

ISSN 0910-7851

伝熱研究

Journal of The Heat Transfer Society of Japan

1997 January
Vol. 36 No. 140

〈特集：多孔質体内の熱・物質同時移動〉

ISSN 0918-9963

THERMAL SCIENCE AND ENGINEERING

Vol. 5

No. 1

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

日本伝熱学会第35期（平成8年度）役員

会 長 副 会 長 理 事 (編集出版) 北 海 道 東 海 (企 画) 北 陸 信 越 中 国 四 国 (総 務) 九 州 監 評 員	長 (編集出版) (企 画) (総 務) 早 坂 洋 史(北 大) 熊 田 雅 弥(岐 阜 大) 金 子 邦 彦(東 大) 青 木 和 夫(長 岡 技 大) 森 岡 齋(徳 島 大) 松 木 健 次(シ ャ ー プ) 尾 添 紘 之(九 大) 鳥 居 薫(横 浜 国 大) 鈴 木 立 之(富 山 県 立 大) 西 尾 茂 文(東 大) 功 刀 資 彰(原 研) 森 英 夫(九 大) 丸 山 茂 夫(東 大) 佐 藤 春 樹(慶 大) 辻 俊 博(名 工 大) 田 中 宏 史(福 岡 工 大) 山 田 明(三 菱 重 工) 廣 田 真 史(名 大) 小 林 健 一(東 工 大) 山 岸 英 明(釧 路 高 専) 松 田 理(石 川 高 専) 時 田 雄 次(大 分 大) 小 原 拓(東 北 大) 富 山 明 男(神 戸 大) 片 岡 勲(京 大) 鈴 木 豊 彦(鳥 取 大) 加 藤 泰 生(山 口 大) 森 康 彦(慶 大) 飛 原 英 治(東 大) 水 上 紘 一(愛 媛 大) 前 川 透(東 洋 大) 宮 内 敏 雄(東 工 大) 佐々木 章(秋 田 高 専) 吉 田 英 生(東 工 大) 武 内 洋(北 工 技 研)	越 後 亮 三(東 工 大) 荻 野 文 丸(京 大) 曾 田 正 浩(三 菱 重 工) 齋 藤 彬 夫(東 工 大) 部 会 長 增 岡 隆 士(九 工 大) 東 北 太 田 照 和(東 北 大) 松 尾 篤 二(三 菱 重 工) 部 会 長 笠 木 伸 英(東 大) 傳 熱 シ ン ポ ジ ウ ム 準 備 委 員 長 戸 田 三 郎(東 北 大) 関 西 中 島 健(神 戸 大) 五 十 嵐 喜 良(東 北 電 力) 部 会 長 関 東 山 田 幸 生(工 技 院) 塩 冶 震 太 郎(石 播 重 工) 日 向 滋(信 州 大) 石 黒 博(筑 波 大) 森 岡 幹 雄(石 播 重 工) 浅 古 豊(都 立 大) 松 島 均(日 立) 中 山 昭 男(九 州 産 大) 岸 浪 紘 機(室 蘭 工 大) 大 原 敏 夫(日 本 電 装) 大 河 誠 司(東 工 大) 三 松 順 次(岐 阜 大) 中 山 明 人(ト ヨ タ 自 工) 原 利 次(日 本 工 大) 東 之 弘(い わ き 明 星 大) 高 田 保 之(九 大) 小 宮 山 正 治(阪 大) 久 角 喜 徳(大 阪 ガ ス) 橋 本 律 男(三 菱 重 工) 松 本 浩 二(宮 崎 大) 川 西 康 平(三 菱 重 工) 数 土 幸 夫(原 研) 中 島 利 誠(お 茶 水 女 大) 塩 津 正 博(京 大) 佐 藤 勲(東 工 大) 村 上 周 三(東 大) 広 瀬 宏 一(岩 手 大) 岡 田 昌 志(青 山 学 院 大)
---	---	--

「Thermal Science and Engineering」

チーフエディター

土 方 邦 夫(東 工 大)

伝熱研究 目次

〈随想〉

伝熱という名の学会 小竹 進 (東洋大学) 1

〈特集：多孔質体内の熱・物質同時移動〉

「多孔質体内の熱・物質同時移動」特集にあたって

..... 第35期編集委員会 松尾篤二 (三菱重工業(株)長崎研究所) 3

Heat and Mass Transfer Aspects of Gas Separation by Adsorption

..... A. Fedorov and R. Viskanta (Purdue University) 4

吸着ヒートポンプの吸着剤充填吸着器内熱・物質移動

..... 渡辺藤雄, 架谷昌信 (名古屋大学大学院工学研究科エネルギー理工学専攻) 12

改質触媒層における熱・物質移動

・福迫尚一郎, 山田雅彦 (北海道大学大学院), 宇佐美優 (東京電力(株)エネルギー・環境研究所) 18

多孔質体内燃焼研究の最近の発展

..... 上宇都幸一 (大分大学工学部生産システム工学科) 27

地下空間環境に及ぼす多孔質体内の熱物質移動現象

..... 藤井義久 (鹿島建設(株)技術研究所, 現: 新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO)) 33

生活環境下における被服材料の有効熱伝導率

..... 高橋カネ子, 山田悦郎 (秋田大学鉱山学部機械工学科) 39

回転式除湿器・回転式全熱交換器内での熱・物質同時移動

..... 田中宏史 (福岡工業大学電子機械工学科) 45

断熱材内の熱物質移動について 河合洋明 (北海道工業大学機械工学科) 50

建築壁体の熱・湿気移動解析 尾崎明仁 (福岡大学工学部建築学科) 57

セラミックスの乾燥収縮シミュレーション

..... 板谷義紀, 架谷昌信 (名古屋大学大学院工学研究科エネルギー理工学専攻) 67

湿紙の乾燥過程における熱及び物質移動現象の研究

岸浪紘機 (室蘭工業大学機械システム工学科), 山崎幸次 (日本製紙株式会社石巻工場技術課),

齊藤図 (室蘭工業大学機械システム工学科), 鈴木淳 (室蘭工業大学機械システム工学科) 73

〈世界のホットユース〉

日本, ヨーロッパ, 米国における工学研究についての感想

..... 徳廣明 (動力炉・核燃料開発事業団) 80

〈研究トピックス〉

高効率フィンチューブ熱交換器の開発 李承甲 (三星電子生活システム研究所) 84

〈賛助会員紹介〉

(株)東芝 原子力技術研究所 師岡慎一 (株)東芝原子力技術研究所 85

〈書評〉

混相流用語辞典	加治増夫 (大阪大学工学部)	88
---------------	----------------------	----

〈行事カレンダー〉		89
-----------------	--	----

〈支部活動報告〉

北海道研究グループ活動報告		90
東北支部活動報告		90
九州支部活動報告		92

〈お知らせ〉

第34回日本伝熱シンポジウムのご案内		93
"The Frontiers Forum" 企画募集		98
日本伝熱学会関西支部 第4期定時総会・講演討論会		98
大阪ドーム見学とコージェネレーションの動向とガスエンジンの高効率化に関する見学会		99
パソコンによる 熱と流れの入門		100
日本混相流学会混相流第17回レクチャーシリーズ 粉粒体のプラグ輸送		100
CALL FOR PAPERS :		
International symposium on AIR CONDITIONING IN HIGH RISE BUILDINGS '97		101
「伝熱研究」会告の書き方		101
「伝熱研究」原稿の書き方		102
事務局からの連絡		103
日本伝熱学会, 入会申込み, 変更届用紙		105

インターネット情報サービス

- <http://htsj.mes.titech.ac.jp/htsj.html>
最新の会告・行事の予定等を提供
- htsj-info@mes.titech.ac.jp
最新の情報を電子メールで受け取りたい方のための電子メールアドレスの登録受付
- htsj@mes.titech.ac.jp
事務局への連絡の電子メールによる受付

Journal of The Heat Transfer Society of Japan
Vol.36, No.140, January, 1997

CONTENTS

<Essay>

On the Name of the Society "Dennetsu" Susumu Kotake (Toyo University)	1
--	---

<Special Issue: Heat and Mass Transfer in Porous Media>

Preface to Special Issue: Heat and Mass Transfer in Porous Media Tokuji Matsuo (Nagasaki R&D Center, Mitsubishi Heavy Industries, Ltd.)	3
Heat and Mass Transfer Aspects of Gas Separation by Adsorption A. Fedorov and R. Viskanta (Purdue University)	4
Heat and Mass Transfer in Adsorber for Adsorption Heat Pump Fujio Watanabe and Masanobu Hasatani (Dept. Energy Engineering and Science, Nagoya University)	12
Heat and Mass Transfer Characteristics in a Reforming Catalyst Bed Shoichiro Fukusako, Masahiko Yamada (Graduate School of Engineering, Hokkaido University) and Yutaka Usami (The Tokyo Electric Power Company, Inc.)	18
Recent Development of Research on the Combustion in Porous Media Kouich Kamiuto (Department of Production, Systems Engineering, Oita University)	27
Effects of Heat and Mass Transfer in Porous Media on the Underground Environment Yoshihisa Fujii (Kajima Technical Research Institute, present address at NEDO)	33
The Effective Thermal Conductivities of Clothing Materials in Human Life Kaneko Takahashi and Etsuro Yamada (Department of Mechanical Engineering, Akita University)	39
Combined Heat and Mass Transfer in Rotary Dehumidifier and Rotary Total Heat Exchangers Hiroshi Tanaka (Fukuoka Institute of Technology)	45
Heat and Mass Transfer Characteristics of a Thermal Insulating Material Hiroaki Kawai (Hokkaido Institute of Technology)	50
Analysis of Heat and Moisture Transfer through Building Wall Akihito Ozaki (Department of Architecture, Faculty of Engineering, Fukuoka University)	57
Simulation of Shrinkage Behavior during Drying of Ceramics Yoshinori Itaya and Masanobu Hasatani (Dept. Energy Engineering and Science, Nagoya University)	67
A Study on Mass and Heat Transfer Phenomena on Drying Moist Fibrous Pulp Sheet Koki Kishinami (Muroran Institute of Technology), Koji Yamazaki (Nippon Paper Industry L.T.D.), Hakaru Saito (Muroran Institute of Technology) and Jun Suzuki (Muroran Institute of Technology)	73

<World Hot Youth>

Some Selected Views on the Engineering Communities in Japan, Europe and the United States of America
Akira T. Tokuhira (Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation) 80

<Research Topics>

Development of a High Efficiency Fin-Tube Heat Exchanger
Seung-Kap Lee (Samsung Electronic Co., Ltd, Living System Research Center) 84

<Profile of Industrial Member>

Nuclear Engineering Laboratory, Toshiba Corporation
Shinichi Morooka (Nuclear Engineering Laboratory, Toshiba Corporation) 85

<Book Review>

Encyclopedia of Multiphase Flow
Masuo Kaji (Faculty of Engineering, Osaka University) 88

<Calendar> 89

<Reports on the Activities of Chapters> 90

<Announcements> 93

伝熱という名の学会

On the Name of the Society "Dennetsu"

小竹 進 (東洋大学)

Susumu KOTAKE (Toyo University)

「何が専門ですか」

「伝熱の研究をしています」

「伝熱って何ですか」

これが一般の研究者技術者（一般の人でなく）の「伝熱」に対する認識である。これが伝熱学会の会員数が固定してしまっている大きな要因ではないか。

「伝熱学会の会員数が固定してしまったのは、伝熱という名称が問題だ」

「ちなみに、『でんねつ』をワープロで漢字変換するとほとんどの辞書では電熱となる。伝熱は学習させなければならない」

というのが、私の尊敬する複数の先生方のご意見である。

名前、ネーミングの問題は確かに重要なことである。とくに、こちらから売り込もうとする商品の場合には、多くの人にすぐ内容を理解してもらって、買わないまでも興味をしめしてもらい必要がある。同じような商品がある場合はなおさらである。潜在意識的な効果をねらって商品名やその内容の宣伝に莫大な費用をかけなければならないことになる。葉を買いにいったその種類の多いことに戸惑い、ついなんとなくすぐ直りそうな名前や潜在意識的に既知な名前のもの（だいたいこういうものは高価であるが）を買うことになる。買ってしまってから他のものと成分を比較するとほとんど差がなく後の祭りであるなどということはしばしば誰しも経験することである。葉ばかりでなく、デパートにあるほとんど全ての商品がそうである。ここではネーミングは非常に重要である。

ルイ・ヴィトン (Louis Vuitton) 社の製品の50%以上が日本人顧客であるといわれる。確かにルイ・ヴィトンは合成素材を上手く活かしてデザインと機能性・耐久性に成功した製品のひとつであるといわれているが、それほど日本の民族がデザインと機能性・耐久性にこだわる民族であるとは思われない。デザインにこだわるなら服装や他の持ち物との調和が問題である。服装の配色や装身具の全体のコーデ

ネーションからはとてもそのようには思われないのがほとんどである。むしろ、こうしたブランド品と関係ない人の方がはるかにデザインのセンスがあるのが普通である。やはり、ネーミングの問題である。ということは、非常にネーミングにこだわる民族であるということになる。もっとも、ブランド品の名と学会の名を一緒にすることは大きなお叱りを受けることになるであろうが。

機械学会、電気学会、土木学会など最初にできたころ専門以外のどのくらい多くの方がその内容を奇怪、伝記、土・木でなく「機械」、「電気」、「土木」として理解していたのだろうか。「いやそのころはこれらの学の創世期であって専門以外の人とのつながりはあまり必要でなかった。いまは社会とのつながりが大切であり、多くの人に理解してもらい必要がある」と言われるかも知れない。しかし、これらの学会がそれなりに名が知られてきたのは、結果としてそれなりのつながりや貢献をしてきたからであろう。最初につなかりを宣言し、貢献を約束して出発したわけではあるまい。このつながりに興味をもち、貢献に魅力をもった人たちが集まり、さらなるつながりや貢献を結果するというようになったのではないだろうか。

したがって、問題はその内容である。内容が伴わないのに名前や看板をいくら立派なものにしても、それこそ看板倒れである。個人的には看板は貧弱なほどよいと思っている。だいたい、なにごとにおいても、看板や評判が良くなってお客が多くなると内容の質が落ちてくるのが世の常である。諸先輩の先生方は、熱機関、エネルギー機器の発達にいままで伝熱学で大きな貢献をしてこられている。したがって、「伝熱」という名は看板としては十分であると思われる..

現在、コンピューターメモリーとして大容量なもの一つにCD-ROMが用いられているが、さらに、大容量のROM/RAMメモリーとしてDVD-ROM/RAM (4.7GB / 2.6GB) が登場しようとしている。この驚

異的な記録機構は相変化記録膜を用いている。これはGe,Se,Teの混合材薄膜で、その相状態がレーザ加熱冷却の温度の高低で非晶質、結晶状態になりその光反射率が相違することを原理としている。全く熱的な話であるが、この問題にどれだけ伝熱学(会)が貢献したのであろうか。レーザの安定性や微妙な材料組成・結晶生成の制御もほとんど伝熱的な問題である。これらの問題の解決に伝熱学(会)がどれだけ貢献してきているのだろうか。ここでは、伝熱が致命的な律速過程であるにもかかわらずレーザとか材料とかが看板であり、熱そのものが看板にならない。熱デスクとはいわないし、熱レーザや熱晶とはいわない。ここに伝熱学の本質があるのではないだろうか。すなわち、いかに重要でも表面に出ない謙虚な学問である。まさに、日本的な学問である。(しかし、どういふわけか伝熱学で功績を残しておられる諸先輩はこのような性格の持ち主が少ないように見受けられるが、これは別の問題であろう。)

基礎的な謙虚な学問であるとすと、名前にこだわる必要もない。看板は貧弱で良い。宣伝の必要もない。ほんとうに伝熱の問題に興味をもち魅力を感じる人たちが、世の喧騒に惑わされずに静かにこつこつと着実にゆっくりとことを進めれば良いのではないだろうか。名前や看板で入ってくるお客は単なるひやかしでありノイズに過ぎない。

でも、こうした問題に興味をもったり魅力を感じたりする人がいなくなったらどうするのかという反論があるであろう。そうなる時は伝熱学は必要がないということである。消滅すれば良い。簡単である。むりに、必要性を見つけないこともない。(伝熱そのものはなくなるから伝熱学はどこかに吸収されてしまったということである。)

人は集団を作ると、大きな集団を望む。とくに、その大将に近い人たちはそうである。大きな集団の大将の方が力が強いからである。でも、本当の力は数ではない。実力である。実力と中身があれば会員は自然に増える。だが、どこの学会でも会員増加に力を注いでいる。どこの学会も中身がなくなってきたのであろうか。さらに、このごろは、大学でもい

や大学の中の学科でも学生を集めるのに看板を塗り直したり名前を変えたり大変である。いずれも、中身はほとんど同じで変わらないようなのだが。中身が同じであるから大変なのであろう。いずれにしても、実力と中身の無いひとつの集団を一般に認識させ、興味をもたせ、集団をふくらませるにはネーミングが大切であるということである。しかし、どこまでそんなことが成り立つのであろうか。

先のブランド商品とも関係するが、流行という言葉がある。なぜ、流行なのか。流行は多くの人々が絞られた狭い対象に同時に興味をもつことにある。しかし、流行の問題はその現象よりもその興味をもつモチベーションにある。ブランド商品ではそれなりの評判と実績があるために、それらに頼って自分の評価能力の欠如を補おうということもあろう。それらを持つことによって集団社会での優越的階層にたつたと思う一種のステータス意識の満足感である場合もあるであろう。さらには、そうしないと集団から疎外されるのではないかという一種の疎外恐怖感である場合もあるであろう。学問の場合でも似たり寄ったりである。先端とかバイオ、環境というキーワードが騒がれているが、そんな言葉を使わないと研究をしていないような感じを受けたり、なにか取り残されたような気になったりする。もっとも、ブランド商品の場合と違って、そのような言葉と関連しない研究では研究費がとれない世の中であることは事実であるが。でも、無理をしてこんな言葉を組み込むことあるまい。金がなければ頭を使わなければならないから、かえって独創的な研究ができる。少なくともそのような環境をつくれることにはなる。

伝熱学会が消滅しても伝熱は消えない。現在3Kといわれている宇宙の終焉まで熱の終焉はない。それまで、すべての道は熱につづき熱に終わる。しかし、その道の中や方向を変えるということは大変である。そこに伝熱学会の存亡がかかってはいるのだが。急ぐことはない。ゆっくりと着実に取り組めば良い。名前など気にすることもない。中身ができれば名前は後からついてくる。

「多孔質体内の熱・物質同時移動」特集にあたって

Preface to Special Issue: Heat and Mass Transfer in Porous Media

第35期編集委員会

松尾 篤二 (三菱重工業(株)長崎研究所)

Tokuji MATSUO (Nagasaki R&D Center,

Mitsubishi Heavy Industries, Ltd.)

エネルギー・環境問題に関連して、様々な分野で多孔質体を用いた機器やシステムの研究が進められており、伝熱上興味深い現象を内包している。例えば吸着ヒートポンプは多孔質の吸着剤に水蒸気などの作動ガスを吸着・脱着させ、それに伴う発熱・吸熱を利用する。細孔の大きさを揃えた多孔質の吸着剤にその細孔よりも分子の大きさが小さいガス成分のみが吸着されることを利用するガス分離装置では、吸着の際には吸着熱除去のため冷却が必要であり、また吸着されたガスを取り出す際には加熱して脱着させる。このような機器のコンパクト化とシステムの高性能化のためには、多孔質体内での熱と物質の移動を予測し制御することが必要である。

多孔質体内の熱・物質移動現象は、上記のような吸着現象に限らず、身近には衣服を通しての熱と水蒸気の移動や、室内の壁や加湿器・除湿器を介しての湿度のコントロール、寒冷地の住宅断熱材中での水蒸気凝結による断熱性能劣化の問題から、工業上は製紙プロセスでの紙の乾燥やセラミック製造過程での乾燥に伴う収縮の問題、さらには多孔質体を用いる燃焼器のように熱の移動を巧妙に積極的に利用するものまで、多岐にわたって関係している。

近年、この分野の研究が国内外で活発化してきており、当学会主催の日本伝熱シンポジウムにおいても数年前から多孔質体のセッションが設けられている。

多孔質体内の熱・物質移動現象は、極めてミクロなスケールでのガスの拡散と熱の移動を伴う複雑な現象であり、その解明にはミクロな計測が困難なため、理論解析はミクロに行っても、それを比較的マクロな計測によって検証するという手法を取らざるを得ない。上記のような種々の多孔質体内の熱・物質移動現象は、対象は異なっても理論的取り扱いの手法や研究のアプローチにはある程度共通性があるものと考えられる。

このような点から、様々な多孔質体内の熱・物質移動現象を解説していただき、最近の研究状況を紹介願うことにより、相互の関連性を浮かび上がらせることができると考えて、この特集を企画した。

テーマの選定に当たっては、特定の現象に偏らずできるだけ幅広く取り上げるように努めたが、ページ数の制約もあって関連の全現象を網羅しているわけではない点は御了解いただきたい。執筆いただく内容については、細かい点は著者にお任せした。したがって、原稿の構成と内容は統一されていないが、各著者が研究の現況に応じて自由に記述でき、それがかえって読者の理解を助けることになるものと思う。

本特集がこの分野の研究の発展に寄与でき、また新たな研究者の興味を喚起できれば幸いである。

なお、主に吸着現象に関するものであるが、以下のような成書に現象や理論が詳述され、また様々なシステムが紹介されているので、興味ある向きは参考にしていただきたい。

おわりに、本特集の企画に賛同し、極めて御多忙にもかかわらず快く原稿をお寄せいただいた著者の方々に、深く感謝の意を表する次第であります。

参考文献

- (1) 清水, 吸着技術ハンドブック, (1993), (株)NTS.
- (2) Ruthven, D.M., Principles of Adsorption and Adsorption Processes, (1984), John Wiley & Sons.
- (3) Wankat, P.C., Large-Scale Adsorption and Chromatography, (1994), CRC Press.
- (4) Suzuki, M., Adsorption Engineering, (1990), Kodansha and Elsevier Science Publishers.
- (5) Greenkorn, R.A., Flow Phenomena in Porous Media, (1983), Marcel Dekker.
- (6) Cushman, J.H., Dynamics of Fluids in Hierarchical Porous Media, (1990), Academic Press.

Heat and Mass Transfer Aspects of Gas Separation by Adsorption

A. FEDOROV and R. VISKANTA
(Purdue University)

ABSTRACT

A brief review of the pertinent literature dealing with heat and mass transfer aspects of gas separation by adsorption is provided to describe the present understanding of the field. The analysis of combined heat and mass and adsorption dynamics in a honeycomb adsorption column is performed to demonstrate the importance of accounting for interactions between heat/mass transfer and adsorption processes. In a way of conclusions, research directions are identified where the current knowledge is limited and additional developments are needed.

NOMENCLATURE

C	concentration [kg/m^3]
c_p	specific heat at constant pressure [J/kgK]
D	mass diffusivity [m^2/s]
d	internal width of the unit cell [m]
F	total cross-sectional area of the unit cell [m^2]
ΔH	differential enthalpy of adsorption [J/kg]
$h_{h,x}$	local heat transfer coefficient [W/m^2K]
$h_{m,x}$	local mass transfer coefficient [m/s]
k	Henry or Freundlich adsorption equilibrium constant or thermal conductivity [W/mK]
L	length of the unit cell [m]
P	wetted perimeter of the unit cell [m]
q	amount adsorbed [kg/m^3]
T	temperature [K]
t	time [s] or wall thickness of the unit cell [m]
V	axial velocity [m/s]
x	Cartesian coordinate [m]

Greek Symbols

ϵ	structural porosity of the unit cell
ϵ_{in}	internal macroporosity of adsorbent
ρ	density [kg/m^3]

Subscripts

eff	refers to effective quantity
g	refers to quantity in the gas phase
h	refers to heat transfer
in	refers to inlet conditions
m	refers to mass transfer
w	refers to quantity in the solid phase
x	refers to quantity related to x -directions
0	refers to initial or reference conditions

Superscripts

*	refers to modified quantity
---	-----------------------------

INTRODUCTION

Adsorption based technologies have enjoyed a wide application in the modern chemical, petrochemical, pharmaceutical, energy, environmental and other industries (Ruthven, 1984). The traditional microporous adsorbents with pore diameters ranging from a few Ångstroms to a few tens of Ångstroms such as silica gel and activated carbon have been traditionally used for drying, alcohol dehydration, impurity removal in pollution control, recovery of radioactive wastes and other technologically important separation processes. The recent development of crystalline aluminosilicates (zeolites) with micropore size strictly controlled by the crystal structure (there is virtually no distribution of pore size) has also opened numerous opportunities for application in catalysis and bioprocessing (Ruthven, 1984; Suzuki, 1990).

Adsorption separation and purification processes are often more energy efficient and, therefore, more cost effective process than conventional distillation technology because of availability of highly selective and long

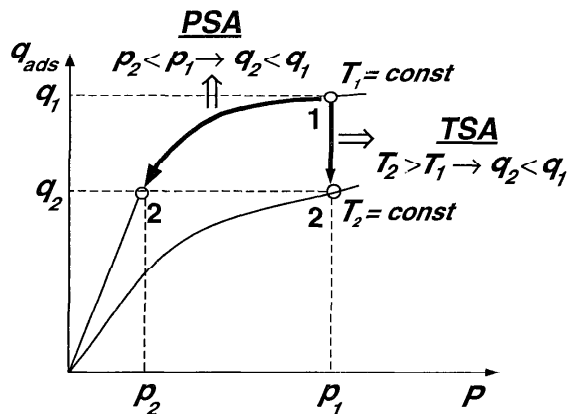


Figure 1: Illustration to the definition of regeneration techniques

lasting adsorbent solids. Bulk separation in multicomponent gaseous mixture by adsorption is based on ability of some porous solids to reversibly and selectively adsorb large volumes of gases. The technological process is transient and consists of alternate adsorption and regeneration steps in a cyclic manner. Among several alternative processes proposed for regeneration of spent adsorbents, desorption by low pressure stream (pressure swing adsorption or PSA cycle), desorption at high temperature (temperature swing adsorption or TSA cycle), and their combination (temperature-pressure swing adsorption or TPSA cycle) are the most common for the gas separation applications (Yang, 1987). Since the equilibrium amount of gas adsorbed is proportional to the partial pressure or concentration of adsorbable species, the isothermal reduction of the total pressure of the gas mixture (PSA) leads to desorption of the adsorbate to the flowing gas stream and, thus, regeneration of the adsorbent solid. TSA regeneration method is based on the fact the adsorption from the gaseous phase is invariably exothermic and, therefore, the equilibrium amount of gas adsorbed decreases with an increase in operating temperature, i.e., desorption occurs. Figure 1 provides the graphical representation of theoretical concepts for both regeneration techniques using adsorption isotherms.

The detailed discussion of TSA and PSA cycles and their application in gas separation technologies can be

found elsewhere (Yang, 1987; Ruthven, 1994). The purpose of this review is to present an overview of works dealing with fundamental aspects of heat and mass transfer interactions with adsorption/desorption, to emphasize the importance of considering the simultaneous heat and mass transfer process while modeling the dynamic behavior of an adsorption column, and, finally, to delineate the major directions where the further research and improved understanding are needed.

LITERATURE REVIEW

Industrial needs for an economic separation process has stimulated fundamental research in adsorption as well as considerable efforts in the development of new adsorbents. Extensive research has been performed to study transport processes in adsorption systems. However, most of these studies are concentrated on investigating solely mass transfer, while keeping the adsorbent at isothermal conditions [the extensive reviews of the literature by Ruthven (1984) and Suzuki (1990) are available and are not repeated here]. Although it has been evident for a long time that adsorption/desorption processes are always accompanied by release/removal of considerable amount of heat (Scheele, 1780), relatively few theoretical studies dealing with simultaneous heat and mass transfer during non-isothermal adsorption/desorption have been reported (Leavitt, 1962; Carter and Barrett, 1973; Yoshida and Ruthven, 1983; Raghavan and Ruthven, 1984) among others. A comprehensive review of the relevant literature up to 1990 is given by Ůlků (1991).

Only during the last several years the problem of heat and mass transfer interactions during adsorption/desorption has received increased attention from researchers, and several comprehensive experimental and computational studies have been undertaken (Farooq and Ruthven, 1990a,b; Gukov et al., 1994; Mohamad et al., 1995; Bart et al., 1996). Farooq and Ruthven (1990a,b) carried out the measurements of the adsorption and desorption breakthrough curves (concentration uptake) and corresponding temperature profiles (both radial and axial) in a series of adsorption columns with internal diameters ranging from 0.77 to 7.9 cm. The columns were packed with 0.707 mm. diameter 5A zeolite adsorbent particles. Adsorption from the mixture of 1% ethylene

as an adsorbate and helium as a carrier gas was investigated. The authors have found that desorption was almost isothermal; however, the departure from isothermal conditions was very pronounced for adsorption. The one- and two- dimensional models for heat transfer along with one-dimensional model for mass transfer and linear Henry adsorption isotherm in both models were used to describe the dynamic behavior of the adsorption columns previously studied experimentally. Both models were able to predict the shape of breakthrough curves correctly. The authors concluded that, in general, for most practical systems, the one-dimensional model should provide an adequate description of the column dynamics. However, under conditions of pure thermal wave formation (i.e., when the thermal front leads the concentration wave), there is some difference between the one- and two- dimensional models. Gukov et al. (1994) presented a two-dimensional mathematical model for both temperature and concentration along with modified Henry's kind kinetic equations for adsorption in the multicomponent mixture. Their predictions showed that axial diffusion and conduction play a very important role in dynamics of the cylindrical adsorption column during the entire operational cycle, including the initial clean-up purge, the adsorption stage, and the regeneration by desorption.

Arguably the most comprehensive mathematical model of adsorption and desorption in a fixed bed has been recently developed by Mohamad et al. (1995). In this model the macroscopic flow, heat and mass transfer analysis is based on Forchheimer-Brinkman extended D'Arcy's flow model in porous media and non-thermal equilibrium between solid adsorbent particles and adsorbate gaseous mixture in the column. An empirical nonlinear Freundlich isotherm was adopted to predict the adsorption equilibrium conditions. Macropore and micropore diffusion are accounted for in both the pellet and crystal using extended version of the model presented by Cen and Yang (1986). The predictions were compared against published experimental data (Yamada and Viskanta, 1992) and appear to be in qualitatively good agreement. The equilibrium constant " k " and the exponent " n " in the Freundlich empirical adsorption isotherm have been identified as the major model parameters responsible for achievement of

quantitative agreement between the theoretical predictions and the experimental data.

The importance of accounting for thermal effects when interpreting the experimental measurements of diffusion rates in biporous pellets obtained by means of the frequency response technique for non-isothermal adsorption has been recently established by Sun et al. (1994) and Bourdin et al. (1996). The authors have even discovered that the very specific bimodal behavior of the experimental out-of-phase data is caused by the heat evolution effects in contradiction to the previously established view (Yasuda et al., 1991) that there are two adsorbable species with different diffusion mobilities.

In summary, the literature review has revealed that only few theoretical and experimental studies have been performed which account for the combined heat and mass transfer effects and adsorption/desorption dynamics. The very simple analytical models for adsorption equilibrium (Henry, Langmuir or Freundlich isotherms) have usually been employed (Farooq and Ruthven, 1990a; Mohamad et al., 1995) which are correctly applicable only for the low partial pressure or concentration limits. Furthermore, the oversimplified treatment of transport phenomena in the porous media (neglecting frictional pressure drop, setting constant linear velocity throughout the porous bed, etc.) is generally assumed.

In the next section we present the theoretical model and compare the predictions with experimental data for simultaneous heat/mass transfer and adsorption dynamics in a honeycomb adsorption column. The intent is to provide a clear evidence of the importance of fundamental understanding of combined heat and mass transfer occurring in the adsorption column and to illustrate their significant influence on the dynamics and overall performance of the system.

AN EXAMPLE: HEAT/MASS TRANSFER AND ADSORPTION DYNAMICS

Mathematical Formulation. PSA and TSA gas separation systems involve the cyclic changes in the pressure (concentration) and temperature of the flowing stream, respectively. Thus, the transient response of the adsorption column on the inlet concentration and temperature intakes is of the major concern.

Most practical designs of the adsorption columns are

of the fixed porous bed type which are characterized by a large contact surface area between adsorbate mixture and adsorbent. However, the momentum, heat and mass transport processes in the porous media are not well understood (Viskanta, 1995). Hence, in order to gain fundamental understanding of heat and mass transfer and adsorption dynamics, the analysis is performed for an adsorption column which has a honeycomb internal structure with well defined geometry (i.e., macroporosity).

The schematic diagram of the honeycomb unit cell together with the coordinate system is illustrated in Figure 2. It is assumed that the flow in the column

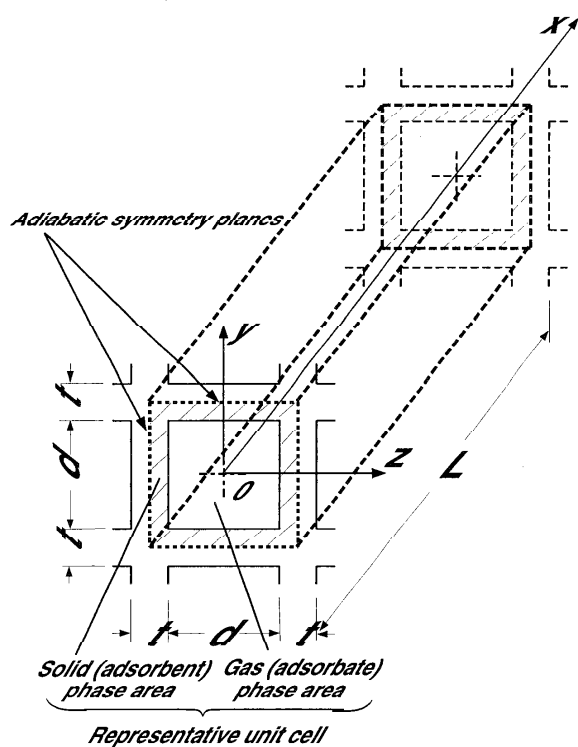


Figure 2: Schematic of the unit cell and the coordinate system

is one-dimensional, laminar, and incompressible with a constant linear velocity V (frictional pressure drop is negligible) and the heat of adsorption is constant and independent of adsorbent surface coverage by the adsorbate film. The transverse heat conduction and species mass diffusion, Dufour and Soret effects, viscous heat

dissipation, radiation, and pressure work are neglected in comparison to axial advection and diffusion of heat and mass. The transient, non-equilibrium mass and energy conservation equations for the flowing gas and solid adsorbent of the unit cell are given by the following:

Conservation of adsorbable species in the gas phase

$$\frac{\partial C_g}{\partial t} + V \frac{\partial C_g}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} \left[D_g \frac{\partial C_g}{\partial x} \right] + h_{m,x} \frac{P}{\epsilon F} (C_w - C_g) \quad (1)$$

Conservation of adsorbable species in the solid phase

$$\epsilon_{in} \frac{\partial C_w}{\partial t} - \epsilon_{in} \frac{\partial}{\partial x} \left[D_{w,eff} \frac{\partial C_w}{\partial x} \right] + h_{m,x} \frac{P}{(1-\epsilon)F} (C_g - C_w) - (1-\epsilon_{in}) \frac{\partial q}{\partial t} \quad (2)$$

Initial and boundary conditions

$$t = 0, \quad 0 < x < L \quad C_g = C_w = C_0 \quad (3)$$

$$t > 0, \quad x = 0 \quad C_g = C_w = C_{in} \quad (4)$$

$$t > 0, \quad x = L \quad \frac{\partial C_g}{\partial x} = \frac{\partial C_w}{\partial x} = 0 \quad (5)$$

Conservation of energy in the gas phase

$$\rho_g c_{p_g} \left(\frac{\partial T_g}{\partial t} + V \frac{\partial T_g}{\partial x} \right) = \frac{\partial}{\partial x} \left[k_g \frac{\partial T_g}{\partial x} \right] + h_{h,x} \frac{P}{\epsilon F} (T_w - T_g) \quad (6)$$

Conservation of energy in the solid phase

$$(\rho c_p)_{w,eff} \frac{\partial T_w}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[k_{w,eff} \frac{\partial T_w}{\partial x} \right] + h_{h,x} \frac{P}{(1-\epsilon)F} (T_g - T_w) - (1-\epsilon_{in}) \frac{\partial q}{\partial t} \Delta H \quad (7)$$

Initial and boundary conditions

$$t = 0, \quad 0 < x < L \quad T_g = T_w = T_0 \quad (8)$$

$$t > 0, \quad x = 0 \quad T_g = T_w = T_{in} \quad (9)$$

$$t > 0, \quad x = L \quad \frac{\partial T_g}{\partial x} = \frac{\partial T_w}{\partial x} = 0 \quad (10)$$

For closure of the problem the non-linear Freundlich adsorption equilibrium isotherm is assumed:

$$q = k_0^*(T_w) C_w^n \quad (11)$$

The effective thermophysical properties and the local heat and mass transfer coefficients are evaluated using published information (Cheng and Vachon, 1969; Kakaç et al., 1987; Karger and Ruthven, 1992).

A fully implicit, absolutely stable finite-difference numerical scheme of the first order approximation in time and the mixed first-to-second order of approximation in the spatial variable has been used for numerical approximation of the governing parabolic equations, Equations (1)-(7). The Thomas algorithm is then used for solving the system of linear algebraic equations with the three-diagonal matrix.

