流速度、温度そして煙濃度分布を図6に示す。

図6 (a) より、火災現場に近い $X = 0.2$ m の断面では強い熱発生のため急激な上昇気流が生じ、それが壁面に沿って降下し、強い循環流を発生させていることが分る。また、図(b) では断面の半分以上が1000℃を越える高温領域となっている。さらに下流に進んだ $X = 0.8$ m の断面ではトンネル下面に50℃以下で、煙濃度も比較的低い領域が出現し、避難にあたってはこの領域の確保が重要となる。

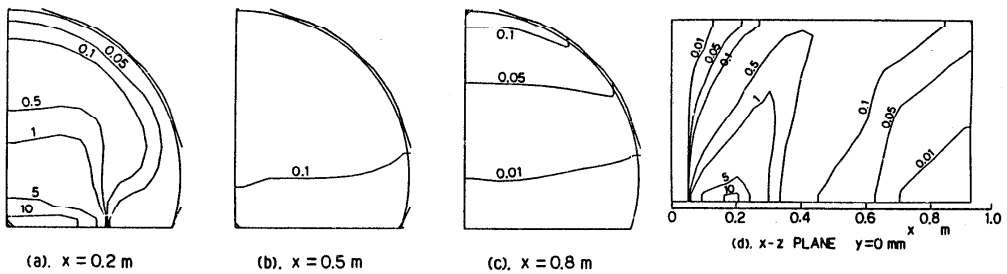
一方、換気風速の決定はトンネル内の人間が安全に避難するために、特に縦流換気方式の場合は最重要の因子である。風速の大きさによる煙や高温領域の拡散状況をマイクロに把



(a) 断面内速度ベクトル図

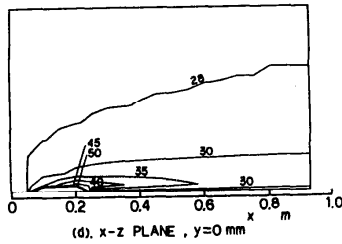


(b) 等温度線図 (単位: °C)

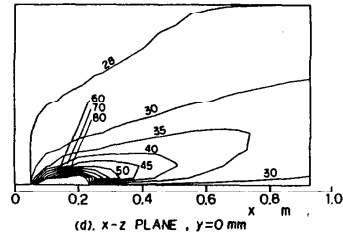


(c) 等煙濃度線図 (単位: 1/m)

図6 火災時の気流速・温度並びに煙濃度分布シミュレーション
(トンネル入口気流速度 $U_{in}=0.7$ m/s、経過時間 $t=84.3$ 秒)



(a) $U_{in}=2.76 \text{ m/s}$



(b) $U_{in}=0.70 \text{ m/s}$

図7 入口気流速度 U_{in} の相違による等温度線図(単位: $^{\circ}\text{C}$)の変化

握し、避難に必要な空間領域を確保するように風速を制御しなければならない。図7(加熱面温度: 200°C)はトンネル入口での風速(0.7と2.76 m/s)に対する温度分布への影響を示す。風速の相違により温度上昇する領域が変化することが分る。

4. まとめ

生活環境の質の向上と共に、最近の地下鉄では駅舎は言うに及ばず、車両への空調(冷房)が乗客へのサービスのために不可欠にもなっている。車両空調による弊害として駅舎空調機への負荷増大と地下環境の悪化が予想され、このため伝熱・水力学の応用として短期的観点からの地下鉄環境シミュレーションが行われた。これにより車両空調機の適正能力の選定や換気孔サイズ、設置位置等の地下鉄システムの最適設計への指針を得ることができた。

一方、道路トンネルの火災時の換気制御には、従来のオーバーオール的な設計を脱してマイクロで精度の高い方式の確立が期待されている。これにはトンネル内の煙流動を含めた熱流体挙動の解析を必要とするが、トンネル火災の場合実物実験の実施は費用的な面からも制約を伴い、また計測も困難なため詳細な温度・流速等のデータも極めて得難い。このように実験が困難な対象には、最近の計算機の普及促進とともに活発化している熱流体の三次元非定常数値計算技術が有効であり、実験では得難い詳細なトンネル内の煙流動の挙動が把握され、道路トンネルの火災に対する安全性向上に寄与しているかを紹介した。

参考文献:

- (1) 柳下・若宮・山中、機論、55-509、B(1989)、
- (2) 古藤・山中、機論、53-494、B(昭62)、2937
- (3) 古藤・山中、機論、53-494、B(昭62)、2944
- (4) 日本道路公団、関越自動車道・関越トンネル(パンフレット)

鉄鋼プロセスにおける熱・流動解析

栗田 興一、高谷 幸司、大西 晶 (住友金属工業)

1. 緒言

鉄鋼分野におけるプロセスは原料処理プロセス、製鉄プロセス、製鋼プロセス、熱延・冷延プロセス、表面処理プロセス等から成り立っている。(図1)¹⁾

この内、上工程といわれる製鉄、製鋼プロセスは冶金反応を主体に、相変化を伴った流動と伝熱がからみあった複雑なプロセスであると同時に、高温であるため、実炉計測が難しいプロセスでもある。それ故、従来迄は、冷間模型実験、または、実験室でのるつぽ実験などで得られた知見をもとに、定性的に総合判断して、炉内状態を推定していた。

しかし、最近のスーパーコンピュータに代表される計算処理能力の飛躍的な向上は、単位操作毎に得られている知見を、複合して組み立て、全体のプロセスを定量的かつ総合的に数値解析することを可能にした。このような、数値解析技術は、数値実験(Numerical Experiment)ともいわれ、一分野を形成しつつある。

この数値解析の一般的な使い方は、次の様なものである。

1. 世の中にまだない新プロセスの能力とか、自然界にまだない物質の挙動を数値解析によって事前予測する。
2. 従来までの実験装置の実験範囲を越えた領域のシミュレーション実験を行う。
(例えば、米国における超超音速旅客機の設計；飛行速度が、従来までの風洞実験の範囲を越えている。)
3. 数値解析結果と、現実の実測結果との差異を追求し、ものの本質を解明して行く。
4. 原子炉の爆発シミュレーションに見られるように”危機管理”への対応方法を、模擬数値実験を用いて、検討する。

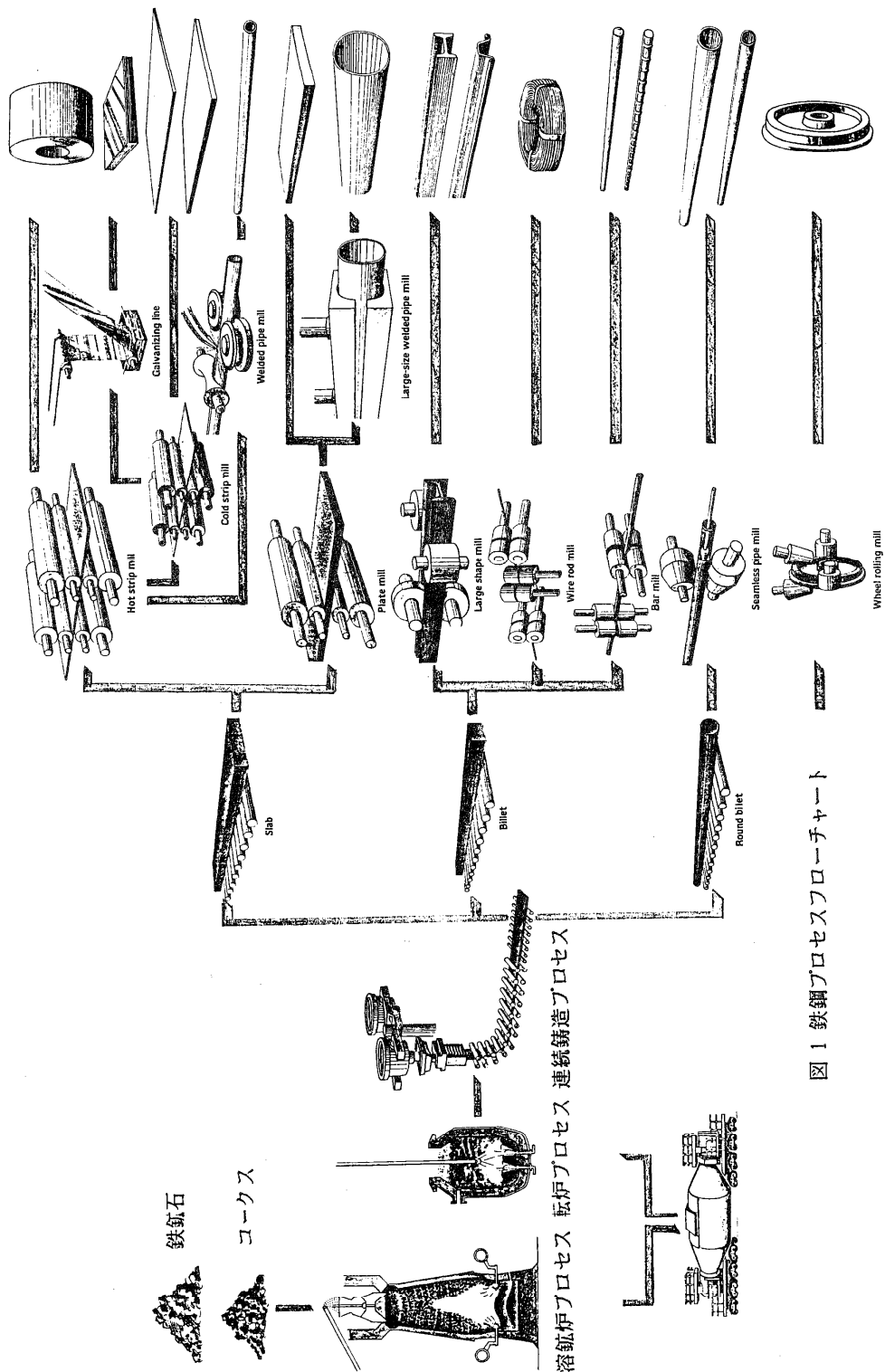


図 1 鉄鋼プロセスフローチャート

溶鉱炉プロセス 転炉プロセス 連続製造プロセス

鉄鉱石
コークス

このように、数値解析の利用分野は、これからの技術開発の手段としてますます拡大していくものと考えられるが、ここでは、鉄鋼業における伝熱・流動シミュレーションに関し、いくつかの実例を述べてみたい。

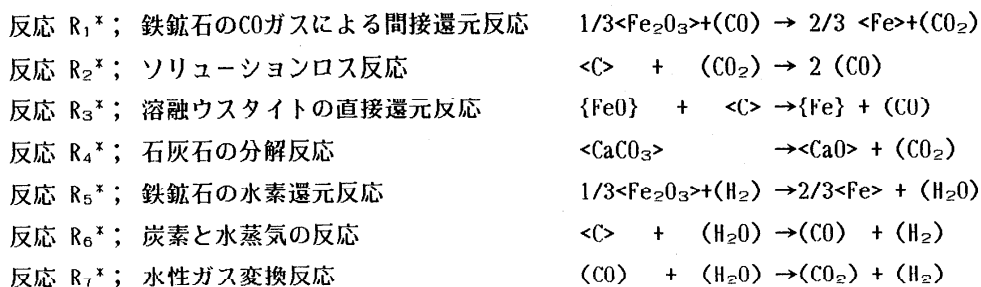
2. 溶鉱炉のシミュレーション

溶鉱炉プロセスでは、装入したコークスと鉱石とから熔融した銑鉄を作るように、伝熱と反応と相変化が複雑に絡みあっている。その数値解析は、次のステップを経て進歩して来た。

最初は、反応容器をブラックボックスとみなし、入り側と出側の物質収支と熱収支を取ることから始まった。

次の段階では、反応容器を反応別に部分分割し、その部分毎に、熱収支と物質収支をとるようになった。さらに、進歩すると、反応容器を微小部分に分割し、微小部分毎におこり得る次に示す反応全てについて、熱および物質の連立微分収支をとるようになった。

〔使用した反応式〕



現在では、反応物質の3次元的な流動も考慮し、熱、反応挙動を、その反応物質の動きに合わせて記述するようになっている。

2.1 1次元定常モデル²⁾³⁾

化学反応工学を用いて求められた微分方程式を差分式の形で展開し、比較的短時間で数値解が得られる。この技術を利用して溶鉱炉を軸方向に微小部分に分割して、炉内部状態を詳細に把握することが出来る。⁴⁾

計算方法は、炉頂での状態を初期条件とした”Runge-Kutta-Gill法”を用いる。すなわち、炉頂排ガス温度、量、組成、および、装入物の温度、量、組成を初期値として、羽口のほうに向かって、炉内状態を数値計算する。なお、炉頂での初期値は、鉄鉱石が羽口レベルに達するまでに溶解し、完全に還元されて溶鉄になると仮定して求めている。

2.2 1次元非定常モデル (ガスの非定常モデル)

反応速度式に時間の項を含めて、微分方程式をたて数値解を求めようとする方法である。例えば、溶鉱炉を対象とした解析で考えてみると、羽口から吹込まれたガスは、約 30 秒で炉頂まで達するのに対し、炉頂から装入した固体は羽口レベルに到達するのに約 8 時間を要するので、通常の炉内状態の変化（固体の変化）を対象にしたような解析では、ガス側は定常と考えてよい。

$$\partial/\partial t \cdot (c_g T_g) \ll v_g \cdot \partial/\partial z \cdot (c_g T_g) \quad \dots(1)$$

このことは、ガスについては、定常の式で十分であることを意味しており、この条件を前提として、次のような基礎式を導入する。

[伝熱に関する基礎式]

$$\begin{aligned} \text{ガス側;} \quad v_g \cdot \partial/\partial z \cdot (c_g T_g) &= \{-h_{gs}/\delta \cdot (T_g - T_s) + Q_g \\ &\quad - c_g T_g \cdot \Sigma(R_i M_i)\}/\rho_g \quad \dots(2) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{固体側;} \quad \partial/\partial t \cdot (c_s T_s) + v_s \cdot \partial/\partial z \cdot (c_s T_s) &= \{-h_{gs}/\delta \cdot (T_s - T_g) + Q_s \\ &\quad - c_s T_s \cdot \Sigma(R_i M_i)\}/\rho_s \quad \dots(3) \end{aligned}$$

[反応に関する基礎式]

$$\text{ガス側;} \quad v_g \cdot \partial/\partial z \cdot \xi_i = \{R_i M_i - \xi_i \cdot \Sigma(R_i M_i)\}/\rho_g \quad \dots(4)$$

$$\text{固体側;} \quad \partial/\partial t \cdot \xi_i + v_s \cdot \partial/\partial z \cdot \xi_i = \{R_i M_i - \xi_i \cdot \Sigma(R_i M_i)\}/\rho_s \quad \dots(5)$$

上式は2階の偏微分方程式であるので、図2に示したような特性曲線（流線）に沿って反応・伝熱計算を実施していくことになる。⁵⁾

$$\text{特性曲線} \quad dz = v_s \cdot dt \quad \dots(6)$$

即ち、ガス側は定常計算を、固体側は、固体の荷下がり線（(6)式）にそって、次の熱、反応に関する常微分方程式を積分する。

[伝熱に関する基礎式]

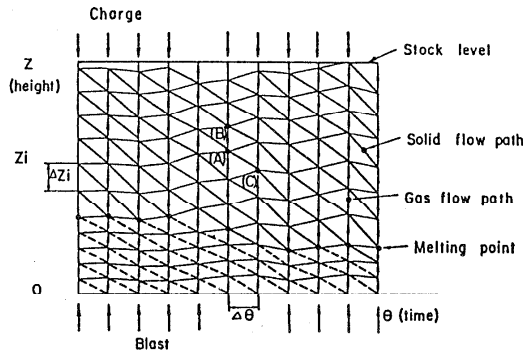


図 2 非定常モデルにおける計算方法

$$\text{ガス側； } d(c_g T_g) = \{-h_{gs} / \delta \cdot (T_g - T_s) + Q_g - c_g T_g \cdot \Sigma(R_i M_i)\} / \rho_g \cdot dz \quad \dots(7)$$

$$\text{固体側； } d(c_s T_s) = \{-h_{gs} / \delta \cdot (T_s - T_g) + Q_s - c_s T_s \cdot \Sigma(R_i M_i)\} / \rho_s \cdot dt \quad \dots(8)$$

[反応に関する基礎式]

$$\text{ガス側； } d\xi_i = \{R_i M_i - \xi_i \cdot \Sigma(R_i M_i)\} / \rho_g \cdot dz \quad \dots(9)$$

$$\text{固体側； } d\xi_i = \{R_i M_i - \xi_i \cdot \Sigma(R_i M_i)\} / \rho_s \cdot dt \quad \dots(10)$$

その解析結果の一例を以下に示す。

(1) 鉬石／コークス比、補助燃料吹込み応答 (図3) ⁶⁾

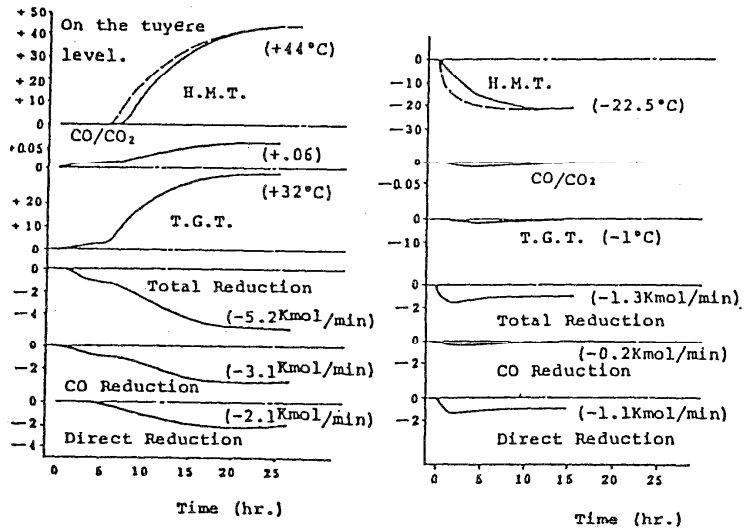
鉬石／コークス比、および、補助燃料を吹込んだ場合の応答時間を理論的に把握することが出来、制御系に結果を反映させることができる。

(2) 休風シミュレーション (図4) ⁷⁾

休風立上がり後の最低出銑温度は、休風中の湯溜まりの熱放散量に依存し、回復速度は休風中の炉壁熱放散量に依存する。休風前減銑量、減銑開始時期の決定に使用される。

(3) 火入れ操業シミュレーション

操業予測 (初出銑のタイミングおよび出銑温度等) を行う。(図5) 炉内耐火レンガの昇温速度が急激であるとスポーリング割れを生じるので、⁸⁾ これを防止する増風パターン (炉内昇温パターン) を選択する。(図6) ⁹⁾



コークス比 Ore/Coke -0.1

送風温度 -50 °C

図 3 高炉非定常操作の応答性

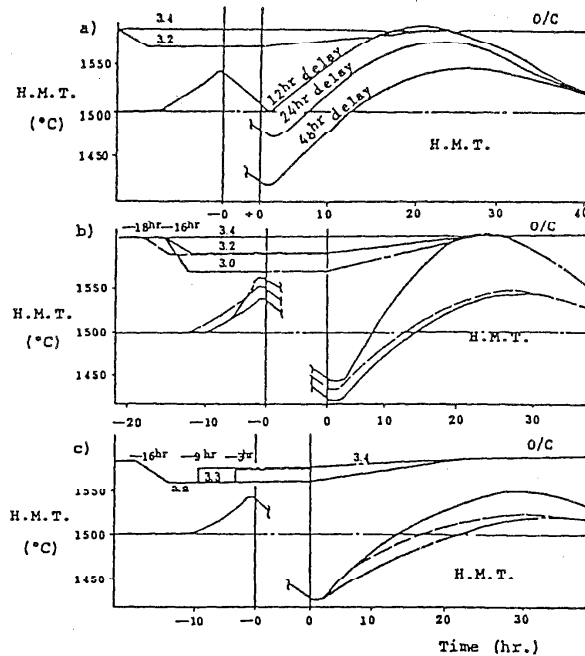


図 4 高炉体風シミュレーション

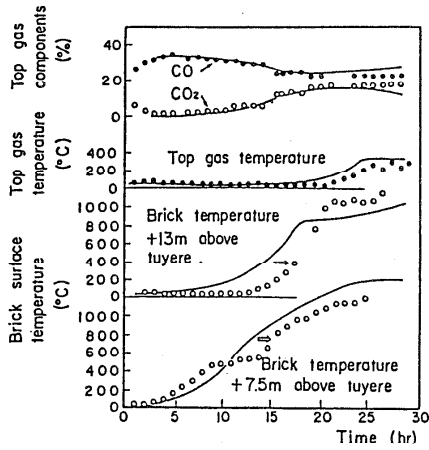


図 5 高炉火入れ操業シミュレーション

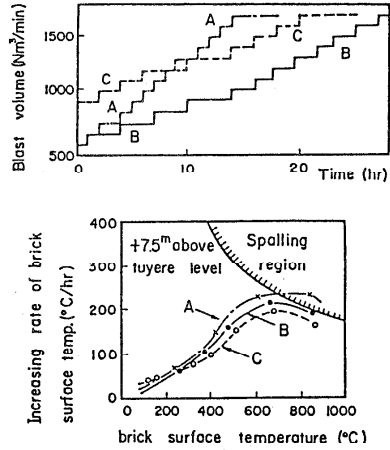


図 6 高炉火入れ増風パターン検討

(4) 吹き出し操業シミュレーション (図7) ¹⁰⁾

減尺吹き出し操業計画立案に用い、次の項目を決定する

- (a) 操業中のストックレベルの変化 → 減尺終了時間の予測
- (b) 炉頂ガス温度、組成経時変化
→ 炉頂設備保護のための炉頂散水量の予測 (散水設備決定)
- (c) 最終出銑温度とトータル出銑量 → 炉前作業の安定

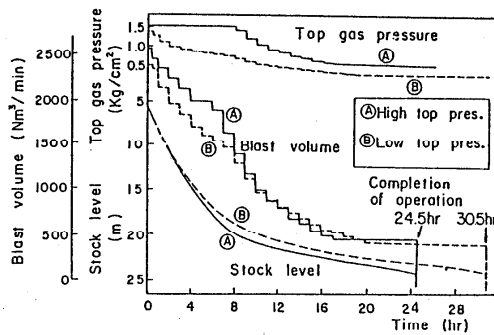


図 7 高炉空炉吹き出し検討

2.3 2次元モデル

反応物質の2次元的な運動も考慮する必要があるので、伝熱と反応に加え、流動(対流)

も同時解析する必要がある。

伝熱と反応および流動の基礎式は、一般に次の様に表わされる。

[充填層の圧力損失式]

$$-\nabla P = (a|V| + b) \cdot V; \quad a = 1.75 \cdot \rho / d_p \cdot (1 - \varepsilon) / \varepsilon^3 \quad \dots(11)$$

$$b = 150 \cdot \mu / d_p^2 \cdot (1 - \varepsilon)^2 / \varepsilon^3$$

[伝熱に関する基礎式]

$$D/Dt(\rho_j c_j T_j) + (\rho_j c_j T_j) \cdot \nabla V_j = \nabla(k_j \nabla T_j) - \sum \{h_{jk} / \delta \cdot (T_j - T_k)\} + Q_j \quad \dots(12)$$

ここで、

$$D/Dt \equiv \partial/\partial t + u \cdot \partial/\partial x + v \cdot \partial/\partial y + w \cdot \partial/\partial z$$

$$\nabla \equiv \partial/\partial x \cdot i + \partial/\partial y \cdot j + \partial/\partial z \cdot k$$

[反応に関する基礎式]

$$D/Dt(\rho_j \xi_j) + (\rho_j \xi_j) \cdot \nabla V_j = \nabla \{D_j \nabla(\rho_j \xi_j)\} + R_j(\xi_1, \dots, \xi_n) \cdot M_j \quad \dots(13)$$

[質量保存式]

(13) 式の各相に関する成分の総和、即ち、 $\sum \xi_j = 1$ (但し、 $C_j = \rho_j / M_j \cdot \xi_j$) を取り、拡散項を無視することにより、次のようになる。

$$D/Dt \cdot (\varepsilon_j \rho_j) + \rho_j \cdot \nabla V_j = \sum R_j M_j \quad \dots(14)$$

定常を仮定すると、(14)式は次の質量保存則になる。

$$\nabla \cdot (\varepsilon_j \rho_j q_j) = W \quad \dots(15)$$

質量保存則(14)式を用いると、(12)、(13)式は、次のように簡単になる。

[伝熱に関する基礎式]

$$D/Dt(c_j T_j) = 1/\rho_j \nabla(k_j \nabla T_j) + 1/\rho_j \sum \{-h_{jk} / \delta \cdot (T_j - T_k)\} + Q_j / \rho_j \quad \dots(16)$$

[反応に関する基礎式]

$$D/Dt(\xi_j) = 1/\rho_j \nabla \{D_j \nabla(\rho_j \xi_j)\} + R_j \cdot M_j / \rho_j \quad \dots(17)$$

(16)、(17)式の左辺は、対流項と言われ、物質移動に伴う熱移動量、反応物質移動量を

表わす項である。反応を伴うプロセスのうち鉄鋼関連の焼結、溶鉱炉、転炉、RH炉、燃焼炉等のプロセスは、いずれも、気体、液体または固体の運動を伴うので、この対流項の影響を考慮する必要がある。

例えば、溶鉱炉の解析のように、反応に関する対流項が拡散項に比して、 10^3 程度大きく、伝熱に関する対流項が熱伝導項に比して、 10^2 程度大きい場合には、入口側の物質の組成および温度を初期条件として物質の移動経路（流線）にそって、出口側に向かって、反応および伝熱に関する積分計算を実行していくことになる。

2.3.1 計算順序

初期条件として、まず炉体形状を与え、次の順に計算を進める。

- (i) 送風量、装人物条件を入力条件として、装人物分布モデルにより、層頂での半径方向粒度ならびに、空隙率分布を推定し、初期値として仮定した炉内状態のもとでの、ガス流れ分布を、溶鉱炉内ガス流れモデル¹¹⁾を用いて求める。
- (ii) 固体の流線をポテンシャルフローを仮定して求め、さらに、液体の流線は炉体形状に沿うと仮定して、この各流線に沿って、各相の熱および反応を同時解析する。
- (iii) 以上のガス流れ計算と、熱・反応計算とを、定常解が得られるまで、繰り返し実行し、収束した所でプリントする。

2.3.2 計算手法（特性曲線法）

$$\text{定常の場合の特性曲線} \quad ; \quad q_{j,r} \cdot dz = q_{j,z} \cdot dr \quad \dots(18)$$

$$\text{非定常の場合の特性曲線} \quad ; \quad dr = q_{j,r} \cdot dt, \quad dz = q_{j,z} \cdot dt \quad \dots(19)$$

この条件を満たす線（特性曲線）上では、1階の偏微分方程式は、次のように常微分化出来る。

[エネルギー保存則（熱）]

$$d/dr \cdot (c_j T_j) = [\sum \{-h_{jk}/\delta \cdot (T_j - T_k)\} + Q_j - c_j T_j \cdot \sum (R_i M_i)] / (\varepsilon_j \rho_j q_{j,r}) \quad \dots(20)$$

または、

$$d/dz \cdot (c_j T_j) = [\sum \{-h_{jk}/\delta \cdot (T_j - T_k)\} + Q_j - c_j T_j \cdot \sum (R_i M_i)] / (\varepsilon_j \rho_j q_{j,z}) \quad \dots(21)$$

[着目成分に関する質量保存則（反応）]

$$d/dr \cdot (\xi_j) = \{-R_i M_i + \xi_j \cdot \sum (R_i M_i)\} / (\varepsilon_j \rho_j q_{j,r}) \quad \dots(22)$$

または、

$$d/dz \cdot (\xi_i) = \{-R_i M_i + \xi_i \cdot \Sigma(R_i M_i)\} / (\varepsilon_i \rho_i q_{iz}) \quad \dots(23)$$

(20)–(23)式の分母は質量流量を示している。

逆に、物質移動を伴わない場合には、(16)、(17)式は、 $D/\partial t \equiv \partial/\partial t$ となるので、熱伝導方程式、拡散方程式となる。

従って、物質の移動速度が大きい（対流支配）場合には、(16)、(17)式の左辺が支配的となり、1階偏微分方程式の解法を用いる。逆に、物質の移動速度が小さい（拡散支配）場合には、(16)、(17)式の右辺第1項が支配的となり、楕円型の2階偏微分方程式の解法を用いる必要がある。加速緩和法等が一般的解法としてよく用いられている。¹²⁾

計算結果の一例を以下に示す。

(1) 装入物分布の影響の検討 (図8)¹³⁾

装入物分布の調節（半径方向の鉱石/コークス比、粒度、空隙率分布の調節）は、鉄鉱石およびコークスを炉内に装入する装入装置についている反発板を炉内に押し出したり、引っ込めたりすることにより行う。

鉱石アーマーを押し出すにつれ ($C_5O_5 \rightarrow C_5O_7$)、炉壁側の鉱石/コークス比が減少し、炉中間部で増加するため、融着帯の形状は、逆V型から、極端なW型へと変化する。その結果、ガス流れは炉芯から炉壁に向かう流れから、W型になると、炉中間部へガス流れが集中する現象が現れる。

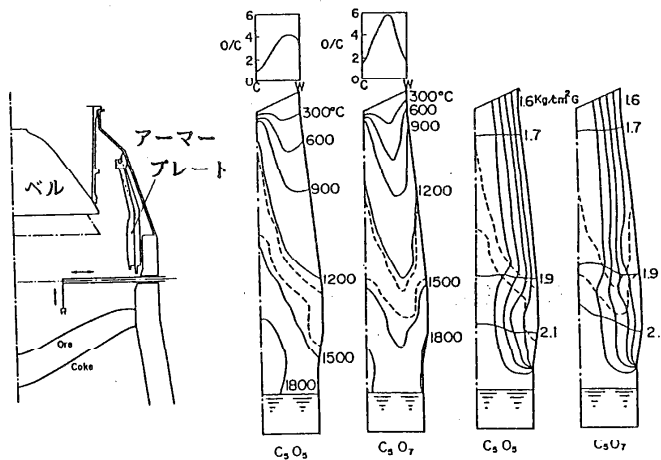


図8 ムーバブルアーマーと炉内状態分布

(2) 炉内 SiO, Si 挙動 (図 9)

炉内装入物温度分布に対応して、SiO ガス発生および銑中への Si 移行反応が進むことから、SiO ガス発生をおさえるためには、溶銑への熱交換を効率的に行うことにより、炉下部高温領域を無くすることが重要である。

(3) 装入物性状の炉内状態におよぼす影響の検討¹³⁾

a. 焼結銑 (図 10)

装入粒度低下、および、RDI 指数上昇により、被還元性が向上し、銑石/コークス比が上昇出来、熱流比が上昇する。その結果、炉上部の温度が低下する。送風圧は、RDI 指数上昇効果と、銑石/コークス比の上昇により、本検討例では約 0.22 kg/cm² 上昇した。

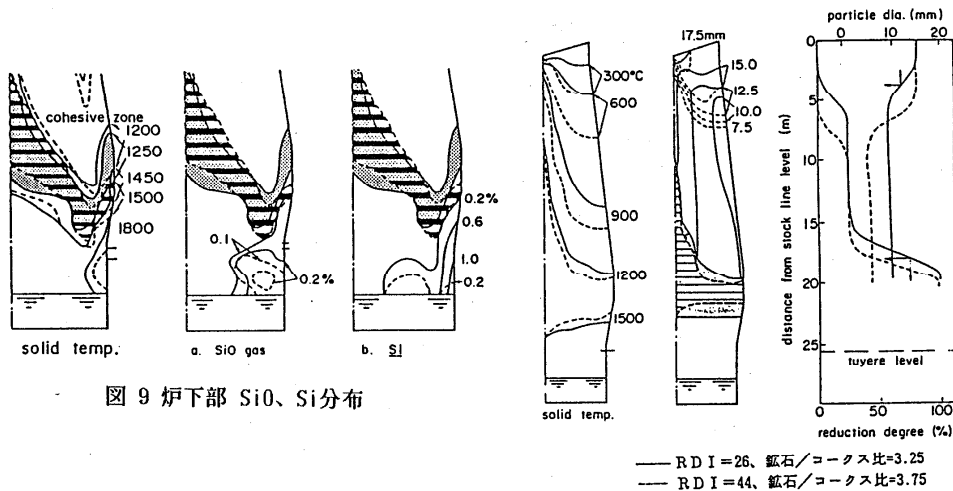


図 9 炉下部 SiO, Si 分布

図 10 焼結銑性状と炉内状態分布
(溶銑温度一定)

b. コークス (図 11)

コークス粒度およびみかけの強度は、ソリューションロス帯以下で、急激に低下する。このみかけの強度低下により、羽口前に向かってさらに粒度低下が著しくなる。

CSR 上昇によるソリューションロス反応減少により、銑石/コークス比を増加させるとソリューションロス反応量が増加するものの、炉内温度の上昇効果により、シャフト上部での間接還元反応速度 ($Fe_2O_3 \rightarrow FeO$) が大きくなり、その結果、炉頂でのガス利用率 (η_{CO}) が向上する。さらに、銑石の還元粉化も抑制される。

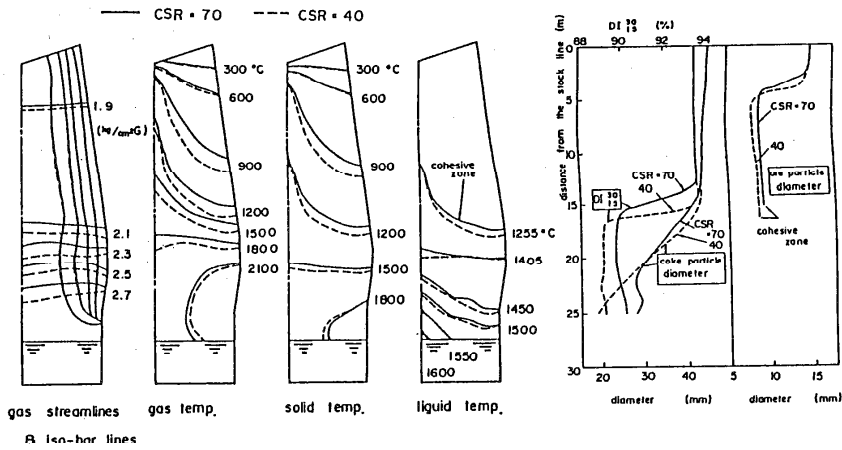


図 11 コークス性状と炉内状態分布（溶銑温度一定）

3. タンデッシュ中溶鋼の誘導加熱シミュレーション¹⁴⁾

連続铸造铸型へ流れ込む、溶鋼の温度を一定に保つことは、铸片の品質を確保する上で、重要である。さらに、溶鋼温度を低位安定に保つことにより、耐火物の損耗量の減少が期待できる。

溶鋼の加熱方式には、プラズマ、直接通電、誘導加熱方式等種々あるが、ここでは誘導加熱方式をシミュレートした。

基礎式は、次の通りである。

[誘導加熱に関する基礎式]

$$\nabla^2 E = 0 \quad ; \text{ポテンシャルの式、} \quad Q = R \cdot I^2 \quad ; \text{発熱量の式} \quad \dots(24)$$

[Navier-Stokes の運動方程式]

$$D\mathbf{V}/Dt = -1/\rho \cdot \nabla P + \nu \cdot \nabla^2 \mathbf{V} + \beta(T_0 - T) \cdot \mathbf{g} + 1/\rho \cdot \mathbf{F} \quad \dots(25)$$

[連続の式]

$$\partial \rho / \partial t + \nabla(\rho \mathbf{V}) = \sum R_i \cdot M_i \quad \dots(26)$$

[エネルギー収支式]

$$DT/Dt = 1/(\rho \cdot C_p) \cdot (\nabla(k\nabla T) + \text{Rate}(-\Delta H) \cdot \rho) \quad \dots(27)$$

誘導コイルによって誘起された電流分布は図12に示すように、湯溝での電流が大きくなっている。この結果を用いて、鑄込み開始前での、静止浴での溶鋼の加熱状態をシミュレートすると、図13に示すように、湯溝での溶鋼温度が1880℃にも上昇することが予測出来、本プロセスでは湯溝耐火物溶損が、問題になるであろうことが、定量的に明らかになった。

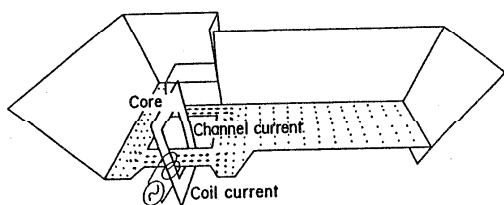


図12 タンデッシュ中溶鋼内誘導電流分布

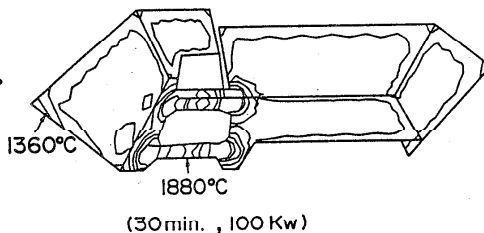


図13 誘導加熱中の静止溶鋼中温度分布

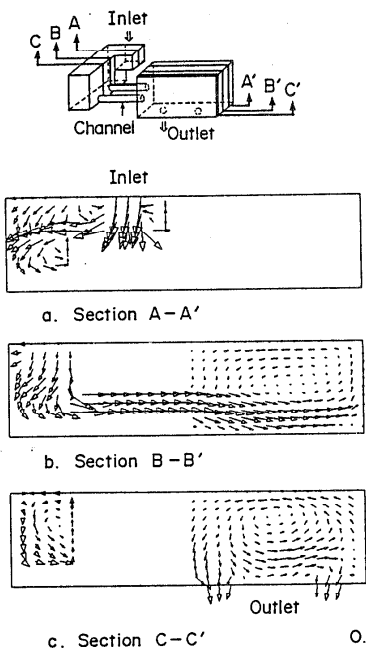


図14 タンデッシュ内溶鋼流動分布（垂直断面）

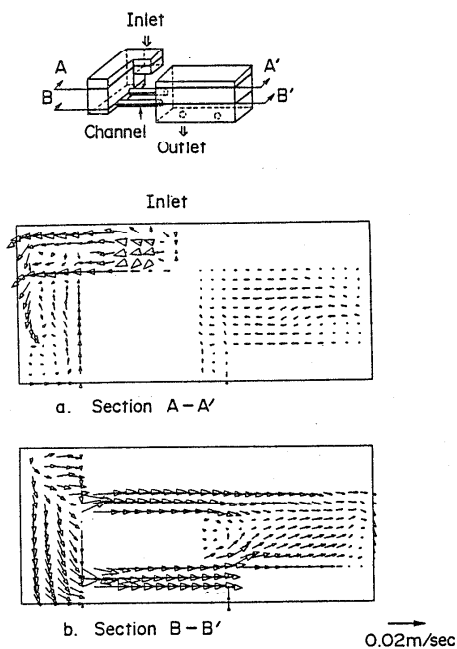


図15 タンデッシュ内溶鋼流動分布（水平断面）

次に、タンデッシュ中での溶鋼流れを3次元で解析した。解析スキームはSOLA法を用いた。垂直断面でみた流速ベクトル図を図14に、水平断面でみた流速ベクトル図を図15に示す。このような、3次元複雑形状での流動解析はスーパーコンピュータの出現によって、実用可能になったといえる。

この溶鋼流動に、誘導加熱をかけた場合の、溶鋼内の温度分布を流動および伝熱の同時解析でシミュレートした。誘導加熱を図17に示すようにCase A;ステップ状にかけた場合、Case B;パルス状にかけた場合の2種類について比較検討した。それぞれのCaseについての20分後の溶鋼の温度分布を図16に示す。ステップ的に加熱した場合には、徐々に温度が上昇するため、タンデッシュ内の溶鋼温度に分布が付きやすい。それに対し、パルスの加熱した場合には、タンデッシュ内の溶鋼温度が比較的均一になっている。

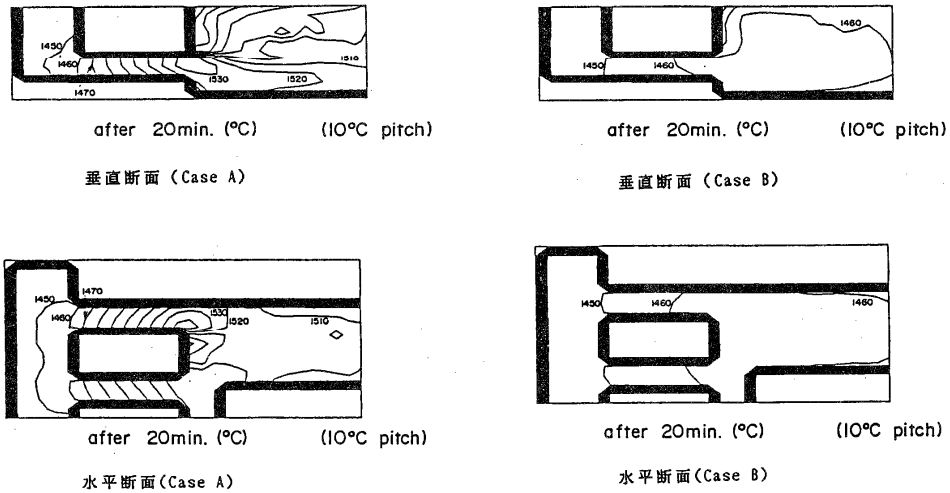


図 16 誘導加熱時の流動下での溶鋼温度分布

タンデッシュ出口2箇所ノズルでの溶鋼の温度変化をとると、図17に示すように、湯溝に近いノズルでの溶鋼温度が、湯溝から遠いノズルでの溶鋼温度に比べて、2分程度温度変化が早く起こっている。

このように、シミュレーションにより、設備を造る前に、予め稼働状態を定量的に把握できる。今後、このようなニーズが急激に増加するものと考えられる。

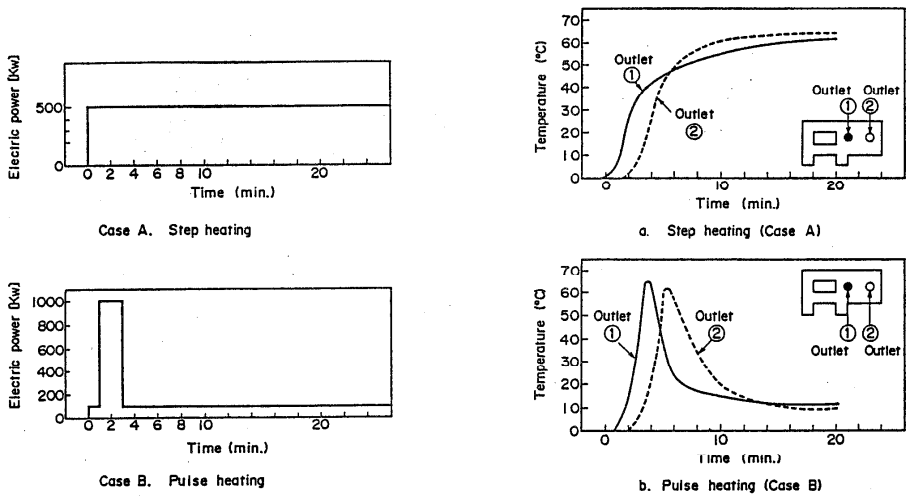


図 17 誘導加熱時の出口ノズルでの溶鋼温度の時間推移

4. 連続鋳造機鋳型内の電磁溶鋼流制御解析^{15) 16)}

近年の超伝導磁石の開発など、電磁力に関する周辺技術の進歩を考える時、電磁流体力学をプロセスにおけるニューテクノロジーとして位置付け、電磁力の効果がプロセスの熱効率および反応効率、または、設備にどのような影響を与えるのかを、問題点を事前予測、検討をしなければならない。このような場合、伝熱および流動のみならず電磁との複合シミュレーションが必要となる。

ここでは、連続鋳造機鋳型内の電磁溶鋼流制御プロセスのシミュレーション例を述べる。

使用した基礎式を以下に示す。

[Navier-Stokes の運動方程式]

$$D\mathbf{V}_1/Dt = -1/\rho \cdot \nabla P + \nu \cdot \nabla^2 \mathbf{V}_1 + \beta(T_0 - T) \cdot \mathbf{g} + 1/\rho \cdot \mathbf{F} \quad \dots(28)$$

V_s = 引抜き速度

[連続の式]

$$\partial \rho / \partial t + \nabla(\rho \cdot \mathbf{f}_s \cdot \mathbf{V}_s) + \nabla(\rho \cdot \mathbf{f}_1 \cdot \mathbf{V}_1) = \sum R_i \cdot M_i \quad \dots(29)$$

[エネルギー収支式]

$$DT/Dt = 1/(\rho \cdot C_p) \cdot (\nabla(k\nabla T) + \text{Rate}(-\Delta H) \cdot \rho) \quad \dots(30)$$

さらに、液相から凝固相までの領域に於ける速度分布にギャップはないものとし、固相率の収支より次式を得る。

$$Df_s/Dt = \text{Rate} \quad \dots(31)$$

ここに、 $F = J \times B$ 、 $\text{Rate} = \Delta f_s / \Delta t$

[電磁気の基礎式：Maxwell の方程式]

$$\text{rot } E = -dB/dt \quad \text{： 電場} \quad \dots(32)$$

$$\text{rot } H = J + dD/dt \quad \text{： 磁場} \quad \dots(33)$$

$$\text{div } D = q \quad \text{： 電束密度保存則} \quad \dots(34)$$

$$\text{div } B = 0 \quad \text{： 磁束密度保存則} \quad \dots(35)$$

ここで、 $D = \epsilon \cdot E$ (ϵ ：誘電率)、 $B = \mu \cdot H$ (μ ：電磁率)

電気ポテンシャル ϕ ($E \equiv -\nabla\phi$)を用いると、(32)~(35)式から次のポアソンの方程式を得る。

$$\nabla(\sigma \nabla \phi) = \nabla \cdot \sigma(V \times B) \quad \dots(36)$$

(1) 流動におよぼす電磁力の影響 (図18)

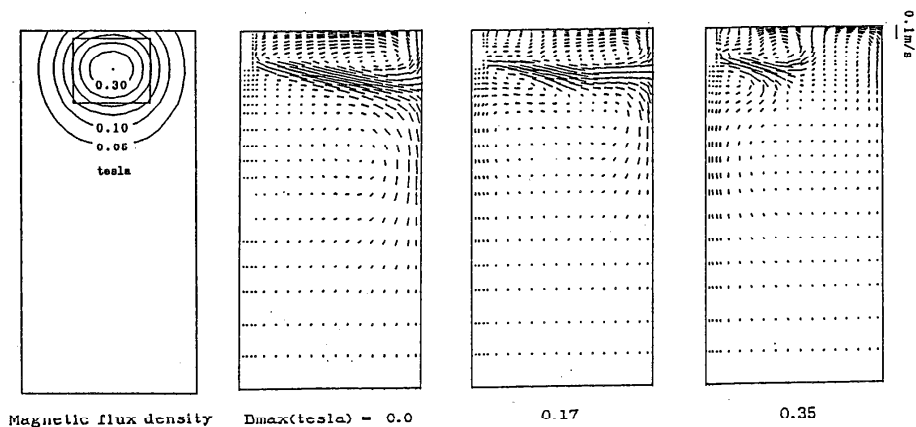


図 18 連続 casting モールド内での磁場と流動分布

連続鋳造の、浸せきノズルから出た溶鋼流を挟むように、モールドの両側に電磁場を付加した。磁束密度の最大値を約 0.17 tesla とした時、上部の渦流れが弱くなる。磁束密度の最大値をさらに、約 0.35 tesla まで上昇させると、短辺側への流れが弱くなり、ノズル下方への流れが強くなる。電磁力によって溶鋼の流動が制御出来、凝固の均一化、品質の向上、鋳造速度の向上が可能であることを示唆している。

(2) 伝熱・電磁・流動解析

電磁・流動解析に伝熱解析を付加することにより、図19に示すようなEMBRの効果の検討結果を得ている。EMBRをかけることにより、スラブの1/2断面でのメニスカス近傍の溶鋼温度がEMBR無しの場合より上昇し、メニスカス近傍の温度勾配が上昇した。メニスカス下の温度勾配は、強い溶鋼の流れにより、EMBRなしでは小さくなった。他方、EMBRをかけることにより、浸せきノズルから出た溶鋼流が上方と下方とに曲り、メニスカス近傍の渦流れが弱くなったため、メニスカス下の温度勾配は、大きくなった。このことは、EMBRを使うことによって、連続鋳造機での熱伝達の状態を制御可能である事を示している。

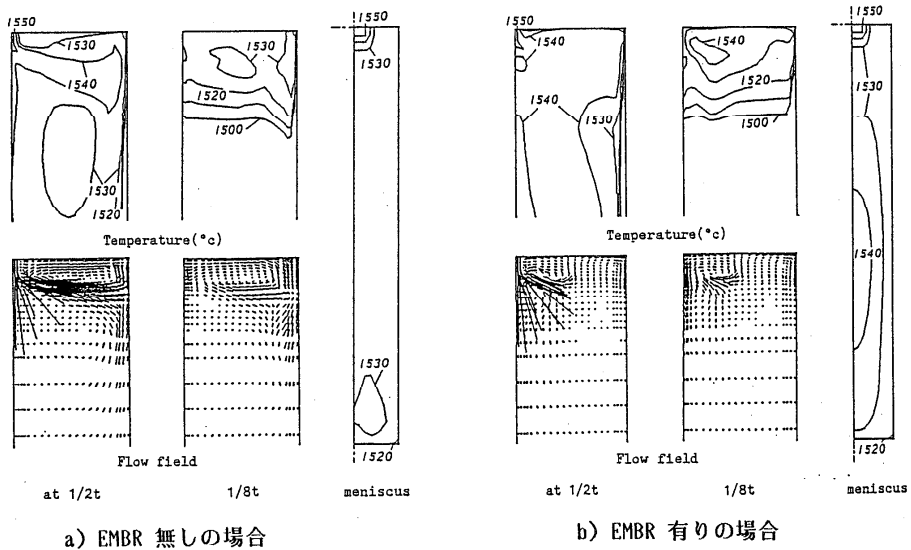


図 19 EMBRが伝熱・流動に及ぼす影響

5. 今後の数値解析の動向

数値解析は、今後ますます、利用の拡大が期待されているが、その拡大の方向について

若干述べる。

(1) 一つは定常から非定常へ、また、2次元から3次元への、計算領域の広がりである。この2次元から3次元への広がりには、技術計算機自体のハードの進歩も必要である。現在の中型技術計算機(約 2 MIPS)では、反応を伴うプロセスの非定常2次元計算で、1ケース 1~2 時間程度を要する。これを3次元に拡張すると、この 100 倍以上の計算時間を要するので、中型計算機では、現実的に実用の域を越えており、スーパーコンピュータによって初めて、実用化が可能となる。また、実際の問題は、ほとんどが3次元であるから、CADと組合わせた、次元反応容器内のプロセス数値解析が今後ますます増加するものと予想される。

(2) 第2は事象の広がりである。例えば、反応を伴うプロセスでは、反応に伴う熱的問題および反応に影響を与える流動現象も同時に解析しなければならないが、この他に、イオン性流体の反応を考える場合には、電磁流体の解析が必要となるし、反応容器自体の設計に反映させるには、熱的な問題に加え、応力解析の問題も関係してくる。このように、反応を伴うプロセスの数値解析技術は、図20に示すように、反応を含め、伝熱、電磁、強度、光、流動の同時解析手法へと、今後、発展拡大していくものと予想される。¹⁷⁾

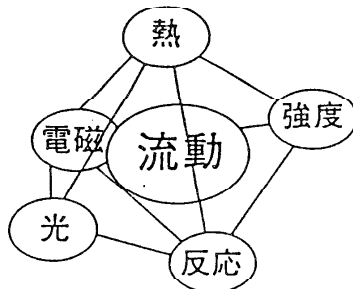


図 20 シミュレーション分野の広がり

6. 結言

以上のように数値解析技術は、プロセス開発の期間を大幅に短縮し、かつ、フィジビリティ・スタディーの精度を向上させ、パイロットプラント実験を代替するものとなると考えらる。しかしながら、このシミュレーション技術は理想的な系については、かなり実用的な域に達してきたものの、混相流の反応挙動、気液界面での反応挙動、液中への気体吹込み時の反応挙動、流動層内での反応挙動等、基本的な流動特性またはマクロな反応挙動等の、いわゆる構成方程式のはっきりしない現象への適用はまだ不十分だといえる。結局、

これらの現象の本質を解明していくことこそ、これからの数値解析技術の進歩に繋がるものといえる。

記号

B ; 磁束密度	t ; 時間
c ; 熱容量	T ; 温度
dp ; 粒子径	V ; 流速ベクトル
D_i ; 着目成分 i の拡散係数	W ; 湧き出し
E ; 電場ベクトル	x, y, z ; 座標
f ; 分率	
F ; 外力ベクトル	β ; 熱膨張係数
g ; 重力加速度	δ ; 代表長さ (= dp/6 · ε)
h ; 熱交換係数	ε ; 空隙率
ΔH ; 反応熱	μ ; 粘性係数
i, j, k ; 座標ベクトル	ν ; 動粘性係数
J ; 電流密度分布	ξ_i ; 着目成分 i の重量分率
k ; 熱伝導度	ρ ; 密度
M_i ; 着目成分 i の分子量	σ ; 電気伝導度
P ; 圧力	
Q ; 焓熱量	サフィックス
R_i ; 着目成分 i の反応速度	g, l, s ; ガス、液体、固体

参考文献

- 1) Sumitomo Metal Profile : Sumitomo Metal Industries, Ltd., (1987), p.2
- 2) 鞭 巖、田村健二、八木順一郎、森山 昭 : 日本金属学会誌、30 (1966)、p.1109
- 3) J.Yagi and I.Muchi : Trans. ISIJ, 10 (1970)、 p.181, p.392
- 4) 冶金反応工学 : 鞭 巖、森山 昭共著 (1974)、[養賢堂]
- 5) L.Lapidus ; Digital Computation For Chemical Engineers, (1962), p.131
- 6) M.Hatano and H.Yamaoka : I.C.H.M.T.Seminar (1979)、 Yugoslavia
- 7) 羽田野道春、山岡秀行 : 鉄と鋼、64 (1978)、 s504
- 8) 加藤一郎、森田喜保、 上文範 : 鉄と鋼、65 (1979)、 p.605
- 9) 羽田野道春、栗田興一、山岡秀行、横井毅 : 鉄と鋼、 68 (1982)、 p.2369

- 10) 羽田野道春、栗田興一、山岡秀行、横井毅：鉄と鋼、68 (1982)、p.2377
- 11) 羽田野道春、栗田興一、岡根幸司：鉄と鋼、63 (1977)、p.217
- 12) 栗田興一、村井達郎；鉄と鋼、73(1987)、p.2052
- 13) 栗田興一、岩永祐治、元重正洋、網永洋一：鉄と鋼、73 (1987)、p.2060
- 14) 大西 晶、栗田興一、多田健一：材料とプロセス、1(1988)、p.1273
- 15) 高谷幸司、中井 健、笠井宣之、渡部忠男、中島英雄；材料とプロセス、1 (1988)、p.1262
- 16) K. Takatani, K. Nakai, N. Kasai, T. Watanabe and H. Nakajima：Trans. ISIJ、投稿中
- 17) 栗田興一；鉄と鋼、74(1988)、p.570

1. はじめに

発酵工業においては、近年遺伝子組換え、細胞融合等に代表されるニューバイオテクノロジーが急速に進歩し、生産技術としてのバイオプロセスは注目を集めている。バイオテクノロジーという、とかくその中に存在する生物ばかりに目が行きがちであるが、実際それを利用して有用生産物を得る場合には装置設計上、操作上種々の工学的問題が存在し、伝熱問題もその中で重要なものの1つである。また、組換え菌のように人の手が増えられれば加えられる程その最適生育条件の制御範囲が狭いものが多く、伝熱も含めた工学的諸問題は重要な難しい問題となって来ている。

そこで今回は、バイオプロセスにおける熱工学的問題上特に重要かつ特徴的な“培地の殺菌”及び“発酵熱の除去”に関する伝熱問題を取り上げ解説する。

2. バイオプロセスの概要¹⁾

本論に入る前に、まずバイオプロセスの概要を紹介する。

バイオプロセスはアミノ酸、核酸、抗生物質、イースト等微生物のもつ生化学反応を利用して有用生産物を得るもので、生産物が何であるかによってプロセスに多少の相違はあるが、基本は同じである。

図-1にバイオプロセスフローダイヤグラムの一例を示すが、¹⁾主要な装置としては、目的生産物取得のための主発酵槽 (Main Fermenter) とこの主発酵槽で微生物を培養するために必要な菌体量を確保することを目的とした種母発酵槽 (Seed Fermenter) からなり立っている。これらの発酵槽は、それぞれに付属した原料 (培地) の調製、蒸煮、殺菌、冷却の設備、通気用空気の調整、除菌の設備、攪拌機等を有しており、主発酵槽に蓄積し生産された有用物質は菌体分離、濃縮、晶出、洗浄分離、乾燥等種々の精製プロセスを通して製品として取り出される。

このようなバイオプロセスには多くの伝熱操作を伴い装置設計上種々の工夫が必要なことから多くの熱工学的問題も存在することになるが、バイオプロセスの最大の課題は無菌の維持であり、それを優先させて伝熱問題を考えなければならない所に大きな特徴があると言える。

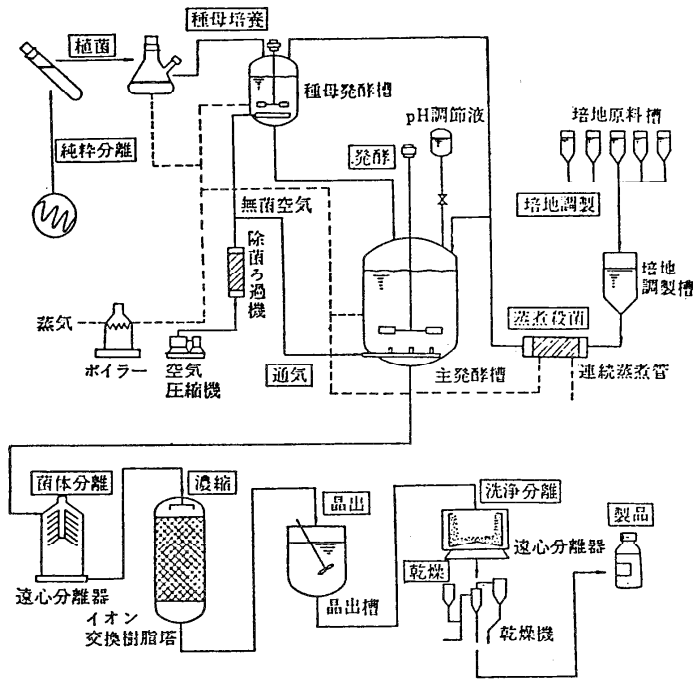


図-1 バイオプロセスフローダイアグラムの一例¹⁾

3. 培地の殺菌²⁾

生物反応を行なう際に目的とする反応を特異的に安定して行なうために、その反応を行なう微生物以外の微生物(雑菌)の活性を完全に失わせておき、目的とする微生物のみを純粋に培養する必要がある。特に有用な微生物は雑菌との競合には極めて弱く、かつ雑菌汚染の第一の原因は培地からの混入であることから、生物反応が成功するかどうかは培地の殺菌が完全かどうかにかかっているとと言っても過言ではない。

培地の殺菌は加熱による方法が最も一般的であり、従ってその加熱強度、加熱時間、温度分布等の伝熱問題が生じて来る。つまり、殺菌を確実に行なうには高温で長時間加熱すれば良いわけだが、過度な加熱は基質の変性、ビタミン等の減少を伴うため最適加熱条件の選定は殺菌方式の選定と同時に大切な問題である。

加熱殺菌は操作方法により回分操作、連続操作に分けられるが各々特徴があり後述する。また、加熱殺菌方式以外には雑菌の除去(ろ過)、紫外線殺菌及びそれ等の併用があるが本稿では触れないことにする。

図-2 に加熱殺菌時における雑菌死滅曲線を示すが、一般的に培地中の生菌類は時間に対して(2)、(3)のように半対数的に低下する。(1)は、培地中の生菌の一部が耐熱性をもつ場合である。又、(4)は、高い耐熱性を持った菌が孢子を形成しその孢子が発芽した場合とか、塊状をなした雑菌部が存在する場合等を示したものである。実際の培地はこれら種々の雑菌の混合状態であり、加熱殺菌装置はこの死滅曲線を測定して設計すべきであるが、一般には加熱

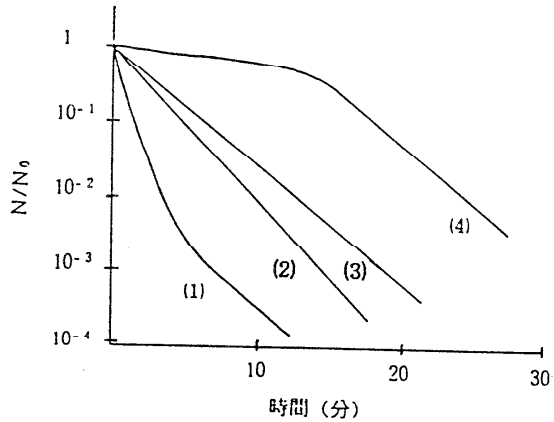


図-2 加熱殺菌時における雑菌死滅曲線

強度 $110^{\circ}\text{C} \sim 130^{\circ}\text{C}$ 、加熱時間 $5 \sim 20$ 分という殺菌条件で設計される。先に述べたように死滅曲線は一般に時間に対してはほぼ半対数的に減少するので次の式で示すことができる。

$$dN/dt = -kN$$

k : 熱による死滅反応速度定数 (min^{-1})

N : 雑菌数 ($t=0$ の時 $N=N_0$)

t : 時間 (min)

本件の詳細に関しては成書³⁾を参照されたい。

3.1 回分殺菌

回分殺菌は、図-3のような発酵槽または殺菌槽中に培地を入れジャケットまたはコイルに熱水か蒸気を通し所定の殺菌温度まで上げ一定時間保持後冷却するもので、小容量の場合広く利用されている。図-3に示すような実際の発酵槽で殺菌操作を行なう場合、槽内の温度分布を均一に保つため攪拌等行なう必要がある。しかし、装置構造上ポケット部等は温度上昇不良による温度不均一化の問題や、比熱差のある培地の混合不足や高粘性培地における流動状態不均一が原因で

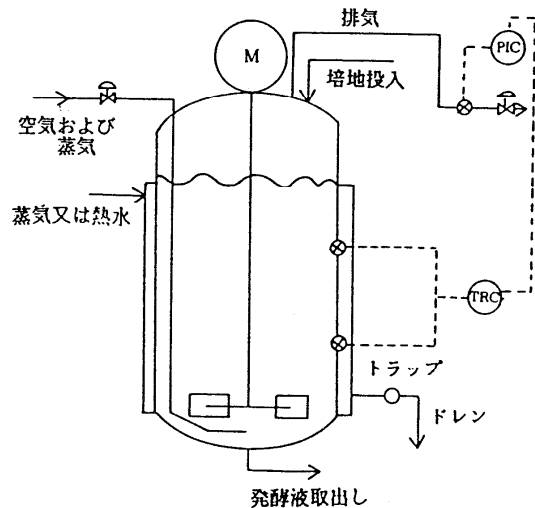


図-3 回分殺菌

槽内温度のローカリゼーションの問題が存在する。また、蒸気を直接吹込む方法は殺菌効果を上げるため有効であるが発泡の問題が生じやすく、かつ、100℃以上の加熱殺菌の場合は温度を一定に保つため圧力制御が重要である。

次の問題として、発酵槽壁にスケールが付着する 경우가良くあるが、スケールがポーラスな状態になっているとその中の空気はスチームと置換し難く熱伝導が悪くなり殺菌が不完全となる。発酵槽壁に蓄積したスケールの熱伝導率を測定し、殺菌中スケールの内部（スケールと槽壁の接触部）にあってはどの程度の温度になるかを計算した結果を図-4に示す。2mmの湿潤スケールの場合、槽内培地が120℃に達した時点でスケール内部の温度は105℃しかならず、そこを120℃にするには更に20%アップのエネルギーが必要である。

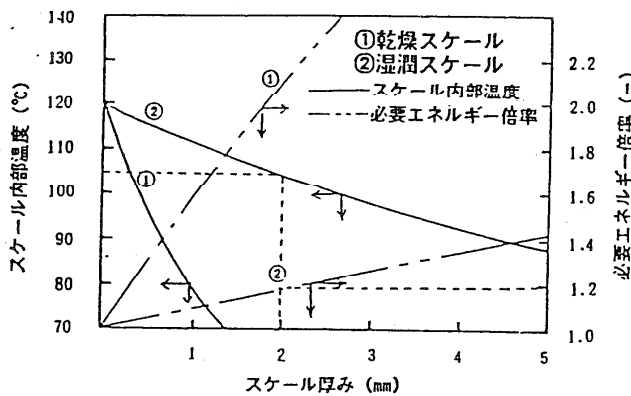


図-4 スケール内部温度および必要エネルギー倍率⁴⁾
 ・(槽肉厚10mm, 材質SUS, 保温材なし, 外気15℃)

3.2 連続殺菌

連続殺菌法はその操作性の良さと殺菌の確実性のために、特に大容量の培地を殺菌する際に使用されている。加熱方式により、間接加熱(図-5)と直接加熱(図-6)があり各々特長があるが、どちらも加熱冷却を短時間に行なうことができるため、処理量の割に小型であり、実装置化が容易である。但し、装置の設計に際しては、培地の種類によっては温度変化による粘度など物性の大幅な変動の問題や、スケールの発生等の問題があり種々の工夫が必要である。