Results and Discussion. Yamada (1994) has studied experimentally heat and mass transfer and adsorption dynamics in the honeycomb adsorption column made of $TiO_2 - WO_3 - V_2O_5$. Specifically, the honeycomb adsorption column has operated in the following manner: initially the mixture of air and water vapor as an adsorbate of the constant concentration $C_0 = 0.0147 \text{ kg/m}^3$ at temperature $T_0 = 22.5 \text{ }^\circ\text{C}$ was passed through the honeycomb column at a steady rate; after the adsorbent and adsorbate have reached an equilibrium, the mixture with higher water vapor concentration $C_{in} = 0.0184 \text{ kg/m}^3$ at temperature $T_{in} = 42.5 \text{ }^\circ\text{C}$ was introduced at the column inlet and, then, these conditions were steadily maintained for the rest of the experiment until a new equilibrium has been reached. The temperature and the water vapor (adsorbate) concentration have been measured at four different spatial locations along the column length as the time progressed. The parameters of the non-linear Freundlich adsorption equilibrium isotherm have been obtained by correlating the experimental data of Yamada (1994) by the equation:

$$q = k_0^*(T_w)C_w^n = 9.398 \times 10^{-8} \exp[3.63 \times 10^6/RT_w]C_w^2 \quad (12)$$

Figures 3 and 4 show the transient adsorbate temperature and concentration uptakes at four different spatial locations along the adsorption column. The theoretical results agree quite well with the experimental data (Yamada, 1994) and show several distinguished features. The physics of heat and mass transfer interactions revealed by both the experimental and theoretical results is discussed in the next few paragraphs.

A sharp increase in the experimentally observed adsorbate temperature (Figure 3) in the first 1–2 minutes is mainly due to the heat evolution during adsorption of the water vapor by the honeycomb adsorbent from

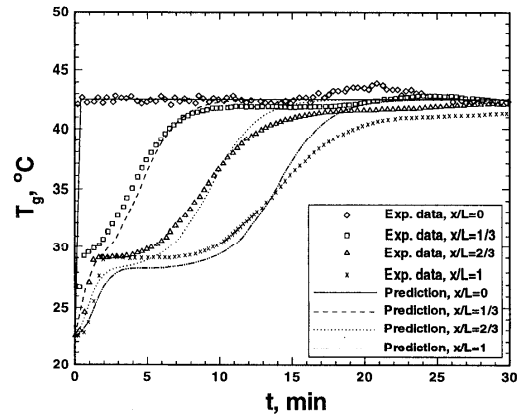


Figure 3: Comparison of theoretically predicted temperature uptake distributions of the adsorbate with experimental data.

the adsorbate-rich mixture ($C_{in} = 0.0184 \text{ kg/m}^3 > C_0 = 0.0147 \text{ kg/m}^3$) initially entering the column. After this adsorption induced sharp rise, the temperature of adsorbate stops increasing and remains constant ($\approx 29 \text{ }^\circ\text{C}$) during some time interval ($2 \text{ min} < t < 7 \text{ min}$ in the section $x/L = 1$, for example) owing to the balance between the heat addition by convection and the heat removal by the temperature induced desorption. Eventually, the heat loss due to desorption is outweighed by convective heat transfer from the hot ($T_{in} = 42.5 \text{ }^\circ\text{C}$) mixture to the initially cold ($T_0 = 22.5 \text{ }^\circ\text{C}$) column, and the temperature starts increasing gradually until it reaches the steady state value of $T_{ss} = T_{in} = 42.5 \text{ }^\circ\text{C}$ (at $t \approx 23 \text{ min}$ in the exit section $x/L = 1$, for example).

These interesting features of the temperature uptake dynamics can be explained only in conjunction with analysis of the so-called "breakthrough curve" (Figure 4), which depicts the changes in the adsorbate concentration as the time progresses. During first one or two minutes of the experiment (depending on the spatial location of the column cross section), the concentration of adsorbate begins to grow very rapidly due additive effects of convective mass transfer from the adsorbate-rich mixture ($C_{in} = 0.0184 \text{ kg/m}^3$) to the adsorbent and adsorption of water vapor by the initially adsorbate-lean

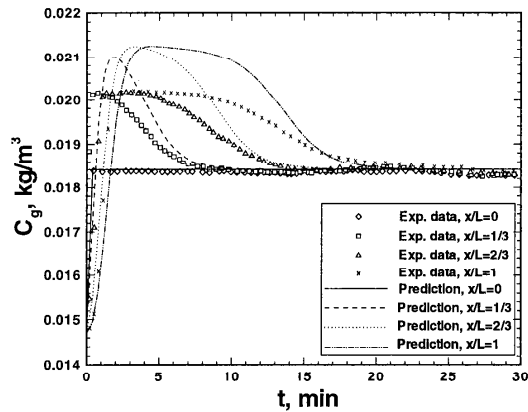


Figure 4: Comparison of theoretically predicted concentration uptake distributions of the adsorbate with experimental data.

adsorbent walls ($C_0 = 0.0147 \text{ kg/m}^3$). If the isothermal mass transfer and adsorption dynamics were considered ($k_0^* = \text{const}$), the adsorbate concentration would gradually reach its equilibrium value of 0.0184 kg/m^3 and from then on remain unchanged (Farooq and Ruthven, 1990a). However, in the case of non-isothermal adsorption, the process is accompanied by the significant heat release and, consequently, by a sharp rise in the temperature, so that the value of the equilibrium constant k_0^* decreases [see Equation (12)]. This means that for the new equilibrium conditions characterized by the higher temperature, the adsorbent cannot accommodate the amount of water vapor previously adsorbed and starts desorbing it back into the flowing adsorbate stream, which becomes even more adsorbate-rich as it flows downstream. This fact is reflected by the presence of the significant overshoot in the adsorbate concentration distributions ($C_{max} \approx 0.020 \text{ kg/m}^3$) shown in Figure 4 over its steady state value of 0.0184 kg/m^3 . The maximum value of the concentration overshoot is slightly overpredicted by the theoretical analysis owing to the limited range of applicability of the empirical Freundlich isotherm.

Note that the time intervals of concentration and temperature plateau directly correspond to each other and are approximately equal for the same cross section as it

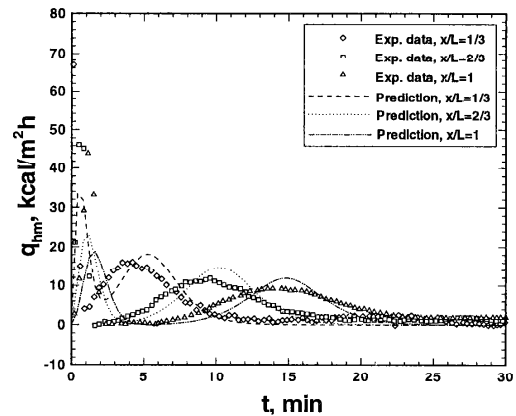


Figure 5: Comparison of theoretically predicted transient heat flux distributions with experimental data.

could be expected by considering an ultimate coupling of heat and mass transfer. Also, they become greater for the cross sections located further downstream of the inlet to the column due to an increase in the adsorbate concentration in the flowing mixture by addition of the water vapor due the temperature induced desorption in the upstream cross sections. Of course, the axial heat conduction and mass diffusion in both the flowing mixture and the adsorbent walls influence strongly the heat and mass transfer dynamics and make the process even more complex.

The transient heat flux distributions from the flowing adsorbate+air mixture to the honeycomb adsorbent walls at three different spatial locations along the adsorption column are depicted in Figure 5. In general, the agreement between the theoretical predictions and the experimental data is fairly good both qualitatively and quantitatively. However, the heat fluxes are underpredicted by about 50% at each cross section of the column during first two to three minutes owing to the relatively slow uptakes in the theoretical temperature (see Figure 3) and the adsorbate concentration (see Figure 4) distributions as compared to these uptakes measured experimentally. Due to the empirical nature of the Freundlich adsorption isotherm and absence of experimental information about the differential enthalpy

of adsorption, any further improvement in the theoretical prediction of combined heat and mass transfer and adsorption/desorption dynamics of the honeycomb column cannot be achieved. Thus, the development of the theoretically sound adsorption equilibrium model, which should account for the possible variation of heat of adsorption during adsorption and desorption as well as with adsorbent surface coverage by the adsorbed film, is extremely important.

CONCLUDING REMARKS

The brief review of the pertinent literature provided in the introduction has demonstrated that the combined heat and mass transfer processes associated with adsorption/desorption dynamics have been attracting increased attention in recent years from both industry and university research communities, but improved understanding of the phenomena and additional developments are needed. The theoretical modeling of the phenomena is necessary in order to provide a scientific basis for improved process design and operation of adsorption-based gas separation systems. The literature search has revealed that the majority of mathematical models of PSA and TSA simply ignore the nonisothermality associated with adsorption and focus solely on the mass transfer and adsorption/desorption dynamics. Furthermore, most of the process analyses have employed very simple analytical models for adsorption equilibrium (Henry, Langmuir or Freundlich isotherms), which are correctly applicable only at the low adsorbate concentration limit. However, the results of theoretical and experimental studies of honeycomb adsorbent under conditions similar to PSA and TSA operations have revealed that heat/mass transfer and adsorption/desorption processes are strongly coupled, and it is necessary to consider them simultaneously in order to obtain realistic predictions of system dynamics and overall performance.

As a summary, several major research directions can be identified where the current knowledge is limited and additional developments are needed. These areas are: (1) development and experimental validation of simplified ("engineering") but theoretically sound theoretical models capable of predicting adsorption equilibrium over large ranges of the adsorbate pressure and temper-

ature, (2) experimental measurement of the heat of adsorption for the various practical adsorbent-adsorbate pairs, (3) experimental measurement and theoretical modeling of transient temperature and adsorbate concentration distributions in the adsorption column during all stages of PSA and TSA cycles, (4) experimental measurement and theoretical prediction of effective thermophysical properties of various types of porous adsorbents and the local heat and mass transfer coefficients between gas and porous solid adsorbent, and (5) global parametric optimization of the adsorption/desorption cycle on the basis of comprehensive mathematical model.

ACKNOWLEDGMENTS

The authors wish to thank Dr. A. Yamada, Mitsubishi Heavy Industries, Ltd., Nagasaki Research and Development Center, for providing unpublished data on the dynamic behavior of the honeycomb adsorbent and for numerous technical discussions. Partial financial support for this work was provided by Mitsubishi Heavy Industries, Ltd. and is gratefully acknowledged.

REFERENCES

- Bart, H. and Germerdonk, R. and Ning, P., 1996, "Two-Dimensional Non-isothermal Model for Toluene Adsorption in a Fixed-Bed Adsorber", *Chem. Eng. and Proc.*, Vol. 35, pp. 57-64.
- Bourdin, V. and Grenier, P. and Mcunier, F. and Sun, L., 1996, "Thermal Frequency Response Method for Study of Mass Transfer Kinetics in Adsorbents", *AIChE Journal*, Vol. 42, pp. 700-712.
- Carter, J. and Barrett, D., 1973, "A Comparative Study for Fixed Bed Adsorption of Water Vapour by Activated Alumina, Silica Gel, and Molecular Sieve Adsorbent", *Trans. Inst. Chem. Eng.*, Vol. 51, pp. 75.
- Cen, P. and Yang, R., 1986, "Analytic Solution for Adsorber Breakthrough Curves with Bidisperse Sorbents Zeolites", *AIChE Journal*, Vol. 32, pp. 1635-1641.
- Cheng, S. and Vachon, R., 1969, "The Prediction of the Thermal Conductivity of Two and Three Phase Solid Heterogeneous Mixture", *Int. J. for Heat and Mass Transfer*, Vol. 12, pp. 249-264.
- Farooq, S. and Ruthven, D., 1990a, "Heat Effects in Adsorption Column Dynamics: 1. Comparison of One-

and Two-Dimensional Models”, *Ind. Eng. Chem. Res.*, Vol. 29, pp. 1076-1084.

Farooq, S. and Ruthven, D., 1990b, "Heat Effects in Adsorption Column Dynamics: 2. Experimental Validation of the One-Dimensional Model”, *Ind. Eng. Chem. Res.*, Vol. 29, pp. 1084-1090.

Gukov, K. and Ukina, E. and Mironov, V., 1994, "Numerical Analysis of the Multicomponent Adsorption in the Fixed Porous Bed” in: *Proceedings of the 1st Russian National Heat Transfer Conference*, Moscow, Russia, Vol. 7, pp. 77-82 (in Russian).

Ůlků, S., 1991, "Heat and Mass Transfer in Adsorbent Beds” in: *Convective Heat and Mass Transfer in Porous Media*, S. Kakas et al., eds., Kluwer Academic Publishers, Dordrecht and Boston, pp. 695-724.

Kakaç, S. and Shah, R. and Aung, W., 1987, *Handbook of Single-Phase Convective Heat Transfer*, John Wiley & Sons, New York.

Karger, J. and Ruthven, D., 1992, *Diffusion in Zeolites and Other Microporous Solids*, John Wiley & Sons, New York.

Leavitt, F., 1962, "Non-isothermal Adsorption in Large Fixed Beds”, *Chem. Eng. Prog.*, Vol. 58, pp. 54-64.

Mohamad, A. and Yamada, A. and Viskanta, R., 1995, "Mathematical Modeling of Adsorption and Desorption in a Fixed Bed” in: *Proceedings of ASME/JSME Thermal Engineering Joint Conference*, L. Fletcher and T. Aihara, eds., ASME, New York, Vol. 3, pp. 305-312.

Raghavan, N. and Ruthven, D., 1984, "Dynamic Behavior of an Adiabatic Adsorption Column - II”, *Chem. Eng. Sci.*, Vol. 39, pp. 1201-1208.

Ruthven, D., 1984, *Principles of Adsorption and Adsorption Processes*, John Wiley & Sons, New York.

Ruthven, D., 1994, *Pressure Swing Adsorption*, VCH Publisher, New York.

Scheele, C., 1780, *Chemical Observations on Air and Fire*.

Sun, L. and Meunier, F. and Grenier, P. and Ruthven, D., 1994, "Frequency Response for Nonisothermal Adsorption in Biporous Pellets”, *Chem. Eng. Sci.*, Vol. 49, pp. 373-381.

Suzuki, M., 1990, *Adsorption Engineering*, Elsevier, Amsterdam.

Viskanta, R., 1995, "Modeling of Transport Phenomena in Porous Media Using a Two-Energy Equation

Model” in: *Proceedings of ASME/JSME Thermal Engineering Joint Conference*, L. Fletcher and T. Aihara, eds., ASME, New York, Vol. 3, pp. 11-22.

Yamada, A., 1994, "Heat and Mass Transfer in the Honeycomb Adsorbent”, *Personal Communications*.

Yamada, A. and Viskanta, R., 1992, "Dynamic Behavior of Constant Wall Temperature Adsorption Column” in: *Fundamentals of Heat Transfer in Porous Media*, M. Kaviany, ed., ASME, New York, Vol. 177, pp. 1-12.

Yang, R., 1987, *Gas Separation by Absorption Processes*, Butterworths Publishers, Stoneham, MA.

Yasuda, Y. and Suzuki, Y. and Fukada, H., 1991, "Kinetic Details of a Gas/Porous Adsorbent System by the Frequency Response Method”, *J. Phys. Chem.*, Vol. 95, pp. 2486-2492.

Yoshida, H. and Ruthven, D., "Dynamic Behavior of an Adiabatic Adsorption Column - I”, *Chem. Eng. Sci.*, Vol. 38, pp. 877-885.

吸着ヒートポンプの吸着剤充填吸着器内熱・物質移動

Heat and Mass Transfer in Adsorber for Adsorption Heat Pump

渡辺 藤雄, 架谷 昌信

(名古屋大学大学院工学研究科エネルギー理工学専攻)

Fujio WATANABE and Masanobu HASATANI

(Dept. Energy Engineering and Science, Nagoya University)

1. 緒言

環境温度以上100℃程度以下の低質熱エネルギーが工場及び民生排熱として未利用のまま大量廃棄されている。その量は総排熱量の90%以上に達しており、このことがエネルギー総合利用効率の低下、ひいてはエネルギー資源の多消費に繋がっている。また、この未利用熱が都市のヒートアイランド化、地球温暖化に拍車を掛け、生活環境や生態系への悪影響が懸念されており、これら問題の同時解決を考慮に入れたいいわゆる環境共生型熱エネルギー利用システムの確立が強く求められている。

吸着ヒートポンプは補助動力を用いることなく、低質熱エネルギーを熱源として作動させる最も優れた排熱回収再生法のひとつであり、環境共生型熱エネルギー利用システムへの導入有力候補とされている。原理的には、Fig.1に示す一対の吸着器と蒸発器/凝縮器で構成される本ヒートポンプのFig.1の概念図を参照すると、高温熱源温度 T_{reg} （再生温度）および低温熱源温度 T_a （環境温度）の2熱源によって駆動し、吸着過程、脱着過程でそれぞれ温熱または冷熱の放熱及び蓄熱が行われる。具体的には、蒸発器において T_a （冷凍操作）、 T_{reg} （昇温操作）によって発生した吸着質蒸気がAds.ライン、吸着器、Des.ラインを経て凝縮器へ循環し、この間の吸着過程において、冷凍操作では蒸発器側で T_{cold} の冷熱が、昇温操作では吸着器側で T_{hot} の温熱がそれぞれ得られる。脱着過程（再生）を含む各器の $T_{out}(T_a < T_{out} < T_{reg})$ は排熱となる。なお、再生熱源には低質熱エネルギーを用いるため昇温操作で放出される T_{out} の熱エネルギーは温度レベルが比較的lowく、そのため通常冷凍操作を対象とする検討が中心になる。

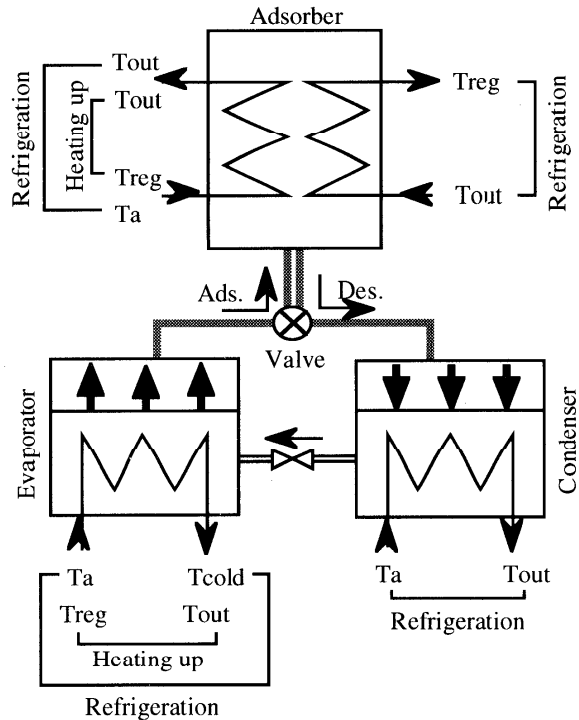


Fig.1 Conceptual drawing of adsorption heat pump

吸着ヒートポンプが実際に稼動するか否かを決定するためには以下の2つを指標とする検討が欠かせない。

- 1) 汲み上げ熱量、汲み上げ温度差、再生に必要な温度差など吸着系の平衡関係に基づく静的特性
- 2) 適用吸着系の吸・脱着速度ならびに吸・脱着に伴う発・吸熱速度などの動的特性

本稿では、とくに2)に関して吸着材充填吸着器側における動的特性を多孔質固体における熱・物質同時移動現象と関連付け、吸着材単一粒子ならびに吸着材を粒子充填及びモジュール化充填した粒子層のそれぞれについて検討を行った研究の成果を中心に概説する。

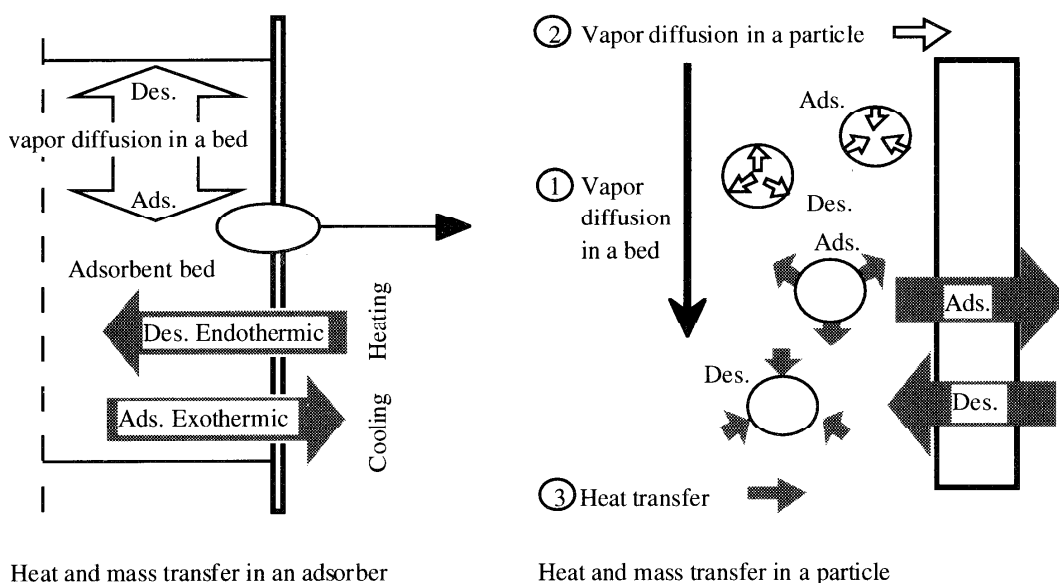


Fig.2 Schematic diagram of packed bed type of adsorption

2. 吸着器における熱・物質移動機構

吸着現象はこれまで主に物質の吸着分離・精製プロセスへ応用されてきた。このプロセスは一般に多成分系を対象としており、吸着質バルク濃度が低く、この系の現象を等温吸着の物質移動として差し支えない。これに対して、吸着ヒートポンプを対象とする密閉系・単一吸着質の吸・脱着操作では吸着熱の発生を考慮に入れた非等温吸着の取り扱いが余儀なくなる。

吸着材充填吸着器上部に吸着質蒸気出入口を有する吸着器内の熱・物質移動現象を模式的にFig.2に示す。ヒートポンプ操作において吸着器内は巨視的には熱・物質同時移動現象と見なされるが、微視的には吸着過程/脱着過程での蒸気圧差を推進力とする蒸気の①流入/流出の物質移動、②粒子内の吸着量差を推進力とする吸着/脱着の物質移動とこれに伴う③発熱/吸熱の熱移動の各現象として捉えられる。

実際のヒートポンプ操作における上記の各現象を詳細に見ると、②はいわゆる吸着材固体の細孔内物質

移動であり、①の吸着材粒状層空隙の物質移動に比べて極めて遅く、この速度が全体の物質移動速度を支配することが多い。すなわち、一般に使用される粒子径 $10\sim 500\mu\text{m}$ の吸着材粒子が構成する粒状層の空隙相当孔径($5\sim 100\mu\text{m}$)に比べて吸着材固体内細孔のそれは1万分の1程度と極めて小さいことによる。一方、③における吸着材粒子の発熱/吸熱は②に付随的に起こるが、通常②の速度向上のために小粒子径の吸着材を使用することが多く、粒子内温度の均一の仮定が成立する。しかし、吸着器充填層内の発熱の除熱/吸熱には固体充填層固有の熱移動抵抗が存在する。このことを踏まえ以下では、著者が吸着ヒートポンプの開発研究を通して検討を行ってきた単一吸着材粒子ならびに吸着材粒子充填層の熱・物質同時移動の取り扱いを中心に具体例を挙げて述べる。

3. 単一吸着材粒子

吸着器における熱・物質移動現象を把握するためには吸着器内吸着粒子における総括の吸・脱着速度

を知る必要がある。この速度は、一般に、吸着材/吸着質の組合せによる吸着平衡関係の相違ならびに与えられた物理的条件によって異なる。したがって、その各々について実測データに基づく評価が行われる。すなわち、この吸・脱着の物質移動に、単一粒子における粒子温度均一及び表面拡散支配の条件を考慮に入れた物質移動方程式の解と実測の吸・脱着速度結果の比較によって得られる拡散係数の値を指標とする速度評価がなされる。

単一粒子の吸着に伴う熱発生を考慮に入れた吸着速度式は、粒子半径 R_c の球形、粒子内物質移動の表面拡散律速及び表面拡散係数 D_c の一定、粒子温度一様、粒子表面での吸着平衡の成立の仮定の下で以下の物質収支式及び熱収支式で記述される。

物質収支式

$$\frac{\partial q}{\partial \theta} = D_c \left(\frac{\partial^2 q}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial q}{\partial r} \right) \quad (1)$$

$$\bar{q} = \frac{3}{R_c^3} \int_0^{R_c} r^2 q dr \quad (2)$$

熱収支式

$$\rho_A C_p V \frac{\partial T}{\partial q} = \rho_A \Delta H V \frac{\partial r}{\partial q} - h_i A (T - T_a) \quad (3)$$

$$C_p = C_{p,A} + q C_{p,H_2O} \quad (4)$$

ここで、 C_p , $C_{p,A}$, $C_{p,s}$, ΔH , h_i , r , T , T_a , V , θ , ρ_A はそれぞれ吸着材粒子、吸着材粒子構成物質及び吸着質の熱容量、吸着熱、熱伝達係数、粒子半径方向距離、吸着材粒子及び環境の温度、粒子体積、時間、粒子密度である。

Eq.(1)は物質移動が粒子内細孔表面の吸着量 q の勾配を推進力としており、吸着平衡関係が線形の場合には解析解が得られる¹⁾。しかし、吸着ヒートポンプ組込み吸着系の吸着等温線はFig.3²⁾ (ϕ は相対水蒸気圧)に例示するシリカゲル/水蒸気系のように非線形であるため数値解法によらねばならない。

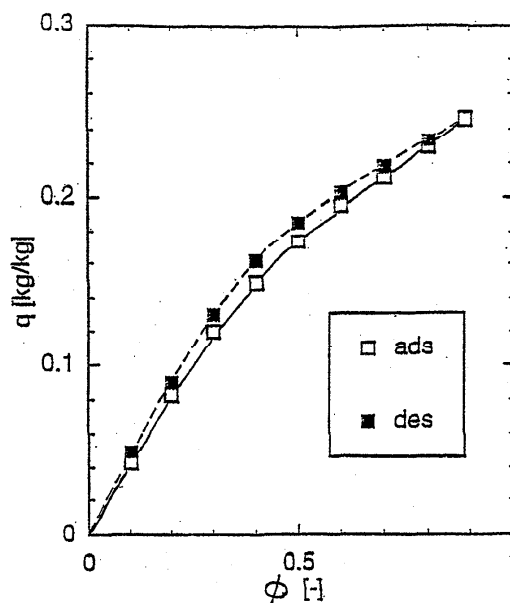


Fig.3 Adsorption isotherms of water vapour on silica gel

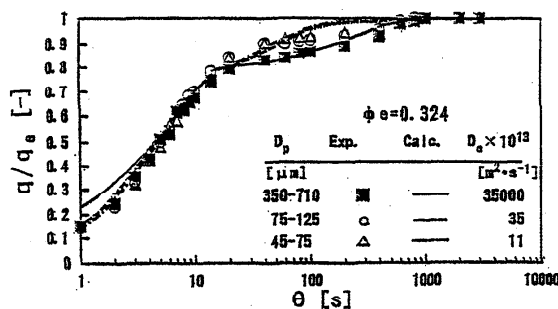


Fig.4 Adsorption rates of water vapour on silica gel

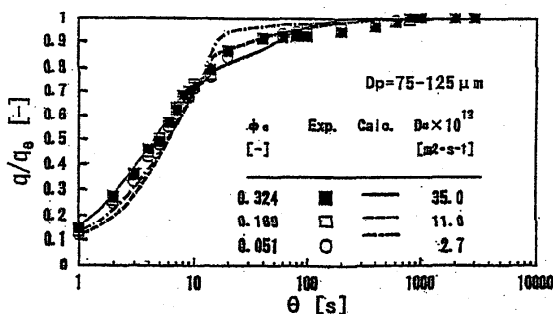


Fig.5 Adsorption rates of water vapour on active carbon

Figs.4, 5に容量法による吸着速度測定結果の実測値とEqs. (1)~(4)に D_c -値を代入して得られる実験結果と最適の数値計算結果の比較の一例を示す³⁾。吸着量の経時変化の実験結果と計算結果は比較的良好に一致しており、本吸着系では熱移動に関してLumpモデル⁴⁾の適用が可能であり、かつ吸着材粒子内物質移動に関して表面拡散支配として差し支えないことがわかる。また、 D_c -値は ϕ 及び粒子径の増大に伴って大きくなるという既往の見かけの傾向⁵⁾も観察される。後者の粒径の影響は表面拡散、粒子温度均一の仮定によると考えられ、精密には粒子内熱・物質移動機構の詳細な検討を必要とする。なお、本稿の主旨からやや逸脱するが吸着平衡論的に見て、低温熱源温度 T_a の条件下で操作される吸着ヒートポンプでは組み込み吸着系の、1) 吸着質の蒸発潜熱が大きいこと、2) 吸着等温線が低相対蒸気圧域 ($0.05 < \phi < 0.2$) で立ち上がること ($\phi=0$ での立ち上がりは、再生温度条件が厳しくなる)、3) 2) の圧力域で大容量の吸着を示すことが要求される。冷熱生成を目的とすれば、1) と3) は汲み上げ熱量、すなわち冷熱レベルおよび冷熱生成量、2) は吸・脱着操作の難易の指標となる。これらはいずれも吸着材/吸着質の組み合わせによって異なるため、あらかじめこの平衡特性を明らかにする必要がある、種々の系の実験的検討が行われている^{6,7)}。

4. 吸着材粒子充填層の熱・物質移動

吸着ヒートポンプの吸着器は基本的に吸着材固体充填型となる。上述したように、このような吸着器内では吸着質蒸気の器内移動と吸着及び脱着、ならびにこれに伴う熱発生、熱吸収が起こる。一般にこのような熱移動を伴う固・気系反応の反応速度は発生もしくは吸収する熱の除熱速度及び給熱速度が全体の速度を支配する。このことは吸着ヒートポンプの総括の吸着速度においても固体充填層に共通する熱移動問題として存在し、この解決のために、吸着材のモジュール化充填が最近検討されている^{8,9)}。その代表例に挙げられる伝熱管一体構造型熱交換吸

着材モジュールの熱・物質移動は以下のように取り扱われる。すなわち、Fig.6に模式図的に示すシリカゲルモジュール (STモジュール) においてはモジュール充填吸着器内均圧条件の下で、熱交換流体は非圧縮性で、流れは栓流、かつ温度上昇による膨張は無視できる、吸着材層は球状吸着材の集合体である、モジュール外表面からの熱損失は無視できる、熱物性値は一定である、などの仮定が成り立てば、吸着ヒートポンプ操作における熱・物質移動方程式は先述のEqs.(1), (2)に加えてつぎの式で記述される。

吸着材層の熱収支式

$$(1 - \epsilon_B)C_P\rho_P \frac{\partial T_P}{\partial \theta} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(\lambda_{Pr} \frac{\partial T_P}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_P \frac{\partial T_P}{\partial x} \right) + (1 - \epsilon_B)\rho_P \Delta H \frac{\partial \bar{q}}{\partial \theta} \quad (5)$$

$$C_P = C_{P,S} + C_{P,H_2O} \quad (6)$$

伝熱管の熱収支式

$$C_w\rho_w \frac{\partial T_w}{\partial \theta} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(\lambda_{wr} \frac{\partial T_w}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_w \frac{\partial T_w}{\partial x} \right) \quad (7)$$

熱交換流体の熱収支式

$$C_f\rho_f \frac{\partial T_f}{\partial \theta} + C_f\rho_f \mu \frac{\partial T_f}{\partial x} = \frac{4}{D} h [T_{w,r} - T_f] + \lambda_f \left(\frac{\partial^2 T_f}{\partial x^2} \right) \quad (8)$$

ここで、 $D, u, \epsilon, B, \lambda, \rho$ はそれぞれ伝熱管内直径、熱交換流体流速、粒子充填空隙率、熱伝導率及び密度であり、添字 f, p, w は熱交換流体、吸着材、熱交換パイプを表す。

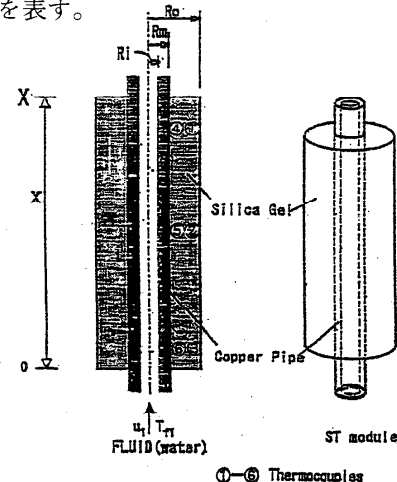


Fig.6 Schematic diagram of ST-module

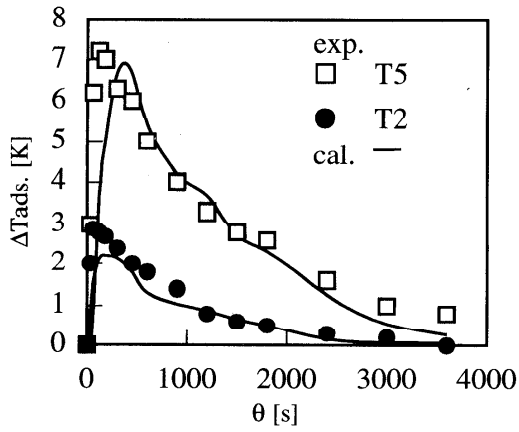


Fig.7 The time changes of temperature in the adsorption process (silica gel/water vapour)

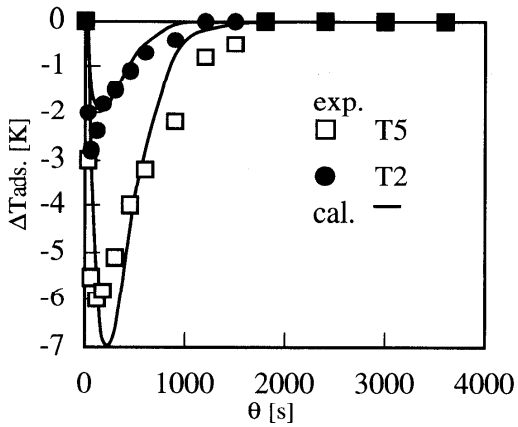


Fig.8 The time changes of temperature in the desorption process (silica gel/water vapour)

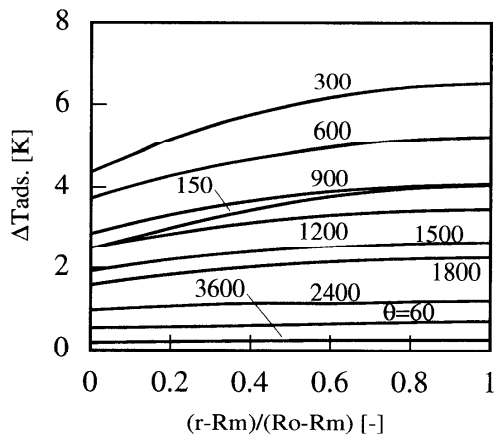


Fig.9 Temperature distributions of ST-module of adsorption process at $T_{ads.}=283K$ and $T_{eva.}=303K$

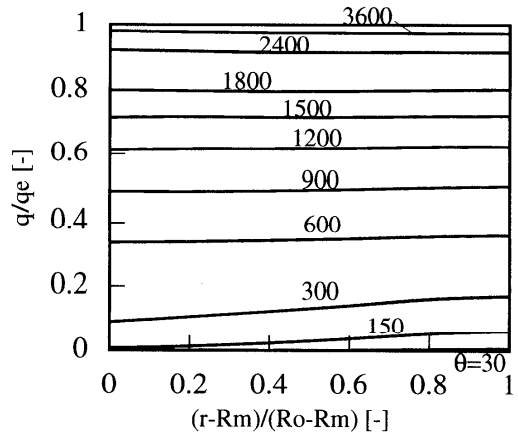


Fig.10 Adsorption amount distributions of adsorption process at $T_{ads.}=283K$
 $T_{eva.}=303K$

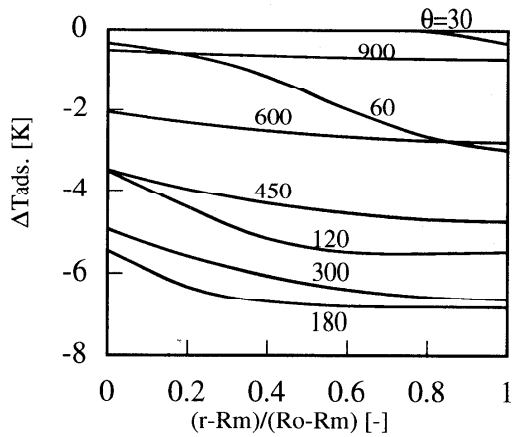


Fig.11 Temperature distributions of desorption process at $T_{ads.}=343K$ and $T_{con.}=303K$
 $q_{initial}=0.114kg \cdot kg^{-1}$

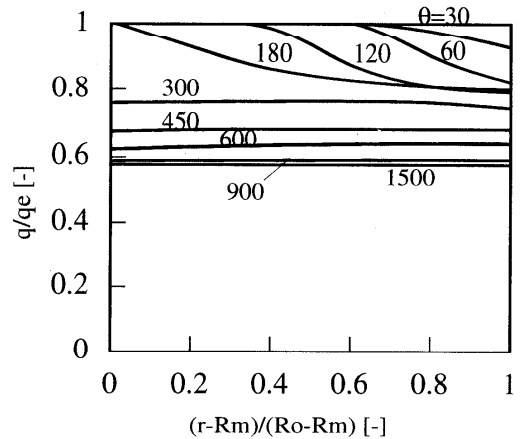


Fig.12 Adsorbed amount distributions of desorption process at $T_{ads.}=343K$ and $T_{con.}=303K$
 $q_{initial}=0.114kg \cdot kg^{-1}$

Figs. 7, 8 にはそれぞれ水蒸気吸着過程及び脱着過程のSTモジュール吸着材層中心部半径方向2点の温度の経時変化の実測値と上記のモデルの理論計算結果の比較を示した。両過程とも実測と計算の結果は良く一致しており、STモジュール充填吸着器内においても密閉系単一成分非等温吸着の概念が適用でき、その熱交換に関して二次元移動の取り扱いが可能であることが示される。なお、図中の ΔT_{ads} は吸着ヒートポンプ操作の吸着過程、脱着過程それぞれの開始吸着器温度 T_{ads} からの温度上昇及び温度降下、 T_{eva} 、 T_{con} は蒸発器及び凝縮器の温度である。またFigs.9～12のこの時の計算から求められるSTモジュール中心部半径方向の温度及び吸着量分布を見ると吸・脱着過程とも比較的速やかに温度、吸着量が平準化されることが分かり、この形式のモジュールが熱・物質移動促進に効果的であることが示される。

おわりに.

冒頭でも述べたように、吸着ヒートポンプはいわゆる環境共生型熱エネルギー利用システムの中核技術のひとつとなると考えられる。本稿はこの吸着ヒートポンプの熱出力の支配因子となる吸着材固体内及びその充填層のいわゆる多孔質固体からなる熱・物質移動について最近の研究結果に基づいて概説した。この熱出力の高効率化を達成するためには詳細には多孔質固体充填層内の蒸気の圧力流れを考慮に入れた取り扱いが必要となり、今後上記の研究の一層の進展が熱望される次第である。

参考文献

- 1) Crank, J.;" Mathematics of Diffusion" , Oxford at the Clarendon Press, (1967)
- 2) Ito, M., F. Watanabe, M. Hasatani; Kagaku Kogaku Ronbunshu, 22, pp.582-589(1996)
- 3) Item,; ibid., 22, pp.163-170(1996)
- 4) Holman, J. P., " Heat Transfer " 6th ed., pp.513-514 and pp.332-333, McGraw Hill International Editions, New York (1986)
- 5) F. Watanabe and M. Hasatani; Kagaku Kogaku Ronbunshu, 8, pp.685-692(1982)
- 6) Meunier, F.; Heat Recovery System, 6, p.491(1986)
- 7) Taoda, H. , M. KOsaka, T. Asahina and H. Noguchi; Taiyo Energy Eng., 180, p. 28(1982)
- 8) Pons, M. and J. J. Guilleminot; J. Solar Energy Eng., 108, pp.332-337(1986)
- 9) Pons, M. and Ph. Grenier; ibid., 109, pp.303-310(1987)

改質触媒層における熱・物質移動

特集

Heat and Mass Transfer Characteristics in a Reforming Catalyst Bed

福迫 尚一郎, 山田 雅彦 (北海道大学大学院)
 宇佐美 優 (東京電力(株)エネルギー・環境研究所)
 Shoichiro FUKUSAKO, Masahiko YAMADA
 (Graduate School of Engineering, Hokkaido University)
 and Yutaka USAMI (The Tokyo Electric Power Company, Inc.)

1. はじめに

燃料電池は、水素と酸素の電気化学反応により発電を行うものであり、図1に示すように燃料電池本体に供給される水素と酸素が電解質を介した各電極における触媒作用によりイオン化し、反応して水を生成する際に直流を発生するものである。

燃料電池発電システムは、普通の発電システムに比べ、発電量の変化による発電効率の変化が少ない、エネルギー効率が低い、機械的駆動部分が無いため発電時の騒音が無く、生成物が水なので環境汚染がほとんど見られない、などの利点を有する。

これまで、宇宙船など特殊な用途に用いられてきたが、最近では、発電時に発生する熱を利用するコジェネレーションシステムという形態で発電プラントが建築され実用化されている。

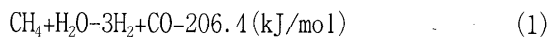
一方、水素は燃料電池の燃料ガスのみならず、工業的に非常に重要な元素であり、重油の精製、アンモニアやメタノールの合成などに用いられている。

また、水素の利点として、燃焼する際の生成物が水のみであるので、現在の環境問題の視点からも次世代のエネルギー源として重視されている。

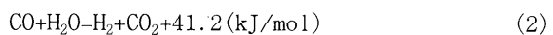
水素の生成には、工業的には、水の電気分解、石炭からの分離、炭化水素ガスの燃焼による部分酸化法などの方法もとられているが、多くの場合、水蒸気改質法が用いられている。これは、メタンなどの炭化水素ガスと水蒸気を触媒作用下で反応させるものである。

例えば、メタンガスの水蒸気改質においては、触媒の作用のもとで以下に示す改質反応(Reforming)と一酸化炭素変成反応(Shifting)の複合反応が生じて水素を生成している。

改質反応：



一酸化炭素変成反応：



このように、多孔質触媒層内において吸熱反応(改質)と発熱反応(変成)が同時に進行し、これにともなうガス組成の変化により物性値が変化するため伝熱挙動は複雑になり、その詳細に関しては明らかとなっていない部分が多い。

燃料電池発電プラントでは、燃料ガスとなる酸素は空気中より取り入れ、水素は天然ガスや都市ガスなどに含まれるメタンやプロパンなどの炭化水素ガスを、改質器において水蒸気改質することにより生成している。改質器は、燃料電池発電システムにおいては燃料処理システムの主反応器であり、電池本体の高寿命化およびコンパクト化の面からも、高性能化が求められている。

水蒸気改質器に関しては、越後ら¹⁾による多孔質輻射変換体を用いた反応器のコンパクト化に関する

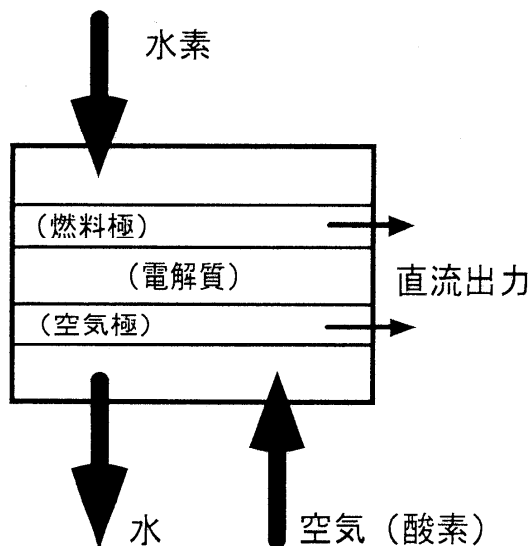


図1 燃料電池の原理

る実験的研究など、これまで多くの研究がなされている。また、新たな触媒の開発に関する研究²⁾も報告されている。一方、解析的研究に関しても、さらに多くの報告³⁻⁶⁾がなされている。

これまでの改質器に関する研究は、その構造特性に関するものが多く、改質器における伝熱および物質移動に関して扱ったものは少ない。また、数値解析においても多孔質層内の伝熱挙動を均一層として扱ったものが多く、改質管内の半径方向の温度、濃度分布を取り扱ったものは無く、その詳細はあまり解明されていないのが現状である。

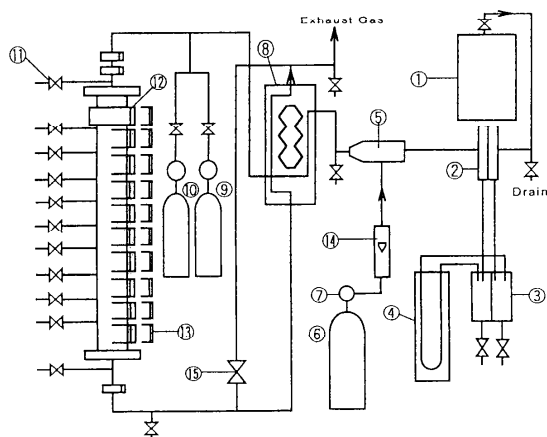
著者らは、これまで燃料電池の改質器の設計基礎資料を得ることを目的として、改質器内の伝熱挙動に関して実験による検討を行ってきた。

本稿では、多孔質層内における化学反応を伴う熱・物質移動現象として、触媒粒子を充填した実スケールの改質管内における伝熱挙動に及ぼす諸因子の影響について解説を行なうものである。

2. 実験装置および実験方法

2.1 実験装置

図2に、本研究で用いた実験装置の系統図を示す。本実験装置は、試験部（改質管）、蒸気供給系、ガ



- | | |
|--|----------------------------------|
| ① BOILER | ⑨ GAS CYLINDER (H ₂) |
| ② ORIFICE | ⑩ GAS CYLINDER (N ₂) |
| ③ DRAIN TRAP | ⑪ SAMPLING VALVE |
| ④ MANOMETER | ⑫ MAIN HEATER |
| ⑤ EJECTOR | ⑬ GUARD HEATER |
| ⑥ GAS CYLINDER (CH ₄ /C ₃ H ₈) | ⑭ GAS FLOW METER |
| ⑦ REGULATOR | ⑮ BYPASS VALVE |
| ⑧ HEAT EXCHANGER | |

図2 実験装置系統図

ス供給系、および測定・制御装置より構成されている。ボイラより供給された蒸気と燃料ガス（メタン）は、所定の割合で混合され、試験部前において所定の温度まで加熱され試験部へ導かれる。試験部では壁温一定の条件で反応後、熱交換器で冷却され、煙突より屋外へ排気される。

本研究で用いた試験部の構造を図3に、また、水平方向の断面を図4にそれぞれ示す。試験部には、外径60.5mm、肉厚2.8mm、全長1000mmのステンレス製(SUS304)の単管を用い、等温加熱条件を得るために図3に示すように長さ方向を10区間に均等分割し、各区間にシースヒータ(1kW)を主ヒータとして取り付けた。また、半径方向の熱損失補償用として主ヒータの上に約15mmの断熱層を設け、さらに、その上にシースマイクロヒータ(700W)を取り付けてある。また、試験部入口における混合ガスの温度調節を行うために、試験部上流にプレヒータとして、主ヒータと同仕様のシースヒータを2箇所に取り付けた。

試験部外壁温度測定のため、試験部各区間の中央位置にクロメル・アルメル熱電対(φ0.3mm)を取り付けた。ガードヒータへの入力制御のために、メインヒータとガードヒータ間の断熱層中に半径

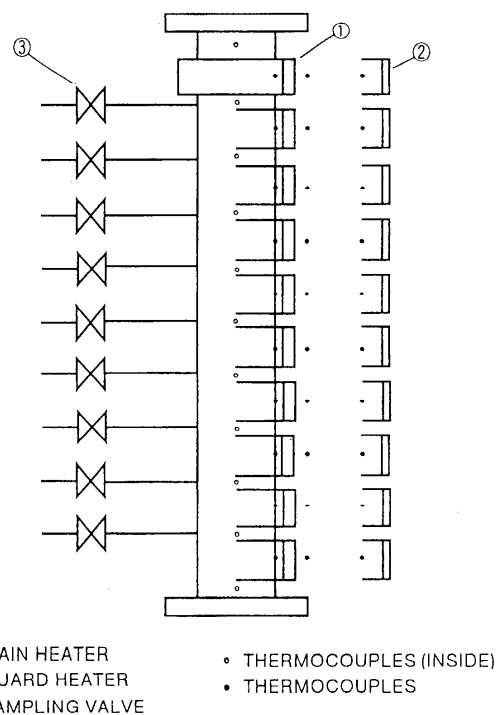


図3 試験部詳細図

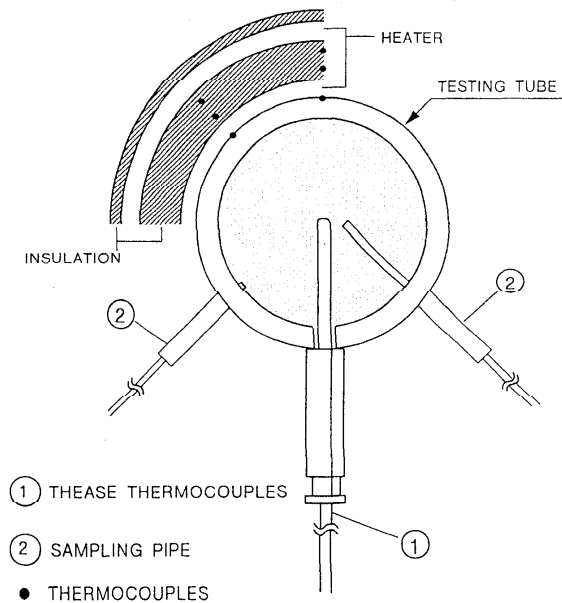


図4 試験部断面図

方向に 10mm の間隔において、クロメルアルメル熱電対 (ϕ 0.3mm) を 2 箇所取り付けてある。

また、各区間 (ヒーター) の境に、層内温度測定用クロメル-アルメルシース熱電対 (ϕ 3.2mm) を、図 4 に示すように、先端が試験部中央部に位置するように取り付けてある。また、層内のガス組成分析のため抽出管としてステンレス管 (SUS306, ϕ 4mm) を、同様に先端が試験部中央部ならびに壁近傍に位置するように取り付けた。

本研究では、被改質ガスとして、メタン (純度 99.99%, 硫黄分 0.01ppm 以下) を使用した。また、反応触媒としてニッケル系アルミナ (Al_2O_3) 球状触媒 (東洋シーシーアイ製 FCR-4-02, ニッケル含有量 $12 \pm 2\%$ (質量分率), 平均粒径 5.26mm, 密度 1994.8 kg/m^3) を使用した。

2・2 実験方法

実験では、始めに一定流量の水蒸気をボイラより試験部に流入させ、ヒーターに通電を行い、触媒層および配管の予熱を行う。

試験部入口温度を所定の温度まで上昇させた後メタンを供給して所定の混合比の混合ガスを供給し、改質実験を開始する。改質管外壁温度およびガードヒーターの入力の制御は、温度調節装置およびコ

ンピュータを用いて自動的に設定した。

試験部内の各部温度が定常状態となった後、メインヒーターの熱供給量および各部温度を計測すると共に、試験部各断面位置より生成ガスを抽出する。各測定終了後、ガスクロマトグラフにより抽出したガスの組成分析を行なった。

本研究では、実験条件としてプロセスガスの流量を示す SV 値 (単位時間当たりの混合ガスの体積流量が、標準状態に換算して粒子層の体積の何倍に相当するかという値)、水蒸気と被改質ガス中の炭素のモル比を表す S/C 値、試験部管壁温度、ならびに試験部入口におけるガス温度を設定した。

改質器の性能を評価する指標の一つとして用いられるメタン転換率を、次式のように定義する。

$$R_M = (M[\text{CO}] + M[\text{CO}_2]) / (M[\text{CH}_4] + M[\text{CO}] + M[\text{CO}_2]) \quad (3)$$

ここで、 $M[n]$ は成分 n のモル数を示す。

また、熱伝達率 h は次式より求められる。

$$h = [(T_w - T) / q \quad d_i / (2\lambda_w \ln(d_o / d_i))]^{-1} \quad (4)$$

レイノルズ数 Re_p およびヌセルト数 Nu_p は、以下のように定義される。

$$Re_p = (U \cdot D_p) / \nu, \quad Nu_p = h \cdot D_p / \lambda \quad (5)$$

3. 実験結果および考察

3・1 SV 値の効果

図 5 に、スチームカーボンモル比 3.0, 改質管外壁温度 600°C , 改質管入口ガス温度 400°C において、SV 値を 1000 から 3000 まで変化させた場合の層内温度分布を示す。

図より、SV=1000 の場合、他の条件の場合に比べ、層内温度が急激に上昇しているのが認められる。これは、SV 値が 1000 のように流量の少ない条件では、流量の大きい条件にくらべて、流体の顕熱上昇が著しいためと思われる。また、改質管下流部で、SV 値が 1000 の条件下において、層内温度がほぼ壁面温度に等しくなっているが、これは、温度が上昇することにより吸熱反応である改質反応の進行が早まり、改質管中流部でほぼ終了しているためと思われる。また、SV 値が 2000 と 3000 の場合、ほとんどその差異が認められないが、これは、流量の増加に

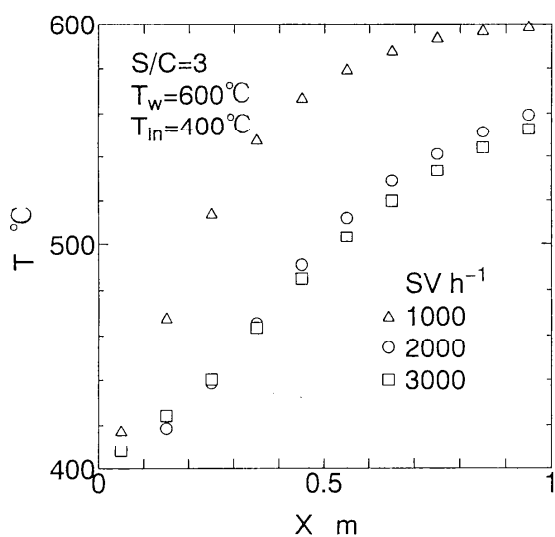


図5 試験部内温度分布

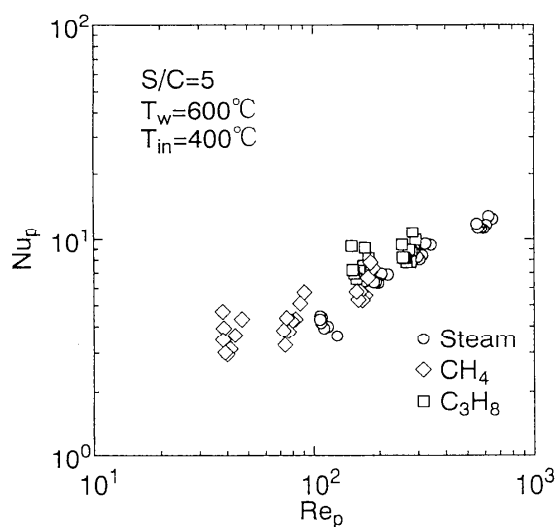


図7 局所ヌセルト数

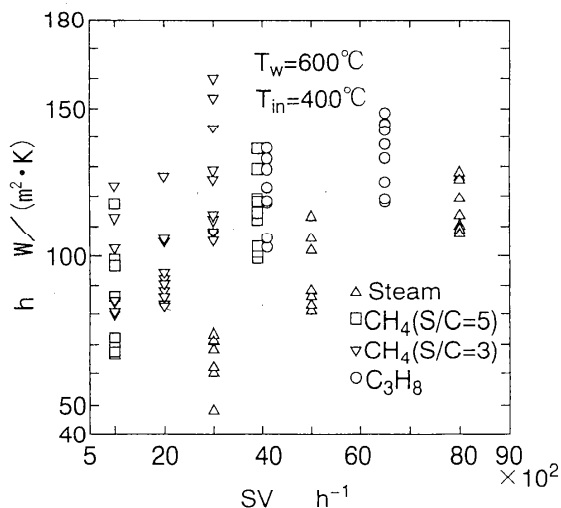


図6 熱伝達挙動

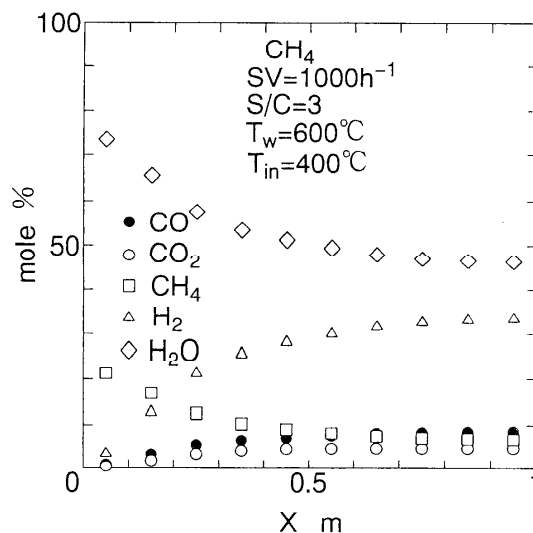


図8 改質反応挙動

よる反応の進行度がほぼ同程度になるためと考えられる。

図6にSV値に対する熱伝達率の変化を示す。図には、反応を伴わない、水蒸気の場合ならびにプロパンガスを用いた実験結果も併記してある。図より、改質反応を伴う場合の熱伝達率は、水蒸気の場合のその数倍高い値を示していることがわかる。図に見られる熱伝達率の値のばらつきは、管の流れ方向に対して改質反応の進行に伴いガスの組成が変化し熱物性値が変わることによるものと考えられる。反応の有無に関わらず、熱伝達率はSV値の増加に伴いほぼ比例して増加していること

がわかる。

図7は、 Nu_p と Re_p の関係を示している。図より、 Nu_p はほぼ Re_p の0.6乗に比例していることがわかる。レイノルズ数が大きな領域では、メタン、プロパン、および水蒸気のみ（反応を伴わない）におけるヌセルト数にあまり差が認められなくなっている。一方、低レイノルズ数の場合には改質反応（吸熱反応）の影響が顕著に現れ、ヌセルト数の低卜率が小さく（値が大き）くなっている。

図8および図9に、 $S/C=3$ 、改質管外壁温度 600°C 、改質管入口ガス温度 400°C の条件下において、SV値が1000および3000の場合の各成分の層内モル分率

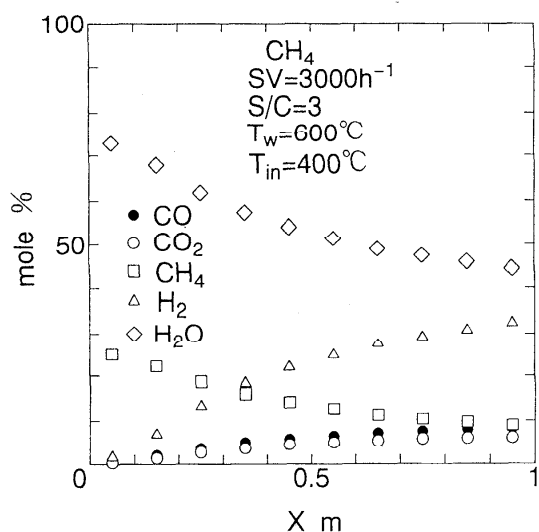


図9 改質反応挙動

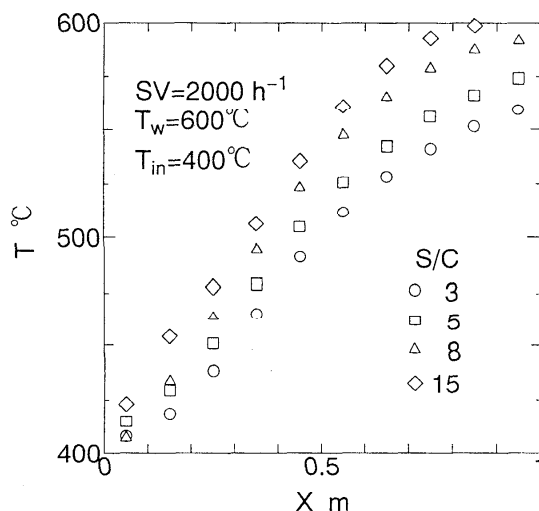


図11 試験部内温度分布

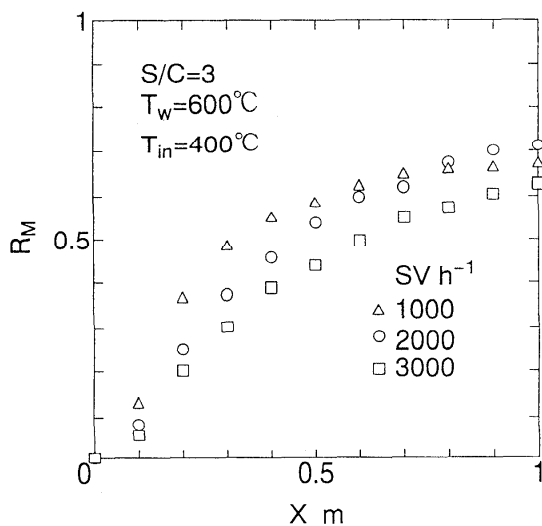


図10 メタン転換率

分布を示す。また、図10には同一条件下におけるメタン転換率分布を示してある。

図8および図9を比較すると、 $SV=1000$ の条件では、改質管上流部で反応がほぼ終了しているのが認められる。これは、プロセスガス流量が少ない条件では、改質管入口付近でガスの温度上昇に伴い改質反応が急激に進行するためと考えられる。また、図9に示す $SV=3000$ の場合には、改質管上流部では反応の進行が比較的ゆるやかであり、改質管下流部においても反応が進行している。これは、流量の増加に伴い、流体の温度上昇がゆるやかになるためと

考えられる。

図10に示すメタン転換率からも、 SV 値が増加するに従い、メタン転換率が減少しているのがわかる。これは、流量が増加することにより層内温度が低下し、シフト反応が進行するためと考えられる。

3・2 S/C値の効果

図11に、 SV 値2000、改質管外壁温度600°C、改質管入口ガス温度400°Cの条件下において、 S/C 値を3から15まで変化させた場合の層内温度分布を示す。図より、 S/C 値が低いほど、層内温度が低くなるのが分かる。これは、 S/C 値が低いほど、混合ガス内のメタンのモル数が大きくなるため吸熱反応である改質反応量が増加し、それにより、層内温度が低下するためと考えられる。また、 S/C 値が大きな場合には、改質管下流部で層内温度が壁温にほぼ等しくなっているが、これは、 S/C 値が高い条件下では、改質管中流部で反応が終了しているためと考えられる。

図12には、 S/C 値の変化に対する熱伝達率を示してある。 SV 値が一定の場合、 S/C 値が増加するとプロセスガス中におけるメタンの含有量が低下することから熱伝達率のうち反応熱による分が低下するため、図に示すような傾向になるものと考えられる。

図13に、 S/C 値を変化させた場合のメタン転換率分布を示す。図より、 S/C 値が8または15などの大きい条件では、改質管上流部での増加率が大きくな

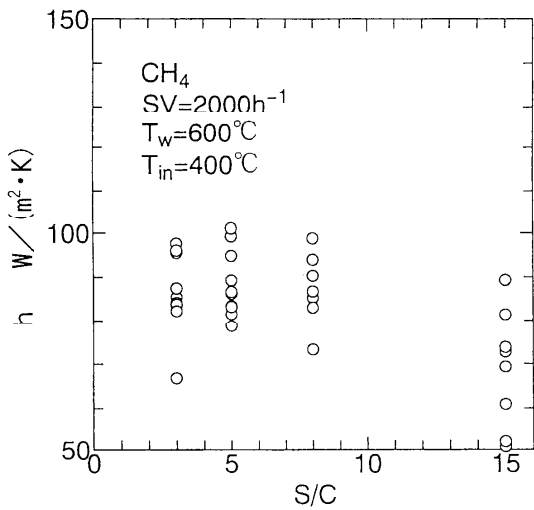


図12 熱伝達挙動

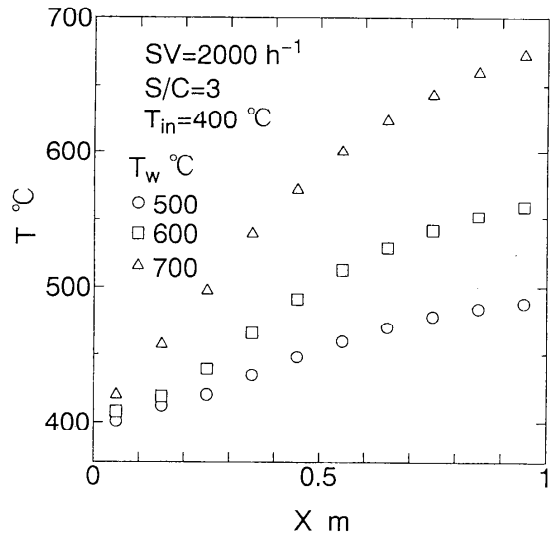


図14 試験部内温度分布

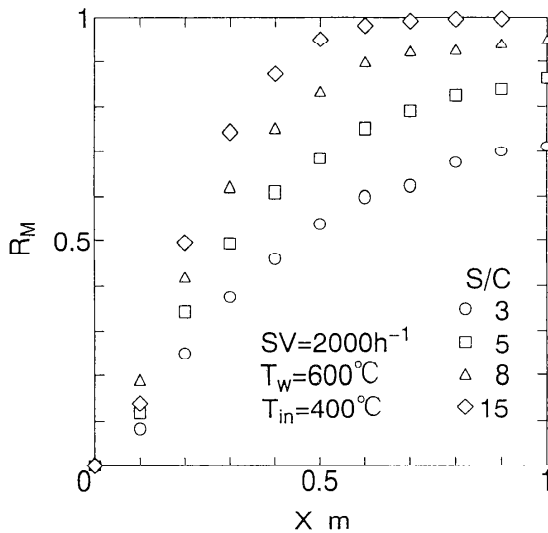


図13 メタン転換率

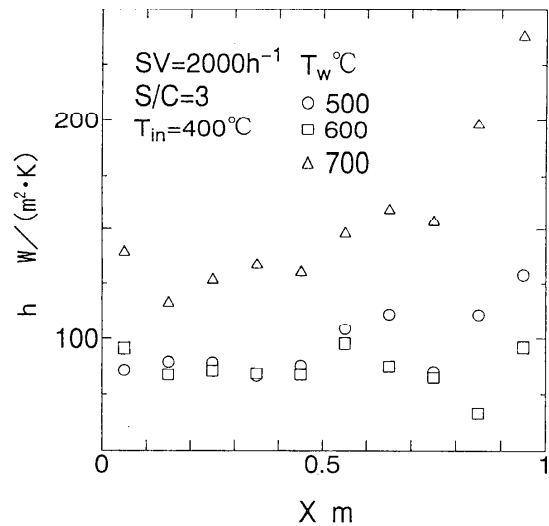


図15 熱伝達挙動

っている。これは、混合ガス内のメタンのモル数が小さくなり、それにより改質管上流部で反応が進行するためと考えられる。

3・3 壁面温度の効果

図14に、 $SV=2000$ 、 $S/C=3$ 、改質管入口ガス温度 400°C の条件下で、改質管外壁温度を $T_w=500^\circ\text{C}$ 、 600°C 、および 700°C に変化させた場合の層内温度分布を示す。図より、改質管外壁温度は層内温度に大きな影響を及ぼすことが分かる。また、外壁温度 500°C の条件下では、改質管出口でのガス温度が壁面温度にほぼ等しくなっているのが分か

る。

図15には、図14と同一条件における局所熱伝達率分布を示す。図において、外壁温度 700°C の条件下での熱伝達率が最も大きくなっているが、これは他の場合にくらべて層内温度が高いため反応量が大きくなることによるものと考えられる。また、外壁温度 500°C および 600°C の場合、両者の値はほぼ等しくなっているが、これは、反応による消費熱量は外壁温度 600°C の条件下の方が大きくなるものの、外壁温度 500°C の条件下においては層内温度と壁温の差が小さくなるためと思われる。

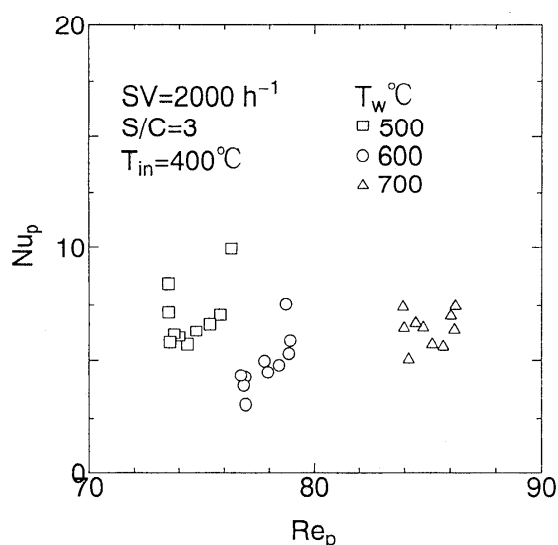


図 16 局所ヌセルト数

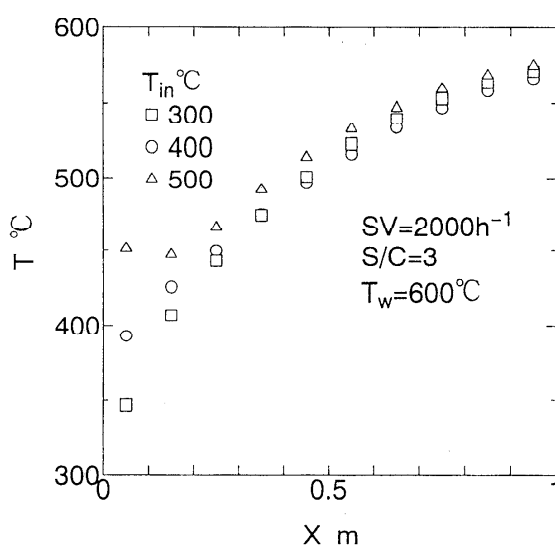


図 18 試験部内温度分布

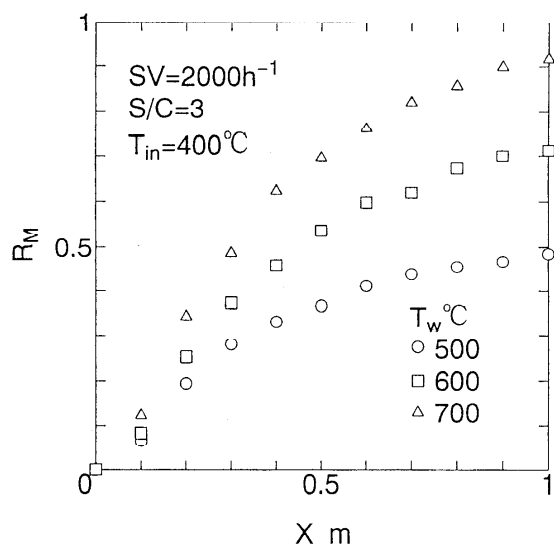


図 17 メタン転換率

図 16 に、局所ヌセルト数分布を示す。図より、外壁温度 500°C の条件下においてヌセルト数が高い値を示しているのが分かる。外壁温度 700°C の場合には、局所熱伝達率は最も高い値を示すが、これは、反応により生成される水素の影響によりガスの熱伝導率が高くなるためと考えられる。

図 17 に、同一条件下でのメタン転換率分布を示す。図より、メタン転換率は、改質管外壁温度の変化により大きく変化することが分かる。外壁温度 700°C の条件下においては、改質管下流部ではほぼ 1 に等しくなっている。外壁温度 500°C の条件下にお

いては、改質管出口においても 0.5 程度にしか上昇していない。これは、先に述べたように、改質管外壁温度の変化により層内温度に大きな差異が生ずるためと考えられる。

3・4 入口温度の効果

図 18 に、改質管入口温度を 300°C、400°C、および 500°C に変化させた場合の層内温度分布を示す。改質管上流部において、入口温度が 500°C の場合に層内温度の低下が見られる。これは、入口温度を上昇させることにより、改質管入口近傍で吸熱反応である改質反応が急激に進行するためと思われる。また、改質管中流部から出口にかけては、層内温度に条件による差異は認められない。

入口温度の変化に対する熱伝達率の変化を図 19 に示す。図より、入口温度 500°C の場合、熱伝達率が最も大きな値をとるのがわかる。これは、先にのべた反応量の増加によるものと考えられる。また、入口温度 300°C および 400°C の条件下では、大きな差異が認められないが、これは反応量がほぼ等しいためと考えられる。