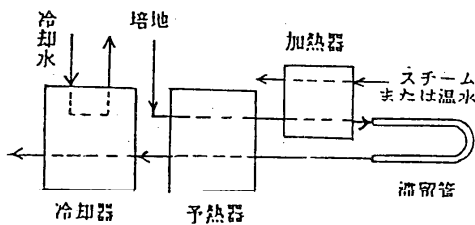


図-5 間接加熱による連続殺菌設備²⁾

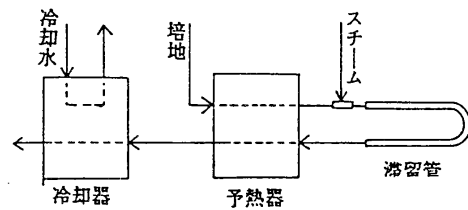


図-6 直接加熱による連続殺菌設備²⁾

4. 発酵熱の除去

微生物発酵は発熱反応であり表-1に示すように多量の発酵熱を発生する。この微生物の生育の最適温度は微生物により異なるが一般に25~35℃の間であり、多量の発酵熱を除去しながらこのような低温に維持する必要がある。このことから装置設計上伝熱の問題が重要となる。

アミノ酸の回分培養の経時変化の例を図-7に示す。このように発熱量は時間と共に変化しピークが出るものが多く、⁵⁾微生物を最適生育条件にするため槽内の培養液温度を設定温度と1℃の偏差内に保持するには、槽内の温度分布の問題と併せて工夫を要する。

この発酵熱の除去には、ブライン、冷水等の媒体の使用も考えられるが、大量培養を行なう工場規模では、河川水（表流水）、井水（伏流水）、海水等の工業用水が一般的に使われる。この使用量は相当なもので、かつ装置材料の腐食問題等から河川水（表流水）の使用が最も一般的で入手が容易であるが、夏場の水温上昇が問題となってくる。図-8に中国地方の代表的河川表流水温の変化を示すが、7~9月の夏場は通常、最大許容水温を越えて来る。例えば、発酵槽容量：200 m³、培養温度：30℃、運転容量：160 m³、有効伝熱面積：200 m²、総括伝熱係数（U値）：1,100 Kcal/m²hr℃とした場合の冷却水温度と冷却水量との関係を発熱量をパラメーターとして試算した結果を図-9に示すが、

表-1 各種基質による発酵熱

	発酵熱 (Kcal/100g菌体)
グルコース	380
n-パラフィン	780
メタン	1,860
メタノール	490
エタノール	413
酢酸	331

引用：「石油発酵 発酵研究会 1970」

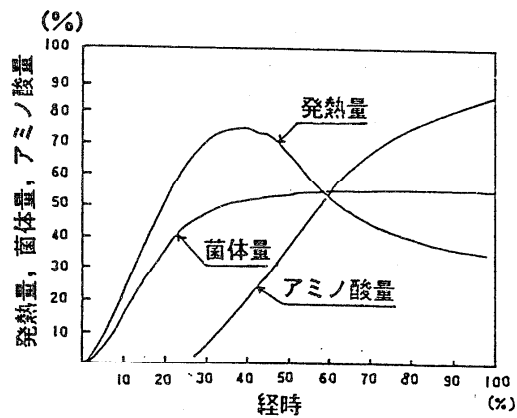


図-7 アミノ酸発酵の発熱量⁵⁾

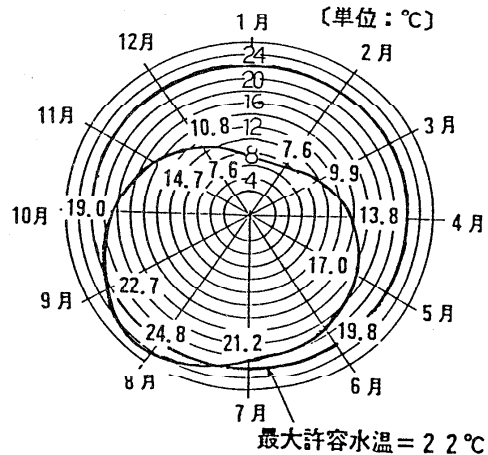


図-8 河川表流水水温の変化 (月間平均値)

水温が20~22℃以上になると急激に冷却水量が増加することになり、冷凍機の設置等何等かの対策が必要となる。

以上のことから、除熱器としてはU値の高い装置を利用した方が対数平均温度差(ΔT)も小さくなり、冷却水量は少なく省エネルギーになるのは当然であるが発酵装置設計上の一番の重要課題である無菌化対策を考慮しながら除熱型式を選定しなければならない。発酵槽の除熱器として一般に使用されている熱交のU値を表-2に示す。

表-2 各種除熱器のU値

除熱型式	総括伝熱係数 (Kcal/m ² hr°C)
コイル	600 ~ 1,100
ジャケット	300 ~ 600
プレート熱交換器	1,000 ~ 4,000
シャワークーラー	900 ~ 1,200

図-10は100klの発酵槽の冷却装置のU値とポンプ動力(理論)の関係をプロットしたものでU値が一定以下になると動力は急上昇して来る。この事は、最も一般的なジャケット、コイルを使用した場合は、発熱量(通常 $0.5 \times 10^4 \sim 1.5 \times 10^4$ Kcal/m²·hr)によっては動力が急上昇する危険がある事を意味し、また、スケールによるU値の低下も大きな問題であることから、その対策は重要な課題である。培養液を強制

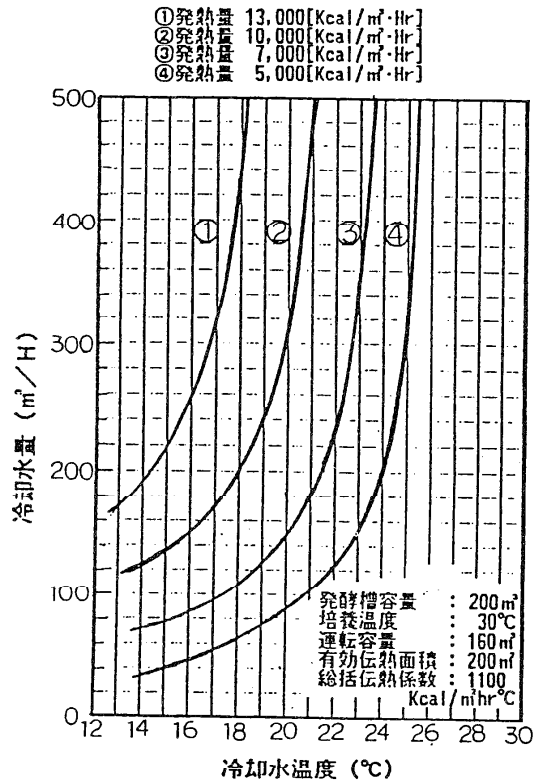


図-9 冷却水温度-冷却水量関係図

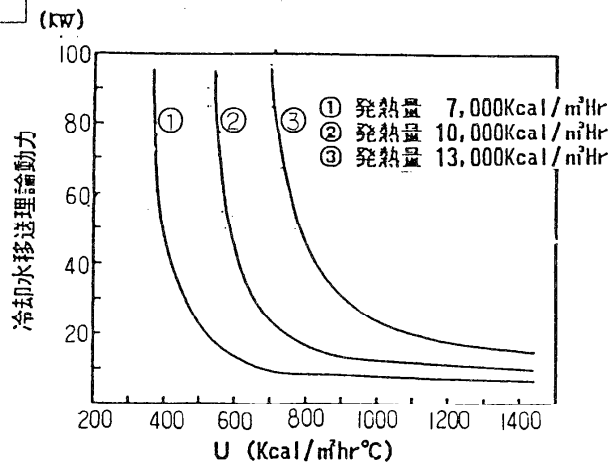


図-10 U値の変化による冷却水動力の変動⁴⁾
(発酵槽容量:100 m³, 有効伝熱面積:100 m²)

外部循環して冷却する時に通常使用されるプレート熱交は高いU値を取れ有効であるが、パッキンの劣化による無菌性の問題や、スケールの問題を起こしやすく、粘度の高い培養液に対しても使い難い。一方シャワークーラーは発酵槽の構造がシンプルになり、無菌対策上は非常に長所を持ったもので蒸発潜熱も利用出来ることから極めて効果的に除熱出来、冷却水の回収方法を工夫すれば有効な除熱型式だと考える。

5. おわりに

バイオプロセスにおける伝熱は、生き物を雑菌から守りながら工学的に取扱うという観点から単なる熱効率のみを考慮した装置とは別な工夫が必要である。今回は培地の殺菌、発酵槽の除熱を中心にバイオプロセスにおける伝熱問題の一面を紹介した。実装置の設計上は対象とする微生物の種類、生産する品目によって培養液の物性、発酵時間、必要無菌度のレベル等著しく異なり個々に解決して行く必要があるが、その上で省エネルギーを心掛けながら最適な装置の設計を考えることが必要である。近年特にニューバイオテクノロジーが注目されておりその進展の早さは目覚ましいものがあるが、同時に増々バイオエンジニアリング力のアップが必要とされており、その中で伝熱問題も実際的な設計、操作の重要課題としてあり続けると考える。

今後は、更に高温又は低温での培養が必要な組換え菌の出現等も考えられ、発酵熱除去のためU値の高い熱交部を持った発酵槽の開発や、槽内温度分布を確実に検出し最適運転条件での効率的な生産可能な設備の開発等が期待される。

文 献

- 1) 木下 祝郎著： 新版発酵工業， 大日本図書
- 2) 遠藤 勲 古崎新太郎ら： 生物反応プロセスハンドブック，サイエンスフォーラム
- 3) 合葉 修一/A.ハンフリー/N.ミリス著： 生物化学工学 第2版，東京大学出版会
- 4) 広谷 精： 生物反応装置セミナー予稿，P-22 “発酵槽における省エネルギー” (1979)
化学工学協会関西支部，日本発酵学会共編
- 5) 服部 横尾，今田： 発酵工学雑誌 52, 583 (1974)

流動層ごみ焼却炉の伝熱

箕浦 忠行 (神戸製鋼)

1. はじめに

流動層ごみ焼却炉は、昭和47年に実用1号炉が現われて以来、各地方自治体で数多く採用され、現在に至っている³⁾。

流動層ごみ焼却炉の原理の一例を図1に示す。燃焼1次空気は、ブローから散気管を通じて、流動層へ送り込まれる。流動化した熱媒体砂は、バーナーにより加熱され、600℃以上になったところへ、ごみが給じん機を介して炉内に装入される。装入されたごみは、熱媒体砂との接触により、流動層内を移動するとともに、ごみ中水分の蒸発、ごみの着火および燃焼が進行する。またごみの一部は流動層内でガス化し、フリーボードで燃焼する。不燃物は、炉底中央部から不燃物排出機によって炉外に取り出され、振動ふるいによって選別され、熱媒体砂は炉内に戻される。

流動層ごみ焼却炉は、火格子式ごみ焼却炉と比較して、炉構造が簡単で補修の容易な点、処理可能なごみ質の範囲が広い点、起動・停止が容易である点などで優れているといわれている。一方、1炉あたりの処理量に限界があり、燃焼熱量に変動のあることなどが指摘されている。

今後流動層ごみ焼却炉が、さらに広く利用されるためには、短所を克服した発展が必要である。ここでは、新しい炉を開発設計するための1アプローチとして、流動層部の熱の流れに着目した熱流動数値モデルを紹介する。

2. 熱流動モデル構築にあたって

現在流動層ごみ焼却炉に期待されている開発項目は①大形化②燃焼熱量変動の平滑化を大きなものとして挙げることができる。これらが実現されれば流動層ごみ焼却炉は大規模処理施設にも適用することが可能となり、その長所を生かせる機会を広げることができる。この大形安定炉の開発にあたって、数値シミュレーションによる検討ができれば、実証実験による負担を低減することができ、経済的に効率のよい開発が可能となる。

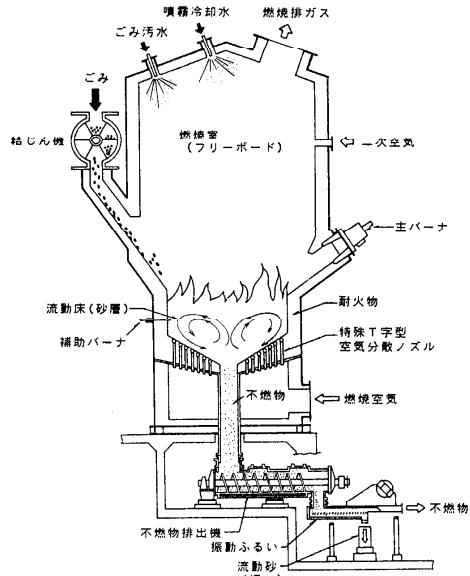


図1. 流動層ごみ焼却炉原理

そこで流動層ごみ焼却炉の熱流動モデルの開発が設計サイドから要求され、著者らがそれに取り組むことになったわけである。

熱流動モデル構築にあたって、現象の理解が第1歩となる。しかしながら、他の多くの流動層機器開発の歴史と同様に、流動層ごみ焼却炉においても工業化技術が常に先行し、現象の理解や解析は後手に回る傾向がある。著者らが熱流動数値モデルの構築に取りかかろうとした時点では、ごみの流動層内での挙動および燃焼特性、フリーボードでのガス燃焼および伝熱特性など現象を把握するために必要なデータは十分とはいえなかった。

そこでまず、流動層部の現象の理解であるが、写真1に示すような頂点からの観察でもわかるように流動層表面に気泡の破裂がみられ、熱媒体砂は気泡流動化していることが容易にわかる。また内部の現象を知るため周方向あるいは半径方向にガス濃度および温度分布を測定し、基礎データとした。



写真1. 流動層表面

3. 熱流動モデルの考え方

熱流動モデルを考えるにあたって前述のようにまずは、現象をいかに理解するか、できるかが問題となる。次にどのような精度でどのような現象に着目したシミュレーションを行う必要があるかを考えなければならない。流動層ごみ焼却炉においては大形化という目標があり、炉の大形化を図れば経済的動力設計の観点から必然的に流動層深さを一定あるいは、少しの増加を維持しつつ、面積を広げる方向に移行する。よって浅く横方向に広がった流動層となり、かつごみの装入口の数は、これも経済的デザインの観点から数が制限されるため、ごみの挙動に着目すれば現象は水平方向と垂直方向の移動を含み3次元となる。

ここでは流動層ごみ焼却炉の燃焼性能の検討が目標となるためごみの燃焼とそれに関係する伝熱、流動現象に着目することになる。流動層部に着目し、図2に示すように領域を3次元要素に分割し、各要素における主要物質に着目した物質および熱収支を整理すると次のようになる。

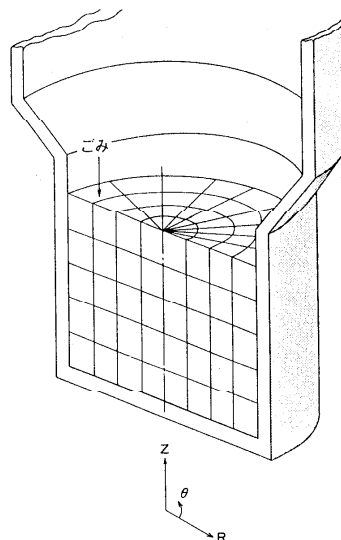


図2. 流動層熱流動モデル

①物質収支

ごみ (可燃分, 水分)

酸素

②熱収支

熱媒体砂

可燃分

流体

次に着目する各物質について数式を立てることになる。数式の導出にあたっては、次の2つの考え方がある。

(a) 流体力学モデル^{3) 14)}

(b) 実験式モデル^{1) 7)}

(a)の流体力学モデルは流れの運動方程式と粒子の運動方程式を直接解く方法 (平均化操作は含まれる) であり、汎用的な方法で非常に自由度の高い計算が可能なものの、計算時間が膨大となる問題がある。よって現時点では、局所的な非定常現象を扱う問題には適するものの、流動層全系の問題には適さないと考えられる。

(b)の実験式モデルは流動層の実験式から物質・熱の移動に関する特性値を求める方法である。長い流動層研究の歴史の中で非常に多くの実験データの積み重ねがあり、実験式として整理されている。そのため、実験式は信頼できるものが多くあるが、実験の範囲外の条件には対応できないという欠点がある。

ここでは実用面から考えて、(b)の実験式モデルを採用した。さらに数式化に際して、種々の単純化を行うことになる。流動層ごみ焼却炉のモデル化では次の単純化を考えた。

①ごみ中の灰分は、存在量が少なく、ごみ焼却性能に大きな影響を与えないと考えられるので無視した。

②気泡頻度などの半径方向分布とそれに伴う熱媒体砂の局部循環や壁面下降流は無視した。

③熱媒体砂の層内偏析は無視した。

④フリーボードの燃焼の影響は無視した。

⑤実炉では底面が水平面に対してある角度をなす円すい状をしているが、水平面として単純化した。

⑥可燃分は熱媒体砂と同一の動きをすとした。

また、実験データをベースにした気泡流動層モデルは、種々のものが考えられているが、ここでは広く使われている気泡を考慮した二層モデルを採用した。

物質および熱収支について現象を整理すると次のようになる。

①物質収支

- ・ ゴミ (可燃分, 水分)
 - ウェークによる上昇
 - 粒子濃厚相部下降
 - 気泡運動に伴う水平方向移動
 - 燃焼・蒸発による変化
 - 外部からの装入
- ・ 酸素 (気泡内)
 - 気泡による上昇
 - 濃厚相内酸素とのガス交換
- ・ 酸素 (粒子濃厚相内)
 - 粒子濃厚相内上昇
 - 気泡相内酸素とのガス交換
 - 可燃分燃焼による変化

②熱収支

- ・ 熱媒体砂
 - 気泡運動に伴う水平方向移動に伴う伝熱
 - ウェークによる上昇に伴う伝熱
 - 粒子濃厚相部下降に伴う伝熱
 - 流体との熱交換
 - ゴミとの熱交換
- ・ 可燃分
 - 気泡運動に伴う水平方向移動に伴う伝熱
 - ウェークによる上昇に伴う伝熱
 - 粒子濃厚相部下降に伴う伝熱
 - 熱媒体砂との熱交換
 - 流体との熱交換
 - 燃焼発生熱量
 - 水分蒸発熱量
 - 装入物顕熱
- ・ 流体
 - 流動相内移動に伴う伝熱
 - 熱媒体砂との熱交換
 - 可燃分との熱交換

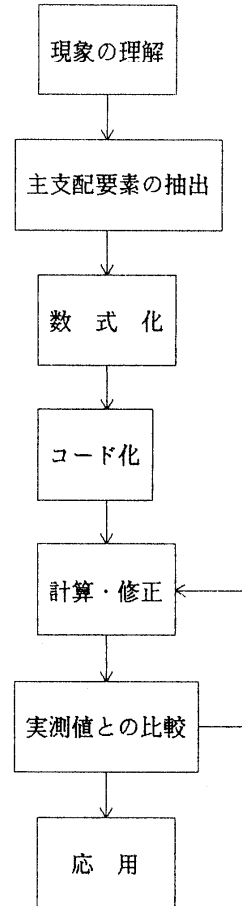


図3. 数値シミュレーションのフロー

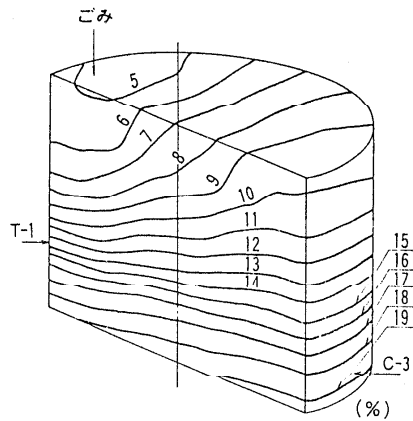


図4. 酸素濃度分布

ごみの燃焼モデルとして 100℃まで加熱されればまず水分が蒸発し、水分がなくなった後温度が上昇し 550℃に達すると着火するとした。可燃分は球形とし、燃焼反応は高温領域では拡散律速とし、低温領域では、反応律速として直線で近似した。

一方、流動相に関する研究は数多く、細かな現象が実験式として整理されているが、熱流動モデルで用いた主な実験式の内容を列挙すると次のようになる。

流動開始速度^{4) 14)}

気泡流量⁵⁾

気泡群の上昇速度¹⁶⁾

平均気泡径の軸方向分布^{11) 12)}

気泡相とクラウド相間のガス交換係数²⁾

水平方向の粒子混合拡散係数⁶⁾

可燃分と熱媒体砂間熱伝達率¹⁵⁾

熱媒体砂と流体間熱伝達率¹⁴⁾

以上示した基礎式、基礎関係式を数値解析手法を用いて解くわけである。数値シミュレーションの結果は実測値と比較されモデルの修正を行い、モデルとして完成後、実際の設計に応用することになる。数値シミュレーション計算の一連の流れを図3に示す。

また、数値シミュレーションにより得られた流動層内酸素濃度分布の結果の一例を図4に示す。

4. おわりに

数値シミュレーションの役割の1つは、絶対値を求めることよりも実験では実現困難な条件で、それを変化させながらパラメータスタディーを行い、定性的性質を得ることにある。

従来、このパラメータスタディーを通して大形炉の特性や、燃焼発熱量変動の特性について検討を行ってきた^{9) 10)}。

今後は、高温燃焼技術の確立が1つの大きなテーマとしてあがっている。流動層内部のごみのガス化反応も含めて従来の熱流動モデルをさらに改良しフリーボード燃焼も含めた熱流動モデルに発展させ実炉設計に役立てていきたいと考えている。

参考文献

- 1) Bellgard, D., Hembach, F., Schoesslet, M. and Werther, J. : Paper for International Conference on Fluidized Bed Combustion, Boston (1987)
- 2) Davidson, J.F. and D.Harrison : "Fluidized Particles", p137, Cambridge Univ. Press (1963)
- 3) Gidaspow, D., B.Ettehadieh and J.Bouillard : AIChE Symp. Ser., 80, 57 (1984)
- 4) Gossens, W.R.A., G.L.Dumont and G.J.Spaepes : *ibid.*, 67, 38 (1971)
- 5) Grace, J.R. and D.Harrison : Chem. Eng.Sci., 24, 497 (1969)
- 6) 平間, 石田, 白井 : 化学工学論文集, 1, 272 (1975)
- 7) Ho, T.C. : Paper for AIChE Annual Meeting, Miami Beach (1986)
- 8) 石川 : 環境施設, No. 18, 36 (1984)
- 9) 箕浦, 坂本, 鈴木, 外山 : 化学工学論文集, 14, 583 (1988)
- 10) 箕浦 : 混相流レクチャーシリーズ (第2回), 87 (1988)
- 11) 三輪, 森, 鞭 : 化学工学, 37, 295 (1973)
- 12) Mori, S. and C.Y. Wen : AIChE J., 21, 109 (1975)
- 13) Pritchett, J.W., T.R.Blake and S.K. Garg : AIChE Symp. Ser., 74, 134 (1978)
- 14) Ranz, W.E. : Chem. Eng. Progr., 48, 247 (1952)
- 15) 白井, 吉留, 庄司, 田中, 北條, 吉田 : 化学工学, 29, 880 (1965)
- 16) 桐栄, 松野, 小嶋, 長井, 中川, 湯 : 化学工学, 29, 851 (1965)
- 17) Wen, C.Y. and Y.H. Yu : AIChE J., 12, 610 (1966)

1. はじめに

流動層内水平伝熱管の管外伝熱係数が円周方向で異なることは多数報告されている。その中では伝熱係数は上半分が下半分よりも大きいという報告が多く、逆に下半分の方が上半分よりも大きいという報告もある。これらの報告は流動条件（例えば流動媒体、空塔速度）や伝熱管の違い（例えば管径、段数、ピッチ）が存在するので、同一基盤で評価はできないが、条件によって円周方向の伝熱係数分布が異なるのではないかと考える。

そこで層内伝熱管と流動媒体あるいは流動用流体との伝熱機構を調べ、モデル化して実機と比較した。試験はコールドモデル装置を用い、伝熱管には透明アクリルを使用して、伝熱管内部から流動層内を16ミリカメラで撮影した。撮影はフィルム速度2000^{コマ}/SECで高速撮影を行い、流動媒体と気泡が交互に伝熱管に接触する様子を納めることができた。このフィルムより、伝熱管上下それぞれの流動媒体接触時間を測った結果、伝熱管上半分の方が流動媒体との接触時間が長いことが確認されたので、流動媒体による接触伝熱と気泡による対流伝熱が周期的に繰り返されて伝熱が行われているというモデル

をたてた。実機より得られた伝熱係数を使用して、シミュレーションを行ったところ、流動媒体が接触している間の、伝熱管の管外伝熱係数は、上半分の値と下半分の値がほぼ同程度となったため、流動媒体の接触時間を測定すれば、伝熱管の管外伝熱係数を計算できるようになった。

2. 実験方法

実験装置の概要を図-1

に、流動層の形状を図-2に示す。

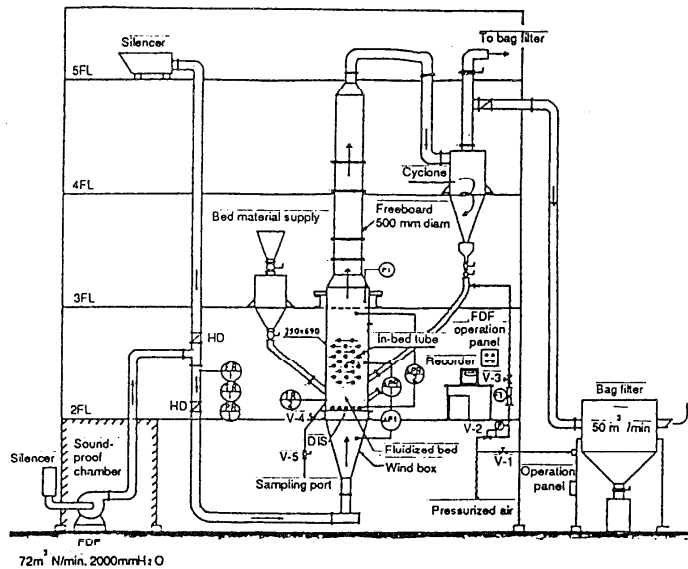


図-1. コールドモデル実験装置概要

流動用空気は流量測定後、風箱に投入され、分散板を通じて流動層内へ入る。実機の流動媒体は生石灰や石膏が主成分であるが、伝熱と同時に摩耗速度も測定するために摩耗速度を速くして実験時間を短縮する目的で密度および粒径が同じ程度である珪砂を使用した。

流動層から出た空気は、サイクロン、バグフィルターで集塵して大気放出する。サイクロンで集められた流動媒体は、流動層高を維持するために、流動層中段に再投入し、それでもなお流動層高が減少する場合は新しく珪砂を追加して、流動層高が常に1000mmで運転されるようにした。

流動層断面形状は250mm×690mmの長方形で、透明アクリル樹脂を使用して可視化されている。流動層内伝熱管もアクリル製とガラス製を用意して、伝熱管の内部から管に接している流動層部分が観察できるようにした。伝熱管は流動層の250mm 長手方向に水平に設置し、管の外径、(50.8mm) 配列形式(千鳥配列)および配列の間隔は当社の実機流動層ボイラと同じ寸法、形式を採用した。

流動状態は流動層の前面から撮影し、流動媒体の伝熱管への接触状況は伝熱管内に45度の角度で取付けた鏡を通して、それぞれビデオと16mm映画撮影機で撮影した。16mm映画撮影機は秒速2000コマ撮影できる高速仕様の機種を使い、低速で映写して流動媒体粒子の挙動を測定した。

MS Catalyst
 $U_0 = 8.6 \text{ cm/sec}$

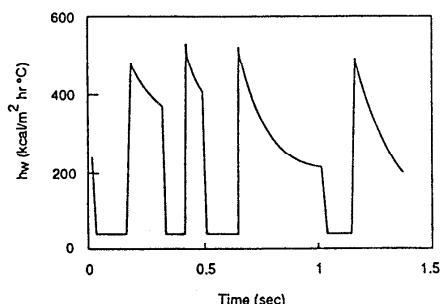


図-3. 瞬時伝熱係数 (Mickley⁽¹⁾)

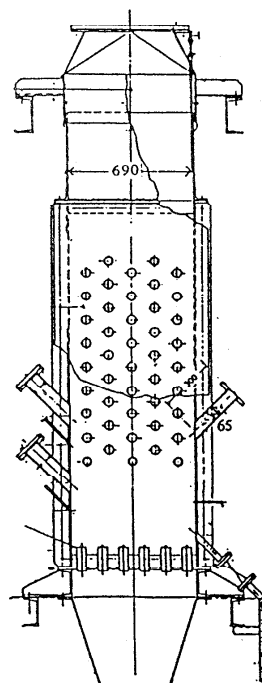


図-2. 流動層形状

流動層温度	常温+30度
流動層内空塔速度	1.5 m/sec
流動層高	1000 mm
流動媒体	珪砂

表-1. 実験条件

流動用空気は常温のものを使い、流動層内の空塔速度は1.5m/secとした。

実験条件を表-1にまとめる。

Mickley⁽¹⁾らは伝熱係数の瞬間値を測定し、図-3のデータを得た。この例では一秒間に三回は

どの頻度で伝熱係数は急激に変化している。従って一般に流動層ボイラで使用する伝熱係数は、時間的な平均値であるといえる。

図-3で伝熱係数が急激に上昇し、500Kcal/m²・hr・°C付近にまで達する現象は、気泡に接触していた伝熱管に流動媒体がやってきて、一挙に接触し、伝導によって熱が伝わることを示している。伝熱管に接触し、そのまま付着している流動媒体粒子層内には、伝熱管への伝熱により温度勾配が発生し、接触部分の粒子温度は低下していき、それと共に伝熱係数は減少する。0.1~0.3秒すると気泡が通過し、停滞していた粒子層は伝熱管表面から去り、伝熱管表面では流動用気体による対流伝熱が支配的になる。対流伝熱では、気体表面が更新されるため、伝熱係数は安定しており、50 Kcal/m²・hr・°Cを示している。この実験を参考に、本実験では次の仮定をたてて計画した。

- ① 図-3では伝熱係数は、急上昇して減少しているが、これにはセンサーの熱容量や伝熱管全体の平均化の影響があり、最初に急上昇したときの伝熱係数は、さらに大きいものと予想される。
- ② この問題を解決するには、伝熱係数の減少速度から、伝熱係数を逆算する方法や流動媒体粒子層の非定常伝熱減少を解析するといった方法が考えられるが、粒子の接触時間は一定ではなく、統計的なものであるため、流動媒体粒子の温度分布も考慮して展開すると複雑になる。
- ③ そこで、図-4に示す瞬時伝熱係数を仮定して実験解析を行った。伝熱管に気泡が接触している時間は τ_g 秒で、対流伝熱が伝熱の支配的な要素である。この間の伝熱係数を h_g とする。伝熱管に粒子が接触している τ_p 秒間で伝熱係数は減少していくが、これを一定値 h_p と仮定する。

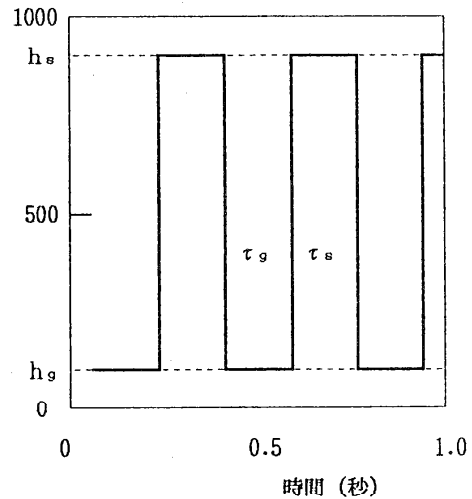


図-4 熱伝達係数モデル

以上の仮定によって設定された粒子接触時の伝熱係数 h_p は、結局、流動媒体粒子層の伝熱管接触部分に温度境界層が存在するという理論と同じになる。

ここで h_g は、ガスと伝熱管との対流伝熱による伝熱係数であり、次の値を使用した。

$$h_g = Nu \cdot k / d_o$$

Nu=40	ヌセルト数	(-)
k =0.0648	ガスの熱伝導度	(kcal/mhr°C)
d_o=0.0508	伝熱管外径	(m)

次に周期と周波数と粒子接触時間割合を定義する。

$$\begin{aligned}\tau &= \tau_g + \tau_s && \cdots \cdots \cdots \text{周期} && (\text{sec}) \\ z &= 1/\tau && \cdots \cdots \cdots \text{周波数} && (\text{Hz}) \\ \theta &= \tau_s/\tau && \cdots \cdots \cdots \text{粒子接触時間割合} && (-)\end{aligned}$$

時間的な平均の管外伝熱係数 h は次式で表現される。

$$h = \theta h_s + (1 - \theta) h_g \quad \cdots \cdots \cdots \text{(式-1)}$$

本実験では高速度撮影によって得られたフィルムより、伝熱管の上半分と下半分について、粒子の接触時間およびガスの接触時間を測定し、平均して τ_s 、 τ_g を求めた。これらの値を使用して粒子の接触時間割合 θ を計算し、管外伝熱係数 h は当社実機データより解析した伝熱管上半分管外伝熱係数と伝熱管下半分管外伝熱係数を使用して、式-1 より粒子接触時の管外伝熱係数 h_s を算出し検討を行った。

当社実機では、炭種による流動層内燃焼効率の違いを調整するために、層内伝熱管の下半分に、伝熱係数調整用の断熱材を加減してとりつけている。この断熱材の効果は、予め実験及び実機にて確認しており、熱抵抗として評価し、抵抗値を把握している。また、断熱材はどのプラントでも全て同一材質、同一形状、同一の取り付け方法を採用している。

3. 実験結果

3.1 流動媒体粒子挙動

伝熱管の内部から伝熱管の外表面を観察すると、伝熱管の下面、側面、上面の違いにより流動媒体粒子が接触する形態が異なった。

(伝熱管下面) 下面では、伝熱管表面に気体と粒子が交互に接触し、気体が接触している時間が長く、2~4ヘルツの周期であった。粒子の接触過程は以下のとおり。

- ① 気泡が通過中は、伝熱管下面は主に気体と接触している。
- ② 気泡通過直後、流動媒体が塊状にて伝熱管下面にほぼ直角に衝突し、衝突と同時に伝熱管表面で停止する。
- ③ 流動媒体は粒子どうしの相対位置を変えずに、瞬時表面で停止した後表面から鈍角に退き、次の気泡の通過となる。

従って一個粒子の自由な運動はなく、粉粒体層と伝熱管とが接触するという構造になっている。

(伝熱管側面) 側面では、伝熱管表面への気泡と流動媒体の到来周期は、伝熱管下面と同じであるが、粒子は伝熱管に接触した後、伝熱管表面に沿って接触しながら上下に滑ったうえで去っていくのが観察された。

(伝熱管上面) 上面では、伝熱管表面に流動媒体粒子が降りつもり、伝熱管に沿ってゆっくりと降り落ちる。気体よりも粒子に接触している時間の方が長く、粒子の移動速度は下面や側面に比べて遙かに遅い。

3. 2 伝熱管への粒子接触割合

高速撮影フィルムで測定し、算出した結果を表-2に示す。

流動媒体粒子が伝熱管に接触している時間割合は、伝熱管の上半分では60%であるのに対し、下半分では24%しか接触しておらず、伝熱量が少ないことがわかる。

次に表-3に当社実機で測定した流動層内伝熱管の上半分と下半分のそれぞれの管外伝熱係数 h と、 h を使って、式-1より求めた粒子接触時の管外伝熱係数 h_s を示す。

計算結果によると、 h_s は上下共900 Kcal/m²・hr・°C程度である。

4. 考察

流動層内伝熱管に流動媒体粒子が接触して伝熱する機構は、個々の粒子が伝熱面に衝突して、その持っている熱容量を放出するのではなく、かなり大きな塊としての粉体層の形で伝熱面に接触して伝熱することがわかった。熱を伝えている間、粉体層は伝熱面に接触したまま移動せず且つ個々の粒子の相対位置も変化しない。従って、伝熱の機構は断続的にやってくる粉体層との非定常伝導伝熱が繰り返されている構造になっていると考えられる。

伝熱がこのような構造であれば、

流動層をひとつの流体として取り扱い、その平均密度や空塔速度あるいは見掛けの粘性等のパラメーターを駆使して、管外伝熱係数を流体力学的に展開する方法は、適当ではなく、本試験で試みたように流動媒体と接触しているか、いないかといったオン・オフ論議を進める方法が、有効ではないかと考える。

伝熱面での流動媒体粒子層の平均接触時間は、伝熱管下半分では0.11秒であるのに対して、上半分では0.89秒と八倍も長い。非定常の伝熱であれば、粒子接触時の伝熱係数は伝熱管下半分の方が大きいはずである。そこで次のように概算する。

	伝熱管上半分	伝熱管下半分
粒子接触時間 τ_s (sec)	0.89	0.11
ガス接触時間 τ_g (sec)	0.49	0.33
周期 τ (sec)	1.48	0.44
周波数 z (Hz)	0.68	2.30
粒子接触割合 θ (-)	0.60	0.24

表-2. 接触時間測定結果

伝熱係数	伝熱管上半分	伝熱管下半分
h (Kcal/m ² ・hr・°C)	597	256
h_s (Kcal/m ² ・hr・°C)	961	905

表-3. 管外伝熱係数

基礎方程式

$$\alpha \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T}{\partial r} \right) = \frac{\partial T}{\partial t}$$

$T(r, t)$. . . 流動層温度 (°C)
 r . . . 伝熱管中心からの距離 (m)
 t . . . 時間 (hr)
 α . . . 熱拡散係数 (m²/hr)

境界条件

$T = T_b$ ($t = 0$ 、 $r_0 < r$)
 $T = T_w$ ($r = r_0$)
 $T = T_b$ ($r = \infty$)
 r_0 . . . 伝熱管半径 (= $d_0/2$) (m)
 T_b . . . 流動層温度 (°C)
 T_w . . . 伝熱管表面温度 (°C)

上記方程式をとり、 τ_s 秒間伝熱管に流動媒体粒子が接触している場合の平均管外伝熱係数 $h_s(\tau_s)$ は次の式で計算できる。

$$h_s(\tau_s) = - \frac{k_s}{\tau_s \Delta T} \int_0^{\tau_s} \left(\frac{\partial T}{\partial r} \right)_{r=r_0} dt$$

ΔT . . . 流動層温度と伝熱管表面温度の差 (°C)
 k_s . . . 流動層の熱伝導度 (kcal/mhr°C)

この結果では $h_s(0.89) = 0.6 h_s(0.11)$ となって接触時間による管外伝熱係数の違いが存在することがわかる。

以上を考慮した上で、本実験、解析の問題点をまとめる。

- ① 管外熱伝達は実機の熱缶（流動層温度780～850°C）状態で測定したが、伝熱管に流動媒体粒子が接触している時間割合は、コールドモデルテストで測定している。流動状態（例えば、ホールドアップ分布、気泡径分布）は流動層温度に、影響されることは知られており、粒子間付着力の温度特性等によるといわれている。従って、ホットモデルでの実験を行う必要があると考える。
- ② 流動層内伝熱管と流動媒体との熱交換は、気体との対流伝熱と粒子層との非定常伝導伝熱が交互に繰り返されると仮定したが、実機設計の際は放射伝熱を考慮しないと合わない。
- ③ 気体による対流伝熱は、伝熱管全体の管外伝熱係数として計算し、伝熱管の上半分と下半分は共にこの伝熱係数であるとしているが、流れに垂直に置かれた伝熱管の前後では、伝熱係数が異なっている。

今後は以上の問題点を考えて、さらに伝熱機構を明かにしていきたい。

5. 結論

流動層内水平伝熱管の上半分と下半分の管外伝熱係数の違いを、コールドモデルで透明伝熱管を使用してしらべた。伝熱は観察結果より、流動媒体粒子の接触による非定常伝導伝熱と、気体の接触による対流伝熱が交互に行われると仮定した。その結果、伝熱管の上半分、下半分共粒子接触による伝熱係数は約900kcal/m²・hr・°Cとなることがわかった。

これによつて伝熱管の上半分と下半分の伝熱の違いが、流動媒体粒子との接触時間に関係があり、接触時間割合を測定すれば伝熱係数が推測される。

6. 使用記号と単位

d_0	伝熱管外径	(m)
h_0	粒子接触時伝熱係数	(Kcal/m ² ・hr・°C)
h_g	気泡接触時伝熱係数	(Kcal/m ² ・hr・°C)
k	ガスの熱伝導度	(kcal/mhr°C)
k_0	流動層の熱伝導度	(kcal/mhr°C)
Nu	ヌセルト数	(-)
r	伝熱管中心からの距離	(m)
r_0	伝熱管半径	$= 1/2 d_0$ (m)
$T(r, t)$	流動層温度	(°C)
T_b	流動層温度	(°C)
T_w	伝熱管表面温度	(°C)
t	時間	(hr)
z	周波数	$= 1/\tau$ (Hz)
α	熱拡散係数	(m ² /hr)
ΔT	流動層温度と伝熱管表面温度の差	$= T_b - T_w$ (°C)
θ	粒子接触割合	(-)
τ	周期	$= \tau_g + \tau_s$ (sec)
τ_g	粒子接触時間	(sec)
τ_s	気泡接触時間	(sec)

7. 参考文献

- (1) H.S. Mickle, et al., Chem. Progr. Symp. Series, 57, (32) 51 (1961)
- (2) K. Yoshida, T. Ueno and D. Kunii Chem. Eng. Sci., 29, 77 (1974)
- (3) H.A. Vreedenberg, J. Appl. Chem (London), 2, Suppl., S26 (1952)
- (4) H.A. Vreedenberg Chem. Eng. Sci., 9, 52 (1958)
- (5) H.A. Vreedenberg Chem. Eng. Sci., 11, 274 (1960)

宇宙における熱技術（宇宙熱発電用熱エネルギー貯蔵）

阿部宜之（電子技術総合研究所）

1. はじめに

21世紀にむけて宇宙環境の積極的な産業利用が進むにつれて、宇宙ステーションを始めとする比較的low軌道における大型建造物の構築の要求、およびこれまでに経験のない数10kW以上の電力供給の要求が生じてくる。それに伴い、これまでの宇宙用システムである太陽電池による光発電システム（PV：Photovoltaic）では、low軌道のため

- ・電池パネル面積
- ・システム重量

の2点が重要な問題となる。前者は太陽電池パネル面積の増大に伴い、ドラッグ（low軌道であるため摩擦が無視できない）の影響が深刻で、高度を維持するための多大なエネルギー消費を引き起こす。後者は、low軌道であるため日陰時のエネルギー貯蔵として二次電池を必要とするが、ミッション時間が10年のオーダーとなると、必要とする二次電池の重量が著しく増大し、全体のシステム重量の増加を招く。

これに対して、エネルギー供給をガスタービン等を用いた太陽熱発電（SD：Solar Dynamic）によって行うと上記の点を著しく改善できるため⁽¹⁾、NASAが総力を挙げて開発を進めており、また欧州⁽²⁾、日本も独自の電力供給能力の確保を目指し、要素技術開発を計画しようとしている⁽³⁾。

2. 熱発電と熱エネルギー貯蔵

当初は、宇宙ステーション建設の時点から電力の多くをSDで賄うことを予定していたが、実際には当分の間PVのみで運用するよう変更した。これは、SDの技術開発の確立の見通しが立たないことによるためで、その原因は集光コレクター、集熱レシーバー等いろいろあるが、特に問題となっているのはレシーバーで日陰時の熱を蓄える蓄熱システムである。

宇宙ステーションの予定軌道では、約1時間半の周回時間のうちほぼ3分の2は日射が得られるが3分の1は地球の陰にはいり日射が得られない。そのためPVでは二次電池、SDでは蓄熱によってエネルギーを蓄えるが、蓄熱方法は

- ・高い蓄エネルギー密度
- ・熱機関を動かすため一定温度での放熱
- ・蓄・放熱のサイクルが速くしかも極めて長期のサイクル寿命

といった必要条件を満たさなくてはならない。これらの条件に最もよさわしいのが物質の相変化を利用した潜熱蓄熱方式である。特に熱機関の動作温度に対応できる潜熱蓄熱材料は、一般

にアルカリハロゲン化物等の熔融塩（例えばLiF, LiF-CaF₂など）であるが、筆者らは有望な潜熱蓄熱材料について詳細なスクリーニングを行い⁽⁴⁾、更に有望な材料について熱特性の実験的把握を進めてきた⁽⁵⁾。

3. レシーバーの技術課題

レシーバーの蓄熱システムの例を示すと図1のような構成となるが、高温潜熱蓄熱材料として有望な熔融塩を用いるうえで問題となるのは、

- ・ 熔融塩とこれを充填する容器材料との共存性
- ・ 溶融・凝固に伴う熱応力とその繰り返しによる疲労破壊
- ・ 凝固時の体積収縮に伴うボイドによる熱抵抗
- ・ これに関連し、微小重力下でのボイドの形成

である。共存性に関しては精力的な研究が行われており、共存性のよい金属材料の選択が進みつつある。技術の確立の上で最もネックとなっているのが、ボイドの発生と熱応力と熱抵抗の問題である。これは、高温熔融塩が一般に固・液相変化に伴い30%程度の体積変化を生じるためである。また、ボイドの熱抵抗、不均一な加熱等により振れの熱応力が生じるサーマルラチ

エッチングといった現象も生じることがある。微小重力下での相変化に伴うボイド発生に関する情報はSD用レシーバー設計の基盤の情報であるため、NASAをはじめ米国の研究機関がデータ取得に目の色を変えている状況である。

筆者らは、微小重力下での相変化に伴うボイド発生に関する実験的な検討を進めている。図2は、速い冷却速度でMo容器内のLiFを凝固させた地上実験の半径方向のX線CT像の例であるが、濡れ性が良い場合には、ボイド（黒く現われている部分）

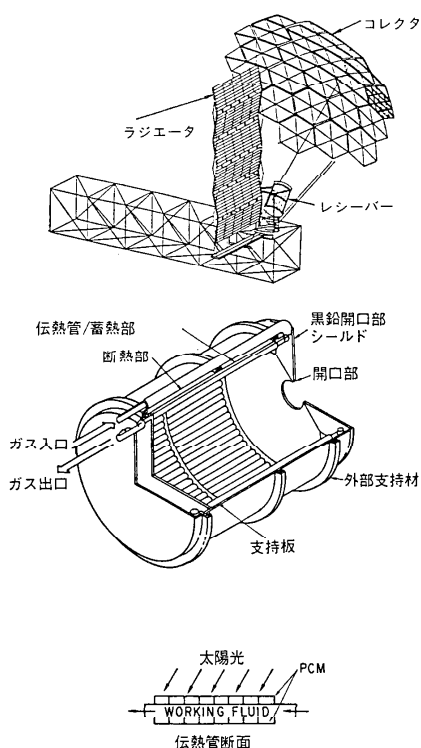


図1 レシーバーの構成例

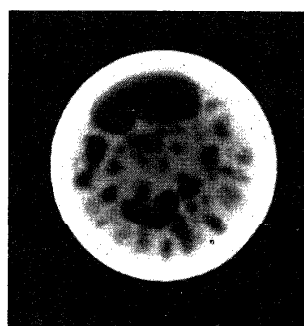


図2 円筒容器内で固化したLiFのX線CT像

の分布が、冷却速度により著しく変化する。熔融塩の凝固過程におけるボイドの形成については、X線CTによる観察を更に高度化し *in situ* 観察を進める一方、文部省宇宙科学研究所と共同で小型ロケット (S-520) の弾道飛行による微小重力実験 (約7分間) を行い、微小重力下でのLiNO₃の凝固状況に関するデータを取得することを計画している。

このような体積変化に伴う問題を少しでも和らげる手段としては、熔融塩を充填する容器を細かく仕切ったり、フィン、ヒートパイプ等で伝熱促進を図ったりする方法が考えられ、NASAではこのような概念のもとで研究開発を進めているが、これでは抜本的な改善とはならずしかもシステム重量の著しい増加を招くため、PVに対するSDの利点を十分に発揮しえない。このような技術的困難さのため、NASAでは最近では潜熱蓄熱ではなく顕熱蓄熱による方法も検討し始めているが、最善の方法でないことは明らかである。

4. アドバンスド・レシーバーとコンポジット材料

4.1 コンポジット潜熱蓄熱材料の試作

筆者らはSD用レシーバーのための潜熱蓄熱技術の研究開発のフィロソフィーとして

- ・高い伝熱特性
- ・システムの軽量化
- ・単純な構造

を常に念頭においているが、実際にはこのような要求を満たすためには既存の蓄熱材料、蓄熱器の概念では限界があり、材料開発レベルからのアプローチも不可欠と考えている。

筆者らは宇宙におけるSD技術に適した潜熱蓄熱技術開発のための有力な技術のひとつとして、潜熱蓄熱材料である熔融塩とセラミクスあるいは炭素繊維等とのコンポジット材料化の可能性に着目した⁽⁶⁾。コンポジット材料の概念が実現できると、

- ・コンポジット蓄熱部と、作動ガスとの間の直接接触の伝熱が可能となり、著しい伝熱特性の改善が図れる
- ・直接接触伝熱により、構造が単純化されシステム重量が格段に軽くなる
- ・熔融塩がサブミクロンオーダーに分布しているため、相変化の際の体積変化に伴う力学的作用がほとんどない
- ・熱抵抗を生じるようなボイドの形成がなく、また炭素繊維、セラミクスは、金属、熔融塩に比べて一般に熱伝導率が高いため、伝熱特性が向上する

といった利点が得られるほか、炭素繊維、セラミクスは金属材料に比べ一般に熔融塩との共存性に優れていると言われている。

今回、最初の試みとして、熔融塩に845°Cに融点を持ち1,015 kJ/kgの潜熱を有するLiF、複合化する材料として、LiFとの共存性に優れ、熱伝導率が高く、高温強度に優れているSiCを選びコンポジット材料を試作し、材料作成に成功した⁽⁷⁾。図3は試作したLiF-SiCコンポジット材料の例で、形状は図に示すようなチューブタイプ、ハニカムタイプである。

これまでのところ、六方晶系、立方晶系両方のSiCについてコンポジット材料の作成を試みた

が、いずれの場合も材料作成は成功し、また形状に関してもかなり複雑な形状のもの、寸法も実規模のレシーバーを構成できる程度の寸法のもので十分に可能である。蓄熱密度はコンポジット材料中の潜熱蓄熱材料の含有量によるが、今回はLiFの含有量は質量分量で約40%程度である。材料作成上はこれを更に60~70%程度に高めていくことは十分可能であることが確認できているが、今後、材料の熱安定性、耐久性を考慮しつつ、最適な組成について実験的な検討が必要である。

4. 2 コンポジット材料の実験的評価

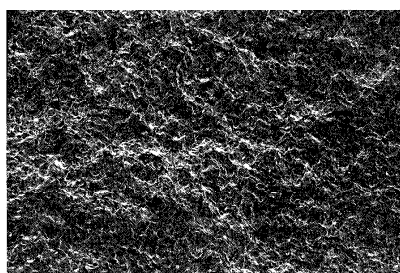
試作したコンポジット材料を蓄熱材料として評価するため、まず

- ・ SEM、EPMAによる表面観察
- ・ 高温顕微鏡による相変化時の表面観察
- ・ 示差熱分析 (DTA) による熱的特性評価

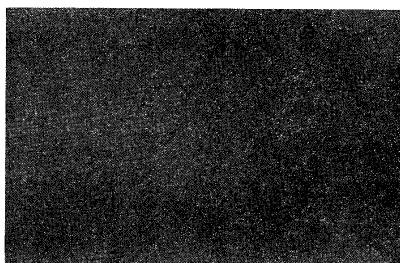
を行った。

図4は、例として六方晶系構造を有するSiCとLiFとのコンポジット材料のSEM観察像(a)、及びX線分析による元素の分布状態を示したものであるが、SiC (b) とLiF (c) がサブミクロンオーダーで均一に分布していることがわかる。さらに、高温顕微鏡による熔融・凝固時の材料表面の観察では、材料表面で熔融塩が熔融時にSiC粒子の隙間から滲出してくる様子が鮮明に観察されたが、熔融状態にあっても熔融塩が材料中に安定に担持された状態であり、流れ出るようなことはなく、繰り返し熔融・凝固を行っても構造は全く変化せず、物理的に極めて安定であることがわかった。

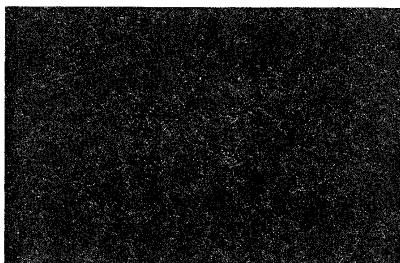
図5はコンポジット材料のDTA曲線である。25回の熔融・凝固の後も、熔融に伴う吸熱ピークと凝固に伴



10 μm
(a) SEM 写真



10 μm
(b) Si の分布状態



10 μm
(c) F の分布状態

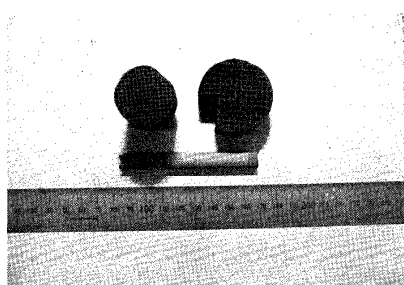


図3 LiF-SiCコンポジット材料

図4 表面観察および分布状態

う発熱ピークは鋭く、狭い温度範囲での相変化が生じており、初期のピーク形状と大差ないことがわかる。これから、試作したコンポジット材料が熱化学的に極めて安定であることが判明した。

図6は、溶融・凝固を繰り返した際の溶融のピーク面積（融解熱）と融解温度（ T_m ）、及び凝固温度（ T_c ）の変化を示したものである。この図から、3～5°Cの過冷却が見られるが、 T_m 、 T_c は溶融・凝固を繰り返しても全く変化していない。一方、相変化を繰り返すと共に潜熱量が極くわずかではあるが減少していることがわかる。これは、測定雰囲気である不活性ガスの気流中で、LiFがわずかな蒸発をしていることによる。

4.3 宇宙用材料としての課題

図3に示したような形状のコンポジット材料を実際にレーザーに適用する場合、最も単純な構造としては外面から直接太陽熱で輻射加熱し、内面、あるいはハニカムの多数の穴に直接作動ガスを流すような、直接接触伝熱を行う構造が考えられる。この場合、前述したように材料表面での溶融塩の蒸発の問題は、宇宙空間のような高真空に直接さらされる時極めて重要である。SD用としてこのようなコンポジット潜熱蓄熱材料を用いて直接接触伝熱型レーザーを開発していく場合、今後の課題として、まず材料表面での蒸発を防ぐための表面処理技術の検討に取り組んでいく必要がある。筆者らは、いくつかの方法について具体的な検討に着手した。

4.4 第2世代型レーザー

これまで述べたようにLiF-SiCのコンポジット材料において、蒸発問題をはじめ長期の共存性等まだ改善すべき点、解決すべき点は多く、検討を精力的に進めているが、一方でこれと並行して更にSDシステムの軽量化、高エネルギー効率化を目指し、材料の高性能化の研究も二つのアプローチにより進めている。その一つは炭素材料を用いた複合化であり、実現するとコンポジット材料の利点がより一層発揮できるものと期待している。

もう一つの試みはLiFに代わる、より高温の潜熱蓄熱材料の利用である。LiFは融点が既存のクローズドサイクルガスタービンの作動ガス温度に適合した潜熱蓄熱材料であるが、今後のガスタービンの技術開発を考えるとSDシステムの1,200°C程度の高温化は十分に可能である。高温化はとりまなおさず高効率化につ

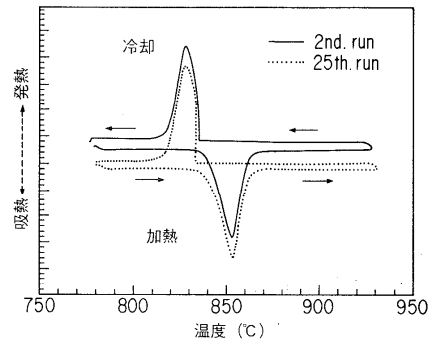


図5 コンポジット材料のDTA曲線

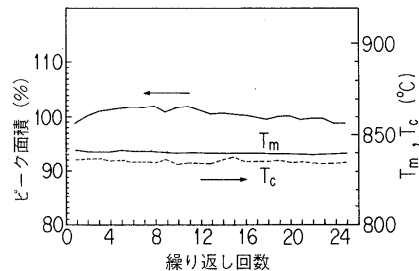


図6 繰り返し溶融・凝固に伴うピーク面積比と T_m 、 T_c の変化

ながるが、技術的にはコレクターの高精度化と共に高温蓄熱材料の開発が課題となる。

目下筆者らが着目している材料は、融解潜熱が大きく $1,263^{\circ}\text{C}$ に融点を持つ MgF_2 である。 MgF_2 についてもこれと SiC とのコンポジット化を試みているが、これまでのところ試験的なコンポジット材料化は成功している。現在は、熱測定による潜熱蓄熱材料としての材料評価に着手している。この $1,200^{\circ}\text{C}$ レベルの蓄熱技術が確立すると、現在我が国で精力的な研究開発が進められている高温ガスタービンと組み合わせた第2世代型SDシステムとして、宇宙エネルギー技術における画期的技術となりえる。 MgF_2 のほか高温潜熱蓄熱材料としては、猛毒ではあるが $^3\text{MgF}_2$ と同様な温度レベルで大きな結晶転移熱と融解熱を有する Be も蓄熱密度の点からは極めて魅力が大きい物質であり、注目に値すると思われる。

5. おわりに

宇宙熱発電への応用を目的としてコンポジット潜熱蓄熱材料に着目し、材料開発に着手し、潜熱蓄熱材料として十分な可能性を有することを実証した。今後は、材料面での検討をさらに進めると共に、より高効率の熱発電システムへの展開を図った材料研究も並行して行っていく。また、エネルギー機器としての技術の確立は、材料開発の段階にとどまっては不可能であり、そのためレーザーの蓄熱システム実験を行う模擬加熱実験ループの建設を現在進めている。89年度後半から宇宙用レーザーの蓄熱システムの実験を開始していく予定である。

宇宙環境利用は人類にとって多くの希望をもたらす可能性を秘めた新たな分野であり、また国際協力のもとにはじめて円滑なプロジェクト遂行が可能となる。宇宙エネルギー技術はややもすると軍事技術に結びつきやすい技術であるだけに、今後、真の平和目的かつ対等な国際協力のもとに宇宙利用を進めていく上で、我が国として確固たるエネルギー技術を確立しておく必要性は極めて高い。一方、宇宙エネルギー技術をはじめとした、民生部門と著しく技術基盤、技術フィロソフィーの異なるエネルギー技術は、我が国の最も苦手とする分野のひとつであり、またエネルギー研究者にはそれを甘受する体質があった。しかし、特殊目的エネルギー技術の開発は技術の裾野を広げ、技術ポテンシャルを高めるばかりでなく、結局は汎用技術としてもフィードバックされていくものであり、精力的な推進を期待したい。

参考文献

- (1) たとえば Proc. SDPS Workshop Part 2, (1984)
- (2) H. Huczera, 37th IAF IAF-86-145, (1986)
- (3) 宇宙開発事業団：熱発電システム技術の研究調査検討報告書, (1987)
- (4) 田中ほか, 電子技術総合研究所彙報 51-7, 469 (1987)
- (5) 阿部ほか, 昭和63-特願37082, (1988)
- (6) 阿部ほか, 昭和63-特願247385, (1988)

1. はじめに

近年、家庭用空調機の需要の伸びは年率10%以上と大きく、中でもヒートポンプ式冷暖房兼用型空調機の伸びは、年率20%近くにも達して目覚ましいものがある。昭和63冷凍年度においては、生産台数は約460万台に、内ヒートポンプ方式は約270万台にも達し、家庭用空調機は一家に一台から一部屋に一台の時代に移行している。こうした状況下において省エネルギー、省資源化、環境対策等における空調機の技術的改良は急速であり、その一環として、空調機に組込まれる熱交換器の高性能化、小型化が著しく進んでいる。これらに関連して、熱交換器に使用されるアルミニウムフィン材についても、薄肉化及び表面処理による機能性の付与等の対応が行われている。

アルミニウムフィン材表面に要求される主な機能は耐食性と親水性である。フィン材は当初、無処理のまま熱交換器に供されていたが、昭和40年代後半に、多くは冷暖房兼用型空調機において、アルミニウムの腐食生成物が白粉となって飛散することが問題化し、防食処理の必要性から、クロメート処理等がフィン材表面に施されるようになった^{1)・2)}。一方、エバポレーターのフィン表面には、冷房運転時に空気中の水分が凝縮して付着する。この凝縮水は通風抵抗の増大を招き、空調機の性能低下の原因となる。そこで、凝縮水を速やかに除去する必要性から、親水性をフィン表面に付与する表面処理の開発が求められていた。昭和54年10月「エネルギーの使用の合理化に関する法律」の施行を契機に、熱交換器の高性能化、小型化を目的としたフィン形状による伝熱促進、フィン間隔の狭小化が進み、並行して親水性表面処理の開発も加速された。現在、親水性樹脂塗膜、シリカ入り有機無機複合塗膜、水ガラス系塗膜およびペーナイト皮膜等が実用に供されている^{3)~6)}。

本報では、プレス成形前にあらかじめアルミニウム条に親水性表面処理剤を塗布するプレコートフィン材について、親水性を中心とした要求される機能と特性、および現在実用に供されている当社フィン材の性能とそれらを用いた熱交換器の通風抵抗等を報告する。

2. 空調機の原理と性能向上

空調機は、主に圧縮機、エバポレーター、コンデンサーおよび膨張弁等より構成されている。図1にヒートポンプ式空調機の冷凍サイクル原理図を示す。熱媒体としてフロンが

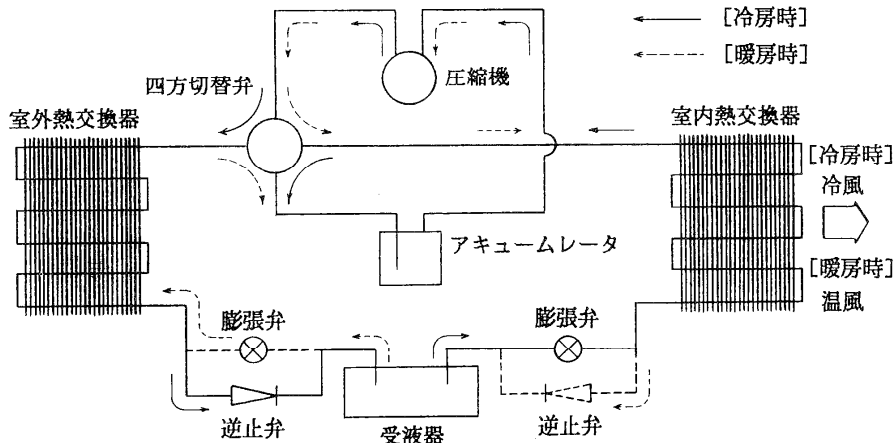


図1 ヒートポンプ式空調機冷凍サイクル原理図 (空気熱源の場合)

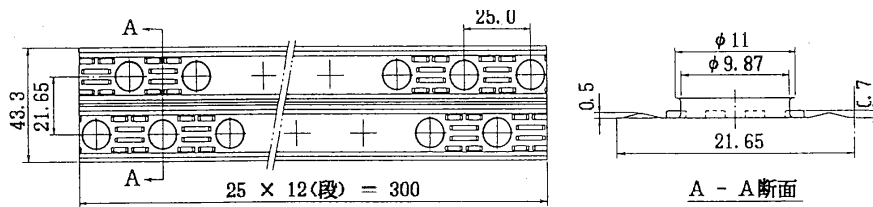


図2 熱交換器用クロスフィン

用いられ、その蒸発/凝縮サイクルによって冷房/暖房がなされる。エバポレーターおよびコンデンサーはクロスフィン型熱交換器と呼ばれる構造のものであり、アルミニウムフィンと銅管から構成されている。クロスフィンの一例を図2に示す。熱交換器の交換熱量 Q は(1)式で表される。

$$Q = K \cdot A_a \cdot \Delta T \quad (1)$$

$$1/K = 1/u_a + 1/u_R (A_a/A_R) + 1/R (A_a/A_P) \quad (2)$$

ここで、 Q : 交換熱量(kcal/hr)

K : 総括熱通過率(kcal/m²・hr・°C)

ΔT : 空気と冷媒間の温度差(°C)

A_a : 空気側伝熱面積(m²)

A_R : 冷媒側伝熱面積(m²)

A_P : 管表面伝熱面積(m²)

u_a : 空気側熱伝達率(kcal/m²・hr・°C)

u_R : 冷媒側熱伝達率(kcal/m²・hr・°C)

R : フィンカラーと銅管間接触抵抗(kcal/m²・hr・°C)

熱交換器の性能向上を図るには(1)式の交換熱量 Q を大きくすればよく、そのためには A_a 、 ΔT 、 K を大きくすればよいことになる。 A_a を大きくするにはフィン表面積を大きくすればよいが小型化とは逆行することになり限界がある。また、 ΔT は使用条件から決まって変えることはできない。最後の K を大きくするには、(2)式から α_a および/または α_R を大きくすればよく、最も実現の可能性が高く、数多くの検討がされて来た。その方策として、前者についてはコルゲートフィン、スリットフィンやルーバーフィン等が考案され、フィン形状は複雑化している⁷⁾。また、後者については内面に浅いたて溝を設けた銅管等が考案され、実用に供されている^{8)・9)}。