図 20 にメタン転換率分布を示す。図より、入口温度の違いにより改質管出口でのメタン転換率に差異はほとんどないのがわかる。

3・5 熱伝達率における反応熱の影響

これまでの検討において、改質反応は熱伝達率を増加させるばかりでなく、その挙動に対しても影響

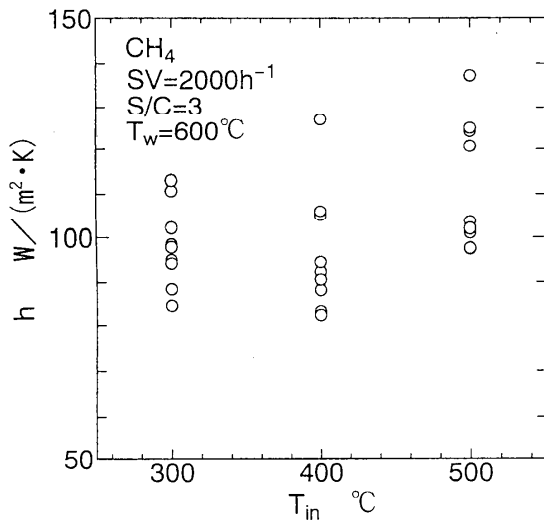


図 19 熱伝達挙動

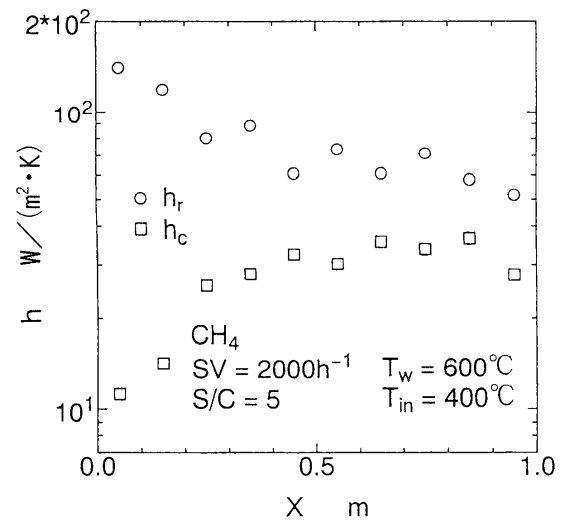


図 21 熱伝達挙動

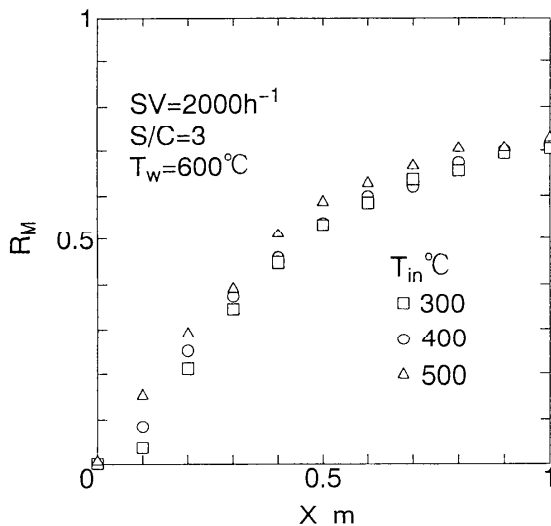


図 20 メタン転換率

を及ぼすことが明かとなった。ここで、熱伝達率のうち、反応熱に関する部分と対流熱伝達に関する部分を次式のように分割して定義して検討を行ってみる。

$$h_c = G \cdot C_p \Delta T / [A \cdot (T_w - T)] \quad (6)$$

$$h_r = H_r \cdot V / [A \cdot (T_w - T)] \quad (7)$$

図 21 に示すように、試験部入り口においては h_r は h_c の 10 倍以上の値を示す。 h_r は次第に減少し、

その分 h_r の割合が大きくなっている。この様に、熱伝達を反応熱に関わる部分と顕熱に関する部分に分解して考慮することは、かかる反応を伴う熱伝達挙動を把握する上で非常に有効な手段となり得る。しかし、ガスの熱物性値がその組成に大きく影響を受けるという密接な関連があるため、その妥当性に関してはさらに検討を要すると思われる。

4. おわりに

本稿では、多孔質層内における化学反応を伴う熱・物質移動現象として、触媒粒子を充填した実スケールの改質管内における伝熱挙動に及ぼす諸因子の影響について、これまでの著者らの研究成果に基づき解説を行なった。

以上述べたことから明かなように、改質触媒層内では、改質反応と熱・物質伝達がガス組成の変化に伴う物性値の変化を介して相互に密接に関連しており非常に複雑な熱・物質移動現象を形成している。

かかる複雑な熱伝達挙動に関して、実験的には非定常挙動の把握や触媒層内断面の温度・濃度分布と反応挙動に関する検討、また解析的検討など、今後の検討課題が多く残されている。

記号

A : 伝熱面積 m^2

		参考文献
C_p : 混合ガスの定圧比熱	J/(kg·K)	
D_p : 触媒粒子径	m	
d_0 : 試験部外径	m	1)越後亮三, 吉澤善男, 花村克悟, 小澤亘, "多孔質輻射変換体を用いたメタン-水蒸気改質器に関する研究", 日本機械学会論文集, 第 57 巻, 第 533 号, (1991-1), pp. 309-314.
d_i : 試験部内径	m	
G : 混合ガス流量	m ³ /h	
H_r : 反応熱	J/m ³	
h : 局所熱伝達率	W/(m ² ·K)	2)二見英雄, 橋本涼一, 内田洋, "スチームリフォーミングにおける触媒開発と改質炉伝熱設計(I)", 燃料協会誌, 第 68 巻, 第 3 号, (1989), pp. 236-243.
h_r : 反応熱に関する熱伝達率	W/(m ² ·K)	3)宇佐美優, 萩原明房, 福迫尚一郎, 田子真, "燃料電池改質器における板型改質管の伝熱挙動", 日本機械学会論文集, 第 58 巻, 第 549 号, (B 編) (1992-5), pp. 1630-1635.
h_c : 対流熱伝達に関する熱伝達率	W/(m ² ·K)	
M : 成分気体のモル数	mol	
Nu_p : 局所ヌセルト数		
q : 熱流束	W/m ²	
Re_p : 局所レイノルズ数		
R_M : メタン転換率		4)越後亮三, 花村克悟, 高橋義憲, 奥山正明, Sumrerng JUGJAI, 萩原明房, 宇佐美優, 船橋信之, "輻射変換体を装備した管式メタン-水蒸気改質器の伝熱解析", 日本機械学会論文集, 第 57 巻, 第 539 号, (B 編) (1991-7), pp. 2329-2335.
T : 層内温度	℃	
T_{in} : 試験部入口温度	℃	
T_{out} : 試験部出口温度	℃	
T_w : 試験部外壁温度	℃	
ΔT : 試験部区間出入口温度差	℃	
U : 層内流速	m/s	5)藤塚正央, 都留潔, 藤本路奥, "燃料電池用改質器の性能評価モデル", 第 29 回日本伝熱シンポジウム講演論文集, (1992), pp. 245-247.
x : 試験部入口からの距離	m	
λ : 混合ガスの熱伝導率	W/(m·K)	6)小山由夫, 大津清一, 吉森正嗣, "触媒充填層におけるメタンの水蒸気改質反応", 第 29 回日本伝熱シンポジウム講演論文集, (1992), pp. 248-249.
λ_w : 外壁の熱伝導率	W/(m·K)	
ν : 混合ガスの動粘性係数	m ² /s	

多孔質体内燃焼研究の最近の発展

Recent Development of Research on the Combustion in Porous Media

上宇都 幸一 (大分大学工学部生産システム工学科)
 Kouich KAMIUTO (Department of Production, Systems
 Engineering, Oita University)

1.はじめに

近年、多孔体内での燃焼現象に関する研究が、国内のみならず、国際的にも幅広い関心を集めており、その様子は、例えば、第25回国際燃焼シンポジウムの後、San Diegoで開かれたS.S.Penner主宰のワークショップの総合報告⁽¹⁾などからも伺い知ることができる。このような動きは、希薄燃焼可能で、NO_x生成の少ない燃焼機器の開発においては、通気性多孔体の効果的利用が、極めて有効であるとの認識が、定着しつつあることを示すものであり、この研究分野の豊かな可能性を暗示している。

本稿では、多孔体内予混合燃焼および拡散燃焼に関する基礎研究と応用技術開発の現状について展望するとともに、今後の課題についても、2,3の私見を述べる。

なお、この研究領域の形成に基本的な貢献をされた越後およびその協力者の手になる明解で示唆に富む解説⁽²⁾が、すでに公表されているので、参照されることを希望する。

2.多孔体内燃焼の基本特性

2-1. 予混合燃焼 通気性多孔体に予混合気を流入させ、適切な方法で点火させると、多孔体内に火炎を安定化できることが実際に確認されている。花村⁽³⁾等は、46mm厚さのコージライト・アルミナ質セル状多孔体内にメタン-空気予混合火炎を形成させたときの多孔体内での定常的な温度分布の測定を行っており、結果の一例を図1に示す。本図では、混合気流速の影響を示しているが、温度分布および反応帯の位置は、その他、当量比、セルサイズ、多孔体の厚さ、固相熱伝導率などの影響も受ける。しかし、多孔体内で火炎が安定化された場合、反応帯をはさみ下流側から上流側へ、土として、ふく射により、熱輸送が行われ、上流側未燃混合気の予熱が行われるので、気相中の火炎に比較して、大きな燃焼速度を得ることができる(気相中の希薄可燃限界付近で約3倍程度まで)と

ともに、固相-気相間の大きな熱伝達係数のため、火炎最高温度も抑制される。図2に、この装置の保炎範囲を示す。一方、竹野等⁽⁴⁾は、熱伝導による熱再循環に着目し、約9000本のアルミナ質セラミック管(30mm長)を主体とし、対流熱交換器で外部

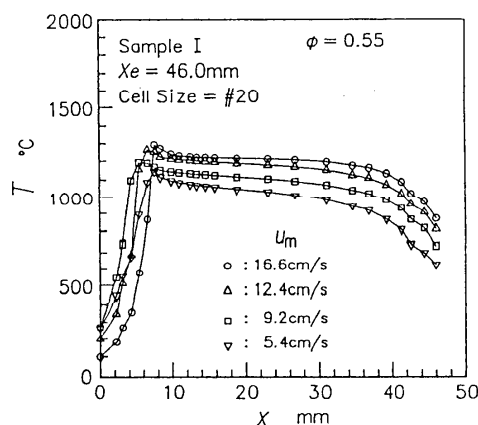


図1 セル状多孔体を用いた燃焼器内温度分布 (花村等)

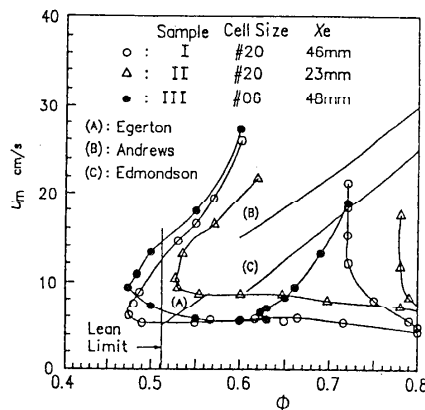


図2 セル状多孔体を用いた燃焼器の保炎範囲 (花村等)

熱再循環も行った燃焼器を試作し、都市ガス-空気予混合の場合について、当量比0.1程度まで希薄燃焼が可能であることを示すとともに、 NO_x 、 CO 生成が極めて少ないことを、報告している。図3,4に、竹野等の燃焼器における流れ方向温度分布と火炎安定図を示す。

以上の実験的研究に加え、これまで多孔体内予混合火炎の火炎構造について、多くの理論的研究が行われている。セル状多孔体内の定常的予混合火炎を対象として、吉澤等^{(5),(6)}は、燃焼反応として一段総括反応を仮定するとともに、定物性を仮定して、広範なシステムパラメータについて解析を行い、実験では得ることのできない、多孔体内でのふく射熱流速分布、エネルギーバランスなどをはじめ明らかにした。また、Sathe et al.^{(7),(8)}は、同じく、一段総括反応を仮定した上で、散乱効果を考慮して、変物性の解析を行った。さらに、Chen et al.⁽⁹⁾は、燃焼反応に、多段反応を導入した解析を行い、火炎最高温度および燃焼速度が、一段総括反応を仮定した場合より小さくなることを示した。以上の定常火炎の解析に対し、花村等⁽¹⁰⁾は、セル状多孔体内を非定常的に伝播する火炎を対象に、火炎が、多孔体内で安定化される領域および、その条件を明らかにした。一方、竹野等⁽¹¹⁾⁽¹²⁾は、セラミック管よりなる一次元ハニカム多孔体内での予混合火炎について、漸近解析を、駆使して、火炎構造を明らかにした。

2-2. 拡散燃焼 多孔体内での拡散燃焼に関する研究は、ほとんど行われておらず、現時点では、円筒状球状粒子充てん層内でのメタン-酸素拡散

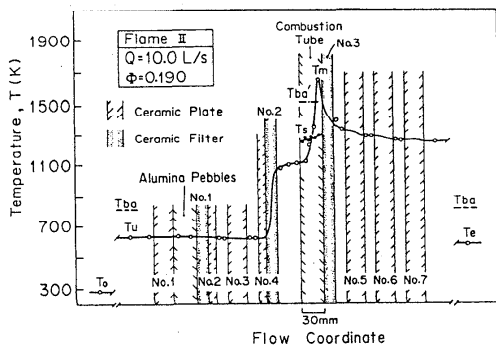


図3 セラミック管を用いた燃焼器内温度分布 (Kotani et al.)

火炎について、火炎面形状、火炎高さに及ぼす燃焼器半径と粒子径の比 Γ 、平均流速（入口レイノルズ数 Re ）の影響が、明らかにされている程度である⁽¹³⁾。図5は、酸素過剰炎の場合に、 Re 数が火炎面形状に及ぼす効果を示している。図で、実線は、質量分散効果まで考慮したBurke-Schumannモデルによる解析結果である。 Re 数とともに、

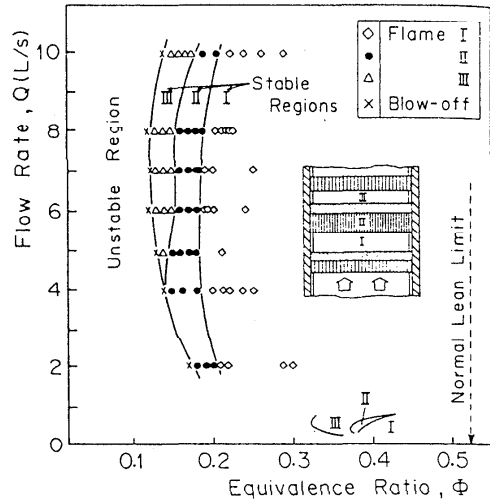


図4 セラミック管を用いた燃焼器の保炎範囲 (Kotani et al.)

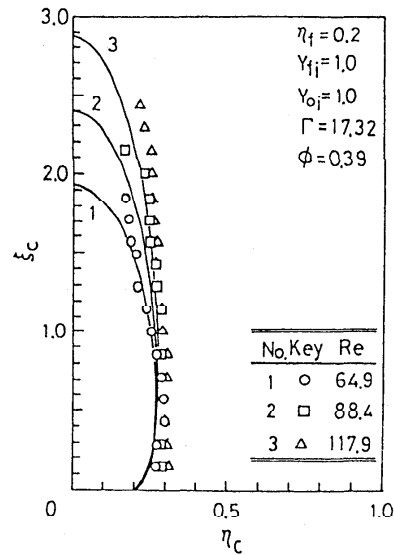


図5 円筒状粒子充てん層内メタン-酸素拡散火炎の形状 (上宇都等)

化学種の特異拡散時間あたりの流れ方向移動距離が増加するので、火炎面形状は、伸張している。図6は、無次元火炎高さ ξ_c^* ($=x_c^*/l_0$) に及ぼす $ReSc$ の効果を示したものである。 $ReSc$ の小さい分子拡散支配領域では、空隙率 ϕ が大きい程、火炎面への化学種の拡散フラックスが大きいので、 ξ_c^* は小さくなる。一方、 $ReSc$ の大きな物質分散支配領域では、 ϕ が小さい程、物質分散効果が大きくなるので、 ξ_c^* は小さくなる。また、この図の $ReSc$ の範囲は、層流拡散火炎の領域であり、 $\phi=1$ の場合、 $\xi_c^* \propto ReSc$ となるが、 $\phi \neq 1$ の場合には、 $ReSc$ が大きくなると、 ξ_c^* は、一定値に、漸近するようになる。以上、多孔体内拡散燃焼においては、流れと直角方向の物質分散効果が、大きな役割を果たすことを示したが、火炎構造については、十分、検討されていない。なお、多孔体内拡散燃焼現象と高温固体電解質燃料電池内での電気化学的反応を伴う物質移動現象との間には、密接な対応関係があることが指摘されている⁽¹⁴⁾。

3. 応用機器

すでに、多孔体内燃焼に内在している、たとえばふく射熱再循環などの原理を、効果的に利用した応用機器が、多数開発されている。ここでは、

代表的なものについて、簡単に言及するに留める。

3-1. 超低発熱量ガス燃焼器 高温流路内に、高空隙率多孔体を、流れに垂直に設置すれば、多孔体一ガス間の高い対流熱伝達係数および、多孔体のふく射遮蔽効果のために、多孔体中でのガスエンタルピーの降下分にはほぼ相当するふく射エネルギーが、上流側に戻り、未燃混合気の予熱に利用することができる。また多孔体の上流側と下流側が、熱的に隔離されるので、多孔体下流側の排ガスから対流熱交換器により熱回収をはかっても、上流側燃焼空間には、影響を及ぼさない。以上の効果

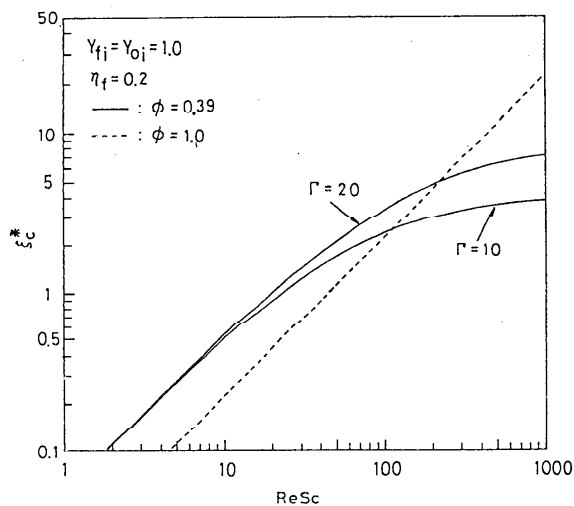


図6 円筒状粒子充てん層内メタン-酸素拡散火炎の無次元火炎高さ ξ_c^* と $ReSc$ の関係 (上宇都等)

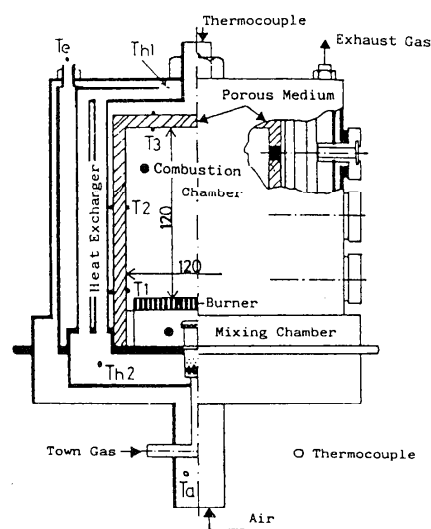


図7 超低発熱量ガス燃焼器の構造 (越後等)

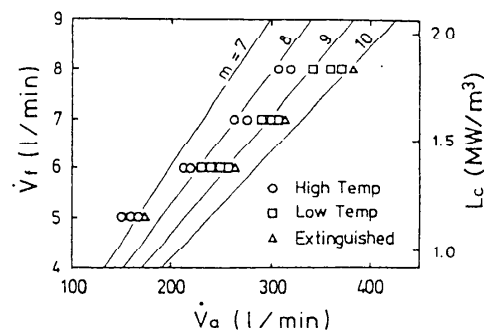


図8 超低発熱量ガス燃焼器の安定限界 (越後等)

に着目して、越後等⁽¹⁵⁾は、空気過剰率 9.9{0.48MJ/(Nm³)}程度まで、自力燃焼が可能な、燃焼器を開発した。図7に、その概略図と安定限界を示す。

3-2. 高効率ラジアントプレート 多孔体を高温流路内に設置した場合に生ずる、上流側への指向性の強いふく射エネルギーを、そのまま外部に導くように工夫された平板型燃焼器である⁽¹⁶⁾。概略図を図9に示す。供試空気は、下部から供給され、多孔板を通過した排気と熱交換し、予熱された後、バーナに導入される。バーナで、燃焼して生成した燃焼ガスのエンタルピは、多孔板で、ふく射エネルギーに変換され、上流側の石英ガラス板を透過して、外部に放出される。本装置により、供試燃料の低発熱量の約80~90%が、ふく射エネルギーに変換可能とされている。もし、多孔体として、ThO₂-CeO₂系のセル状多孔体が利用できるならば、非灰色ふく射変換効果⁽¹⁷⁾により、燃焼ガスエンタルピの大部分を、可視光として取り出せる可能性がある。

3-3. 超断熱(再生式)燃焼器 多孔体によるふく射熱再循環とともに、蓄熱回収を行うことにより、発熱量の極めて低い混合気を燃焼させることを目的とした燃焼器であり、その原理の学術的検討がなされる以前に、塗装排ガス燃焼器として開発実用化された経緯⁽¹⁸⁾がある。図10は花村等⁽¹⁹⁾⁽²⁰⁾

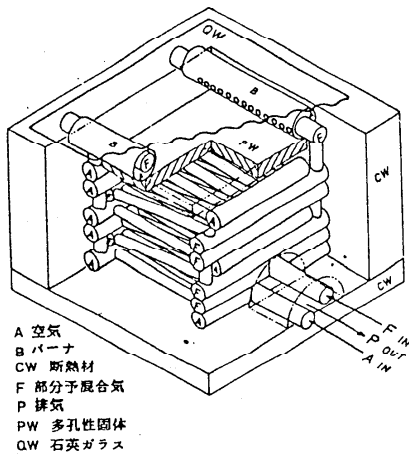


図9 高効率ラジアントプレートの構造(吉澤等)

により、試作された燃焼器である。多孔体が充てんされた流路内に、混合気を周期的に、流動方向を反転させながら、供給する。始動時の点火は、まず中央の電気ヒータに、通電し、空気のみを供給する。次に混合気を導入する。点火後、電気ヒータは止める。混合気は、多孔体内で十分予熱され

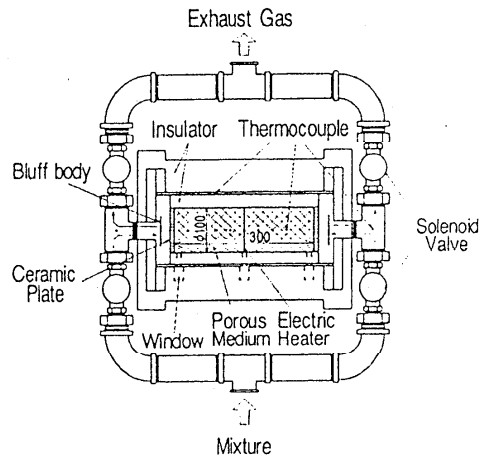


図10 超断熱燃焼器の構造(花村等)

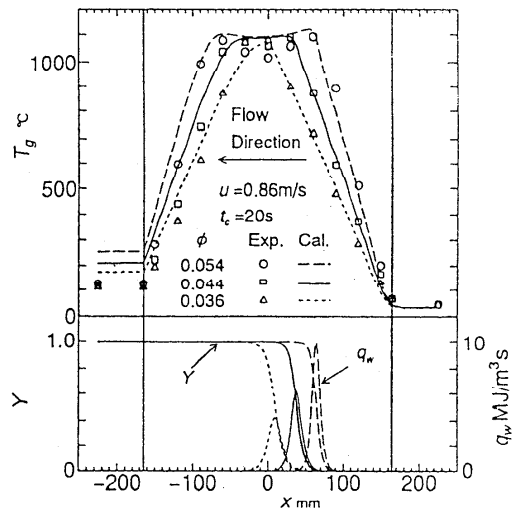


図11 超断熱燃焼器内温度分布,生成物モル分布および熱発生率(花村等)

た後、燃焼する。そして、そのエンタルピを、反応帯下流側の多孔体に与え、多孔体から流出する際は、十分、温度が低下する。以上の、予熱—燃焼—蓄熱のサイクルを、流動方向を周期的に変えながら、反復する。図11に、本燃焼器によって、都市ガス—空気予混合気を燃焼させた場合に得られる温度分布、生成物モル分率、熱発生率の分布の一例を示す。本燃焼器により、当量比0.04 (150kJ/m³) の都市ガスの自力燃焼を、行い得ることが報告されている。花村等は、このシステムを往復動熱機関の水蒸気によるメタンの直接改質に応用している。

3-4. 多孔体表面バーナ 一般に、ガスからの熱ふく射は、固体ふく射に比較して小さく、大きなふく射能を得るためには、固体ふく射を利用しなければならない。もし、多孔体の下流端表面近傍に、火炎帯を形成することができれば、多孔体表面が、高温となり、大きなふく射加熱量が期待できる。このようなバーナは、シュバンクバーナ、セラミックファイバーバーナとして、知られているが、火炎が下流端に、固定される条件や多孔体表面温度に及ぼす種々のパラメータ（例えば、混合気流速、当量比、ファイバ径、光学厚さなど）の影響が、解明されたのは、近年のことである。⁽¹⁰⁾⁽²¹⁾⁽²³⁾ 図12には、板谷等⁽²¹⁾により求められたシリカーアルミナ質多孔体バーナの表面温度と当量比の関係である。このバーナでは、当量比1.2~1.5の範囲で、最大の表面温度が得られている。

3-5. 多孔体熱電変換器 多孔性熱電素子を用いて、燃焼ガスエンタルピを、直接、電気エネルギーに変換する手段が、越後等⁽²⁴⁾により考案され、基本的な検討と実験が行われた。図13に、その概念図を示す。このシステムにおいて、流れ方向に、可燃性混合気を流して、上流側の低温接点を冷却し、下流の高温接点近傍で、安定な火炎をつくるように、燃焼を制御すれば、素子内に、急激な温度勾配を生み出すことが可能になり、それにより、熱電発電が可能となる。さらに、超断熱燃焼との組み合わせも考えられている。

4. あとがき

以上、多孔体内燃焼現象の基本的特性とその応用技術について、現在までに得られている知見をまとめた。以下、今後の課題について、2,3の私見を述べる。まず、予混合燃焼については、ほぼ基

本的な特性が解明されてしまったという感を深くするが、具体的な燃焼器設計の立場からは、多孔体燃焼に伴うNO_x生成機構の詳細な把握が不可欠であろうし、また、機器の最適化のためには、使用する多孔体の熱流動特性とふく射物性を統一的に予測するためのモデルが必要となるが、これらのテーマについての基礎研究は不十分である。また、拡散燃焼については、さしあたり火炎構造の解明が必要である。一方、応用技術開発に関しては、上記の基礎研究の充足とは別に、少なくとも、予混合燃焼については、そこに組み込まれている伝

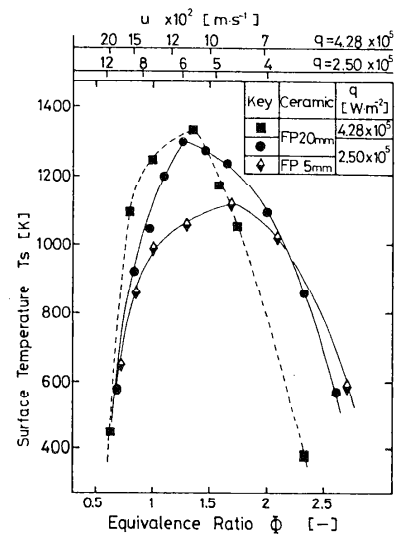


図12 多孔体バーナ表面温度と当量比の関係 (板谷等)

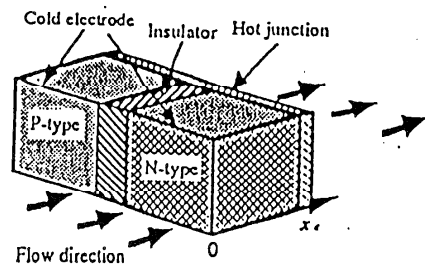


図13 多孔体熱電変換素子の概略図 (越後等)

熱学上の原理は十分理解されているので、その原理にもとづいて、種々の具体的な要求に答える形での応用技術を生み出すことは可能であるし、必要である。しかし、燃焼過程では、化学エネルギーの熱への転換という側面のみではなく、ほぼ全てのエネルギー形態を産出する過程が共存しているから、近年、越後⁽²⁵⁾が主張しておられる「エクセルギ再生燃焼」という視点より、多孔体内燃焼を考え直すことにより、思いがけない新局面が開かれることへの期待はもっと大きい。多孔体熱電素子による発電という魅力的なアイディアも、恐らくは、そのような視点の転換・拡大の中から産み出されたものであろう。

本稿が、「多孔体内燃焼」という、我国で、着想され推進されてきた研究分野への、若い研究者の皆さんの関心を引き起こす契機になれば幸いです。

(文献)

- (1) Penner, S.S. and Berland, A.L., Energy-The International Journal, 20-4, (1995), 311.
- (2) 越後, 吉澤, 機誌, 86-780, (s58), 1285.
- (3) 花村, 吉野, 吉澤, 越後, 機論(B編), 54-504, (s63), 2207.
- (4) Kotani, Y., Behbathani, H.F., Takeno, T., 20th. Symp. (Int) on Combustion., (1984), 2025.
- (5) 吉澤, 佐々木, 越後, 機論(B編), 52-482, (s61), 3587.
- (6) 花村, 吉澤, 越後, 同上, 56-529, (1990), 2816.
- (7) Sathe, S.B., Peck, R.E., Tong, T.W., Comb. Sci. Tech., 70, (1990), 93.
- (8) Sathe, S.B., Peck, R.E., Tong, T.W., Int. J. Heat Mass Transf., 33-6, (1990), 1331.
- (9) Chen, Y.-K., Matthew, R.D., Howell, J.R., HTD-Vol. 81, (1987), 25.
- (10) 花村, 越後, 吉澤, 機論(B編), 54-533, (1991), 315.
- (11) Takeno, T., Sato, K., Hase, K., 18th. Symp. (Int.) on Combustion, (1981), 465.
- (12) Takeno, T., Hase, K., Comb. Sci. Tech., 31, (1983), 207.
- (13) 上宇都, 小川, 宮本, 斉藤, 第34回燃焼シンポジウム講演論文集, (1996), 5.
- (14) 越後, 私信.
- (15) 越後, 久留須, 一宮, 吉澤, 機論(B編), 51-464, (s60), 1297.
- (16) Yoshizawa, Y., Echigo, R., Tomimura, T., Proc. 2nd ASME-JSME Thermal Conf., Vol. 5, 1987.
- (17) 吉澤, 中嶋, 越後, 機論(B編), 55-519, (1989), 3523.
- (18) Commercial report, A New Method of Destroying Organic Pollutants in Exhaust Air, ADTEC Co Ltd. (1990)
- (19) Hanamura, K., Echigo, R., Zhdanok, S., Int. J. Heat Mass Transf., 36-13, (1993), 320
- (20) Hanamura, K. and Echigo, R., Proc. 3rd KSME-JSME Thermal Eng. Conf., Vol. II, (1996), 339.
- (21) 板谷, 三好, 前田, 架谷, 化学工業論文集, 16-1, (1990), 56.
- (22) Tong, T.W., Sathe, S.B., Peck, R.E., Int. J. Heat Mass Transf., 33-6, (1990), 1339.
- (23) Tong, T.W. and Sathe, S.W., J. Heat Transf., 113-2, (1991), 423.
- (24) Echigo, R., Yoshida, H., Tawata, K., Koda, M., Hanamura, K., Proc. 10th. Int. Heat Transf. Conf., (1994), 173.
- (25) Echigo, R., Proc. 3rd KSME-JSME Thermal Eng. Conf., Vol. III, (1996), 1.

地下空間環境に及ぼす多孔質体内の熱物質移動現象

*Effects of Heat and Mass Transfer in Porous Media
on the Underground Environment*

藤井 義久 (鹿島建設(株)技術研究所
現：新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO))
Yoshihisa FUJII (Kajima Technical Research Institute,
present address at NEDO)

1. はじめに

地下空間を利用した施設はトンネル・地下鉄に限らず近年多様化し、従来は地表面下 10m 程度の浅い地盤に建設されていたものが、建設技術の発展と共に交通・エネルギー輸送・生産施設など大都市のインフラストラクチャーの多くが地表面下 50m 以上の大深度地下に建設されるものと予想されている。

大深度に建設される地下利用施設は滞水層内に設置される場合が多く、ここでは地下構造物と地下水との間の熱的相互作用は未解明の問題の一つであり、長期的な地盤温度の変化が地下空間の熱環境に影響を及ぼすと同時に、地下構造物からの熱移動によって地盤温度が変化し地下水の流動に伴って周辺の環境へ影響を及ぼすことが考えられている。

地下空間は外気から遮断され周囲を熱容量の極めて大きな地盤・岩盤に囲まれているため恒温性が高く、これを利用した地下貯蔵庫などでは空調エネ

ルギーの大幅な低減になる。

しかし、発熱負荷が増加傾向にある地下鉄では地盤への蓄熱が進み開業当初不必要であった冷房設備を導入するケースが増えていることはよく知られている。また、高い機密性のため常に適正な換気が必要なことも地下空間の大きな特徴であり、大規模な地下利用施設においては多量な外気導入が必要である。しかし、多量な外気導入は地下空間の恒温・恒湿性に多大な影響を及ぼすため、特に地下の生産・貯蔵施設では周辺壁体からの水分の浸透・蒸発の予測や壁面結露の防止対策が重要課題となっている。

このように空調・換気負荷が大容量化する大規模地下空間にとっては、空調・換気計画の基礎となる空調負荷算定法及び地下空間の温湿度予測法の確立が急務となっている。そのためには地盤・岩盤及び周辺壁体との熱・水分移動のメカニズムを明らかにすることが不可欠である。

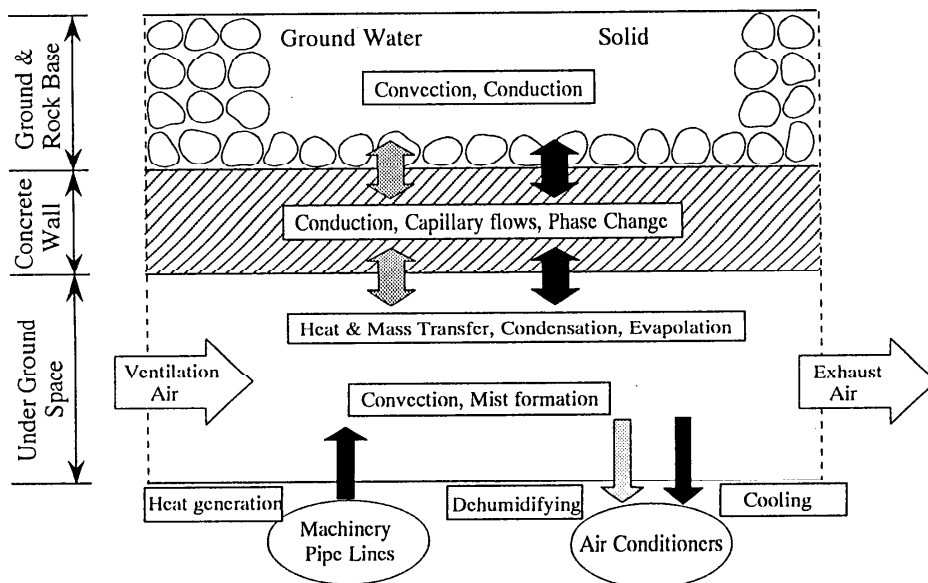


Fig.1 地下空間に係わる熱・水分移動の概念図

2. 多孔質体と地下空間

Fig.1 は地下空間に係わる熱及び水分移動の概念図である。地下空間は半無限体である地盤・岩盤及び壁体と熱・物質的に連成された系である。

ここで、滞水した地盤・岩盤は半無限の飽和多孔体として考えることができる。従って、地下水流のある地盤・岩盤は熱伝導体として壁体と連成するだけでなく、地下水流に伴う熱移動が重要となる。また、壁体からの熱移動により比較的透水性の高い地盤では自然対流の発生も考えられるが、これら地下水流に伴う地盤・岩盤内の熱移動及び温度分布は多孔質構造によって大きく異なるものと予想される。

壁体は地下水の直接の侵入を防ぐことを目的とし、その材料は一般的にはコンクリートが用いられる。ここで、コンクリートの浸透性係数 K は 10^{-20}m^2 のオーダーと極めて小さいが、壁体は一方が湿り空気、他方が飽和地盤に接しているため壁体内ではセメントペーストの毛管構造を介した水分移動が行われる。また、壁体内の温度条件によっては壁体内部における蒸発（乾燥）・凝縮（内部結露）や空気側壁面における蒸発・凝縮（表面結露）が発生する。

このように、地下空間の温・湿度を詳細に解明し適切な空調・換気設備を設計するには多孔質である地盤・岩盤及び壁体内の熱物質（水分）移動現象と連成させた解析が必要である。

本文では、コンクリート壁体内の不飽和熱・水分移動、及び飽和地盤内の熱・水分移動の特性と研究課題を概説し、地下空間の熱環境計画の基礎資料に供するものである。

3. コンクリート壁体の熱水分移動

壁体コンクリートは一般にセメントペースト、5mm 以下の細骨材、及び 20mm 以下の粗骨材の混合物であり、骨材となる砂・砂利に比べてセメントペーストは Photo 1 の電子顕微鏡写真が示すように流体輸送路となる空隙を有し、その内部組織は $0.001 \mu\text{m}$ 程度のゲル空隙、数 μm 程度の毛細管空隙さらにコンクリート製造過程で混入する数 $10 \mu\text{m}$ から数 mm のマクロ空隙から成る多孔質体である。

多孔質体の熱水分移動に関する解析理論は De Vries[1]を初めとするマトリックポテンシャルや水分化学ポテンシャルを用いたポテンシャル理論と蒸気圧・液水圧を直接用いる力学モデルに大別される。

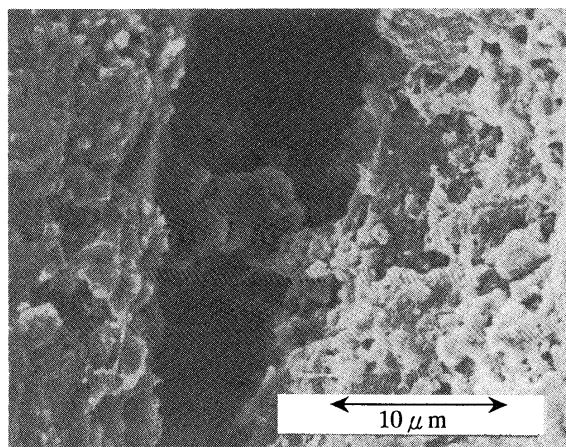


Photo 1 セメントペーストの電子顕微鏡写真

3. 1 ポテンシャル理論に基づく定式化

ポテンシャル理論によれば多孔質体の液占率 ϕ_f と温度 T の時間変化は次式の形で表される。

$$\begin{bmatrix} \rho_f & 0 \\ 0 & \rho C \end{bmatrix} \frac{\partial}{\partial t} \begin{bmatrix} \phi_f \\ T \end{bmatrix} = \nabla \cdot \begin{bmatrix} \lambda_{11} & \lambda_{12} \\ \lambda_{21} & \lambda_{22} \end{bmatrix} \nabla \begin{bmatrix} \phi \\ T \end{bmatrix} \quad (1)$$