また、熱交換器の軽量化、小型化を目的として、アルミニウムフィン材の薄肉化、フィン間隔の狭小化、銅管の細径化、および銅管間隔の縮小化等の技術的改良が平行して進められている^{10)~12)}。

3. アルミニウムフィン材に要求される性能

3.1 親水性

ヒートポンプ式空調機用熱交換器の場合、エバポレーターにおいて、顕熱と潜熱の両方の熱交換をおこなうことになる。アルミニウムフィン表面の温度は空気の露点よりも低下するために、空気中の水分が凝縮し付着する。冷房時の室内機の場合、この凝縮水はフィン表面に半円形に付着、もしくはフィン間に架橋し、空気通路をふさぐために、通風抵抗の増加、騒音の増大、霧の発生、場合によっては水の飛散を招く原因となる^{13)~16)}。また、暖房時の室外機の場合、除霜運転時にフィン表面に残留した融解水は氷塊となり、通風抵抗の増大のみならず除霜時間の増加を招くことになる。最近の熱交換器の高性能化、小型化を目的としたフィン形状の複雑化、フィン間隔の狭小化の動きは、これらの問題を更に顕在化している。フィン間隔が2mmを下回ると凝縮水の影響で湿潤時と乾燥時の通風抵抗比が著しく増加することが知られている⁸⁾。

そこで、フィン表面には、付着した凝縮水を速やかに除去できる性能が求められる。その性能を得る方法は、大別すると、フィン表面に親水性、すなわち水濡れ性を付与し、凝縮水を薄い水膜にして流下させるか、あるいは、フィン表面を極度に撥水性にし、凝縮水の付着を防止する二通りが考えられる。撥水性にする方法はフッ素樹脂およびシリコン樹脂等のコーティングが検討されているが、現時点では期待する効果が得られていない。それ故、フィン表面に親水性を付与する技術開発が必要とされ、大きく進展してきた。現在、親水性処理としては、親水性樹脂塗膜、シリカ入り有機無機複合塗膜、水ガラス系塗膜及びペーナイト系皮膜が実用に供されている。

3.2 耐食性

室内機のアルミニウムフィン表面は、冷房運転時は凝縮水によって湿潤状態にあるが、運転停止時は乾燥状態にあり、乾湿が繰返されることになる。この条件下で、アルミニウムは腐食し、フィン表面にはバイアライトとペーライトからなる腐食生成物層が生成される¹⁾。この皮膜層が乾燥されて剥落し、空気吹き出し口より白粉となって飛散する問題が、昭和48年頃から、特に冷暖房兼用型空調機において顕在化し始めた。その対策として、フィン表面に耐食性を付与することが必要になり、クロメート処理および樹脂コーティング等が施されるようになった。

3.3 プレコートフィン材に必要な特性

アルミニウムフィンに親水性と耐食性を付与するには、空調機メーカーで熱交換器を成形組立後に表面処理剤に浸漬処理するポストコート方式と、圧延メーカーであらかじめアルミニウム条に表面処理剤を塗布したプレコートフィン材を用いて熱交換器を成形組立するプレコート方式がある。プレコート方式は、薄く均一な塗膜が得られ、しかも、空調機メーカーで、表面処理設備を必要としないことより、その比率が高まりつつある。

プレコート方式による熱交換器製造プロセスの概略を図3に示した。プレコートフィン材はプレス油塗布、プレス成形、組立、溶剤脱脂、ロー付け等の多くの工程を通るので、親水性、耐食性等の機能のほかに、ポストコート方式とは異なる多くの特性を有することが要求される。主な特性は、プレス油により親水性が低下しないこと、プレス成形によるフィン材の破断が無く、塗膜の剥離も無いこと、金型工具を摩耗させないこと、トリクレン等の溶剤による溶出が少ないことおよび銅管ロー付け時の熱により黄変しないこと等であるが、現在開発されているプレコートフィン材は、各々一長一短があり、これらの特性を全て満足するものは無い。

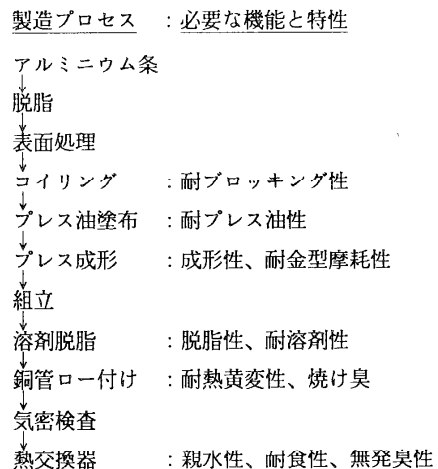


図3 熱交換器製造プロセスとプレコートフィン材に必要な機能と特性

4. プレコート親水性表面処理フィン材

4.1 種類と特徴

当社の開発したプレコート親水性表面処理フィン材の種類と特徴を表1に、その性能を表2にまとめた。

表 1 親水性表面処理フィン材の種類と特徴

処理名	種類	塗膜成分	特 徴
CC535	シリカ	親水性樹脂+シリカ +界面活性剤 (クロメート 下地処理)	シリカを含有する。優れた親水性と耐トリクレン性を有し、ドロー方式、しごき方式フィンに使用されている。金型工具材質として超硬合金が必要である。
CC503	水ガラス	水ガラス +親水性樹脂 (クロメート 下地処理)	優れた親水持続性を有し、トリクレン洗浄による重量変化・ロー付時の加熱による変色もない。塗膜は極めて薄く、しごき方式フィンにも使用可能であるが金型工具材質として超硬合金が必要である。
CC343	ノンシリカ	親水性樹脂 +界面活性剤 (クロメート 下地処理)	ノンシリカタイプ。親水持続性・金型摩耗性・耐トリクレン性・耐食性に優れ、しごき方式およびドロー方式フィンに使用されている。

表 2 親水性表面処理フィン材の性能

項目		処理名	CC535	CC503	CC343
親水性	初期水濡性 ¹⁾	塗装のまま	5	5	5
		洗浄後 ²⁾	4	5	5
	水濡持続性 ³⁾	100回	4	4	4
		300回	4	4	4
		500回	4	4	4
		1000回	4	4	4
	1500回	4	4	4	
耐食性	塩水噴霧試験 (結果：R. No.)	300h	>9.8	>9.8	9.8
		500h	>9.8	9.8	9.8
プレス 成形性	連続成形性	ドロー方式	◎	◎	◎
		しごき方式	◎	○	◎
	金型摩耗性	ドロー方式	○	○	◎
		しごき方式	○超硬	○超硬	◎
耐溶剤性	浸漬重量減	85°C×5min.	2%	0%	5%
耐熱性	外 観	300°C×5min.	○△	◎	○
		400°C×5min.	×	◎	○△
発臭性	運転時の臭い	冷房運転	◎	○△	◎

注) 1)水濡れ性の試験方法 恒温恒湿室において、所定の温度に保たれた厚板にサンプルを密着させ、結露水の濡れ具合をかきつする。

評価点 5：全面均一濡れ、4：全面濡れるが僅かに凹凸あり、3：全面濡れるが凹凸状、2：部分的に水寄りあり、1：水寄りが大きい

2)洗浄後 プレス油に48h 浸漬、トリクレン洗浄後

3)水濡持続性サイクル 純水中浸漬 2min.、冷風乾燥 6min.を1サイクルする。

評価 ◎：非常に良好、○：良好、△：やや不良、×：不良

当初、白粉対策として耐食性を付与する観点から、クロメート処理のフィン材が開発され、次いで、昭和50年から熱可塑性樹脂塗料を塗布したフィン材が開発され、実用化されたが、これらはいずれも撥水性であった。

昭和54年10月「エネルギーの使用の合理化に関する法律」施工を契機に、親水性が重要視されるようになり、シリカを含有する有機・無機複合体塗料（シリカタイプ）、水ガラス系表面処理剤、および、親水性樹脂塗料（ノンシリカタイプ）を塗布したプレコートフィン材が順次開発された。表1のフィン材は現在実用に供されている代表的なものである。

CC535 は、最も優れた耐食性とプレス油に左右されない安定した連続成形性を有している。一方、親水性向上のためにシリカ含有量が増加されており、金型摩耗性から超硬工具を必要とする。また、有機樹脂を含むために Uベンド管ロー付け時の熱により熱交換器端部のフィン表面は黄変する。CC503 は、最も優れた親水性を発揮する。ロー付け時の黄変は無い。塗膜成分の多くが無機質であるために金型工具として超硬合金を必要とする。また、水ガラスは、一般に空気中のホルムアルデヒド等の極性のある有機化合物のガスを吸着し易く、このガス成分は冷房運転の初期にフィン表面より脱着し異臭を感じさせることがある¹⁷⁾。このため、水ガラス処理フィン は室外機に適用される場合が多い。CC343 は、金型摩耗対策として親水性樹脂塗料のみを塗布したフィン材であり、最近実用化された。

ロー付け時に僅か黄変することを除けば、良好な親水性と耐食性を示し、また、冷房運転時の臭いの問題も無いプレコートフィン材である。

4.2 親水性

親水性の評価は、塗膜上に滴下した水滴の接触角(図4)を測定することにより行った。プレコートフィン材から幅50mm×長さ100mmの試片を採取し、プレス油に48h浸漬、トリクレン洗浄後、2min純水浸漬、6min冷風乾燥を1サイク

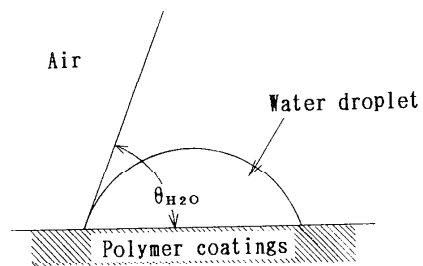


図4 塗膜上の水の接触角

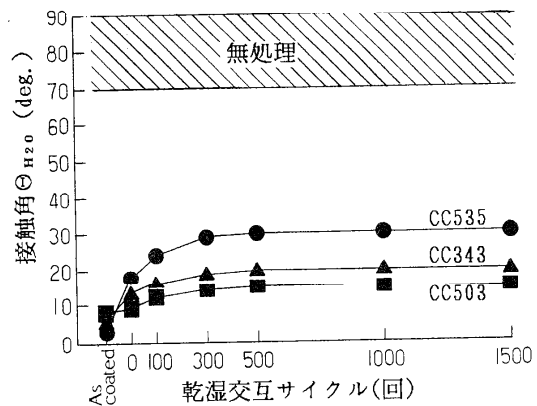


図5 乾湿交互サイクル試験による親水性の変化

ルとして、100回から1500回まで乾湿交互サイクル試験に供し、その接触角を測定した結果を図5に示す。プレコートフィン材の接触角は、無処理よりはるかに低い値である。サイクル試験による変化は比較的小さく、親水性は良好である。CC503が最も低い接触角を示し、次いでCC343、CC535の順である。親水性の変化には、空気中の汚染物質の付着、界面活性剤の流出等種々の因子が考えられるが、カルボキシル基を含む樹脂の場合、そのイオン交換性が親水性を変化させることが確認されている¹⁸⁾。

4.3 通風抵抗および伝熱性能

通風抵抗および伝熱性能の試験は、図6に示す試験装置により、表3の試験条件に基づいて行った。通風抵抗の評価は、冷房運転（湿り状態）時および暖房運転（乾き状態）時の前面風速Vaが1.0m/sにおける湿り通風抵抗 ΔP_w および乾き通風抵抗 ΔP_d を測定し、両者の比 $\Delta P_w/\Delta P_d$ （乾湿通風抵抗比）

を求めることにより行った。また、伝熱性能の評価は、(1)式より熱通過率Kを求めることにより行った。通風抵抗の試験は $\Delta P_w/\Delta P_d$ 、すなわち、 ΔP_w の値が一定となるまで繰り返した。無処理材、CC535、およびCC343についてはフィンピッチ(Fp)が1.8mmの熱交換器を使用

表3 乾湿通風抵抗試験条件*

状態	乾球温度	湿球温度	通水条件	時間
湿り	27.0℃	19.5℃	5℃×9l/min.	6h
乾き	21.0℃	15.5℃	50℃×9l/min.	2h

*：湿り(6時間)～乾き(2時間)～放置(16時間)を1サイクルとした(1Cycle/day)。

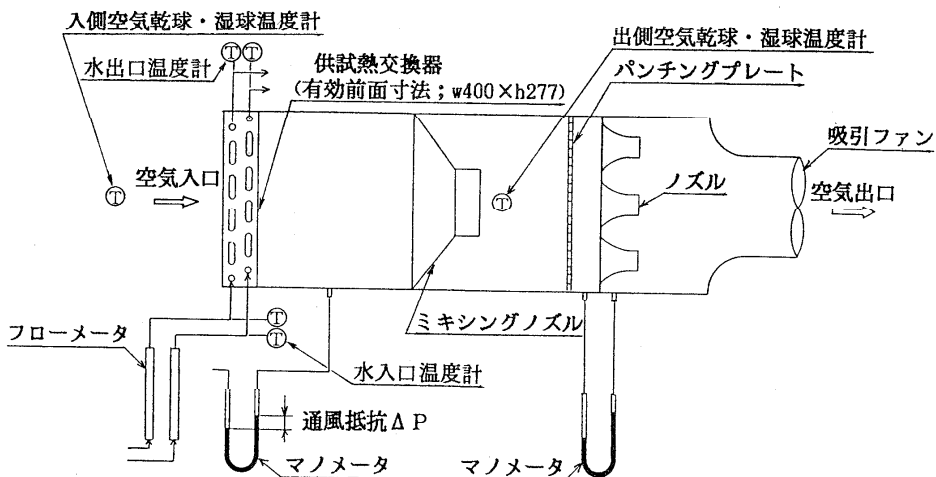


図6 通風抵抗試験装置 (恒温室内)

した。また、CC503 については前述のように高い親水性を有するので、コンパクト化 (Fpの狭小化) を狙ってFpが1.4mmの熱交換器を使用した。試験結果を図7および図8-1, 2 に示す。プレコートフィン材の乾湿通風抵抗比は、親水性と同様にサイクル数による変化は小さく、10回以降では安定した値となった。その安定値は、無処理材に比較してはるかに小さく、親水性が良好であることを示している。特に、CC503 については、Fpが他のプレコートフィン材の場合より小さいにもかかわらず、最も低い乾湿通風抵抗比を示しており、今後の熱交換器の小型化、高性能化に十分対応できるものと期待される。空調機において、ファン動力が一定とすれば、冷房運転時における風量 (前面風速) は、フィン表面に付着した凝縮水のために、暖房運転時よりも低下し、その低下量は通風抵抗の値によって左右される。そこで、無処理材およびプレコートフィン材のそれぞれにおいて、乾き運転時の前面風速が1.0m/sの場合について、 ΔP_w が ΔP_d と同じ値となる湿り運転時の前面風速を図8-1, 2 より求めた。また、その風速における熱通過率も同図より求め、それらの結果を表4 に示した。無処理材の場合、前面風速は0.6m/sと著しく低下しており、そのときの熱通過率は、前面風速が1.0m/sの時より17%低下している。一方、プレコートフィン材の場合は、前面風速は0.83~0.91m/sと低下は少なく、熱通過率の低下割合も前面風速が1.0m/sの時より 6~3%と非常に小さい値であり、フィン表面に付着した凝縮水を速やかに除去する親水性表面処理の効果が認められた。

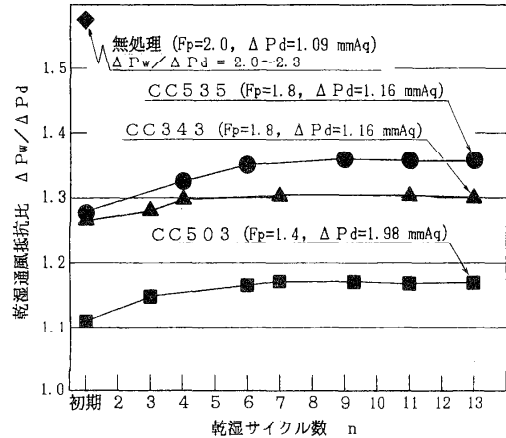


図7 乾湿通風抵抗比

表4 伝熱性能

表面処理	有効伝熱面積 (m ²)	乾き運転時		湿り運転時			
		Va=1m/s	Va=1m/s	ΔPw = ΔPd 時			
				初期		ΔPw 安定時	
				熱通過率 K (kcal/m ² h ² °C)	熱通過率 K (kcal/m ² h ² °C)	前面風速 Va (m/s)	熱通過率 K (kcal/m ² h ² °C)
無処理	4.4	46.0	62.7 (100)	0.60	52.0 (83)	—	—
CC535	4.9	46.0	63.0 (100)	0.86	59.9 (95)	0.83	59.1 (94)
CC343	4.9	45.9	61.4 (100)	0.86	58.4 (95)	0.83	57.8 (94)
CC503	6.2	42.1	55.7 (100)	0.91	55.7 (97)	0.88	53.0 (95)

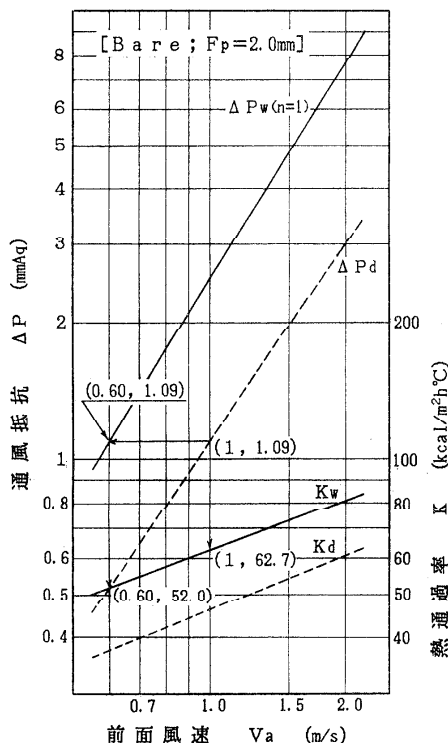


図8-1 前面風速と通風抵抗及び熱通過率
(無処理; $F_p=2.0\text{mm}$)

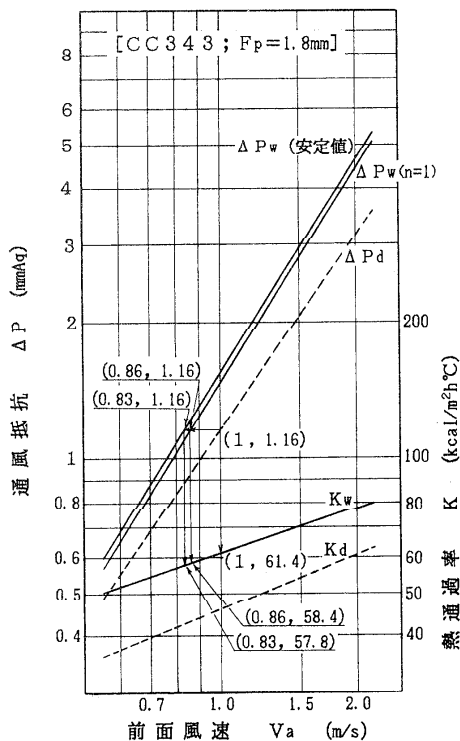


図8-2 前面風速と通風抵抗及び熱通過率
(CC343; $F_p=1.8\text{mm}$)

5. まとめ

空調機用熱交換器に使用されるプレコートフィン材に必要な機能と特性、および、実用に供されている代表的なフィン材の性能を述べた。親水性と耐食性は、市場の要求を満足している。プレコートフィン材のみに求められる耐熱黄変性、金型摩耗性等の特性については対応できたものもある。また、最近フロン規制、およびトリクロロエチレンの発癌性等の公害面から洗浄不要な揮発性プレス油の開発が急速に進展しており、対応するプレコートフィン材の開発も重要な課題となっている。

6. 参考文献

- 1) 鈴木敏夫：住友軽金属技報，Vol.17，No.1，No.2（1976），88
- 2) 斉藤莞爾，土田信，関谷仁司，前田利徳：住友軽金属技報，Vol.23，No.1，No.2（1982），42

- 3) 野世溪精, 前田利徳, 竹島義雄, 知念武廣, 西野正男, 森山勉: 住友軽金属技報, Vol. 28, No. 2 (1982), 101
- 4) M. Mimaki: ASHRAE TRANSACTIONS, V. 93, Pt. 1. (1987)
- 5) 三世沢良明: 実務表面技術, Vol. 34, No. 6 (1987), 199
- 6) 岩間哲治, 勝又堅, 三田村康二, 竹内庸: 軽金属学会第57回秋期大会講演概要 (1983), 111
- 7) 例えば, 辻弘美, 皆川貞利: 軽金属学会金属成形部会第4回セミナー(1986), 84
- 8) 酒井国武, 轟恒彦: 化学工学, Vol. 50, No. 5 (1986), 290
- 9) 目時實, 西本嘉弘, 橋本博實, 宮田勝夫, 野世溪精 若松千代治: 住友軽金属技報, Vol. 27, No. 1 (1986), 28
- 10) S. Oshima, H. Nakata and T. Onishi: HF-HR Commission E2, Lyngby, Denmark(1983)
- 11) 松井満, 中田春男, 大嶋進: 第21回空気調和・冷凍連合講演会講演論文集, (1987), 49
- 12) 田中博由, 青山繁男, 小間八郎, 安立正明: 日本冷凍協会論文集, Vol. 5, No. 3 (1988), 75
- 13) 鳥越邦和, 川端克宏, 中田春男, 山本博康: 冷凍, Vol. 63, No. 734 (1988), 1369
- 14) 桑原永治, 山崎雅也, 河村敏明: 日本冷凍協会論文集, Vol. 2, No. 3 (1985), 203
- 15) 山口善吉, 桑原永治, 星隆夫: 第19回空気調和・冷凍連合講演会論文集, (1985), 49
- 16) 山崎起助, 丸山和弘, 加峯茂行, 湯山 : 冷凍, Vol. 56, No. 648 (1981), 823
- 17) 長谷川義文, 今井正也, 西野正男: 住友軽金属技報, Vol. 28, No. 2, (1987), 62
- 18) 清谷明弘, 今井正也, 春日司: 住友軽金属技報, Vol. 30, No. 1, (1989), 31

1. はじめに

鉄鋼製造プロセスは、図-1に示すごとく昇降温の繰り返しであり、伝熱技術の果たすべき役割は多いといえる。最近では、品質的にもコスト的にも厳しくなったユーザーニーズに対応して、各製造工程では、品質管理体制を強めている。この中で、コスト削減を図るために、インラインでの品質・材質作りこみ技術を極限まで高めることが必要となっている。この品質・材質作りこみ技術を熱的な観点からみると、従来の省エネルギー中心の考え方が影をひそめ、材料温度のより厳しい管理へと技術的な視点が大きく変化したと捉えることができる。

すなわち、各製造工程では、品質の均一化・安定化のために材料温度の均一化が、さらに材質の作りこみのためには、材料温度履歴の制御が強く求められている。

本稿では、鉄鋼製造プロセス（特に製鋼工程から圧延工程）における新しい加熱技術の開発状況を述べる。なお、冷却技術の概要については高島、三塚の報告^{1)・2)}を参照されたい。

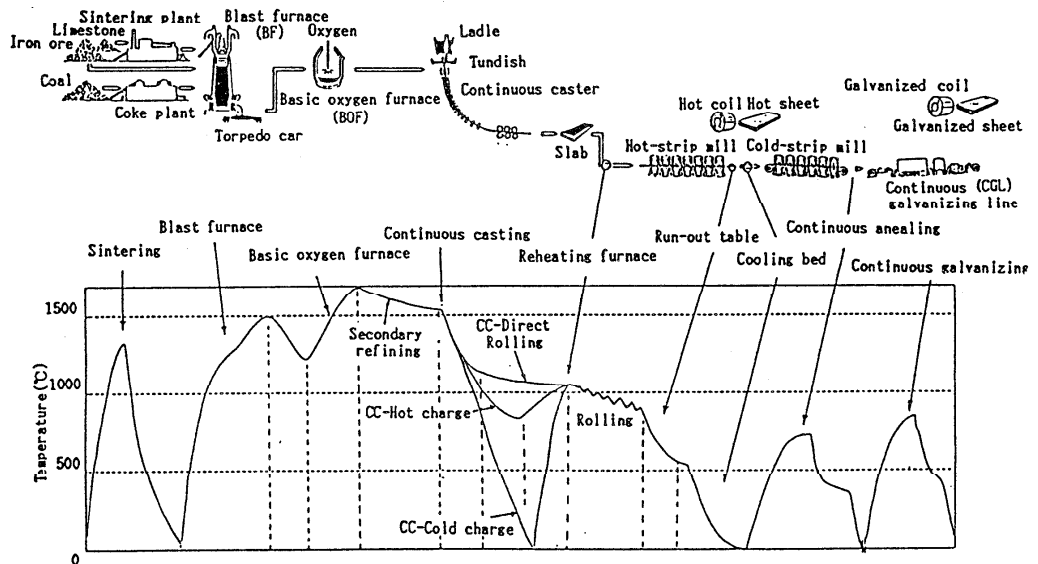


図-1 鉄鋼製造プロセスの材料温度推移例

2. 溶鋼の加熱技術

2.1 溶鋼加熱技術の概要

製鋼工程では、鋼材に対する品質要求の高度化にともない、溶鋼を清浄化する二次精錬の適用比率が増加している。このため、転炉での出鋼温度が高くなり転炉耐火物の溶損量が大きくなるという問題がある。また連続铸造においては、鑄片の品質安定化のために溶鋼温度を铸造中一定に保つことも重要である。これらの課題を解決するためには、転炉から連続铸造の間で溶鋼に熱を与える加熱技術の必要となるが、最近プラズマや誘導加熱を用いたタンディッシュでの溶鋼加熱技術の開発が進んだ。いずれの方法も電力を熱源として使い、①クリーンな雰囲気での加熱、②高温溶鋼に対して効率的な加熱、③制御特性に優れた加熱、を実現している。

2.2 プラズマを用いた溶鋼加熱技術^{3), 4)}

プラズマを用いた溶鋼加熱技術はタンディッシュや取鍋で実用化されている。図-2に、タンディッシュにおける溶鋼のプラズマ加熱装置の概要を示す。タンディッシュは、連続铸造における溶鋼保持装置であり、取鍋から溶鋼を受け鑄型に注入する機能を持っているが、ここに加熱室とプラズマトーチを設け移行型プラズマアークで溶鋼を加熱している。図-3に、その加熱形態を示しているが、プラズマアークから溶鋼への伝熱ルートは次の三通りと考えられている。

- ①プラズマアークと溶鋼の接点における電気抵抗発熱による伝熱
- ②プラズマアークから溶鋼表面への輻射による伝熱
- ③プラズマアークにより加熱された加熱室内壁面から溶鋼表面への輻射による伝熱

実績データからの解析では、各々の溶鋼加熱への寄与比率は、おおよそ 2 : 1 : 4 となり、第三のルートの影響が大きいことが認められている。したがって、効率的な加熱を行なうためには、加熱室の容量・断熱設計に留意しなければならない。

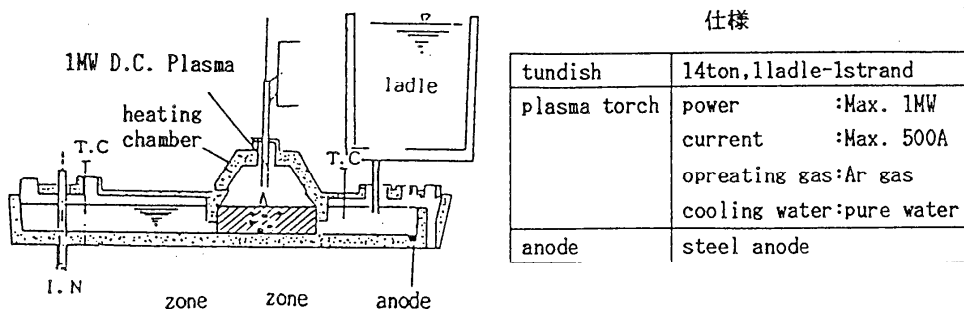


図-2 タンディッシュ溶鋼プラズマ加熱装置概要

さて、プラズマ加熱による熱効率（投入電力エネルギー量と溶鋼への伝熱エネルギー量の比）は、最大80%が得られ、タンディッシュ内溶鋼温度も図-4に示すごとく、その変動が著しく改善されている。

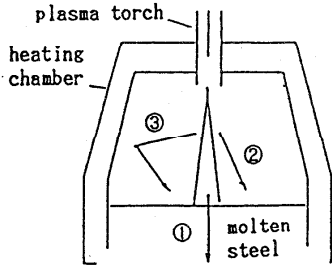


図-3 プラズマ加熱のメカニズム

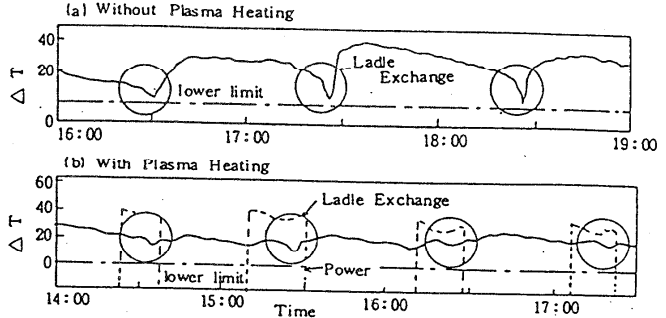


図-4 タンディッシュ内溶鋼温度履歴

2.3 誘導加熱を用いた溶鋼加熱技術^{5), 6), 7)}

タンディッシュにおける溶鋼加熱技術はプラズマの他、誘導加熱による方法がある。図-5に誘導加熱式溶鋼加熱設備の概要を示す。誘導加熱の設備構成は、タンディッシュ内を貫通した鉄心と鉄心に巻かれた一次コイル、鉄心を溶鋼が一回りするようにあけられた湯溝からなり、溶鋼が二次側のコイルの役割をする変圧器の構造をしている。加熱原理は、溶鋼内に誘起された誘導電流によるジュール発熱に依っており、加熱効率も90%と高い。

この誘導加熱方式で注意すべきことは、加熱後の溶鋼温度測定の前代表点の決め方で、湯溝の吐出孔近傍では溶鋼の混合が完全ではなく、温度測定精度も悪いことが溶鋼流れシミュレーションと溶鋼温度の実測結果から明らかになった。したがって、溶鋼温度の測定は湯溝の出口からある程度離れた所で行なう必要がある。(図-6参照)

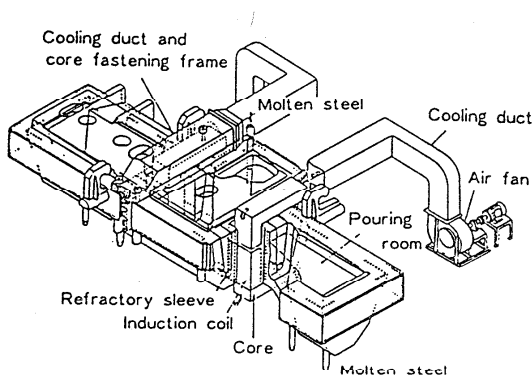


図-5 タンディッシュ溶鋼誘導加熱装置概要

仕様

capacity	100KW
control sytem	tap changer
accuracy of temperature control	±2.5℃
cooling of coil	air cooling
pinching check	transformer secondary current detector
molten steel	grond
leak check	detector

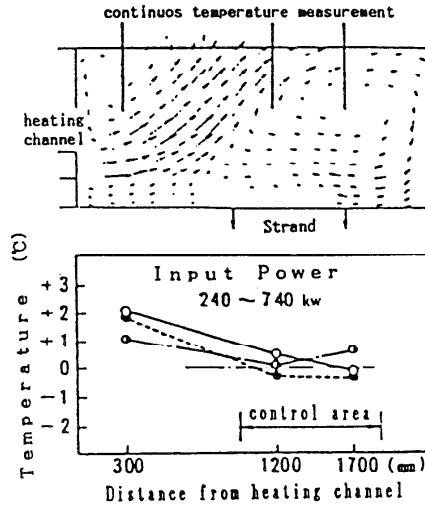


図-6 加熱槽の温度分布

3. 連続鋳造から熱間圧延プロセス間での鋳片加熱技術

3.1 直送圧延における高温鋳片製造技術⁸⁾

最近、図-7に示す連続鋳造と熱間圧延工程を直結する直送圧延が行なわれるようになったが、ここでも新しい加熱技術の試みがなされている。

直送圧延とは、連続鋳造で製造された鋳片を直ちに熱間圧延工程に送り圧延するプロセスであるが、このプロセス実現のためには、いかにして高温鋳片を得るかが重要な技術課題であり、具体的には①連続鋳造機内での緩冷却、②搬送ラインでの保温強化、③圧延前での鋳片端部への熱補償技術の開発がなされた。

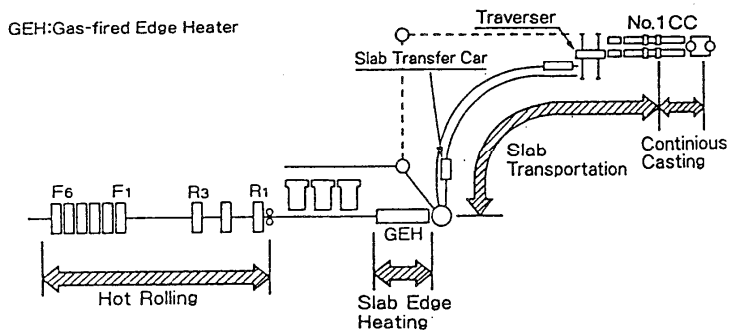


図-7 直送圧延プロセスのレイアウト例

ここでは、連続鋳造機の切断装置前後のルミナスウォールバーナーを用いた鋳片加熱装置と鋳片端部加熱装置の開発例を述べる。

3.2 鋳片加熱装置⁹⁾

連続鋳造機と圧延機が離れていると、搬送ラインでの滞在時間が長くなり、保温カバーだけでは十分な鋳片の温度保持が出来ない。そこで、保温性能を強化した鋳片加熱装置が

必要となる。図-8にルミナスウォールバーナーを用いた鋳片加熱装置の概要を示すが、バーナーを保温装置の側面に設置することで、①1200℃程度の高輝面による鋳片端部の局部加熱と、②鋳片全体の保温性能向上を実現している。この保温性能の評価を、鋳片表面～大気間の貫流伝熱係数で示すと、ルミナスウォール部は20～30Kcal/mh℃であり、通常保温カバー部の70～90Kcal/mh℃と比べると、大巾に保温性に優れた装置といえる。

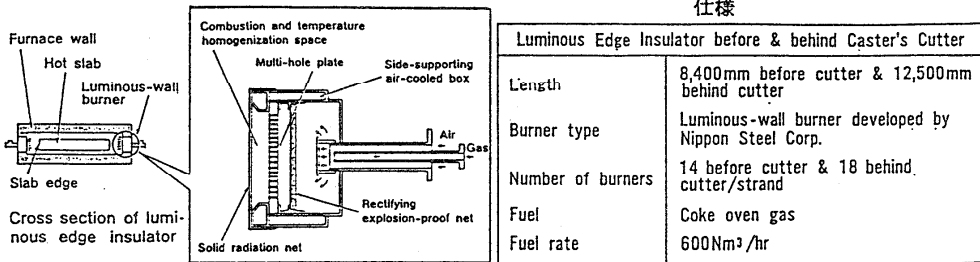
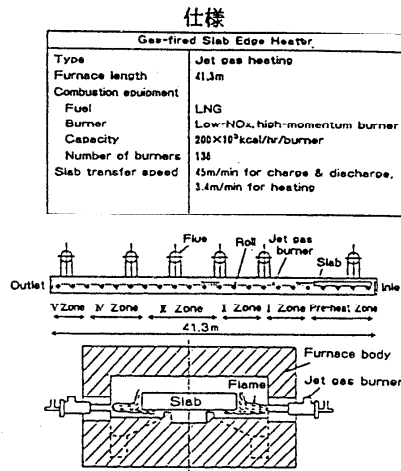
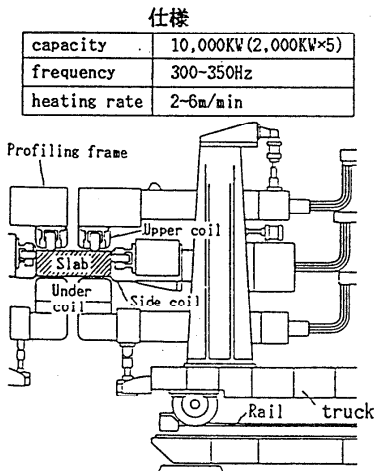


図-8 ルミナスウォールバーナーの設備概要

3.3 鋳片端部加熱装置^{8), 10), 11)}

前に述べた鋳片加熱装置を搬送ライン全体に設置することは、熱効率的にみると非効率であり、局部的にしか採用されていない。したがって、放熱面積の大きい端部を、圧延機の前で急速に加熱し熱補償する装置が必要で、図-9のような局部誘導加熱方式や、図-10のガス加熱方式が開発されている。局部誘導加熱方式は、鋳片端面の周囲にコイルを配置し鋳片端部に発生する誘導電流のジュール熱で端部を局部的に加熱する構造で、コイルコア形状の適正化、結線方式の改善等により入熱効率は48%を達成している。その加熱効果を図-11に示すが、鋳片端部で約120℃の昇温が認められる。



また、ガス加熱方式は、噴流火炎を鑄片端面の下部に衝突させることで、鑄片端部の急速加熱が可能で、その伝熱量は $15\sim 20 \times 10^4 \text{ kcal/m}^2\text{h}$ に達している。

上記のルミナスウォールバーナー方式の鑄片加熱装置と噴流ガス加熱方式の鑄片端部加熱装置を設置した場合の鑄片温度推移例を図-12に示すが、直送圧延に必要な鑄片の温度確保、すなわち圧延終了時の鋼板温度が A_r3 点を満足していることがわかる。

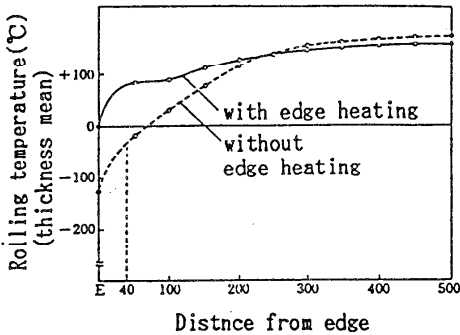


図-11 端部温度改善効果

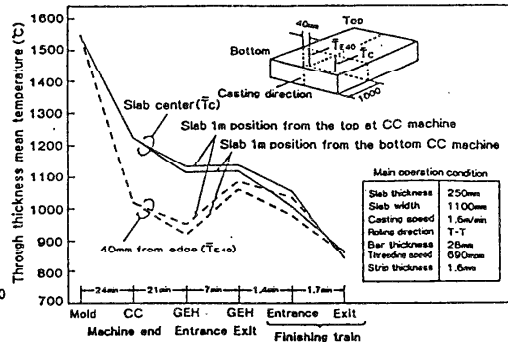


図-12 鑄片温度推移例

4. おわりに

鉄鋼製造プロセス開発のうち製鋼工程から熱間圧延までの加熱技術的を絞って述べたが、今後鉄鋼製造プロセスにおける加熱技術は、材料の品質安定化のため均一加熱、材料の偏熱防止のための局部加熱、また設備のコンパクト化のための急速加熱に向けての研究開発がさらに続けられものと思う。

参考文献

- 1) 高島 : 伝熱研究、27(1988)104,p116
- 2) 三塚 : 第22回夏期伝熱セミナー、(1988)、p93
- 3) 平岡ら : 鉄と鋼、73(1987)、S690
- 4) 桑原ら : 鉄と鋼、73(1987)、S691
- 5) 高島ら : 鉄と鋼、73(1987)、S252
- 6) 二川ら : 鉄と鋼、73(1987)、S928
- 7) 矢崎ら : 鉄と鋼、73(1987)、S929
- 8) 今井ら : 材料とプロセス、1(1988)、1240
- 9) 龍川ら : 日本鉄鋼協会、1989春季発表予定
- 10) 今井ら : 材料とプロセス、1(1988)、1242
- 11) 杉田ら : 製鉄研究、313(1984)、p28

バブコック日立(株) 呉研究所 秋山 巖
金田 博志

1. はじめに

火力発電プラントにおける伝熱研究は、1960年代においては原子力関係の技術確立と関連して、蒸気・水側における現象の解明にあったように思われる。すなわち、沸騰伝熱および二相流の不安定性、超臨界圧近傍におけるバーニアウト現象の解明とこれを回避するための特殊伝熱管の開発などであった。1960年代後半からは、いわゆる公害問題が発生するようになり環境機器の開発が盛んになったが、これに対してボイラ本体側では従来の高効率燃焼指向一辺倒であった燃焼研究に、低公害燃焼の課題が加味されるようになってきた。すなわち、燃料の持っている熱量を徹底的に開放し高温の燃焼ガスを得るべく、理論的に必要とされる最小限の空気量と出来る限り十分に混合させ未燃分を低くしようとしてきたのに対し、サーマルNO_xを低下させるために、温度が高くならないように緩慢な混合によって燃焼をゆっくりさせようとする方向に変換してきたのである。かくして、出来る限り狭い空間で高温燃焼させようとする方向と広い空間で低温燃焼させようとする相反する方向の燃焼技術のバランスを取らなければならなくなってきた。燃焼現象が、燃料と酸化剤と熱供給の三つから成り立っていることを考えれば、燃焼技術開発にあって伝熱現象の寄与が大きいことは誰も否定出来ないであろうが、従来の燃焼研究においては実験による技術開発が先行し、伝熱機構の面からの理論的検討が十分になされていないように思われる。このような状況になってくると燃焼領域形成を伝熱機構の面から見直し、好ましい燃焼反応域を設計出来るようにすることが重要な課題となってきたのである。本報では、燃焼器開発に当たって考慮すべき伝熱関係の課題の一部を概説し、その後一例として旋回流による保炎機構について考察した結果を示すことにする。

2. 燃焼器開発上の伝熱に関する課題

2. 1. 点火機構

燃料に点火するにはヒータあるいは点火プラグなどで熱を供給して、燃料と空気の存在する場所を着火点以上の温度にしなければならない。例えばポットバーナなどにおいては、液体あるいは固形の燃料をヒータで加熱蒸発させ空気との混合気を生成させ、これに着火エネルギーを供給することになる。この場合には、燃料は最初ヒータからの放射によって熱が供給され、溶融、蒸発などにエネルギーが消費され、次いで主に伝導によって着火エネルギーが供給されるものと思われる。着火に至る判定基準として着火エネルギーで考えるべきか、着火温度で考

えるべきかの議論もあるようであるが、この問題はさておき、この可燃混合気への有効エネルギー伝達形態は、この熱量供給系廻りの物理的構成によって大きく影響され、点火ヒータの容量決定に対する重要な因子となる。ここで支配している現象はほとんどが伝熱問題として取り扱われるべきである。

2. 2. 保炎機構

点火によって燃料蒸気に火炎が形成されると、これに後続して供給される新しい燃料蒸気に熱がフィードバックされ更に大きな火炎に成長するか、あるいは熱のフィードバックが不十分であったり、後続の燃料蒸気の供給が不十分だったりして火炎が小さくなり消滅してしまうかが問題である。定常的に火炎を形成させるには保炎機構が必要になるが、これは換言すれば熱のフィードバック機構をうまく構成してやることになる。この手法としては通常対流伝熱が利用される。ブンゼンバーナのごとき小容量バーナでは、バーナリムの後流に循環流を形成させ熱のフィードバックを計る。大型ボイラに使用されているような大容量バーナでは、燃料と空気の流れの中に保炎器と称する障害物を置き上述のリム後流のものと類似の循環流を形成させたり、旋回噴流を用いて噴流中に再循環流を形成させたりする。

なお、最近燃焼効率がよく、放射熱の有効利用の面から着目されている接触燃焼バーナにおいては、燃焼場に設置されている固体が放射熱伝達にも寄与しているが、その熱伝導によって保炎用の熱がフィードバックされているようである。

再循環流を用いる熱のフィードバックでは、層流燃焼においては流線に沿った流体の循環そのものが重要であるが、乱流燃焼においては再循環流中の乱流混合による熱の移動が重要になる。この問題に対しては、乱流混合層における物質移動、熱移動が定量的に評価されなければならず現状ではバーナ設計上、最も未知の伝熱問題とすることができる。

再循環流形成に及ぼすいくつかの因子について述べてみる。産業用ボイラなどで最もよくみられる円筒炉の一端にバーナが一本設置されている場合を例に取ると、再循環流は、バーナ出口の炉の中心軸上に存在するものと炉壁側に存在するものがある。通常は、前者を熱のフィードバック機構に用いるが、後者を用いている場合もある。この循環流は、バーナ径と炉径との比によってその大きさ、長さなどが変化する。1次空気と2次空気を分割して供給するような場合には、それぞれの口径比によっても影響される。もちろん、スワール数によっても変化し、スロート部の形状、旋回器の形式、燃料の持ち込む運動量などにも影響される。再循環領域がバーナ出口の適正な位置に形成されないと NO_x 、未燃分の抑制がうまく行かないだけでなく種々のトラブルが発生する。再循環流が、バーナスロートの内側まで戻ってくれば、燃料噴射ノズルや保炎器を燃損させるし、バーナよりあまりにも離れたところに形成されれば火炎は不安定になり、場合によっては失火することにもなる。現在の燃焼器開発に当たっては、未燃分、 NO_x を下げるのが重要な課題になっているが、これを達成するには、燃焼領域を何段階かに分け、それぞれの段階でどのような反応を分担させるようにするかを考える。未燃分低減には燃料と空気の混合を良くし、高温域で燃焼させることが必要である。また、ここで、燃料中

N分を気化させ何らかのN化合物にしておくことが、次段階でのNO_x還元にも有利であると考
えられている。しかし、高温域の形成は燃料と空気が量論比に近い比率で混合している領域で
なされ、この領域に対して燃料および空気は流入し、燃焼生成物が流出するという関係になっ
ている。したがって、保炎域の形成には燃料および空気の流れに対して後流側に存在する高温
域からの熱を上流側に戻すことが必要であり、NO_x抑制の面からは、高温域から流出してくる
反応生成物に対して、再度、燃料あるいは空気との混合をさせようとするので互いに矛盾した
要素を含んでいることになる。また、炉壁での熱吸収分布はできるだけ均一になるようなもの
が望ましいので高温域の局部集中化は避けたい。このような相容れない要素を再循環流形成に
よってうまく組合わせ、実用上望ましい性能を引き出すことがバーナ開発上の要点である。

2. 3. 火炉熱吸収分布

燃料を燃焼させる主な目的は、その保有している熱量を開放し、これを利用するためである。
例えば、火力発電プラントにおいては、ボイラ部で熱サイクル作動流体である水（または蒸気）
にその熱を供給することである。したがって、ボイラ火炉内においては、前述の如くにして形
成させた火炎から炉壁で熱を吸収させることになるが、この伝熱形態は放射伝達が支配的であ
る。この伝熱解析については、近年は、電子計算機を用いて実用上十分なものがなされるよう
になっており、今後はその精度を向上させながら使い易いものに改良していくことが課題であ
る。

2. 4. その他（トラブル対策）

以上説明してきた伝熱問題は、バーナ構成上どうしても必要な課題であるが、その他にも望
ましくない伝熱現象が発生することがある。以下、バーナ開発上考慮しておかねばならない、
歓迎せざる伝熱現象の例を幾つか挙げておく。

先に、保炎機構の項でも少し述べたが、再循環流域がバーナスロット内に近くなってくると、
燃料噴射ノズルや保炎器が焼損するので温度を監視して
おき、このような現象の起こらない範囲を選定しておか
ねばならない。また、二段燃焼を採用している火炉では、
二段燃焼用空気の投入口が炉内の火炎からの放射加熱に
よって焼損することが心配されるので、ある程度の冷却
用空気を流しておかねばならない。これも、空気供給口
の構造を工夫するとともに温度監視をして、これを回避
する条件を把握しておかねばならない。

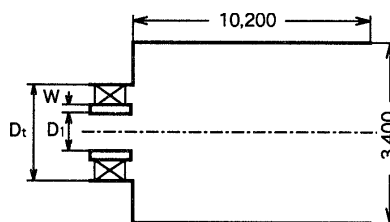


図1 バーナおよび炉の構造

表1 バーナの寸法

項目	寸法 (mm)
D ₁	700
W	225 ~ 900
D _t	965 ~ 1,530

3. 旋回流による保炎性制御について

3. 1. バーナ構造および運転条件

円筒炉の端に一本のバーナが設置されているものを検
討対象に選ぶ。構造および寸法をそれぞれ図1と表1に

示す。バーナは二重管構造とし1次空気と微粉炭粒子（以下微粉炭流）が中心部より供給され、燃焼用空気（以下2次空気）が環状に旋回を与えられて供給される。微粉炭流流路の径（ D_1 ）および1次、2次の空気量と供給微粉炭量は一定にしておき、微粉炭流流路と2次空気流路の間すなわち保炎リングの間隔（以下保炎器幅、 W ）を変化させ、そのとき形成される逆流域の変化ひいては微粉炭粒子の流跡線（以下粒子軌跡）の変化について考察する。また、 $W/W_0 = 2$ （ W_0 ：基準保炎器幅 = 225 mm）の条件においては、スワール数（ S_w ）を0.4～0.8と変化させ逆流域、粒子軌跡への影響を調べた。

スロート径（ D_t ）に対する炉径（ D_f ）の比は、2.2～3.5の間で変化している。この比も逆流域形成に影響することは別途説明済みであるが、本報における例では、この効果も加味されたものとなっている。

1次空気は温度95℃、流速は12.5m/sで、燃料の無煙炭は6t/h供給し、流速は1次空気と同じとした。微粉炭粒子の直径は20、50、および80 μ mで代表させ、3個所から流入させている。2次空気は温度300℃で、基準保炎器幅のとき流速が30m/sとした。

3. 2. 基礎式および解法

(1) 基礎式

循環流を伴う流れ場における流動、伝熱および反応現象は、(1)式の連続の式および(2)式の楕円型の偏微分方程式で記述することができる。

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div}(\rho \vec{u}) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \phi) + \text{div}(\rho \vec{u} \phi) = \text{div}(\Gamma \phi \text{grad} \phi) + S \phi \quad (2)$$

ここで、 ϕ は流速や温度などの変数であり、 $\Gamma \phi$ および $S \phi$ は ϕ に応じた拡散係数および生成あるいは消滅項である。

これらのベクトル形で記述した基礎式は、現象が定常であり軸対称2次元であると仮定できれば、連続の式も含めて(3)式の形で表わすことができる。

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial x}(\rho u \phi) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(r \rho v \phi) \\ = \frac{\partial}{\partial x}(\Gamma \phi \frac{\partial \phi}{\partial x}) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(r \Gamma \phi \frac{\partial \phi}{\partial r}) + S \phi \end{aligned} \quad (3)$$

すなわち、便宜上 $\rho = 1$ 、 $\Gamma \phi = S \phi = 0$ とすれば連続の式となる。

通常炉内の流れは乱流となるので、乱流モデルとして $k-\epsilon$ 2方程式モデルを用い、放射伝熱無視、反応速度無限大などの仮定をおくと、炉内現象を記述するための主な基礎式は、連続の式も含め8方程式となる。表2に ϕ に応じた $\Gamma \phi$ および $S \phi$ を求めた結果を纏めて示す。ここで、同表中のGENおよびPは表の下部に示した(4)および(5)式で表わされる。

表2 ϕ に応じた Γ_ϕ および S_ϕ

ϕ	Γ_ϕ	S_ϕ
1	0	0
u	μ_t	$\frac{\partial}{\partial x} (\mu_t \frac{\partial u}{\partial x}) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r \mu_t \frac{\partial u}{\partial r}) - \frac{\partial P}{\partial x}$
v	μ_t	$\frac{\partial}{\partial x} (\mu_t \frac{\partial v}{\partial r}) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r \mu_t \frac{\partial v}{\partial r}) + \frac{\rho w^2}{r} - \frac{2 \mu_t v}{r^2} - \frac{\partial P}{\partial r}$
rw	μ_t	$-\frac{2}{r} \frac{\partial}{\partial r} (\mu_t r w)$
k	μ_t / σ_k	$\mu_t \cdot \text{GEN} - \frac{2}{3} \rho k (\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{v}{r} + \frac{\partial v}{\partial r}) - \rho \epsilon$
ϵ	μ_t / σ_ϵ	$[C_1 \{ \mu_t \cdot \text{GEN} - \frac{2}{3} \rho k (\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{v}{r} + \frac{\partial v}{\partial r}) \} - C_2 \rho \epsilon] \cdot \frac{\epsilon}{k}$
m_{fx}	μ_t / σ_f	0
h	μ_t / σ_h	0

$$\text{GEN} \equiv 2 \{ (\frac{\partial u}{\partial x})^2 + (\frac{v}{r})^2 + (\frac{\partial v}{\partial r})^2 \} + (\frac{\partial w}{\partial x})^2 + (\frac{\partial u}{\partial r} + \frac{\partial v}{\partial x})^2 - \frac{2}{3} (\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{v}{r} + \frac{\partial v}{\partial r})^2 + \{ r \frac{\partial}{\partial r} (\frac{w}{r}) \}^2 \quad (4)$$

$$P \equiv p + \frac{2}{3} \mu_t \{ \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r v) \} + \frac{2}{3} \rho k \quad (5)$$

微粉炭燃焼や液滴燃焼のように燃料として固相あるいは液相の微粒子を用いる場合、上記した8方程式に加えて、粒子の運動、反応、伝熱現象を記述する方程式が必要となる。粒子を扱う方法としてオイラー法とラグランジュ法が知られているが、ここでは、粒子が不均一に分散している場合に適する後者を採用し、更に粒子と流体間の相互作用を考慮に入れることが可能ないわゆるPSIC法 (Particle Source In Cell Model) と呼ばれている手法を用いた。基礎式は文献¹⁾を参照した。

(2) 解法

a) 数値計算法

前述の方程式は非線形であるため、大型計算機を用いて数値解を求めた。数値解法の主なものを以下に示す。これらはPatankerのテキスト²⁾に詳述されているので説明は省略する。

- ・ 離散化：コントロールボリューム法
- ・ 対流／拡散項の扱い：べき乗法
- ・ 離散化方程式の求解：線順法
- ・ 流れ場の計算：SIMPLE

b) 計算格子および境界条件

軸方向に30、半径方向に26分割し、現象が急変するバーナ近傍および中心軸近傍を他の

場所より細かくする不等分割とした。また壁に隣接する格子は壁関数を使用する関係から、無次元座標 y^+ が出来るだけ15から100 の間に入るように設定したが、必ずしもすべての場所で満足できなかった。乱流モデルおよび壁関数に用いた定数を表3に示す。また、炉入口、出口、中心軸および壁における境界条件を表4に纏めて示す。

c) 計算手順

計算は図2のフローチャートに示すように、大きく二つの部分に分けられる。第一の部分では微粉炭粒子が入らないガスみの流れ、温度および反応場の概略解を反復法により解く。次の部分では、得られた流れ場のもとで、微粉炭粒子をバーナから入れ、粒子群の軌跡を解く。次に各コントロールボリューム内で粒子とガスとの交換運動量を求め、それをガス流れへの外力項に加えてガス流れ、温度、反応場を解き直す。再び得られた流れ場のもとで軌跡を計算し、

表3 モデル定数

モデル	定数
乱流 ($k-\epsilon$)	$C_1 = 1.44, C_2 = 1.92, C_\mu = 0.09$ $\sigma_k = 1.0, \sigma_\epsilon = 1.22$ $\sigma_{fu} = \sigma_{ox} = \sigma_h = 0.9$
壁関数	$\kappa = 0.419, E_1 = 9.8$

収束解が得られるまで第二の部分反復計算する。収束はコントロールボリュームにおけるマスバランス誤差の内、最大値 (SMAX) が(6)式の条件を満たすか

表4 境界条件

位置	条件
入口	$u = u_f / U_a, v = 0, rw = rw_a$ $k = 0.005 \cdot u^2$ $\epsilon = C_\mu^{3/4} \cdot k^{3/2} / 0.03 R_b$ $m_{fu} = 1.0 \quad m_{ox} = 0.232$ $T = T_f / T_a$
出口	$\frac{\partial u}{\partial x} = \frac{\partial v}{\partial x} = \frac{\partial rw}{\partial x} = \frac{\partial k}{\partial x} = \frac{\partial \epsilon}{\partial x} = 0$ $\frac{\partial m_{fx}}{\partial x} = \frac{\partial h}{\partial x} = 0$
中心軸	$\frac{\partial u}{\partial r} = \frac{\partial k}{\partial r} = \frac{\partial \epsilon}{\partial r} = v = rw = 0$ $\frac{\partial m_{fx}}{\partial r} = \frac{\partial h}{\partial r} = 0$
壁	$u = v = rw = \frac{\partial k}{\partial n} = 0$ $\epsilon_1 = C_\mu^{3/4} \cdot k^{3/2} / 0.4 \Delta l$ $\frac{\partial m_{fx}}{\partial n} = \frac{\partial h}{\partial n} = 0$

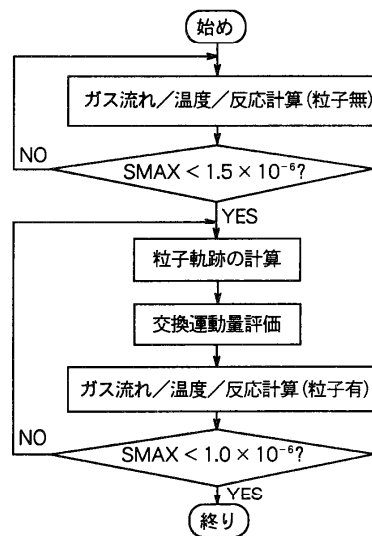


図2 計算手順

どうかで判定した。

$$SMA X \leq 1.0 \times 10^{-6} \quad (6)$$

3. 3. 結果と考察

図3および図4にフローパタンと粒子軌跡の計算結果の例を示す。図3はスワール数を一定 ($S_w = 0.6$) にしておいて保炎器幅を変えたもので、(a)は $W/W_0 = 1$, $D_f/D_t = 3.5$ (b)は $W/W_0 = 2$, $D_f/D_t = 3.0$ (c)は $W/W_0 = 4$, $D_f/D_t = 2.2$ に対する結果である。図4は保炎器幅を一定 ($W/W_0 = 2$) にしたまま、スワール数を変えたもので、(a)は $S_w = 0.4$ (b)は $S_w = 0.6$ (c)は $S_w = 0.8$ に対する結果である。各々炉上半分にはガスフローパタン、炉下半分には微粉炭粒子軌跡を示している。ガスフローパタンは、断面内の成分をベクトル表示したものであり、このほかに旋回成分を有していることも考慮しておかねばならない。粒子軌跡は実際には旋回成分を有しているが、表示断面も粒子の旋回と同じ旋回を有している面を考え、その面に投影されているような表現にしている。なお、炉中央部の再循環流において、速度ベクトルの軸方向成分が、炉出口側からバーナ側に向かう、すなわち逆流している領域を線で囲み斜線を施しており、以下逆流域と呼ぶ。

図5および図6に $2,000^\circ\text{K}$ で割って無次元化した炉中心軸上の温度分布を示す。軸方向位置は炉長 ($L = 10,200\text{mm}$) で無次元化している。

(1) 保炎器幅 (W/W_0) の影響

炉中心軸上において、ガスの軸方向速度成分は炉内に入るにつれて次第に減衰し、速度零の点すなわち淀み点を過ぎると逆流するようになる。保炎器幅を大きくすると ($W/W_0 = 1 \rightarrow 2$)、この淀み点はバーナから遠ざかる。更に大きくすると ($W/W_0 = 2 \rightarrow 4$)、微粉炭流は逆流域を貫通し、中心軸上には淀み点なくなることが図3より分かる。したがって、温度分布も逆流領域の形成状況に応じて変化し、図5に見られるように、中心軸上では W/W_0 が大きいほど高温領域がバーナから遠ざかる。このような現象は W/W_0 が大きい程すなわち2次空気流と微粉炭流の距離が離れるほど、2次空気流の有している旋回速度成分が遅れて微粉炭流に伝わるためと考えられる。この遅れによって粒子の挙動も W/W_0 の影響を大きく受ける。 W/W_0 を1から2に増加すると粒子の反転挙動が大きくなり、 $W/W_0 = 4$ にすると微粉炭ノズルの管壁近くから入る粒子は反転挙動をするが、中心部から入る粒子には反転挙動がなくなる。

このような粒子挙動に起因して、バーナ近傍における微粉炭粒子の滞留時間は W/W_0 を大きくすると増加する。例えば本計算では、 W/W_0 を1から2にすると、軸方向位置がスロート径の4倍のところに粒子が達するまでの全粒子の平均滞留時間は1.5倍にもなる。その結果、高温の微粉炭粒子がバーナ近傍に多く存在するようになり、その放射の影響を受けて着火および保炎性が良好になると考えられる。しかしながら W/W_0 が大きすぎると、上記した貫通現象によって粒子存在割合が減少するので、保炎器幅には最適値が存在することになる。この最適値は微粉炭流と2次空気との運動量比や旋回強度などによって変化するため、これらの影響も把握しておく必要がある。

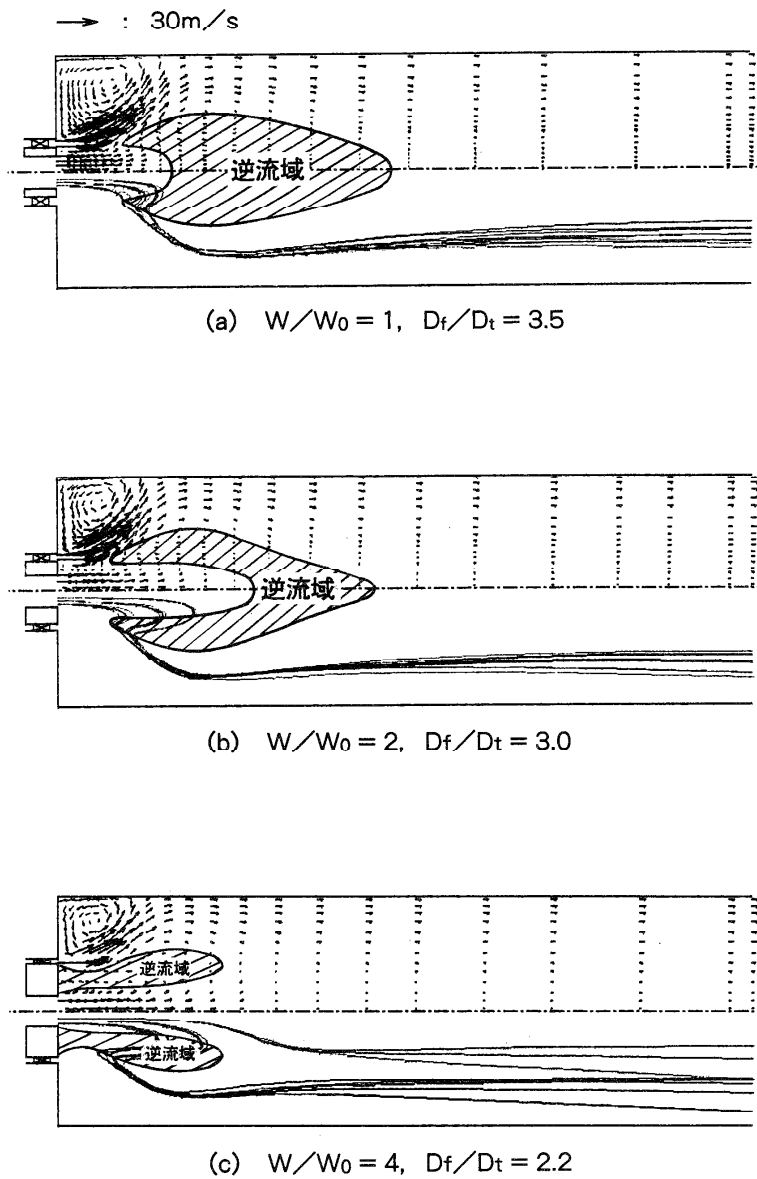
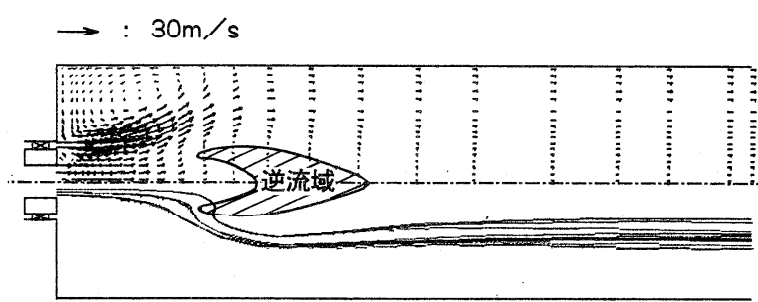
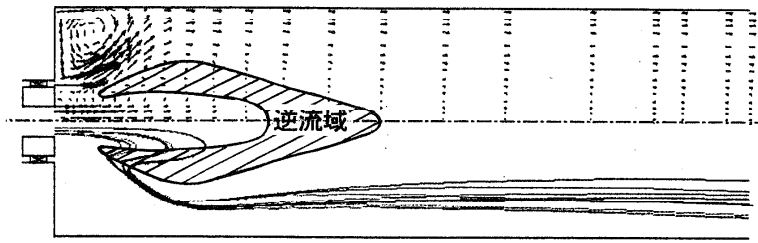


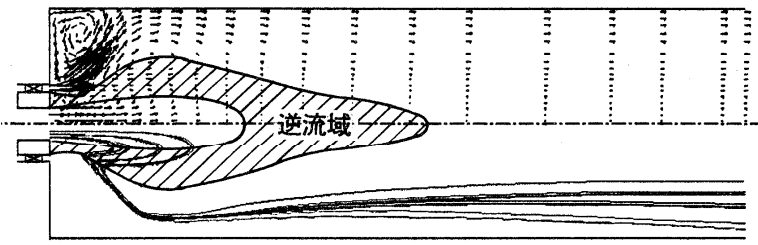
図3 フローバタン計算結果
(保炎器幅変化, $S_w = 0.6$)



(a) $Sw = 0.4$



(b) $Sw = 0.6$



(c) $Sw = 0.8$

図4 フローバタン計算結果
 (スワール数変化, $W/W_0 = 2$, $D_f/D_t = 3.0$)

(2) スワール数の影響

図4より2次空气の旋回強度を大きくすると逆流域は大きくなりまた、バーナに近付くようになる。特に $S_w = 0.8$ では保炎リングの後流にできる再循環流域と合体し大きな逆流域が形成される。また粒子の反転挙動も大きくなる。したがって、スワール数が大きい程粒子滞留時間が長くなるので、着火・保炎性は良好と考えられる。中心軸上の温度分布に関しては、図6に示したように、スワール数が大きい程高温領域はバーナに近付く。

4. おわりに

以上述べてきたようにバーナ開発時に伝熱問題として検討しておくべき課題は非常に多いが、これらを精度良く予測するには、今後更に、乱流モデルの改良が必要と考える。しかし、それぞれのバーナにおいて主な支配因子は何かを良く洞察し的確な解析を行なえば、実験との併

用によって適正な構造や操作条件を効率よく見出すことができる。また、従来より実用化されている燃焼器においては種々の工夫がなされ構造の複雑なものもあるが、ここで述べたようなシミュレーションを用いればその真の機能は何であるかを解析でき、性能向上をはかることが可能と考えられる。

ここで概説した燃焼器開発上の伝熱に関する諸問題が、伝熱研究者の興味を呼び起こし、この分野の技術進歩が促進されれば幸いである。

5. 参考文献

- 1) C. T. Crowe 他2名: The Particle-Source-In Cell (PSI-CELL) Model for Gas-Droplet Flows: J. Fluid Engineering, 332, 325 (1977)
- 2) S. V. Patanker: Numerical Heat Transfer and Fluid Flow: McGraw-Hill (1980)

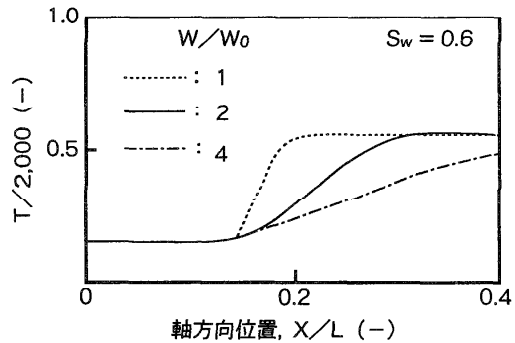


図5 炉中心軸上の温度分布 (保炎器幅変化)

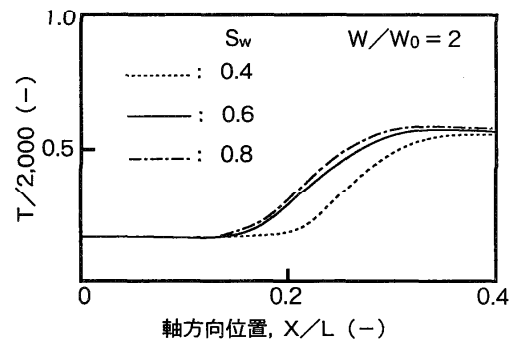


図6 炉中心軸上の温度分布 (スワール数変化)

半導体製造工程の伝熱問題

平沢茂樹（日立 機械研究所）

1. まえがき

半導体製造工程には多くの伝熱問題が存在する。これまでに多くの文献^{(1)~(3)}で紹介されており、著者も第21回夏期伝熱セミナー（東北大）⁽⁴⁾にて話題を提供した。また、第25回日本伝熱シンポジウム（金沢）ではオーガナイズドセッションに「半導体製造装置における伝熱」が取り上げられ活発に発表討論がなされた。ここではシリコンウエハの熱処理工程を中心に最近の研究を紹介する。

企業における伝熱研究について、「半導体製造装置における伝熱」のセッションのオーガナイザーがレビュー⁽⁵⁾で次のように述べている。「企業の研究者は現在稼働している装置に関して解析や実験を行うのが、どうしても当面の仕事になってしまう」。また産学協同研究の特集号⁽⁶⁾で次のように述べている。「企業で働く技術者の仕事の大半は目前の技術課題を解決することで、一方大学の研究者は長期ビジョンの下で仕事を展開したい」。この点をお含み頂き、以下に紹介する内容が、本特集号のねらいである「一般の読者にあまり知られていないが、学術的にも興味深い企業における伝熱に関連した研究、機器開発などを内容とする記事」に及ばないことは御了解頂きたい。

2. 酸化・拡散装置とCVD薄膜形成装置

ウエハの熱処理工程の代表として、酸化・拡散工程とCVD（Chemical Vapor Deposition）薄膜形成工程があげられる。

酸化・拡散工程では、ウエハを800~1200℃に数十秒から数時間加熱することにより、①シリコン基板内に不純物（ほう素、リン、ひ素など）の拡散、②イオン打込み時に生じた結晶の損傷の回復、③熱酸化膜の形成などを行なう。代表的な酸化・拡散装置として、図1に横形拡散装置、図2に縦形拡散装置、図3にランプアニール装置を示す。横形拡散装置は古くから用いられてきた。石英ポートにウエハを25~100枚くらい、間隔3~6mmくらいで並べ、これを円筒形状した電気抵抗加熱の高温装置内に挿入して熱処理を行う。縦形拡散装置は横形に比較して、ウエハ出し入れ時の外気混入量が小さく、酸化膜形成時の膜厚ばらつきを1/5~1/3に低減できるため⁽⁷⁾、最近多く用いられている。

また、ランプアニール装置はウエハを1枚ごと装置内に挿入し、ハロゲンランプで加熱す

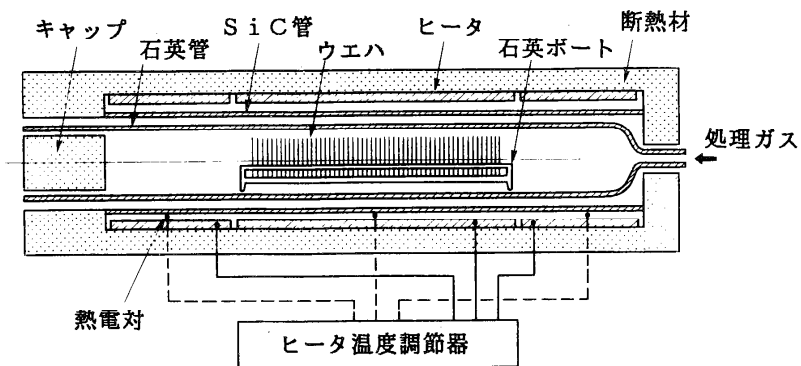


図1 横形拡散装置

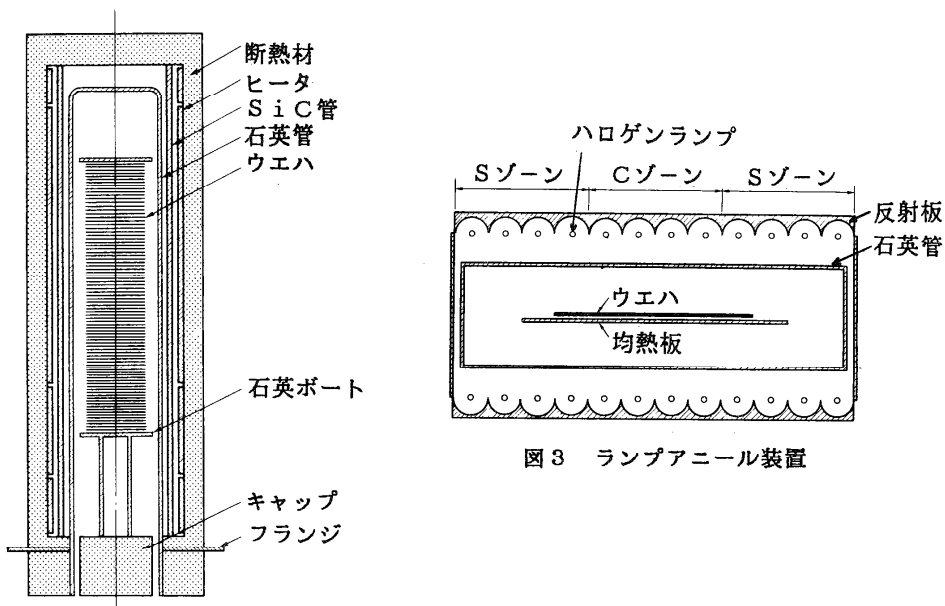


図3 ランプアニール装置

図2 縦形拡散装置

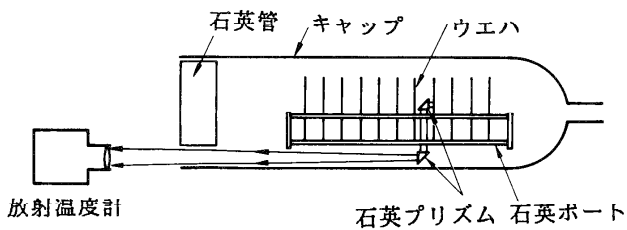


図4 放射温度計測法

るものである。ウエハ温度を放射温度計で測定し、ランプ発熱量を制御している。ランプアニール装置は短時間加熱に対応できるため、最近特に注目されている。この他、横形、縦形などのバッチ処理で高速温度制御を可能にするものとして、ミラー方式熱ふく射加熱装置（赤外線反射膜を施したガラス製加熱装置）が開発されている⁽⁷⁾。

CVD薄膜形成工程では、300～1100℃の常圧、減圧、プラズマ中にウエハを入れ、処理ガス（モノシラン、酸素、アンモニアなど）を流して、熱分解あるいは化学反応によりシリコン基板上に薄膜（多結晶シリコン、窒化シリコンなど）を堆積する。加熱方式として、誘導加熱、電気抵抗加熱、ランプ加熱などがあり、ウエハ処理枚数によって枚葉処理（1枚ごと）、バッチ処理、連続処理などがある。多数の装置構造が用いられている⁽²⁾⁽³⁾。

3. 熱処理中のウエハ温度計測

半導体の熱処理装置ではウエハ汚染を引き起こすことから、熱電対によるウエハ表面温度測定は許されていない。ただし、装置内の空間温度測定には熱電対が使われる。熱処理の精度向上には、ウエハ温度を非接触で正確に測定することが必要である。これまで放射温度計が多く用いられている。低温のシリコンウエハは波長1.2μm以上で透過があり、放射率が温度によって大きく変化する⁽⁸⁾ので、測定波長3～5μmの一般的な赤外線放射温度計では精度が悪い。

ランプアニール装置はウエハ温度を測定してランプ発熱量を制御しているため、応答よく測定することが重要である。また放射温度計に与えるランプ光の影響を小さくするため、ハロゲンランプの照射波長領域0.4～4μmを外し、測定波長を5～8μmにするなどの工夫を行なっている⁽⁹⁾。

バッチ処理ではウエハが狭い間隔で配列されているため、列の途中のウエハ温度を測定するのは容易でない。渡辺⁽¹⁰⁾は石英プリズムによる反射を利用した放射温度計測法を開発した(図4参照)。ウエハの放射率の温度依存性が小さいように、測定波長を0.9μmとしている。

放射温度計でウエハ温度を測定する場合、ウエハの放射率のデータを与える必要がある。半導体製造工程には各種薄膜多層表面構造のウエハが存在する。筆者ら⁽¹¹⁾は高温の酸化膜、窒化膜付シリコンウエハの放射率が膜の干渉効果を考慮して計算できることを示した。Hesketh⁽¹²⁾はμmオーダーの微細表面構造をもつウエハの放射率を測定した。今後、各種表面状態の放射率データベースが充実されることが望まれる。

4. 拡散装置内のウエハ温度分布

ウエハを均一に熱処理し、熱応力による欠陥の発生を防止するため、過渡時と定常時のウエハ面内温度分布及びウエハごとの温度差を低減することが必要である。

バッチ処理は同時に多数のウエハを熱処理できる利点があるが、その反面、ウエハを狭い間隔で配列するため、挿入・引出し時にウエハ面内温度分布が生じる。シリコンウエハは透過のある鏡面であり、それが石英ボート上に配列されているため計算が複雑である。数値シミュレーションによりウエハ温度分布と各種因子（ウエハ間隔、挿入速度など）との関係が検討されている^{(13)~(15)}。

ランプアニール装置について、著者ら⁽¹⁶⁾はウエハ温度分布の数値シミュレーションを行った。図5は1000℃、30秒加熱の際のウエハ中心温度、面内温度差の時間変化を示す。図6はSゾーンとCゾーン（図3参照）のランプ発熱比率（ Q_s/Q_c ）と昇温時及び準定常時におけるウエハ面内温度差との関係を示す。ランプ発熱比率を制御することによりウエハ面内温度差を低減できることがわかる。さらに均熱板併設の効果についても検討した。

5. 拡散装置、CVD装置内のガス対流

装置内部のクリーン度を良くするには、内部への外気混入を防止することが重要である。またCVD装置では、反応成分ガスの輸送現象が律速要因となるため、膜成長を均一にするには、装置内部のガス二次流れを防止することが必要である⁽²⁾⁽³⁾。

横形拡散装置はウエハ出し入れ時に内部の高温ガスが流出し、低温の外気が混入する。外気混入を防止するため、装置入口部に高純度ガスのシャワーを設けるなどの工夫が考えられている⁽¹⁷⁾。坂井⁽¹⁸⁾は高温の装置内部に低温の処理ガスを供給した場合のガス対流状況を観察し、装置内部にうず領域、高速層領域、滞留層領域が存在することを示した。

CVD装置について、木枝⁽¹⁹⁾は枚葉式縦形CVD装置内のガス対流について数値シミュレーションを行い、流れパターンにヒステリシス現象があることを示した。森⁽²⁰⁾は下面を加熱した水平長方形管内複合対流中のベナード渦の生成制御について実験と数値シミュレーションを行い、流路の側壁温度を制御することによりベナード渦を防止できることを示した。このような場合、工場では装置構造を変えるなどして解決することが多い。

6. 薄膜多層構造の局部応力解析

ウエハ表面にはLSI素子の複雑な薄膜多層構造が形成されている。代表例を図7に示す。それが高温で熱処理されると、LSI素子内部に局所応力が生じ、素子の電気特性に

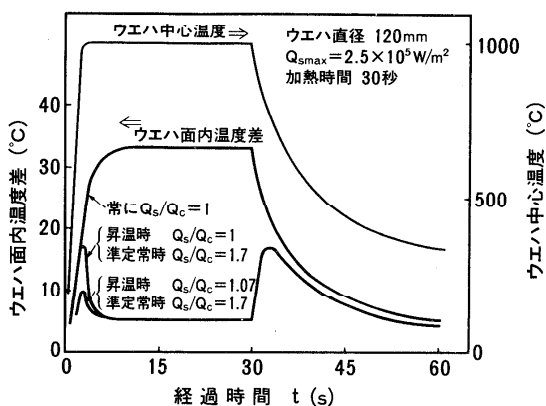


図5 ウェハ中心温度と面内温度差の時間変化

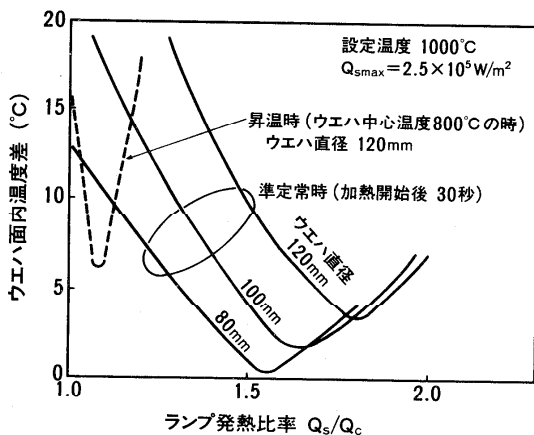


図6 ウェハ面内温度差とランプ発熱比率との関係

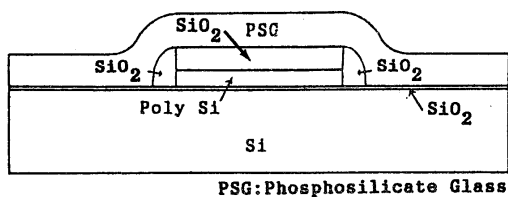


図7 薄膜多層構造

影響を与える。斉藤⁽²¹⁾は薄膜多層構造を形成するプロセス（薄膜形成、酸化、拡散など）に沿って、表面形状の変化を含めた応力解析プログラムを開発した。

7. むすび

半導体製造に関する伝熱の問題は多岐にわたり、熱応力や化学反応などと深く関連している。今後、集積度の向上に対応して、プロセスの高精度、均一化のため、産学協同で問題を解決して行く必要があると思う。

8. 参考文献

- (1) 鳥居、高垣、日本機械学会誌、89-809 (1986)、396.
- (2) 木枝、伝熱研究、26-101 (1987)、36.
- (3) 太田、流れの可視化、9-32 (1989)、11.
- (4) 平沢、第21回夏期伝熱セミナーテキスト (1987)、1.
- (5) 中山、伝熱研究、27-106 (1988)、43.
- (6) 中山、伝熱研究、27-104 (1988)、62.
- (7) 坂井、ほか4名、第25回日本伝熱シンポジウム講演論文集 (1988)、127.
- (8) Sato, T., Japan. J. of Appl. Phys., 6-3 (1967)、339.
- (9) 竹岡、電子材料、24-3 (1985)、104.
- (10) 渡辺、ほか2名、第27回計測自動制御学会学術講演会SICE'88 (1988)、307.
- (11) 平沢、ほか4名、酸化膜・窒化膜付シリコンウエハの950℃における放射熱物性、日本機械学会第66期通常総会講演会 (1989)、発表予定.
- (12) Hesketh, P. J.,ほか2名、Trans. of the ASME, J. of Heat Transfer, 110-3 (1988)、680.
- (13) 平沢、ほか2名、第24回日本伝熱シンポジウム講演論文集 (1987)、648.
- (14) 丸本、松井、第25回日本伝熱シンポジウム講演論文集 (1988)、121.
- (15) 小田、ほか2名、第49回応用物理学会学術講演会、秋季、2 (1988)、611.
- (16) 平沢、内野、第25回日本伝熱シンポジウム講演論文集 (1988)、124.
- (17) 平岩、矢木、ながれ、6 (1987)、334.
- (18) 坂井、ほか4名、第33回応用物理学関係連合講演会、春季 (1986)、526.
- (19) 木枝、Jensen, K. F.,第24回日本伝熱シンポジウム講演論文集 (1987)、251.
- (20) 森、小泉、第25回日本伝熱シンポジウム講演論文集 (1988)、130.
- (21) 斉藤、ほか4名、電子情報通信学会技術研究報告、88-183、SDM88-83(1988)、41.

煙突の結露・結氷被害と防止対策

月館 司 (道立寒研)

釜田幹男 (道立寒研)

外田昭七 (マルシヨウ製作所)

1. はじめに

近年、簡易床暖房システムが、その手軽さと快適さから、かなり普及してきている。簡易床暖房システムには、ストーブに床暖房専用バーナーを内蔵したものと、従来のストーブの煙筒に床暖房用の熱交換器を取り付けるものの二種類がある。このうち、後者のタイプはストーブの排熱を利用するので、暖房効率が高まり、省エネルギーになる。しかし、その一方では、通気抵抗の増加と排気温度の低下が起こり、ドラフト不足や煙突内での結露を引き起こすことが多い。これは、簡易ペチカにも同様に当てはまる。また、ストーブの効率や住宅の断熱、気密性能が向上し、ストーブを減少で燃焼させることが多くなったが、煙突は依然として断熱線の外側にあるため、煙突内で結露する例も数多くある。

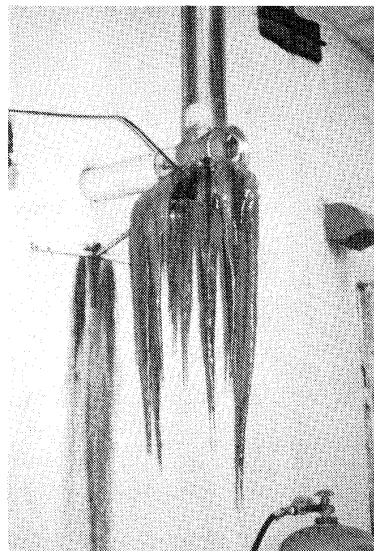


写真-1. 結露水の結氷

写真1は結露水がつららとなった事例である。結露による障害は、結露水の室内への流入や外面の汚れが一般的であるが、結露水が煙突内部で氷結したために、ストーブが不完全燃焼し、CO中毒で死亡するという事故もこれまでに2件発生している。¹⁾

ここでは、煙突内の結露の防止を目的に行った実験と解析結果について報告する。

2. 結露試験

2.1 試験方法

通常用いられているステンレス煙筒、コンクリート製集合煙突のほか、断熱性のある煙筒、及び、断熱改修した集合煙突において試験を行った。煙突の断面は図1のとおりである。集合煙突の断熱改修は、厚さ50mmの発砲ポリスチレンの外張りによる方法、密度73kg/m³のグラスウール13mmを充填したステンレス二重煙筒を集合煙突上部から挿入する方法の二種類を行った。

このほか、煙道の周囲に空気層をもつセラミックブロック製の集合煙突での試験も行っているが、本報では省略する。試験は、外気風速が3m/s以下の日に、灯油ストーブ、薪ストーブを用いて実施し、排気温度、ドラフト、CO₂、CO、O₂濃度、外気温、室温、灯油消費量を測定した。測定位置を図2に示す。また、煙突下部から結露水を採取し、その量、水素イオン濃度（pH）を測定した。

2. 2 試験結果

表1に各煙突の試験結果を示す。

屋外に取り付けられた煙筒の場合、通常のスチンレス煙筒では、外気温が-7℃のときに結露しているが、グラスウールで断熱した煙筒では-26℃でも結露は生じていない。また、空気層利用煙筒においても、同燃焼量（約0.31/h）で、外気温も非常に近い条件（-7℃と-10℃）での排気温度の降下を比較すると、スチンレス裸煙筒が上下温度差62℃に対し、空気層利用煙筒では26℃とかなりの効果が現れている。

集合煙突の場合も同様に、グラスウール断熱煙筒を挿入した場合は温度降下が小さく、結露も発生しなかった。FP板を外張りしたものについては、薪ストーブでしか試験を行っていないため、その効果を明らかにすることはできなかった。

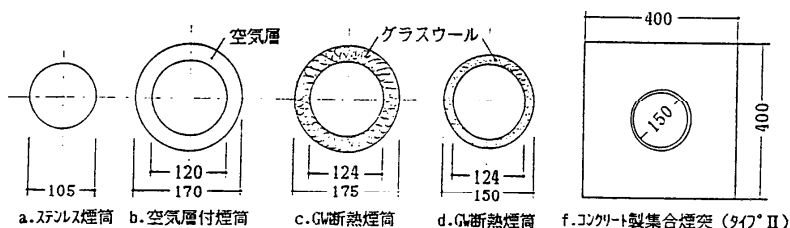


図-1. 煙突の断面

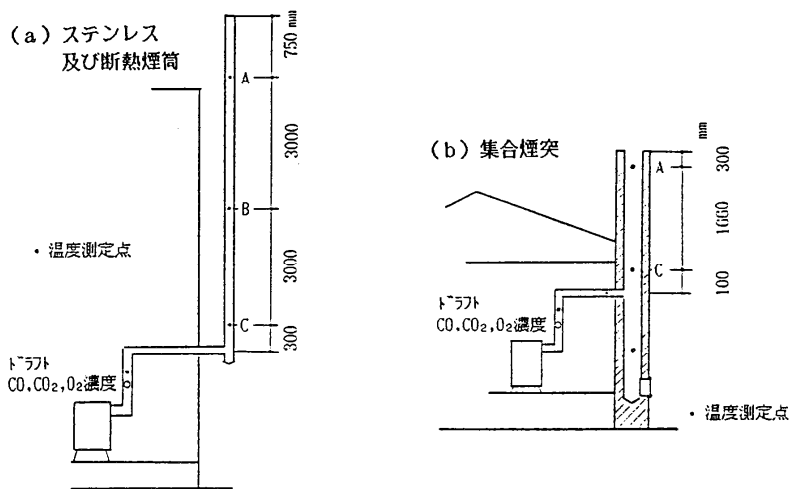


図-2. 測定位置

表-1 結露防止対策・煙筒及び外付け集合煙突の廃ガス温度降下の比較

項目 タイプ		屋外露出煙筒・外付け集合煙突内の結露水及び廃ガス温度降下					
		結露水量と 結水の状況	煙筒中心温度 上・下温度差 Δt_1 (deg)	上部中心と内 部温度差 Δt_2 (deg)	煙筒内の平均ガス温 度と外気温度差 $\Delta t_3 = t_g - t_o$ (deg)	燃焼量 (ℓ/h)	試験中の平 均外気温度 t_o ($^{\circ}C$)
屋外露出煙筒	結露対策	なし(乾燥)	約 26 $^{\circ}C$	約 6 $^{\circ}C$	約 116 $^{\circ}C$ 、 t_g : 90 $^{\circ}C$	0.287 (ℓ/h)	- 25.9 $^{\circ}C$
		なし(乾燥)	約 20 $^{\circ}C$	約 11 $^{\circ}C$	約 84 $^{\circ}C$ 、 t_g : 69 $^{\circ}C$	0.225 (ℓ/h)	- 15.3 $^{\circ}C$
	空気層利用煙筒	大粒の水滴発生	約 26 $^{\circ}C$	約 22 $^{\circ}C$	約 72 $^{\circ}C$ 、 t_g : 61 $^{\circ}C$	0.305 (ℓ/h) (4.57 $\ell/15h$)	- 10.7 $^{\circ}C$
	現状のステンレス裸煙筒	120(cc)、pH 3.1 250(cc)、pH 4.8	約 62 $^{\circ}C$ 約 37 $^{\circ}C$	約 27 $^{\circ}C$ 約 16 $^{\circ}C$	約 69 $^{\circ}C$ 、 t_g : 62 $^{\circ}C$ 約 50 $^{\circ}C$ 、 t_g : 35 $^{\circ}C$	0.30 (ℓ/h) 0.195 (ℓ/h)	- 7.0 $^{\circ}C$ - 20.0 $^{\circ}C$
外付け集合煙突	結露対策	なし(乾燥)	約 3 $^{\circ}C$	約 5 $^{\circ}C$	約 46 $^{\circ}C$ 、 t_g : 33 $^{\circ}C$	0.21 (ℓ/h) (1.05 $\ell/5h$)	- 13.1 $^{\circ}C$
	F P 現場貼 集合煙突	煙突内表面に結水	約 60 $^{\circ}C$	約 10 $^{\circ}C$	約 74 $^{\circ}C$ 、 t_g : 62 $^{\circ}C$	薪: 1.58(kg/h) (7.9kg/5h)	- 11.8 $^{\circ}C$
	現状の外付け集合煙突	結水、pH 4.5 215(cc)、pH 4.8	約 68 $^{\circ}C$ 約 7 $^{\circ}C$	約 14 $^{\circ}C$ -	約 71 $^{\circ}C$ 、 t_g : 59 $^{\circ}C$ 約 38 $^{\circ}C$ 、 t_g : 26 $^{\circ}C$	0.42 (ℓ/h) 0.194 (ℓ/h)	- 12.0 $^{\circ}C$ - 12.3 $^{\circ}C$

3. 結露のシミュレーション

3.1 数値モデル

煙突内での結露を予測することができれば、効果的な防止対策を検討する上で有用である。ここでは数値モデルについて述べる。

計算対象は屋外煙筒及び集合煙突とする。煙突内表面温度が排気の露点温度以下であれば、そこに結露が生じる。この結露は流下し、内表面が露点温度以上のところに来ると再び蒸発する。モデル化に当たって次のことを仮定する。

- 1) 結露の水膜は薄く、その温度は煙突内表面温度に等しい。
- 2) 煙突を伝わる上下方向の熱移動は無視できる。
- 3) 排気の輻射伝熱量は対流伝熱量に比べて十分小さく無視できる。

これにより、煙突を高さ方向に等分割すると、k番目の分割要素について次式が成り立つ(図3)。

(熱収支)

$$Q_{ok} = \alpha_{ok} (\theta_{sok} - \theta_o) A_{sok}$$

$$Q_{mk} = (\theta_{sik} - \theta_{sok}) / R$$

$$Q_{ik} = \alpha_{ik} A_{sik} \Delta \theta_i + F_k (I_k' - I_k) \\ = G I_{k-1}'' + W_{k-1}' I_{k-1}' - G I_k'' - W_k' I_k'$$

$$Q_{ok} = Q_{mk} = Q_{ik} + W_{k+1} I_{k+1} - W_k I_k$$

ここで、

$$\Delta \theta_i = \frac{\theta_{ik-1} - \theta_{ik}}{\log \left(\frac{\theta_{ik-1} - \theta_{sik}}{\theta_{ik} - \theta_{sik}} \right)}$$

$$R = \log (r_o / r_i) / (2 \pi \lambda \Delta h)$$

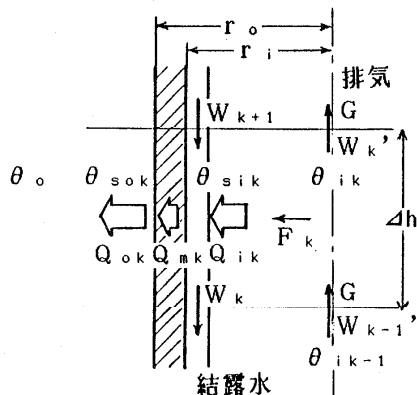


図-3. 分割要素モデル

(物質収支)

$$F_k = W_k - W_{k+1} = W_{k-1}' - W_k' \\ = \alpha_{Dk} A_{Sik} \gamma (C_{ik} - C_{Sik})$$

内表面の熱伝達率は、レイノルズ数の大小によって、次の2式から求めた。

$$Nu = 0.023 Re^{0.8} Pr^{0.4} \quad (Re^{21/8} > 1550 Gr \text{のとき})^{2)}$$

$$Nu = 0.129 (Gr Pr)^{0.333} \quad (Re^{21/8} \leq 1550 Gr \text{のとき})^{2)}$$

物質伝達率は熱伝達との相似則より、

$$Sh = 0.023 Re^{0.8} Sc^{0.4} \quad (Re^{21/8} > 1550 Gr \text{のとき})^{2)}$$

$$Sh = 0.129 (Gr Sc)^{0.333} \quad (Re^{21/8} \leq 1550 Gr \text{のとき})^{2)}$$

また、排気の物性値は熱伝導率についてのみ湿り空気の値を用い、その他は N_2 、 O_2 、 CO_2 、水蒸気の混合気として算出した²⁾。水蒸気の拡散係数は、 $D_0 = 0.220 \times 10^{-4} m^2/S (0^\circ C)$ を次式により温度補正して求めた²⁾。

$$D = D_0 (T/273)^{1.75}$$

計算方法は初めに煙突出口の水蒸気量を仮定して各分割要素で熱収支、物質収支を満足させながら計算を進め、煙突入口の水蒸気量が水蒸気発生量に等しくなるよう最初の仮定を変更している。なお、要素の分割幅は50cmにしている。

3. 2 測定値との比較

通常のステンレス煙筒(実験番号①、②、⑤、⑥、⑦)、及び、グラスウール断熱煙筒(実験番号③、④)での測定結果と計算値を図4に示す。温度測定位置は、実験番号①～④では図2(a)、⑤～⑦では図5のとおりであり、いずれも煙筒の中心温度である。空気比、排気量はガス分析の結果より算出した。計算において、外表面熱伝達率は、外気風速が3m/s以下であることから、10及び15kcal/m²h²Cとしている。また、煙筒内の熱伝達率は、実験番号①～④では円管内強制対流での推定式を用いているが、⑤～⑦では排気量(あるいはレイノルズ数)が小さいため、この式を適用すると熱伝達率を過小に見積るように思われる(図6参照)。そこで、⑤～⑦では煙筒内面で下降気流が生じていると考え、自然対流での推定式を用いている。

図4を見ると、断熱煙筒では外表面熱伝達率の影響がほとんどなくなっており、A～B点では測定値とよく一致している。また、通常の煙筒でも、上記の熱伝達率の範囲で、測定値を概ねカバーしている。しかし、結露量を比較すると、断熱煙筒では計算においても結露していないが、その他の場合は、計算値の方がかなり大きくなっている。これは、煙筒上部で結露水が霜状に氷結していたり、また、水滴がある大きさ以上にならないと流下しないために、測定値が実際の結露量より小さくなっていることが原因の一つとして考えられる。

3. 3 シミュレーション結果と考察

図7は煙突の種類による煙突出口温度、結露量を予測したものである。ここで煙突の高さは6m、外表面の熱伝達率は20kcal/m²h²Cとしている。断熱の効果は非常に大きく、高密度グラ

実験 番号	外気温 (°C)	灯油消費量 (l/h)	空気比	排気量 (kg/h)	結露量 (cc/h)		計算値/水蒸気量
					測定値	計算値	
①	-7.5	0.32	5.1	19.39	40	161~178	0.372~0.411
②	-20.6	0.19	11.1	24.88	65	141~150	0.418~0.445
③	-12.9	0.64	4.1	31.27	0	0	0
④	-16.5	0.22	9.5	24.68	0	0	0
⑤	-6.0	0.68	2.2	18.08	170	257~312	0.328~0.398
⑥	-8.0	0.53	2.7	17.20	130	259~293	0.412~0.467
⑦	-9.0	0.33	3.6	14.19	220	214~228	0.518~0.553

室内空気の絶対湿度は6g/kgと仮定
煙筒の外表面熱伝達率は10及び15 kcal/m²h°C

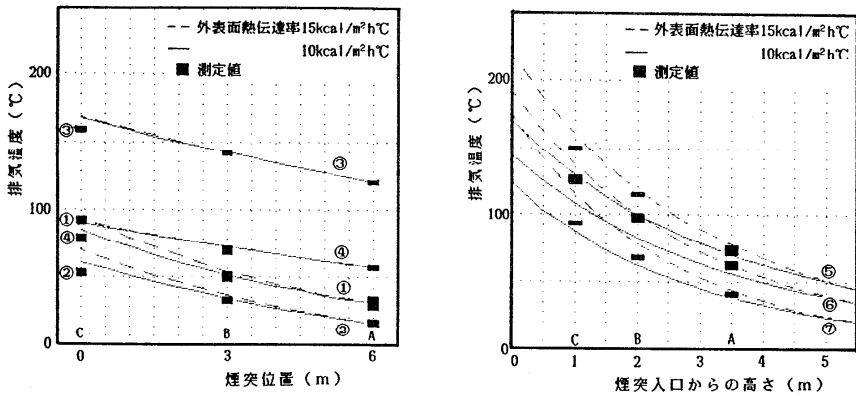


図-4. 排気温度の測定値と計算値

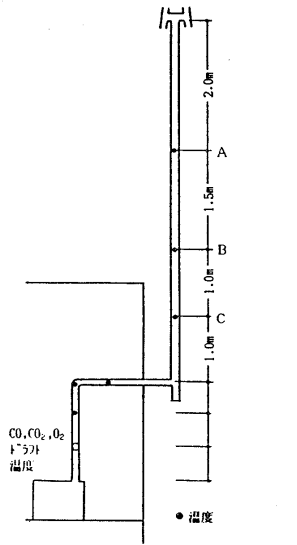


図-5. 測定位置(実験番号⑤~⑦)

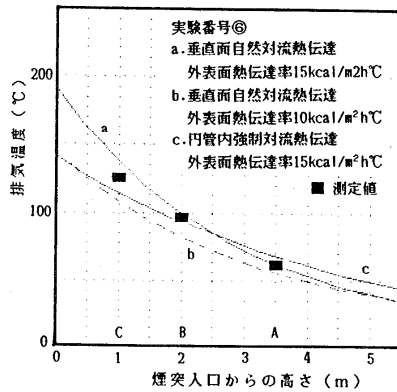


図-6. 排気温度(熱伝達率による差異)

スワール30mm相当の断熱をすれば、外気温-30℃のときに排気が100℃程度の温度で煙突に入っても結露しないことがわかる(計算条件8)。また、集合煙突を屋内に設置することも結露防止に有効である。計算条件4、5は、2、3と同じ種類の煙突でその下から4mが屋内にある場合であるが、たとえば、外気温-10℃、煙突入口温度160℃の場合、屋外設置(2、3)より、出口温度は15~20℃上昇し、結露量は200cc/h以上であったのがほとんど0cc/hになっている(屋内部分の外表面熱伝達率8kcal/m²h²℃、室温20℃とした)。

図8は、断熱以外の結露対策として、煙突に空気を供給する方式の効果を予測したものである。給気することにより、その直後の温度は低下するが、排気量が増加することによって温度の降下率が小さくなるため、出口温度は高くなっている。それに加え、露点温度が降下する効果によって結露量も減少している。しかし、入口温度が高いところでは給気の量が多くなると、逆に結露量が増える場合もでてきている。すなわち、煙突性能や排気の状態に対して最適な給気量が存在することがわかる。そこで、この点について検討する。

結露を考慮しなければ煙突出口の排気温度は、

$$\theta_{out} = \theta_o + (\theta_{in} - \theta_o) \exp(-NTU)$$

$$NTU = KA / G' C_p$$

と表される。給気量を ΔG 、排気と給気の比熱が等しいとすれば、給気直後の排気温度は、

$$\theta_m = \frac{G' \theta_{in} + \Delta G \theta_r}{G' + \Delta G}$$

であり、排気量は次式で与えられる。

$$G' + \Delta G = \frac{G' (\theta_{in} - \theta_r)}{\theta_m - \theta_r}$$

したがって、給気を行った場合の煙突出口温度は、Kが不変とすれば、

$$\theta_{out}' = \theta_o + (\theta_m - \theta_o) \exp\left(\frac{-NTU(\theta_m - \theta_r)}{\theta_{in} - \theta_r}\right) \quad (1)$$

θ_m で微分すると、

$$\frac{d\theta_{out}'}{d\theta_m} = \left(1 - \frac{NTU(\theta_m - \theta_o)}{\theta_{in} - \theta_r}\right) \exp\left(\frac{-NTU(\theta_m - \theta_r)}{\theta_{in} - \theta_r}\right)$$

よって、煙突出口温度 θ_{out}' が最大となる θ_m は、

$$\theta_m = \theta_{mopt} = \theta_o + (\theta_{in} - \theta_r) / NTU \quad (2)$$

$$NTU = \frac{KA}{G' C_p} = \log\left(\frac{\theta_{in} - \theta_o}{\theta_{out} - \theta_o}\right)$$

となる。また、そのときの給気量、すなわち、最適給気量は、次式で与えられる。

$$\Delta G_{opt} = G' \frac{\theta_{in} - \theta_{mopt}}{\theta_{mopt} - \theta_r} \quad (3)$$

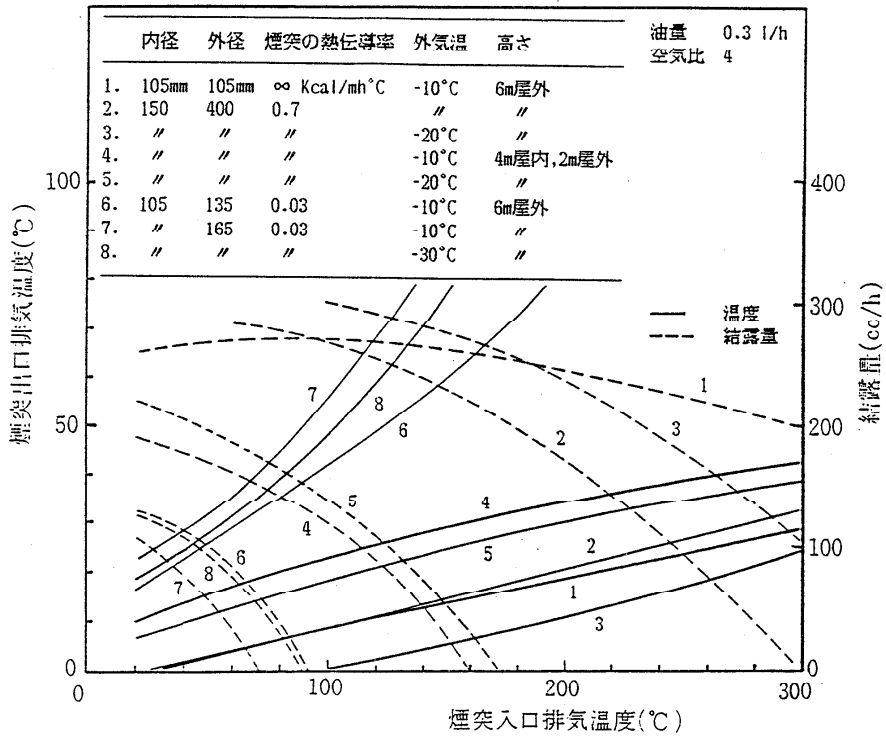


図-7. 煙突性能の排気温度、結露量に与える影響

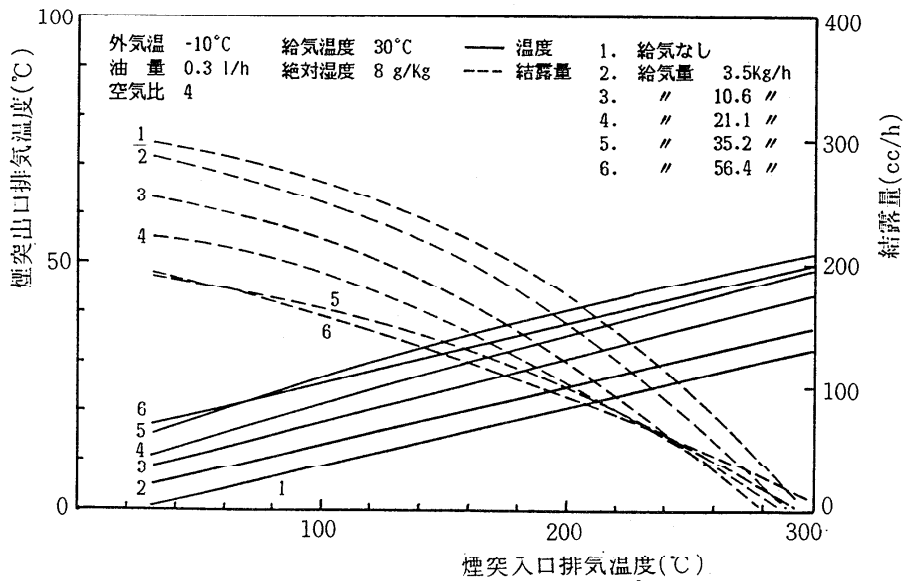


図-8. 給気の効果 (煙突性能は図-7の2の条件)

(2)、(3)式より、煙突の断熱性能が低く、長い(KAが大きい)ほど、燃焼量、空気比が小さい(G'が小さい)ほど θ_m は低くなり、排気量に対する給気量の割合($\Delta G/G'$)を大きくすれば良いことがわかる。また、(2)、(3)式が適用できるとすれば、最適給気量は給気前の煙突入口、出口温度、排気量、外気温より簡単に得られることになる。もし、 $\theta_{in} < \theta_{out}$ であるならば給気による効果が期待できないことを意味する。

図9は図8を給気量を横軸に取って書き改めたものである。煙突入口温度が150°Cのときには給気量が50kg/hぐらいまで結露量は減少しているが、250°Cでは10kg/hを越えると結露量の減少はほとんど見られない。また、(2)、(3)式による最適値は煙突入口温度が150°Cのとき55.6、250°Cのとき29.5kg/hとなり、比較的妥当な値を示している。

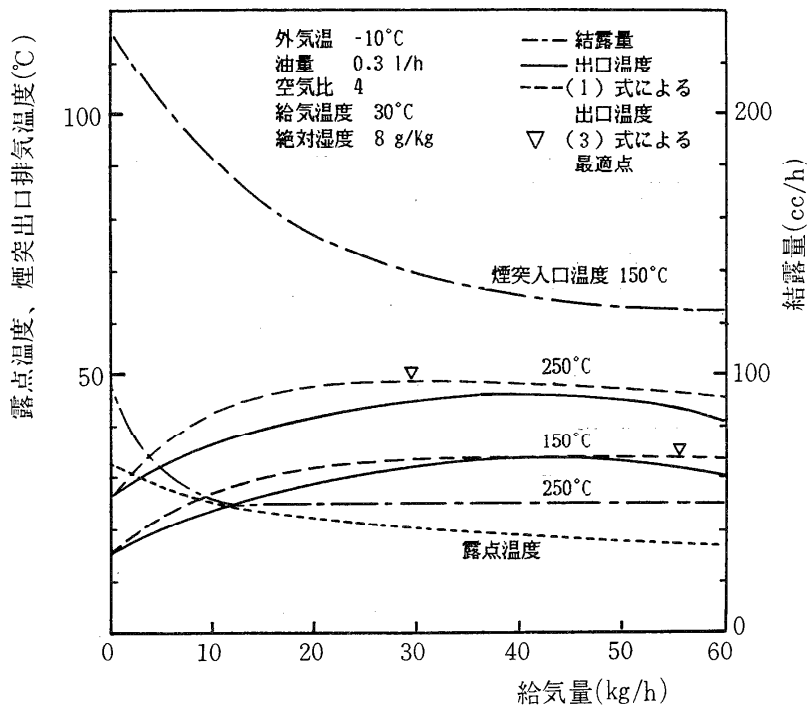


図-9. 給気量の影響 (煙突性能は図-7の2の条件)

4. おわりに

煙突内結露について実験を行い、また、その防止方法をシミュレーションにより検討した。その結果、煙突の断熱と集合煙突を屋内に入れることの有効性が定量的に明らかとなった。さらに、給気方式についても適正な空気量を供給すれば結露量を減少させることができることを示した。しかし、この方式ではドラフトへの影響および暖房効率が低下する点を考慮する必要がある。

(記号一覧)

Q : 熱量 (kcal/h)	I : 結露水エンタルピ (kcal/kg)
I' : 水蒸気エンタルピ (kcal/kg)	I'' : 乾き排気エンタルピ (kcal/kg)
G : 乾き排気量 (kg/h)	G' : 湿り排気量 (kg/h)
ΔG : 給気量 (kg/h)	W : 結露水量 (kg/h)
W' : 水蒸気量 (kg/h)	F : 水蒸気の内表面への移動量 (kg/h)
θ : 温度 (°C)	T : 絶対温度 (K)
C : 水蒸気の重量濃度 (-)	A : 面積 (m ²)
r _i : 煙突内径 (m)	r _o : 煙突外径 (m)
Δh : 分割要素高さ (m)	α_o : 外表面熱伝達率 (kcal/m ² h°C)
α_i : 内表面熱伝達率 (kcal/m ² h°C)	K : 平均熱通過率 (kcal/m ² h°C)
α_D : 物質伝達率 (m/h)	γ : 比重量 (kg/m ³)
λ : 熱伝導率 (kcal/mh°C)	C _p : 比熱 (kcal/kg°C)
Nu : ヌセルト数	Re : レイノルズ数
Pr : プラントル数	Sh : シャーウッド数
Sc : シュミット数	Gr : グラスホフ数

添字 o : 外気、i : 排気、s_o : 外表面、s_i : 内表面、m : 混合後の排気、r : 室内空気、
in : 煙突入口、out : 煙突出口

(謝辞)

実験に当たり、北見工大・金山教授には貴重な御助言を賜りました。ここに深く感謝致します。

(参考文献)

- 1) 我孫子ほか、厳寒地における灯油ストーブの煙突内結露・凍結によるCO中毒事例、火災 Vol.38 No.5 (昭63-10)
- 2) 伝熱工学資料、日本機械学会
- 3) 浅野、燃燒廃ガスの排気筒における冷却特性、昭和58年度建設省建築研究所年報
- 4) 釜田ほか、煙筒及び集合煙突内の結露、結氷現象とその被害防止対策に関する試験研究、昭和59年度北海道立寒地建築研究所調査研究報告集
- 5) 釜田ほか、煙突内の結露、結氷現象とその防止対策に関する研究(その1~3)、空気調和・衛生工学会北海道支部講演論文集(昭61-3)
- 6) 月館ほか、煙突内結露に関する実験と解析、空気調和・衛生工学会講演論文集(昭61-10)
- 7) 月館ほか、煙突内結露の防止方法に関する検討、昭和61年度北海道立寒地建築研究所調査研究報告集

ヒートパイプを使用した永久凍土低温貯蔵庫

土谷富士夫 (帯蓄大)
了戒公利 (清水建設)
望月正孝 (藤倉電線)

1. はじめに

北海道のように寒冷環境にある地域では、それをデメリットとしないためには寒冷環境を十分に認識し、既存の固定概念にこだわらない自然への対応が必要である。そこで、寒冷自然環境の特質を理解し、その地域社会の要請を組み込む積極的な研究体制が作られることが急務である。

冬期間の北海道は広域で土壌の凍結がみられる。このため、土壌凍結が時には凍結・凍上被害を誘発し、建物や道路、水路などに多大な破壊被害をもたらしている。また、こうした被害は構造物ばかりでなく、作物、牧草、樹木等の冬枯れ問題にもなっている。

こうした寒冷気候による自然災害として土壌凍結をとらえたとき、その防止あるいは抑制のために、多くの研究を推進し、莫大な対策の経費を使用せざるを得ない現状である。土壌が凍結すると、地中から大量の水分を吸引し、土中にアイスレンズと呼ばれる分離氷晶を形成し、体積を膨張させ巨大な凍上圧を発生する。このため、地面上部の構造物を持ち上げ構造破壊を導く。さらに、春季の融解により、沈下が起こり構造破壊を助長する。また、凍結が深く地面に侵入すると地温の低下が大きくなり、地中の植物根の細胞が凍死する被害を大きくしている。しかし、一度凍結した土壌はコンクリート並みの強度を示すことから、人工的に土を凍結させて、軟弱な地盤を掘削する人工地盤凍結工法があり、凍結土の性質を積極的に利用している。また、凍土は潜熱(水が氷に相変化する時に発生する熱)を付随することから、この状態で冷熱エネルギーを貯蔵していることになる。

いままで、電力により冷凍機を動かす強制的冷却で人工凍土を造成してきたが、ここでは冬の寒さを冷熱エネルギー源として活用する、伝熱素子のヒートパイプを用いた人工凍結方法は、寒冷気候を有する北海道ならではの効果的な手法と考えられる。

2. 寒冷地域と寒さ

それでは冬の寒さを知るため、図1に世界の最寒月の月平均気温の分布図を示す。北半球では大陸上が最も低温になりやすく、特にシベリア東北部が最低になりやすく極寒といわれるベルホヤンスクの1月の月平均気温は -48°C にも達する。ここでは、 -67.8°C の最低気温を観測している。最近では、この近くのオイミヤコンでは -70°C の新記録を出している。しかし、今までの世界の最低気温を出した東シベリアより低温の地域があり、1960年8月24日に、ソ連の南極のポストーク基地

で-88.3℃を観測し、世界の最低気温となっている。

次に日本の寒さについて述べると、日本の一番寒いところといえば、北海道の内陸部となる。1902（明治35）年1月25日に旭川で-41.0℃を記録している。その翌日は帯広で-38.2℃を記録し、実に未曾有と言ってもよい寒波が北日本を襲い相当の寒さとなった。

しかし、単に最低気温のみでは冬期間の低温を表わすことはできないので、マイナスの日平均気温を加算した、積算寒度（凍結指数とも呼ぶ）を用いると冬期間の寒さを表現できる。図2に北海道の寒候期の積算寒度値の分布とを示す。これによると、十勝、網走および釧路の内陸部が最も寒冷的な地域であることがわかる。

3. 永久凍土とは

ここに、永久凍土とは「寒さのため凍った土が永久に融けない状態の土」の意味であるが、英語ではPermafrostと呼ばれ、1945年にpermanently frozen groundを略して名付けられた。この言葉の定義は「少なくとも相続く2つの冬とその間の1年を含めた期間より長い間、零度以下の温度を持つ土または岩における温度条件」となっている。

永久凍土は、世界的にシベリア、アラスカ、カナダ北部、中国奥地、モンゴル等に広く分布し、その面積は地球上の陸地の14%にも及んでいる。日本では富士山の山頂、大雪山周辺、十勝三股、糠平の一部でごくわずかに発見されている。図3に北半球における永久凍土の分布状況を示す。海中にも永久凍土が存在し、海水の水結温度が-1.8℃であることから、これより低い温度の地点は海底に存在する。連続帯とは永久凍土層が水平方向にも鉛直方向にも連続している地帯で、深いところでは400 mにも及んでいる。点在帯は地形因子、地下水、植性などにより一部だけに存在するタイプである。カナダ北部のエスキモー一部落ではこの永久凍土の丘にトンネルを掘って、天然の冷蔵庫に利用している。

さて、北海道では永久凍土はできないが、季節的凍土は冬期間に形成され、春季に融解して消失する。北海道の最深さの土壤凍結深さの分布をみると、十勝と北見の内陸部が深くまで凍結する地

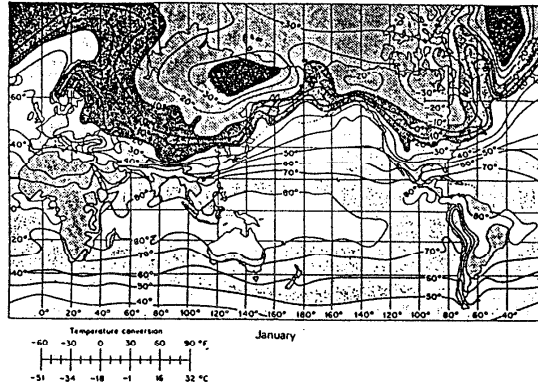


図1 世界の1月の月平均気温の分布

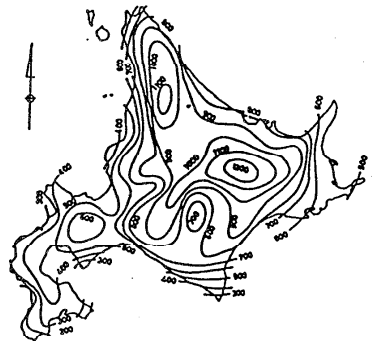


図2 北海道の積算寒度の分布

域といわれているが、実際には積雪があるために凍結は抑制され、これより小さくなる。図4は積雪下における道東地域の凍結深さの分布を示す。寒冷で積雪の比較的小さい内陸部に深い凍結地帯が出現している。

4. ヒートパイプとは

ヒートパイプ (heat pipe)の源流をさかのぼると、1942年、米国オハヨ州にある G. M. 社の R. S. Gaugler が発案して特許出願した Heat Transfer Device が文献第1号である。1963年に、G. M. Grover が最初に Heat Pipe という名称を使用し、人工衛星用のヒートパイプの研究を行った。そして、1968年に打ち上げられた人工衛星に、搭載電子通信機の温度制御として、2本のヒートパイプが使用され成功に至った。以後、パイプの理論解析は大きく進展し、米国に続いてイギリス、イタリアで原子炉に使用できる高温用パイプが研究された。

以上のように、初期のヒートパイプは人工衛星、宇宙船あるいは熱電子発電機へ利用されたが、1970年代になって産業機器の放熱と均熱用に用いられた。現在は、電気装置からの放熱、金属の冷却、空調、熱交換機、均熱炉その他家庭用品などの多方面に実用及び開発化が行われている。

ヒートパイプの原理を説明すると、密閉容器のなかに封じ込まれた液体が、加熱されることにより、蒸発して気体となり容器内に充満する。このとき、他方を冷却すると蒸気は凝縮して液体に戻る。このとき加熱部では蒸発に必要な潜熱が液体に吸収され、冷却部ではその熱が放出されるので、外部からみると固体の棒の熱伝導によって熱が流れるのと同じように、蒸発部から凝縮部へ熱を輸送するように見える。蒸発-凝縮はごく小さな温度差でも起こり、冷却部で凝縮した液体は、ウィックと呼ばれる構造を持つ毛管現象によって凝縮液を加熱部に戻すことができる。重力の場では、上部が冷却部に下部を加熱部という状態にすると、効率良く作動し、このサイクルが無限に継続される。図5にヒートパイプの構造図と図6にヒートパイプの断面図を示す。

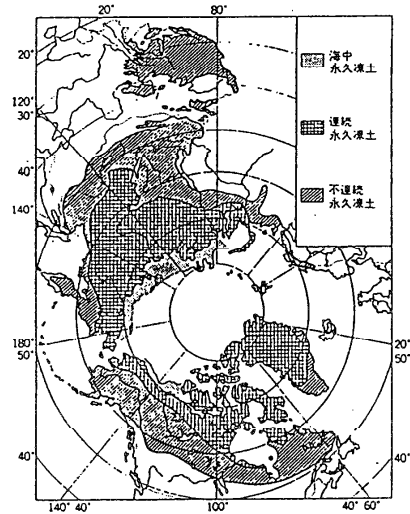


図3 北半球における永久凍土の分布

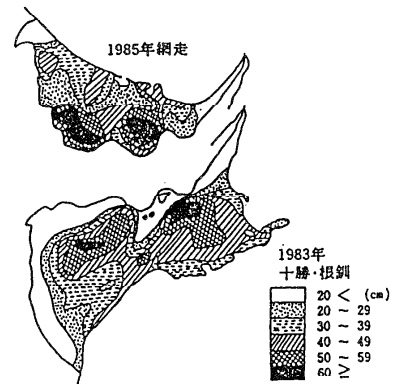


図4 自然積雪下の土壌凍結分布 (十勝・根釧・網走地方)

5. ヒートパイプの性能と用途

ヒートパイプの構成材料を表1に示す。また、作動液体は現在使用されているもので、その主な作動液体と使用温度範囲を表2に示した。パイプ材と作動液体との適合性があり、パイプ材との融点の使用温度以上であると、腐食の発生や不凝縮ガスの発生により、作動液体の変質して循環の障害になったり、圧力上昇の危険が生じる。ヒートパイプは次に要約するように、他に見られない長所がある。

(1) 優れた熱伝導性

金属に比べて、数百倍もの多量の熱を輸送できる。

(2) 速い熱応答性

ヒートパイプ内の蒸気は音速に近いスピードで移動する。

(3) 高い温度均一性

温度分布を一樣にさせる機能を持っている。

(4) 大きな設計自由度

必ずしも、円管でなくともよく、任意の形状でもよく、パイプの外側にフィン等を取り付けられる。

(5) メンテナンスの不要

電氣的または機械的な駆動部を必要としないので無動力で作動する。

(6) 軽量コンパクト

パイプの中が中空なため重量が軽い。

次に、ヒートパイプの利用形態を分類すると、次の5つの特徴を生かした用途

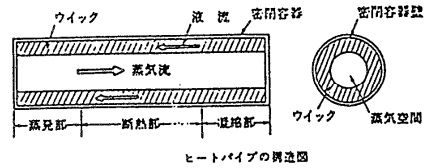


図5 ヒートパイプの構造断面

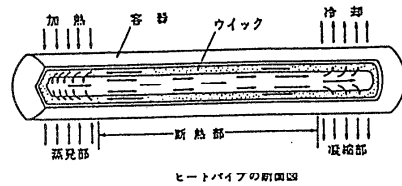


図6 ヒートパイプの断面図

表1 ヒートパイプの構成材料

動作液	水、メチルアルコール、エチルアルコール、アセトン、フロン11、ナトリウム、カリウム、リチウムなど
ウイック材	金属性網（銅、ニッケル、ステンレス）、焼結合金など
密閉容器	銅、ステンレス鋼、ニッケル、タンダスチン、モリブデンなど

表2 おもな動作液と使用温度範囲

動作液	融点〔℃〕	沸点*〔℃〕	使用温度範囲〔℃〕	温度領域
ヘリウム	-272	-269	-271~-269	極低温
窒素	-210	-196	-203~-160	
アンモニア	-78	-33	-60~100	常温
フロン11	-111	24	-40~120	
フロン113	-35	48	-10~100	
アセトン	-95	57	0~120	
メチルアルコール	-98	64	10~130	
エチルアルコール	-112	78	0~130	高温
水	0	100	30~200	
サーメックス	12	257	150~395	
水銀	-39	361	250~650	
セシウム	29	670	450~900	
カリウム	62	774	500~1,000	
ナトリウム	98	892	600~1,200	
リチウム	179	1,340	1,000~1,800	
銀	960	2,212	1,800~2,300	

*大気圧での物性値を示す。

が考えられる。

図7に現在の利用状態を示す。

- (1) 熱源とヒートシンクとを離しておく。
電子機器、音響機器、モータ、金型の冷却の性能向上、排熱利用、温冷分離の熱交換機。
- (2) 等温性がある。
人工衛星の外殻、電子部品の等温化、調理用厨房機器
- (3) 熱流束を変換し得る。
原子炉の熱電子発電機
- (4) 温度制御ができる。
宇宙船用の温度制御
- (5) 熱ダイオード性と熱スイッチ性

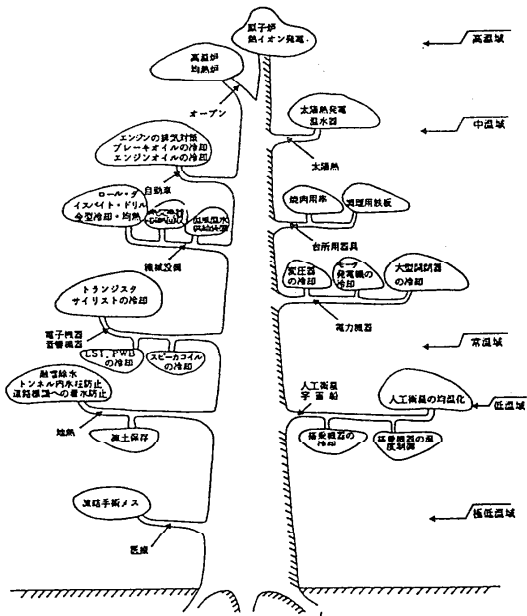


図7 ヒートパイプの利用用途

6. ヒートパイプの寒冷地域での使用例

冬期の降雪による着氷、凍結、つららの発生など交通、生活面での防止対策に利用願望が多い。しかし、資源問題、コスト、保守管理などから普及の制約がなされているのが現状である。この点、建設費は割高でも、自然資源の地熱などの利用システムの開発がなされてきた。特に土壤凍結用に使用した、アラスカパイプラインの例について述べるとする。米国、アラスカ州を全長1,280 kmの石油パイプが、1968年に計画され、約60億ドルをかけて、1977年に完成した。北極海に接するブルドー湾から、永久凍土地帯を横切って、太平洋岸の不凍港バルデールまで、60℃に加熱した原油の圧送が開始した。このとき、この熱が地面に伝達されると、永久凍土は融解し、パイプの支柱は沈下したり、その後の凍結による凍上で破壊される。また、永久凍土の融解は、コケ類を主食とするトナカイの死滅に導くものであった。こうした、自然環境の保全のため、図8に示す垂直支持杭の内側にヒートパイプを取り付け、土壤を冷却し熱が下に伝

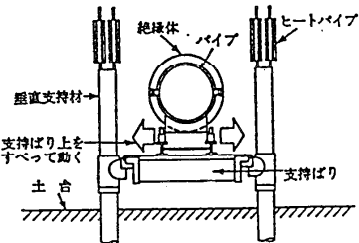
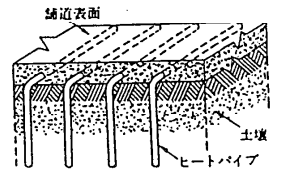


図8 アラスカのパイプラインでのヒートパイプ利用



地熱利用のヒートパイプ融雪・凍結防止システム

図9 ロードヒーティング用のヒートパイプ

わらないようにした。このとき、使用したヒートパイプは約13万本といわれ、作動寿命は30年を保証している。

我が国では、道路の融雪を目的として、地熱や温泉などの排熱を利用して図9に示すように、ヒートパイプの放熱部を舗装表面に埋め込み、冬期間の融雪に成功している。その他、公共施設の玄関先、歩道および駐車場の融雪にも利用されている。

7. ヒートパイプによる人工永久凍土と低温貯蔵庫

冬期間の寒冷気候を利用し、土壌を深くまで凍結させた後、その凍結した土層内に農作物を長期的に貯蔵できることが判明した。しかし、単に自然条件のみで完全に土壌を凍結させても、その凍結の深さは1m程度であるため、その貯蔵量は限られ、安定して市場に出荷できる程ではない。凍結土層を4mまで増大させるためには、熱伝素子であるヒートパイプの利用が不可欠である。1984年より、ヒートパイプの土壌凍結効果の現地試験と調査を続けてきた。その結果、ヒートパイプは厳寒な冬期の寒冷気温のもとで、作動液圧、パイプ内の構造などの改良により、土中深くまで凍結できることが判明した。そこで1987年12月に帯広畜産大学の構内に、小型の低温貯蔵庫のモデルプラントを構築し、内部に馬鈴薯などを貯蔵し、性能試験を開始した。(写真1)