ここで ρC は熱容量、 $\lambda_{11} \sim \lambda_{22}$ は不飽和水分拡散係数である。 ϕ はポテンシャル関数であり満水域は重力ポテンシャル ($-g \Delta x$) を、不飽和域では毛管圧ポテンシャル (P_c / ρ_f) を用いる。しかしポテンシャル理論では水分移動の力学的なメカニズムを記述したものでないため、温度 T と液占率 ϕ_f の関数である不飽和水分拡散係数及び液占率 ϕ_f とポテンシャル ϕ の関係は実験的に求めざるを得ない。例えばコンクリートを対象にした研究では松本ら[2]の ALC 板（空隙率 0.55）の実験・解析があるが、空隙率が 0.2 以下で浸透係数 K が 10^{-20}m^2 のオーダーである普通コンクリートでは不飽和水分拡散係数の測定は困難である。

3. 2 力学モデルに基づく定式化

力学モデルを用いた解析理論は Whitaker[3]によって提唱され、固体壁に関する解析は Ilıc&Turner [4], Ferguson & Lewis[5]らによってなされているが、いずれも多孔体の微細構造と液水及び蒸気移動の物

理モデルの関係が明確でなく、そのため毛管圧や不飽和浸透係数が直接測定できるレンガのように極めて空隙率が高く浸透性も良い材質を除いて報告はなく、一般性のある解析モデルの確立が望まれている。

3.3 モルタルコンクリートの力学モデル

モルタルコンクリートの熱・水分移動の力学モデルを提案する。まず、空隙率 ε の多孔質構造と流体輸送に係わる管径 δ とを関係付けるために、顕微鏡写真等の観察から以下のようにモデル化する。

- ① Fig.2 に示すように流体輸送に係わる管径 δ の毛管路は空洞内壁やより太い毛管の内壁の曲率部 r を介して連続すると考える。従って、管径 δ 、断面積 S なる毛管路数 $N(\delta)$ は $\eta(\delta)$ を毛管接続率として次式で表される。

$$N(\delta) = \eta(\delta) \frac{\varepsilon \phi' \Delta \delta}{S} \quad (2)$$

- ② 細孔径分布関数 ϕ' は水銀圧入法などによる実験から求める。
- ③ 管径 δ が小さい場合は $\eta(\delta)$ は 1 に漸近し、10 μm 以上のマクロ空隙は互いに独立で $\eta(\delta) = 0$ となることから、毛管接続率 $\eta(\delta)$ は有効空隙率のべき乗に比例するとモデル化する。ここで、比例常数とべき数は多孔質固有の値であり、恒温定常法による不飽和浸透試験並びに非定常乾燥・湿潤実験から同定する。

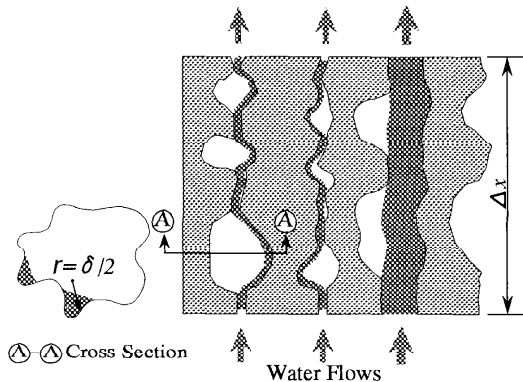


Fig.2 モルタルコンクリートの毛管路モデル

毛管径 δ の流路の基礎方程式は乾き空気の質量保存、総水分量の質量保存、エネルギー保存、及び液水と水蒸気の圧力平衡から成り立ち、以下に主な仮定を示す。

- ① 毛管路内の湿り空気と液水の運動は Hagen-Poiseuille 流を仮定する。
- ② 水蒸気の移動は拡散方程式に従う。
- ③ 毛管路内の相変化の時間スケールは乾燥・湿潤過程の時間スケールに比べて十分小さく、常に液水と水蒸気は平衡状態にある。
- ④ 毛管圧力 P_c は $\delta/2$ の液面曲率に対する表面張力（接触角は 0 とする）で表される。

毛管路 δ の支配方程式を δ に関して積分すると、微小空間 Δx におけるベクトル形式の移流拡散方程式が得られる[9]。

$$A \frac{\partial \Omega}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} (U \Omega) = \frac{\partial}{\partial x} \left(\Lambda \frac{\partial \Omega}{\partial x} \right) + G \quad (3)$$

ここで、 Ω は液占率 ϕ 、温度 T 、湿り空気圧力 P_g 、及び水蒸気圧力 P_v から成る状態ベクトルであり、係数マトリックス A 、 U 、 Λ 、 G (文献[9]参照) はコンクリート多孔質の構造条件 (空隙率 ε 、細孔径分布関数 ϕ' 、毛管接続率 $\eta(\delta)$) から一義的に求められる。

3.4 実験結果との比較

上記の解析モデルの検証を目的に、一面を等温断湿条件とし、他面を恒温恒湿な空気に暴露した厚さ 80mm のモルタルコンクリート供試体の湿潤及び乾燥実験を行った[6][7]。その結果を見ると、暴露開始から 2 日以上経過し、液占率変化が比較的緩やかな状態では、実験値と解析値は良く一致し、長期的なコンクリートの乾燥・湿潤過程に関しては数値計算による予測の見通しを得た。

しかし、暴露開始直後の液占率が急激に変化する状態では解析値は実験値に比べて急激な変化を示し、解析モデルに改良の余地があることが伺われた。特に、暴露開始直後の表面近傍の液占率の変化には、より微細な毛管内の相変化並びに移動現象が支配的であり、微細多孔質体内の局所平衡仮定や液水の運動モデルに対して詳細な検討が必要と考えている。そのためには、マイクロスケールにおける移動現象の実験的把握が不可欠な課題となっている。

従来、コンクリート内の液占率分布の実験的な把握には重量法やインピーダンスプローブ法が用いられてきたが、いずれも測定誤差が大きく、また液水の非定常な移動現象を直接観察することができないため、今後の解析モデルの進展には MRI 法[8]など新しい計測法の発展が期待される。

3. 5 地下空間に対する計算結果例

コンクリートの力学モデルを用いて実トンネルの数年間にわたる予測計算を行った結果を Fig.3 に示す。力学モデルでは物理変数を用いるため、地下空間や周辺地盤との連成解析が容易である。

この例は縦流換気トンネルにおいて、通過空気の温湿度が季節変動する場合のコンクリート壁面の水分フラックス J (空気から壁面へのフラックスを正) を示したものである。壁体コンクリート厚さは 30cm とし、空気側境界条件としては実測値に基づいた熱伝達率及び物質伝達率を与え、地盤側境界条件として恒温飽和水条件を与えたものである。

秋季、トンネル内の湿度が低下しコンクリート壁面から蒸発が始まると、しばらくの間は多量の蒸発があるが、壁面近傍が乾燥すると蒸発量は減少し、冬季におけるコンクリート壁体からトンネル空気への加湿量は非常に小さい。

一方、春季から梅雨季にかけて通過空気の湿度が上昇し壁面温度が露点以下となると、表面近傍のコンクリート内で水分凝縮が起こり、コンクリート内部に浸透する。しかし、表面近傍が満水状態となると浸透力が低下するために、コンクリート壁面における凝縮量(図中破線)の一部しか壁体内に吸収されず、その差は壁面を流下する結露水となる。

このように、予測計算結果は実トンネルで発生する温湿度変化並びに結露現象を良く説明している。また、予測計算手法の確立により地盤条件と換気条件から年間を通して適正な温湿度環境を保ち、結露など不快な現象のない壁体性状の設計が将来的には可能になるものと考えられる。

4. 周辺地盤内の熱物質移動現象

大深度地下構造物の周辺地盤内の熱移動は地下水流の測定が困難な事から実測値に基づいた研究は少ない。しかし、静止した滞水層の場合は自然対流による熱移動が、地域的な動水勾配による地下水流がある場合は強制対流がトンネル周辺地盤内に発生すると予想される。ここでは飽和地盤内に建設されるトンネルのモデルとして飽和粒状多孔質層内の水平円筒を考える。

飽和多孔質層内に設置された水平円柱周りの自然対流の研究は数多くあり、浅い地盤に設置されたパイプを対象にしてポテンシャル流れに基づいた定常解析⁹⁾並びに実験的研究¹⁰⁾がなされている。さらに、Fand ら¹¹⁾によってダルシー流から非ダルシー流までの広い範囲を対象にした熱伝達の整理式が提案されている。また、壁面近傍の間隙率分布が流体速度に及ぼす影響(チャンネル効果)については Hsiao ら¹²⁾の解析例がある。

共存並びに強制対流については Cheng ら¹³⁾¹⁴⁾によってダルシーモデルと境界層近似を用いた解析がなされている。

しかし、多くの研究は定常状態を対象とし非定常な自然対流・強制対流を対象にした実験・解析は少なく、特に周期変動する境界を対象とした研究は見あたらず、通過空気が日変動・季節変動をするトンネルを対象にした場合、壁面熱伝達率の算定のみならず飽和地盤内の非定常温度分布並びに熱移動は未解明の問題となっている。

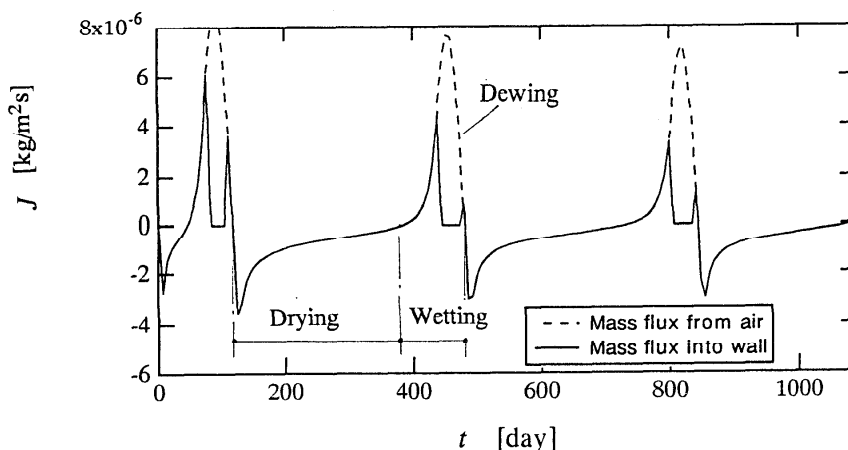


Fig.3 トンネル壁面の水分フラックスの計算結果

4.1 トンネル周辺のモデル実験

Fig. 4 にガラスビーズ模擬地盤内(400mm×400mm×250mm)に設置された水平円筒(外径 100mm)周りの非定常温度分布の実験結果を示す。これは、浸透性係数 $K=10^{-9}\sim 10^{-11}\text{m}^2$ の砂礫層地盤に建設された直径 10m のトンネルに流速 4.3mm/h の地下水が側方から当たる場合において、トンネル内の温度が外気導入によって季節変動することを想定し、その 1/100 スケール実験を行ったものである[15][16]。円筒温度は循環温水槽で正弦波状にコントロールし、模擬地盤内の温度分布は 162 点の熱電対で計測した。

主な相似則はダルシーレーリー数 $DaRa$ 、トンネル径基準のレイノルズ数 Re_D 、無次元周期 τ_0 、無次元粒子径 γ であり、これより実験の円筒壁面の温度変動幅 ΔT_w 、変動周期 t_0 、多孔質体中のみかけ水流速度 V 、及び模擬地盤粒子径 d の選定を行った。

$$DaRa = \frac{g\beta KD \Delta T_w}{\alpha_f \nu_f}, \quad Re_D = \frac{VD}{\nu_f} \quad (4)$$

$$\tau_0 = \frac{t_0 V}{D}, \quad \gamma = \frac{d}{D}$$

ここに、 g : 重力加速度、 β : 体積膨張率、 α_f : 水の温度伝導度、 ν_f : 水の動粘性係数

実験結果を見ると壁面温度上昇の開始当初は円柱表面から半径方向に一樣な熱移動が観察される ($\tau/\tau_0=2/8$)。しかし時間が経過するにつれて対流による熱移動が顕著となるため円筒の下流側に広範囲な高温域が広がり半径方向の温度分布は一樣でなくなる ($\tau/\tau_0=3/8$)。次に、壁面温度が低下し始めると円筒の下流には熱溜りが発生し ($\tau/\tau_0=4/8$)、次第に下流に移動する ($\tau/\tau_0=5/8$)。また $\tau/\tau_0=5/8$ では円筒表面には低温域が形成され、これは次の半周期の間に低温の熱溜りに発達する。

なお、 $\tau/\tau_0=2/8$ において円筒表面より下流に低温の熱溜りが観測されるが、これは半周期前に発生したもので時間経過と共に僅かに拡散しているが、なお明確な形状を保っている。このような現象は通常の流体では円筒の後流の乱れと浮力による渦発生による拡散効果が大きいいためほとんど見ることはできず、多孔質体特有の現象である。

しかし、水の流速が増し粒子レイノルズ($Re_d = \gamma Re_D$)が 6.2 を越えるあたりから非ダルシー効果が顕著となるため、熱溜りは次第に不明確となる。また、無次元粒子径 γ が 0.05 を越えるあたりからトンネル壁体と多孔質体との間のチャンネル効果によって、熱移動量の急激な増加が現れる。

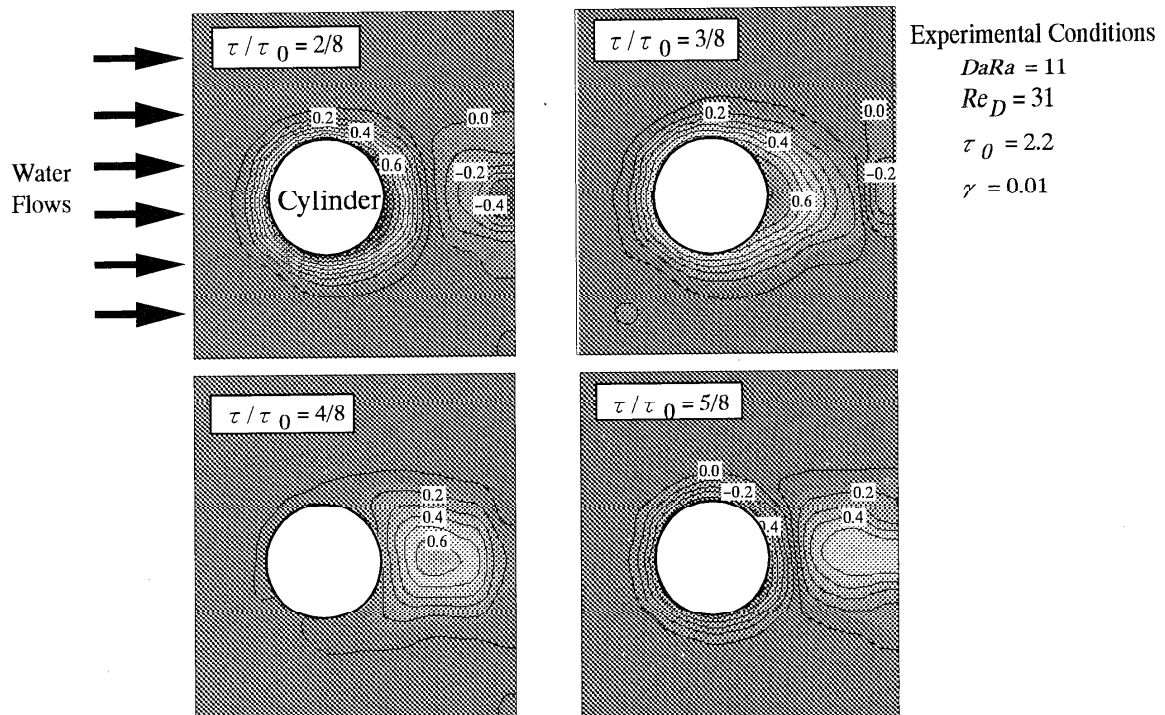


Fig. 4 壁面温度が周期変動する円筒まわりの温度変化の実験結果

ダルシー及び非ダルシー領域とも Forchheimer-Brinkman-Boussinesq モデルを差分法により数値計算することにより解析され、実験結果との照合も良いことが明らかにされている[15][16]。

実規模トンネルにおいては、地盤及び地下滞水層の性状は極めて複雑であり実験結果をそのままスケールアップする事はできないが、極めて緩やかな地下水流においてトンネル周辺に発生する熱溜りは1~2年間にわたってトンネル下流側50mにもおよぶ可能性があることが示された。特に、都市部の大深度地中開発においては構造物周辺の地盤環境への予測・配慮が重要であることは、このことから指摘できる。

5. むすび

地下空間の温湿度を予測し、適正な空調・換気計画を行うには、多孔質体としての壁体並びに周辺地盤・岩盤の熱・水分同時移動現象の把握が重要であることを示した。

現状の地下空間の温熱環境計画は機械空調を主体であるため、地盤・壁体は空調負荷の一要素としてのみ考えられている場合が多く、必ずしも地下空間に特有な高い恒温・恒湿性が最大限利用されているわけではない。従って、より快適で省エネルギー性の高い地下空間の創造には適正な吸放湿特性及び伝熱特性を有する壁体材料の選定・開発が第一に必要であり、そのためには、壁体の多孔質構造と熱水分移動現象の関係のさらなる解明が望まれる。

多孔質構造の諸特性と移動現象の精緻なモデルの構築には本文でも述べたように、微細で複雑な多孔質構造内のミクロスケールにおける非定常な熱・水分移動並びに相変化現象の解明とそれに基づいたマクロモデルの評価が必要であり、ミクロスケール場における実験法・解析法の発展と成果を見据えつつ、実用的な解析法の研究を行っていく予定である。

地下空間の周辺地盤に及ぼす環境予測には、複雑な地層構造を考慮した予測計算手法の確立と共に、長期実測による検証が不可欠である。山岳地帯の岩盤に建設される揚水式地下発電所では10年以上にわたって地下空間内の温湿度と周辺岩盤温度の長期観測を行っており、地下水の長期的な影響等も次第に明らかになってきている[17]。しかし、岩盤においては破碎帯のように局所的かつ異方性の強い多孔質が介在しており、詳細な検討は今後の課題である。

参考文献

- [1] De Vries, D.A., Tran. Am. Geophys. Union, 38, (1957), 222
- [2] 松本衛 他, 日本建築学会計画系論文報告集, 353, (1985), 11.
- [3] Witaker, S., In Advances in Drying, Eds. Mujumdar, A.S., Hemisphere, 1, (1980), 23.
- [4] Ilic, M. and Turner, I.W., Int. J. Heat Mass Transfer, 32, (1989), 2351.
- [5] Ferguson, W.J. and Lewis, R.W., Numerical Heat Transfer, Part B, 23, (1993), 91.
- [6] 藤井義久 他, 日本機械学会論文集 B, 62-596, (1996), 1475.
- [7] 藤井義久 他, 第32回日本伝熱シンポジウム, C195, (1995), 141.
- [8] Shattuck, M. et. al, ASME Experimental Tech. in Multiphase Flows, 128, (1991), 39.
- [9] Himasekhar, K. and Bau, H.H., Int. J. Heat Mass Transfer, 30-2, (1987), 263.
- [10] Himasekhar, K. and Bau, H.H., Tran. ASME, J. of Heat Transfer, 110, (1988), 649.
- [11] Fand, R.M., Steinberger, T.E., and Cheng, P., Int. J. Heat Mass Transfer, 29-1, (1986), 119.
- [12] Hsiao, S.W., Cheng, P., and Chen, C.K., Int. J. Heat Mass Transfer, 35-12, (1992), 3407.
- [13] Cheng, P., Int. J. Heat Mass Transfer, 25, (1982), 1245.
- [14] Cheng, P. and Hsu, C.T., Int. J. Heat Mass Transfer, 29-12, (1986), 1843.
- [15] Fujii, Y., Ohta, K., and Hijikata, K., Proc. of the 10th Heat Transfer Conf., Vol.5, (1994), 249.
- [16] 藤井義久 他, 日本機械学会論文集 B, 61-583, (1995), 1128.
- [17] 戸梶慎一 他, 空調学会講演論文集, E-15, (1994), 329.

生活環境下における被服材料の有効熱伝導率

*The Effective Thermal Conductivities of
Clothing Materials in Human Life*

高橋 カネ子, 山田 悦郎
(秋田大学鉱山学部機械工学科)

Kaneko TAKAHASHI and Etsuro YAMADA
(Department of Mechanical Engineering, Akita University)

1. 緒言

現在、人間が衣服を着用することは当然のことであり、着衣なしの生活は考えられず、しかも一生の付き合いである。衣服は日常生活において熱環境から身体を保護するなど、人間にとって非常に大切な役割を果たしている。それゆえ、人体を快適に保つための保温性能に関する研究や、その素材である布地の熱物性値に関する研究が数多くなされてきている。

近年、新しい繊維素材の開発が目覚しく、種々の高性能被服材料が発表されている。高性能素材は被服材料に対する限りない人類の望みをかなえ続ける科学の産物であり、繊維素材の開発は生活をより快適なものにする必要不可欠の課題である。

被服材料の性能には、繊維固有の性質に加えて、繊維の形態や集合構造の効果が繊維固有の物性よりはるかに大きい場合が多いと言われている。ここでは、人間の生理と自然環境に関与する保健衛生的性能、特に、被服材料の熱および物質移動特性に着目して述べる。

2. 従来の研究

被服材料の熱特性に関する従来の研究においては、古くは衣服の保温性についての報告^{(1),(2)}が主で、水分を考慮した布地の有効熱伝導率の測定結果^{(3)~(6)}はきわめて少ない。また、衣服着用の実際に即した総合的な実験結果を求める研究^{(7)~(9)}では、多数の影響因子が取り扱われてはいるが、因子それぞれの影響についての整理よりも、総合的な結果の考察が主体であり、定量的な評価は不十分である。

他方、近年では快適性についての追求が問題となり、水分を考慮した報告もかなり見うけられる。過渡的熱伝導率測定装置⁽¹⁰⁾や衣服内気候シミュレーション装置の開発⁽¹¹⁾により、定量的な結果を求めているが、定常的な水分移動を含む場合は測定されていない。

著者らは、伝導のみが生じている被服材料の有効熱伝導率を測定すると共に、熱移動と湿分移動が共存している現象も測定可能な実験装置を試作することにより、湿分移動を伴う条件下においても測定し、物性値の評価を行っている。

3. 熱移動のみを考慮した布地の有効熱伝導率⁽¹²⁾

これまでの布地の有効熱伝導率に関する研究では、連続相の母材である空気に繊維が不連続相として混入している混合物として布地を取り扱っている場合が多い。しかしながら、実際に着衣した布地内部では、発汗のような生理的要因などで湿分が停滞あるいは内部を移動している。従って、布地の有効熱伝導率を考える場合には布地内で熱と湿分が同時に移動する熱移動特性を明らかにすることが必要である。

一方、布地内を湿分が移動する場合は現象が複雑となり、重要な因子を把握出来ないまま検討する可能性も大きい。

以上のような立場から、はじめに、最も基本となる物質移動のない場合の有効熱伝導率について、定常比較法によって測定した結果を示し考察をする。

3.1 繊維の体積率と材質の関係

布地の有効熱伝導率の測定には定常熱流に基づく平板比較法を採用した。布地の有効熱伝導率 λ_e は材質、織物構造が同一でも異なることがあり、この原因は繊維体積率 V_f の相違によると考えられる。これまで、 V_f を広範囲に変えた実験は多くない。ポリエステル布については、仲ら⁽¹³⁾の測定値があるが、 V_f が比較的大きい範囲のみであり、また、竹中は繊維の体積率を変えて多くの材料についての結果⁽¹⁴⁾を示しているが、繊維の有効熱伝導率に極小値が存在することを主に述べており、体積率は小さい範囲にとどまっている。しかしながら、実用に供される布地では、厚手のものの場合 $V_f=0.52$ 程度まで使用されており、広い V_f の範囲にわたる結果が必要となる。このような立場から、これまでの

実験結果と既存の研究者の布地および繊維系物質であるグラスウールの結果をも合せ図1に示す。これらの比較より、同一材質では体積率の増大に伴い、 λ_e の増加率も大きくなることわかる。すなわち、繊維の体積率の小さい領域を除けば λ_e は材質の影響を受けることは明らかである。

3.2 従来の推定式との比較

これまでに提案された布地の有効熱伝導率の推定式を分類すると、熱伝導のみによるとして考えられた式、微視的な対流および放射などを考慮した式とに大別できる。これらのうち、比較的簡単に λ_e を評価でき、常温域では十分適用可能と考えられる熱伝導のみを考慮した式を主として取り上げる。これらの式のうち、Schumester⁽¹⁵⁾、Baxter⁽¹⁵⁾、田中ら⁽¹⁶⁾の式は固体内熱伝導を重視し、竹中⁽¹⁴⁾の式は固体内熱伝導と接触面を通る熱伝導を考慮して導かれている。以上の推定式とこれまで測定された結果を比較した結果を図2に綿布の例で示す。

図中の $V_f=0.03$ 前後の3点が他の点より小さいが、これは糸を引き抜いてみかけ比重を変えた結果、繊維の間隙の均質性が損なわれたことによると考えられる。各推定式は勾配に相違はあるものの同様な傾向を示している。竹中の式は V_f が大になれば繊維相互の接触量は増加するので、等価断面係数 y を適切に見積もれば実験値との一致は良好になると推測される。本測定結果に最も近い値を示すのはSchumesterの式である。Schumesterの式と比較して他の式は全て λ_e を過小評価している。田中の推定式は他の式に比べSchumesterの式に最も近く、繊維体積率による増加割合はBaxterとSchumesterの式のちょうど中間にある。

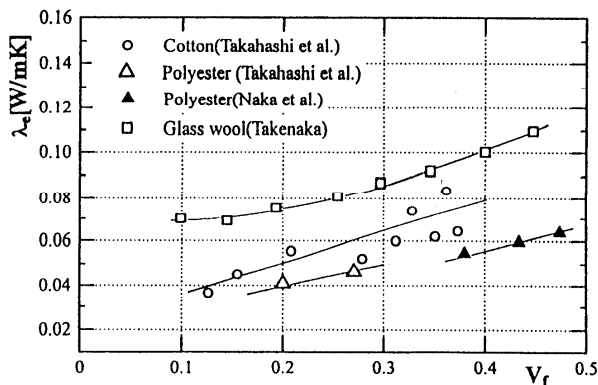


図1 繊維体積率による布地の λ_e の変化

4. 湿分移動を伴う布地の有効熱伝導率⁽¹⁷⁾

これまでの被服材料に関する有効熱伝導率の研究はいずれも湿分や発汗に伴う水分の移動を生じない熱伝導のみを考慮した研究がほとんどであり、水蒸気拡散をも考慮した報告は少ない。最近の研究についていえば、衣服内気候シミュレーション装置を用いた衣服材料の水分と熱の移動特性に関する一連の原田ら^{(18)~(20)}の研究、被服材料の水分移動特性と着用感については丹羽ら^{(21)~(23)}の研究があり、着用感を左右する因子として、衣服内湿度および発汗量を上げている。しかしながら、衣服着用時の人体の不感蒸泄及び発汗に伴う水分の移動を考慮している例はごく少ない。

人間が発汗及び不感蒸泄していることに着目し、着用している衣服においては、布地が繊維とその空隙を満たしている媒質、すなわち空気や湿分などの複合体であることから、布地の熱移動現象は繊維やその空隙を満たしている媒体の熱伝導及び物質移動、繊維間放射、対流などが複雑に合わされたものとして取り扱うことが必要不可欠となる。

4.1 実験装置と試料

本報告で用いた実験装置は定常比較法に基づくもので、布地内に存在する湿分の熱的挙動を明らかにするため、水容器を用いて水蒸気拡散を生じさせている。装置の概略を図3に示す。測定部は全て電

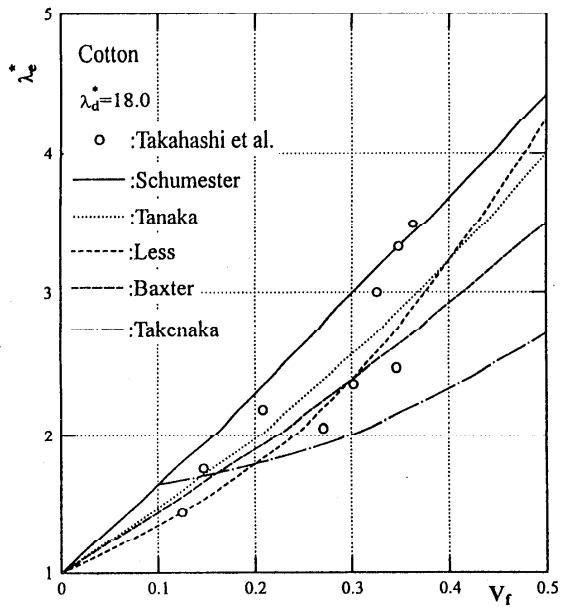


図2 繊維体積率による λ_e の変化
既存の推定式と実験値との比較

子天秤上に設置している。空調機による強制対流の影響を防ぐため、実験装置は断熱材で製作された箱の中に設置されている。本実験では、測定部の上部を解放し布地は自然に重ねられている。実験試料は羊毛と、麻2種類であり、詳細は表1に示す。積層布地内部の様相を検討するため試料7枚重ねの湿り空気に接している試料から2枚目と6枚目の上下に2対づつの熱電対を設置している。

4.2 結果と考察

衣服着用状態において、重ね枚数が増加すれば保温性も向上すること、材質や組織によってその効果が異なることなどは日常生活で経験されている。

同一材質のものを重ね合わせることは一般的でないが、著者らは、布地を通過する湿分移動を検討する目的のため、同一材質の試料を重ねた場合を取り扱っている。実験では、高温側は湿り空気、低温側は環境温度とし、その間に積層布地を設置した実験

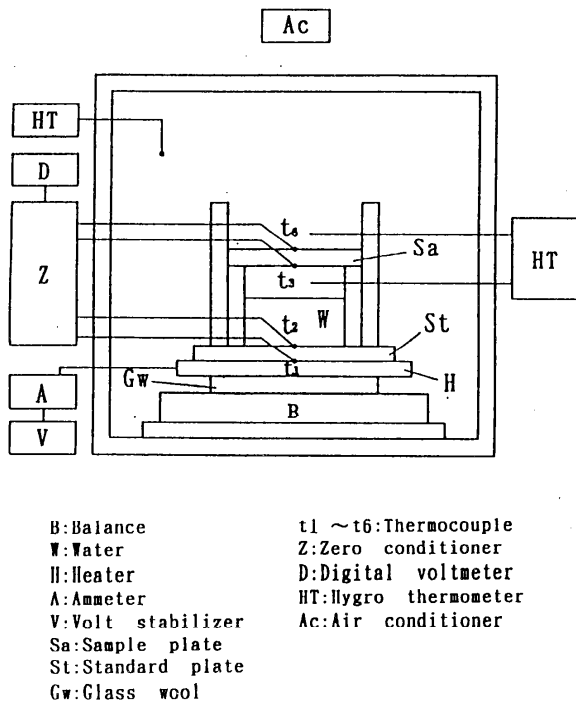


図3 実験装置

表1 試料の詳細

Material	ρ_e	D [mm]			
		1 N	3 N	4 N	5 N
Wool [W]	148[g/in]	0.426	1.635	2.155	2.472
L. linen [F(a)]	33×28	0.643	1.764	2.352	2.923
L. linen [F(b)]	55×50	0.381	1.120	1.388	1.725

を行い、湿り空気に接した布地と環境温度に接した布地の有効熱伝導率を測定した。湿分移動を伴う積層布地の実験結果では、布地の有効熱伝導率は蒸発量の増加と共に大きくなること、および材質と織物構造の影響を受けることが確認された。

試料内温度 T_s と有効熱伝導率 λ_e の関係の代表例を羊毛、麻 (a)、(b) についてそれぞれ図4に示す。図中の数字は高温側からの布地の位置を示している。いずれも中央部の布地3枚の場合が高い λ_e を示し、放湿側と吸湿側の布地1枚の λ_e が低い結果となっている。羊毛の吸湿側の試料1枚の λ_e が低いのは高温側である水蒸気が繊維間を通過したためと思われる。放湿側の布地1枚の λ_e が低いのは試料上方が開放されており湿分が拡散するためである。麻(a)、(b)は羊毛と類似した傾向を示すが内部試料の λ_e の差が小さい。これらの測定結果は過渡状態では布地内部の繊維に水分の吸脱着が生じていることを示唆している。

次に、羊毛の試料内温度 T_s と内部試料の有効熱伝導率 λ_e の関係を図5に示す。布地枚数が少なく、吸湿側に近いほど結果のばらつきが大きく、布地1枚の有効熱伝導率が高めである。放湿側では結果のばらつきは小さく有効熱伝導率も低めである。このことは、高めの値の場合は水分の影響が大きく、低

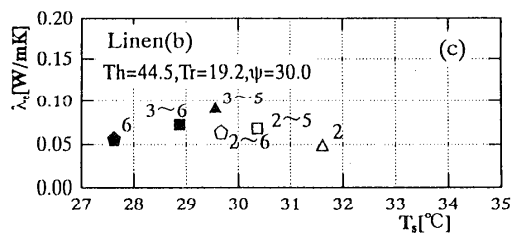
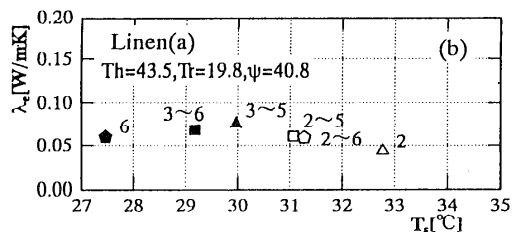
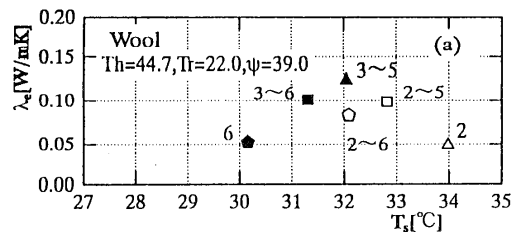


図4 積層布地の λ_e の温度変化

めの値は水分の影響が少ないものと考えられる。これは有効熱伝導率がみかけの実験条件のみに依らないことを示しており、羊毛の吸湿性、放湿性ともにより特徴が現れている。羊毛は繊維自体は親水性

であるが、繊維表面は撥水性が高く濡れにくいこと、木綿、レーヨン、アセテートは吸水性が高くかつ水分率もかなり高い繊維であることがこれらの現象の原因である。

さらに、湿分移動現象の詳細を観察するため 15 秒毎に測定した試料近傍環境湿度 ψ_2 と内部布地の有効熱伝導率 λ_e の対応関係を羊毛の場合の代表例を図 6 に示す。吸湿側と放湿側に最も近い試料 1 枚の λ_e が大きく変化している。試料近傍の湿度変化と内部試料 λ_e の変化は関連していると考えられる。本実験の試料内部の湿分挙動については、水容器より拡散した水蒸気の一部が布地に吸湿、拡散し、湿分が試料内上方まで移動し、繊維あるいは繊維の狭い隙間への吸湿や水滴の付着などが考えられる。即ち、局所的な湿度分布の測定の必要性が感じられる。しかし、現状ではこの測定の緒⁽²⁴⁾についたところであり、現時点では積層布地の湿分移動を伴う実験で内部布地の有効熱伝導率を測定することにより、湿分の分布状態が推定できるといえよう。

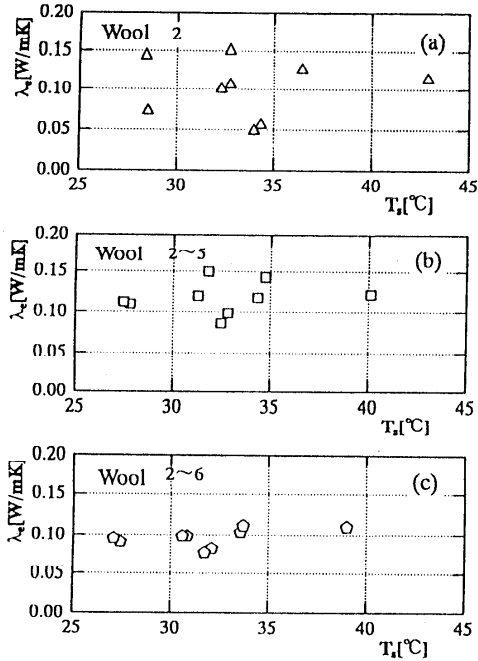


図 5 積層布地の λ_e の温度変化

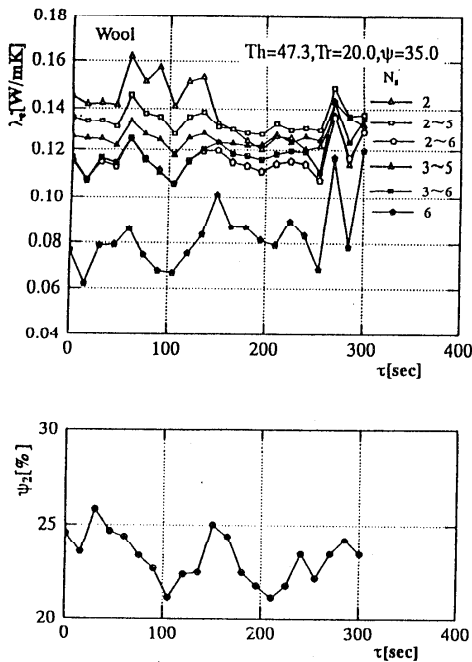


図 6 積層布地の λ_e と ψ_2 の時系列

5. 被服材料のモデル化と数値計算⁽²⁵⁾

前述の実験結果で示されているように同一材質の布地を重ねた場合、局所的に布地の有効熱伝導率が異なることから、現象解明の一つの手段として簡単なモデルをもとに水滴付着を考えた数値シミュレーションを行った。