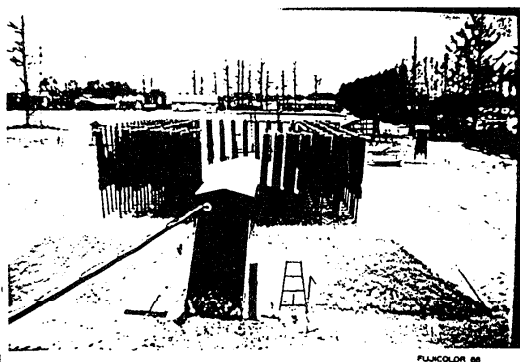


写真1 畜産大学構内の低温貯蔵庫

低温貯蔵庫の原理と特徴

すでにヒートパイプの原理と特徴は述べたので詳しくは説明しないが、地面に鉛直に埋設されたヒートパイプは、地中から熱を吸収し地上のフィンから放熱し、土壌温度を零度以下に低下させる。土壌水は冷却されて氷となってその場に保存される。夏期になって外気温が上昇して

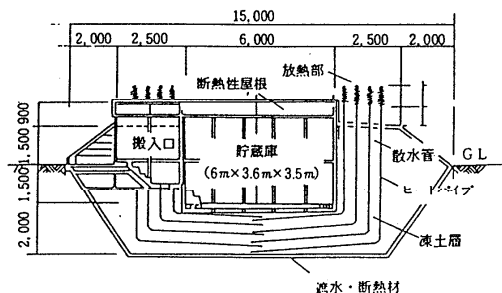


図10 低温貯蔵庫のプラント構造図

も、ヒートパイプの熱ダイオード性により、暖かい熱は地中に伝達されない。その結果、冬期間に形成された凍結土層は断熱材に取り囲まれているため、容易には融けず低温状態が持続され、その内部の貯蔵物質は保存される。自然寒気を利用するため電気やその他の動力を一切必要としないので従来の冷蔵庫と大きな差があり、ランニングコストを必要としない省エネルギータイプの低温貯蔵庫である。そして、氷の潜熱を使用するため、貯蔵温度と湿度はほぼ一定に保持される。極めて簡単な構造であることから、貯蔵庫の耐久年数は30年以上と考えられる。

8. 貯蔵庫の構造とヒートパイプの形状

図10に示すように貯蔵庫の空間の寸法は、幅3.6 m、奥行き6.0 m、高さは約3.6 mであるため、庫内容積は約70m³からなり鉄骨、ジオテキスタイル不織物（テンサーSR1）で造られている。さらに、地盤の肌落ちを防ぐためその外に織物（クラフトル土木シート）を挿入した。屋根は木セメント板、断熱材（カネライトフォームF1）および防水シートの順に構成されている。

貯蔵空間を囲む形で、厚さ約2 mの凍土が構築されるように、216本のヒートパイプが50cm間隔で4列になるように敷設した。パイプは直径46mmのSUSコルゲート、ステンレス管からなる。12.07 mの最長パイプはL字型に1/10勾配で貯蔵庫底部の長手方向に平行に2.0～3.5 m深さに埋設した。7.8 mの最短パイプは貯蔵庫長手方向に鉛直に敷設した。地上に約2.4 mほど突き出たヒートパイプの上部には凝縮部としてアルミ製フィンが、大きさ20×20cmの正方形で1cmヒッチで170枚取り付けられている。

凍土、パイプおよび庫内温度の測定は、C-C熱電対線を使用し、温度計測用の小型データロガーとパーソナルコンピュータを結合し、フロッピーディスクユニットで毎日3時間毎に、50点の測定値を記録した。測定位置は、L字型でフィン部、地盤内3断面を、そして直管型でフィン部、地盤内2断面とした。貯蔵庫内は底部、側壁、中央、天井部そして屋根の6箇所とし、その他に厚さ10cmの地盤断熱材の表裏3箇所とした。

直管型はフィン温度に対してパイプの先端でわずかに10%程度の温度差しかなく、この低温で土を凍結させることが分かった。これによって2 m以上の厚さをもつ凍土が形成された。L型パイプは

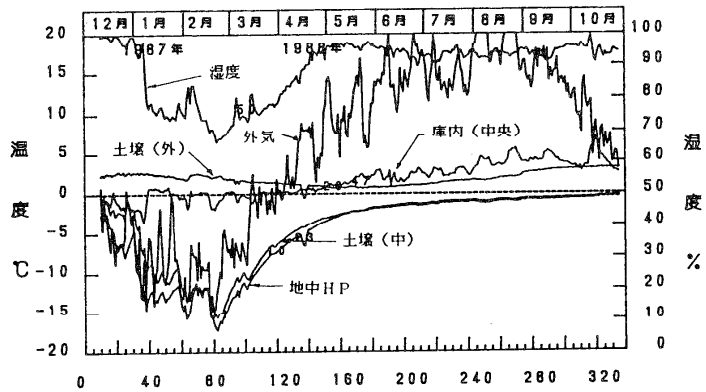


図11 貯蔵庫内の温度・湿度と経過日数

本格的寒波の到来した1月で急激な温度低下をもたらし、底面では -8°C まで達した。

図11に気温、庫内中央温度、ヒートパイプと地盤の温度の経時変化を示す。また、表3に代表的な各地点の月平均温度を示す。冬期の2月までは庫内温度はマイナスとなって冷え過ぎの傾向がみられ、パイプの数が予想より多かったため、今後は多少の対策を考慮する必要が生じた。他方、3月以降の温度状態は良好で、完全に永久凍土がつくられ、貯蔵物質に大きな効果をもたらすことが判明した。最暖月の8月でも庫内は 4.2°C の適温を維持したため、2~3の問題はあるものの十分に実用できる技術と考える。

表3 永久凍土低温貯蔵庫の温度、湿度の月平均値

測定地点	12月	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月
気 温	-6.7	-9.7	-10.8	-3.2	4.7	9.9	15.0	14.2	19.5	14.7
フィン温度	-6.5	-10.0	-0.4	-2.7	5.6	10.4	15.4	14.6	10.8	15.0
庫内湿度	97.9	90.0	73.3	76.7	89.0	96.1	93.6	93.1	93.2	93.8
庫内天井	-1.5	-0.5	0.6	0.9	2.5	4.7	5.8	6.6	7.9	5.9
庫内中央	-1.2	-0.3	-0.3	-0.1	0.5	1.7	2.2	2.6	4.2	4.2
側壁温度	-1.8	-3.8	-3.5	-2.4	-0.9	0.6	1.4	1.7	3.1	3.3
床面温度	-1.1	-6.2	-2.8	-3.0	-1.0	1.6	2.2	2.3	4.1	4.2
ヒートパイプ										
GLライン3	-2.3	-6.5	-6.4	-3.5	-1.1	-0.1	0.6	1.2	2.4	2.9
12	-2.2	-8.7	-10.7	-7.3	-3.6	-2.1	-1.5	-1.1	-1.0	-0.7
直管GL33	-5.4	-13.3	-13.6	-4.7	3.0	7.9	12.9	12.6	17.2	13.4
35	-0.2	-8.9	-6.8	-5.5	-2.9	-1.7	-1.3	-1.0	-0.8	-0.6
L型底21	-1.1	-10.9	-5.3	-6.3	-3.1	-0.9	-0.5	0.3	1.4	2.0
23	-5.4	-13.1	-14.2	-9.7	-4.9	-2.3	-1.4	-1.0	-0.8	-0.6

1. はじめに

ヒートポンプは我国において、冷房と暖房が一台で可能な空調システムとして目ざましい発展を遂げてきた。

ヒートポンプの熱源としては、手近で豊富に得られ、しかも採熱部が簡易かつ安価な設備で済むといった利点から、空気熱源が主流となっている。

しかし北海道のような寒冷地では、低外気温度時の能力低下や着霜などの問題があり、本格的な普及に至っていないのが現状である。

当所では、厳寒期にも安定した能力を発揮できるシステムとして、地中熱を利用したヒートポンプの研究開発に取り組んでいる。このシステムは、地中に埋設した熱交換器（以下、採熱管という）に、不凍液等の二次冷媒を循環させるグラウンドカップル方式と、サイクル内のフロン冷媒を直接循環させる直膨方式⁽¹⁾があるが、ここでは、グラウンドカップル方式の研究開発状況について述べる。

2. 研究開発の概要

本研究開発は、1982年秋より開始され、「土壌の熱伝導解析」、「ヒートポンプ機器の開発及びフィールド試験」、「採熱管理設機の開発」の三テーマに分類されている。

(1) 土壌の熱伝導解析

土壌の熱伝導の理論解析を行い、シミュレーション化とその実証のためのフィールドにおける連続採熱、蓄・採熱試験の実施。

(2) ヒートポンプ機器の開発及びフィールド試験

機器の設計、性能試験及びフィールド試験による機器システムの技術的評価。

(3) 採熱管理設機の開発

採熱管の地中への埋設効率向上を目的とし、軟質から硬質土壌（N値50程度）での実証試験の実施。

3. 土壌の熱伝導解析

地中温度の季節変化、熱伝導率等を測定し、理論解析によるシミュレーションと実証試験の結果から任意の土壌における蓄・採熱量を把握する手法を確立する。

3. 1 地中温度の季節変動

図-1に、札幌市内、砂礫土壌における年間の地中温度の変化の実測値を示す。

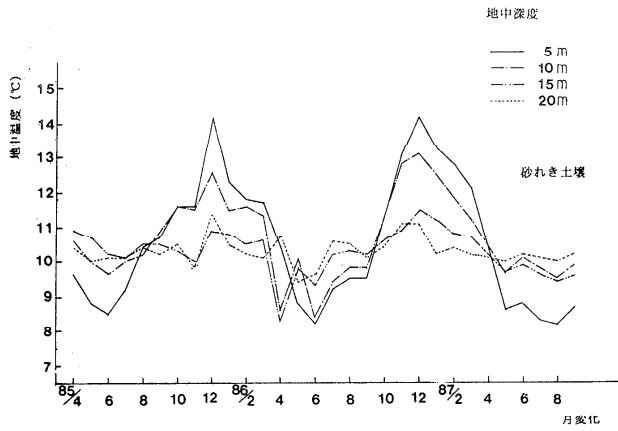


図-1 年間の地中温度変化(札幌市内、砂礫土壌)

これより、

- a. 地中温度は深度が10m程度までは季節により変化する。
- b. 温度変化は、季節変動の影響をほぼ半年遅れで受け、夏場に低く冬場に高い値となる。

3. 2 土壌の熱伝導率

図-2に、札幌市内の4地点で測定した土壌の熱伝導率を示す。

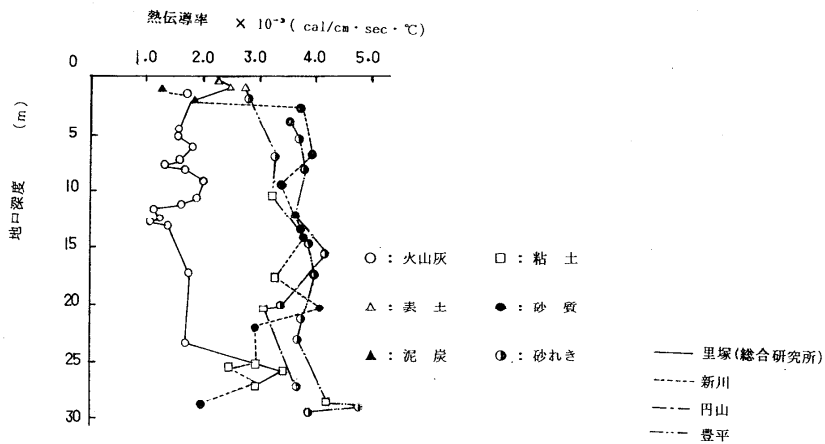


図-2 土壌の熱伝導率

これより、

- a. 土壌の熱伝導率は、地質などの条件により変動する。
- b. 火山灰土は、他の土壌に比べ熱伝導率が小さい。

3.3 連続採熱，蓄・採熱試験⁽²⁾

長期間にわたる地中からの採熱挙動において，採熱量の減衰特性を把握するための連続採熱試験，また，蓄・採熱の繰り返しによる地中の熱挙動を把握する蓄・採熱試験を研究所構内で実施した。

試験は，恒温装置で一定の温度に設定された不凍液（エチレングリコール30%水溶液）を，採熱管に循環させて行なった。

表-1に試験条件を示す。

表-1 試験条件

項目	仕様
採熱管形状	60.5 mm (直径) 20.0 m (長さ)
不凍液流量	6.0 l/min
〃 温度	
(連続採熱)	0.0 °C*
(蓄・採熱)	30.0 °C (蓄熱時) 0.0 °C (採熱時)
試験土壌種類	粗粒火山灰土
〃 熱伝導率	0.54 kcal/m·h·°C (平均)
初期土壌温度	9.0 °C

測定項目は不凍液流量，不凍液温度，および土壌温度で3時間間隔で測定を行ない，1日8回の平均値をその日の代表値とした。

熱量は，採熱管の出入口における不凍液の温度差に流量と熱容量を乗じて求めた。

測定データは，15日の移動平均値を用いて整理した。

*試験開始当初温度制御の不備から，必ずしも0.0 °Cを保っていない。

図-3に，連続採熱試験における採熱量の実測値を，シミュレーション計算結果と比較して示す。シミュレーション計算は差分法を用いて行った。

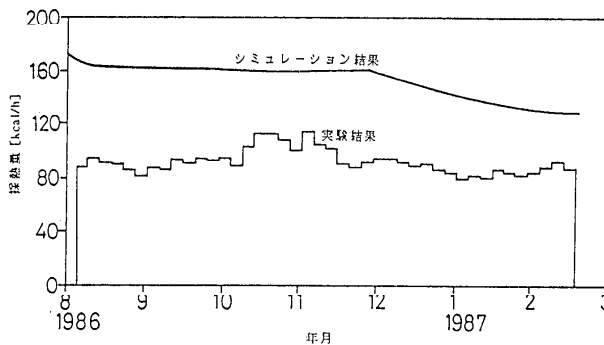


図-3 採熱量の変化（連続採熱試験）

図-4に、連続採熱試験における深さ12mの土壤温度変化の実測値をシミュレーション計算結果と比較して示す。

パラメータは管からの距離である。

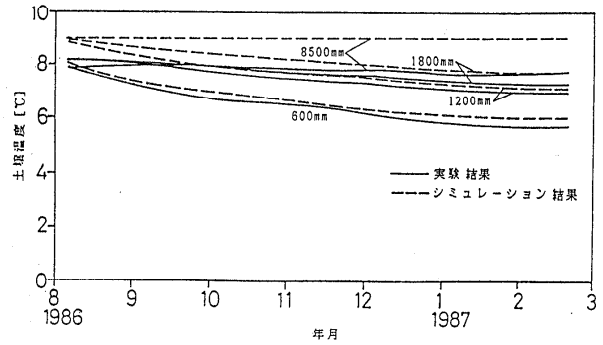


図-4 土壤温度変化（連続採熱試験）

図-5に、蓄・採熱試験における熱量の実測値を、シミュレーション計算結果と比較して示す。

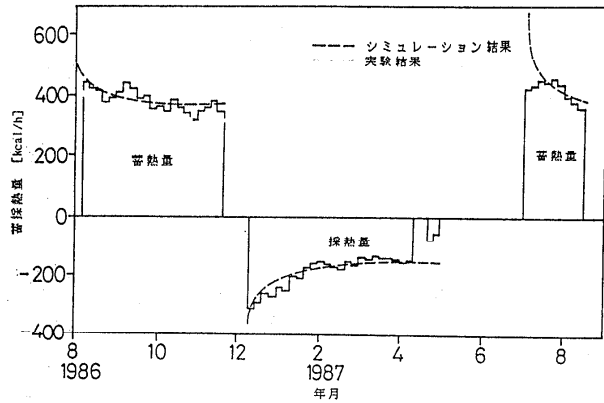


図-5 熱量変化（蓄・採熱試験）

図-6に、蓄・採熱試験における深さ12mの土壤温度変化の実測値をシミュレーション計算結果と比較して示す。

パラメータは管からの距離である。

シミュレーション計算結果は、実測値と良く一致することから、任意の土壤における熱量、地温変化を推定することが可能となった。

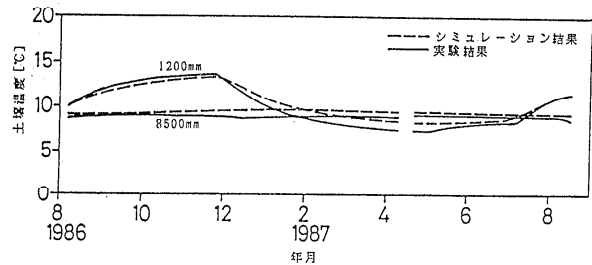


図-6 土壤温度変化（蓄・採熱試験）

4. ヒートポンプ機器の開発及びフィールド試験

本システムの北海道における適用性を調査するため、当所において試作機を開発し、道内の代表的な10都市でフィールド試験を実施した。

システムの概要を図-7に、また、試作機の仕様を表-2に示す。

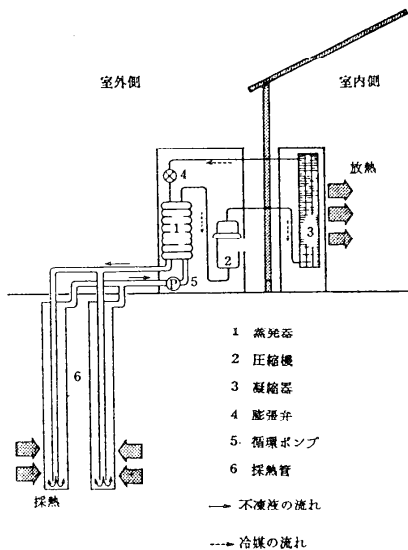


図-7 システム概要図

表-2 試作機の仕様

暖房能力	5,500 kcal/h
暖房面積	30m ² (普通断熱仕様)*
圧縮機	全密閉ロータリー式, 1.9kW 定格
電源	3相, 200v
採熱管	50φ, 20mの鋼管(垂直埋設)×7本
採熱量	4,320 kcal/h
冷媒	R-22
二次冷媒	エチレングリコール 30%水溶液
成績係数	2.8

*想定暖房空間は、居間(12畳)+台所(6畳)

1985年11月から約1年間の試験の結果、

- (1) 開発機は、道内の全域で使用が可能である。
- (2) 採熱管の採熱量は、ほぼ 20 ~ 25 kcal/h・mであった。
- (3) 火山灰土壌では、熱伝導率が低いなどの原因で、10~30%の採熱量低下がみられた。
- (4) 暖房期間中の機器の成績係数は、使用条件により異なるものの、2.3~2.8を達成した。
- (5) 厳寒時においても、良好な暖房感の評価を得た。(モニター70%)
- (6) 快適な冷房感の評価を得た。(モニター100%)

5. 採熱管理設機の開発

採熱管の地中への埋設は、従来ボーリング工法により行われてきたが、工事費が高くシステムの経済性という面で非常に不利な条件となっていた。

当所では、埋設費のコスト低減を図るため採熱管理設機の開発を行い、土壌の硬さ別による埋設工法を設定した。

土壌の硬さ	埋設工法
N値30以下 N値50以下	管の回転圧入方式 オーガによる穿孔掘削方式

管の回転圧入方式は、管先端に切り刃を取り付けて直接管を埋設する工法のため、従来のボーリング工法に比べ大幅なコスト低減を可能にすることができた。また、穿孔掘削方式については、注水作用による掘削効率の向上を含めた技術評価を行っている。

さらに、地質ごとの採熱管理設コストの計算を容易にするため、北海道の地質マップを作成した。

下の写真に採熱管理設機の外観を示す。

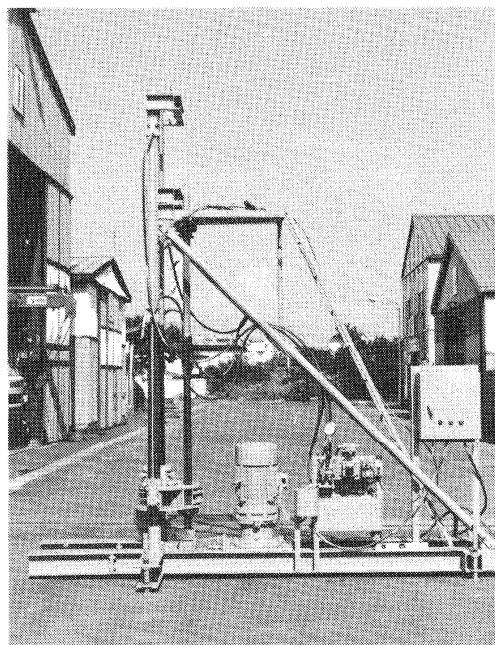
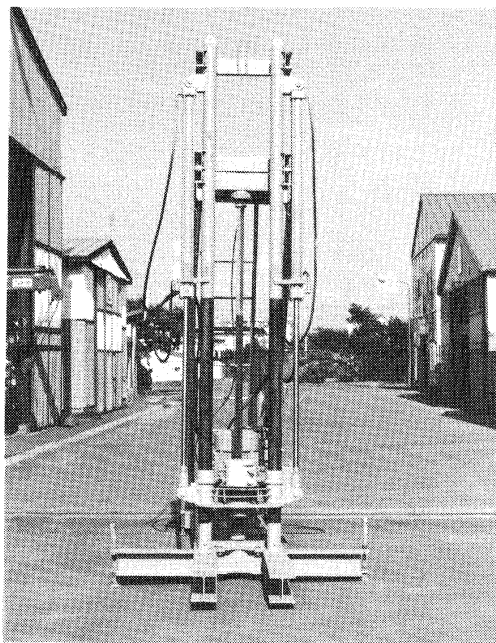


写真 採熱管理設機の正面（左）と側面（右）

6. おわりに

地中熱源ヒートポンプシステムの研究開発により、土壌の熱特性、機器の能力特性を把握することができた。また、本システムの道内における適用可能性も、実証することができた。さらに、イニシャルコスト面において採熱管理設工法の確立により、従来のボーリング工法に比べ、大幅な採熱部コスト低減も可能になった。

しかし、本システムは空気熱源のヒートポンプシステムに比べ、厳寒期における高効率な運転が可能であるが、地中埋設部のイニシャルコストが依然として高いことから経済的に不利となっている。

現在、イニシャルコストの一層の低減を目指し、採熱管本数の低減化対策（効率的な採熱手法の把握）、効率的な採熱管理設工法の確立といった、より経済性を求めた技術開発を行っている。

また、地中熱源ヒートポンプのもう一つの方式である直膨方式は、二次冷媒の駆動動力の低減、冷媒／二次冷媒の熱交換器の削減といったイニシャル、ランニングの両コストを低減できるシステムであり、その開発も積極的に行っている。

以 上

文 献

- (1) NEWS LETTER : IEA heat pump center, Vol4 , No.4, Dec'86
- (2) 落藤 澄 他：長期土壌蓄・採熱のパイロット実験とシミュレーション，
空気調和・衛生工学会 昭和63年度学術講演会講演論文集，昭和63年
9月

ソーラヒートポンプメタン発酵システムにおける熱収支

金山公夫、馬場 弘 (北見工大)

佐藤雅紀、佐久間忠秋 (ホクレン農総研)

1. まえがき

本研究開発は北海道東北部(網走郡東藻琴村)に位置する北見畜産公社において、当地域の有望な太陽エネルギーと、と場排水からの回収熱を熱源として、動物解体時に排出される処理水の濃厚廃液を固定床式メタン発酵システムに導いて嫌気性発酵を行わせることによりメタンガスに変換し、バイオマス資源の有効利用を図ろうとする実証試験である。本事業は科学技術庁資源調査所委託の「はまなすプロジェクト」^{1)、2)}でホクレン農業総合研究所と北見工業大学が昭和57年度から6カ年計画で実施した結果である。

2. 年度毎事業概要

昭和57年度：斜網地区8カ町村の産業廃棄物のバイオマス資源の利用状況調査。

昭和58年度：ソーラシステム(住友金属工業製)の設置と性能測定。

昭和59年度：固定床式メタン発酵システム(神鋼ファウドラ製)の発酵槽の設置および性能測定。

昭和60年度：固定床式メタン発酵システムの付属装置の一部を設置し、予備実験を行う。

昭和61年度：固定床式メタン発酵システムの残り部分を設置し、予備実験。

昭和62年度：ソーラヒートポンプメタン発酵システムが完成し、本システムの本格稼動による総合的性能測定と評価。

3. メタン発酵システム

メタン発酵槽(リアクター、70m³)内に流入した排水は酸生成菌により低分子の有機酸に分解され、次にメタン生成菌によりメタンと炭酸ガスが生成される。メタン発酵は28~32℃の中温にて行われるため、この熱源はCFシートを用いた空気式集熱器で得られた太陽熱と、ヒートポンプによりシステム処理水から回収された排熱で賄われる。発生メタンガスは脱硫塔、除湿器を経てガスホルダー(60m³)に貯えられ、温水ヒーターで燃焼させて公社厚生棟の暖房、給湯用の温水として利用される。昭和62年度は発生ガスの一部は瞬間ガス湯沸器に供給して温水を得て、リアクター補助熱源とした。

4. システムフローシート

図1に固定床式メタン発酵システムのフローシートを示す。

図2に本システムの熱授受関係をブロック図で示す。

原水は第1熱交換器(17.6m²)で予熱され、リサイクル水と合流してリアクターに流入する。ここで嫌気性メタン発酵処理されて原水はサージタンクを通り、リサイクル水と処理水とに分かれる。処理水は第1熱交換器で原水を予熱しさらに第3熱交換器(3m²)でヒートポンプの低熱源となって排出される。リサイクル水は第2熱交換器(1.6m²)で太陽熱およびヒートポンプ供給熱によって加熱される。太陽集熱器(60m²)およびヒートポンプ(5.5KW)からの熱は蓄熱槽(3.5m³)に蓄熱され、リアクター入口温度が設定値以下になった場合に自動的に供給される。一方、ヒートポンプは蓄熱槽の水温が40℃以下になった場合に運転する。ソーラシステムは蓄熱槽の水槽により風洞内の温度が高い場合に自動的に運転する。

本システム全体の熱平衡式は次の通り。

$$H_1 + H_2 + H_3 + H_4 + H_6 = H_5 + H_6 + H_7 + H_L$$

ここで H_1 : 原水のエンタルピー

H_2 : 発酵熱

H_3 : ヒートポンプの消費電力熱当量

H_4 : ソーラシステムから蓄熱タンクに供給される温水のエンタルピー

H_6 : 発生ガス燃焼熱

H_5 : 処理水のエンタルピー

H_6 : 発生ガスのエンタルピー

H_7 : 蓄熱タンクからソーラシステムへ戻る温水のエンタルピー

H_L : 放熱損失、(熱量の単位はMJ/h)。

5. システムの性能測定の結果

6年間の本プロジェクト研究期間中の最終年度(昭和62年6月から63年3月まで)の測定結果を考察を加えて以下に述べる。

図3にCOD負荷とガス発生量の月変化の推移を示す。メタンガスは7月末は140 m³/日、8月は170 m³/日、9月は200 m³/日および12月上旬は250 m³/日とCOD負荷の増加に比例して発生量が増加し、最大発生量は11月8日の364 m³/日であった。12月後半から発生量は減少し、COD負荷に追随しなくなったのは負荷のかけ過ぎによるものと思われる。

図4にシステムのCOD負荷、リアクター温度およびガス発生量の月変化を過去の測定値と比較して3ヶ年分を示す。61年度が60年度に比べてガス発生量が多いのはリアクター温度

が高かったためと考えられるが、62年度の結果をみるとリアクター温度が低いにもかかわらず、ガス発生量は最も多い。これはCOD負荷の増大と原水のリアクター内滞留時間が長くなったためと考えられる。

図5にシステムの熱精算図(エネルギーフロー)を示す。入熱は太陽熱、電力、原水顕熱、ガス燃焼熱および発酵熱で、出熱は処理水顕熱、発生ガス顕熱および各種損失熱量である。

図6に62年11月26日のエネルギーフローを代表例としてあげ、原水供給量当たり(MJ/m²)および単位時間当たり(MJ/h)の尺度で示す。

図7は全測定期間中の蓄熱槽への各種供給熱量、外気温度およびソーラシステムとヒートポンプの稼働時間を5日毎にまとめて示す。

図8はシステムに供給する熱量およびヒートポンプ電力熱当量の割合を示す。

図9に全測定期間中のヒートポンプ成績係数、ソーラシステム集熱量の蓄熱タンクへの蓄熱効率およびシステム全体のシステム成績係数の推移を示す。ヒートポンプ成績係数は全期間中ほぼ4.0と高い値を示し、システム成績係数は11月~12月にかけて6.0~10.5の極めて高い値を得た。

本システムの設計、施工および稼働に際して、特に伝熱学的な配慮および興味のある点は①図10に示すようにソーラシステムの集熱部には炭素繊維シートを用い、集熱効率が高く、システム維持が容易な空気式集熱器(北見工大方式)を採用し、寒冷地において凍結の心配のない産業用ソーラシステムとして適することが実証された。^{3)~7)}②熱交換器は汚水を扱うため第1熱交は1回/月、第2熱交は1回/年および第3熱交は3回/月の割合で洗浄を行い、効率の維持に努めた。③リアクター基礎部から土中への熱損失を防ぐため地下1.5mまで掘下げ、厚さ100mmの発泡ウレタン吹付けを行い、特に外気温低下時にリアクター表面から大気への熱損失を防ぐため、冬期間のみリアクター全体をビニールシートで覆った。④FRP製蓄熱タンクは100mmのスタイロフォームとコンパネで覆い、熱交換器およびシステム配管はバルブ類を含めてよく断熱保温を施した。

6. むすび

1) 本固定床式メタン発酵システムは原水供給量100m³/日、原水BOD濃度4000mg/lのときの設計値である150Nm³/日以上メタンガス発生能力が証明された。これは本システムに種々の伝熱上の対策を施したことが、それが本来持っている能力をフルに発揮し得た原因の一つと考えられる。

2) ヒートポンプの成績係数として期間中4.0と言う大きな値を得られたのは低熱源となる処理水の温度が15~18℃と高かったためであろう。システム成績係数は11月の平均で6.5以上を達成できたことにより、本ソーラヒートポンプメタン発酵システムは極めてエネルギー利得の高い性能を有することが判明した。本研究は科学技術庁資源調査所の許可を得て公表

するもので、その御好意に厚く感謝する。

- 文献 1. ホクレン農業協同組合連合会、地域エネルギー総合利用実証調査報告書
(科学技術庁委託)、昭和57~62年度
2. 科学技術庁資源調査所、地域エネルギー総合利用システム実証調査報告、
資料第153号、昭63
3. 金山公夫、馬場弘、樫原正規、日本太陽エネルギー学会第10回研究発表会
講演論文集、昭59、P.145
4. 金山公夫、馬場弘、樫原正規、日本太陽エネルギー学会第11回研究発表会
講演論文集、昭60、P.89
5. 金山公夫、馬場弘、第22回日本伝熱シンポジウム講演論文集、昭60、P.280
6. 日本機械学会、研究協力部会RC-70成果報告書I、昭60、P.29
7. 金山公夫、馬場弘、第7回日本熱物性シンポジウム講演論文集、昭61、P.111

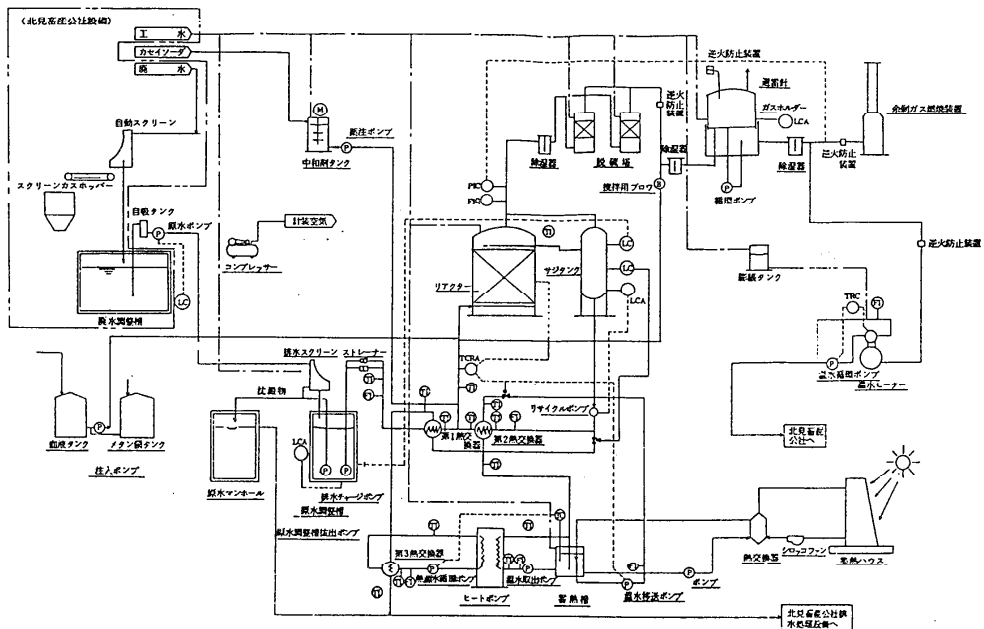


図1 固定床式メタン発酵処理システムのフローシート

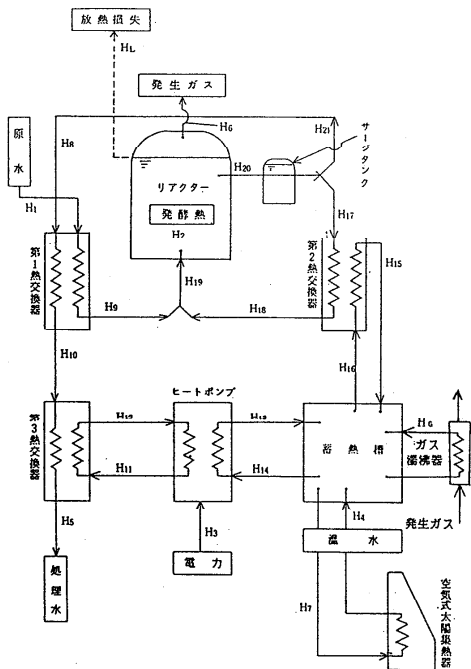


図2 システム加熱系のブロック図

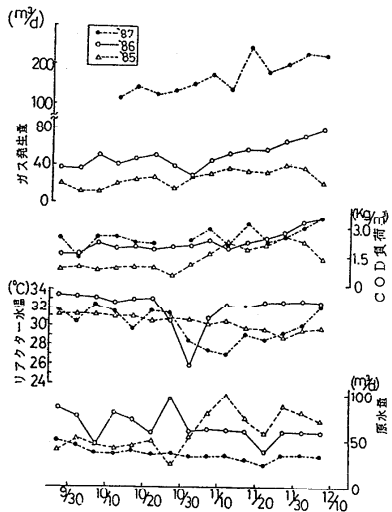


図4 年度毎の各性能値の比較

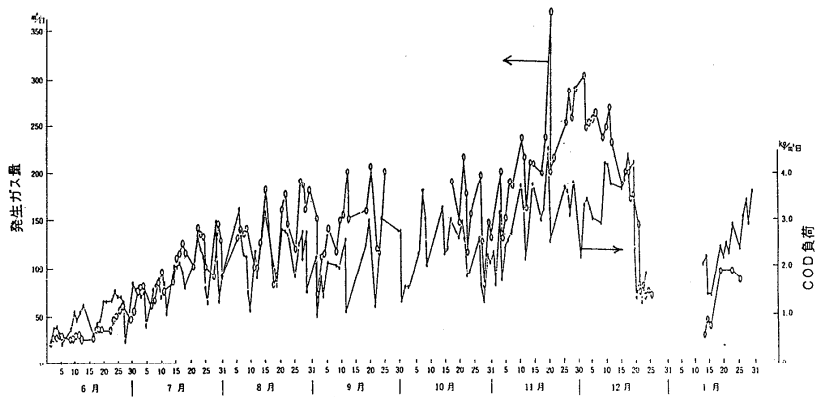


図3 COD負荷および発生ガスの月変化

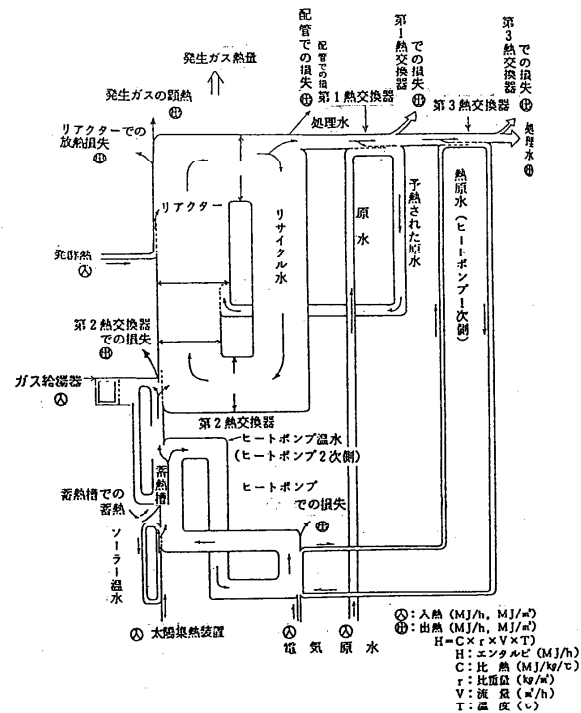


図5 熱精算平衡図の説明

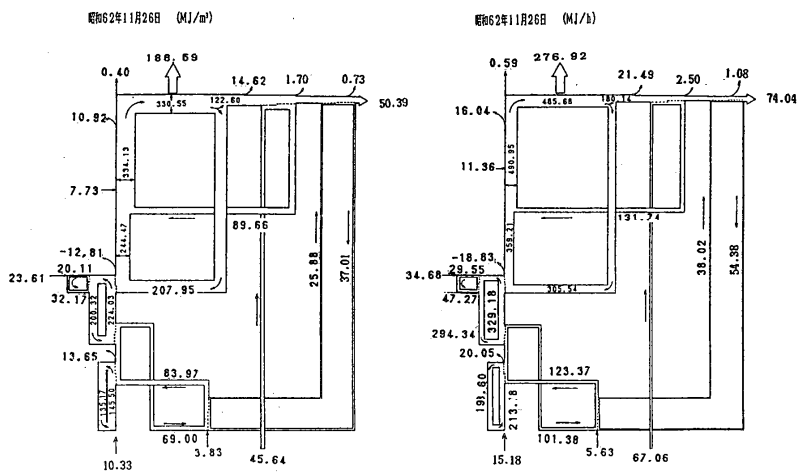


図6 熱精算結果の一例

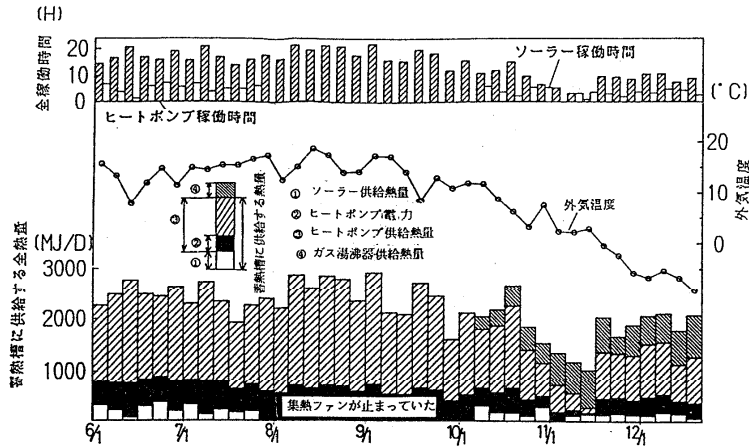
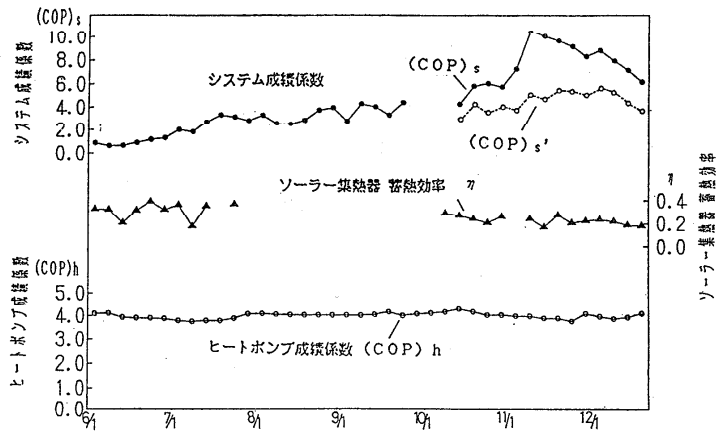


図7 蓄熱槽への供給熱量、ソーラー、ヒートポンプシステム稼働時間、外気温度の月変化



※ (COP)_s'とはガス給湯器に使用されるメタンガスを考慮したもの

図9 各種成績係数および蓄熱効率

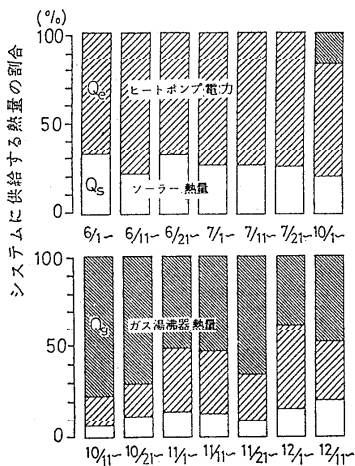


図8 システムの供給熱量の種類と割合の推移

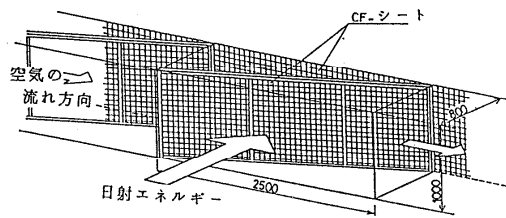


図10 空気式集熱器の集熱部構造

1. はじめに

著者の所属する企業では、エネルギー変換、航空・宇宙、運輸・交通、産業機械、空調・冷凍など、かなり巾の広い分野の製品・システムを扱っており、伝熱工学に関する研究開発のテーマも相当いろいろな方面にわたっている。この数年間、著者自身、社内全般にわたる熱工学の研究開発をコーディネートする任務にも携わっているが、最近の数年ないし10年間は、やはり伝熱研究に期待される内容と研究の環境が変わったと感ぜざるをえない。一企業での経験という制約はあるが、企業における伝熱研究の最近の傾向とそれにまつわる問題点、さらに次の世代に必要とされるであろう伝熱技術をどのように捉えているかを、その背景の考察を含めてまとめてみた。

表題に余りこだわる積りはないが、研究対象とする伝熱現象が同じである以上、企業であろうと大学等公立研究機関であろうと研究に本質的な違いはない筈である。ただ、企業における研究は製品の開発と切り離せないのが普通である。このため、研究テーマの選び方あるいは研究の進め方で多少の差異があることは己むを得ないし、企業での研究活動の中には純粹にみれば必ずしも研究とはいえない開発設計的なものも含まれるので、企業での「伝熱研究」は少し巾を広げて考える方がよいのかも知れない。したがってここでは、伝熱現象そのものだけではなく、伝熱現象にも関係のある周辺の技術を含めて、熱工学的な視野での内容を扱うことにしたい。

2. 最近の伝熱研究の傾向

はじめに、熱工学の発展の母体となった技術分野を歴史的に眺めると、18世紀はじめの蒸気機関の発明以来、20世紀後半の1000MWをこえる巨大規模の発電システムの出現に至るまで、エネルギー変換技術がリード役を果たしてきたといつてよいであろう。特に第2次世界大戦後の4半世紀は、発電用原子炉やロケット機関の研究開発を通じて、熱の移動にともなう種々の問題の研究が盛んに行われ、伝熱工学として体系化されていくとともに、エネルギー以外の技術分野にも伝熱の研究が広がっていった。そして、このような体系化された伝熱工学の知識を駆使すれば、伝熱技術者が日ごろ当面する問題のかなりは一応の解決をつけることができるのが現状である。

しかしながら、すべての製品・システムについてそうであるように、社会的また経済的要求

にもとづく技術の高度化が絶えず求められ、止むことがない。高度化の内容は、高性能化—高速化、高効率化、軽量化あるいは高集積化—と高信頼性、さらには機能の複雑化である。

このような背景から、企業における最近の伝熱研究を特徴づけるいくつかの傾向としては、次の3点を挙げてよいと思う。

- (1) 技術の高度化要求に対応する最適化手法の必要性
- (2) 特殊領域ないしは境界領域の伝熱問題の増加
- (3) 研究コストの高騰の研究形態への影響

このうち、(3)は必ずしも伝熱の分野に限った傾向ではないし、やや異質にみえるかもしれないが、研究テーマの選定やその進め方に対しては大きな影響をもつので、順を追ってあとで触れることにしたい。

最適化手法の必要性

「最適化」については、伝熱面積の最小化といったような単純な最適化が求められる場合もあれば、製品あるいはシステム全体としての目的に沿った最適化が達成されるように伝熱機器を含む多数の構成要素間での複雑な調整が求められる場合もある。後者の考え方は、乗用車や空調機などの量産製品分野と航空・宇宙など一部の高度技術分野ではかなり早くから取り入れられている。そしてこの場合、技術の高度化を追求するほど、相反する要求を調和させ、最適条件を見出すための技術的選択の余地は狭められることになる。このようなケースは、熱に関する分野でも多くなっており、高い熱効率と負荷変化に対する柔軟性を追求した超臨界圧変圧運転ボイラの蒸発器形式が、メーカーによらずにスパイラルワウンド形に辿りついたことはそのよい例である⁽¹⁾。最適化手法を追求する研究においては、製品・システムの中での伝熱問題がどのような役割を担っているかを熟知している必要があり、そのためには逆に伝熱性能が影響を与えるであろう周辺分野の知識、ひいては製品あるいはシステム全体についても相当の知識をもたないと目的を十分に達成できないことが多い。そして最適化手法を作り上げるに当たっては

- (1) 関係する伝熱分野での従来技術の内容の過不足の吟味と不足するデータの補完
- (2) 必要な周辺分野を含む最適化のための伝熱性能予測ツールの開発

が必要であり、キーとなる伝熱技術については代替案を用意しておくことも有効と思われる。

一つの事例として、コンバインド発電プラント用排熱回収ボイラの蒸発器を構成する円形フィン付管群の最適化を取り上げよう。円形フィン付管は空冷熱交換器に数多く用いられており、その伝熱特性は解明ずみと考えられていた。しかし、これは正三角形配列でフィン枚数がある程度多い場合に当てはまるのであって、ボイラでは必ずしもこの配列は採用されない。したがって、最適化のためのツールを開発するには管のピッチを変えた千鳥配列の場合の伝熱特性も系統的に調べる必要があった。これらのデータにもとずいてケーススタディを行った結果、従

来の正三角形配列ではないところに伝熱面積を大中に削減できる最適化の解があることを見出した。ついでに言うならば、実際の排熱回収ボイラでは、フィン付管群とそれを囲むダクトの周壁との間に、構造上避けられない空間を生ずる。この部分は流動抵抗が少ないため、いわゆるバイパス流を生ずるが、これは伝熱にはほとんど寄与しない上、管群の部分のガスの流速が減少するという相乗効果によって伝熱性能に大きな影響を及ぼす。したがって、上述のケーススタディではバイパス流の影響評価を含めての最適化を行っている。

特殊領域あるいは境界領域の伝熱問題

産業界では、従来から熱工学との関係が深いエネルギー、鉄鋼、運輸などの分野の製品やシステムのほとんどは、1970年代から1980年代にかけて成熟期をむかえ、技術的完成度もピークに達した。一方、エレクトロニクスや新素材の目覚ましい隆興が目立つようになった。それにともなって、伝熱研究のリード役にも交代、分散の傾向が現われはじめ、先端分野あるいは次世代の伝熱技術についてもいろいろの機会に論ぜられるようになった。第2の「特殊領域あるいは境界領域」の伝熱問題はこれと重なるものである。

技術の高度化、複合化を進めていくと、従来の伝熱技術の延長上の改良や最適化だけでは限界があり、新しいブレークスルーが求められる状況が出てくる。そのようなブレークスルーは、一つの製品・システムに個有な、特定の分野、特定の目的に有効な伝熱技術であればよく、これを、ここでは「特殊領域の伝熱」と呼ぶことにする。「境界領域の伝熱」については説明す

表1. 特殊領域伝熱・境界領域伝熱のいくつかの例

分類	伝熱現象	目的・効果
無重力下の伝熱 アクティブ法伝熱促進	表面張力対流	・微小重力下での溶融材料内部の対流予測
	EHD 沸騰促進	・微小重力下での沸騰伝熱促進 ・電気的手段による伝熱量の直接制御
プロセス熱制御	多孔質内部物質移動 稀薄金属蒸気流	・製紙乾燥プロセスの熱制御と品質向上 ・真空蒸着装置内の金属蒸気の流れの把握
電磁気応用加熱	誘導加熱（導電体）	・薄鋼板加熱、物体内部からの加熱
	誘電加熱（誘電体）	・紙の水分制御、糊（ゲル）の固化
	赤外線加熱	・表面薄層、塗膜の選択的加熱乾燥
界面物質移動	プラズマ加熱	・超高温発生
	着霜メカニズム 化学反応共存伝熱	・ヒートポンプ着霜抑制 ・触媒反応最適化、還元火炎生成過程追跡

るまでもないが、従来から伝熱はどちらかといえば主役とはみなされていない材料製造・触媒などの化学反応・電磁気応用などに関する技術分野で、伝熱問題に対するブレークスルーを見出すことによって、その分野での新しい展開が可能となる場合がそれである。

表1は、特殊領域あるいは境界領域の伝熱のいくつかの例を示したものであるが、分類は多分に便宜的である。この表に掲げた伝熱現象の大部分は、物質内部の分子運動と電磁波との相互作用、分子レベルでの移動・流れといった「物性論的視点」に立って、その本質を理解する必要がある。また、他のものについても、「微視的な見方」で現象を理解することが望まれる。このような理解の仕方は、これらの伝熱現象に関する知見を目的に沿って応用展開する上で不可欠と考えられる。

研究コストの高騰の影響

企業の場合、研究費には、新たに購入したり製作したりする実験装置のための費用の他に、人件費、過去に揃えた研究設備や建物の償却費など、企業の研究活動に要するすべての費用が含まれるのが普通である。研究コストの高くなる理由はいろいろあるが、結果としてみれば、高価な研究設備のふえたことが人件費を、より正確には研究に費やされるべき時間を圧迫していることになる。このため、一つのテーマに十分な研究時間を費やして研究を行えるのは、研究規模の大きなテーマに限られてくる傾向がある。このことの弊害は、規模の大きい研究費を負担できる分野、いかえると概して市場規模の大きい製品分野ではより一層の技術の高度化が期待できるのに反して、市場規模の小さい製品分野での技術の進歩は余り期待できないため、両者の間の技術ギャップが広がることである。もちろん、これは原則論であり、異分野間の技術転移によってこのような弊害を少なくするような方策も採られている。しかし、将来の技術動向を推測するに当たっては、上に述べたような原則も頭に入れておく必要がある。量産分野と大規模製品あるいは高付加価値製品の分野での技術の高度化は今後とも確実に行われていく筈である。

3. 将来の伝熱研究の方向

将来、進むであろう伝熱研究の方向を見定めるにはその予測がいかに難しいといえども、社会の政治・経済の影響を強く受ける技術全般の動向から、熱エネルギーさらには熱工学に関係ある技術課題を抽出し、整理していく以外にない。技術の動向には短期または中長期といった観点での見方もあるが、ここでは21世紀始めまでを視野に入れて、熱工学の大きな課題を次の3つに分類したい。

- (1) エネルギー変換と地球環境の保全
- (2) 宇宙における熱制御
- (3) プロセスの熱制御

このうち、(1)はCO₂問題にどう対応するかという、まさに地球規模でのエネルギー変換形

態の最適化の課題である。(2)に関しては、宇宙ステーションにおける微小重力下での伝熱現象の制御、発電および真空の宇宙空間への熱除去の問題があり、地上と宇宙ステーションの間を往復する宇宙往還機の推進システムと再突入時の熱遮蔽の問題がある。閉空間という意味では、深海底を対象とする海洋開発機器の動力源についても共通の課題がある。(3)に関しては、金属・紙・プラスチックなど既存材料の高品質化と薄膜蒸着や表面処理による高付加価値化、あるいは新素材、特に複合材料や機能材料製造のためのプロセスを高度な熱制御によって最適化するという課題がある。発熱密度の高い高集積度半導体素子の冷却なども広い意味でのプロセスの熱制御と考えてよいであろう。これらのうち、(2)と(3)については、この特集の中の別の表題でいくつか扱われているので、以下では(1)についての課題を少し詳しく整理してみたい。

CO₂問題の背景

フロンによるオゾン層の破壊について異常気象に端を発したCO₂による地球温暖化という、国境をこえた地球規模での環境問題は、昨年以來、国際的関心事として大きくクローズアップされた。その因果関係に未解明な点が多いにしても、この問題は、エネルギーを大量に消費する人類の活動がもはや地球の環境に何らかの影響を及ぼさずには済まないほど大きな規模になったことを意味している。エネルギーの大量消費にともなう局所的な環境汚染の問題は、1970年代からすでに始まっていた。石炭を主要発電用燃料とするヨーロッパの諸国では、SO_x排出にともなう酸性雨による湖沼酸性化や森林枯死などの環境破壊が発生した。人口密集度が著しくエネルギーの消費密度が特に高い米国のカリフォルニア州あるいは日本では、NO_xによる光化学スモッグの被害が表面化した。NO_xに関しては発生源での対策がとられて一応の効果が表れており、SO_xについても、ヨーロッパでの対応はやや遅きに失した感があるが、発生源対策によって被害を抑制できることが日本において実証されている。CO₂による環境汚染の影響が、これまでのSO_xやNO_xによる環境汚染と本質的に異なると考えられているのは、CO₂の排出量がSO_xやNO_xにくらべて、桁違いに大量であって、しかも蓄積性がある点であり(ただしCO₂は海水にはかなりよく溶解し、植物の光合成に消費される)、この結果、地球の環境に修復不能な変化を与える恐れがあるからである。

CO₂の発生は化石燃料を燃焼させることによって生ずるが、そのCO₂排出量は全世界で1985年に194億トンで、それまでの10年間は年率2.2%でCO₂排出量が増加している。そして1985年の全世界のCO₂排出量のうち約半分は米・ソ・中の3ヶ国によるものであり、このときの日本のCO₂排出量は4.3%である。1988年6月のカナダ政府主催の「変化する気候」国際会議では、2005年にCO₂排出量を現状レベルから20%削減し、最終的には50%削減する目標が提案されている。これによって大気中のCO₂濃度は産業革命以前の約2倍のレベルの560ppmで安定化するというのが最近の推算である。

これが CO₂問題に取り組む際の一応の目標となる数値であるが、CO₂削減のための対策としては次の2つしかない。

- (1) CO₂発生抑制・・・エネルギー利用の効率化
CO₂発生が少ないエネルギー源への転換
- (2) CO₂の固定・・・物理化学的固定
バイオマスによる固定

CO₂発生抑制技術

CO₂の発生を抑制する手段としてのエネルギー利用の効率化は、省エネルギーとエネルギー変換システムの高効率化によって達成されなければならない。日本は、オイルショックの際の対応策として推進した排熱の有効利用などの省エネルギーでかなりの成功を納めたが、さらに高度なエネルギー利用をはかるには、コージェネレーションの全面的な導入を含む広い範囲での熱の利用形態の最適化を考えるべきである。電力用・産業用・運輸用を含めて、日本で消費される化石燃料の50%強は電力エネルギーあるいは動力エネルギーの形に変換して使用される。この電力および動力エネルギーに関しては、エネルギー変換効率を高めることがCO₂を減少させるのに直接的に役立つ。現在の火力発電の送電端熱効率は、世界でもっともよい日本においても36.4%（1985年、高位発熱量基準）である。もし、50%をこえる送電端熱効率が達成できれば、電力量を落さずにCO₂を20%削減する目標は優に達成できる。

運輸用の移動動力源を含めてこのレベルを達成することは、それほど簡単ではないが、一方、熱力学の法則が教える熱サイクルの高温化と、温度レベルに応じていくつかのエネルギー変換方法の組合せによる最適化を行えば、目標の実現は決して困難ではない。現在、もっとも熱効率の高い熱機関は船用の大型ディーゼルエンジンであり、出力軸端での熱効率は49~50%（高位発熱量基準）に達しており、やがて実現されるであろう1300℃級ガスタービンを採用するコンバンド発電プラントでは発電端熱効率46%（同）を目指している。実用化はされていないが高温排熱の利用を前提にしたMHD発電、固体電解質燃料電池、金属蒸気サイクルなど、いくつかのエネルギー変換技術の開発が過去あるいは現在もつづけられている。これらの熱電変換システムと排熱回収ランキンサイクルとの組合せの最適化によって、熱効率50~60%のエネルギー変換システムを実現させるのが、これからの熱工学における最重要課題の一つである。

CO₂排出量を比較すると、石炭を100%とした場合、重油は80%、LNGは液化のための動力消費分を考慮に入れて60%程度である。したがって燃料転換、特に石炭からLNGへの転換も有効である。しかし、資源の有限性を考えれば石炭をすべてLNGにおきかえるわけにはいかず、燃料転換には自ずと限界がある。

CO₂を全く発生しないエネルギー源としては、太陽発電、風力・波力発電、潮力発電、海洋温度差発電、地熱発電、水力発電などの再生可能な自然エネルギーと原子力エネルギーがある。

自然エネルギーは利用面から考えると地域的偏在が著しく、水力と地熱を除けば密度の薄いエネルギー源であり、経済的にも成立する利用技術を確立するまでには相当の開発努力を要するし、量的にも、他のエネルギー源を補完する役割を目指すのが現実的と思われる。原子力については、負荷変化への対応の限界から、その割合を高めるには効率のよい大規模電力貯蔵システムの開発が必要であるし、何よりも社会的受容の限界という他のエネルギー源とは異質な側面があることを常に念頭におく必要がある。

CO₂の固定技術

CO₂固定技術についても、いろいろの考え方があるが、基本的には1日5000万トンを超える膨大なCO₂排出量があり、大気中に一旦分散されたものについては、植物の光合成による固定か、海水による吸収を通じての藻類の光合成および珊瑚の生成による固定しか方法がないことを前提にしなければならない。バイオマスによるCO₂固定の促進は、将来はCO₂問題を解決する本命の技術と目されるが、どの程度までそれが可能なのか、未だ解明されていないことが多い。

CO₂の発生場所が限定されている場合には、CO₂の工業的回収・固定が検討の対象となるが、CO₂の固定・回収に要するエネルギーの増加分に見合う以上のCO₂削減効果がない限り、その技術は無意味である。回収したCO₂を固定する方法には、液化して深海底に投棄する方法や水素分子を加えるなどの化学反応操作によって再資源化する方法が考えられているが、上述の観点からみるとかなり疑問のある方法もあるし、深海底投棄の場合の環境への影響評価は未知数が多くて進んでいない。

長期的にはCO₂の放出を抑制し、さらにCO₂の固定化を促進することによって、自然界における炭素の循環を安定した一定のレベルに落ち着かせなければならない。このためには、単独のCO₂発生の抑制手段やCO₂の固定手段によるCO₂の削減だけでなく、水素利用サイクルなど新しく開発されるいくつかの方法手段も織り込んで互いのシステムの長所を活かし、短所を補完し合うことによって、最終的には地球全体としての最も適切なエネルギーの利用体系を構築する必要がある。

参考文献

- (1) 岩淵 牧男、羽田 寿夫、蒸気発生器における熱交換技術、エネルギー・資源、7巻、4号(1986)、p.359
- (2) CO₂問題については日本経済新聞ほか日刊紙の記事および官公庁統計資料を参照した。

1. はじめに

東芝はエネルギーとエレクトロニクスを大きな二本柱にした総合電機メーカーであるので、対象とする機器は極めて広範囲に亘っている。最近の技術進展と社会のニーズに対応し、新しい機器の開発と従来製品のコンパクト化や高性能化、さらには安全性などの面での高度化などの点において、伝熱・流動は重要な役割を担っている。

伝熱・流動がからむ事業・機器分野は電気・機器の材料製造、生産技術から電子機器、家電機器、エネルギー機器、産業機器、原子力機器、宇宙・航空機器などに分類できる。

電子機器では電子デバイスの製造過程、計算機の筐体の設計、LSI基板等において熱特性の評価が重要である。家電機器ではエアコン用熱交換器、冷凍機、暖房機器、さらに空調室内の気流評価など対象機器、課題が多い。

エネルギー機器としては超々臨界圧蒸気タービン、ガスタービンの翼の冷却技術、コンバインドサイクル発電用排熱回収ボイラ、さらには地熱や海洋温度差発電用熱交換器等や、回転機、変送電、車両機器などの冷却と電気絶縁技術の兼ね合いなどがある。また、超電導マグネットの極低温冷却、燃料電池の冷却・熱交換技術なども挙げられる。

原子力機器ではBWRにおける沸騰による限界熱流束、二相流、安全性にからむ炉心冷却特性、FBRにおける液体ナトリウムを使った熱交換器や原子炉内の熱流動評価、さらに原子燃料再処理や使用済燃料輸送時などにおいても熱的課題が多い。

特に最近ではスーパーコンピュータによる熱流動解析が急増し、以上述べてきた各分野に利用され、各機器の高性能化に役立っている。

2. 各分野における研究の現状と展望

2.1 材料製造

半導体の素子に用いられているシリコンや化合物半導体の単結晶はチョコレート法、フローティング法、ブリッジマン法によって製造されている。

シリコンの結晶引き上げ 結晶の大型化の進んでいるシリコンの単結晶ではチョコレート法によって製造されているが、結晶の直径の大型化、結晶の生産性を上げ、品質向上させるため引き上げ速度の増加、不純物、ドーパントの均一化が要求されており、そのためにはシリコンの融液内の流れの最適化、結晶内の温度分布の制御が必要である。しかし、温度・流速は

結晶を実際に引き上げている段階で測定することや、適当な媒体を用いた実験で流れ・熱の相似性を満足させる無次元数を実機と一致させることは不可能である⁽¹⁾。そのため計算機によるシミュレーションを行った。ルツボ内のシリコンの融液は結晶とルツボの回転による強制対流と、結晶・ルツボ間の温度分布によって生じる自然対流とが共存しており、さらに結晶と融液の界面形状は熱的・幾何学的条件によって変化するので結晶内の温度分布と融液の流れ・温度を同時に数値解析によって解いた。結晶の界面の形状は融液の流れに影響を及ぼし、結晶に取り込まれる不純物、ドーパントの濃度分布に影響を及ぼすので重要である。融液の対流によってルツボから酸素が結晶に輸送されるので、これを防ぐため超伝導の磁場を印加してこれを抑制することが研究されている。また融液中にはレーリー数が大きくプラントル数が小さい場合には温度変動の発生で結晶にストライエーションを発生するが、磁場を印加することによってこれを抑制できる。磁場の印加についてはこれを融液の液面に直角方向に印加する場合と、水平方向に印加する場合とがある。直角方向に印加した場合は流れと熱は軸対称と仮定することが可能であり、今までに多くの解析が行われているが、実際には水平方向に磁場を印加する方が有効である。そこで、結晶の近辺の流れを知るためこれを数値解析によって求めた。磁場は非軸対称になるので三次元流れとして求めた。磁場を印加しない場合にも自然対流はレーリー数が大きいと一般的に流れは軸対称にならないことが実験的に知られており、三次元流れとして計算することが必要である(2.9節関連)。

化合物の半導体の単結晶引き上げ GaPやGaAsなどのⅢ-Ⅳ族の化合物半導体は液封じチョコラルスキー法を用いて大口径化することを試みている。融液からP、AsなどのV族の蒸気が蒸発するのを防ぐためB₂O₃などで融液の表面を覆い、かつ数十気圧に保持して引き上げを行うものである。これらの結晶では臨界剪断応力が低くなって転移が発生し易く、結晶内の熱応力を小さくすることが重要であり、システム全体の温度制御が必要である。

2. 2 生産技術

半導体など電子デバイスの製造環境では塵埃やオイルミストなどの浮遊微粒子を効率的に除去し、デバイスに付着させないことが重要である。当社はクリーンルーム内のレイアウトや製造装置の構造を検討するため、これら微粒子の挙動を数値解析する技術を開発している。空気中の微粒子挙動は次の3つの要因に支配されると仮定する。すなわち、

- 1) 分子運動論的效果……………ブラウン拡散、熱泳動
- 2) 流体力学的効果……………気流による輸送、乱流拡散
- 3) 場に存在する体積力の効果…重力沈降、静電気力による誘引

それぞれの要因を定式化し、数値解析した。図1はクリーンルーム内の装置上方に発塵点を想定した場合の確率的微粒子濃度を表わしている⁽²⁾。粒径は1 μm以上の比較的大きな粒子の場合には重力の影響が大きく、装置・床面に沈着するが、粒径が小さくなると拡散の影響が

増大し、粒径 $0.1\mu\text{m}$ 以下では完全に懸濁状態となることがわかる。将来はこの解析手法を対流中、真空中などの問題に拡張し、適用範囲を拡げていく。

2. 3 電子機器

筐体熱設計へのCAEの利用 最近の電子機器は大小の計算機を始めとして小型化、高速化傾向のため熱問題が深刻になっている。そのために熱対策を含めた電子機器の熱設計が重要となっており、伝熱に関する研究もこの方面が主となっている。この熱設計のために、自然空冷筐体の放熱の実験式が導かれ、その放熱機構の研究もされているが、熱設計にCAEを利用するための研究が一つの柱となっている(図2)。その際、最新の大形計算機を利用しても流動・伝熱の完全な計算をするのはまだ無理があるので、流れと温度場を求めるとに接点法や熱回路網法を用いて簡易モデルを作り、筐体内の流れの把握に流れの可視化を用いたり流体抵抗係数や熱伝達係数に実験値を利用する試みがなされている。流れの可視化実験は流れの分布を得るのに用いられる。またこの方法では実験データの蓄積が必要となっている。そのため、流体抵抗係数については自然対流のようにレイノルズ数が小さい領域でも値が得られるように工夫し、多孔板や金網⁽³⁾のデータが得られている。熱伝達係数については、LSIパッケージ用の小型放熱フィンについて、自然対流と強制対流中で放熱性能が得られ⁽⁴⁾、自然対流では放熱フィンが筐体内で他の部品の影響を受ける場合の基礎実験が行われている。

電子部品の熱解析 電子部品の熱解析には熱設計用に簡易な熱回路網法を応用している。LSIパッケージ基板内の熱解析⁽⁵⁾、医療機器用のX線管の熱解析、感熱プリンターに用いられるサーマルヘッドの熱解析、また電球型蛍光灯の熱解析にも応用されている。

今後の展望 今後は熱設計のより合理化が望まれる。そのためには、計算機能力の発達に適合した熱設計システムの構築が鍵となる。また地上以外に宇宙利用の高性能ヒートパイプの開発や相変化を伴う放熱パッケージの研究も発展することが望まれる。

2. 4 家電機器

家電機器に於ける伝熱研究はエアコン用熱交換器を中心に冷蔵庫、ショーケース、冷水機等

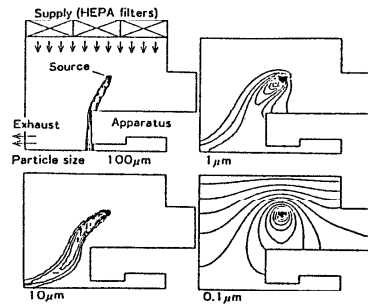


図1 粒径に対する微粒子濃度分布の解析例

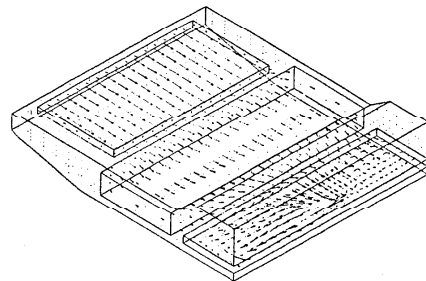


図2 ラップトップコンピュータまわりでの流動解析の例

の冷凍機器、暖房機器として石油、ガス暖房機の燃焼用熱交換器、及び住設機器として電気温水器、給湯付風呂釜等の加熱ヒータ、ソーラシステム等幅が広い。調理家電に於いてもマイコン電気釜、電磁調理器の熱伝達設計等、H A 機器は勿論、A V 機器でも部品のラジエーション設計の問題として殆どの製品が伝熱と係わっている。これを全部述べるのは誌面の関係で出来ないが、その中で高性能化が進んでいるエアコン用熱交換器の伝熱研究について主に述べる。

熱交換器の種類として空気熱交換器、水熱交換器、燃焼用熱交換器が目的に応じて冷媒との熱交換に使われているが、特に空気熱交換器は高性能化が顕著である。このほか蓄熱材を利用した寒冷地向蓄熱エアコン用の蓄熱熱交換器、床暖房エアコン用の床パネル熱交換器、ヒートパネルエアコン用のふく射パネル熱交換器等がある。これらはいずれも商品性、形態に直接関わるものであり、家電機器として量産性、コスト、デザイン等、与えられた範囲で伝熱性能と両立させる最適設計を行っている。主力の空気熱交換器はプレートフィン（アルミ）チューブ（銅）方式であるが、高性能、コンパクト化のトレンドは著しく、過去10年間に2倍の性能になっている。これはフィンの熱伝達研究（フィンパターン、ルーバ、スリット等局所熱伝達率の大幅向上）、パイプの熱伝達研究（内面溝付き管、内面フィン、細径化等）、フィン幅、パイプ配列の最適化等がコンピュータによる数値解析、レーザ、サーモビュアによる可視化技術等で格段に進歩した為である。又、ヒートポンプの主力化で着霜－除霜を考慮したフィン親水性処理の研究、更に管内の流動様式を混相流として測定、伝熱解析する研究等多岐に渡っている。前述した蓄熱熱交換器はパラフィンを使用しており急速相変化と体積変化を伴う為信頼性を中心に評価した。又、ふく射パネルについては最近の快適暖房の追及から遠赤外線の研究動向も背景にあり、ふく射優先の伝熱研究が製品化に結びついたものである。更に燃焼用熱交換器では冷媒加熱エアコン用として高効率化と冷媒加熱安定性及び結露に対する耐食性材料選択等について研究、開発した。

一方、熱交換器ではないが室内の快適性評価についての研究が盛んであり、当社においても寒冷地から亜熱帯地までの気象環境下で建物内の空調環境評価が自動データ処理システムにより稼働しており、室内気流の三次元シミュレーション、SIMPLE法、境界要素法による室内伝熱解析も行っている。

今後の動向としては混合冷媒、フロン代替用冷媒の伝熱研究、コージェネ、ヒートパイプなどの熱回収システムの研究等が挙げられ、高効率化、コンパクト化は各商品とも更に研究が進むものと考えられる。家電機器では社内三つの研究所が工場技術部門と連携し基礎研究の一層の充実と性能向上、コストダウンの為の新材料、新製造技術開発を中心に進めており、その為には前述した各種評価解析ツールの研究開発も重要なキーファクタと考えている。

2. 5 エネルギー機器

当社のエネルギー機器に関する伝熱研究は極めて幅広い。研究部門別で分類すると、動力機械、

熱交換器、回転機器等、極低温関連、燃料電池に関する研究等を行っている。これ等の機器は全て発電に関する機器であるから、社会的影響が強く、十分に信頼性、安全性を高めなければならないが、伝熱研究はそのための重要なものとなっている。

動力機械 蒸気タービンに関し、従来の247at a、566℃の超臨界圧タービンよりも更に高い353at a、650℃の蒸気条件で運転される超々臨界圧タービンの回転部を蒸気により効果的に冷却する技術の研究をおこなった。研究成果の一部は第一ステップとして316at a、566℃の蒸気条件で既に実機に適用され運転されている。

発電用ガスタービンは1300℃級の高温ガスタービンが開発されつつあるが、当社は**動・静翼の冷却技術**の研究として、空気冷却のリターンフロー形冷却動翼、インサート方式の冷却静翼の開発を進めている。

熱交換器に関する研究 原子力発電用湿分分離加熱器(MSH)の加熱器伝熱管内凝縮水の過冷却特性を実長モデルによる蒸気試験、及び部分モデルによる過冷却低減のための研究を行い、実機の伝熱特性の評価や構造信頼性の向上に役立っている。

コンバインドサイクル発電用排熱回収ボイラに関しては、**フィン付き管群の伝熱特性試験、圧力損失特性試験**に関する要素試験を始め、ガスタービンと一体で試験できる実機大の**自然循環形排熱回収ボイラ**による、循環特性の試験研究、スウェリング現象の試験研究その他を行っている。復水器は発電所において作動蒸気を凝縮して再利用するための大形のシェルアンドチューブ形熱交換器であるが、伝熱性能向上の為に、管群内の蒸気の流れを把握するための実験、解析研究を行った。又、**傾斜管群の管外凝縮**について凝縮水のインダンションが凝縮性能に与える効果に関する実験研究をおこなった。

宇宙ステーション用の発電設備に用いる為の、**蓄熱機能を持った熱交換器**の研究も行っている。これは日射時に蓄熱材(LiF)に蓄熱し、日食時に熱を回収して発電熱源するものである。蓄熱材の**凝固・融解**挙動の熱解析を行い潜熱形蓄積材の特性を十分に発揮する伝熱管形状をもとめた。

地熱バイナリー発電用熱交換器、海洋温度差発電(OTEC)用熱交換器等の低沸点媒体利用技術の研究は、**媒体の物性**研究を含めて、**高性能伝熱管**の開発とその伝熱特性研究に注力した。その結果、新型の溝付き管、Cu溶射管が開発された。

又、飽和水や飽和蒸気を扱う事が多い原子力関連技術として、**自己蒸発を伴う二相流流動**現象の研究を行っている。配管や、機器の内部では、運転状態の変化に伴って複雑な流動・伝熱現象がおこる。これらの状況を十分に設計段階で評価し反映すべく注力している(2.7節関連)

回転電気機械、変電機器、送配電機器ならびに**車両用機器** これらの機器においては、冷却技術と電気絶縁技術(電気絶縁技術は熱抵抗が大きい)という互いに相反する技術を総合的にまとめることが重要な課題である。これらの機器の冷却は、**強制対流**によるものが主であるが、メンテナンスフリー化や、コンパクト化の要請から自然対流・沸騰・凝縮・輻射・熱伝導

によるものも新增している。

一例を挙げると、回転電気機械においては超電導発電機のように遠心力場での液体ヘリウムの伝熱・流動を、変電機器においてはSF₆ガス絶縁遮断器に見られるようにアークを伴う高温高圧の高速流体の熱流動を、また送配電機器においては配電盤に代表されるように輻射を伴自然対流を、さらにまた車両用機器においては沸騰冷却ヒートシンクに見られるように伝熱面形状によって変化する冷媒の伝熱・流動などを扱っている。これらの伝熱現象を決定する因子はいずれも複雑で、かつ複雑に絡み合っているため、大型コンピュータを駆使した大規模な数値解析だけでは現象解明できない部分を含んでいる。このため、部分モデルや相似則モデルによる試験・解析が主体となっているが、可視化試験は現象解明にヒントを与えてくれる手段として利用している。

今後の伝熱研究はこのように複数の因子から成る複雑な現象を扱う場合が増加していくものと考えている。

極低温伝熱 極低温超電導機器として数多くの超電導マグネットおよびクライオスタットを製作しており、液体窒素温度（約80 K）、液体ヘリウム温度（約4 K）での沸騰熱伝達・輻射・伝導などの伝熱問題について実用レベルの開発を行っている。本節に関連して、本誌前号⁽⁶⁾にも紹介があり、参考にされたい。

超電導マグネットの設計で超電導安定性を評価するには超電導々体表面の液体ヘリウム中における沸騰熱伝達特性を知る必要がある。このため導体・冷却チャンネルが実コイルと等価な2次元伝熱モデルを作成し、ヒーターで加熱して液体ヘリウム中の沸騰曲線を測定している。このデータをもとに、マグネットがクエンチした場合の発熱や導体の熱伝導を考慮し、常電導部分の伝播・回復について解析し評価している。ただし沸騰熱伝達は定常熱伝達として扱う。過渡熱伝達の評価も必要であるがこれは今後の課題である。

極低温浸入クライオスタットでは断熱真空の残留気体圧力と多層断熱材の性能の関係や、蒸発ヘリウムガスによる伝導型の冷却における熱バランスなどについてモデルによる評価試験を行っている。

燃料電池発電システム 当社は実用化が近いと見られているリン酸型燃料電池（PAFC）発電システムの開発に注力しつつ、次世代のものについても研究開発を進めている。以下主にこのPAFCシステムにおける伝熱問題について述べる。

PAFCにおいては $H_2 + 1/2 O_2 \rightarrow H_2 O$ の反応により電気と蒸気を発生するとともに電池本体内に熱を発生する。この熱を電池本体外へ排出する必要があり、冷却板に冷却水を供給して行っている。電池本体の温度分布は電池セル面内においても、積層高さ方向においてもできるだけ平坦であり、ホットスポットのないことが望ましい。このためには、セル面内の電流分布、反応ガスの供給流量・濃度、セル面内および高さ方向の熱伝導、接触熱抵抗、冷却水の配分などの関係を計算機コードに組み込み各変数の感度解析を行うとともに実測データと

の突合せを行っている。また過度変化時の温度上昇・下降が適切な範囲内におさまることが重要である。

改質器は、電池本体内で反応する水素を原燃料である天然ガス、ナフサ、メタノールなどから製造するものである。多数の反応管内に改質触媒を充填し、原燃料と蒸気の混合ガスを通じ、他方、管外よりは高温ガス（燃焼ガス）で加熱して水素に富むガスに改質する。反応管の温度分布は外部よりの加熱と内部よりの反応吸収熱とのバランスで決定される。管外では燃焼ガスによる放射と対流の熱伝達、管内では触媒充填層内の伝熱および反応吸収熱などを評価することが必要であり、実験的研究を進めている。

また、プラントでは熱交換器を多数用いており、このコンパクト化も課題である。

なお、熔融炭酸塩型について電池本体の温度分布と冷却法が重要であり、その研究を進めている。また排熱回収蒸気発生器の開発研究を実施している。

2. 0 原子力機器

原子力機器は沸騰水型原子炉（BWR）をこれまでに多数製作し、また将来の原子炉として高速増殖炉（FBR）の開発を進めている。

BWRについては高圧条件下での沸騰を伴う二相流の伝熱・流動を扱っているが、特に燃料表面での軽水による伝熱については定常状態に関して、設計限界となる限界熱流束を実寸大規模で測定し、とくにスペーサの効果を調べている。また、各種過度状態での燃料健全性追求の観点から安定性を調べ、ポストドライアウトについてもリウエッティングと関連させた研究をおこなっている。安全については苛酷事故以前の代表的な設計基準事故であるLOCA（冷却材喪失事故）時のECCS（非常用炉心冷却系）作動による流動⁽⁷⁾・再冠水に至る炉心冷却モード（蒸気・スプレイ冷却・膜沸騰等）を系統的にまとめ、設計解析コード中のモデルを現実的なものに変更した。これらの研究を通じて定常・過渡事象における二相流のボイド率分布測定の必要性からX線による2種類のボイド率計を開発・使用している⁽⁸⁾⁽⁹⁾。図3は得られた結果の一例である。

炉容器レベルでの流動では最近中小型のBWR概念設計が国の内外で盛んである。特に中小型炉では自然循環とpassive safetyとが大きな特徴であるので自然循環の基礎研究、自然現象により炉を静止させるアイデアが提案され、動的機器に代わる蒸気駆動インジェクタ等の応用を開始した。他に燃料再処理（レーザ濃縮を含む）に関しても物質移動・自然対流・蒸発・凝縮・輻射など多角的な伝熱現象が見られる。

FBRは冷却材が液体ナトリウム(Na)という特徴がある。ナトリウムを使った研究ではNa熱交換器のNa熱伝達の向上、

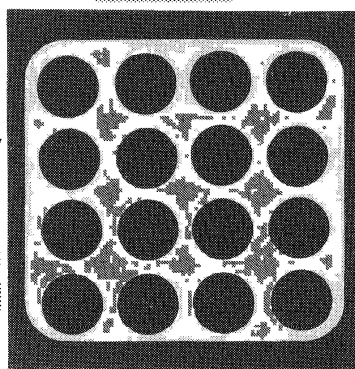


図3 X線CTを用いた管群内でのボイド率計測の例

Naミストの蒸着、カバーガスの輻射、漏洩Naの燃焼挙動、熱疲労に関してNa噴流の温度ゆらぎ（サーマルストライピング）、Na層の断熱効果を見るための自然対流などを実施してきた。相似則を介して水を使用して実験することも多い。前記スライピングや、急激な温度勾配をもたらす層化流動（ストラティフィケーション）、炉容器などの機器のコンパクト化のための流動実験などである。LDVによる乱流計測⁽¹⁰⁾、感温液晶による立体的な温度変化、レーザーライトシート法による複雑な流動場での可視化などが最近の動きである。BWR、FBRいずれにおいても大型計算機を利用した熱流動解析が原子力CAEの一環として盛んであり、実験の一部を代行しており今後共この傾向をさらに強める予定である。二相流については2流体モデルによる燃料間でのサブチャンネル解析、液膜モデルによる限界出力予測⁽¹¹⁾などが最近の成果である。単相流については汎用解析コードと各モデルによる乱流解析、最近では自由液面の揺動（スロッシング）も解析できるようになっている。いずれにせよ、原子力では広範な伝熱現象がシステムとして起こり、それを確実に評価できる技術を実験・解析の両面から設計に反映させるよう目指している。

2. 7 宇宙機器

衛星の熱制御はスピン衛星、三軸衛星に関わらずコーディング、多層化インシュレーションなどの受動型熱制御素子とヒータを併用する方式が基本となっている。しかしながら、近年衛星の大型化、モジュール化および搭載機器の発熱量/発熱密度の増加の傾向が顕著になり、サーマルルーバ、ヒートパイプ、流体ループ等の能動型熱制御素子の利用技術が重要になってきている。

サーマルルーバは衛星放熱面の実効放射率を自動的に変化させる熱制御素子で、バイメタルを使用してブラインド型のブレードを駆動する方式が最も一般的に用いられている。1982年に打上げた国産初の三軸衛星である技術試験衛星Ⅲ号（さく4号）はこのタイプのサーマルルーバを搭載している。

ヒートパイプは流体の相変化を利用した高熱伝達素子で、地上機器の熱制御用として広く用いられているが、1950年代にアメリカで衛星用熱制御素子として開発されたものである。宇宙用ヒートパイプとしては軽量・信頼性の観点からアルミニウム/アンモニアをそれぞれ管材/作動流体として用いた軸方向グループヒートパイプが最も一般的に用いられている。1992年打上げ予定の2トン級の静止三軸衛星である技術試験衛星Ⅵ号には通信用中継器、電源等の熱制御のため、約60本のヒートパイプを使用している。

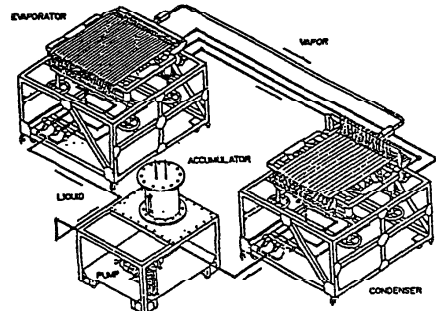


図4 宇宙機用熱制御に関する二相流体ループ

図4はプラットフォーム型宇宙機用熱制御システムとして開発中の二相流体ループである。**相流体伝熱装置**は地上では目新しいものではないが、**無重力下**での安定性および制御性に関するデータが乏しく、未だ宇宙用としての実用化の例は無い。現在、宇宙開発事業団との契約に基づき実験・解析の両面から二相流体ループの開発を進めている。

2. 8 コンピュータによる熱流動解析

最近のスーパーコンピュータの飛躍的な性能向上に伴い、当社においてもコンピュータによる熱流動解析は、熱流動現象の把握のみならず、各種機器の性能評価に広く利用されるようになり、省エネルギー化、高効率化、小型計量化、安全性向上などに役立っていることはこれまでの各節で示してきた通りである。

解析方法としては、差分法、有限体積法、有限要素法などがあり、社内開発ソフト、導入ソフトなどを使い分けており、製品開発・設計の強力なツールになっている。解析結果の表示にはカラーグラフィックやアニメーションを多く用いている。特に時間依存問題の動画出力は得られた結果を直観的に、また短時間に考察するのにたいへん有効であり、ミニコンやEWSを用いて社内開発システムを中心にそれを実現し、種々の熱流動解析の視覚化に役立っている。

近年、より詳細な開発・設計資料を得ようと解析対象はより現実化され複雑化の方向にあり(**圧縮性流れ**、**燃焼**、**自由表面を有する流れ**など)、それに対応するため、解析技術、モデル化技術の向上と蓄積を計っており、それと共に格子生成(数値格子生成など)や解析結果の視覚化技術の向上にも注力している。

対象は、ターボ機械内部の流れ、原子力機器内部の流れ(2.6節)、電力・電子機器などの冷却性能に関わる伝熱を伴う流れ(2.3節)、IC製造に関わる機器内の流れ、室内気流(エアコン設計やクリーンルーム設計)などがあげられ、より詳細な設計情報を得るため三次元解析や時間依存解析の必要性が高くなっている。例えば、2.1節で述べたが、シリコン単結晶製造法であるCZ(Ozochralski)法においては、対流抑制のための水平磁場が印加されている。この石英るつば内の流動パターンは実験的把握が非常に困難で、Maxwellの方程式を考慮した大規模三次元解析によって明らかにした。

この他にこれまで行った主な熱・流動解析は、災害情報システムの一環としての降雨シミュレーション、防災システムの一環としての煙の流れのシミュレーション、半導体製造プロセスで使用される縦型拡散炉内の熱と流れのシミュレーションなどである。

降雨シミュレーション⁽¹²⁾ではNavier-Stokes方程式、熱力学方程式の他に、水蒸気と雲粒の間の相互変換過程、雲粒が雨粒へ成長する過程、雨粒が蒸発して水蒸気が生じる過程、雨粒が落下する過程についてモデル化し、水蒸気、雲、雨について方程式も加える。差分法でそれらの方程式を積分していく。

煙の流れのシミュレーションでは、燃焼熱によって誘起された**熱対流**と、生成した煙がその

熱対流に乗って流れていく過程をシミュレーションしている。煙はpassive scalarでなく、熱対流への影響も考慮する。

VLSI時代に入り、ウェーハの大口径化、省スペース化、省電力化への要請が高まるに従い、炉を垂直にした縦型拡散炉が注目されている。炉内のガスの流れと温度分布をシミュレーションし、その開発を支援している。(13)

これらと並行して、熱と流れの数値シミュレーションにとって極めて重要な乱流のモデル化(LES)や計算アルゴリズムについても研究を行っており、数値シミュレーションの高精度化、高速化を目指している。

3. まとめ

以上見てきたように、当社における機器開発において、ほとんどあらゆる伝熱・流動上の課題が含まれていると言っても過言ではない。すなわち電子部品内の熱伝導、各種機器の放熱部分の自然対流・強制対流・輻射伝熱とこれらの複合伝熱、エネルギー機器に必ず使われる熱交換器、原子炉や宇宙機器、燃料電池内の沸騰・二相流、またコンデンサ内の凝縮、宇宙用蓄熱材の凝固・融解、暖房機等の燃焼、高速増殖炉用ナトリウムなどの化学反応などである。

これらの現象の解明、性能評価のためにはレーザによる流れの可視化、感温液晶や、遠赤外線による温度の画像化、X線による過渡二相流観測、大規模実証試験における超高速データ処理、スーパーコンピュータによる境界層や乱流渦解析・二相流解析・グラフィック処理・数値シミュレーションなどの技術が駆使されている。今後もこの様な高度の技術を使った伝熱・流動研究がエネルギーとエレクトロニクスの開発にますます重要になるものと思われる。

代表的な成果の文献

- (1) 荒木, 日本機械学会P-SC92調査分科会報告書, 36 (1986).
- (2) Suwa, Y., ISPE the 3rd Int. Conf. Proc. (to be published) Springer-Verlag.
- (3) Ishizuka, M., ASME Journal of Fluid Engng., 109, 389 (1987).
- (4) 横野ら, 機論, 53, 495B, 3397 (1987).
- (5) 石塚ら, 機論, 52, 476B, 1772 (1986).
- (6) 中込・栗山, 伝熱研究, 28, 108, 127 (1989).
- (7) Nagasaka, H., et al., J. Nucl. Sci. Technol., 22, 11, 963 (1985).
- (8) 師岡ら, 日本原子力学会誌, 30, 10, 952 (1988).
- (9) 奈良林ら, 機論, 50, 450B, 562 (1984).
- (10) 横堀ら, 機論, 55, 掲載予定, (1989).
- (11) 寺坂ら, 第23回日本伝熱シンポジウム, B321 (1986).
- (12) Horibata, Y., et al., SIMULATION, 50-2, 000 (1988).
- (13) 堀端ら, 情報処理学会第27回数値解析研究会報告, 88-NA-27 (1988).

1. はじめに

編集委員の先生より「企業における伝熱研究」特集号への寄稿のご依頼があった。一般の読者にあまり知られていないが、学術的にも興味深い、企業における伝熱に関する研究や、機器開発について紹介して欲しいというご依頼であった。学術的にも興味深いという点では余りご要望に沿えそうもないと思ったが、企業における伝熱研究の例として、筆者の行った商品や機器の開発研究のいくつかをご紹介します。企業での商品や機器開発における伝熱研究の特徴を知っていただくことも何らかのご参考になるのではないかと勝手に解釈しお引受することにした。

筆者の会社は、建設機械や産業機械等の機械の中でも限られた分野を主対象とする企業であり、エネルギーや熱を主体とする機器は、エンジンに関するものを除いては少ない。従って従来伝熱技術が必要とされるのは、エンジンに関する場合が中心であり、カバーする伝熱技術の範囲も比較的狭い領域に限定されていた。

しかし近年新しい分野に出て行くための多くの試みがなされ、その結果必要とされる伝熱技術の範囲も徐々に広がってきている。筆者も約20年前に会社に入社以来、研究所において前半はエンジンに関する研究開発に、又後半は、エネルギーや熱を主体とする商品や機器の開発に従事してきた。

この間約5年半会社より派遣されて米国ミネソタ州立大学伝熱工学研究所に留学し、エネルギー変換機器に関する研究を行う機会を持った。これらの研究開発を通して、企業での商品や機器開発における伝熱研究と大学における伝熱研究の間には、当然のことではあるが、かなりの性格的な違いがあることを実感してきた。例えば企業での商品や機器開発における伝熱研究では、(1) 伝熱面の形状や伝熱現象が複雑であるためモデル化が難しく、実機で確認した方が早い場合が多い、(2) 性能、機能の他にコスト、信頼性・耐久性、生産性、サービス性、etc を考慮する必要があり、伝熱要素と他の要素との妥協を計らざるを得ない場合が多い、即ち伝熱要素のみを扱えば良いというケースは少ない、(3) 伝熱技術と異分野の技術との交流や結合、即ち技術複合化が要求される場合が多い、(4) 時間的な制約のため、詳細な解析をする余裕がなく、1次のオーダーの検討のみで設計を始める場合や、開発のある程度進んだ段階で、後づけで解析を行い性能向上対策等を見出す場合も多い、等の特質があるように思われる。ただしこれはあくまでも当社の開発研究を通して感じた特質であって、他の会社の場合にこれらが当てはまるとは限らない事はいうまでもない。

以下にこれらの特質を示す例として、過去約10年間の間に筆者がかかわった当社におけるエネルギーや熱を主体とする商品や機器の開発研究のいくつかの概要を紹介したい。

2. エネルギー関連機器開発と伝熱

2-1 ディーゼルエンジンの開発における伝熱

ディーゼルエンジンの伝熱に関し、シリンダライナーやピストンの冷却系、即ちエンジン内部冷却系、の熱伝達に関する研究を行った。この研究を取り上げた直接の動機は、建設機械の輸出地域

は増々拡大の方向にあり、これにつれて使用地域や使われ方が多様化し、種々の使用条件化における信頼性、耐久性の確保が一段と重要となり、これらを一層向上させるには、ピストンやシリンダライナーなどの主要構成部品の周囲でおきる伝熱現象をより正確に、又より詳細に把握することが必要となったためである。ディーゼルエンジン内部冷却系の内燃焼室まわりの熱伝達については、燃焼性能の予測等にも必要であることから、ディーゼルエンジンの熱伝達に関する研究の主対象として、従来より数多くの研究がなされてきた。これに対し、燃焼室まわり以外の、燃焼性能に直接的な影響を与えない部分の熱伝達についてはあまり研究が行なわれておらず、現象の把握も燃焼室まわり程進んでいなかった。そこでこの研究においては、従来殆んど取り上げられておらず又信頼性・耐久性の確保に重要なシリンダライナーの冷却水面とピストンアンダークラウンの油ジェット冷却面の熱伝達に関し、(1) シリンダライナーのスカuffing、ピストンクラック、オイル消費増大などの問題解決及び冷却法の改善、限界水温の向上などに有効と思われる基礎的データの取得、(2) ディーゼルサイクルシミュレーションに必要な冷却系関係の入力データ、特に熱的境界条件、の整備及び精度の向上、(3) 将来エンジンの研究に必要な統一の見地から見たエンジン内部の熱流に関する基礎的データの収集等を目的として実験を行った⁽¹⁾⁽²⁾⁽³⁾⁽⁴⁾。

2-1-1 シリンダライナー冷却水面の熱伝達

水冷ディーゼルエンジンのシリンダライナー冷却水面の強制対流熱伝達を表わすものとして、従来二重円管内の乱流熱伝達の式が使用されて

きた。⁽⁵⁾ しかし一般に冷却水の流路は複雑であり、果してこのような式が適用出来るものかはなほ疑問に感じていた。そこで当社の実機直列 6気筒過給付ディーゼルエンジン（定格出力 420 PS）のシリンダブロック、

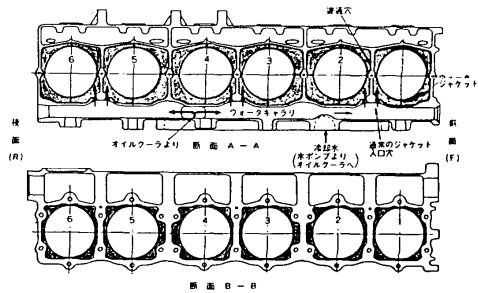


図 1 シリンダブロック横断面

図 1、を用いて、ライナー冷却水面静圧分布

測定、油膜法によるライナー冷却水面の流れパターン測定、熱流束印加法によるライナー冷却水面の熱伝達係数分布測定、等を実施した。その結果冷却水の流れは非常に複雑であり、平均流速を出すことすら簡単ではないこと、写真 1、ライナー冷却水面の熱伝達係数は場所により又気筒により大きく変化し、図 2、図 3

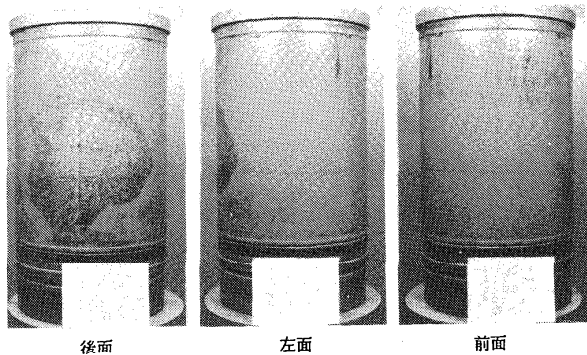


写真 1 シリンダライナー外面上の冷却水流れパターン

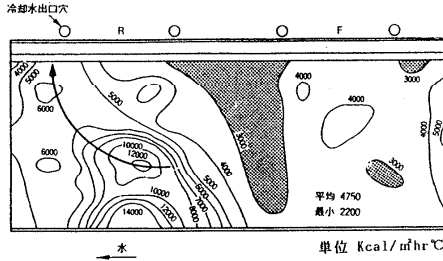


図2 熱伝達係数分布(通常ブロック, 第1シリンダ)
冷却水流量500ℓ/min, 水温50°C, 熱流束一定

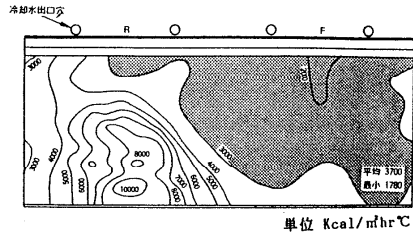


図3 熱伝達係数分布(通常ブロック, 第3シリンダ)
冷却水流量500ℓ/min, 水温50°C, 熱流束一定

、従来一般に用いられている二重円管内の乱流熱伝達の式ではとてもこれを説明できないこと等が解った。本研究においては、このような複雑な流れによる伝熱現象を一般的な式で表わすことは非常に困難であると考えて、あえて式の形でまとめる試みはしなかった。現状把握のあと、実機実験による熱伝達係数分布の改善と熱伝達係数分布の改善が壁温に及ぼす影響予測をシミュレーションにより行い、図4、通常のシリンダブロックを大幅に変更することなく、冷却水流路を修正することにより、ライナーの温度分布を改善できることが解った、図5、6 参照。これらの改善は実機に用いられ効果を発揮している。

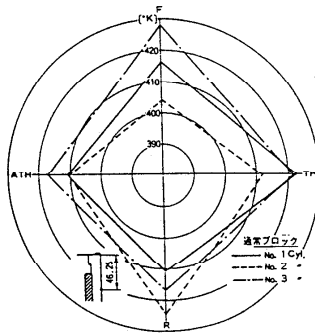


図5 ライナーの円周方向温度分布
(改良前の各気筒間のばらつき)

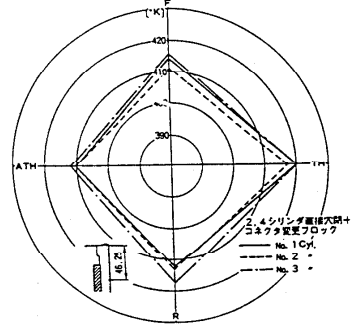


図6 ライナーの円周方向温度分布
(改良後の各気筒間のばらつき)

2-1-2 ピストンアンダークラウンの油ジェット冷却面の熱伝達

ピストンアンダークラウンのオイルジェット冷却は基本的には液体ジェットの固体壁面への衝突冷却であるが、壁面が曲面であること、壁面が上下動すること、ジェットと壁面との間にコネクティングロッドという障害物が存在することなどにより、現象はかなり複雑である。従来使用されている熱伝達係数の値はさまざまであり、実験データは僅かに1件^[6]ある程度で殆んど研究されていなかった。そこでライナーのテストと同様の実機エンジン、図7、を用いてピストン静止時のアンダークラウンの流れパターン測

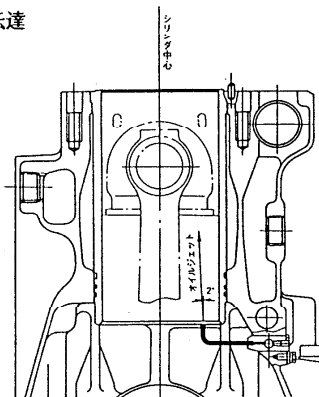


図7 冷却用オイルジェットノズルの取付状況

定、熱流束印加法、図 8、によるアンダークラウンの静的熱伝達係数分布測定、又単筒エンジンモータリングテスト装置とリンク機構を用いた、ピストン上下動時(1,000 rpm迄)のアンダークラウンの動的熱伝達係数分布測定、等を実施した。その結果ピストンアンダークラウンの熱伝達係数は、ピストン運動の影響を強くうけること、図 9、平均熱伝達係数はピストンの回転数及び冷却油量とともに増大すること等が解った。

エンジンの回転数が一定でもピストン上下動の速度及びピストンの位置はクランク角度により変化するので、オイルジェットがアンダークラウンに衝突する速度及び位置は常時変化する。従って衝突速度によるデータの整理は困難で、熱伝達を支配する代表速度として平均ピストン速度とオイルジェットの噴出速度との差を用い、又代表寸法としてノズル出口より平均ピストン位置までの距離を用いるなどの簡易的な整理法が必要となる。しかし時間的な制約等からこれらを導くまでにはいたらず、実用上は熱伝達係数分布の実測データそのものに多少の修正を加えて使用している。

2-2 太陽熱利用機器の開発

この開発を始めた当時は第 2 次オイルショックの後で、太陽エネルギーに関する研究開発が非常に盛んな時であり、又丁度社内的にも新しい分野に出て行くための摸索が行われていた時であり新しい太陽熱利用機器の開発が期待の内に始められた。開発に当たり多方面から検討を行った結果、熱エネルギーとしての利用については(1) 経済性及び市場性の点より当面は給湯に使用するのが良い、(2) 集熱効率を高めるために出来るだけ低温で集熱するのが良いの 2つの基本方針を決定した。そしてこの基本方針を満す新しくかつユニークな太陽熱利用機器として、ブラックリキッド型太陽熱集熱器とそれを用いるソーラ給湯システムを採択した⁽⁷⁾⁽⁸⁾⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾⁽¹¹⁾⁽¹²⁾。

当時一般に使用されていた平板型の太陽熱集熱器には、選択吸収膜、黒色塗装膜ないしヒートパイプによる集熱方式が採用されていた。この方式の原理は、集熱部で一旦光のエネルギーを熱のエネルギーに変換し、熱のエネルギーを集熱部の金属またはプラスチックを媒体として伝導及び対流伝熱により作動流体(水や不凍液)に伝えるものであり、言わば光熱間接変換方式をとるものである。これに対しブラックリキッド型太陽熱集熱器は、作動流体そのものを有色(黒色)とし、光のエネルギーを直接的に作動流体に吸収させる方式であり、従来の間接変換方式に対し、直接変換方式といえるものである、図10。ブラックリキッド型太陽熱集熱器は米国のバッチル記念研究所にお

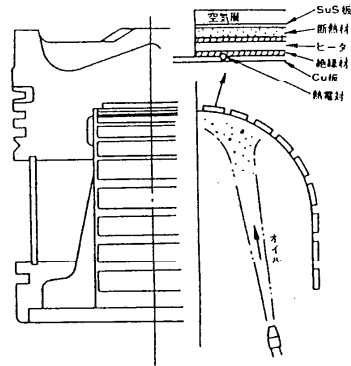


図 8 ヒータ装着ピストン

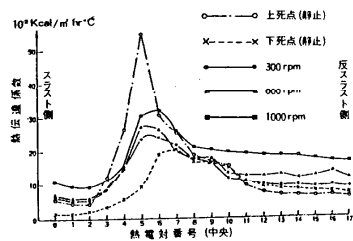


図 9 動的熱伝達係数の分布
流量6 l/min, レイノルズ数2,700

いてプラスチックを用いてかなりの研究開発が行なわれたが⁽¹³⁾⁽¹⁴⁾⁽¹⁵⁾、全て失敗に終わっている。ブラックリキッド型太陽熱集熱器の基本的な長所は(1) 直接変換方式であるため、低温集熱領域での集熱効率が高い、(2) 黒色の不凍液を使用す

	間接太陽光吸収型	直接太陽光吸収型
集熱原理	金属製のフィンに太陽光を吸収させた後、フィンを媒山して熱伝導により金属製の管内を流れる作動流体に熱を伝える	透明のガラス管内又はプラスチック流路内を流れるブラックリキッド(黒色熱媒体)に太陽光を直接吸収させる
受光体 熱媒体	金属性フィン(選択吸収膜付) 水又は不凍液	ブラックリキッド (黒色熱媒体)
構造 (原理)		

図10 集熱原理の比較

るので凍結しない、(3) 金属材料を使用しないので腐食の恐れがない、(4) 最高到達温度が低いため過熱しにくい等をあげることができる。ブラックリキッド型太陽熱集熱器の開発における主要課題は、(1) 黒色不凍液(ブラックリキッド)と集熱特性との相関把握、(2) 長期(15年以上)に亘って紫外線の照射や温められた黒色不凍液との接触に耐える低コスト透明材の開発、(3) 高い集熱効率を有し、長期(15年以上)に亘る屋外使用に耐え、量産性に優れしかも低コストの集熱器の構造開発、(4) 長期(5年以上)に亘って安全性、耐熱性、耐候性、化学的安定性及び防蝕性等を有する黒色不凍液(ブラックリキッド)の開発、(5) システム技術開発の5点であった。

(4)の黒色不凍液の開発に当っては、当社の保有技術だけでは無理と判断し開発の早い段階から外部の化学品メーカー(大日精化工業㈱)と共同で開発を行った。又(5)のシステム技術開発についてはブラックリキッド型太陽熱集熱器の開発にある程度目途のついた段階から大手のゼネコン(鹿島建設㈱)と共同で開発を行った。これら異分野における他社の技術と当社の伝熱関連技術との複合化を計った結果、集熱器及びソーラ給湯システムの開発を完成させることができ、技術複合化の重要性を体験した。以下に本開発の経緯について簡単に紹介したい。

2-2-1 黒色不凍液の濃度と集熱特性

黒色不凍液の濃度の決定は、集熱特性に直接関係するため重要である。黒色不凍液の濃度及び流路厚み(深さ)の決定は透過率を μ とするとき次式による。

$$\mu = i/i_0 = \exp(-klc)$$

ここで i_0 、 i はそれぞれ黒色不凍液に入る前及び黒色不凍液を通った後の光の強度、 k は波長に依存する定数、 l は黒色不凍液の流路厚み、 c は黒色不凍液の濃度である。

この式で明らかのように濃度が薄い場合、その一部が流路を通過する結果吸収されるエネルギーが少なくなり、逆に濃度が高い場合光は流路の極く表層部のみで吸収され、局所的に温度が上昇することになり、熱損失が大きくなる。従って光が流路の厚み全体で吸収されるような最適濃度が設定されなければならない。黒色不凍液の流路厚みが4mmの場合0.02%の容積濃度が最適となる。

2-2-2 透明材料と集熱器構造の開発

当初は黒色不凍液の流路を形成する材料として透明のプラスチックを用いて開発を行った。

プラスチックは最終的に不適であることが解ったので、結局ガラスを用いて開発を行った。

多数のガラス構造のものについて試作を行い、重量、コスト、生産性等の点から検討を加え、紆余曲折の結果最終的にガラス管構造の集熱器を開発した。その外観、構造及び公的機関による効率測定結果をそれぞれ写真 2及び図11、図12に示す。太陽光の吸収部（黒色不凍液の流路部）は内径10φの細ガラス管70本をゴムの一体成形マニホールドにさし込むだけのシンプルな構造にまとめることができた。伝熱上興味深い特性として、この集熱器は一般の平板型集熱器に比較して設置傾斜角度

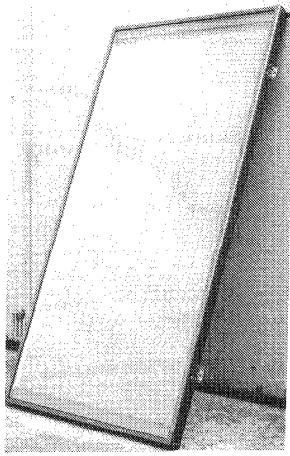


写真 2 細ガラス管方式のブラックリキッド型集熱器外観

に敏感である。これは集熱器内空気自然対流パターンが一般の平板型集熱器と異なり、角度に強く依存するためと思われる。

2-2-3 集熱器の伝熱解析

細ガラス等構造のブラックリキッド型集熱器の伝熱現象は放射・対流・伝導の3つの伝熱モードのからみあった複雑なものである。特に放射伝熱は太陽光の波長分布特性、太陽光吸収部の幾何学的形状、黒色不凍液の流路厚み方向における吸光特性等に依存するため厳密に解析することは困難と考え、いくつかの仮定を置いてモデル化を行った。図13に細ガラス管構造のブラックリキッド型集熱器の伝熱解析モデルを

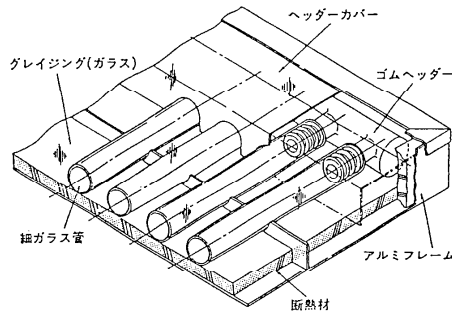
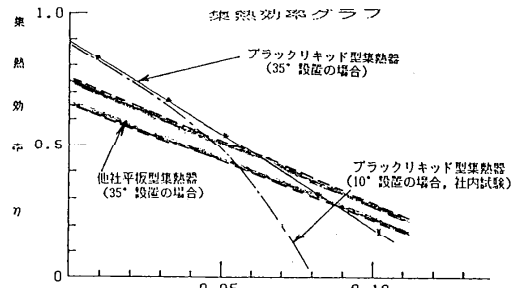


図11 細ガラス管型ブラックリキッド集熱器の構造



ここで $X = (T_{in} - T_{out}) / (2 - T_a)$

T_{in} : 太陽集熱器入口熱媒体温度 (°C)

T_{out} : 太陽集熱器出口熱媒体温度 (°C)

T_a : 周囲温度 (°C)

I : 入射太陽エネルギー量 (kcal / m² · h)

図12 公的機関による集熱効率測定結果

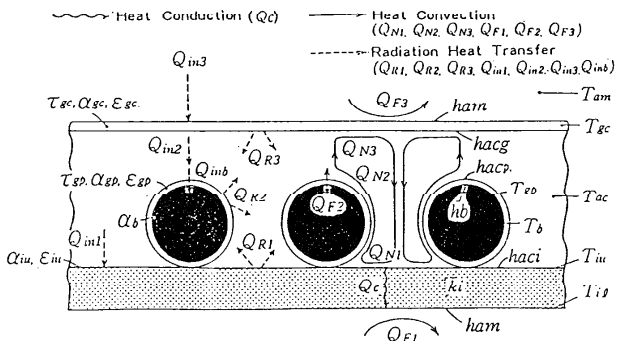


図13 ブラックリキッド型集熱器の伝熱解析モデル

示す。このモデルにより集熱器内部の温度や集熱効率を予測することができ、図14、集熱器の開発を効率的に進めることができた。

2-2-4 黒色不凍液（ブラックリキッド）の開発

市販の墨汁や黒色インクを水で希釈したものは紫外線劣化などのために約1週間程度で透明の水となり使いものにならないことが解った。そこで問題点を洗い出しブラックリキッドの耐久性を満す条件として、(1) 熱的影響、(2) 紫外線の影響、(3) 遠心力（ポンプ）の影響等に左右されないこと、さらに(4) 凍結せず、(5) 日本水道協会の見解（液の成分は全て食品添加物であること）に従うことという以上5点を遵守する方針をとった。開発したブラックリキッドは全て食品添加物より構成されており、基本的には活性炭の微粒子を水と不凍液の混合液中に分散剤によって分散させたものである。これらの配合割合を表1に示す。又その特徴を表2に示す。開発の過程で数多くの品質確認を行った。その概略の項目を表3に示す。安全性に関しては成分変更の都度、日本食品分析センターにて動物実験等を含む各種のテストを行い確認した。耐候性、耐熱性、化学的安定性については、屋内における加熱促進テスト及び屋外における太陽光を用いての循環曝露とフレネルレンズによる加速促進曝露テストを行い、各種の分析と合わせその品質を確認した。防蝕性等を含む材質への影響については金属、プラスチック、ゴムにつきそれぞれ専門の公的機関にテストを依頼し、その適合性を確認した。

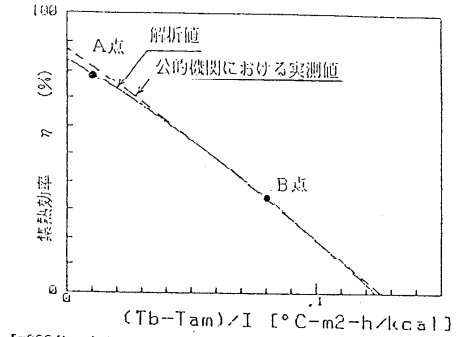


図14 集熱効率の実測値と解析値の比較

表1. ブラックリキッドの成分

成分（食品添加物）	配合割合(%)
プロピレングリコール	40.0
水	58.85
分散剤	1.0
活性炭	0.02
その他	0.13

表2. ブラックリキッドの特徴

(1) 長期に亘り入射する太陽光を100%吸収する。
(2) 凍結しない（凍結温度-22℃）
(3) 安全である（食品添加物のみで構成）
(4) 金属の防蝕性能に優れている。
(5) 日本水道協会認定液 S59.1ソーラー用不凍液の認定獲得

表3. ブラックリキッドの品質確認項目

- 安全性
 - 日本食品分析センターにて実施
 - (a) 重金属分析（重金属及び有機リン等の検出）
 - (b) 急性毒性（マウスへの経口投与）
 - (c) 皮膚一次刺激性（家畜への塗布）
 - (d) 防菌力（大腸菌等5種の菌株につき培養試験）
- 安定性
 - 加熱促進テスト及び屋外循環曝露テスト
 - (a) PH及び粘度変化
 - (b) 紫外線吸収スペクトル
 - (c) ガスクロマトグラフ
 - (d) 活性炭の分散（粒度分布、分散状況）
 - (e) 透過率変化
- 材質への影響
 - (a) 金属に対する影響
 - ・防錆試験
 - ・促進試験（日本防錆協会にて実施）
 - ・屋外曝露試験
 - ・摩耗試験
 - (b) プラスチックに対する影響
 - ・促進試験
 - ・屋外曝露試験
 - (c) ゴムに対する影響
 - ・促進試験
 - ・屋外曝露試験

2-2-5 ブラックリキッド型集熱器利用ソーラ給湯システム

数件の業務用クラスのブラックリキッド型集熱器利用ソーラ給湯システム（集熱器5枚～100枚）の設置と通年に亘る熱的特性の把握をゼネコンと共同で行った。

図15及び写真 3に集熱器30枚の給湯システムの系統図と集熱器の設置状況を示す。数年に亘る実施テスト及び計測の結果は、ブラックリキッド型ソーラ給湯システムが、凍結及び過熱の恐れのないメンテナンスフリーのシステムであり、年間を通じての集熱性能も平板型ソーラ給湯システムに比較して約 10%程度高くなることを示した。本集熱器及びソーラ給湯システムは現在当社のグループ企業で事業化されている。

2-3 熱電素子利用機器の開発

長年熱電素子の事業を行っている当社のグループ企業があり、この企業と共同で、排熱回収熱電発電システム及び輻射型局所冷暖房パネルの開発を行った。どちらもグループ企業が熱電素子材料の開発を担当し、当社が熱的解析を含む機器及びシステムの開発を担当した。

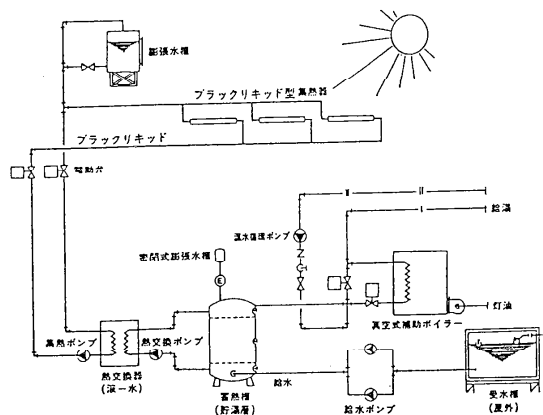


図15 ブラックリキッド型ソーラ給湯システム系統図

2-3-1 排熱回収熱電発電システムの開発⁽¹⁶⁾⁽¹⁷⁾

大手電力メーカーより火力発電所からの排熱回収発電システムとして熱電素子が利用できないか検討して欲しいとの要請があった。調査を行った結果、熱電発電については、素子などの単体についての報告はあるが、システムとして熱交換器まで含めたデータは殆んどないことが解った。

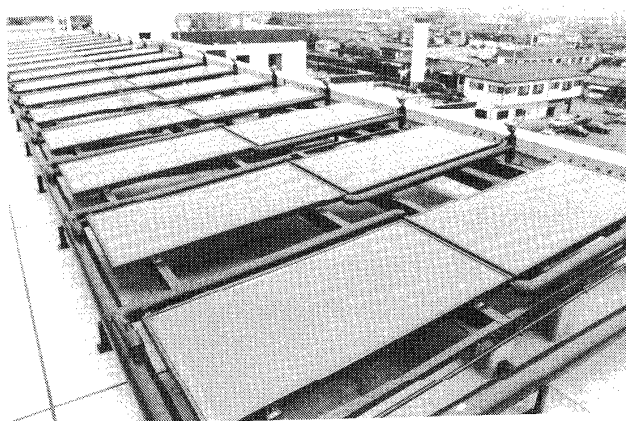


写真 3 ブラックリキッド型集熱器設置状況

そこで先ず低品位（主に200℃以下）の排熱からの熱電発電につき、熱電素子単体、熱交換器単体、熱電素子と熱交換器を組み合わせた熱電発電サブシステムの種々の形状及び組み合わせに対する各種の性能テストを行い、熱と電気のインターフェース等を含む広範な基礎的データを収集した。

例として図16に排ガス温度130℃、冷却水温度20℃における熱電発電サブシステム各部の温度と出力電流の関係を示す。熱源媒体の高温側と低温側の温度差に対する熱電素子の接合部の高温側と低温側の温度差の比は無負荷開放時には65.6%であるが、出力電流を増加するとバルチエ効果のために順次低下し、熱と電気がインターフェースしていることが良く解る。

次にこれらの基礎的データを基に最適化設計を行い出力200Wの排熱回収熱発電システムを開発した。その外観、構造、性能の一例をそれぞれ写真4、図17、図18に示す。図18は発電システムの排ガス温を130℃、冷却水温を20℃としたときの出力電圧-出力電流及び出力-出力電流の関係を示す。発電システム出力端での電気出力は、媒体流速を増やせば増加するが、集、放熱熱交換器の圧損の増大に従って媒体輸送のための内部動力に消費されるので、正味出力を最大とする媒体流速条件が存在する。本発電システムの性能は冷却水温20℃、流速0.25m/s一定で、排ガス温130℃の場合、流速2.0~2.5m/sにおいて正味出力の最大を生じ、その時の出力は熱電素子モジュール単位面積当たり400W/m²であった。又排ガス温を170℃に上昇した場合は827W/m²を得た。この開発により熱発電は熱を直接電力に変換する方法

で、可動部分がなく、構造簡単で、形状が自由で、保守が不要という長所を有すること、又経済的な見地からは、排ガス温度は200℃以上が望ましいこと等の結論をうることができた。システム最適化には熱電素子の形状がかなり重要であり、種々の形状の熱電素子を製作する必要があったが、グループ企業の方でこれらを実施できたため比較的短期間で開発を行うことができた。本開発の場合にもグループ企業の材料技術と当社の伝熱技術を組み合わせることによってシステムを完成させることができ、技術複合化の大切さを認識した。熱発電に関する今後の

伝熱上の主要課題として、(1)熱電素子と熱交換器との接触熱抵抗をいかに低減するか、(2)熱交換器の圧損をいかに低減するか等を挙げることができる。2-3-2 輻射型局所冷暖房パネルの開発^{[18][19]}

熱電冷却については、既に産業用、宇宙用、理化学用、家電用、医学用等の分野において機器の開発及び実用化が行われて

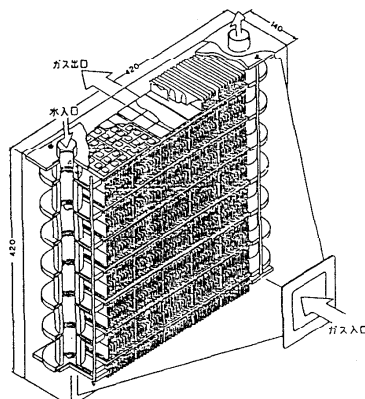


図17 200W熱電発電システムの構造

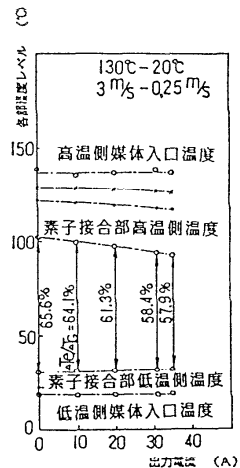


図16 発電器各部温度と出力電流

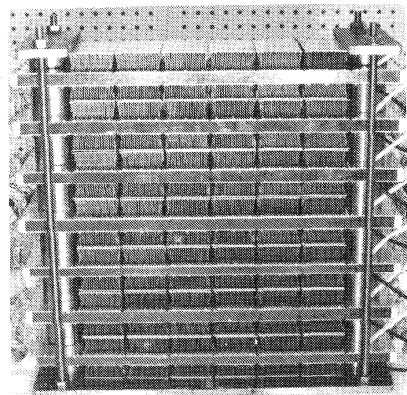


写真4 200W熱電発電システムの外観

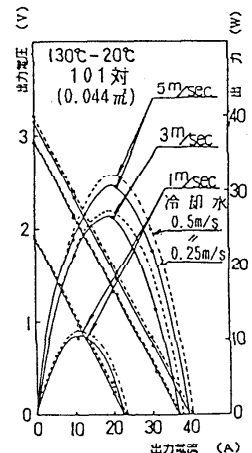


図18 出力電圧-出力電流
出力-出力電流特性

きた。しかし空調用はある程度の能力が必要であり、能力当りの容積やコストの点で圧縮機利用のものに比べて劣るため実用化は殆んどされてこなかった。排熱回収熱電発電システムの開発を通じて、熱電素子利用システムの構成、構造、設計等に関する各種のデータ及びノウハウが蓄積出来たので、これを機会に新たに熱電式空調機の可能性を検討した。当社には空調機に関する技術やノウハウが少なかったこと、又市場のニーズを適確に把握しなかったこと等から大手ゼネコン（鹿島建設㈱）と共同で検討を進めた。色々な方向から検討を行い、その結果有望な熱電式空調機としてオフィス空調の新しいトレンドに沿う輻射型局所冷暖房パネルを考案し、共同で開発を行った。近年のオフィスビルではOA機器が大量に導入され、機器が集中するエリアでは機器からの発生熱で室内環境が悪化し、冬期においても冷房設備が必要というケースも出てきている。しかし冷房設備を設置するとなると、冷媒や冷水を循環させる配管設備、さらには凝縮水を放出するドレーン配管も必要となるなど、おおがかりな工事とコストが余儀なくされる。このためOA機器エリアの冷（暖）房が簡単に出来るシステムが要望されている。又高度情報化社会への移行により、オフィスワークの割合は増加し、夜間や休日等のセントラル空調停止時の補助空調機や、個人の好みに応じた快適で創造的な空間を形成出来る空調機が求められている。輻射型局所冷暖房パネルはこれらのニーズを満たし、しかも熱電素子の良好な特性を効果的に活用したパーソナルタイプの冷暖房機である。

その外観と構成及び作用をそれぞれ写真 5、図19に示す。

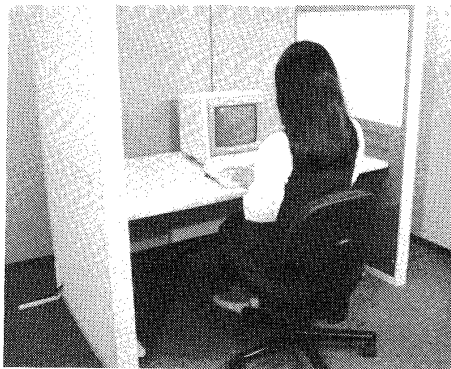


写真 5 輻射型局所冷暖房パネルの外観

この輻射型局所冷暖房パネルは、ローパーティションの片面の上半部を輻射伝熱面とし、局所空調される空間及び作業者をこのローパーティションの輻射伝熱面でかこみ、この空間の内部の作業者を輻射伝熱面の冷却又は加熱により、輻射熱で直接冷房または暖房するものである。

輻射伝熱面の冷却又は加熱は伝熱面の内側にはりつけた複数個の熱電素子により行う。又局所空調される空間の温度が高い場合や作業者の代謝量が大きい場合には、出来るだけ冷房効果を高める必要があり、このため輻射伝熱面とは独立して作動する冷房効果増大用の吹出し空気ファンを内蔵している。これらの機器を全て厚さ60mmのローパーティションの内部に収めた構造となっている。

輻射型局所冷暖房パネルは、輻射により直接作業者の冷暖房を行うので、冷暖房能力が従来の空気を冷暖房する間接型空調機に比較してかなり小さくてよい。このため熱電素子の圧縮機と比

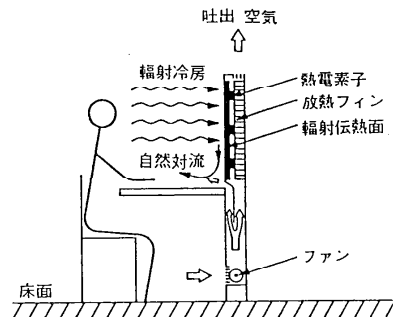


図19 輻射型局所冷暖房パネルの構成と作用

べた場合のデメリットである能力当りの容積やコストの問題が大幅に解消され、むしろその薄型、可動部不要、配管不要、低騒音、高信頼性等の数多くのメリットを生かすことが可能となった。又この冷暖房機は輻射による冷房方式を採用しているため、不快なコールドドラフトを生じることなく、やさしく快適でかつ健康的な冷暖房を行うことができる。輻射型局所冷暖房パネルの開発における伝熱上の主要課題は、(1) 輻射伝熱面の内側において輻射伝熱面の冷却又は加熱を行う冷暖房機本体(輻射伝熱面と熱電素子と熱交換フィン)の熱電気複合特性の最適化、(2) 輻射伝熱面の外側における輻射、自然対流(ダウンフロー)、凝縮(結露水)の3つの伝熱モードの共存する伝熱場の最適化、(3) 輻射伝熱面と人体との間の輻射伝熱の最適化、(4) 輻射型局所冷暖房パネル、机、イス、人体等によって構成される3次元空間の温度及び気流分布の最適化の4点であった。パーソナルタイプの冷暖房機における輻射冷房の効果についてはこれまで殆んどデータがなく、又実験や解析による冷房効果の正確な把握も相手が人間だけに困難であり結局、早稲田大学理工学部建築工学科の木村研究室にその評価を御願いし、環境試験室内における人間(約40名の被験者)を用いての体感評価テストによりその最終的な効果を確認することにした。

図20に体感評価テスト結果の一例として室温28℃の場合の輻射伝熱面の温度と吹出し空気の流速を変えた場合の被験者の温冷感申告値の変化を示す。これより輻射伝熱面の温度は温冷感申告値にかなりの影響を及ぼし輻射冷房の効果のあることがよく解る。吹出し空気の流速を増大すると温冷感申告値は低下す

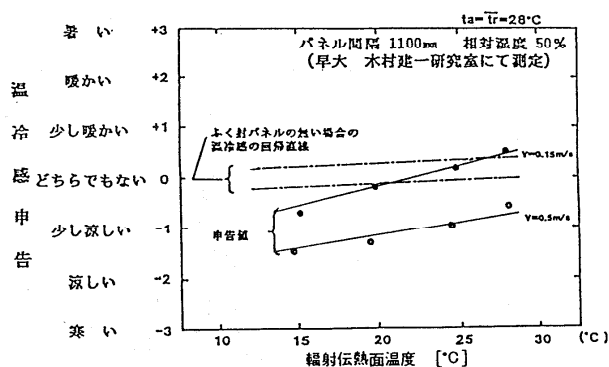


図20 輻射型局所冷暖房パネルの体感効果

るが、不快感は逆に増大するため、快適性の面からは流速を0.3m/s以下に収めて使用すべきであることも解った。図中の一点鎖線は一樣温度及び流速場における温冷感申告値の予測結果である。

非一樣温度及び流速場を形成する局所冷暖房パネルは、一樣温度及び流速場の場合に比べて冷房効果が大きく、効果的な冷房方式であると言える。本開発の場合にも、大手ゼネコンの空調技術、当社のグループ企業の材料技術、大学の快適性評価技術及び当社の伝熱技術を複合化することにより開発を完了させることが出来、技術複合化のメリットを生かすことが出来た。本輻射型局所冷暖房パネルは H元年 6月以降大手金属家具メーカーを通して事業化される予定である。

3. おわりに

一企業における商品や機器の開発における伝熱研究の特質につき御紹介した。一つの開発テーマ的にを絞り、その伝熱研究的側面に重点を置いて御紹介した方が良かったのではないかとも思う。

しかし伝熱技術と異分野の技術との複合化は今後増々盛んになるものと思われ、あえて複数の開

発テーマにつきその技術複合的特質を中心に御紹介した。本報告が何らかの御参考になれば幸いである。

<参考文献>

- [1] 門谷、他、小松技報、第30巻第3号、1984
- [2] 門谷、他、小松技報、第30巻第4号、1985
- [3] 門谷、他、小松技報、第31巻第2号、1985
- [4] 門谷、他、第25回伝熱シンポ講演論文集、1988
- [5] Alock, J.F., Proc. of the General Discussion on Heat Transfer, Instn Mech. Engrs, 1951
- [6] Stotter, A., SAE Paper NO.660757, 1966
- [7] Kadotani, K. et al, ASME·JSME Thermal Engineering Joint Conference, 1983
- [8] Kadotani, K. et al, International Conference on Thermal Application of Solar Energy, 1985
- [9] 門谷、他、日本太陽エネルギー学会第8回研究発表会講演論文、1982
- [10] 門谷、他、同上 第9回研究発表会講演論文、1983
- [11] 門谷、他、同上 第10回研究発表会講演論文、1984
- [12] 門谷、他、化工協会 Continuing Education シリーズ講習会 NO.16, 1986
- [13] Landstrom, D., et al, Battelle Memorial Institute Report, 1978
- [14] Landstrom, D., et al, Battelle Memorial Institute Report, 1980
- [15] Landstrom, D., et al, Battelle Columbus Laboratories, DOE/30171, 1981
- [16] 上村、半田、門谷、他、第47回応用物理学会熱電変換シンポジウム、1986
- [17] 半田、上村、門谷、他、第47回応用物理学会熱電変換シンポジウム、1986
- [18] 門谷、他、建築設備と配管工事、Vol 26, NO.10, 1988
- [19] 木村、田辺、門谷、日本建築学会講演会講演論文、1988

第109回米国機械学会冬季年会 "109th ASME Winter Annual Meeting" に出席して

中村秀夫 (原研)

1988年11月27日から12月2日にかけて、イリノイ州シカゴのハイヤット リージェンシー ホテルで開催された第109回米国機械学会冬季年会に出席しましたので、その印象を簡単に報告致します。 報告者は、"Heat Transfer"及び"Fluid Engineering"の両セッションで計3件の発表を行ないましたが、ASMEの年会に参加するのは今回が初めてであり、また、年会の全日程に参加した訳ではないので、以下に述べますのは参加したセッション等を中心にした報告です。

まず、表1に、今回の年会におけるセッション及び講演等の数を示します。 講演の数は、昼間に行なわれたものだけで340にも上り、前回のボストンでの全講演数の322を大きく上回り、大変な盛況でした。 オープニングレセプションでの簡潔で極めて短いスピーチもさることながら、ビールを片手に出版社や計測機器メーカーの展示をまわり、比較的安く図書が購入できるシステムは大変魅力的でした。