5.1 布地のモデルと数値解析法

糸は繊維の集合体であるがこれを単純化し、布地は円柱状の単繊維が交互に重ねられて構成されているものとする。このような構造の布地に対して、繊維間に含まれる空気に流動がなく、かつ、物質移動の影響を繊維間の隙間に水分が付着したことで評価するものであり、熱伝導のみで考える。このような条件下で布地内繊維の幾何学的、熱的因

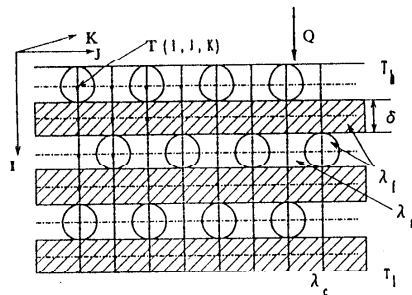


図 7 布地の計算モデルと座標系

子、繊維間の接触状態に関係する因子を変化させ有効熱伝導率を評価する。さらに、衣服着用時は一般に重ね着状態であることから、布地を数枚重ね合わせた積層布地として取り扱うことにする。布地を重ねた状態の厚さ方向の断面図は前述の単純化から図7に示されるようになる。布地に水分が付着した場合の有効熱伝導率は糸近傍の空気部分を水分に置き換えて計算した。ここでは、定常3次元熱伝導問題として、差分近似法を用いて加速リープマン法により解を求めた。

5.2 計算結果と実験値の比較

著者らが提示した伝熱モデルによる計算結果を以下に示す。計算においては、空気の熱伝導率は0.0257[W/mK]、水分の熱伝導率は0.602[W/mK]として温度変化は無視した。高温面温度 T_h は皮膚温度を低温面温度 T_l は外気温度を想定し、 $T_h=38.0[^\circ\text{C}]$ 、 $T_l=20.0[^\circ\text{C}]$ とした。図8に繊維の熱伝導率 λ_f と布地の7枚の平均有効熱伝導率 λ_e の関係を示す。繊維は異方性を持ちその熱伝導率は繊維軸方向とそれに垂直方向では異なるが、繊維及び糸の熱伝導率の実測値は数少なく、本報告では繊維の熱伝導率は文献値⁽²⁶⁾を参照し決定した。水分を含まない場合、 λ_f の増加と共に λ_e は増大するが $\lambda_f=0.4[\text{W/mK}]$ 以上になると増加割合が小さくなる。含有水分率 V_w が大きくなれば λ_e の増加割合は大きくなる。すなわち、断熱性能は著しく低下して被服材料としての機能が失われることになる。

次に、積層布地7枚のうち連続した布地2枚に水分が付着し、積層布地内を熱流方向に布地単位で移

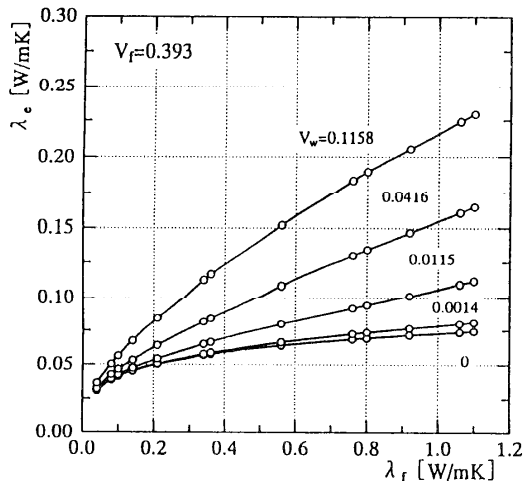


図8 繊維の熱伝導率による布地の λ_e の変化

動した場合の各層の温度分布を図9に示す。含水布地が存在するところで温度勾配が小さく、その場所から外れると同一の大きな勾配となっていることがわかる。水分が存在するところで部分的に熱伝導率が大きくなることを示されている。

次に実験値との比較を示す。実験値ではばらつき大きい湿り空気側、環境温度側の結果について検討する。糸の熱伝導率が $\lambda_f=0.34[\text{W/mK}]$ の場合について、含水布地1枚が高温部層2、中央部層4、低温部層6に存在する場合と含水布地2枚が層12、層34、層67に存在する場合の層2、層4、層6の有効熱伝導率の計算結果を羊毛、麻に対する層2と層6の実験結果と比較して図10、11にそれぞれ示す。羊毛と麻いずれにおいても、実験条件はヒータ温度 $T_h=34.0\sim 64.0[^\circ\text{C}]$ 、環境温度は $T_l=20\pm 2[^\circ\text{C}]$ 、環境湿度 $\Psi=25\sim 45[\%]$ である。羊毛の実験結果では湿り空気側の層2でほとんどの結果が高い値を示し、環境温度側の層6で低めの値を示している。麻の実験結果では湿り空気側、環境温度側のどちらも高めから低めの範囲にありばらつきは小さくな

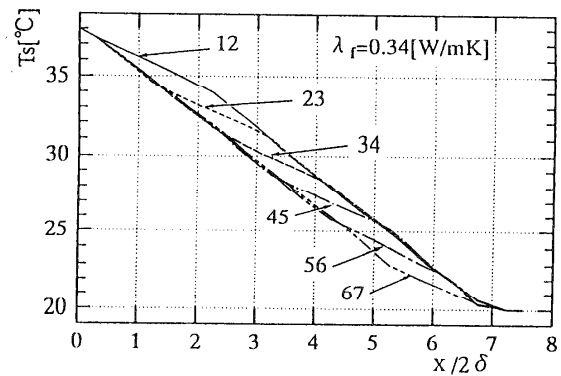


図9 積層布地内の温度分布

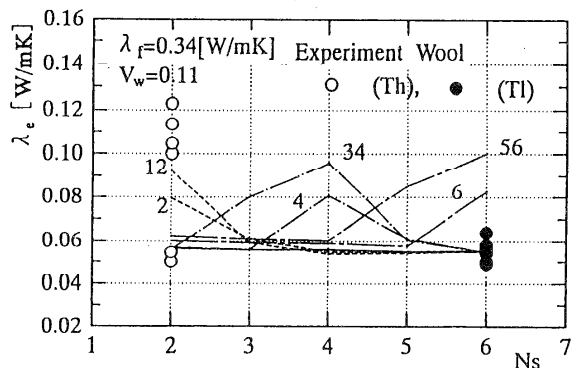


図10 λ_e の計算結果と実験値との比較

い。羊毛に関する実験結果は湿り空気側に水分の存在を示唆しており、環境温度側はほとんどの場合水分を含まない結果に近い値を示している。これは羊毛の性質である吸湿性、放湿性の特徴をよく現しているといえる。しかしながら、麻の場合は湿り空気のみならず環境温度側も水分の存在が認められる結果であり、これも綿素材の吸湿性はよいものの、放湿性があまり良くない特徴を現しているものである。実験結果のばらつきは環境条件が異なり、湿り空気側、環境側の温湿度変化の影響によるものであることを示していると考えられる。いずれにしても、湿り空気及び環境温湿度の状態が不安定であるため、湿分移動を伴う布地の有効熱伝導率の測定結果は再現性の少ない結果である。さらに実験の精度を向上させるためには湿り空気および環境温湿度の制御に十分な注意を払う必要があることを本計算結果は示している。

6. 結 言

本報告では、被服材料の有効熱伝導率およびそれへの水分の影響について実験および数値解析により明らかにした。

(1) 熱移動のみを考慮した被服材料の有効熱伝導率は繊維の容積比が小さい場合を除けば、繊維の熱伝導率が大きいほうが有効熱伝導率は大きく、その増加率も大きい結果を得た。

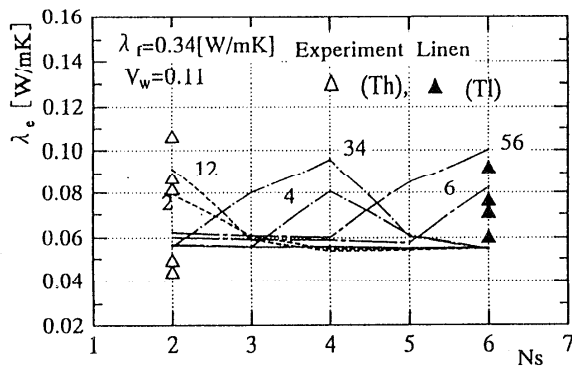


図 11 λ_e の計算結果と実験値との比較

(2) 湿分移動を伴う布地の有効熱伝導率は布地を通過する蒸発量の増加とともに大きくなり、蒸発量はヒータ温度、周囲温度、湿度により影響を受ける。積層布地では、湿り空気側と環境温度側の布地 1 枚の有効熱伝導率が実験により一定ではない結果が得られた。

(3) 布地の織物構造を考慮した伝熱モデルの計算結果は、内部に不均一に含水布地が存在すると内部の布地の有効熱伝導率はその位置によって異なり、水分のあるところで大きい値を示す。

文献

- (1) 竹中, 高分子, 10(1961), 925-930.
- (2) A. H. Woodcock, Text. Res. J., 32(1962), 628-633.
- (3) 仲他, 繊維機械学会誌, 26(1973), T34-T42.
- (4) 鈴木他, 繊維機械学会誌, 30(1972), 481-491.
- (5) 仲他, 繊維機械学会誌, 29(1976), T100-T106.
- (6) J. I. Spencer-Smith, Clothing Res. J., 5(1977), 3-17.
- (7) 渡辺他, 家政学雑誌, 5(1954), 6-10.
- (8) 渡辺他, 家政学雑誌, 8(1957), 158-162.
- (9) 渡辺他, 家政学雑誌, 10(1959), 209-215.
- (10) 川端, 繊維機械学会誌, 37(1984), T130-T141.
- (11) 松本他, 繊維機械学会誌, 41(1988), P566-P575.
- (12) 高橋他, 素材物性学雑誌, 7(1994), 76-84.
- (13) 仲他, 繊維機械学会誌, 30(1977), T158-T166.
- (14) 竹中, 家政学雑誌, 14(1963), 77-83.
- (15) Pratt, A. W. Academic Press, (1969), 304-305.
- (16) 田中他, 化学工学論文集, 16(1990), 168-173.
- (17) 高橋他, 素材物性学雑誌, 8(1995), 24-32.
- (18) 土田他, 繊維機械学会誌, 35(1982), P302-P306.
- (19) 原田他, 繊維機械学会誌, 36(1983), P392-P399.
- (20) 原田他, 繊維機械学会誌, 36(1983), P586-P595.
- (21) 丹羽他, 繊維製品消費科学会誌, 8(1967), 249-263.
- (22) 諸岡他, 日本家政学会誌, 30(1979), 320-327.
- (23) 諸岡他, 日本家政学会誌, 30(1979), 328-335.
- (24) 高橋他, 第 17 回日本熱物性シンポジウム講演論文集, 1996, 147-150.
- (25) 高橋他, 日本機械学会論文集投稿中.
- (26) 日本熱物性学会編, 熱物性ハンドブック, 465, 養賢堂.

回転式除湿器・回転式全熱交換器内での
熱・物質同時移動

Combined Heat and Mass Transfer
in Rotary Dehumidifier and Rotary Total Heat Exchangers

田中 宏史 (福岡工業大学電子機械工学科)
Hiroshi TANAKA (Fukuoka Institute of Technology)

1. 緒言

回転式除湿器や回転式全熱交換器はエレメント素材をハニカム状に成形し、ホイールとしたものを使用し、処理空気はその細い流路内を通過する。表1に示すように前者は産業用・業務用が主で処理空気を必要な湿度まで除湿するもので、最近ではかなり低露点まで除湿可能となっている。また、後者は空気調和における換気の際の排熱を顕熱のみならず潜熱も回収するもので、省エネルギー機器である。共に多孔質体としては比較的薄いもので、除湿器用のものは母材に含浸させる量が多く、全熱交換器用の場合には数%程度の除湿剤を母材表面に吹き付けたものである。

表1 回転式除湿器と回転式全熱交換器の特徴



	回転式除湿器	回転式全熱交換器
機能	処理空気の乾燥、あるいは低露点空気の精製制御	換気の際の顕熱と潜熱の回収
用途	製造過程での空気の調湿・乾燥、防錆や貯蔵保存庫	ビル空調・工場空調等
顕微鏡写真例		
機能材	繊維質母材内に除湿剤を含浸させたものを成形	アルミ等の表面に数%程度の除湿剤を吹き付けたものを成形
他	数~十数[rph]の回転数	数~十数[rpm]の回転数

図1に示すように、システムとしては回転式除湿器も回転式全熱交換器も同一であり、ロータのエレメント素材の機能が異なるだけである。

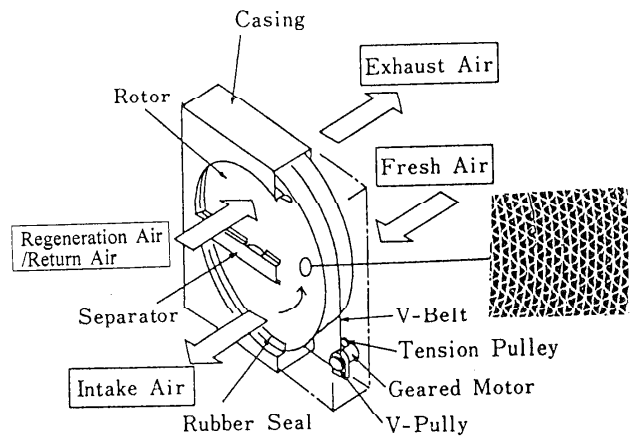


図1 回転式除湿器/回転式全熱交換器のシステム概要図

回転式除湿器の設計計算については固定層内の吸着操作¹⁾で扱うガスが水蒸気の場合とすればよいが、①吸着剤は母材ともに加工され、②薄い板状であり、③周期的に吸着・脱着を繰り返すが、装置全体は定常となり、様相が若干異なる。

また、回転式全熱交換器については、回転蓄熱式空気予熱器と同様な設計計算法が示されている²⁾。そこではマトリックス内の狭いダクトでの平均熱伝達係数及び平均物質伝達係数を実用機で経験的に求めたものを用い性能予測する。

このように、回転式除湿器や回転式全熱交換器は構造は単純であるが、エレメント温度及び空気温度が、回転方向や断面の長さ方向の各場所でも異なり、さらに周期的に変化する。水蒸気の吸着及び脱着熱は一般に大きく、温度変化が大きく、温度分布や水蒸気濃度分布はさらに複雑となる。したがって、エレメント内の各場所で物質伝達と熱伝達の同時移動

を厳密に解析することにより、これらの複雑な現象の詳細が予測可能となる。

そこで、筆者らの行っている解析方法や結果の概要を述べ、「エレメント内の物質伝達と熱伝達の同時移動」の様相と特徴、さらにはそれらの問題点等について述べる。

2. 熱・物質移動の数値解析

回転式除湿器や回転式全熱交換器で用いられるロータのエレメントの断面形状は図2に示すように段ボール状に成形したものを重ね合わせ、さらに必要な円筒径と長さになるようにしたものである。したがって、熱と物質の同時移動は個々の波状の円筒内で行われる。

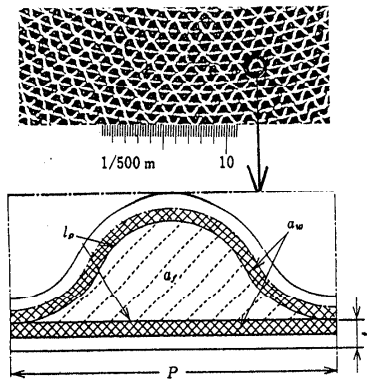


図2 エレメントの形状

図2の下部に示すようにエレメントの山形の断面の幾何学的形状から、波形のダクトを上下に重ねたものと仮定して取り扱う。従来より、これらの解析的取り扱いにはさらに、ダクト板の1/2厚さの単一のダクト内で熱の吸熱・放熱及び水蒸気の吸着と脱着が行われることに帰着する。図3の解析系のように熱と物質の同時移動を伴う層流対流熱伝達・物質伝達をダクト板の熱伝導と連成されて解析することになる。

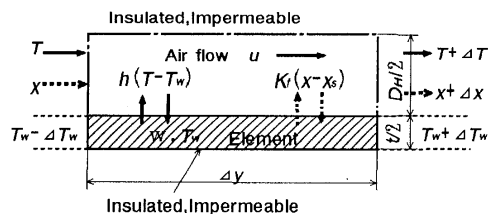


図3 エレメント要素の解析系

基礎方程式は

ダクト内の熱の収支について

$$\rho_a c_p a_f u \frac{\partial T}{\partial y} = h(T - T_w) l_p \quad (1)$$

エレメント要素板の熱伝導について

$$\lambda a_w \frac{\partial^2 T_w}{\partial y^2} + \rho_a c_p a_f u \frac{\partial T}{\partial y} + \gamma \rho_a c_p a_f u \frac{\partial x}{\partial y} = a_w \rho_w c_w \frac{\partial T_w}{\partial \tau} \quad (2)$$

ダクト内の水蒸気分の収支について

$$\rho_a c_p a_f u \frac{\partial x}{\partial y} = K_f(x_s - x) l_p \quad (3)$$

エレメント要素板内の水分の収支について

$$\rho_a c_p a_f u \frac{\partial x}{\partial y} = a_w \rho_w \frac{\partial w}{\partial \tau} \quad (4)$$

境界条件: $y = 0$;

$$T = T_1, \quad \partial T_w / \partial y = 0, \\ x = x_1, \quad \partial w / \partial y = 0 \quad (5)$$

$y = l$:

$$\partial T_w / \partial y = 0, \quad \partial w / \partial y = 0 \quad (6)$$

初期条件: $\tau = 0$;

$$T_w = T_{w0}, \quad w = w_0 \quad (7)$$

ここで、 a_w :エレメントの断面積、 a_f :エレメント流路の断面積、 c_p :空気の比熱、 c_w :エレメントの比熱、 h :エレメント内の熱伝達係数、 γ :吸着熱、 H :ヘンリー数、 K_f :水蒸気の物質伝達係数、 k_f :エレメント内の物質伝達係数、 L :エレメント長さ、 l_p :エレメント流路の濡れ長さ、 T_w :エレメント温度、 u :流路方向空気流速、 w :エレメントの水分量、 x :水蒸気濃度、 y :流路方向座標、 λ :エレメントの熱伝導率、 τ :時間、 ρ_a :空気の密度、 ρ_w :エレメントの密度である。また、添字 i は入口、 o は出口、 $av.$ は平均を示す。

数値解析は上式を差分化し、各時間ステップ毎に繰り返し計算を行い、エレメントの温度、水分及びダクト内空気の温度及び水蒸気濃度を求める。

その際、①熱伝達係数 h は図2の波状の形状をほぼ正三角形とし、2~3mmの細い相当径であるので層流強制熱伝達についてのWibulswas³⁾の数値解析結果より局所の値 h を与える。物質伝達係数 K_f についてはルイスの関係、 $K_f = h / (c_p \cdot \rho_a)$ より局所値を与える。

③吸着熱は文献によりまちまちであるが、水の蒸発潜熱を与える。

④ x_s はエレメント表面近傍の水蒸気濃度である

が、エレメント表面温度で主流空気が吸着平衡にあるときの値を仮定し、物質伝達の推進力とする。エレメントの吸着等温線は使用される吸着剤単体のもではなく、実際にエレメントとして成形されたものを別途測定したものをを用いる。エレメントの測定例を図4に示す。

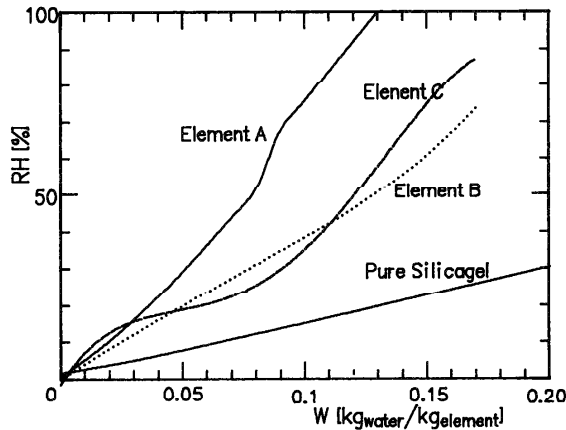


図4 各エレメントの吸着等温線の測定例

⑤実際には、吸着平衡とのずれやエレメント内の透湿抵抗などもあり、次式の見かけの物質伝達係数 K'_r で補正する。

$$\frac{1}{K'_r} = \frac{1}{K_r} + \frac{1}{H \cdot k_s} \quad (9)$$

つまり、式(3)の K_r の代わりに K'_r を用いる。ここで、 k_s は吸着剤内の拡散抵抗係数、 H はヘンリー数である。なお、詳細は文献(4)を参照されたい。

⑥また、脱着時も吸着等温線上で脱着し、吸着時と全く同様の方法で解析できると仮定する。ただし、流入空気の方法は逆になる。

上述の非定常現象の解析は、機器の回転数に相当する吸着プロセスの計算と脱着プロセスの計算を行う。その結果は同時にロータに対しては各時間に対応する角度にあるエレメント要素の結果でもある。それらの計算を交互に行い、それぞれの出口の空気温度及び水蒸気濃度、エレメント温度及びエレメントの水分量が一定値に収束するまで同様の数値計算を繰り返す。

3. 回転式除湿器の実験と解析例及び問題点

まず、最初に $100\text{ mm} \times 100\text{ mm} \times$ 長さ 100 mm のエレメントC(炭素繊維エレメント)の要素での

非定常の除湿プロセスについての実測結果と2節の解析結果の比較例⁵⁾を図5に示す。このエレメントは比較的熱容量が小さく、吸着開始直後は出口水蒸気濃度の低下と共に、出口空気温度の上昇が著しい。温度上昇による拡散の推進力の低下を伴い、急速に温度低下となる。時間と共にエレメント内に水分が蓄積され、吸着平衡に漸近する。温度も流入空気の温度となる。数値解析結果もほぼ一致している。

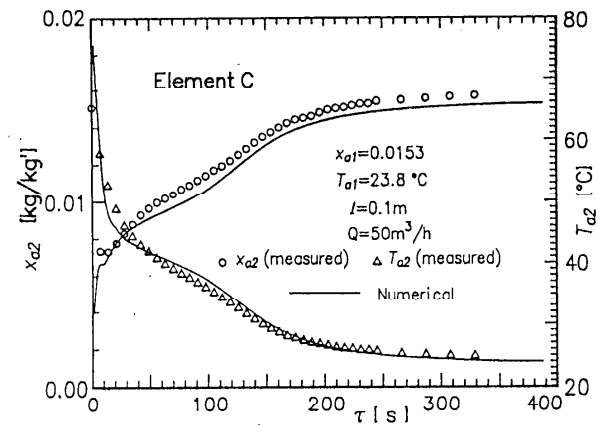


図5 出口の空気温度 T_{a2} と水蒸気濃度 x_{a2} の時間変化の実測例と解析例の比較

回転式除湿器については、3/4回転に相当する時間の吸着プロセスと残り1/4回転に相当する時間の脱着プロセスの場合が一般的である。比較的高温・多湿の空気の除湿・脱着の1回転の計算例を図6に示す⁶⁾。図中の斜線部の面積が1回転での除湿量に対応し、積分平均値が減湿分となる。出口水蒸気濃度の平均値については図7に示すように、風量だけでなく、エレメント長さや回転数でも異なる。

低露点の空気を得るには、一回除湿された空気を分流し、再生空気として利用することが行われるが、このような特殊な操作や運転条件の場合にも同様な解析が可能である。しかし、図4の吸着等温線にはとくにRHの低い場合の正確な測定データが用いられる。

単一のエレメント板からの対流熱伝達では放射の影響がかなり大きい⁷⁾。図2のモデルの細いダクト内では放射の項は考えなかったが、再生・脱着プロセスでは 100 °C 以上の温度となるので、厳密に解析すべきかも知れない。複合材料であるエレメントの熱物性値も正確な評価が必要であろう。

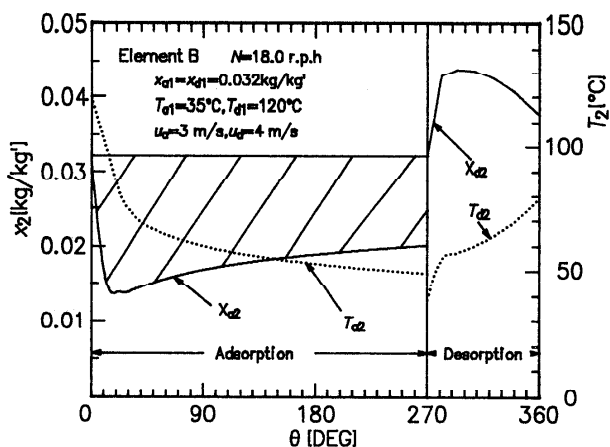


図6 ロータ各部の出口の空気温度 T_2 と水蒸気濃度 x_2 の解析例

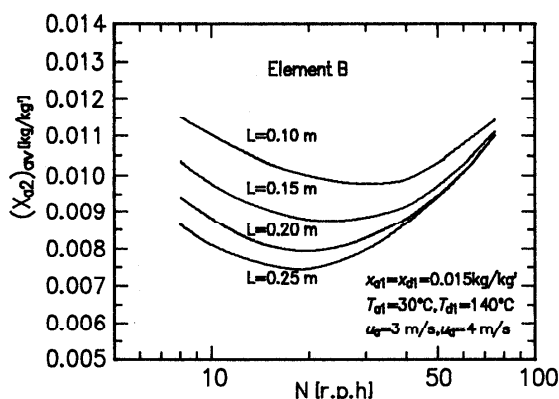


図7 出口平均水蒸気濃度 $(x_{a2})_{av}$ の特性解析例

4. 回転式全熱交換器の実験と解析例及び問題点

回転式全熱交換器については、一般に換気の際に使用されるので、1/2回転に相当する時間の吸着プロセスの計算と残りの1/2回転に相当する時間の脱着プロセスの計算を行う。顕熱と潜熱を共に効率よく回収する必要があるが、表1に示すように回転式除湿器に比べ、回転数はかなり早い。

全熱交換器の場合には、回収する顕熱と潜熱の割合で性格が異なる。日本の夏期の気候条件では潜熱負荷が顕熱負荷の5倍程度となることもある。しかし、冬期では同程度である。中間期では、顕熱のみを回収する場合となることもある。

夏期の気候条件での測定例と同じ条件での数値解

析例との比較をそれぞれの温度効率、湿度効率、エンタルピー効率について図7に示す⁸⁾。回転数が6[rpm]で、風速を0.3~1.37[m/s]と変化させた場合である。

なお、

$$\text{温度効率 } \eta_{nt} = \frac{(T_{n,i} - T_{n,o})}{(T_{a,i} - T_{d,i})} \times 100 \text{ [\%]}$$

$$\text{湿度効率 } \eta_{nx} = \frac{(x_{n,i} - x_{n,o})}{(x_{a,i} - x_{d,i})} \times 100 \text{ [\%]}$$

$$\text{エンタルピー効率 } \eta_{nh} = \frac{(h_{n,i} - h_{n,o})}{(h_{a,i} - h_{d,i})} \times 100 \text{ [\%]}$$

ここでnは吸着プロセスでa、脱着プロセスでdとする。

風速つまり風量の増加に対して、湿度効率及びエンタルピー効率は次第に減少している。しかし、温度効率はあまり変化しない。このような夏期の条件では潜熱回収が支配的であることが示される。また、温度のみならず湿度を制御する場合には、風量や回転数を正確に制御することも重要である。

ここで、示した解析方法を用いれば、冬期の条件や顕熱のみの中間期の運転条件でも同様に解析でき、性能の詳細についても検討が可能となる。

空気調和の場合には、温度変化が10~20°C程度であるので、放射の影響は少ないと考えられる。

母材の表面の数%の吸着剤の熱物性値の評価は無視したが、厳密には母材の熱容量や熱物性値が変化し、エレメントの温度に影響する。

また、母材を含めると吸着等温線も温度によって変化する。

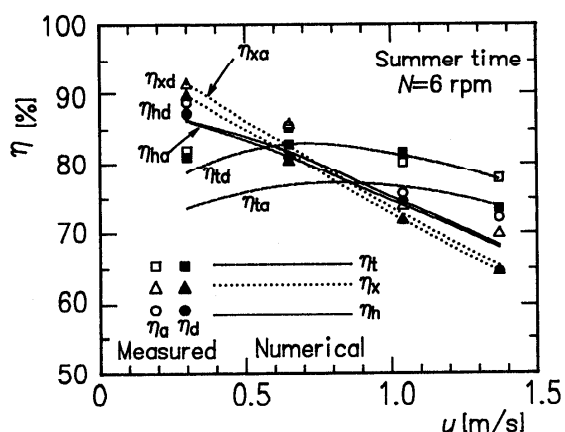


図8 温度効率、湿度効率及びエンタルピー効率の実測結果と解析結果の比較(夏期条件)

5. 問題点とまとめ

回転式除湿器・回転式全熱交換器内での空気中の水蒸気の吸着・脱着を伴う熱・物質の同時移動の解析手法の1例を紹介した。一見複雑な現象に見えるが、エレメント内の細いダクトで行われるため、簡単な仮定や見かけの物性値を用い数値解析が可能であり、シミュレーション結果は実測値と比較的よく一致する。これは、実際使用したエレメント要素材で実測した吸着等温線をそのまま解析に利用していることによると考えられる。

解析的な興味からするならば、純粋な吸着剤を用いたほうが、吸着理論との対応が明解であるが、簡単なものに限定される^{9, 10)}。

一般的な条件での設計計算では、種々のパラメータや運転条件でかなり詳細な数値まで検討できるので、有効と考えられる。

3節、4節で述べた問題点などを整理すると以下のようなになる。

解析系等：

- ①流れ場の解析
- ②エレメント材の厚さ方向の熱伝導の解析
- ③エレメント材内水分透過の解析
- ④輻射の影響の考慮
- ⑤その他

熱物性値等：

- ①吸着等温線の精密測定（低露点・温度依存）
- ②エレメント内の透湿抵抗係数の評価
- ③吸着熱及び脱着熱の評価
- ④複合材料として、エレメント材の比熱・熱伝導率の評価
- ⑤脱着の評価、その他

ここでは触れなかったが、静止型除湿器及び静止

型全熱交換器では、エレメント板を熱及び水蒸気が通過及び透過するので、上記の問題はさらに厳密でなくてはならない。

計算機の容量と速度は益々大きく、早くなるので、これらの問題点の解明は比較的簡単なことかもしれない。しかし、このような機器について、厳密な情報の必要性がどこまであるかという問題でもある。

この分野の問題に関心のある方々のご参考になれば幸いである。

【参考文献】

1. 改訂五版・化学工学便覧, 化学工学協会, 丸善, 1989, pp584/624
2. 伝熱工学資料、第4版、日本機械学会, 1986, pp266/268
3. Shah and London, 'Laminar Forced Convection in Ducts', Academic Press, N. Y., 1978, PP243
4. 田中・白石・宮武;九州大学生産科学研究所報告, 第80号, 1986, pp39/49
5. 田中・白石・宮武;昭和61年度空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集, 1986, pp161/164
6. 田中・久木迫, 福岡工業大学エレクトロニクス研究所報, 第8巻, 1991, pp11/15
7. 田中・粟田, 第33回日本伝熱シンポジウム講演論文集, 1996, pp845/846
8. 田中・粟田・隈, 空気調和・衛生工学会論文集, 第59号, 1995, pp41/47
9. P. Biswas, S. Kim and A. F. Mills, Trans. ASME J. Solar Energy Engng., Vol. 106, 1984, pp153/158
10. S. Kim, P. Biswas and A. F. Mills, Trans. ASME J. Solar Energy Engng., Vol. 107, 1985, pp120/127

断熱材内の熱物質移動について

Heat and Mass Transfer Characteristics of a Thermal Insulating Material

河合 洋明 (北海道工業大学機械工学科)
Hiroaki KAWAI (Hokkaido Institute of Technology)

1. はじめに

断熱材は省エネルギー技術の中において、とりわけ重要な位置を占めるものであることは周知の通りであり、工業的用途から一般家庭に至る広い範囲の活用がなされている。ここで、しばしば断熱材内における熱・物質移動挙動が議論される訳であるが、これは主として空隙を経由した内部での水分移動に起因する性能劣化があるためである。本文では、こういった問題に関して、特に寒冷地の建築物壁体の断熱を例に取りながら、話題を提供しようと思う。

近年の住宅では、気密性および断熱性を高め快適な室内気候を保つことは、最も大切な条件の一つとされる。夏は涼しさを感じ、冬は暖かくという良好な居住性を設備の力を借りて実現するという方法に至った結果、エネルギーのロスを抑えるという観点からも、断熱材が、地域に関わらず多用されるようになり、例えば、図1で示すように、断熱材の使用が一般的なものとなった。また、図2から、適当な厚さの断熱材を施工することにより、高い省エネルギー効果が得られることもわかる。住宅に使用される断熱材は、軟質繊維板(インシュレーションボード、ソフトテックスなど)、無機質繊維材(ロックウール、グラスウールなど)、および合成樹脂発泡材(スチレンフォーム、ウレタンフォームなど)、お

よびその他の補助的断熱材(アルミ箔、石膏ボードなど)などに分類される。一般に熱伝導率の小さい材料を断熱材と呼ぶわけであるが、建築物には $0.1\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 程度以下のものが多く使用されている。グラスウールは、繊維径は $0.5\sim$ 数 μm のもので作られており、空隙率は $0.88\sim 0.93$ 程度⁽²⁾である。図3にグラスウールの熱伝導率の測定例を示す。熱伝導率は、 $0.04\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 前後(密度約 $16\text{kg}/\text{m}^3$ の場合)⁽³⁾となっている。図4に密度と熱伝導率の関係を測定

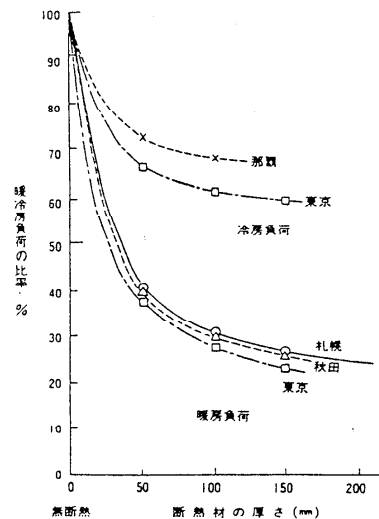


図2 断熱材厚さと暖冷房負荷⁽¹⁾

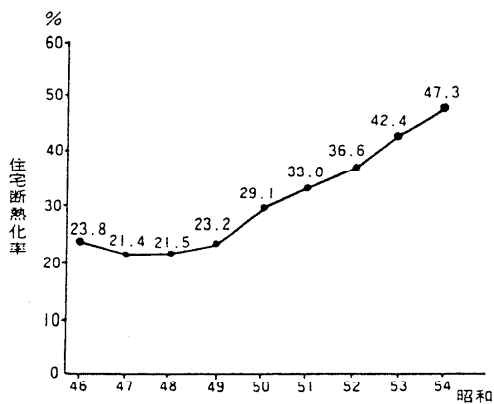


図1 住宅の断熱化率の例⁽¹⁾

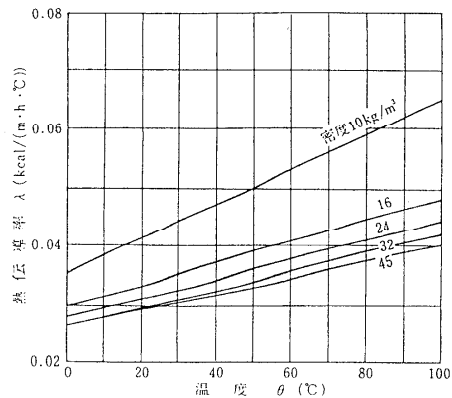


図3 グラスウールの熱伝導率⁽³⁾

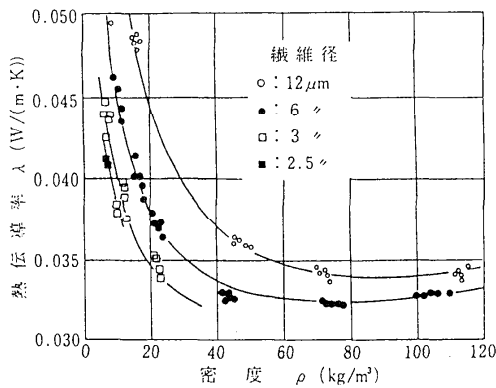


図4 グラスウールの密度と熱伝導率⁽³⁾

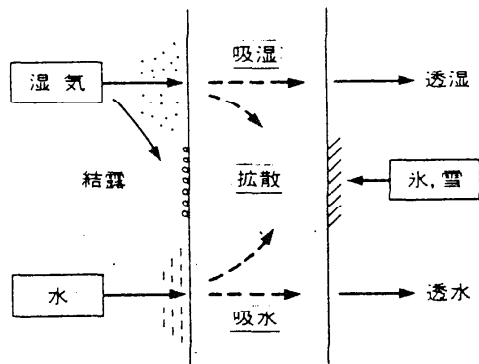


図5 水の移動⁽⁴⁾

した例を示す。対流の効果が、大きくなる範囲で密度の低いもの、繊維の細いものが良好な断熱性能を示す。

壁体内に十分な断熱材を施すことにより、表面結露の発生は抑制されるが、次に内部結露が議論されるようになった。建築構造体を挟んだ両側の空気の水蒸気分圧が異なれば、水蒸気は一方の空気からもう一方の空気に流れ、この時に、構造体内部の温度が露点以下になっていれば、内部で凝縮が生ずる。水分移動の概要を図5に、水蒸気分圧と内部結露の発生について図6にそれぞれ示す。結露被害は結露水自体による一次的なもの、結露水による材料含水率上昇などが招く二次的のもの、および結露発生に代表される劣悪な環境条件において予想される副次的被害に分類される。一次的なものは、壁のシミなど、一見して確認できる被害であり、二次的なのは腐食菌類などの生物によって引き起こされる被害である。副次的被害とは熱環境の快適性を損なうなど、結露を誘発する家屋に付随する被害・欠陥である。結露の発生形態については、表1のような整理がなされている。

以上に述べた結露現象は木質系材料および断熱材の腐食、あるいは断熱性能の低下という深刻な問題を引き起こす原因となり、その挙動を理解し制御の可能性を探ることは、熱工学および建築工学にまたがる大変興味深い課題となっている。

2. 断熱材の熱・物質移動に関する 在来の研究について

本文の範囲として、特に繊維質断熱材に関する研究に注目し、それらの概況の整理を試みる。

2.1 断熱材充填層の熱移動挙動について

実験研究として、断熱材充填層の有効熱伝導率⁽⁷⁾

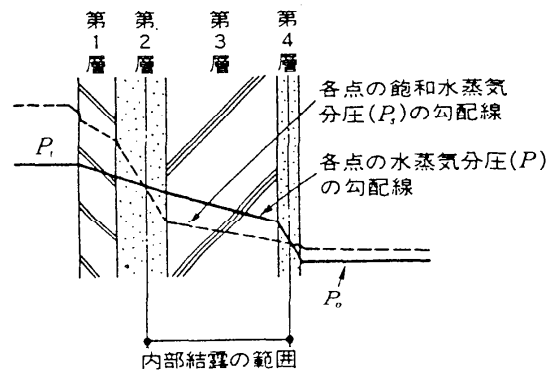


図6 水蒸気分圧と内部結露⁽⁵⁾

表1 結露発生形態⁽⁶⁾

初期結露 (築後2~3年)	<ul style="list-style-type: none"> 建材よりの放湿 (木材・コンクリート・断熱材等) 含水による熱抵抗減少 (断熱材・コンクリート等) 住まい方の不適合 (特に木造からRC造の場合)
一般結露	<ul style="list-style-type: none"> 定常結露——詳細は表1参照 (主に暖房時、まれにクーラー冷風等で発生) 非常結露——詳細は表1参照 (間欠暖冷房による湿度急変 大熱容量による表面・空気温度差拡大 (表面温が空気温度変動についていけない場合等)
	<ul style="list-style-type: none"> 表面結露: 構造体の断熱性が室内環境や気密性に比して低い場合、室内側表面等に生じる結露(定常結露の場合) 内部結露: 構造体内部の温度分布と湿度分布のアンバランスにより日にふれない内部において生じる結露。断熱・気密化が防湿に先行した場合に危険。

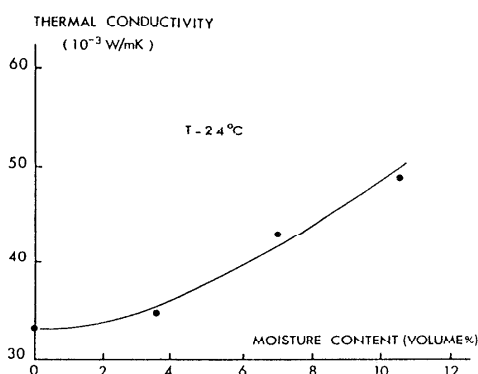


図7 含水量が等価熱伝導率に与える効果⁽¹¹⁾
(厚さ 25mm, 平均温度 24°C, 温度差 20°C, 密度 70kg/m³)

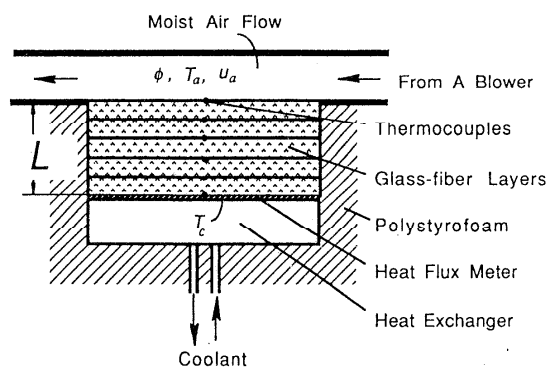


図8 実験装置概要⁽²¹⁾

あるいは断熱材充てん層に空気層を設けた場合の熱伝達特性^{(8),(9)}などが取り上げられている。

2.2 水分の移動・蓄積や相変化の影響について

(1) 常温および高温域

含水が断熱材の等価熱伝導におよぼす効果^{(10),(11)}が検討されており、例えば図7のような実験結果が示されている。水分移動を考慮したものは、水分蓄積挙動⁽¹²⁾、水分凝縮と移動が断熱性能におよぼす影響⁽¹³⁾があり、解析的なものとしては、断熱材内の水分蓄積挙動⁽¹⁴⁾、水分蓄積挙動とそれに伴う有効熱伝導率の増大⁽¹⁵⁾が取り上げられている。相変化を伴う熱・物質移動の解析例⁽¹⁶⁾では、断熱材内の湿度レベルが、水蒸気の移動や水分凝縮に大きく寄与することが確認されている。また、工業的使用を意識した研究として、断熱材内に凝縮がある場合の熱・物質移動挙動に関する実験と解析⁽¹⁷⁾が報告されている。

(2) 低温域

Taoらは、図8に示すモデルに基づき、霜層生成の効果なども考慮した、繊維質断熱材の熱・物質移動挙動について実験と解析を行っている^{(18),(19),(20),(21)}。その他にも、断熱材内の浸透空気流や吸着の効果などを取り上げている^{(22),(23),(24),(25)}。

寒冷地では冬季の内外の温度差が大きいため、透湿および凝縮が起こりやすく、長期間にわたり内部に水分が蓄積され、断熱性能の低下を招くことがある。坂爪らは、この現象について詳細な測定を行ない、有益な成果を残している^{(26),(27)}。図9,10,および11に、水分蓄積状態の写真、断熱材の水分蓄積率、および水分蓄積の熱伝導率への影響をそれぞれ示す。図14右の写真の条件では、試料低温面から霜層が蓄積し、異なる二つの温度勾配の出来ることが確認されている。左のように、液状水が蓄積する場合は、温度分布は、ほぼ直線的で、勾配も小さい。蓄積水分

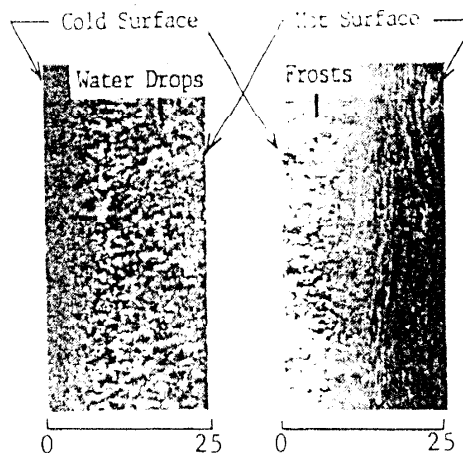


図9 断熱材内の水分蓄積状態⁽²⁶⁾

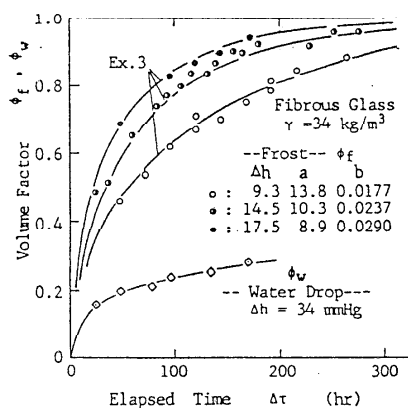


図10 水分蓄積率の経時変化⁽²⁶⁾

は、低温面近傍に低温面近傍に、水滴状に蓄積される。霜状蓄積の体積率は、初期に大きく増加し、その後徐々に増加割合が小さくなっていく。霜層が蓄積する場合には、熱伝導率が急激に蓄積開始と同時に急増し、その後、水分の蓄積と同時に増大する。これは、水分移動に伴う潜熱と水分の蓄積による伝熱機構の変化によるものと説明している。

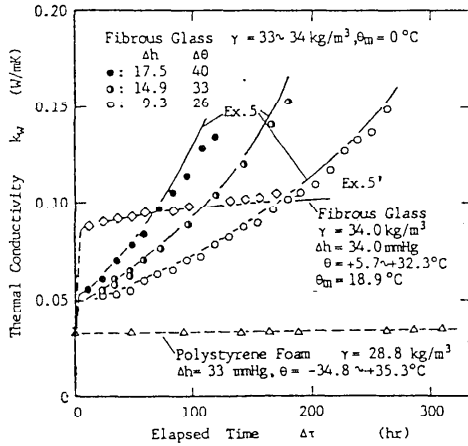


図11 水分蓄積の熱伝導率への影響⁽²⁶⁾

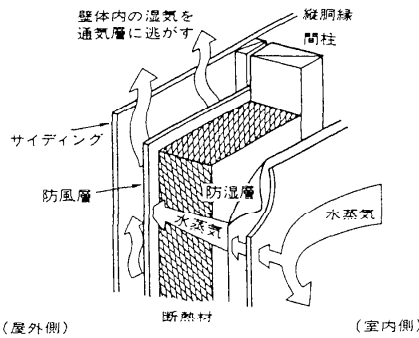


図12 通気層構法⁽²⁸⁾

2. 3 通気層を設けた断熱壁について

内部凝縮を防ぐ一方策として、断熱材外側に外気を取り入れ、その流動によって水分を軽減しようとする通気層工法と呼ばれる方法がある。構造の概略を図12に示す。斉藤らは、通気層構法を採用した壁体断熱材内にコンセント埋め込み用の小孔や防湿材の隙間等から水蒸気が進入することを想定し、水分蓄積の時間変化を数値計算によって解析した^{(29),(30),(31)}。図13は、空気層の有無による水分蓄積量の変化を示したものである。通気層を設けることにより、大幅に蓄積水分量が減少し、通気速度の大きい場合にその傾向が強い。これは、通気層があることにより、水蒸気を放散する面積が広がり、通気により水蒸気の浸出速度増加するとしている。

筆者らは、断熱材内の水分蓄積を制御するための基礎的試料を得る目的で、図14に示す装置を用いて、通気層に接する断熱材について、通気層空気流速、通気層空気温・湿度、加熱室温・湿度、冷却壁温度などが、断熱材の見かけの熱伝導率および含水率におよぼす影響を実験的に検討し^{(32),(33),(34)}、一部、数値計算⁽³⁵⁾による解析も行った。通気層は厚さ

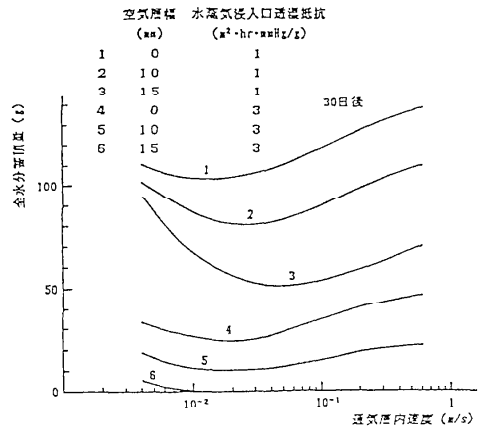


図13 空気層の有無による水分蓄積量の変化⁽³⁰⁾
(通気層幅 10mm)

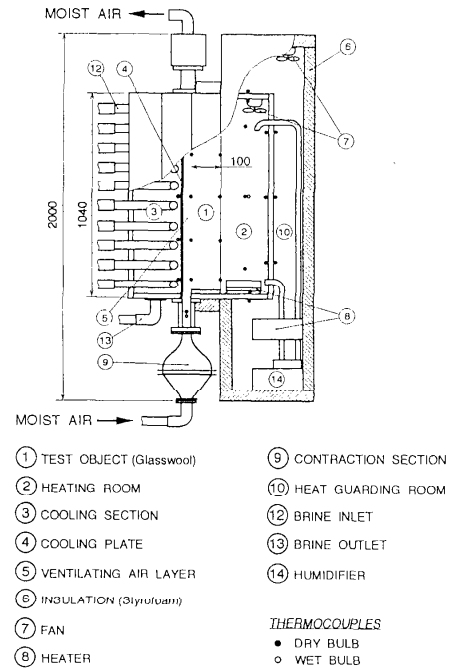


図14 実験装置⁽³⁵⁾

20mmwで、一面を冷却壁、対向するもう一面を断熱材の表面で構成した長方形断面の流露である。断熱材の背面は、過加熱室にて、高温に保たれている。

サーモグラフィにより可視化した断熱材側面の温度分布を図15に示す。何れの写真も、通気層側内部に低温部分が広がっていることが分かる。断熱材下部から中部にかけては、通気層から加熱室への空気流入があるため、特にその傾向が強く現れている。

図16に見かけの熱伝導率の挙動を示す。通気層空

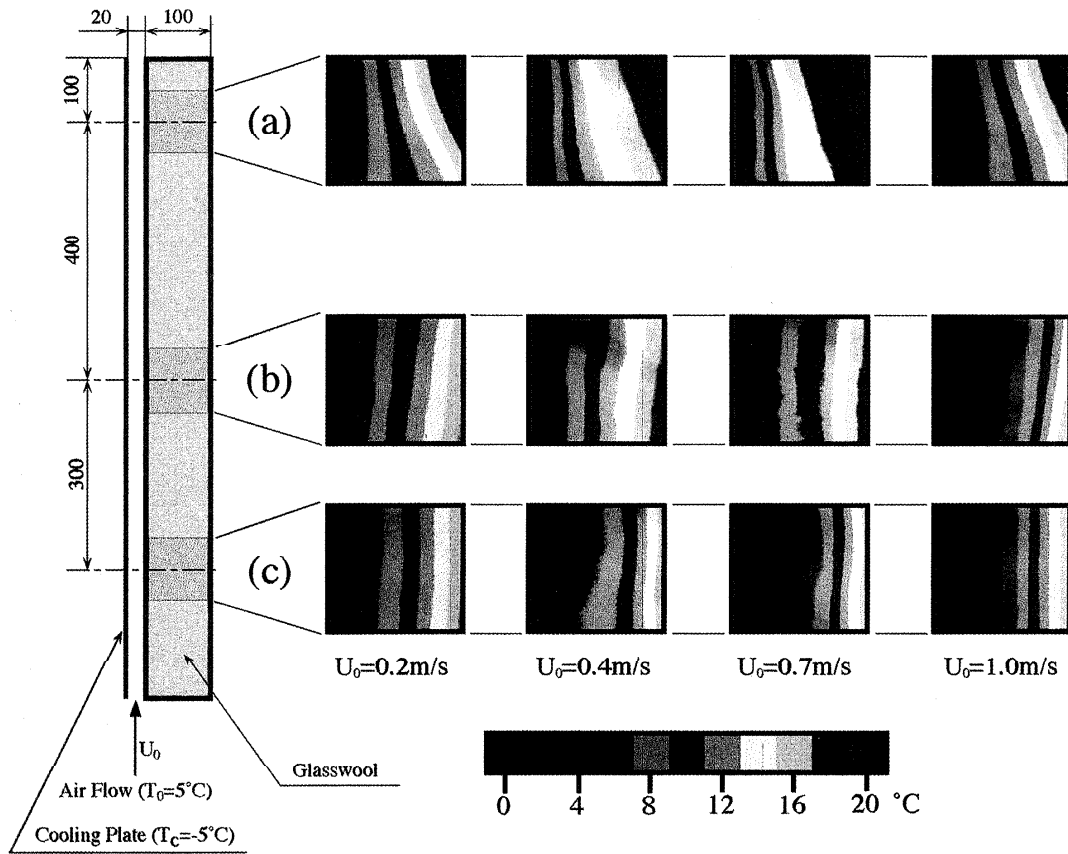


図15 温度分布の可視化⁽³⁵⁾ (加熱室温度 25°C, 通気層流入空気温度 5°C, 冷却壁温度 -10°C)

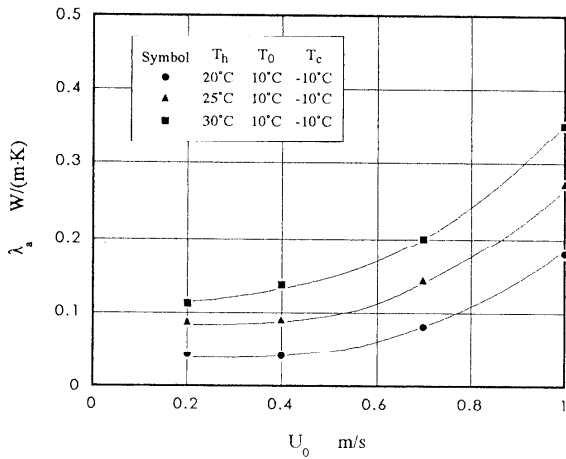


図16 見かけの熱伝導率におよぼす通気層流入空気速度および加熱室温度の効果⁽³⁵⁾

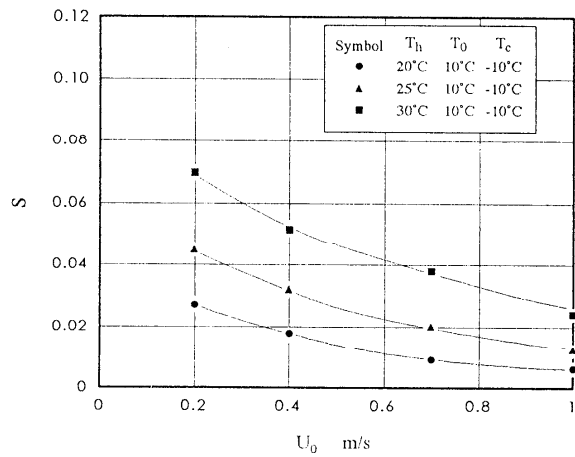


図17 含水率におよぼす通気層流入空気速度および加熱室温度の効果⁽³⁴⁾

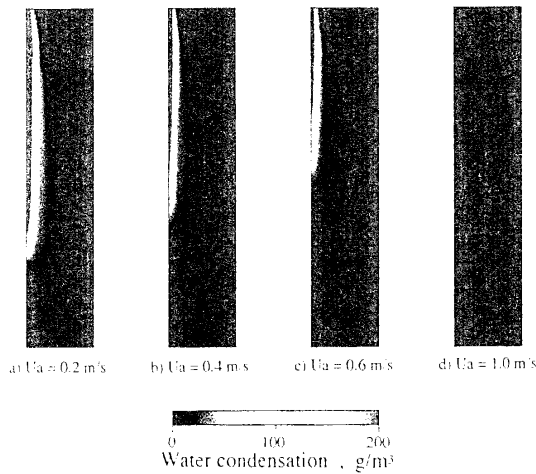


図18 断熱材内凝縮水分分布⁽³⁵⁾
(冷却壁温度 -5°C , 通気層流入空気温度 5°C)

気流速の増大に伴って、熱伝導率も増大する。通気層に流入する空気の一部は、断熱材を経由して加熱室を通過するため、換気による熱輸送を増大させるため、このような傾向が現れるものと考えられる。

図17は、断熱材の含水率におよぼす通気層空気流速および加熱室温度の効果が示されている。通気層流速の増大によって、含水率は減少する。斉藤らと同様に、空気による水蒸気放散が促進されるものと考えられる。また、加熱室温度の増大によって、含水率は増大するが、実験では加熱室の相対湿度を一定としているため、室内温度の上昇は絶対湿度の増大と露点上昇となり結露が容易になる方向に作用する。Vafaiら⁽¹⁶⁾が解析結果でも触れているように、水蒸気のレベルが、水分蓄積に影響を及ぼすことが本装置でも理解できる。

図18には、数値計算を行った結果を示してある。断熱材は、の左は通気層に接しており、図の白い部分が水分凝縮の大きな部位である。したがって、通気層側上部に、水分蓄積が起りやすく、通気層空気流速の増大に伴って、水分蓄積が抑制されていることがわかる。

3 おわりに

通気層には、水分蓄積を抑制する効果があると言われながら、その機構の詳細はあまり具体的なものにはなっておらず、効果的な応用をはかる上でも、明らかにすべき点が多いと思われま。

本文で引用させていただいた研究以外にも、多くの優れた研究が行われておりますが、紙面の都合上割愛させていただいたことをご了承下さい。

ペンを置くに当たって、貴重な研究成果を残され、ご研究半ばで、すでにご逝去された、斉藤 図先生、坂爪伸二先生に、心より感謝と哀悼の意を表したいと思います。

文献

- (1) 須貝 高, 木造住宅における断熱材の利用法とその効果, 空気調和と冷凍, (1983), 5.
- (2) Nield, D.A. and Bejan, A., "Convection in Porous Media", Springer-Verlag, (1992), 4.
- (3) 日本熱物性学会編, 熱物性ハンドブック, (1990), 養賢堂, 216.
- (4) 加賀秀治, "水はいたずら"といわれるが……, 建築技術, (1991), 119.
- (5) 小池武雄, 結露の発生, 建築技術, (1991), 123.
- (6) 大澤元毅, 住宅における結露対策, 建築技術, (1987), 12.
- (7) Seki, N., Fukusako, S., and Inaba, H., Heat Transfer in a Cavity Packed with Fibrous Glass, Trans. ASME J. of Heat Transfer, 100, (1978), 748.
- (8) Vafai, K and Belwafa, J.E., An Experimental Investigation of Heat Transfer in Enclosure Filled or Partially Filled with a Fibrous Insulation, Trans. ASME J. of Heat Transfer, Vol.112, (1990), 793.
- (9) Belwafa, J.E. and Vafai, K. An Experimental Investigation of Heat Transfer in a Partially Filled Horizontal Enclosure, Experimental Thermal and Fluid Science, Vol.4, (1991), 369.
- (10) Langlais, C., Hyrien, M., and Klarsfeld, S., Moisture Migration in Fibrous Insulating Materials Under the Influence of a Thermal Gradient and Its Effect on Thermal Resistance, Moisture Migration in Buildings, ASTM STP 779, (1980), 191.
- (11) Langlais, C., Hyrien, M., and Klarsfeld, S., Influence of Moisture on Heat Transfer Through Fibrous-Insulating Materials, Thermal Insulation, Materials, and Systems for Energy Conservation in the '80s, ASTM STP 789, (1981), 563.
- (12) Wijesudera, N.E., Hawlader, M.N.A., and Tan, Y.T., Water Vapour Diffusion and Condensation in Fibrous Insulations, Int. J. Heat Mass Transfer, Vol.32, No.10, (1989), 1865.
- (13) Wijesudera, N.E. and Hawlader, M.N.A., Effects of Condensation and Liquid Transport on the Thermal Performance of Fibrous Insulations, Int. J. Heat Mass Transfer, Vol.35, No.10, (1992), 2605.
- (14) Vafai, K. and Whitaker, S., Simultaneous Heat and Mass Transfer Accompanied by Phase Change in Porous Insulation, Trans. ASME J. of Heat Transfer, Vol.108, (1986), 132.
- (15) Vafai, K. and Sarkar, S., Condensation Effects in a Fi-

- brous Insulation Slab, Trans. ASME J. of Heat Transfer, Vol.108, (1986), 667.
- (16) Vafai, K. and Tien, H.C., A Numerical Investigation of Phase Change Effects in Porous Materials, Int. J. Heat Mass Transfer, Vol.32, No.7, (1989), 1261.
- (17) Murata, K., Heat and Mass Transfer with Condensation in a Fibrous Insulation Slab Bounded on One Side by a Cold Surface, Int. J. Heat Mass Transfer, Vol.38, No.17, (1995), 3253.
- (18) Tao, Y.-X., Besant, R.W., and Rezkallah, K.S., Moisture and Frost Accumulation in a Fibrous Insulation Slab, Heat Transfer and Flow in Porous Media, ASME HTD-Vol.156, (1990), 59.
- (19) Tao, Y.-X., Besant, R.W., and Rezkallah, K.S., Unsteady Heat and Mass Transfer with Phase Change in an Insulation Slab: Frosting Effects, Int. J. Heat Mass Transfer, Vol.34, No.7, (1991), 1593.
- (20) Tao, Y.-X., Besant, R.W., and Rezkallah, K.S., Modeling of Frost Formation in a Fibrous Insulation and on an Adjacent Cold Plate, Int. Comm. Heat Mass Transfer, Vol.18, (1991), 609.
- (21) Tao, Y.-X., Besant, R.W., and Rezkallah, K.S., Heat and Moisture Transport Through a Glass-Fiber Slab with One Side Subject to a Freezing Temperature, Water in Exterior Building Walls / Problems and Solutions, ASTM STP 1107, (1992), 92.
- (22) Tao, Y.-X., Besant, R.W., and Rezkallah, K.S., The Transient Thermal Response of a Glass-Fiber Insulation Slab with Hygroscopic Effects, Int. J. Heat Mass Transfer, Vol.35, No.5, (1992), 1155.
- (23) Simonson, C.J., Tao, Y.-X., and Besant, R.W., Thermal Hysteresis in Fibrous Insulation, Int. J. Heat Mass Transfer, Vol.36, No.18, (1993), 4433.
- (24) Mithzhell, D.R., Tao, Y.-X., and Besant, R.W., Air Filtration with Moisture and Frosting Phase Changes in Fiberglass Insulation - I. Experiment, Int. J. Heat Mass Transfer, Vol.38, No.9, (1995), 1587.
- (25) Mithzhell, D.R., Tao, Y.-X., and Besant, R.W., Air Filtration with Moisture and Frosting Phase Changes in Fiberglass Insulation - II. Model Validation, Int. J. Heat Mass Transfer, Vol.38, No.9, (1995), 1597.
- (26) 坂爪伸二, 工藤 均: 水分蓄積を伴う断熱材の熱伝導特性, 第6回日本熱物性シンポジウム講演論文集, (1985), 125.
- (27) 坂爪伸二: 断熱材の凍結による性能低下, 「寒冷地における凍結問題について」, 日本機械学会北海道支部講義会資料, (1989), 43.
- (28) 井上貞弘, 水と寒さによる障害, 建築技術, (1991), 137.
- (29) 斉藤 図, 鎌田紀彦, 工藤孝行, 断熱壁内における熱及び水分移動と蓄積に関する研究, 第2回寒地環境工学合同シンポジウム講演論文集, (1988), 49.
- (30) 斉藤 図, 鎌田紀彦, 岸浪紘機, 戸倉郁夫: 断熱壁内における熱及び水分移動と蓄積に関する研究(壁内空気層の水分凝縮抑止効果について), 第3回寒地環境工学合同シンポジウム講演論文集, (1989), 49.
- (31) Saito, H., Kamada, Kudo, T., and Kishinami, An Analytical Study on Moisture Transfer and Accumulation in Insulation Walls, Proceedings of International Symposium on Cold Regions Heat Transfer, (1989), 239.
- (32) 河合洋明, 岡垣 理, 福迫尚一郎, 除湿機能を有する断熱材の熱および物質移動, 北海道工業大学研究紀要, 第19号, (1991), 19.
- (33) 河合洋明, 岡垣 理, 福迫尚一郎, 除湿機能を有する断熱材の熱および物質移動, 日本冷凍協会論文集, Vol.9, No.1, (1992), 25.
- (34) 河合洋明, 岡垣 理, 福迫尚一郎, 通気層に接する多孔質層の熱および物質移動に関する実験的研究, 日本冷凍協会論文集, Vol.13, No.3, (1996), 25.
- (35) 河合洋明, 岡垣 理, 福迫尚一郎, 通気層に接する多孔質層の熱および物質移動, 北海道工業大学研究紀要, 第22号, (1994), 115.

建築壁体の熱・湿気移動解析

Analysis of Heat and Moisture Transfer through Building Wall

尾崎 明仁 (福岡大学工学部建築学科)

Akihito OZAKI (Department of Architecture, Faculty of Engineering, Fukuoka University)

1. はじめに

建築では、材料内や空気中の水分を総称して湿気という。湿気は、壁体や室内空気中で熱との複合移動を生じ、建物の耐久性と住環境に大きく影響する。例えば、カビや腐朽による躯体材料の劣化は、壁体の温湿度変動に原因があり、外界気象条件や室内空気温湿度の他、断熱材の種類・位置、防湿層・通気層の有無などの壁体構成と関係がある。また、換気、壁体の吸放湿、室内での発生水分は、室内湿度を変化させ快適性を左右する。したがって、耐久性の向上を目的とした壁体の防露設計や住環境の予測には、熱・水分移動の把握が必要となる。

建築の水分問題は、大別すれば床下や壁体の防露・防乾と室内湿度調整であり、主に水蒸気移動に原因がある。そこで、ここでは蒸気拡散域 (hygroscopic 域) を対象として^{注1)}、水分ポテンシャル¹⁾を用いた壁体の熱・湿気複合移動解析モデル²⁾について概説し、模型実験によりその妥当性を検証する。次に、建築における熱・水分移動問題の一例として、防露設計を目的とした外壁温湿度の実用計算を示す。

2. 熱・湿気複合移動解析モデル

多孔質体内の水分収支式は、質量保存より次式で表される。

$$\frac{\partial W}{\partial t} + \nabla J_w = 0 \quad (1)$$

ここで、 J_w は単位面積当たりの水分流量、 W は単位容積当たりの水分重量である。水分ポテンシャル μ_w ^{注2)} を水分流 (湿流) の駆動力^{注3)} とし、多孔質体内は等圧であると仮定すると、 J_w は次式で求められる。

$$J_w = -\lambda' \nabla \mu_w \quad (2)$$

λ' は水分ポテンシャル勾配に対する拡散係数 (水分伝導率) で、液相水分流が無視できる Hygroscopic 域では定数として近似できる^{注4)}。また、 W は多孔質体内の気相水分と液相水分の和として次式で与え

られる。

$$W = \rho_{gw} \psi + \rho_{lw} \phi \quad (3)$$

ψ と ϕ は多孔質体の空隙率と含水率で、 ρ_{gw} と ρ_{lw} は容積絶対湿度と液水の比重である。式(2)、(3)を式(1)に代入し、 λ' を定数とすると、

$$\frac{\partial \rho_{gw} \psi}{\partial t} + \frac{\partial \rho_{lw} \phi}{\partial t} = \lambda' \nabla^2 \mu_w \quad (4)$$

が導かれる。式(4)の左辺第2項は、 ϕ を μ_w の関数とし、さらに水分ポテンシャルの定義式^{注2)}を用いれば、

$$\frac{\partial \rho_{lw} \phi}{\partial t} = \rho_{lw} \left(\frac{\partial \phi}{\partial \mu_w} \frac{\partial \mu_w}{\partial t} + \frac{\partial \phi}{\partial \mu} \frac{\partial \mu}{\partial t} \right) \quad (5)$$

$$\mu = RT \ln \frac{P_w}{P_s} \quad (6)$$

となる。ただし、 $\partial \phi / \partial \mu_w = 0$ であるから ϕ は μ の関数^{注5)} として与えられ、Hygroscopic 域の水分収支式は次式で表される^{注6)}。

$$\frac{\partial \rho_{gw} \psi}{\partial t} + \rho_{lw} \frac{\partial \phi}{\partial \mu} \frac{\partial \mu}{\partial t} = \lambda' \nabla^2 \mu_w = \lambda' \nabla^2 \mu_w^o + \lambda' \nabla^2 \mu \quad (7)$$

$\rho_{gw} \ll \rho_{lw}$ であるので、空隙が少ない一般材料では気相水分の蓄積量 $\partial \rho_{gw} \psi / \partial t$ は無視でき、式(8)が得られる。

$$\rho_{lw} \frac{\partial \phi}{\partial \mu} \frac{\partial \mu}{\partial t} = \lambda' \nabla^2 \mu_w = \lambda' \nabla^2 \mu_w^o + \lambda' \nabla^2 \mu \quad (8)$$

熱収支式は、単位容積当たりの多孔質体内のエンタルピー H 、熱流 q を用いて次式で表される。

$$\frac{\partial H}{\partial t} + \nabla q = 0 \quad (9)$$

多孔質体内は等圧であると仮定し、Hygroscopic 域のみを対象とすれば、式(9)は次のように変形できる。

$$C \rho \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda \nabla^2 T + r \cdot r_{gl} \quad (10)$$

ここで、 C, λ, ρ は多孔質体の比熱、熱伝導率、比重で、 r は相変化熱 (吸着熱) である。 r_{gl} は単位容積当たりの多孔質体内における気相・液相水分の

相変化量で、式(11)で与えられる。

$$r_{gl} = \lambda \nabla^2 \mu_w - \frac{\partial \rho_{gw} \psi}{\partial t} \quad (11)$$

したがって、Hygroscopic域の熱収支式は次式で表される。

$$C\rho \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda \nabla^2 T + r \left(\lambda \nabla^2 \mu_w - \frac{\partial \rho_{gw} \psi}{\partial t} \right) \quad (12)$$

高温の場合を除けば ρ_{gw} は非常に小さく、また一般材料の空隙率 ψ は小さいので、 $\partial \rho_{gw} \psi / \partial t$ は無視でき式(13)が得られる。

$$C\rho \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda \nabla^2 T + r \cdot \lambda \nabla^2 \mu_w \quad (13)$$

境界条件は、式(14)、(15)で与えられる。

$$-\lambda \frac{\partial \mu_w}{\partial n} = \alpha' (\mu_{wa} - \mu_{ws}) \quad (14)$$

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial n} - r \cdot \lambda' \frac{\partial \mu_w}{\partial n} = \alpha_c (T_a - T_s) + r \cdot \alpha' (\mu_{wa} - \mu_{ws}) + q_s \quad (15)$$

ここで、 n は境界面の内向き法線ベクトル、 α' は水分ポテンシャル差に対する水分伝達率、 μ_{wa}, μ_{ws} と T_a, T_s は空気と境界面の水分ポテンシャルと温度、 q_s は放射受熱量である。

なお、外力場の平衡状態は、化学ポテンシャル μ に外力場のポテンシャル Ψ を加えた $\tilde{\mu} = \mu + \Psi$ が全系で同じ場合に満足される。したがって、外力場では μ_w の代わりに $\tilde{\mu}_w = \mu_w + \Psi$ を駆動ポテンシャルとする。

3. 壁体の熱・湿気移動解析

3.1 模型室

図1に模型室の平面・断面を示す。模型室は2室

構成で、間仕切り壁の中央に試料 (400×400×100mm) を設置できる。本実験では、透湿シートで構成した空気層および4枚重ねにした25mm厚のグラスウール(96 kg/m³)を試料とした。模型室内の法は、1室は600×900×900mm、2室は960×900×900mmで、室内はアルミ箔付きアスファルトフェルトで仕上げている。模型室内は完全に密閉され、試料部分を除く間仕切り壁は断熱断湿されている。1室天井は水槽で構成されており、恒温水槽からの循環水により冷却できる。また、1室床と2室床・天井には面状発熱体を設置しており、1、2室を加熱あるいは冷却することで両室の空気温度を任意に設定できる。2室天井と1、2室側壁は合板(5mm)で構成されているが、パネル(合板3mm付きフォームポリスチレン80mm)を取り付けることで断熱性を強化できる。間仕切り壁に対面する2室側壁にはアクリル板(10mm)を使用しており、模型室外側のアクリル板近くに設置した模擬太陽光源(メタルハライドランプ6燈)を使用することで、アクリル板を透過した模擬太陽光により試料を照射加熱できる。なお、室内湿度は飽和塩溶液で制御し、室内はプロペラで攪拌する。

3.2 空気層の透湿実験

模型室内の温湿度をほぼ一定(24℃, 90%)にした後に、2室のみ約42℃まで加熱した。室内湿度は1室のみ飽和塩溶液(KNO₃)で制御しており、2室に加湿源はない。図2、3に模型室および空気層の温湿度と水分ポテンシャルの経時変化、および加熱後の定常状態における湿気平衡関係⁽⁷⁾を、図4に初期状態から加熱後の定常状態に至る模型室内の湿流の模式図を示す。