HEAT TRANSFER ASMEの伝熱部門(HEAT TRANSFER DIVISION)は、1988年で創立50周年を迎えました。 今回の年会ではそれを記念して、表2に示すような幾つかの基調講演やパネル討論が行なわれましたが、報告者はこれらの内、1)及び2)に参加することができました。 これらは、現在話題のコンピュータの中央演算素子等電子機器の冷却及び、宇宙開発に必要なと思われる熱伝達(ここでは核沸騰)への重力場の影響についてであり、いずれも会場は100人以上の参加者であふれ、熱気に包まれていました。 とくに、2)のパネル討論では、九州大学の西川先生らが1984年に報告された、伝熱面の傾きを変えた場合における核沸騰熱伝達係数の実験結果を基に行なわれ、大変印象的でした。 討論では、Rohsenow, Zuberらの諸先生方を含めて活発な意見交換がなされましたが、"いったい、今までの熱伝達係数においてちゃんと重力の項を考慮しているものがあつただろうか?"といった意見まで出され、伝熱研究の奥深さ(?)を痛感させられました。 1)の電子機器冷却に関する講演では、電子機器冷却の歴史を含む総括的な話がなされましたが、現在の日米貿易摩擦の状況を暗に示すような内容も含まれていました。 たとえば、"今後は製品の開発期間を半分くらいに短縮しないと半導体の開発速度に追いつけないが、日本ではそれがもう達成されつつある。"といった具合です。 表2に示しましたパネル討論の中には、残念ながら出席できなかったものの、7)のように炭酸ガスの増加に伴う地球の温暖化現象を扱うものもあり、伝熱研究の多様さに感嘆することしきりでありました。 なお、その他に行なわれたセッションのテーマには、過渡熱伝導、保温システム内伝熱、上述1)に関連した強制、自然および複合対流での熱伝達、材料加工時の相変化問題や、相変化に起因した伝熱及び熱システム、熱交換器での流動励起振動と雑音、高速流での伝熱、燃焼、伝熱流動での記号計算、閉じた系での自然対流、教育、蒸気発生器/熱交換器での熱水力、高温高圧セラミクス熱交換システム、伝熱流動での三次元問題、低温バイオテク

伝熱研究 Vol. 28, No. 109

ノロジー、廃棄物焼却、ガスタービンエンジンでの伝熱、流れの可視化フィルム等がありました。ASMEの年会では、HEAT TRANSFER DIVISION だけがポスターセッションを行なっており、一つの特徴と言えるかもしれません(表1参照)。

HEAT TRANSFERのセッションでは2件のポスターセッション発表を行ないました。共に、加圧水型原子炉(PWR)の小破断事故(SBLOCA)蒸気発生器(SG)の1、2次系内冷却材挙動と熱伝達に関して、現在原研のROSA-IVプログラムで行なわれている大型非定常試験装置(LSTF)を用いた模擬実験の結果及び計算コード(RELAP5/MOD2)の性能評価に関するものです。

FLUID ENGINEERING Fluid Engineering Divisionのセッションでのテーマには、気液及び固気二相流、レシプロICエンジンでの流動、Power Plant Transients、流体力学の工業応用、Water Hammer in Power Plant、水力機械、流体力学での小型コンピュータ応用、バルブの流体力学と非定常動作、コンピュータ流体力学(CFD)、非回転ターボ機器、非定常流、流量計測等がありました。基調講演はなく、パネル討論も1件だけでしたが、発表件数はASME年会の内が一番多く、活気に溢れていました。ただ、流れの可視化等を扱うセッションが無く、ビデオ等利用する参加者も少なかったのは残念な気がします。

報告者の3件目の発表は、これも原研のROSA-IVプログラムで行なってきました、光ファイバーを用いた高温高圧用小型ビデオプローブの開発に関するものです。現在LSTF及び、個別効果試験用の定常二相流試験装置(TPTF)では、水平配管内の高温高圧水/蒸気二相流の直接観察のために、米国原子力規制委員会(USNRC)との協定に基き貸与された大型のビデオプローブを使用しています。ところが、このビデオプローブはそれ自身が流れの大きな障害物になり、またスコープの保護のための冷却が必要で熱シンクとなることから、無冷却で高温高圧に耐える小型のプローブの開発を原研で進めて来ました。今回開発されたプローブは小型なので、可動型にする事が容易で、その場合、例えばじょう乱を伴う水平管内二相流の、水面下のボイド及び蒸気相中のエントレインメントの様子を同時に観察する事が可能となります。

さて、今回会場として使用されたハイヤット リージェンシー ホテルは、シカゴの中心に位置しミシガン湖に流れ込むシカゴ川に添って、道路をはさんで2つのブロックにまたがる巨大でかつエレガントなホテルでしたが、その豪華なデコレーションはクリスマスシーズンということもあり、さらに華麗なものでした。また、豆電球のちりばめられた街路樹等で美しく飾られた” Windy City ”シカゴは、時折雪がちらつきずいぶん寒かったのですが、日本を出発する前にいただいていた” 米国における治安最低の場所 ”のイメージに反して、誠に活気溢れる近代的ビジネス都市でしたので、少なからず安堵しました。ちなみに、ARGONNE国立研究所からPURDUE大学に移られた石井教授の談によれば、” 上記の様な悪いイメージは多くの米国人も同様にいただいているようだが、実際は強力な警察力によって良い治安が維持されている。”との事でした。ただ、やはり米国では、ホテルのエレベータには一人で乗らない等の注意は最低守った方が良くもありません。

表1. セッションおよび講演等の数 (Final Program より)

セッション	基調講演	パネル討論*	一般講演*	その他*
1. Advanced Energy Systems			50(s)	
2. Aerospace			36(s)	
3. Applied Mechanics			81 + 64(s)	
4. Bioengineering	1	1	121(s)	
5. Board on Professional Development		1		
6. Board on Professional Practice and Ethics		1		
7. Center for Research and Technology Development		2	9	
8. Computers in Engineering			5	
9. Council on Education		1		
10. Council on Engineering Interdisciplinary Sessions		7	36 + 38(s)	
11. Database Committee		1		
12. Design Engineering		2	33	
13. Dynamic System & Control			63 + 83(s)	
14. Electrical and Electronic Packaging		1	25	
15. Fluid Engineering	2	1	12 + 150(s) + 18(f)	3
16. Heat Transfer		9	7 + 27(s) + 130(p)	
17. History and Heritage			5	
18. Management		3	4	
19. Materials			73(s)	
20. Materials Handling			11(s)	
21. Materials Properties Council			11(s)	4
22. Mechanical Engineering Department Heads		1	5	
23. Mechanical Engineering Technology		1	4	
24. NDE Engineering			10 + 10(s) + 8(f)	
25. Noise Control and Acoustics	1	1	10 + 15(s)	
26. Nuclear Engineering				14(c)
27. Oil Guard				
28. Performance Test Codes		1(S)		
29. Pressure Vessels and Piping			16 + 25(s)	
30. Production Engineering		1	121(s)	1
31. Rail Transportation			21	
32. Safety		3	8	
33. Solar Energy		3	11	
34. Technology and Society				
35. Tribology			4	

* (S): Seminar, (s): in SYMPOSIUM, (f): in FORUM, (p): in POSTER SESSION, (c): in Competition

表2 HEAT TRANSFER DIVISION に於ける設立50周年記念基調講演及びパネル討論

- 1) Challenges in Electronic Packaging and Physical Design
by A. BAR-COHEN, Control Data Corp., Bloomington, MN (Keynote Lecture)
- 2) Panel on Significant Questions in Heat Transfer:
The Mechanisms of Nuclear Boiling Heat Transfer (Panel Discussion)
- 3) Panel on Nucleonic Heat Transfer: Future Directions (Panel Discussion)
- 4) Panel on Program Emphasis in Heat Transfer Research at Federal Funding Agencies
(Panel Discussion)
- 5) Integrated Approach to Aerothermal Heating and Structural Heat Transfer for
Hypersonic Vehicle by A. R. WIETING, NASA Langley Research Center, Hampton, VA
(Keynote Lecture)
- 6) Panel on Perspectives for the Future of the Heat Transfer Division in ASME
(Panel Discussion)
- 7) Panel on Future Challenges in Environmental Heat Transfer (Panel Discussion)

日本伝熱研究会北海道研究グループ講演・見学会

日本伝熱研究会北海道グループの見学会・講演会が下記の通り行われた。

日時：昭和63年12月17日（土）

場所：Ⅰ）見学会、札幌エネルギー供給公社エネルギーセンター

10:00~11:30

Ⅱ）講演会、北海道大学学術交流会館 第4会議室

13:00~17:00

Ⅰ）札幌市地下鉄排熱利用地域冷暖房プラント、参加者26名

連絡幹事の挨拶のあと、谷口博北大教授による同プラントのシステム概念の説明に続いて札幌エネルギー供給社の山田課長より同システムについて詳細な説明が行われた。

本システムは地下鉄駅舎内の廃熱をヒートポンプにより回収し、駅舎の冷房を行うと共に回収された熱エネルギーをガスボイラ・ヒートポンプシステムによりさらに高温度の熱水とし、さらに吸収式冷凍機と組み合わせて、札幌駅北口周辺20haの地域に冷暖房を行うことを目的に建設されている。

札幌市の地下鉄は年間1~1.35億kwhの電力を消費し、これは札幌市が消費する電力の5%に達する。これによって発生する廃熱の排出をファンによる空気の入れ換えによって行っているが、このための電力が全体の30%を占めると共に排熱による都市の汚染の原因ともなっている。従って廃熱を回収することによって排熱のための電力消費を軽減し、都市の熱汚染を防ぐ新しいエネルギーシステムとして国内外の多くの注目を集めているとのことであった。

システムの設置場所はエネルギー公社の近くに建設中のビルの地下にあり大型のヒートポンプ、ボイラ、熱交換器とそれらを結ぶ大口径の配管群などの建設現場は圧巻であった。また中央制御室は最新のコンピュータシステムでコンパクトに組立てられ広い制御室の中央にまとめられていた。

見学終了後質疑応答が行われた。本システムは駅舎の冷房を兼ねて廃熱回収が行われており、電力の消費は夏と冬で変化しないこと、またこのシステムは生産設備として計画されコスト計算は厳しく行われている。しかし、通年で全熱負荷の25%を廃熱で賄われあとは都市ガスに依存しているため現状の石油価格では短期的に見て経済性は難しいが、長期的視野では十分評価されるなど、活発な討論が持たれた。

II) 講演会、北大学術交流会館(13:00~17:00)、参加者28名

室工大堀山政良助教授は『「水室計画プロジェクト'88」舟形総合利雪農業方式の開発』というテーマで、山形県舟形町で行われている冬期積雪を集積し融雪遅延方式により、夏期の農業用水および雑用水の供給と冷気を無菌栽培場などに利用しようとするもので、雪を冷熱源として積極的に利用する大規模な夢のある計画が紹介された。

ついで帯広畜人の土谷富士夫助教授は『ヒートパイプによる永久凍土の低温貯蔵庫について』と題してヒートパイプを用いた土中冷蔵庫による農作物の貯蔵について、実際に貯蔵庫を試作して行なった実験結果をもとに説明がなされた。農産物の長期貯蔵能力は十分良好であるが現在のところヒートパイプのコストが高い(7~8万円/本)こと、冷熱源と貯蔵庫の熱コンダクタンスの制御が難しいなどの問題があるが、これらはいずれ解決出来る見通しにあるとのことである。

北見工大金山公夫教授は『ソーラヒートポンプ発酵システムにおける熱収支について』をテーマに東藻琴畜産公社で行ったソーラヒートポンプシステムによると場廃液のメタン発酵について説明があった。それによると昭和57年から計画が開始され同60年の予備試験を経て62年に完成したシステムにおいて100m³/日の原水を処理し150Nm³/日のメタン発生能力の設計値に対して、COD4000ppmの原水を50m³/日処理し、操作条件をうまく行えば300Nm³/日以上メタンガスの発生が得られ、ヒートポンプもCOP4.0と云う大きな値を得ることが出来た。

最後に芝浦工大片山功蔵教授による『スーパーヒートポンプの研究開発を中心に』と云うテーマで現在ムーンライト計画ですすめられている超高性能ヒートポンプの開発状況の説明がなされた。それによると目標とする出口温度85℃、COP8と言う夢のヒートポンプの開発は、冷媒には非共沸混合冷媒R123(90%)+R12(10%)などの組合せが試みられており、さらに化学的蓄熱技術の研究開発と凝縮器における熱交換性能の改善が伝熱工学的に進められているとのことであった。

(北海道地方連絡幹事 金山 公夫)

中国・四国研究グループ講演会

日時：昭和63年12月16日（金） 13:00～

場所：愛媛大学学生会館

講演：1) 乱数の性質についての一考察

※神田 健一，高橋 孝富士，千葉 徳男（香川職訓短大）

2) 狭い隙間液中を進行する気泡に関する研究

— 壁上に残留する液膜について —

※村上 幸一（愛媛大工），小川 正吾（愛媛大工院）

3) 曲円管内乱流について

※青山 善行（愛媛大工），二神 浩三（愛媛大工）

4) 水面に浮遊した原油上の火炎伝播速度

※新井 雅隆（広島大工），斎藤 孝三（ケンタッキー大）

Robert A. Altenkrick（ミシシッピー大）

David D. Evans（NBS）

5) 石炭スラリ液滴の燃焼（高温雰囲気内における気流の影響）

※松江 孝博（広島工大），新井 雅隆（広島大工）

廣安 博之（広島大工）

講演1) 不規則な現象を統計的に処理する際、前提となる「現象の不規則性」を判定することが必要となるが、不規則データの例として3種の疑似乱数（一様乱数、一様乱数シヤフル型、正規乱数）を用いて数値実験を行った結果の報告である。この報告の中で、「自己相関がゼロであるような時系列は不規則である。」という見地から、乱数の個数とその分散との関係、正規乱数の予測可能性や確率紙上での直線性および各乱数列の自己相関係数に関して検討が行われた。

講演2) 二枚の水平な平行円板間にある液中に、下方円板の中心に設けたノズルから加圧気体を急激に吹き込んだ場合の気液界面の非定常挙動に関する実験的検討である。実験は、液中に設置された平行円板間に気泡を噴出させて行い、気液界面の経時的な形状変化や界面先端の水平方向速度などを求めるとともに、気泡先端通過後に上方円板壁面上に残留する液膜の厚さを測定した。その結果、平板間距離が小さい場合には界面の成長速度は一次元モデルで整理できること、平板間距離が大きい場合、浮力の影響が小さいときは単相流の衝突噴流によって生じる放射状壁面噴流に似た挙動を示し、浮力の影響が大きいときは重力波の見地から導出した式に従って減速することが示さ

れた。また、気泡厚さの最大値や上方円板に付着する液膜厚さについての実験式が示された。

講演3) 曲り円管内の発達した乱流場における乱れ特性に関する実験的研究である。実験には、曲がりの曲率半径と管内半径の比 R/a が16, 26, 60の3種類の曲り円管を用い、流れが十分に発達した位置の管断面についてI型熱線あるいはX型熱線によって半径方向および周方向の時間平均流速、乱れ強さの分布を測定した。その結果、曲り円管内乱流では管中央領域でのレイノルズ応力と乱れ強さの分布には極大値、極小値があることや、 R/a が小さい場合には乱れの生成項と散逸項とが釣り合わない領域の現れることなどが示された。

講演4) コンビナート等での原油流出事故時の火災を想定した、水面に一樣に広がる原油の表面上を伝播する火災の速度に関する実験的研究である。実験水槽には観察用のガラス窓を持った恒温水槽を用い、火災伝播速度をビデオカメラによる撮影結果から求めるとともに、火災伝播時の燃料層や下部水層の温度を熱電対を用いて測定した。その結果、原油層の厚さが薄くなると火災伝播速度が低下して予熱帯の幅が広がること、原油層の放置時間によって火災伝播の形態が変化すること等が報告された。

講演5) 微粉炭と流体を混合して得られる石炭スラリの燃焼についての実験的研究である。ここでは、スラリー液滴として初期直径 3.4mmのCWM (Coal Water Mixture) を用い、高温壁上での液滴、液滴を高温雰囲気中に懸垂した場合および高温空気流中に懸垂した場合の3種の条件下での液滴の蒸発、燃焼をビデオカメラを用いて観察することによって、気流がスラリー液滴の燃焼に及ぼす影響を調べた。また熱電対によって液滴中心の温度も測定した。その結果から、高温壁上と高温雰囲気中でのスラリー液滴の燃焼についてはスフェロイダル状態の有無と表面反応開始部分の違い以外に大きな差はみられず、また高温雰囲気中と高温気流中とでは表面反応と分解反応の起こる条件が異なっていることが示されるとともに、気流速度による燃焼状態の違いについても報告がなされた。

(中国・四国地方連絡幹事 須藤 浩三)

九州研究グループ講演会

I

日 時 : 昭和63年9月30日(金) 15時~17時

場 所 : 九州大学工学部 機械系大会議室

講 師 : Prof. T. H. K. Frederking
Department of Chemical Engineering,
School of Engineering and Applied Science
University of California, Los Angeles

講演題目 : Recent Development in Porous Media Transport: He II

講演要旨 多孔質層内の超流動液体ヘリウムの流動と伝熱に関する講演がなされた。種々の条件下での輸送現象に関して、液体ヘリウムの2流体モデル(通常液体と超流動液体)を用いた理論解析の方法が示され、得られた解析結果は多孔質層の透過性としてダルシーのパーミアビリティを用いることで実験結果と一致することが示された。

II

日 時 : 昭和63年10月28日(金) 14時~17時

場 所 : 九州大学機能物質科学研究所会議室

講 演 1) 滴状凝縮熱伝達における表面処理層熱物性の影響について

鶴田隆治, 白浜正幸, 増岡隆正(九工人)

2) チョクラルスキー炉のシミュレーション

今石宣之(九大機能研)

見学会 多成分混相エネルギー変換システム実験装置について

藤井 哲(九大機能研)

講演概要

1) 滴状凝縮を長時間持続させるための凝縮面の表面処理法としてフッ素樹脂系の高分子材料による薄膜コーティングが最も有望視されている。ただ、この種の高分子材料の多くは熱伝導率が低いため、表面処理層自身の熱伝導抵抗だけでなく、その熱伝導率が滴状凝縮の熱伝達に及ぼす影響、いわゆる狭さく熱抵抗が問題となる。そこで、先の狭さく熱抵抗理論に膜厚の影響を含めることによって一般化を行い、表面処理層の膜厚、熱伝導率によって狭さく熱抵抗がどのように変わるかを理論的に評価した。また、その結果を凝縮面材料を変えた実験結果、および既存のPTFE凝縮面上における熱伝達率の報告値と比較し、よく一致しているものの、膜厚の影響に関してはなお詳細な実験を行う必要があることを示した。

2) 単結晶育成技術の内最も重要なチョコラルスキー炉(CZ炉)の操作は、ノウハウの集積に支えられている。CZ炉の特性を理解する第一歩として、炉全体を一つの系として取り扱う熱・流動シミュレーションを試み、坩堝温度と結晶直径、固液界面形状との関係、輻射熱制御物体の効果、メルト内流速分布等について考察した。

(九州地方連絡幹事: 藤井丕夫)

第27期「伝熱研究」編集後記

第27期編集委員長 宮本 政英（山口大）

昨年4月に第106号の編集を始めて、今109号の編集を終えるまでに約一年間「伝熱研究」の編集をお手伝いさせていただいた。この間、編集委員を始め御執筆の皆様、事務局の方々など多くの人々の御協力や励ましを得て、なんとか編集委員長の重責を果たさせていただいた。お世話になった皆様に誌上を借りて深甚なる感謝の意を表わしたい。

さて、御承知のごとく今期の「伝熱研究」には次の様な特集が組まれた、担当編集委員のお名前と併せてあらためて記すと次のようである。

- | | | |
|-------|---------------------|---------------|
| 第106号 | <特集：第25回日本伝熱シンポジウム> | 玉木恕乎委員、太田照和委員 |
| 第107号 | <特集：第22回伝熱セミナー> | 藤井丕夫委員、須藤浩三委員 |
| 第108号 | <特集：伝熱トピックスのレビュー> | 笠木伸英委員、高城敏美委員 |
| 第109号 | <特集：企業における伝熱研究> | 金山公夫委員、新井紀男委員 |

第106、107号は例年同じ特集であるが、全国規模の伝熱セミナーは今回が最後となった。第107号の誌面にはこれを惜しむ声が多く寄せられた。既に若い会員を中心に各地方研究グループで、ユニークなセミナーが企画されていると聞く。セミナーの新たな発展が期待される。

第108、109号の特集は将来問題検討委員会の答申を受けて企画した。伝熱トピックスのレビューは関連の研究に携わる読者には大変有益であることは疑いもないが、著者の負担が大きいことが執筆依頼の時点では最も気掛りであった。それにもかかわらず、依頼ページ数の倍以上に及ぶ力作が寄せられ、雑誌が厚くなり過ぎるのではないかと逆に心配する一幕もあった。

企業における伝熱研究は、企業としての制約から公表される内容には限界があると思われるが、社会のニーズや動向に最も敏感な企業の伝熱研究からは、将来の伝熱研究の方向や可能性の一端を窺うことができるのではないかと期待される。更に109号では初めての試みとして、カラーグラビアを1ページ掲載した。最近伝熱研究にも盛んに応用されている流れや温度場を可視化する技術を紹介するためにも、カラー写真はますます必要となるであろう。

今期から英文の目次が設けられたのを機会に、笠木委員を中心に英文原稿のタイピングインストラクション（本誌<お知らせ>参照）を整備し英文による投稿の便を図った。国際化の時代でもあり英文による投稿が増えることが期待される。和文による御寄稿の際に、時に英文の題目、氏名、所属を付記することを失念される場合もあった。原稿のワープロ化と共にこの件も宜しく願いたい。

最後に、編集にあたっては何かと至らぬことが多かったことをお詫びすると共に、「伝熱研究」発行に御協力頂いた多くの皆様にあらためて感謝し、日本伝熱研究会のますますの発展を祈って編集後記を終わりたい。

： お 知 ら せ ：

(1) 第27期（昭和63年度）総会のお知らせ

本会の第27期（昭和63年度）総会が、日本伝熱シンポジウムの第2日目に下記のごとく開催されますので、会員各位のご出席をお願いいたします。

記

- 日 時 平成元年 6月 1日（木） 13:30～14:00
場 所 仙台第一ホテル
〒980 仙台市宮城野区榴岡 1-2-45 Tel 022-297-4411
- 議 題 (1) 昭和63年度会務報告
(2) 昭和63年度会計報告
(3) 日本伝熱研究会学術賞・技術賞授与
(4) 第28期役員選出
(5) 旧・新会長挨拶

(2) 新会員名簿の発行

昭和63年12月から平成元年 1月にかけて会員の皆様のご協力により会員データを更新し、新しい会員名簿ができあがりました。本号と前後して会員の皆様のところにお届けすることができると思います。データは平成元年 4月10日現在のものです。

前回会員名簿は2年前の昭和62年 4月に発行しましたが、今回のデータ更新で3/4が新しくなりました。今回の会員名簿は従来のデータに加え、勤務先の FAX番号を追加しましたのでご利用ください。

年齢別会員数分布については、生年データをいただけないのが67件ありますので不確かさが 6%程度あります。

伝熱シンポジウム期間中、昨年同様に会場で個人会員会費の受付事務をいたしますのでご利用下さい（事務局）。

第 26 回日本伝熱シンポジウム

開催 5 月 31 日～6 月 2 日 (申込先: 第 26 回日本伝熱シンポジウム準備委員会)

[主催: 日本学術会議熱工学研究連絡委員会, 日本伝熱研究会, 日本機械学会ほか]

開催日 平成元年5月31日(水) ~ 6月2日(金)
講演会場 宮城第一ホテル
[〒980 仙台市宮城野区榴岡1-2-45, 電話022-297-4411]

シンポジウム
参加費 一般事前申込1名5,000円, 当日申込1名6,000円, 学生・大学院生事前申込1名2,500円, 当日申込1名3,000円(いずれも講演論文集代を含みません)
講演論文集代 1冊5,000円(日本伝熱研究会会員には1冊無料進呈)ただし, 郵送の場合は1冊5,500円
懇親会 6月1日(木) 18:30~20:30
会場 宮城第一ホテル
[〒980 仙台市宮城野区榴岡1-2-45, 電話022-297-4411]

事前申込1名6,000円, 当日申込1名7,000円, ただし, 同伴大人は無料です。
申込要領 郵便振替払込書の通信欄に, (1)氏名(ふりがな), (2)勤務先または学校名, (3)講演論文集冊数(進呈分以外), (4)懇親会出欠(婦人同伴の方はその旨を明記)をご記入の上, 当該費用をご送金下さい。参加証は当日, 受付にてお渡しいたします。なお, 事務の簡素化と経費節減のため, 原則として, 領収書の発行を省略させて頂きますので, 郵便局で受け取られる郵便振替払込金受領書を保存して下さるよう, お願い申し上げます。
郵便振替払込書は1人につき, 1枚ご使用下さい。

事前申込締切申込先 平成元年5月10日(水) 消印有効

振替口座: 仙台 8-5670
第26回日本伝熱シンポジウム準備委員会
〒980 仙台市荒巻字青葉
東北大学工学部機械工学科内
TEL. 022-222-1800ex4105 FAX. 022-268-3695

当日受付 8時20分よりシンポジウム会場で行います。

1) *印は講演者, 各講演は10分, 討論はそれぞれの講演群のうちで適宜まどめて行います。
2) 連名者で所属(勤務先・通学先)が省略されている方は, 前者と同じです。

A 室

第1日 5月31日(水)

[強制対流(Ⅰ)] 9:00~10:40

{座長 鈴木 健二郎(京大)}
一宮 浩市(山梨大)}

- A111 多孔質層内に置かれた傾斜した円柱からの強制対流熱伝達
機正 木村 繁男(東北工試),
機准 *濁沼 裕之(日立冷熱)
- A112 水溶液中に置かれた水平円柱周りの凍結挙動
機正 福迫 尚一郎(北大), 機学 *山田 雅彦,
機学 守実 寿
- A113 水平円柱まわりの強制-自然共存対流の熱伝達
並行流の場合
機正 *北村 健三(豊橋技科大), 機学 柏木 智光
- A114 一様流中におかれた回転円柱の熱伝達
機学 *大久保 知章(東北大), 機正 島田 了八,
機正 熊谷 哲
- A115 臨界間隔における直列2円柱まわりの流動と熱伝達
機正 五十嵐 保(防衛大), 機正 *山崎 裕朗,
機正 西田 幸造

[強制対流(Ⅱ)] 10:50~12:30

{座長 藤田 秀臣(名大)}
宮内 敏雄(東工大)}

- A121 平板境界層におかれた長方形柱の伝熱促進
機正 *五十嵐 保(防衛大), 機正 高崎 博美
- A122 平板上に置かれた正方形柱まわりの流動および熱伝達
機正 *佐藤 浩(慶大), 機正 菱田 公一,
機正 前田 昌信
- A123 フィンを有する流線形管の強制対流熱伝達
機正 *千田 好彦(東北学院大), 機正 塚越 律夫,
機正 庄司 幸嗣, 機正 佐藤 恭三
- A124 平板層流境界層内におかれた長方形柱まわりの流れと熱伝達
機正 五十嵐 保(防衛大), 機正 *高崎 博美
- A125 浮遊粒子中に置かれた管群まわりの熱輸送機構
機正 渡辺 吉典(三菱重工),
機学 *桑 杉男(岐阜大), 機正 熊田 雅弥,
機正 馬淵 幾夫, 機正 平田 賢(東大)

[強制対流(Ⅲ)] 13:30~14:50

{座長 五十嵐 保(防衛大)}
山下 博史(名大)}

- A131 波形流路の流動に関する研究
機正 浅古 豊(都立大), 機正 中村 博,
機学 *渡辺 昭治
- A132 後方ステップ流中の乱れ構造変化のグラフィック表現
(速度・圧力変動の相互相関関数と壁面圧力場の比較)
機正 上方 邦夫(東工大), 機准 *二松 順治
- A133 急拡大流路における流動と熱伝達の数値解析
機学 *西原 淳夫(京大), 井上 義章,
機正 鈴木 健二郎
- A134 拡大流路内剥離流れの層流熱伝達
機正 太田 照和(東北大), 機学 *戸田 芳信

特定テーマセッション

[次世代エネルギーシステムにおける伝熱] 15:00~17:20

{座長 秋山 守(東大)}
戸田 三朗(東北大)}

レビュー 秋山 守 (東大)

- A141 ディスク型希ガスMHD発電機内の超音速流における熱伝達
機正 *吉川 邦夫 (東工大), 機正 塩田 進
- A142 プラズマと電極壁面間の放電モード遷移 (微細アークと巨大アークの発生挙動の分離)
機正 *岡崎 健 (豊橋技科大), 矢部 衛, 奥村 幸彦
- A143 核融合炉機器の高熱負荷除熱に関する研究 (水の強制流動サブクール沸騰限界熱流束)
機正・原正 *稲坂 富士夫 (船技研), 機正・原正 成合 英樹 (筑波大)
- A144 液体金属ミスト冷却の熱伝達特性 (核融合炉高温高熱負荷壁の除熱に関する基礎研究)
機正・原正 *黒川 政秋 (東北大), 機正・原正 戸田 三朗, 杉山 直樹, 機正・原正 堀 豊
- A145 水平管群を重力方向によさる流体Naの共存対流熱伝達 (高速炉炉熱除去系熱交換器の基礎研究)
原正・機正 *杉山 憲一郎 (北大), 原正 馬 英, 原正・機正 石黒 亮二, 華平 隆史

第2日 6月1日(木)

[強制対流 (IV)] 8:40~10:40

(座長 荻野 文丸 (京大), 藤田 公一 (慶大))

- A211 直交回転円管内の流れと熱伝達の数値解析
機正 石垣 博 (航技研), 機正 *田村 洋, 望月 宗和
- A212 一次元管路における温度フロント移動問題の解法
機正 大串 哲明 (三菱電機)
- A213 偏心環状管路における層流熱伝達
機正 鈴木 健二郎 (京大)
*Janusz SZMYD (Mining & Metallurgy大), 大塚 弘雅 (関西電力)
- A214 三次元槽型方程式による曲り円管内乱流複合対流熱伝達の数値解析 (曲り円管の姿勢による影響)
機正 秋山 光庸 (宇都宮大), 機正 杉山 均, *毛塚 貞幸, 出島 淳一 (日立)
- A215 曲り管内流れの二重解
機正 *石垣 博 (航技研), 望月 宗和
- A216 境界適合座標系を用いた曲がり円管内層流の温度混合 (管路入口に不均一温度分布を与えた場合)
機正 功刀 資彰 (原研), 機正 横川 三津夫, 機学 *住吉 誠 (宇都宮大), 機正 杉山 均, 機正 秋山 光庸

[強制対流 (V)] 10:50~12:30

(座長 片岡 邦夫 (神戸大), 滝本 昭 (金沢大))

- A221 曲り円管内の流れと熱伝達の数値解析
機正 石垣 博 (航技研), 機正 *植田 修一, 望月 宗和
- A222 高熱流束加熱による二重円管内ガス流の熱伝達 (第2報 両面加熱)
機正 *山田 博史 (名大), 志満津 孝

機正 *鳥居 修一 (九大), 機正 清水 昭比古, 機正 長谷川 修, 日笠 正晃

- A223 下面加熱の水平長方形管内複合対流中の縦渦の生成と制御に関する研究 (発達した乱流域)
機正 *小泉 博義 (電通大), 機正 細川 巖
- A224 曲矩形管内の流れと熱伝達の数値解析
機正 石垣 博 (航技研), 機正 *山田 仁, 望月 宗和
- A225 固液反応を伴うスラリーの管内層流熱伝達
化工正 *荻野 文丸 (京大), 化工学 岡田 俊明, 化工学 坂田 和彦

[強制対流 (VI)] 14:10~15:50

(座長 秋山 光庸 (宇都宮大), 日向 滋 (信州大))

- A231 単相自然循環流動特性に関する研究 (非一様発熱分布を有する加熱部内流動特性; その2)
機正 藤井 照重 (神戸大), 機正 *石田 紀久 (原研), 原正 石塚 信, 海老野 洋二郎 (神戸大)
- A232 湿式半導体製造工程における熱・流動・塵挙動解析 (処理槽内の洗浄特性)
機正 *古藤 悟 (三菱電機), 機正・空正・冷正 池内 正毅, 機正 山中 皓郎
- A233 L S Iパッケージ用多孔形状フィン付強制空冷放熱器の特性
機正・冷正 *藤井 雅雄 (三菱電機), 機正・冷正 池内 正毅, 小原 雅信
- A234 ラジエータ用ルーバー付フィンの研究 (熱交換器のルーバー群内流れ)
*岩崎 充 (カルソニック), 中村 誠
- A235 加熱面冷却に関する研究
機正 木本 日出夫 (阪大), 今村 弘樹, 機正 *浜辺 謙二 (川崎重工)

[強制対流 (VII)] 16:00~17:20

(座長 相場 實也 (秋田高専), 中山 顕 (静岡大))

- A241 吹出しを伴う流れの流動・伝熱特性の数値解析 (層流の場合)
機正 *Ali. K.A. RAHMAN (京大), 機正 鈴木 健二郎, 機正 萩原 良道
- A242 ガスタービン動翼内冷却流路の熱伝達特性
機正 望月 貞成 (東農工大), 機学 *樋口 進, 機正 真家 孝 (石播)
- A243 流体振動を用いた熱輸送管に関する一実験
機正 *小澤 守 (神戸大), 機正 坂口 忠司, 機正 浜口 八朗, 機正 河本 明 (東芝), 機正 市居 明彦
- A244 強制対流冷却超伝導体の安定性解析
機正 伊藤 猛宏 (九大), 機正 高田 保之, 機正 笠尾 大作, 機学 *小林 雅浩

第3日 6月2日(金)

[強制対流 (VIII)] 8:40~10:40

(座長 河村 洋 (東理大), 植田 洋匡 (国公研))

- A311 くさび面への衝突噴流における流動および熱伝達
機正 *山下 博史 (名大), 志満津 孝

- A312 周囲と密度の異なる気体噴流に関する研究
(第1報: アルゴンガス噴流の流動・拡散特性)
機正 *文沢 元雄(原研), 機正 菱田 誠,
機正 功刀 資彰
- A313 円柱列による衝突噴流伝熱の制御
化工正 *片岡 邦夫(神戸大), 化工学 浜野 真一,
化工学 南浦 健二, 指江 尚史, 李 功様
- A314 円形衝突噴流伝熱伝達の特性に関する実験的研究
機正 *原正 一宮 浩市(山梨大), 機学 *奥山 薫
- A315 軸対称噴流の渦輪発生周波数
機正 *栗間 諄二(山口大), 機正 平田 賢(東大),
機正 笠木 伸英
- A316 代数応力モデルによる二次元乱流衝突噴流の熱流動解析
機正 秋山 光庸(宇都宮大), 機正 杉山 均,
機正 *大沢 幹夫(本田技研)

[強制対流 (IX)] 10:50~12:30

{ 座長 石垣 博(航技研),
西村 龍夫(富山大) }

- A321 成層流における渦形成と混合の数値シミュレーション
機正 *小宮山 正治(阪大), 機正 高城 敏美,
機正 加守田 昌史(三菱重工)
- A322 乱流混合のLarge Eddy Simulation
(乱流の組織的構造)
機正 宮内 敏雄(東工大), 機学 *川野 浩一郎,
新郷 美紀
- A323 低レイノルズ数領域と非常管内流への適用から見た
二、三のk-ε乱流モデル
機正 *河村 洋(東理大), 水尾 勝
- A324 長い円管内旋回乱流予測における応力方程式モデルの検討
機正 *平井 秀一郎(阪大), 機正 高城 敏美
- A325 温度場3方程式乱流モデル
機正 *長野 靖尚(名工大), 機正 田川 正人,
機学 北原 周摩

[強制対流 (X)] 13:30~14:50

{ 座長 笠木 伸英(東大),
新井 雅隆(広島大) }

- A331 壁乱流の準秩序運動と熱伝達
機正 *田川 正人(名工大), 機正 長野 靖尚,
機学 東住 誠治
- A332 円管内安定温度成層流の乱流熱輸送
機学 *小林 健一(慶大), 機正 菱田 公一,
機正 前田 昌信
- A333 ベンド内乱流の特性
機正 *青山 善行(愛媛大), 機正 二神 浩三,
機正 土方 邦夫(東工大)
- A334 気・液界面での液側乱流構造とスカラー輸送機構
化工正 *小森 悟(九大),
化工正 平賀 義之(グイナン),
化工正 村上 泰弘(九大),
化工正 植田 洋匡(国公研)

[強制対流 (XI)] 15:00~17:00

{ 座長 長野 靖尚(名工大),
望月 貞成(東農工大) }

- A341 渦発生体による平板層流境界層熱伝達の促進
機正 *柳原 一蔵(横国大), 機正 鳥居 薫
機正 土方 邦夫(東工大), 機正 長崎 孝夫,
機学 *南 和孝

- A343 角柱を挿入した平行平板間流れの流動・伝熱特性
機学 *井上 義章(京大), 機学 西原 淳夫,
機正 鈴木 洋, 機正 鈴木 健二郎
- A344 リングを有する円管内流の熱伝達
機正 *丸茂 榮佑(明石高専), 機学 中島 秀之,
機学 中元 淳一
- A345 三次元突起群による矩形管路の伝熱促進に関する研究
*後藤 義信(岐阜大), 機正 馬淵 幾夫,
加藤 彰, 機学 吉川 徹, 機正 熊田 雅弥
- A346 コロナ放電を利用した対流伝熱の促進
(流れと平行にソライヤ電極を設置した場合の理論解析)
機正 *多田 幸生(金沢大), 機正 滝本 昭,
機正 植田 大作(東芝), 機正 林 勇二郎(金沢大)

B 室

第1日 5月31日(水)

[熱物性] 9:20~10:40

{ 座長 飯田 真宏(福国大),
荒木 信幸(静岡大) }

- B111 有効熱物性値における直接測定値と誘導値との
相違について
機正 *山田 悦郎(秋田大), 足利 貢, 松尾 義輝
- B112 フロン代替物質R123の熱伝導率測定
機正 *小林 裕二(慶大), 足木 英洋(中部電力),
機正 長坂 雄次(慶大), 機正 長島 昭
- B113 感温液晶の光学的特性
(懸濁液)
機正 *原正 *秋野 詔夫(原研),
原正 浅野 泰久(神船大),
機正 *原正 功刀 資彰(原研),
機正 *原正 黒沢 昭(神船大),
鷺谷 昭二郎(日本カプセル), 中西 真行
- B114 透湿度測定法に関する研究(続報)
機正 田中 宏史(福岡工大)

[計測・測定] 10:50~12:30

{ 座長 塩治 震太郎(IHI),
阿部 宜之(電総研) }

- B121 微小孔内の突沸現象を利用した記録方法
(第1報 液体吐出待時間の測定)
機正 *服部 俊介(東芝), 精正 鈴木 祐司,
機正 栗原 映男, 渋谷 邦弘
- B122 感温液晶を用いた自動温度計測法に関する基礎的研究
機学 *辻 康(東大), 機正 笠木 伸英,
機正 平口 賢、石川 雅幸
- B123 電子機器の熱設計にCAEを導入する際の一考察
機正 *石塚 勝(東芝), 機正 佐々木 富也,
機正 横野 泰之, 三戸 修悦
- B124 超音波印加による伝熱促進に関する研究
機正 *中川 勝文(豊橋技科大), 機学 *野村 信福
- B125 超音波CTによる円管内噴流の温度分布測定
化工正 *新井 紀男(名大), 化工学 山本 彰夫,
化工正 架谷 昌信, 佐藤 正典(本多電子)

[ヒートパイプ (I)] 13:30~14:50

{ 座長 田中 修(九工大),
師岡 慎一(東芝) }

- B131 2成分混合媒体を用いたヒートパイプの研究(第2報)
機正 土方 邦夫(東工大), 機正 長崎 孝夫,
機学 *長谷川 浩巳
- B132 永久磁石制御型ヒートパイプ
(ヒートパイプの可変コンダクタンス制御技術)
機 国俊(藤倉電線), *望月 正孝, 杉原 伸一,
益子 耕一, 置鮎 隆一
- B133 金網ウィックの浸透係数
機正 *小佐井 博章(熊本大), 機正 井村 英昭,
機学 池田 勇二
- B134 吸熱源との熱的干渉を考慮したモデルによるヒートパイプ
の動特性の解析
化工正 倉前 正志(北大)

特定テーマセッション

- [大規模および環境伝熱学] 15:00~17:20
{座長 田中 正之(東北大)}
賈藤 武雄(東北大)
- レビュー 田中 正之(東北大)
- B141 密度成層流におけるupstream influence
に関する数値的研究
化崎 秀史(国公研)
- B142 大気中の重力流の挙動
*植田 洋匡(国公研), 余 偉明(筑波大)
- B143 都市キャニオンにおける伝熱特性に関する研究
(屋外環境表面の対流熱輸送)
機正 吉田 篤正(京大), *綿谷 茂,
赤松 勝
- B144 都市ヒートアイランドの研究
(大気温度の移動観測結果と3次元解析結果との比較)
機正 賈藤 武雄(東北大), *山田 逸作
- B145 住宅の期間暖房負荷計算法について
その1
建正・空正 *渡辺 俊行(九大),
建正・空正 尾崎 明仁, 建正・空正 平佐 幸男,
建正・空正 龍 有二, 建正・空正 片山 忠久
- B146 住宅の期間暖房負荷計算法について
その2
建正・空正 *尾崎 明仁(九大),
建正・空正 渡辺 俊行, 建正・空正 平佐 幸男,
建正・空正 龍 有二, 建正・空正 片山 忠久

第2日 6月1日(木)

[ヒートパイプ(II)] 8:40~10:20

- {座長 深野 徹(九大)}
忽那 泰章(神船大)
- B211 銅-水ウィックレス・ヒートパイプの伝熱特性
機正 田中 修(九工大), 機正 越野 英和,
*栗木 淳, 安積 則義
- B212 スーパーヒートパイプの伝熱特性
機正 田中 修(九工大), 機正 越野 英和,
阿辺 政司, *酒井 久, 田中 勝実
- B213 等温照射用ヒートパイプの除熱特性
機正 岡本 芳三(茨城大), 機正 神永 文人,
原正 伊藤 治彦(原研), 望月 正孝(藤倉電線),
*杉原 伸一

- B214 SO₂/SO₃系気相可逆反応を用いた高温ケミカルヒートパイプ
に関する研究(閉ループ系の熱輸送特性)
化学工 *曾 維平(名大), 化工正 松田 仁樹,
化工正 架谷 昌信

- B215 ハニカムパネルに埋め込んだヒートパイプ熱輸送特性の
検討
航空宇宙正 *坂坂 明宏(NTT),
機正・航空宇宙正 中島 克彦

[自然対流(I)] 10:30~12:30

- {座長 尾添 結之(九大)}
前川 透(東洋大)}
- B221 下から加熱される水平流体層の乱れの研究
(第1報:ハニカム構造体の熱伝達への影響)
機正 *村田 秀男(原研),
機正 刑部 真弘(茨城大),
機准 後藤 博樹(住友重機),
原正 田坂 完二(原研)
- B222 ハニカムコアをもつ傾斜空気層内の自由対流熱伝達
機正 浅古 豊(都立大), 機正 中村 博,
*陳 志強, ASME MOHAMMAD FAGHRI (Univ. of
RHODE ISLAND)
- B223 熱抽出を伴う多孔質スクリーンの自然対流への影響
機正 増岡 隆士(九工大), 機学 *河本 修治,
機学 西村 敏和, 機正 鶴田 隆治
- B224 下方加熱による多孔質層内2次元対流の安定性
(Straussバルーンは存在するか)
機正 木村 繁男(東北工試)
- B225 傾斜流体層内自然対流伝熱に対する仕切板の効果
化工正 *西村 龍夫(富山大),
化工正 長澤 史生(広大), 化工正 河村 祐治
- B226 海中におかれた水層の融解熱伝達
機正 福迫 尚一郎(北大), 機学 *大野 有也,
機学 成田 恵一, 機学 鈴木 理夫

[自然対流(II)] 14:10~16:50

- {座長 今石 宣之(九大)}
石原 勲(関西大)}
- B231 微小重力下における発熱性流体の対流伝熱
機正 *三田地 結史(豊橋技科大), 機学 小林 晋,
電正 齊藤 制海
- B232 回転場に置かれた二重円筒間水平流体層内のマランゴニ
密度差複合対流に関する研究
機正 庄司 正弘(東大), 機学 *原口 洋一
- B233 2重化されたカプセル内における自然対流の研究(その1)
機正 廣瀬 宏一(米沢工高)
- B234 半球容器内自然対流における円形伝熱面近傍の流動と伝熱
機正・原正 椎名 保顕(原研)
- B235 突起伝熱面をもつ密閉空間の自然対流熱伝達
機正 吉岡 啓介(大分大)

[自然対流(III)] 16:00~17:40

- {座長 菱田 誠(原研)}
浅古 豊(都立大)}
- B241 低レイリー数における水平円柱自然対流熱伝達の数値解析
原正 *竹内 右人(京大), 原正 塩津 正博,
原正 櫻井 彰
- B242 液体ナトリウムにおける水平円柱自然対流熱伝達
原正 *畑 幸一(京大), 原正 竹内 右人,
原正 塩津 正博, 原正 櫻井 彰
- B243 ホログラフィ干渉法による共存対流熱伝達の研究

- (下降気流中の水平円柱まわりの熱伝達)
 原正 *大辻 友雄(神船大), 原正 黒澤 昭
 B244 鉛直円管内加熱下向流の強制・自然複合対流熱伝達
 機正 丸山 茂夫(東大), 機学 *岩崎 洋一,
 (故) 田中 宏明
 B245 鉛直二重円管内の自由対流熱伝達
 (温度場と速度場の発達過程)
 伝正 *崔 準婁(韓国機械研),
 機正 円山 重直(東北大), 機正 相原 利雄

第3日 6月2日(金)

- [自然対流(IV)] 9:00~10:40
 烏田 卓爾(日立)
 〔座長 能登 勝久(神戸大)〕
 B311 溝に埋め込まれた垂直平行平板列の自然対流熱伝達
 機正 *河合 洋明(道工大), 機正 岡垣 理
 B312 鉛直平行平板間の共存対流に関する研究
 (断熱板と非加熱部をもつ一様加熱板の組合せ)
 機正 勝田 勝太郎(関西大), 機正 *石原 勲
 B313 一様発熱する鉛直平板上の自由対流境界層
 (層流・遷移域における乱れの発達)
 機正 *宮本 政英(山口大), 機正 加藤 泰生,
 機正 栗間 諒二, 機学 城島 一暢,
 機学 池 公司郎
 B314 鉛直2平板間密度成層内の自然対流に関する研究
 (第2報)
 機正 姫野 修廣(東工大), 機正 土方 邦夫,
 機学 *川本 浩一
 B315 分散熱源を有する平行平板群の層流共存対流熱伝達
 (平板の熱伝導の影響)
 機正 *富村 寿夫(九大), 機正 藤井 丕夫

- [自然対流(V)] 10:50~12:30
 増岡 隆士(九工大)
 〔座長 吉岡 啓介(大分大)〕
 B321 自然対流乱流境界層の構造特性
 機正 辻 俊博(名工大), 機学 *股 雅晨,
 機正 長野 靖尚
 B322 安定温度成層内のサーマルブルームの揺動
 (規則波の発生について)
 機正 *能登 勝久(神戸大), 筒井 一就,
 機正 松本 隆一
 B323 マランゴニ対流発生におよぼす電場の影響
 機正 *前川 透(東洋大), 機正 棚沢 一郎(東大),
 安部 啓成
 B324 立方体容器内の液体カリウムの自然対流におよぼす磁場の
 影響
 機学 *岡田 和人(九大), 機正 *化工正 尾添 紘之
 B325 く形ループにおける沸騰を伴う自然循環流
 機正 *怒那 泰章(神船大), 機正 森田 駿樹,
 機正 福田 勝哉

- [自然対流(VI)] 13:30~15:30
 宮本 政英(山口大)
 〔座長 北村 健三(豊橋技科大)〕
 B331 船用炉の横揺れ時自然循環特性
 機正 *村田 裕幸(船技研), 機正 石田 紀久(原研)
 B332 円環型自然循環ループの管内温度分布と流速分布
 *須田 不二夫(東海大), 三村 和男(東海大)

- B333 水平環状空間内乱流自然対流の直接数値解析の妥当性
 原正 福田 研二(九大), 守田 幸路,
 *中村 陽一郎, 原正 長谷川 修, 谷口 昇
 B334 鉛直環状空間内における自然対流熱伝達
 機正・原正 戸田 三朗(東北大),
 *佐藤 博道(トヨタ),
 機正・原正 黒川 政秋(東北大),
 機正・原正 堀 豊
 B335 二成分気体の拡散と自然循環に関する研究
 第3報:逆U字管における拡散と自然循環(II)
 機正 *武田 哲明(原研), 機正 菱田 誠
 B336 二成分気体の拡散と自然循環に関する研究
 第4報:高温ガス炉の配管破断事故時における空気への浸入
 挙動(II)
 機正 武田 哲明(原研), 機正 *菱田 誠,
 原正 馬場 信一

C 室

第1日 5月31日(水)

- [凝縮(I)] 9:00~10:40
 上原 春男(佐賀大)
 〔座長 橋詰 健一(東芝)〕
 C111 水平フィン付管群を流れる冷媒R113蒸気の凝縮熱伝達
 (千鳥配列管群の場合)
 機正 本田 博司(九大),
 機正 内間 文顕(岡山大), 機正 野津 滋,
 機学 鳥越 栄一, 機学 *今井 誠士
 C112 ローフィン付管の凝縮に関する実験的研究
 機正 *曾田 正浩(三菱重工), 機正 岩淵 牧男
 C113 編み込み細線を有する細細管凝縮器の伝熱特性
 機正 越後 亮三(東工大), 機正 吉田 英生,
 機学 *宮下 洋介
 C114 二成分不溶性混合冷媒の凝縮熱伝達に関する研究
 (付着滴の離脱と掃除効果)
 機正 滝本 昭(金沢大),
 機正 *寺西 恒宣(富山工専),
 機正 羽根田 完爾(松下電産),
 機正 林 勇二郎(金沢大)
 C115 高分子被覆面における滴状凝縮の狭く熱抵抗の研究
 機正 鶴田 隆治(九工大), 機学 *白濱 正幸,
 機正 増岡 隆士

- [凝縮(II)] 10:50~12:30
 土方 邦夫(東工大)
 〔座長 本田 博司(九大)〕
 C121 湿分分離加熱器伝熱管出口における過冷却
 (第3報:解析による過冷却度の予測)
 機正・冷正 *橋詰 健一(東芝), 冷正 阿部 法光,
 機正 尾関 敏明, 機正 佐藤 健二
 C122 湿分分離加熱器伝熱管出口における過冷却
 (第2報:フロンを用いた実験)
 冷正 *阿部 法光(東芝), 冷正・機正 橋詰 健一,
 機正 尾関 敏明
 C123 湿分分離加熱器伝熱管出口における凝縮液の過冷却
 (第1報:実験条件での実験)
 機正 *尾関 敏明(東芝), 機正 佐藤 健二

- C124 気泡分散相を利用した蒸気吸収熱伝達特性の研究
機正 嶋志田 隼司(芝浦工大), 機学 *榎本 英一,
機正 一色 尚次(日本大),
機正 佐藤 運男(芝浦工大), 機正 片山 功蔵
- C125 自由表面を有する液体ジェット流への蒸気の凝縮現象に関する研究
機正・原正 井上 晃(東工大),
機正・原正 高橋 実, 原学 *津久井 潤

「凝縮(Ⅲ)」 13:30~14:50

〔座長 藤井 丕夫(九大)〕

- C131 鉛直面上の乱流膜状凝縮に関する実験的研究
機正 上原 春男(佐賀大), 機学 田口 雄三,
機学 *中川 信也, 機学 井手 春敏
- C132 水平管内凝縮に関する理論的研究
機正 *土方 邦夫(東工大),
V. NAVROTSKI (ハリコフ工大)
- C133 二成分蒸気の水平二重管環状部における凝縮(環状部寸法の影響)
機正 野津 滋(岡山大), 機正 本田 博司(九大),
機学 沢畷 賢一(岡山大), 機学 *尾崎 公一
- C134 Uベンドを有する二重管型凝縮器に関する研究
機正 本田 博司(九大), 機正 野津 滋(岡山大),
機学 *西田 伸, 冷正 中田 春男(ダイキン)

特定テーマセッション

〔熱物性測定の新技術〕 15:00~17:20

〔座長 時田 薫(神戸大)〕

レビュー 時田 薫(神戸大)

- C141 700K, 200MPaまでの領域における混合流体の熱力学性質測定装置の開発
機准 *加幡 安雄(慶大), 機正 上松 公彦
- C142 高圧流体用の振動密度計の開発
化工正 松尾 成信(神戸大)
- C143 純粋冷媒および混合冷媒の飽和液体密度測定装置
化学 *前沢 幸繁(慶大), 機正 佐藤 春樹,
機正 渡部 康一
- C144 広い温度・圧力範囲の気体および液体の定圧比熱測定装置の開発
機正 *佐藤 春樹(慶大), 機正 斎藤 温,
機正 池谷 陽一郎, 機正 中川 真介,
機正 渡部 康一
- C145 金属の全半球ふく射率と比熱の同時測定法
機正 *佐々木 世治(一関高専),
機正 増田 英俊(東北大),
機正 日向野 三雄, 機正 佐々木 博志
- C146 強制レイリー散乱法による溶融塩の温度伝導率測定(1000℃以上のアルカリ金属塩化物の測定)
機学 *中沢 巨樹(慶大), 赤堀 正憲,
機正 長坂 雄次, 機正 長島 昭
- C147 ステップ状加熱による断熱材の熱物性値測定法
機正 荒木 信幸(静岡大), 機学 *仙場 浩雅,
機正 牧野 敦

第2日 6月1日(木)

〔沸騰(Ⅰ)〕 8:40~10:40

〔座長 塩津 正博(京大)〕

- C211 液体窒素の過渡沸騰伝熱特性(急加熱時の沸騰気泡挙動と熱伝達履歴)
機正 *奥山 邦人(横国大),
機正・化工正 飯田 嘉宏
- C212 チャンネル中加圧超流動ヘリウムの沸騰熱伝達特性 I
機正 *岡村 哲至(東工大), 低温正 梶島 成治,
低温正 石戸 功一, 低温正 佐藤 明男(東芝)
- C213 窒素-4フッ化炭素混合冷媒の沸騰熱伝達に関する研究
機正 *天野 俊之(三菱電機)
- C214 R22-R114混合冷媒の水平蒸発管内伝熱特性に関する研究(続報)
機正 吉田 駿(九大), 機正 森 英夫,
機正 *松永 崇, 機正 大石 克巳
- C215 二成分混合媒体のプール核沸騰熱伝達(第1報)
機正 藤田 恭伸(九大), 機正 *大田 治彦,
機正 筒井 正幸, 機正 庵原 久夫(有明高専)
- C216 混合媒体の沸騰熱伝達(R11 R113系の実験結果)
機正・化工正 中西 重康(姫工大),
機正・化工正 村井 一弘, 機正・化工正 川島 陽介,
*柴原 正文

〔沸騰(Ⅱ)〕 10:50~12:30

〔座長 庄司 正弘(東大)〕

- C221 EHD効果を利用した沸騰熱伝達促進に関する研究(第2報 沸騰気泡の挙動と伝熱特性)
機正 *緒方 潤司(三菱重工),
機正 矢部 彰(機研), 機正 竹谷 隆夫
- C222 EHD効果を用いたプール沸騰熱伝達の促進
機正 *上原 光宏(東大), 機正 西尾 茂文,
機正 棚沢 一郎
- C223 サブクール状態での核沸騰熱伝達特性
機正 *神永 文人(茨城大), 機正 岡本 芳三,
機正 刑部 真弘, 村山 憲吾
- C224 狭隘流路における強制対流サブクール沸騰熱伝達
機学 *保坂 史郎(東大), 機正 平田 賢,
機正 笠木 伸英, 幸田 栄一
- C225 狭い間隙における核沸騰熱伝達と限界熱流束(伝熱面姿勢の影響)
機正 藤田 恭伸(九大), 機正 *内田 悟,
機学 後藤 俊二

〔沸騰(Ⅲ)〕 14:10~15:50

〔座長 吉田 駿(九大)〕

- C231 多孔質沸騰放熱スタッドにおける過渡温度変化の解析
*中山 恒(日立), 中島 忠克, 大橋 繁男,
桑原 平吉
- C232 高温液小滴と低沸点液による蒸気爆発の機構に関する研究(最大圧力ピークの発生原因)
機正 *高島 武雄(横国大),
機正・化工正 飯田 嘉宏
- C233 分散気泡水による高温物体の冷却特性
機正 *横井 豊(豊田中研), 中西 和之,
機正 藤掛 賢司

- C234 高温物体の液中急冷過程に対する超音波照射の影響
機正・化工正 飯田 嘉宏,
機学・化工学 筒井 健太郎, 化工学 *佐々木 純一
- C235 ミスト冷却に関する研究
(第4報:非定常性の影響)
機正 *大久保 英敏(東大), 機正 西尾 茂文

[沸騰(IV)] 16:00~17:40

{座長 井上 晃(東工大)
神永 文人(茨城大)}

- C241 水平管の核沸騰熱伝達における管群効果
(管まわりの局所熱伝達係数とボイド率)
機正 藤田 恭伸(九大), 機正 *吉田 敬介
- C242 水平二重円筒容器内プール沸騰におけるボイド率分布と温度分布の測定
機正 *日向 滋(信州大), 機正 桜井 正幸,
機正 九我 修, 機正 中沢 賢,
J. E. S. Venart (U. N. B. (Canada)), A. C. M. Sousa,
K. J. Ahn
- C243 水平同心円筒内における円筒管の沸騰熱伝達
機正 *土田 一(秋田高専), 機正 相場 真也
- C244 水平蒸発管内周平均熱伝達係数に及ぼす管壁内熱伝導の影響
機正 吉田 駿(九大), 機正 *洪 海平,
機正 松水 崇
- C245 BWR燃料棒スペースまわりのドライアウトに関する研究
機正 *横堀 誠一(東芝), 機正・原正 師岡 慎一,
機正・原正 寺坂 晴明, 太田 光明,
原正 加藤 賢

第3日 6月2日(金)

[沸騰(V)] 8:40~10:40

{座長 伊藤 猛宏(九大)
大田 治彦(九大)}

- C311 沸騰開始に及ぼす伝熱面予熱温度の影響(続報)
機正 *佐古 光雄(広島大), 中山 義孝,
機正 山崎 博司
- C312 伝熱面のマイクロ形状とプール沸騰熱伝達の関係
機正 *福田 勝哉(神船大), 機正 森田 駿樹,
機正 忽那 泰章
- C313 プール沸騰に関する研究
(合体泡下に形成される液膜厚さ)
機正・原正 *熊田 俊明(北大), 原正 坂下 弘人
- C314 加熱面材質による固液接触過程の検討
機正 *稲田 茂昭(群馬大), 金属正 永倉 和郎,
鳥羽 正幸, 吉沢 幸佳, 福原 貴
- C315 気液界面形状の解析をとり入れた接触角の測定
機正 *水上 紘一(愛媛大),
森本 寛(松下寿電子), 機正 二神 浩三(愛媛大)
- C316 核生成理論のバブルジェットプリンタへの応用
機正 *浅井 朗(キャンソ)

[沸騰(VI)] 10:50~12:30

{座長 村尾 良夫(原研)
波江 良弘(船技研)}

- C321 プール沸騰に関する研究
(水平細線の限界熱流束)
機正・原正 熊田 俊明(北大), 原正 坂下 弘人,
*松永 哲哉

- C322 垂直円管内の自然対流沸騰の限界熱流束
機正 *門出 政則(佐賀大), 山地 清, 三原 信一
- C323 高圧領域における一樣加熱垂直円管内の強制流動沸騰限界熱流束
機正 *横谷 定雄(東大), 機正 庄司 正弘,
機正 渡辺 誠, 機正 甲藤 好郎(日大)
- C324 管内強制流動サブクール沸騰の限界熱流束に対する管径の影響について
機正 *甲藤 好郎(日大), 機正 吉原 正博
- C325 CCFL相関式に基づく垂直矩形流路の下向流
低流速条件下の限界熱流束の予測
機正・原正 *神永 雅紀(原研),
機正・原正 数土 幸夫, 機正・原正 村山 洋二,
原正 皆藤 和男(日本鋼管)

[沸騰(VII)] 13:30~15:10

{座長 藤田 恭伸(九大)
菊地 義弘(広島大)}

- C331 プール膜沸騰熱伝達(1)
原正 *塩津 正博(京大), 原正 畑 幸一,
原正 畑 幸一
- C332 プール膜沸騰熱伝達(2)
原正 *櫻井 彰(京大), 原正 塩津 正博,
原正 畑 幸一
- C333 膜および遷移沸騰における加熱面温度変動と熱伝達機構に関する研究
機正 庄司 正弘(東大), 機学 *川上 道生
- C334 飽和膜沸騰熱伝達の流れの影響
原学 *劉 秋生(京大), 原正 塩津 正博,
原正 櫻井 彰
- C335 水平円柱まわりの自然対流膜沸騰熱伝達の全体像
機正 西尾 茂文(東大), 機学 *大竹 浩晴

D 室

第1日 5月31日(水)

[放射(I)] 9:00~10:40

{座長 工藤 一彦(北大)
新井 紀男(名大)}

- D111 赤外放射計による射出率の測定とその応用
機正 *岡本 芳三(茨城大), 機正 神永 文人,
機正 刑部 真弘, 金属正 衛藤 基邦(原研),
石井 敏満(茨城大)
- D112 配向を考慮した繊維集合体のふく射物性値の推定法
機正 黒崎 晏夫(東工大), 機正 *山田 純,
機正 竹内 正顯(桐蔭横浜大),
高木 拓(芝浦工大)
- D113 アルカリ硝酸塩のふく射物性
機正 *牧野 俊郎(京大), 前田 孝英, 枝村 学,
機正 吉田 篤正
- D114 日射量データに基づく雲の透過率の検討
機正 *馬場 弘(北見工大), 機正 金山 公夫
- D115 ソーラボンドの断熱構造を考慮した熱的性能の予測
機正 *金山 公夫(北見工大), 機正 馬場 弘

[放射(II)] 10:50~12:30

{座長 金山 公夫(北見工大)
山田 幸生(機械技研)}

- D121 球状粒子充てん層内相関散乱ふく射輸送に関する研究
機正・原正 *上字部 幸一 (大分大)
- D122 充填層内での放射エネルギーの透過に関する研究
(第2報 各手法による減衰係数の比較)
機正 工藤 一彦 (北大), 機正 谷口 博,
*金 鈴模
- D123 間接型加熱炉におけるボルト充填層の伝熱解析
*伊藤 広之 (東邦ガス), 中村 泰久, 渡辺 哲男,
化工正 新井 紀男 (名大), 化工正 架谷 昌信
- D124 半導体拡散プロセスにおける積層ウエハの温度分布
(第2報 挿入時の装置温度変化とウエハの透過を考慮した
場合)
機正 *平沢 茂樹 (日立), 機正 鳥居 卓爾,
機正 高垣 哲也
- D125 たて型ブリッチマン式単結晶成長過程における自然対流と
伝熱に対する内部ふく射の影響
機正 *松島 均 (日立), R. Viskanta (Purdue Univ.)

[流動層] 13:30~14:50

- (座長 熊田 雅弥 (岐阜大))
吉澤 善男 (東工大)
- D131 流動層中の水平加熱円管まわりの非定常局所伝熱特性
機正 *石黒 博 (筑波大), 機学 市川 和芳,
機正 成合 英樹
- D132 流動層内水平円管周りの粒子挙動と熱伝達特性
機正 *加藤 泰生 (山口大), 機正 宮本 政英,
機学 藤本 昌樹, 機正 出井 安正 (宇部興産)
- D133 流動層内におかれた蓄熱を伴う冷却面よりの熱伝達
機正 福迫 尚一郎 (北大), 機学 *小崎 正道,
機正 田子 真, 機正 鳥越 邦和 (ダイキン),
機正 川端 克宏 (ダイキン)
- D134 水分浸透をともなう粒子層内の伝熱特性について
機正 青木 和夫 (長岡技術大), 機正 服部 賢,
機学 *白石 直也

特定テーマセッション。

[バイオ伝熱学] 15:00~17:20

(座長 棚澤 一郎 (東大))
*矢野 郁郎 (宮城工技センター)

レビュー 棚澤 一郎 (東大)

レビュー 生体組織における伝熱
谷下 一夫 (慶大)

- D141 食パン焼成時の非定常3次元熱移動
辰川 信行 (敷島製パン), *伏田 矩久,
化工正 架谷 昌信 (名大),
化工正 新井 紀男, 化工正 坂谷 義紀
- D142 食品凍結の伝熱モデル
機正 林 勇二郎 (金沢大),
機正 *関谷 光生 (東芝),
機正 国峰 寛司 (明石高専)
- D143 噴霧乾燥における粉粒体食品の性質
冷正・空正 *加藤 文男 (森永乳業), 重兼 彰夫
- D144 食品工業における高粘性流体の伝熱
化工正 今野 宏卓 (山形大),
化工正 栗山 雅文 (山形大),
神崎 幹雄 (森永乳業), 菊地 基和,
*設楽 英夫

第2日 6月1日 (木)

[輻射 (Ⅲ)] 8:40~9:40

(座長 上字部 幸一 (大分大))
*牧野 俊郎 (京大)

- D211 放射熱線法の応用に関する研究
(第3報 箱型炉での検討)
機正 早坂 洋史 (北大)
- D212 ふく射変換体による反応熱の効果的変換に関する研究
機正 *谷川 明 (東工大), 機正 富村 寿夫 (九大),
機正 越後 亮三, 機正 花村 克悟
- D213 光エネルギーによる熱輸送に関する基礎的研究
(反射板による熱・光変換体の指向性)
化工正 *坂谷 義紀 (名大), 化工学 水野 正克,
化工正 架谷 昌信

[熱交換器 (Ⅰ)] 9:50~11:30

(座長 宮武 修 (九大))
*徳田 仁 (船技研)

- D221 改良シングルブロー法の開発
(伝熱面内の流路方向熱伝導の影響)
機正 八木 良尚 (東農工大), 機正 望月 貞成,
機学 *原 拓実
- D222 改良シングルブロー法の開発
(平行平板群への適用による本測定法の検証)
機正 *八木 良尚 (東農工大), 機正 望月 貞成
- D223 千鳥配列矩形平板まわりの流れと熱伝達
機正 *小林 崇 (青森職訓大),
機正 島田 了八 (東北大), 機正 熊谷 哲
- D224 オフセットフィンとの流動、伝熱特性に関する数値解析
機正 *喜 冠南 (京大), 機正 鈴木 健二郎,
兼田 哲男, 機正 萩原 良道
- D225 細線および細管より構成された空気熱交換器の伝熱特性
(第3報 管配列の影響)
機正 鳥越 邦和 (ダイキン), 機正 *川端 克宏,
機正 柏木 孝夫 (東京農工大),
機正 野色 泰弘 (阪市大)

[熱交換器 (Ⅱ)] 11:40~12:40

(座長 長島 昭 (慶大))
*大串 哲朗 (三菱電機)

- D231 スターリング機関用熱交換器の熱伝達に関する研究
(第1報 管内熱伝達に関する実験的研究)
機正 *神坂 光男 (三菱重工), 機正 岩淵 牧男
- D232 スターリング機関用熱交換器の熱伝達に関する研究
(第2報 実験機関用熱交換器の熱伝達特性)
機正 神坂 光男 (三菱重工), 機正 *岩淵 牧男
- D233 エア・ターボ・ラムジェット用水素加熱器の熱交換特性
解析
機正 *小熊 正人 (石播), 機正 矢野 康和,
水谷 智昭, 機正 塩冶 震太郎,
航空宇宙研 機次 亘弘 (宇宙研)

[熱交換器 (Ⅲ)] 14:10~15:50

(座長 鳥越 邦和 (ダイキン))
*青木 和夫 (長岡技術大)

- D241 炭酸カルシウムの高温壁面への析出挙動 (第2報)
原正 *坂下 弘人 (北大), 機正・原正 石黒 亮二,
高村 洋二, 機正・原正 杉山 憲一郎

- D242 各種媒体の沸騰熱伝達に及ぼす電気流体力学 (EHD) 効果について
山崎 健利 (東電), 大橋 秀利,
機正・冷正 川田 章広 (三菱重工), 岩藤 要三良,
*大武 幹治
- D243 カーエアコン用プレートアンドフィン形エバポレータの蒸発熱伝達特性
機正・冷正 *大原 敏夫 (日本電装),
機正 山本 敏博, 機正 藤田 秀臣 (名大)
- D244 自然循環型プレートフィン蒸発器の流動特性
機正 *堀 政義 (石播), 望月 國春 (東京電力)
- D245 傾斜スプレー塔による液-液接触熱・物質移動操作の電気流体力学的促進
(I. 傾斜平行平板電極間における液滴の運動挙動)
機学 *望月 高昭 (慶大), 機正 森 康彦,
機正 梶 信藤 (職訓大)

[熱交換器 (IV)] 16:00~17:20

{座長 藤井 雅雄 (三菱電機)}
{杉山 憲一郎 (北大)}

- D251 吸着ヒートポンプの放熱蓄熱特性
(伝熱促進体の影響)
化工正 *渡辺 藤雄 (名大), 化工学 勝山 仁之,
化工正 架谷 昌信, 化工正 丸茂 千郷 (鐘紡)
- D252 円筒型蓄熱水槽の内部特性と蓄熱効率
化工正・機正 宮武 修 (九大), 化工学 *藤田 和昭,
玉利 俊哉
- D253 縦フィン付円管形潜熱蓄熱器の放熱特性
機正 海野 紘治 (豊田工大), 機学 *尾関 正司,
機正 小林 清志
- D254 内部構造による潜熱蓄熱器の放熱性能の変化
機正 *海野 紘治 (豊田工大), 機学 尾関 正司,
機正 小林 清志
- D255 樹脂円柱群蓄熱体による潜熱蓄熱
機正・化工正 宮武 修 (九大),
機准・化工学 *岩下 寛之, 化工学 山本 修史,
化工学 足田 豊和, 化工学 本田 祥也,
山根 泰三

第3日 6月2日 (金)

[燃焼] 8:40~11:00

{座長 架谷 昌信 (名大)}
{竹内 正樹 (桐蔭横浜大)}

- D311 液滴炎とよどみ点近傍火炎のアナロジーについて
機正 新岡 嵩 (東北大)
- D312 高温物体によるメタン-空気予混合気体の着火
機正 佐野 妙子 (東海大)
- D313 水面に浮遊した燃料の液面燃焼
(第一報 水の沸騰による燃焼率の変化)
機正 *新井 雅隆 (広島大),
斉藤 孝三 (ケンタッキー大),
R. A. Altenkrich (ミシシッピー大),
D. D. Evans (NIST)
- D314 圧力勾配のある流れ場における火災の安定性および保炎
(円柱による保炎特性と後流渦構造の関係)
機学 *石野 洋二郎 (名工大), 機正 山口 蒼起,
機正 大岩 紀生, 機正 長谷川 達也
- D315 帯電法による燃焼炉内の燃料液滴径分布測定法 (II)
化工正 *玉野 和保 (広島工大), 化工正 中井 資

- D316 白金細線表面における水素の触媒燃焼
機正 *平田 哲也 (石播), 機正 池田 英人,
機正 宮内 敏雄 (東工大)
- D317 断熱燃焼等の限界温度に関する研究
(続報)
機正 吉澤 善男 (東工大)

[エネルギー利用 (I)] 11:10~12:30

{座長 梅村 晃由 (長岡技科大)}
{稲葉 英男 (岡山大)}

- D321 無雪道路の見掛け熱通過率
機正 梅宮 弘道 (山形大), *奥山 正明
- D322 地下水と土壤蓄熱効果を利用した無雪道路の研究 (その5)
機正 梅宮 弘道 (山形大), 機正 *羽賀 恵寿
- D323 降雪時における融雪をともなう熱交換器の特性について
機正 青木 和夫 (長岡技科大), 機正 服部 賢,
機学 *石川 信幸, 清水 裕氏, 碓井 信 (日新製鋼)
- D324 着箱にともなうヒートポンプのサイクル特性
機正 青木 和夫 (長岡技科大), 機正 服部 賢,
機学 *杉原 浩二, 小松 滋

[エネルギー利用 (II)] 13:30~14:30

{座長 斎藤 彬夫 (東工大)}
{海野 紘治 (豊田工大)}

- D331 放射冷却と太陽熱も利用した大規模エネルギー利用システムの研究
機正 斎藤 彬夫 (東工大), *吉岡 正浩
- D332 微小カプセル内の潜熱蓄熱媒体による冷熱の空気搬送
機正 黒崎 晏夫 (東工大), *安井 元一,
機正 佐藤 勲
- D333 混合冷媒R22+R114を用いたヒートポンプシステムの実験
機正 *高松 洋 (九大), 機正 小山 繁,
機准 池上 康之, 化工学 加茂川 丈巳,
機正 藤井 哲

E 室

第1日 5月31日 (水)

[熱サイホン] 9:20~10:40

{座長 中山 恒 (日立)}
{神坂 光男 (三菱重工)}

- E111 密閉型二相サーモサイホンの局所蒸発熱伝達特性
機正 深野 徹 (九大), 機正 *角川 勝彦
- E112 密閉二重管型二相熱サイホンの伝熱限界
原正 *福田 研二 (九大), 原正 近藤 哲也,
中川 清, 原正 長谷川 修
- E113 密閉形円管熱サイホンにおける流動および熱伝達
機正 柳田 玄一郎 (名大), 機正 山下 博史,
伝学 *杉山 一弘
- E114 超塑性成形における伝熱と変形の解析
機正 長野 靖尚 (名工大), 機正 *辻 俊博,
機学 熊沢 聡太郎

[熱伝導 (I)] 10:50~12:30

{座長 福迫 尚一郎 (北大)}
{上松 公彦 (慶大)}

- E121 多層複合円筒殻に対する熱伝導の一次近似方程式
機正 遠藤 修司 (航技研)

第2日 6月1日(木)

- E122 微細複合構造を有する電子部品内の熱伝導
(解析法の提案)
*中山 恒(日立), 機正 藤岡 和正
- E123 移動境界適合座標系の研究
(伝熱問題解析への応用)
機正 *黒田 成昭(電通大), 大羽 秀幸
- E124 繊維集合体の吸湿・発熱・伝導
機正 竹内 正顯(桐蔭横浜大), 機正 *横山 正則
- E125 溶液の過冷却凝固
機正 *林 勇二郎(金沢大),
機正 国峰 寛司(明石高専),
機正 長元 孝夫(石川高専)

[蒸発] 13:30~14:50

- (座長 熊田 俊明(北大))
水上 紘一(愛媛大))
- E131 加熱された溶射セラミックス被覆面に衝突する液粒の蒸発
被覆層厚さの影響
機正 高野 孝義(豊田工大)
- E132 EHD効果を用いた液滴の蒸発促進
機正 *高野 清(東大), 機正 棚澤 一郎,
機正 西尾 茂文
- E133 スプレーフラッシングにおける最大蒸発効率の追究
化工正・機正 宮武 修(九大), 化工学 *大東 寛久,
化工学 加藤 信彦
- E134 固液接触角の測定法に関する研究
機正 *加藤 健司(名大), 機正 藤田 秀臣,
機正 佐々木 英治(東芝), 宮下 晃一(名大)

特定テーマセッション

[マイクロ伝熱学] 15:00~17:20

- (座長 神沢 淳(東工大))
三浦 隆利(東北大))
- レビュー 神沢 淳(東工大)
- E141 集積回路内微小発熱素子の熱伝達に関する研究
機正 土方 邦夫(東工大), 機正 *長崎 孝夫,
倉爪 亮(東工大)
- E142 気体分子からの蛍光を用いた圧力の非接触光測定
機正 平井 秀一郎(阪大), 機正 高城 敏美,
機学 *上野 徹, 機学 岡田 基裕
- E143 希薄気体中におかれたフィンからの熱伝達
(直接シミュレーションモンテカルロ法による解析)
機正 *宇佐美 勝(三重大),
機正 藤本 哲夫(名大),
機正 加藤 征三(三重大)
- E144 アルカリ金属の蒸発・凝縮を伴う場のシミュレ
ーション
機正・原正 杉山 憲一郎(北大),
機正・原正 石黒 亮二, *内海 司
- E145 レーザ加熱による金属・非金属原子クラスターの生成
機正 *青木 功(東大), 機正 小竹 進
- E146 レーザ加熱による固体溶解・蒸発と相変化
機正 *黒木 雅嗣(東大), 機正 小竹 進

[熱伝導(II)] 9:00~10:40

- (座長 林 勇二郎(金沢大))
岡田 昌志(青学大))
- E211 密度反転自然対流を伴う円筒カプセル内の接触融解熱伝達
の研究
機正 *齋藤 武雄(東北大), 野間 毅
- E212 種々の形状のカプセル内の接触融解熱伝達の研究
*野間 毅(東北大), 機正 齋藤 武雄
- E213 円筒カプセルを用いた潜熱蓄熱の研究
機正 斎藤 彬夫(東工大), 機正 宇高 義郎,
機正 大河 誠司, 機学 *中田 直樹, 山崎 博之
- E214 水平におかれた矩形容器内の凝固・融解挙動
機正 *平田 哲夫(信州大), 牧野 善洋
- E215 水平管群の周りの水融解に関する実験的研究
機正 鳥越 邦和(ダイキン), 機正 仲沢 優司,
機正 *山下 浩幸

[熱伝導(III)] 10:50~12:30

- (座長 服部 賢(長岡技術科大))
平田 哲夫(信州大))
- E221 含水多孔質層内の非定常凍結熱伝達
機正 *佐々木 章(秋田高専), 機正 相場 真也,
機正 福迫 尚一郎(北大)
- E222 多孔質層内の固-液相変化
(ソリ付き伝熱面回りの非定常熱伝達)
機正 笹口 健吾(熊本大)
- E223 不均質混合材料の相変化に関する研究
(数値計算による凝固過程の推算)
機正 *平澤 良男(富山大), 機正 斎藤 彬夫,
機正 竹越 栄俊
- E224 ランダムポイント法による多次元融解問題の数値解法
(対流場への適用)
機正 齋藤 武雄(東北大),
機正 加藤 秀樹(ヤマハ発動機),
*中村 慎(東北大)
- E225 コジメシステム用溶融塩潜熱蓄熱器の伝熱解析
*金成 克彦(電総研), 機正 阿部 宣之,
加工正 神本 正行, 田村 善昭(川崎重工),
加藤 正樹

[二相流(1)] 14:10~15:50

- (座長 石塚 隆雄(東芝))
久木田 豊(原研))
- E231 垂直上昇気液二相流の液体塊速度に及ぼす圧力の影響
機正 世古口 言彦(阪大),
機正 中里見 正夫(宇部高専),
機正 武石 雅之(阪大),
機正 *清水 英男(宇部高専),
機正 森 幸治(阪大),
機正 三宅 常時(宇部高専)
- E232 垂直上昇スラグ流の流動パラメータに関する実験的研究
(圧力の影響)
機正 世古口 言彦(阪大),
機正 中里見 正夫(宇部高専), 機正 清水 英男,
機正 *三宅 常時
- E233 局所相対速度に基づく混相流のモデリング
機正 坂口 忠司(神戸大), 機正・原正 *富山 明男,
機正・原正 南川 久人

- E234 差圧の統計パラメータ特性と流動様式判別への利用
機正・原正 松井 剛一(筑波大), *青木 利幸
- E235 コージェネレーション用ボイラの水位動特性
機正 藤井 照重(神戸大), 機正 太田 淳一,
蔦 安衆(東北電力学院), 機学 *木島 和夫(神戸大),
機学 金加 貴史

[二相流(II)] 16:00~17:40

{座長 田坂 完二(原研)}
福田 研二(九大)

- E241 中性子ラジオグラフィによる二相流の可視化と
ポイド率計測
機正 *竹中 信幸(神戸大), 機正 藤井 照重,
機正 赤川 浩爾(龍谷大), 小野 厚夫(神戸大),
園田 浩一, 機学 浅野 等, 機学 西崎 圭一
- E242 画像処理技術を用いた二相流計測法
機正・原正 堀 豊(東北大),
機正・原正 戸田 三朗, *阿川 一美,
機正・原正 黒川 政秋
- E243 凝縮を伴う管内二相流に関する研究
(気相凝縮率を導入した解析)
機正・原正 *堀 豊(東北大),
機正・原正 戸田 三朗, 新保 仁,
機正・原正 黒川 政秋
- E244 ら旋り付き・細線挿入管内における環状噴霧流の研究
(エントレインメント抑制効果の検討)
機正 *波江 良弘(船技研), 機正 汐崎 浩毅
- E245 らせん管内沸騰二相流の熱伝達
(らせん設置角の影響)
機正 *渡辺 修(愛知工大), 機正 部谷 尚道,
機学 大見 康光, 機正 藤田 秀臣(名大)

第3日 6月2日(金)

[二相流(III)] 9:00~10:40

{座長 成合 英樹(筑波大)}
有富 正憲(東工大)

- E311 ストカスティックモデルによる二次元固気二相衝突噴霧流の
数値解析
機学 *河村 勉(九大), 機正 清水 昭比古,
機正 長谷川 修
- E312 固気二相衝突噴霧流の伝熱促進機構に関する研究
(第1報: 粒子-伝熱面間の直接接触熱伝導の寄与)
機正 黒崎 晏夫(東工大), 機正 佐藤 勲,
亀岡 裕次, *安茂 義洋
- E313 固気二相衝突噴霧流の伝熱促進機構に関する研究
(第2報: 粒子添加による境界層覆乱の効果)
機正 黒崎 晏夫(東工大), 機正 佐藤 勲,
*亀岡 裕次

- E314 二相流衝突噴霧による伝熱促進
機正・原正 *芹沢 昭示(京大), 原正 高橋 修,
機正・原正 河原 全作, 米山 智巳,
機正・原正 岐美 格
- E315 噴霧状気液二相流中の平板乱流境界層内の流動と熱伝達
(平板表面温度が比較的高温の場合)
*松下 雄紀(慶大), 機正 菱田 公一,
機正 前田 昌信

[二相流(IV)] 10:50~12:30

{座長 坂口 忠司(神戸大)}
芹沢 昭示(京都大)

- E321 一成分二相流ノズルの性能特性
(第3報)
機正 藤井 照重(神戸大), 機正 太田 淳一,
機正 竹中 信幸, 機正 赤川 浩爾(龍谷大),
機学 *浅野 等(神戸大), 機学 森本 修
- E322 オフィスから放出される高温高压水流の二次元数値解析
機正・原正 *湊 明彦(日立),
機正・原正 村田 重人
- E323 気ほう流の膨張波による減圧沸騰特性に関する研究
機正 *中川 勝文(豊橋技科大), 稲吉 寿浩
- E324 大口径水平管内水/空気二相流
(第2報: 圧力損失と速度分布について)
機正 小泉 安郎(原研), 原正 *中村 秀夫,
原正 山本 信大, 原正 田坂 完二
- E325 跳水現象を伴う気液二相流
原正 久木田 豊(原研), 原正 *片山 二郎,
原正 中村 秀夫, 原正 田坂 完二

[二相流(V)] 13:30~14:50

{座長 松井 剛一(筑波大)}
岡崎 健(豊橋技科大)

- E331 沸騰遷移後の熱伝達に関する研究
(BWR模擬燃料集合体を用いた場合)
原正 姉川 尚史(東京電力),
機正・原正 *師岡 慎一(東芝), 原正 白川 健悦,
原正 江畑 茂男, 機正・原正 横堀 誠一,
機正・原正 吉本 佑一郎
- E332 各種バンドルにおける低質量流量時ポイド率
(第2報: 相関式の検討)
機正 *刑部 真弘(茨城大),
機准 後藤 博樹(住友重機),
原正 田坂 完二(原研)
- E333 3次元サブチャンネルコードの開発
(気液相間運動量交換モデルの検討)
*島田 洋二(東芝), 機正・原正 寺坂 晴夫,
原正 吉村 邦広
- E334 高転換型軽水炉の熱水力特性に関する基礎研究
(バンドル形状における熱水力特性)
原学 *生方 恵一郎(東工大), 機正・原正 井上 晃,
機正・原正 有富 正憲, 機正・原正 高橋 実

『夢伝熱元年：新世代の鼓動』

日本における伝熱研究の中で大きな役割を果たしてきた伝熱セミナーは昭和の終焉とともにその幕を閉じました。関東地方研究グループでは、平成の幕開けとともに、もう一度伝熱研究会創生期の初々しく親密な関係の中で新たな伝熱の夢を求めてゆくことを目的として、サマースクールを企画しました。本スクールは、夢を実現した男たちの話「No.1への挑戦」をはじめとして、これからの夢を種々な角度から追い求めたいと考えています。また、本スクールは企画から実施まで大学院の学生諸氏の協力のもとに行なわれており、すべての参加者が自由に発言できる場を提供することを大切に考えています。加えて、ビデオを使った、新しい発表形式も試行する予定ですので、皆様の積極的な参加をお待ちしています。

1. 会期 7月24日(月)～25日(火) 1泊2日
2. 会場 東京都青梅市二俣尾2-371
国民年金保養センター『おくたま路』
TEL 0428-78-9711
(交通：JR青梅線石神前駅下車 徒歩8分)
3. 参加費(宿泊、食事、懇親会費を含む)
一般：16,000円
学生：12,000円
4. 定員 60名
5. 申し込み 本号綴じ込みの申し込み用紙に必要事項を記入の上、下記宛先まで郵送下さい。同時に、参加費を郵便振替にて準備委員会まで払い込んで下さい。締切後の取り消しには参加費は返却できません。
郵送先 〒223 横浜市港北区日吉3-14-1
慶応大学理工学部機械工学科 菱田 公一
電話 044-63-1141 内線 3130
振替先 サマー・サマー・スクール準備委員会
口座番号 東京0-410354
締切 6月19日(月)
(先着順にて定員になり次第締切らせていただきます。)
6. 準備委員会
委員長 菱田公一(慶大)
幹事 飛原英治(東大) 吉田英生(東工大)
委員 石黒博(筑波大) 大河誠司(東工大) 黒田明慈(東大)
小林健一(慶大) 佐藤勲(東工大) 佐藤浩(慶大)
長坂雄次(慶大) 長崎孝夫(東工大) 西野耕一(東大)
丸山茂夫(東大) 村田章(東大)

7. 日程

7月24日(月)

時間	表 題	内 容
12:30	受 付	
13:00-	開校式	名簿による参加者の自己紹介
13:30-	[特別講演] No.1への挑戦	「ホンダF1エンジン: 1500ccエンジン1000馬力の秘密」 土岐 進(本田技術研究所)
14:20-	休 憩	
14:30-	A V - p a p e r I	伝熱シンポジウム等で話題になった研究の内容や実験風景をビデオを用いて説明。何でも聞いてみよう。 ・画像処理に基づく流れの三次元計測 西野 耕一(東大) ・気体分子からの蛍光を用いた圧力の測定 平井秀一郎(阪大) ・EHD効果を応用した沸騰伝熱の促進 矢部 彰(機械研)ほか
15:30-	休 憩	
15:45-	道具としてどこまで使えるか? 「パッケージソフト」	EWS・パソコン合わせて数台準備。 著名な熱・流体関連パッケージソフトの内容説明を聞き、そして実演。 自分自身でさわって体験。 参加ソフトは現在数社に交渉中。
17:30-	休 憩	
18:30-	懇親会	
20:00-	ビデオ試写会	取材ビデオを使った伝熱研究に関する様々な意見の交換会。大先生も出演予定。
21:00		

7月25日(火)

時間	表 題	内 容
8:50	AV-paper II	<ul style="list-style-type: none"> ・ホログラフィによる圧力場の測定 三松 順治 (岐大) ・強制レーリ-散乱を用いた温度伝導率の測定 長坂 雄次 (慶大) ・原子炉内の熱流動に関する最近の計測技術 横堀 誠一 (東芝) ほか
9:50-	休 憩	
10:00-	[セミナー] 連続体力学からの take off	将来の伝熱研究は? 「伝熱における分子工学的問題」 小竹 進 (東大) 「Molecular dynamics の世界」 能勢 修一 (慶大)
12:00-	閉校式(バーベキュー)	日の出町自然休暇村さかな園にて

 関東地方研究グループ主催 サーマル・サマー・スクール 参加申込用紙

当日参加者全員に、顔写真入りの参加者名簿をお配りしたいと思います。
 本状から直接製版し印刷しますので、楷書で記入し、顔写真をお貼り下さい。
 なお、本状(写真を含む)はセミナー当日受付にてお返し致します。

ふりがな M T S
 氏 名: _____ 生年月日 年 月 日
 所属・職名
 (研究室・学年): _____
 所在地
 (連絡先): 〒 _____

顔写真 3×3 程度 裏面に氏名を 記入

TEL () FAX ()

興味のある分野: _____

会場までの交通手段をお知らせ下さい。 1. 電車 2. 自家用車 3. 未定
 (2日目のバーベキュー会場への移動用チャーターバスの乗車人数確認のため)

日本混相流学会
混相流レクチャーシリーズ
「基礎から最前線まで」
第3回－混相流計測法の基礎－

協 賛 日本機械学会、化学工学協会、土木学会、粉体工学会、スラリ輸送研究会、流れの可視化
(予定) 学会、日本原子力学会、日本航空宇宙学会、資源・素材学会、日本造船学会、日本伝熱研
究会、日本流体力学会、日本ボイラ協会、日本鉄鋼協会

日 時：平成元年5月15日(月)13時～17時

5月16日(火)10時～17時

場 所：大阪駅前第3ビル16階 大阪市立大学文化交流センター

〒530 大阪市北区梅田1丁目1番3-1700

TEL. 06-344-5425

申し込み締切：4月28日(金)

講演題目及び講師：

レーザ流速計による分散系二相流の流動計測

慶應義塾大学理工学部

菱田公一

固液二相流の流動特性と計測法

山形大学工学部化学工学科

都田昌之

気液二相流計測法の開発と応用

日本原子力研究所燃料安全工学部反応度安全研究室

傍島 眞

粉体の基礎的特性とその評価

ホソカワミクロン㈱研究開発本部

内藤牧男

固液二相流計測の実際

住友金属工業㈱プラントエンジニアリング事業本部

東海林泰夫

気液二相流の計測器について

日本科学工業㈱開発部

小玉和信

参加費：(参加者にはテキストを1冊無料贈呈いたします)

会 員 12,000円(協賛学会会員)、非会員 18,000円

学生、院生 4,000円

定 員：100名

申し込み方法：葉書大用紙(郵便振替の場合は振替用紙通信欄)に「混相流講習会申し込み」と題記し、氏名、勤務先、連絡先、会員資格を明記し、参加費を添えて(現金書留、郵便振替または銀行振込)下記までお送り下さい。なお、テキストのみご希望の方は4,000円(会員)、6,000円(非会員)を添えて「混相流講習会テキスト希望」と題記して下記宛お申し込みください。

申し込み先：〒554 大阪市此花区春日出中2-14-9 近藤印刷㈱内

日本混相流学会 企画運営部会

(TEL 06-466-1588 FAX 06-463-2522)

銀行振込口座番号 住友銀行 六甲支店 普通預金口座 159825

口座名：日本混相流学会企画運営部会

郵便振替口座番号 神戸1-38899

口座名：日本混相流学会企画運営部会

問い合わせ先：日本混相流学会企画運営委員(〒657 神戸市灘区六甲台町1-1
神戸大学工学部機械工学科 藤井照重 TEL 078-881-1212 内線 5139)

日本機械学会・関西支部 第4回講習会＝

計測における不確かさ解析の基礎と応用

(熱工学部門・関西支部 合同企画)

聴講申込締切 6月12日・開催 6月16日

(協賛：化学工学協会関西支部，空調調和・衛生工学会近畿支部，低温工学協会，日本原子力学会関西支部，自動車技術会関西支部，日本伝熱研究会，日本燃焼研究会，日本ボイラ協会)

日時 平成元年6月16日(金) 9.30～17.30
会場 建設交流館 603会議室

趣旨 計測データに含まれる誤差を明らかにしない限り，理論やモデルの有効性の確認や設計変更による性能改善の判断は不可能である。誤差の大きさの検討抜き判断はそれまでの努力や経済的投資をも無駄にする恐れすらある。不確かさは，測定値或は最終的な実験結果に含まれる誤差の限界値を科学的に推定した値である。欧米では，技術論文や商契約中の計測データに不確かさ解析を加えることを義務付ける方向へ急速に進んでいる。我が国でも，不確かさ解析技術者にとって避けて通れない状況となってきた。本講では，最近米国で国家規格となった不確かさ解析手法の解析書に沿って，不確かさ解析の定義，基礎理論，応用法，事例等を平易に解説する。

題目・講師

日 時	題 目	内 容	講 師
6月16日(金) 9.30～11.30	確率・統計及び不確かさ解析の基礎	不確かさ解析の意義，標準化の動向と共に，確率・統計の基礎(偶然誤差，かたより誤差)不確かさ解析の基礎についての解説	東京大学 工学部 助教授 笠木 伸 英
12.30～14.30	不確かさ解析の応用手法	単一，繰返し試験や絶対・相対試験の不確かさ，空間的・非一様性の影響，異常値の扱い，回帰に伴う不確かさ等実用上の問題の解説	名古屋工業大学 教授 長 野 靖 尚
14.45～16.30	不確かさ解析の事例解説	流体計測を始めとして，主として熱工学及び流体工学における具体的応用例についての解説	三菱重工(株)高砂研究所 流体研究室主任 川 田 裕
16.30～17.30	質疑応答		

聴講申込締切 6月12日(月)

定 員 120名

聴 講 料 会 員 6000円(大学，官公庁関係 6000円，大学院生および学生員 6000円)

会員外 20000円，ただし，いずれも教材1冊代金を含む。教材は本会発行「計測の不確かさ」を使用する。

・協賛学協会員の方も本会会員と同じようにお取扱いいたします。

申込方法 B6判用紙(学会誌半裁)に「部門・関西支部第4回講習会申込み」と題記し，(1)氏名・会員資格，(2)勤務先・所属部課名・住所，(3)通信先，(4)所属学協会名，(5)送金内訳および送金額を記入のうえ，下記申込先宛にお申込み下さい。参加費は現金書留で申込先に送付するか，または下記銀行口座宛ご送金下さい。

申込先 大阪市此花郵便局私書箱20号 日本機械学会関西支部担当 近藤宛
振込口座 住友銀行 四貫島支店 普通口座 1151698 日本機械学会関西支部名義

問合せ先 〒554 大阪市此花区春日出中2-14-9
近藤印刷(株)内 日本機械学会関西支部担当 近藤宛
電話 (06) 466-1588

- ご 注 意
- (1) 開催日の10日前までに聴講料が符金した分は参加者にあらかじめ聴講券をお送りいたします(以降は当日受付となる場合があります)。
 - (2) 聴講券発行後は取消しのお申し出が有りましたが聴講料は返金いたしませんのでご注意願います。
 - (3) 会社，工場などを通信先にご指定の場合は部課名まで詳細にご記入ください。
 - (4) 領収書は原則として発行いたしませんので必要な場合はその旨お申し出ください。

日本混相流学会主催
第2回混相流インターナショナル・レクチャー・コース

混相流における最新の計測技術とシミュレーション手法

(国際交流部企画)

協 費： 化学工学協会、資源・素材学会、スラリー輸送研究会、土木学会、流れの可視化学
会、日本機械学会、日本原子力学会、日本航空宇宙学会、日本造船学会、日本伝熱
研究会、日本ボイラ協会、日本流体力学会、粉体工学会、日本鉄鋼協会

(五十音順)

日 時： 平成元年(1989年)6月19日 9:45~20:00
20日 9:30~17:00
(午前9時より受付)

会 場： 東京大学山上会館大講義室
(東京都文京区本郷7-3-1 TEL 03(818)3008, 03(812)2111)

申し込み方法： 参加申し込みは、郵便振替払込通知票の通信欄に

フリ カナ 1.氏 名	2.会員資格_____	
3.参加費：事前申し込み(平成元年5月31日まで)		
	2日券	1日券
正 会 員	25,000円	15,000円
学生会員	10,000円	5,000円
会 員 外	40,000円	25,000円
当日申し込み(平成元年6月1日以降)		
	2日券	1日券
正 会 員	30,000円	20,000円
学生会員	10,000円	5,000円
会 員 外	50,000円	30,000円

(注) 該当する金額を○で囲んで下さい

4.連絡事項

(注) 協賛学協会の会員は正会員と同一料金です。

を記入の上、下記宛、参加費を払い込んで下さい。

郵便振替

払込先：混相流講演実行委員会

口座番号：宇都宮 4-42113

(注1) 参加費払い込み後は、取り消しのお申し出があっても参加費は返金致しません
ので、ご注意下さい。ただし、代理者の参加を認めます。

(注2) 郵便振替払込票(受領証)をもって領収書に代えさせていただきます。
ただし、別途、領収書の必要な方は事前にお申し出下さい。会場にてお渡し致
します。

問い合わせ先：詳細については、下記にお尋ね下さい。

筑波大学構造工学系 松井 剛一

〒305 茨城県つくば市天王台

TEL 0298-53-5129, FAX 0298-53-5207

第2回寒地圏伝熱国際シンポジウム

-ご案内と参加のおすすめ-

(日本居住の方は下記によりお申込下さい)

第2回寒地圏伝熱国際シンポジウムは下記のとおり、初夏の6月に札幌にて開催されます。6月下旬の札幌は、一年中で最も快適な気候であり、あらゆる花が咲き乱れている季節であります。

第1回の寒地圏伝熱国際シンポジウムは、1987年6月にカナダ国エドモントン市アルバータ大学にて開催され、寒地圏における伝熱工学の研究に携わっている産・官・学界の研究者、技術者、および学生など、6ヶ国より100名余の参加があり、成功のうちに終了いたしました。

今回の第2回寒地圏伝熱国際シンポジウムには、すでに11ヶ国より60編を越える論文が寄せられております。ご参加された方は、寒地圏伝熱工学の研究成果に関する最新の情報を得ることが出来るものであります。

実行委員一同、有意義かつ快適な国際シンポジウムに致し度いと願っております。どうぞ奮ってご参加下さいますようお願い申し上げます。

第2回寒地圏伝熱国際シンポジウム
実行委員長 関 信弘 (北大名誉教授)

開催日時	平成元年6月28日(水)～30日(金) 北海道大学学術交流会館 〒060 札幌市北区北8条西5丁目 Tel.(011)758-5426 (JR札幌駅北口より徒歩4分)
参加登録費	予約(5月15日以前) 20,000円 (学生 5,000円) 当日(5月15日以後) 25,000円 (学生 7,000円)
懇親会費	予約(5月15日以前) 5,000円 当日 6,000円
申込方法	同封の郵便振替払込用紙に必要事項(裏面にも記入項目あり)をご記入の上、期限までに郵便局にて払込み下さい
払込み先	郵便口座 小樽6-42738 『第2回寒地圏伝熱国際シンポジウム実行委員会』
問い合わせ先	その他の詳細については、下記までお問い合わせ下さい 〒060 札幌市北区北13条西8丁目 北海道大学工学部機械工学第二学科 伝熱工学講座気付け 第2回寒地圏伝熱国際シンポジウム事務局 TEL(011)716-2111 内6424 or 6427 FAX(011)717-4745

なお、宿泊・航空券については、次頁の項をご参照下さい。

◇◇◇◇宿泊◇◇◇◇

6月下旬の札幌は、一年中で最も季節の良い時期で、内外より多くの観光客が訪れます。できるだけ早く各自ご予約されることをお勧めいたします。

なお、下記のホテルが5月1日(月)まで予約を受付けます。電話で直接”寒地圏伝熱国際シンポジウム参加”とことわってお申込下さい。

KKR札幌	：	¥4,840～3,740／1人1泊
		〒060 札幌市中央区北4西5-1
		TEL(011)231-6711
ホテル札幌会館	：	ツイン¥16,000／2人1泊
		3～4人部屋¥5,800／1人1泊
		〒060 札幌市北区北17西4
		TEL(011)726-1341

◇◇◇◇航空券◇◇◇◇

下記の旅行会社にて割安の航空券を取り扱っています。電話で直接”寒地圏伝熱国際シンポジウム参加”とことわってお申込下さい。

(株)トゥデイ・トラベルサービス
〒065 札幌市東区北17東1 ノーヴィ17
TEL(011)721-3699

日本熱物性研究会創立 10 周年記念セミナー

1. 日 時 : 1989年6月30日(金) AM: 9.30 - PM:5.00
2. 場 所 : 機械振興会館(地下2階ホール), 地下鉄日比谷線「神谷町」5分
定員 150名
3. セミナの名称: 日本熱物性研究会創立10周年記念セミナー

《今、熱物性はキー・テクノロジー》

4. プログラム:

AM: 9.30 - AM: 9.40	開 会 ・ 挨拶	日本熱物性研究会会長
AM: 9.40 - AM:10.20	講演(1)「熱物性とは」	講師: 長島 昭 氏 慶応大・機械工学科教授
AM:10.20 - AM:11.00	講演(2)「熱物性値の求め方(1) -熱伝導率等-」	講師: 高橋 洋一 氏 東大・原子力工学科教授
AM:11.00 - AM:11.40	講演(3)「熱物性値の求め方(2) -熱膨張率等-」	講師: 岡路 正博 氏 計量研・低温計測研究室長
AM:11.40 - AM:12.20	講演(4)「エレクトロセラミックスの 熱的問題と熱物性」	講師: 一ノ瀬 昇 氏 早大・理工学部教授
PM: 1.20 - PM: 2.00	講演(5)「食品加工と熱物性」 -チーズ製造工程管理への応用	講師: 堀 友繁 氏 雪印乳業(株)技術研究所室長
PM: 2.00 - PM: 2.40	講演(6)「冷蔵庫材の熱物性」 -真空断熱材の応用-	講師: 尾崎 英征 氏 松下冷器(株)技術センター参事
PM: 2.40 - PM: 3.20	講演(7)「宇宙航空用材料の 熱的問題と熱物性」	講師: 野村 茂昭 氏 航空宇宙研・総括室長
PM: 3.40 - PM: 4.55 (75 分間)	パネル討論「熱物性の上手な 測定と利用法-実戦クニック-	司会: 荒木信幸教授(静大) パネラ: 各講師
PM: 4.55 - PM: 5.00	挨拶 ・ 閉 会	日本熱物性研究会会長

5. 受講者の対象

- (1)各大学、各国公立研究機関の材料科学、機械工学、電子材料、化学、建築材料、高分子材料、応用物理 家政学、調理科学、農芸化学等の学生、大学院生、研究者
- (2)機械、金属、半導体、電子材料、化学品、高分子、食品などの各会社の開発研究者
設計技術者および品質管理、検査部門の技術者、
- (3)温度計測、熱伝導特性の測定、熱膨張、熱変形、断熱性能などでお悩みの方々。

6. テキスト

- 講演解説(各講師の執筆)および熱物性研究に便利な付録付き
付録①熱物性研究会10年史、②熱物性データ入手法、③熱物性測定受託機関一覧
④熱物性のための便利帳、⑤熱物性関連機器・材料メーカー一覧、⑥カタログ綴じ

7. 参加費

- 参加費(テキスト代を含む) 主催・協賛学会員 3000円、非会員 6000円
(学生会員は2500円、賛助会員は3000円)

8. 参加申込み先

- 参加ご希望の方は、①氏名、②勤務先、③連絡先、④所属学協会名、⑤会員番号を明記の上、下記あてに参加費をそえて郵便でお申し込み下さい。受講券をお送りします
送り先:

〒432 浜松市城北3-5-1 (電話:0534-71-1171 内線264)
静岡大学工学部エネルギー機械工学科 荒木研究室気付
日本熱物性研究会事務局「10周年セミナー係」

混相流シンポジウム' 89
(第8回)
講演論文募集

日本学術会議水力学水理学研究連絡委員会、日本混相流学会、化学工学協会、資源素材学会、スラリー輸送研究会、土木学会、流れの可視化学会、日本機械学会、日本原子力学会、日本航空宇宙学会、日本造船学会、日本鉄鋼協会、日本伝熱研究会、日本船川機関学会、日本ボイラ協会、日本流体力学学会、粉体工学会 共催予定

開催日 1989年7月12日(水)、13日(木)

会場 神戸大学自然科学研究科大会議室
〒657 神戸市灘区六甲台町 (TEL 078-881-1212)

開催主旨 混相流という学問・技術分野がわが国にも国際的にも確立されつつあります。わが国におきましては従来より水力研連、混相流シンポジウム実行委員会を中心として、上記の多数の学協会の共催により、混相流シンポジウムが開催され、混相流に関する広範囲の議論や情報交換がなされ、混相流研究に関する中心的な存在になってまいりました。昨年度からは、日本混相流学会が幹事学会となって、従来の混相流シンポジウム実行委員会の活動を受け継ぎ、混相流に関する科学・技術をさらに発展させることを意図して、第7回シンポジウム「混相流シンポジウム' 88」を開催致しました。

本年度においても、昨年度と同様、各種混相流の分野を越えて、共通の場で混相流に関する科学・技術について議論し、情報交換を行い、今後のこの分野の進展をはかるとともに、社会への貢献を行おうとするもので、下記のようなテーマで研究発表講演を募集致します。

また「広がり深まる固液二相流研究」と題して下記の特別セッションを開催致します。多数の方々のご参加を希望致します。

混相流シンポジウム' 89 特別セッション “広がり深まる固液二相流研究”

血液循環系における混相流問題

講師 新見 英 幸 (国立循環器センター)

サスペンションの力学

講師 大 西 善 元 (鳥取大学)

堆積層を伴うスラリー管内流動

講師 佐 藤 博 (秋田大学)

水平管内の粒子速度及び濃度分布のシミュレーション

講師 朝 倉 国 臣、中 島 巖 (北海道大学)

研究発表講演募集テーマ

1. 混相流の流動特性、流動機構、熱物質移動現象
2. 混相流のモデリング、基礎方程式
3. 混相流のシミュレーション、数値計算
4. 混相流のダイナミクス
5. 混相流の計測技術
6. 混相流関連技術

7. 自然現象としての混相流
8. 生体内における混相流
9. その他

- 講演要旨**
1. 講演の採否は実行委員会にご一任願います。
 2. 1件につき講演時間10分、討論時間10分の子定ですが、件数によって多少変更があるかも知れません。
 3. 講演論文原稿ページ数は、原稿用紙(47字×41字)4ページとし、その原稿を縮小オフセット印刷致します。

講演申込締切 1989年5月8日(月)

原稿提出締切 1989年5月27日(土)(厳守)

- 講演申込要旨**
1. 講演申込者は次の(A)、(B)についてB5判の用紙1枚に記入し、日本混相流学会混相流シンポジウム'89実行委員会までご送付ください。
 - (A) 講演申し込み: 「混相流シンポジウム'89講演申し込み」と題記し、題目、発表者(連名の場合は講演者に※印をつける)、所属機関、連絡先を明記する。
 - (B) 講演概要: 200字程度の講演概要と3~5語のキーワードを記入する。
 2. 日本混相流学会誌Vol.2, No.4, Vol.3, No.1をお持ちの方は巻末の用紙をご利用ください。
 3. 申し込み締切後ただちに採否を決定し、申込者に通知致します。採用者には原稿用紙を送付しますので、4枚に執筆の上、締切日までに実行委員会宛ご送付願います。
 4. 講演者には講演申し込み整理費(1件1000円)を申し受けますので、原稿提出時に合わせてお送りください。
 5. 講演申し込み用紙はFAXにてお送りいただいても結構です。

講演申し込み用紙、講演概要、原稿、講演申し込み整理費は下記日本混相流学会混相流シンポジウム'89実行委員会までご送付ください。

送付先: 〒657 神戸市灘区六甲台町
 神戸大学工学部生産機械工学科
 日本混相流学会混相流シンポジウム'89実行委員会
 TEL 078-881-1212 FAX 078-881-0036

問い合わせ先: 神戸大学工学部 坂口忠司(内線5152); 実行委員長
 浜口八朗(内線7244) 藤井照重(内線5139)
 竹中慎幸(内線5138) 太田淳一(内線2744)

第 10 回日本熱物性シンポジウム 論文発表申込要領

—— 研究発表の内容, 対象物質 ——

熱物性値 ————

- 熱力学性質 : PVT 性質, 蒸気圧, 飽和液体温度, エンタルピ (平衡性質) エントロピ, 熱容量, 熱膨張率, 音速, ジュール・トムソン係数, 相平衡性質, 表面張力など。
- 輸送性質 : 粘性率, 熱伝導率, 拡散係数, プラントル数など。(非平衡性質)
- 熱放射性質 : 放射率, 反射率, 吸収率, 透過率など。

- 1) 測定法, 測定機器, 標準機器, 標準データ
- 2) 熱物性値の評価, 解析, 相関, 推算, 理論
- 3) 気体, 液体, 熱媒体, 動作流体, 混合流体, 熔融塩
- 4) 金属, 合金, 金属酸化物, 熔融金属
- 5) セラミックス, プラスチックス, 複合材料, エレクトロニクス材料, 絶縁材料
- 6) 建材, 耐火材, 断熱材 (保温材, 冷却材), 蓄熱材
- 7) 食品, 衣料, 生体, 農水産物
- 8) 土壌, 岩石, 石灰, 凍結層, 雪氷
- 9) その他

—— 講演申込方法 ——

A4 版用紙 1 枚に、(1) 講演題目 (2) 著者名 (講演者に○印) (3) 所属 (4) 連絡先を記入し、さらに (A) 研究目的 (B) 実験方法または理論 (C) 結果などの概略を記入して、6 月 5 日 (月) までに下記宛お送りください。なお講演の採否および発表形式については、第 10 回熱物性シンポジウム実行委員会にご一任ください。採否決定および発表形式は 6 月末頃までにお知らせし、その時原稿用紙もお送りします。

—— 講演の中込先 ——

〒060 札幌市北区北 13 西 8

北海道大学工学部 機械工学第二学科 伝熱工学講座 気付け

第 10 回熱物性シンポジウム実行委員会 Tel (011) 716-2111 内線 6424 or 6427

なお参加費については、下記を予定しております。参加申込方法については、追ってお知らせいたします。

(シンポジウム) 日本熱物性研究会会員および共催協賛学協会会員 (予約) 4,000 円 (当日) 5,000 円、学生 (予約) 2,500 円 (当日) 3,500 円、非会員 (予約) 5,000 円 (当日) 6,000 円。また、日本熱物性研究会会員には、講演論文集を無料で配布します。その他の方には、講演論文集は、5,000 円で会場にて頒布します。

開催日	平成元年 9 月 20 日 (水) ~ 22 日 (金)
会場	北海道大学学術交流会館 〒060 札幌市北区北 8 条西 5 丁目 Tel. (011) 758-5426 (JR 札幌駅北口より徒歩 4 分)
講演申込 〆切	6 月 5 日 (月)
論文原稿 〆切	8 月 1 日 (火)
	〒060 札幌市北区北 13 西 8 北海道大学工学部 機械工学第二学科 伝熱工学講座 気付け 第 10 回日本熱物性シンポジウム実行委員会 TEL (011) 716-2111 内線 6424 or 6427 FAX (011) 717-4745

IFHP/CIB/WMO International Conference on Urban Climate, Planning and Building

1989年11月6日(月) - 11月11日(土)

於 国立京都国際会館, 京大会館

1. 主催

IFHP/CIB/WMO国際会議「都市気候・計画・建築」組織委員会(委員長
京都大学教授・松浦邦男)・京都大学

2. 共催

国際住宅計画連合(IFHP)・都市建築気候学委員会(Standing Committee -
Urban and Building Climatology; International Federation for Housing
and Planning)

国際建築研究情報会議(CIB)・W-71 建築気候学ワーキング委員会(Working
Commission W-71 on Building Climatology; International Council for
Building Research, Studies and Documentation)

世界気象機関(WMO)・気候学委員会・気候と都市域ワーキンググループ(Work-
ing Group on Climate and Urban Areas; Commission for Climatology;
World Meteorological Organization)

世界地理学連合(IGU)・気候学委員会・局地気候小委員会:(Sub-Commission
on Local Climate; Commission on Climatology; International Geographi-
cal Union)

日本建築学会

日本気象学会

日本地理学会

3. Scope and Topics

As problems related to Urban and Building Climatology are diverse in differ-
ent climatic regions of the world, attention should be paid to each climatic
region;

Cold climate (arctic, subarctic)

Temperate climates (mid-latitude)

Hot dry climate

Hot wet climate.

In addition, the scope and topics for the conference shall be focused on the
following:

1) Wind structure in urban areas

2) Solar radiation in urban areas and its impacts on building design

3) Effects of vegetation on urban climate and buildings

4) Urban climate and air pollution

5) Impacts of urban climate on human health

6) Disasters caused by extreme climatic events in urban areas

7) Urban climate and energy management

8) Urban climate and building materials

9) Urban climate and building design

10) Urban climate and urban planning and layout

11) Prediction of urban climate

12) Needs for future research in urban and building climatology.

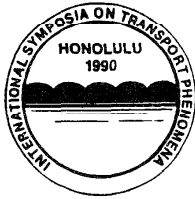
4. 応募論文の締切り

A4版1頁英文30行以内の梗概を5月31日まで

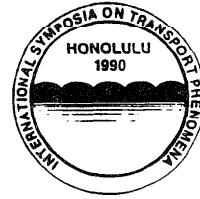
5. 連絡責任者

〒606 京都市左京区吉田本町 京都大学工学部建築学教室 中村泰人

電話(075)753-5739(直通) ファックス(075)753-5748(教室)



CALL FOR PAPERS



The Third International Symposium on Transport Phenomena and Dynamics of Rotating Machinery (ISROMAC-3) Honolulu, Hawaii, USA, April 1-4, 1990

The purpose of the symposium is to provide a forum for specialists in rotating machinery to present new developments and discuss the state of the art, the future direction and priorities in the areas of transport phenomena and dynamics. The Symposium has established itself as a major international conference in the area of rotating machinery, with the first two symposia held in 1985 and 1988 with great success.

Scope

Papers are solicited which deal with any aspect of thermo-fluid transport phenomena (mass, momentum, heat and energy transfer), seal and rotor dynamics, vibration and whirl, and related topics such as design and control of rotating machinery. All types of rotating machines, i.e., turbines (gas, steam, hydraulic, and wind), pumps, compressors, fans, propellers, and others will be considered. Modeling, theory, experiments, and numerical methods and simulations are all appropriate. Papers may be results of original research or those which summarize a specific subject. Papers dealing with special topics such as dynamic interaction of rotating machinery with fluid and structures, innovative design concept, and new applications, e.g., operation of rotating machinery in space environment, computer disc drives, etc. are welcome.

Selection of Papers

Initial selection will be made based on submitted abstracts of about 500 English words. The abstract should contain: 1) paper title, 2) five keywords in the order of importance, 3) authors' names, affiliations and full addresses, 4) name, address, phone number, teletype (FAX) number and telex number (if any) of the author to whom subsequent correspondence should be directed. The abstract should state clearly the objectives, results, and conclusions. Inclusion of one or two supporting figures or tables in the abstract that highlight the results will be particularly helpful and encouraged. Final acceptance will be based on review of the complete manuscript. All accepted papers will be published in the proceedings which will be available at the meeting.

Schedule

May 1, 1989	Three (3) copies of abstract due
May 15, 1989	Notification of abstract acceptance
June 30, 1989	Four (4) copies of full length manuscript due
September 15, 1989	Notification of final paper acceptance
November 1, 1989	Camera-ready manuscript due

Abstracts should be sent to:

Dr. J. H. Kim (Chairman, ISROMAC-3)
Electric Power Research Institute
3412 Hillview Avenue
P.O. Box 10412
Palo Alto, California 94303 USA
Phone: 415/855-2671
Telex: 82977 EPRI UF
FAX (teletype): 415/855-1026 (for verification, call 415/855-1028)

For further information, please contact Dr. J. H. Kim at the above address or:
Professor W.-J. Yang (Co-Chairman, ISROMAC-3)
Dept. of Mechanical Engineering and Applied Mechanics
University of Michigan
Ann Arbor, Michigan 48109 USA
Phone: 313/764-9910 or 764-2694

Supporting Organizations

Office of International Symposia on Transport
Phenomena
Gas Turbine Society of Japan
Flow Visualization Society of Japan
American Society of Mechanical Engineers

Canadian Society of Mechanical Engineers
Japanese Society of Mechanical Engineers
Turbomachinery Society of Japan
Heat Transfer Society of Japan
Electric Power Research Institute

Scientific Advisory Committee for ISROMAC-3

A. J. Acosta (USA)	R. C. Hendricks (USA)	R. Nordmann (West Germany)
P. Allaire (USA)	G. J. Hwang (Taiwan)	H. Ohashi (Japan)
U. Bolleter (Switzerland)	J. M. Hyun (Korea)	H. E. Siekmann (West Germany)
M. J. Braun (USA)	N. Kasagi (Japan)	C. W. Sullivan (USA)
K. C. Cheng (Canada)	J. H. Kim (USA)	W. Tabakoff (USA)
S. F. Chou (Taiwan)	T. S. Lee (Korea)	T. Uemura (Japan)
S. H. Crandall (USA)	J. W. Lund (Denmark)	D. G. Wilson (USA)
N. Cumpsty (UK)	T. McCloskey (USA)	S. H. Winoto (Singapore)
O. Furuya (USA)	D. E. Metzger (USA)	S. L. K. Wittig (West Germany)
J. P. Gostelow (Australia)	R. J. Moffat (USA)	W.-J. Yang (USA, Chairman)
E. Gunter (USA)	A. Muszynska (USA)	M. H. Zhu (China)
A. Hamed (USA)	W. Nakayama (Japan)	

Advisory Board for International Symposia on Transport Phenomena

W. Aung (USA)	K. Imaichi (Japan)	C. P. Tso (Malaysia)
K. C. Cheng (Canada)	J. H. Kim (USA)	G. de Vahl Davis (Australia)
J. P. Gostelow (Australia)	R. J. Moffat (USA)	B. X. Wang (China)
R. J. Goldstein (USA)	W. Nakayama (Japan)	S. H. Winoto (Singapore)
M. Hirata (Japan)	F. Ogino (Japan)	W.-J. Yang (USA)
G. J. Hwang (Taiwan)	C. L. Tien (USA)	

国際会議のお知らせ

名称： 〈 鋳造、溶接、先進凝固プロセスのモデリング 〉に関する第5回国際会議
Vth Conference on MODELING OF CASTING, WELDING AND ADVANCED
SOLIDIFICATION PROCESSES

期日： 1990. 9. 16 (日) - 9. 21 (金)

場所： スイス、ダボス (チューリッヒから約2.5時間のスイスアルプス中にある保養地)

主催：米国技術協会 (The Engineering Foundation, USA)

内容：凝固、鋳造、溶接に興味を持っている世界各国の政府、産業界、学会関係者間の情報交換を目的として、参加者全員が同一ホテルに宿泊し、同一会場で討議する。今回は特にシミュレーションによる予測と実測値の比較およびマイクロ組織の解析に重点を置く。また、溶接に関し予測値と実測値が最も近いグループあるいは個人に賞を出す”Round Robin” session と内容および発表技術の優れたものへの授賞を行う。

プログラム (予定) :

- * 鋳造のモデリング (インゴット、連続鋳造、精密鋳造その他)
- * ニヤ・ネット・シェイブ鋳造および先進凝固プロセスのモデリング
- * 溶接の数値計算力学
- * 熱と流れの連成問題
- * 熱移動と応力場の連成問題
- * ミクロ組織、欠陥、ミクロ/マクロ偏析の予測
- * 熱力学データ、プロセス制御、センサー、診断技術、逆問題
- * プリプロセッサ、エキスパート・システム、その他数学的取扱
- * 将来の方向とニーズ、パネルディスカッション

組織および運営委員会 : Dr. M. Rappaz (Chairman, Switzerland)

Dr. M. R. Ozgu (Switzerland), Dr. K. W. Mahin (USA),
Dr. T. W. Clyne (UK), Prof. J. Dantzig (USA), Prof. K. Eastering (Sweden),
Prof. H. Fredriksson (Sweden), Dr. A. F. Giamei (USA),
Prof. G. Lesoult (France), Prof. I. Ohnaka (Japan), Prof. P. R. Sahm (FRD),

サーキュラーおよび参加申込みは

The Engineering Foundation,
345 East 47th Street, New York, NY 10017, USA

アブストラクト (約250 words) は1990. 2. 28までに 下記にお送り下さい。

Dr. M. Rappaz, Materials Department,
Swiss Federal Institute of Technology,
34, Ch. Bellerive, CH-1007 Lausanne, Switzerland

「伝熱研究」の原稿のワープロ化のお願い

「伝熱研究」編集委員会（伝熱研究会）

1. はじめに

日本伝熱研究会の会誌「伝熱研究」の原稿をワープロで打って提出して下さる方が、近年増加しており、現在では、かなりの割合に達しております。もし、ワープロ原稿をそのまま会誌にのせることができれば、「伝熱研究」の印刷費用は安くなりますし（活字組みから写真製版への移行による費用の減少）、活字組みの時に生じる文章中の誤字、脱字を減らすこともでき、また、ゲラ刷りの校正作業もずっと楽になるなど種々の利点が生じるものと思われまます。そこで、原稿をワープロで打っていただける方には、なるべくワープロの出力原稿を提出していただき、それをそのまま会誌にのせることにいたしました。印刷用原稿としては、各著者のプリンタ出力をそのまま使用しますので、印刷の仕上りは機種による字型の違いなどのために多少不揃いになると思われまますが、以下の標準書式に従ってプリンタ出力をし、原稿を御提出いただきますよう、ご協力のほど、どうぞよろしくお願い申し上げます。

なお、もちろんのことながら、ご無理な方は、従来通りの手書き原稿を事務局にお送りいただければ、事務局で対応できますので、お気軽にお申し付け下さい。

2. 「伝熱研究」用原稿の標準書式

2.1 標準出力フォーマット

- ★この用紙の書式を参考にして、A4の用紙に打出す。（切り貼りは自由。印刷時にB5に縮小します。なお、縮小された大きさにB5に打出しても構いません。）
- ★縦長、横書き。（プリンターは、24×24ドット以上の文字構成とする。）
- ★全角文字を標準とする。（英語、数字は半角が望ましい。）
- ★一行に印字する文字数：42文字程度（40～44文字の間なら構いません。）
横 幅 ：160mm 程度（150mm～170mmの間なら構いません。）
（この場合、文字間隔は1/8文字程度に対応します。）
- ★一頁の行数：34行程度（33～35行の間なら構いません。）
縦の長さ ：255mm 程度（245mm～265mmの間なら構いません。）
（この場合、行間隔は1文字分程度に対応します。）
- ★図面・表は、シンポジウム講演論文集と同様に貼り込む。

（以上よろしく願いいたします。）

1 (一行目は表紙の頁のみ空白とする。二頁目以降は文章を書く。) 40・42・44

..... 10 20 30

..... 「伝熱研究」の原稿のワープロ化のお願い

..... (表題は三行目の中央に文章と同じ大きさの文字で書く。)

5 「伝熱研究」編集委員会・(伝熱研究会)

..... (表紙の頁は一行空白) (氏名、所属〔略称〕を右に詰めて書く。)

1. はじめに (本文スタート↓)

・日本伝熱研究会の会誌「伝熱研究」の原稿をワープロで打って提出して下さる方が、近年増加しており、現在では、かなりの割合に達しております。もし、ワープロ原稿をそのまま会誌にのせることができれば、.....

..... ↑

..... ↑

..... |

←-----160mm-----+-----→

15 |

..... 255mm | ←→

..... ↓ 10mm

..... なお、..... ↓

.....、事務局で対応できますので、お気軽にお申し付け下さい。

20 (一行空白)

2. 「伝熱研究」用原稿の標準書式

2. 1 標準出力フォーマット

★この用紙の書式を参考にして、A4の用紙に打出す。(切り貼りは自由。印刷時にB5に縮小します。なお、縮小された大きさとB5に打出しても構いません。)

★縦長、横書き。(プリンターは、24×24ドット以上の文字構成とする。)

★全角文字を標準とする。(英語、数字は半角が望ましい。)

★一行に印字する文字数：42文字程度(40～44文字の間なら構いません。)

横 幅：160mm程度(150mm～170mmの間なら構いません。)

(この場合、文字間隔は1/8文字程度に対応します。)

★一頁の行数：34行程度(33～35行の間なら構いません。)

縦の長さ：255mm程度(245mm～265mmの間なら構いません。)

(この場合、行間隔は1文字分程度に対応します。)

★図面・表は、シンポジウム講演論文集と同様に貼り込む。

(以上よろしくお願いたします。)

35

Typing Instructions for Contributors to
Journal of Heat Transfer Society of Japan

Editorial Board for J. Heat Transfer Soc. Japan

c/o Department of Mechanical Engineering
Tokyo Institute of Technology
Meguro-ku, Tokyo 152, Japan

Manuscripts should be typed single-half-spaced within a space of 170 x 255 mm, on one side of the page, using A4 (210 x 296 mm) or letter-size (8¹/₂ by 11 inch) white paper and 12-pitch typing letters. The manuscripts must be typewritten clearly using a black carbon or film ribbon on an IBM or equivalent typewriter. A word processor may be used with a letter-quality printer. The printing plates will be prepared by photographing the original manuscripts submitted. Therefore, it is important for typists to avoid erasers and keep the manuscripts as clean as possible. The pages will be reduced approximately 14% by the printer so that the data must be large enough to be readable at that reduction.

On the first page of each chapter, the chapter title should be typed centered, leaving two lines of space above it. The author's name and affiliation should also be typed centered. Put them on a line separate from the title and the text, leaving one line of space above and two lines of space below. On the second and subsequent pages, start typing at the top of the page. Each text page holds 40 lines of type. Using a light-blue pencil, lightly write the page number at the upper right corner of the page.

Equations should be typed if possible. If handwritten, they must be carefully lettered using black ink, using symbols approximately the same size as the typewritten characters. Type the equation and its number enclosed in parentheses as follows:

$$St = 0.0287 Pr^{-2/5} Re_x^{-1/5} \quad (1)$$

All symbols should be defined in the text. If a nomenclature section is included to define unique symbols, place it at the end of the text just ahead of the reference section. All data should be reported in SI units.

Place the table/figure preferably at the top or bottom of a page as close as possible to its first mention in the text. Type captions for tables/figures right above/under them. Leave one line of space between the table/figure and

following or preceding text. High quality reproduction of illustrations depends on the condition of the original artwork. It should be prepared as carefully as the text. In planning sizes of line figures and labels, keep in mind that the final page will be reduced 14% by the printer. Be certain that labels and data points will be legible at this reduction. Glossy prints, photostats, or reprints of drawings may be used if they are of high quality with sharp, even lines and lettering. Photographs must be sharp black-and-white glossy prints.

References should be listed immediately following the text. They may be listed either in alphabetical order or in numerical order by text citation. In the text, reference citations should be either by the last name of the author(s) and the year of publication or by the reference number enclosed in square brackets, respectively. Some sample lists of symbols and references follow:

NOMENCLATURE

c_p	specific heat at constant pressure, J/kg K
h_x	local heat transfer coefficient, W/m ² K
Pr	Prandtl number
Re_x	Reynolds number, $u_\infty x/\nu$
St	Stanton number, $h_x/\rho c_p u_\infty$
u_∞	free stream velocity, m/s
x	distance from the leading edge, m
ν	kinematic viscosity, m ² /s
ρ	density, kg/m ³

REFERENCES

- [1] Clark, J. A., 1986, Private Communication, University of Michigan, Ann Arbor.
- [2] Lee, Y., Korpela, S. A., and Horne, R. N., 1982, "Structure of Multi-Cellular Natural Convection in a Tall Vertical Annulus," Proc. 7th Int. Heat Transfer Conf., U. Grigull et al., ed., Hemisphere, Washington, DC, vol. 2, pp. 221-226.
- [3] Sparrow, E. M., 1980, "Forced-Convection Heat Transfer in a Duct Having Spanwise-Periodic Rectangular Protuberances," Num. Heat Transfer, vol. 3, pp. 149-167.
- [4] Tung, C. Y., 1982, "Evaporative Heat Transfer in the Contact Line of a Mixture," Ph.D. Thesis, Rensselaer Polytechnic Institute, Troy.

Note that a long list of references may be typed single-spaced.

事務局からのお願い

今度び、日本学術会議熱工学研究連絡委員会編集により「熱工学の研究動向と熱技術の進展」をまとめ、財団法人日本学術協力財団より発行されました。一部定価 1,000円のところ会員には 500円にてシンポジウム会場で頒布することに致しましたので、ご協力くださるようお願い申し上げます。



日本伝熱研究会への入会手続きについて

(1) 個人会員および学生会員

下記の当該申込み用紙に所要事項御記入の上、事務局宛御送付下さい。同時に郵便振替にて当該年度分の会費（個人会費は5,000円／年、学生会員は3,500円／年）をお支払い下さい。

会員には「伝熱研究」及び「日本伝熱シンポジウム講演論文集」等をお送りしています。

なお、「日本伝熱シンポジウム講演論文集」については、前年度の会費を納入された方に限り、当該年度のもの1冊をお送りしております。

本会の事業年度は毎年4月1日に始まり、翌3月末日に終わります。

申込書送付先： 〒152 東京都目黒区大岡山2-12-1

東京工業大学工学部機械工学科気付

電話 03(726)1111(代) 内線 2169, 2179

日本伝熱研究会

郵便振替口座：東京6-14749 日本伝熱研究会

(2) 維持会員

維持会員に入会申込みの場合は、上記事務局に直接書面または電話で御連絡いただくか、あるいはお近くの個人会員に御連絡下さい。事務局から研究会の内容、会則、入会手続きなどについてご説明いたします。

維持会員の会費は1口3,000円／年で、申込は何口でも結構です。会員には「伝熱研究」及び「日本伝熱シンポジウム講演論文集」等を申込1口につき1部ずつお送りしています。

日本伝熱研究会個人会員申込書・変更届書

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

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：カスケード | 17：蒸気機関 | 18：原子力 | 19：太陽熱 | 20：環境 |
| 21：その他（ | | | | ） |

*) 学生の場合は在学学校名、学年（M2、D3など）を記す。

伝熱研究
Vol. 28, No. 109

1989年4月発行

発行所 **日本伝熱研究会**

〒152 東京都目黒区大岡山2-12-1
東京工業大学工学部機械工学科気付

日本伝熱研究会

電話 03(726)1111(代) 内線2169, 2179

Fax 03(729)0563

振替 東京 6-14749

(非売品)