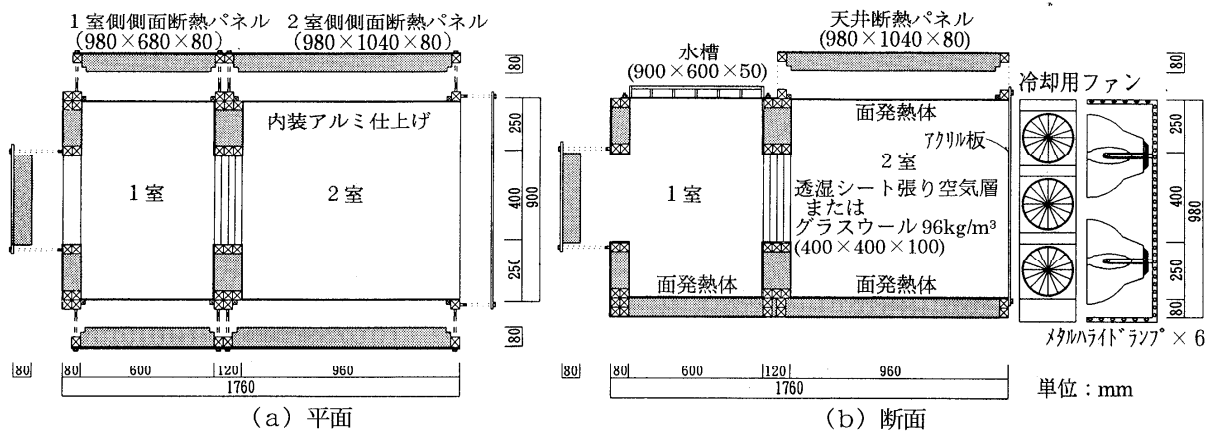


図1 模型室

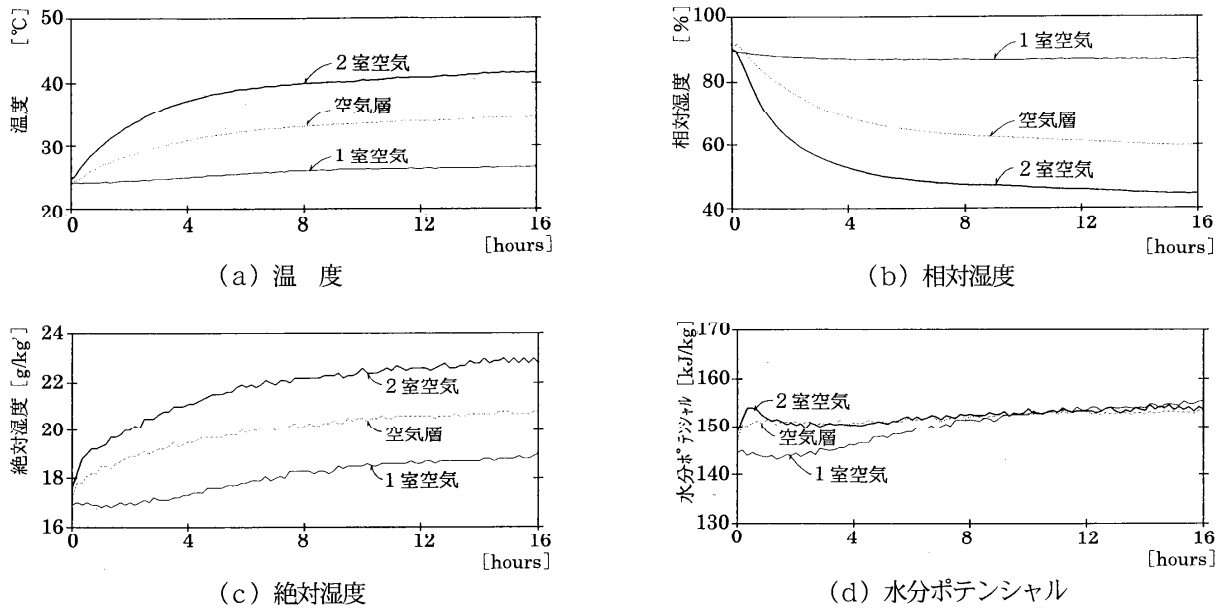
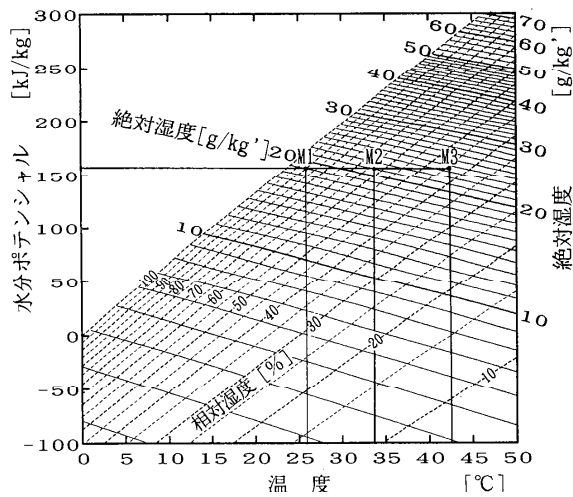


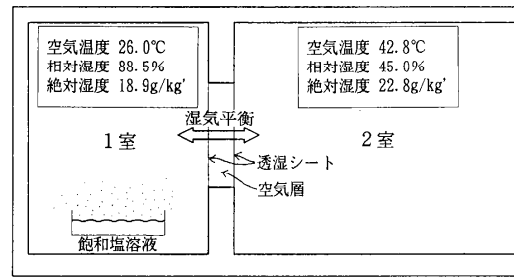
図2 空気層の透湿実験



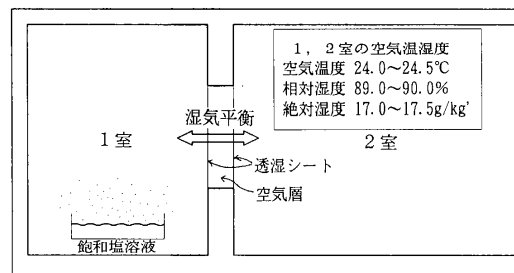
測定点	空気温度	相対湿度	絶対湿度
M1; 1室	26.0°C	88.5%	18.9g/kg'
M2; 空気層	34.5°C	59.8%	20.7g/kg'
M3; 2室	42.8°C	45.0%	22.8g/kg'

図3 湿気平衡関係(水分ポテンシャル線図)

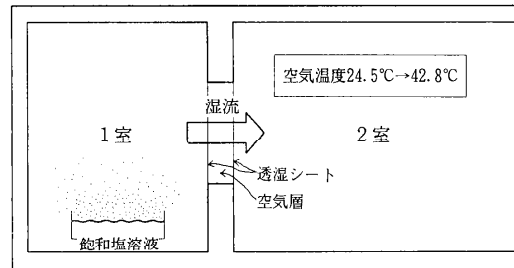
加熱後に、2室空気の相対湿度は約45%まで低下するのに対して、絶対湿度は約5.5g/kg'も上昇し定常値は22.8g/kg'を示す。2室には加湿源がないため、絶対湿度の上昇は1室からの貫流水分によると考えられる。一方、1室空気の相対湿度はほぼ90%で一定に制御されているが、温度は2室加熱後に約2.0°C上昇し、それともない絶対湿度も約2.0g/kg'上昇している。しかし、1室空気の



(a) 初期状態



(b) 過渡状態



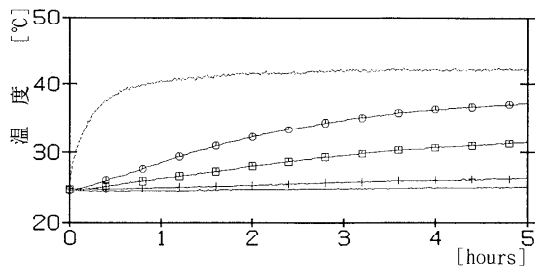
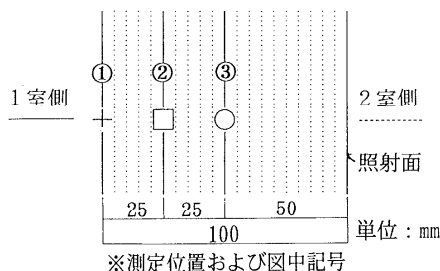
(c) 加熱後の定常状態

図4 湿流の模式図

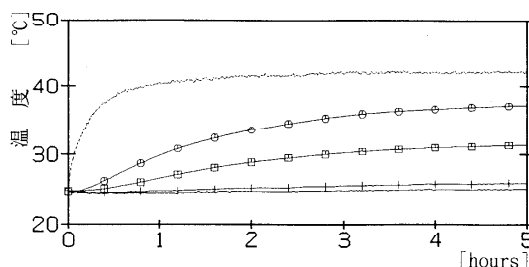
表1 計算に用いた物性値

物性値	
λ	0.030 [W/(m·K)]
λ'	6.500×10^{-13} [kg/(m·s·(J/kg))]
α'	3.991×10^{-10} [kg/(m ² ·s·(J/kg))]
$\partial\phi / \partial\mu$	1.552×10^{-6} [kg/(m ³ ·(J/kg))]

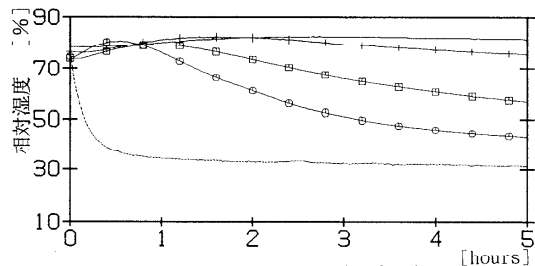
λ : 熱伝導率, λ' : 水分伝導率,
 α' : 水分伝達率, $\partial\phi / \partial\mu$: $\phi - \mu$ 関係



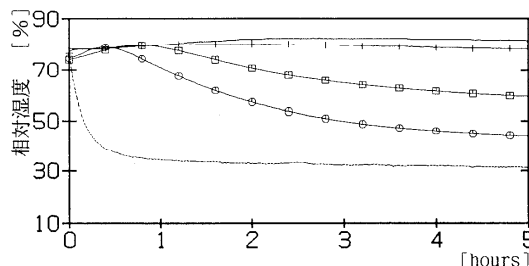
(a) 温度 (測定値)



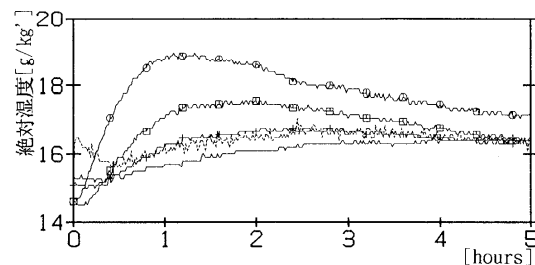
(d) 温度 (計算値)



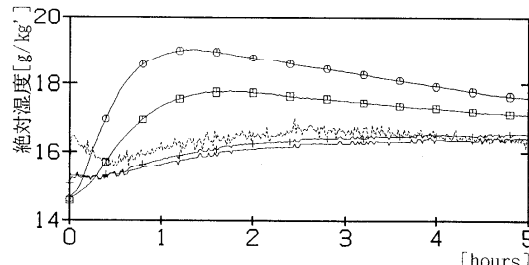
(b) 相対湿度 (測定値)



(e) 相対湿度 (計算値)



(c) 絶対湿度 (測定値)



(f) 絶対湿度 (計算値)

図5 試料(グラスウール)の照射加熱実験

絶対湿度は 18.9g/kg' を示す程度で、2室空気より約 4.0g/kg' も低い値を示す。湿流は絶対湿度勾配(差)によって生じる^{注8)}と仮定すれば、温度差がある場合でも湿気平衡後には1室と2室の絶対湿度は同じ値を示すはずであるが、本実験はそれとは矛盾する結果を示している。これに対して、湿気平衡後の1室と2室空気の水分ポテンシャルはほぼ一致している。なお、2室加熱後の約7時間は1室より2室の水分ポテンシャルの方が高く、その高低関係は湿流方向と反対であるが、両室の値は相対湿度で約4%の範囲内で逆転する程度の

差異であり、これは測定誤差によると考えられる。また、空気層の温度、相対湿度、絶対湿度は、いずれも1室空気と2室空気との値を示すのに対し、水分ポテンシャルは常に2室とほぼ同じ値である。つまり、温度勾配(差)がある場合は、湿気平衡が成立しても絶対湿度には勾配(差)が生じるのに対し、水分ポテンシャルは一律な値を示す。このことから、水分ポテンシャルは湿流の駆動力として妥当であると考えられる。

3.3 試料の照射加熱実験

模型室内の温湿度をほぼ一定(25°C, 75%)にし

た後に、2室側を照射加熱した。室内湿度は1室のみ飽和塩溶液 (NaCl) で制御しており、2室に加湿源はない。図5(a)~(c)に実験による模型室および試料内部の温湿度の経時変化を、図5(d)~(f)と表1に模型室の温湿度を入力値として計算した試料内部の温湿度と、計算に使用した物性値を示す。試料内部の絶対湿度は、照射面に近い測定点③、②、①の順に高い値を示す。それらの差は、照射開始後の約2時間が特に大きく、その後は時間経過とともに次第に小さくなる。照射直後に試料内部の絶対湿度差が著しいのは、温度上昇にともなう試料からの脱着水分量の差異によるもので、その後、それらの差が減少するのは試料から室内への放湿に起因すると考えられる。なお、計算値は、温度、相対湿度、絶対湿度のいずれも測定値と良く一致する。

4. 防露設計を目的とした建築外壁の温湿度計算

近年の住宅は、空調機器の普及にともない室内熱環境の改善および暖冷房負荷の低減を目的として断熱気密化される傾向にあり、温暖湿潤地域でもR-2000に代表される寒地住宅が建設されつつある。しかし、これらの住宅では夏季昼間の冷房時に、日射受熱による躯体からの放湿、いわゆる蒸し返し現象により壁体内部が高湿化する危険がある(躯体や断熱材から放出された湿気が拡散し、内装材裏面‘冷房の影響を受ける低温部位’で結露する³⁾)。

通年に亘り外気湿度が低い寒地の住宅では、室内での発生水分が原因で生じる冬季の結露(室内表面結露と外装材裏面の壁体内部結露)のみが問題となるため、それらは計画換気による屋内から外気への湿気の排出、高断熱化による室内表面温度の低下抑

制、通気構法(外壁外周部に設けた通気層に外気を導入する構法)による壁体内部から外気への湿気の排出、高气密化(内装材裏面の気密防湿シート施工)による壁体内部への透湿抑制により防止できる。温暖湿潤地域でも寒地住宅の導入にともないこれらの方法が採用されている。しかし、外気が高湿になる蒸暑季間には、通気層からの湿気の流入により壁体内部が高湿化することや、内装材裏面の気密防湿シートが夏季内部結露をより助長することなど、寒地住宅の断熱気密仕様では防止できない湿害の発生が危惧される^{注9)}。

そこで、温暖湿潤地域における防露設計の一例として、外壁仕様(通気層の有無、内装裏面部材‘気密シート’の透湿抵抗)の違いが壁体内部湿度に及ぼす影響について明らかにする。

4.1 建築モデルと計算方法

熱・湿気複合移動解析モデルを用いた数値シミュレーション⁴⁾により、壁体の防露仕様について検討する。図6に戸建住宅1階の1室を想定した建築モデルを、図7と表2に外壁モデルI、IIの構成と仕様(内装裏面部材‘気密シート’の透湿係数が異なるタイプ1~5)を示す。モデルIは壁体内部が密閉される在来壁体、モデルIIは外装材裏面に通気層(18mm厚)のある通気壁体^{注10)}である。モデルI、IIの断熱材はいずれもグラスウール(10kg/m³)であるが、外装裏面部材は一般的な施工例に従いモデルIはアスファルトフェルト(20kg/m³)、モデルII(通気層内側)は透湿シートとする。

福岡の標準気象データを使用して建築モデルの温湿度を計算し、その結果を入力値として壁体の内部温湿度を計算する。表3に建築モデルの月別の設

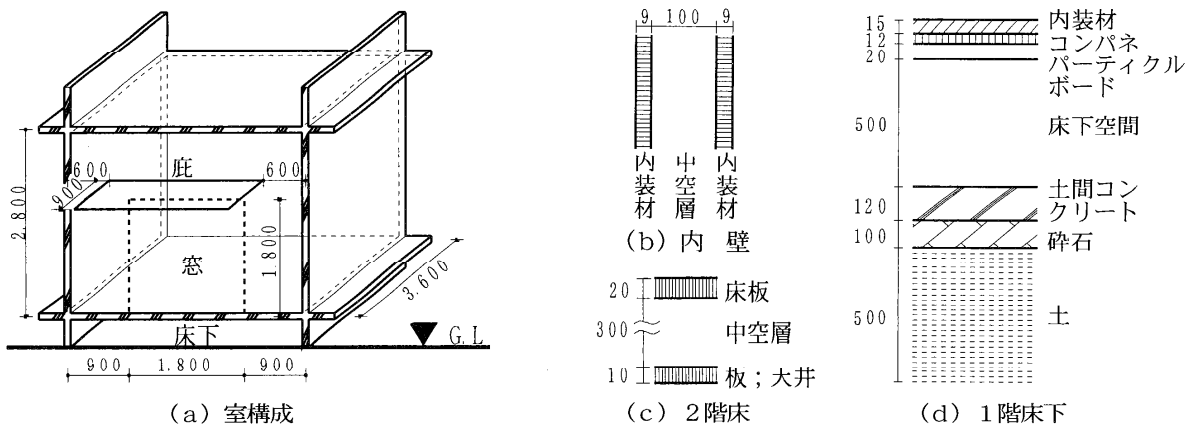
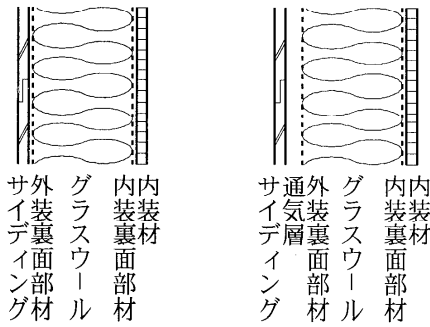


図6 建築モデル



(a) 在来壁体モデルI (b) 通気壁体モデルII
図7 外壁モデル

表2 外壁モデルの仕様

壁体モデル	タイプ	外装裏面部材 [透湿係数 kg/(m ² ·h·mmHg)]	内装裏面部材 (気密シート) [透湿係数 kg/(m ² ·h·mmHg)]	透湿抵抗比
在来壁体モデルI	1	アスファルトフェルト [2.150×10 ⁻⁴]	ポリエチレンフィルム(0.05mm) [4.416×10 ⁻⁶]	1:48
	2		アスファルトフェルトコートクラフト紙 [6.000×10 ⁻⁵]	1:3.6
	3		アスファルトフェルトの1/2 [1.075×10 ⁻⁴]	1:2
	4		アスファルトフェルト [2.150×10 ⁻⁴]	1:1
	5		アスファルトフェルトの10倍 [2.150×10 ⁻³]	1:0.1
通気壁体モデルII	1	透湿シート [4.565×10 ⁻³]	ポリエチレンフィルム(0.05mm) [4.416×10 ⁻⁶]	1:1029
	2		アスファルトフェルトコートクラフト紙 [2.150×10 ⁻⁴]	1:76
	3		透湿シートの1/10 [4.565×10 ⁻⁴]	1:10
	4		透湿シートの1/2 [2.283×10 ⁻³]	1:2
	5		透湿シート [4.565×10 ⁻³]	1:1

表3 建築モデルの月別設定温度(終日暖冷房)

月	1~3	4	5	6~9	10	11	12
最高温度 [°C]	—	—	—	26	—	—	—
最低温度 [°C]	22	—	—	—	—	—	22
最高相対湿度 [%]	—	—	—	70	—	—	—
最低相対湿度 [%]	50	—	—	—	—	—	50

表4 在室者スケジュール

時間	1~6	7	8	9~18	19	20	21~23	24
人数	0	1	2	1	1	2	2	0
作業強度	—	2	2	1	2	2	1	—

※作業強度(1:静座, 2:軽動作)

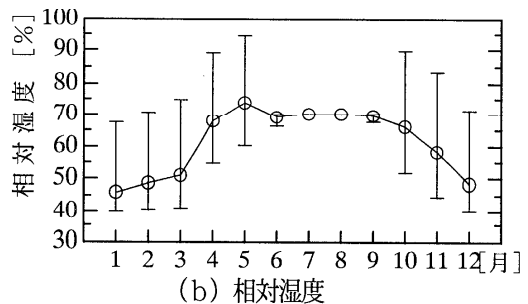
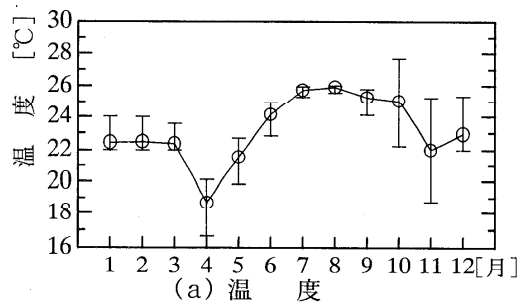


図8 室内温湿度の月平均値と日最高・最低値の月平均値

定温湿度を、表4に在室者スケジュールを示す。6~9月は終日冷房(26°C以下)、12~3月は終日暖房(22°C以上)とし、室内湿度は実質の冷暖房時間のみ制御(冷房時70%以下、暖房時50%以上)する。図8に福岡の室内温湿度の月平均値と日最高・最低値の月平均値を示す。

4.2 防露計算例

図9~16に、在来壁体モデルIと通気壁体モデルIIの福岡(南壁)における冬季と夏季の壁体内部湿度の計算結果を示す。在来壁体モデルIのタイプ1~5(図中ではモデルI-1のように略記)の冬季(外装材側)および夏季(内装材側)の内部相対湿度を比較すると、冬季はタイプ5~1の順に、夏季はタイプ1~5の順に高い値を示し、内装裏面部材

の透湿抵抗が冬季は小さいタイプで、夏季は大きいタイプで高温になる。タイプ1~5の外装裏面部材(アスファルトフェルト)と内装裏面部材の透湿抵抗の比は、順に1:48, 1:3.6, 1:2, 1:1, 1:0.1である。外装材側に比べ内装材側の透湿抵抗が大きいタイプ1~3では、冬季内部結露の危険性は極めて少ない。例えば、1~2月に外装材裏面の相対湿度が90%以上になる割合は、タイプ1~3の順に0%, 約2%, 約4%である。しかし、7~8月にタイプ1~3の内装材裏面の相対湿度が90%以上になる割合は順に29%, 22%, 19%と多く、いずれのタイプも内部結露(相対湿度100%)が発生している。夏季に内部結露を生じないのは、内装材側の透湿抵抗が外装材側より小さいタイプ5のみであ

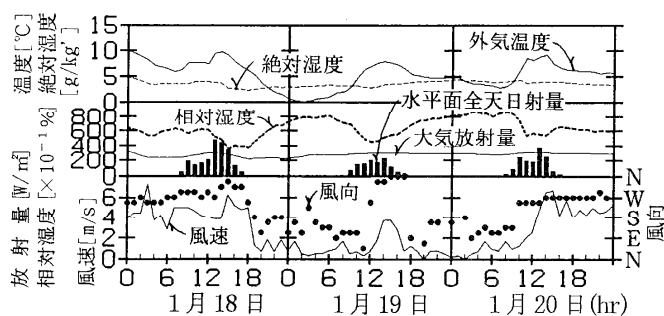


図9 標準気象データ (冬季)

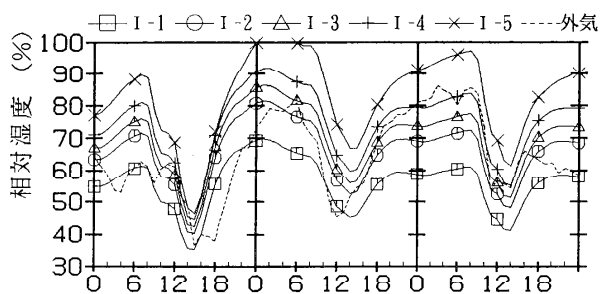


図10 在来壁体モデルIの外装材裏面の相対湿度

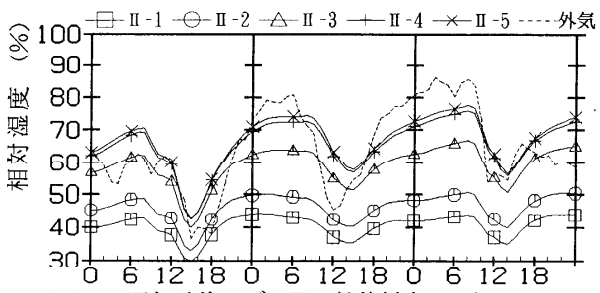
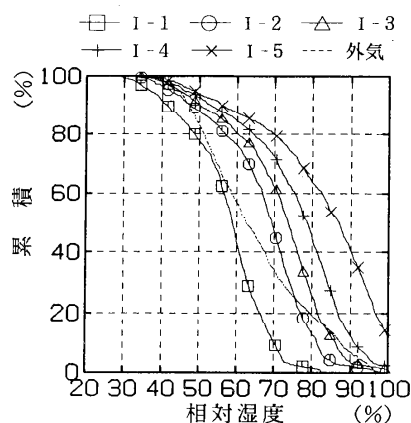
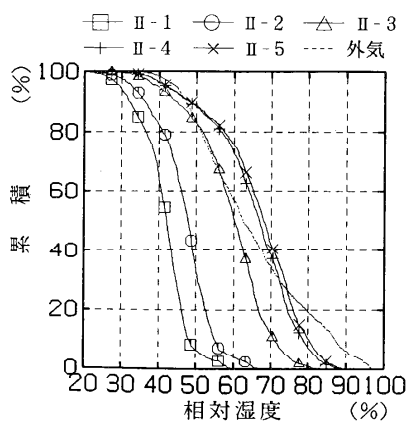


図11 通気壁体モデルIIの外装材裏面の相対湿度



(a) 在来壁体モデルI



(b) 通気壁体モデルII

図12 外装材裏面の相対湿度の累積相対度数 (1~2月)

る。したがって、モデルIのタイプ1~5は冬季と夏季のいずれかに（あるいは冬季と夏季のいずれにおいても）内部結露を生じており、在来壁体で壁体内部の湿害を通年に亘り防止することは困難である。「住宅の新省エネルギー基準と指針⁵⁾」では、第IV地域における外装材側と内装材側の透湿抵抗の比を1:2と定めているが、この基準を在来壁体に適用した場合は、夏季に壁体内部結露が起きる可能性が非常に高い。

通気壁体モデルIIのタイプ1~5の冬季（外装材側）および夏季（内装材側）の内部相対湿度を比較すると、在来壁体モデルIと同じように、冬季はタイプ5~1の順に、夏季はタイプ1~5の順に高い値を示す。ただし、1~2月に外装材裏面の相対湿度が90%以上（80%以上）になる割合はタイプ5でも0%（約11%）であり、通気壁体により福岡では冬季湿害の危険性が激減する。ま

た、通気壁体モデルの夏季の内部相対湿度は、在来壁体モデルより遥かに低い。例えば、内装裏面部材にポリエチレンフィルムを使用したタイプ1について比較すると、7~8月に90%以上になる割合は、在来壁体モデルは約29%であるのに対し、通気壁体モデルは約15%である。しかし、内装裏面部材の透湿抵抗が大きいタイプ1~3では内部結露が発生している。また、タイプ1~3は相対湿度80%以上の高湿域の割合がいずれも20%以上と多く、カビや腐朽菌が繁殖する危険性が高い。通気壁体モデルのタイプ1~5の外装裏面部材（透湿シート）と内装裏面部材の透湿抵抗の比は、順に1:1029, 1:76, 1:10, 1:2, 1:1である。タイプ4, 5の内部相対湿度が90%以上（80%以上）になる割合は、冬季は0%（約8%）、0%（約11%）、夏季は約2%（約18%）、約1%（約17%）であり、通年に亘り湿害の危険性が低いことから、福岡で通気

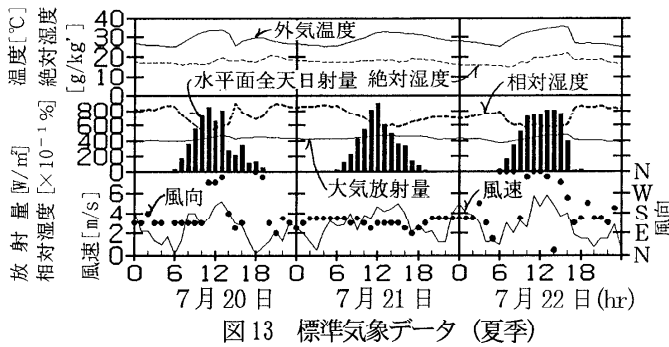


図13 標準気象データ (夏季)

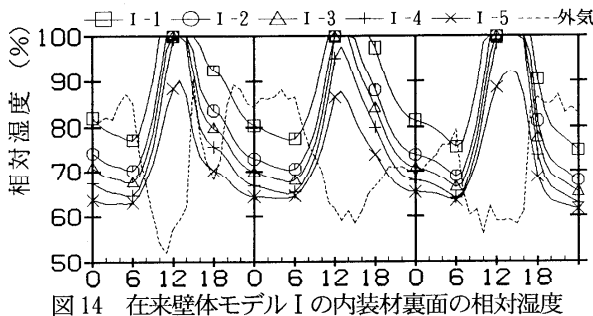


図14 在来壁体モデルIの内装材裏面の相対湿度

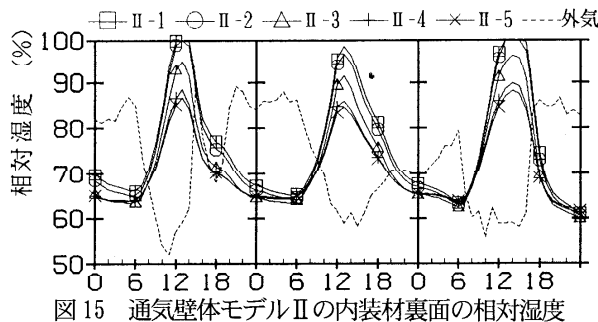
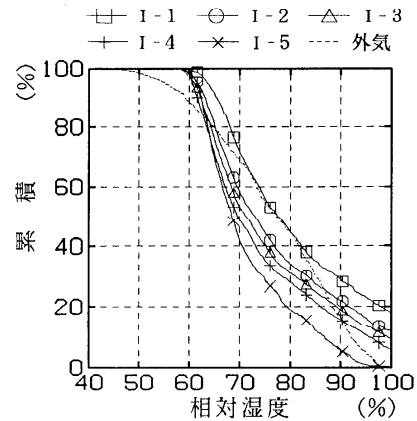
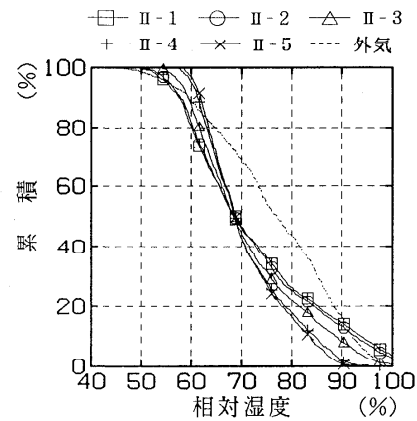


図15 通気壁体モデルIIの内装材裏面の相対湿度



(a) 在来壁体モデルI



(b) 通気壁体モデルII

図16 内装材裏面の相対湿度の累積相対湿度数 (7~8月)

壁体を採用する場合は内装裏面部材の透湿抵抗を外装裏面部材の2倍以下の値とする仕様が適している。

5. むすび

建築における熱と水分の同時移動現象は、躯体の吸放湿、雨水の浸透、基礎や地盤の凍結・融解、植栽の蒸発など多岐にわたり、水分は気相・液相・固相に変化するが、主な水分問題は防露・防乾と室内湿度調整であり蒸気拡散に起因するため、本稿では hygroscopic域を対象に説明した。まず、水分ポテンシャル(湿流の駆動力)を用いた熱・湿気複合移動解析モデルについて概説し、次に室内の温湿度制御と模擬太陽光の照射が可能な模型室での実験を基に、水分ポテンシャルの妥当性と数式モデルの精度を検証した。また、通年に亘る外壁温湿度の計算結果から、温暖湿润地域における防露設計例を示した。

注

1) 建築の水分問題は、主に防露・防乾と室内湿度調整であり蒸気拡散が対象となるが、他にも雨水の浸透や凍結・融解、植栽の蒸発を利用したパッシブクーリングなど、液相・個相水分の移動についても数多く研究されている^{6)~8)}。

2) 湿り空気は多成分系であるが、水分を除けばその成分組成はどこでもほぼ同じで、また水分が相変化しても他成分の組成に影響しないので、空気中の水分は仮想的に気相・液相水分が共存する単一成分系と考えられる。そこで、熱力学関数(化学ポテンシャル)を水蒸気に応用して水分ポテンシャル(湿流の駆動力)が定義できる¹⁾。

$$\mu_w(p, T) = \mu_w^o(T) + RT \ln \frac{p_w}{p_s} \quad (16)$$

$$\mu_w^o(T) = 6.44243 \times 10^5 + c_{p,w}(T - 273.15) - Tc_{p,w} \ln \frac{T}{273.15} + RT \ln \frac{P_s}{1.01325 \times 10^5} \quad (17)$$

ここで、 p_s と p_w は飽和水蒸気圧と水蒸気分圧である。式(16)、(17)は、水蒸気の化学ポテンシャルを示す式(18)において、

$$\mu_w(p, T) = h_{o,w} - Ts_{o,w} + \int_{T_o}^T c_{p,w} dT - T \int_{T_o}^T \frac{c_{p,w}}{T} dT + RT \ln \frac{p}{p_o} + RT \ln \frac{p_w}{p} \quad (18)$$

定圧比熱 $c_{p,w}$ を定数、基準温度 T_o を摂氏 0°C ($=273.15\text{K}$)、基準圧力 p_o を1気圧 ($=1.01325 \times 10^5 \text{ Pa}$)、基準エンタルピーと基準エントロピーを式(19)で与え、

$$h_{o,w} - T_o s_{o,w} = 6.44243 \times 10^5 \quad (19)$$

p を温度 T における飽和水蒸気圧 p_s に置き換えることにより導かれる。なお、オンサーガーの相反定理⁹⁾より、水分ポテンシャルは非等温場でも湿流の駆動力となることが証明される^{注3)}。

3) 拡散による内部エネルギーの流れ J_Q から物質流 J_i による熱流 (物質によって運ばれる熱) を引いたものを J'_Q とする。

$$J'_Q = J_Q - \sum_{i=1}^m J_i H_i \quad (20)$$

非平衡熱力学の仮定に基づき流束 J_α と駆動力 X_β に線形則が成り立つとすると、現象係数 $l_{\alpha\beta}$ と X_β の積として現象方程式が与えられる。

$$J_\alpha = \sum_{\beta} l_{\alpha\beta} X_\beta \quad (\alpha, \beta = 1, 2, \dots) \quad (21)$$

J'_Q と J_i が共存する場合は次式が得られる。

$$J'_Q = l_{QQ} X_Q + l_{Qi} X_i \quad (22)$$

$$J_i = l_{iQ} X_Q + l_{ii} X_i$$

オンサーガーの相反定理⁹⁾に従えば、交差係数には次の関係が成り立つ。

$$l_{Qi} = l_{iQ} \quad (23)$$

ここで、 J'_Q と J_i を空気中の熱流と湿流とすると $l_{Qi} = l_{iQ} = 0$ となるので、これらの駆動力は式(24)、(25)で表される。

$$X_Q = \frac{d}{dx} \left(\frac{1}{T} \right) \quad (24)$$

$$X_i = -\frac{1}{T} \left(\frac{d\mu_w}{dx} \right)_T \quad (25)$$

このとき、 l_{QQ}/T^2 を熱伝導率 λ とすれば J'_Q の駆動

力は温度勾配 T となり、 l_{ii}/T を μ_w に対する拡散係数 λ' (水分伝導率) とすれば J_i の駆動力は化学ポテンシャル勾配となる。

4) 水分ポテンシャル μ_w に対する水分伝導率 λ' は、現象係数 l_{ii} を温度 T で除して与えられるため^{注3)}、常温域における λ' の温度依存性は僅かで定数として近似できる。

5) 細孔の半径を d 、細孔内の蒸気圧を p 、液体面の飽和蒸気圧を p_s 、液体のモル体積を V_m 、液体の表面張力を γ 、液体と細孔壁の接触角を θ とすると、Kelvin 式より μ と細孔径の関係が導かれる¹⁰⁾。

$$\mu = RT \ln \left(\frac{p}{p_s} \right) = -\frac{2\gamma V_m}{d} \cos \theta \quad (26)$$

液体は細孔の小さいところから詰まると仮定すると、細孔径分布から含水率 ϕ と μ の関係が求められる。

6) 熱・湿気 (水分) 複合移動解析モデルは、他にも湿流の駆動力に水蒸気圧を用いた式や、飽和水分ポテンシャル μ_w^o が温度の関数となる^{注2)} ことから温度と μ を用いた式、 μ の代わりに含水率を用いた式が提案されている^{11), 12)}。

7) 図3は、水分ポテンシャルと温度、相対湿度、絶対湿度の関係を示す水分ポテンシャル線図である。なお、式(16)、(17)のガス定数 R は、

$$R = 83144 \left[\frac{\text{J}}{\text{mol} \cdot \text{K}} \right] / 18.016 \times 10^{-3} \left[\frac{\text{kg}}{\text{mol}} \right] = 46150 \left[\frac{\text{J}}{(\text{kg} \cdot \text{K})} \right] \quad (27)$$

で与え、定圧比熱 $c_{p,w} \left[\frac{\text{J}}{(\text{kg} \cdot \text{K})} \right]$ は次式で求めた。

$$c_{p,w} = (a + bT + cT^2) / (18.016 \times 10^{-3})$$

$$a = 3036, \quad b = 9.615 \times 10^{-3} \quad (28)$$

$$c = 1180 \times 10^{-7}$$

8) Hygroscopic域における水分流は、気相水分流 (湿流) であるため、防露設計や室内温湿度計算では一般的に蒸気拡散法則が適用され、湿流の駆動力として水蒸気圧 (あるいは絶対湿度) が用いられる。

9) 壁体内部結露には、冬季結露と夏季結露がある。両者とも断熱化により温度分布が著しい場合にその低温部で発生する。つまり、冬季内部結露は夜間の暖房時に壁体内部の外気側で、夏季内部結露は昼間の冷房時に壁体内部の室内側で発生することが多い。ただし、冬季内部結露は室内から壁体内部に侵入した湿気が原因で発生するのに対して、夏季内部結露

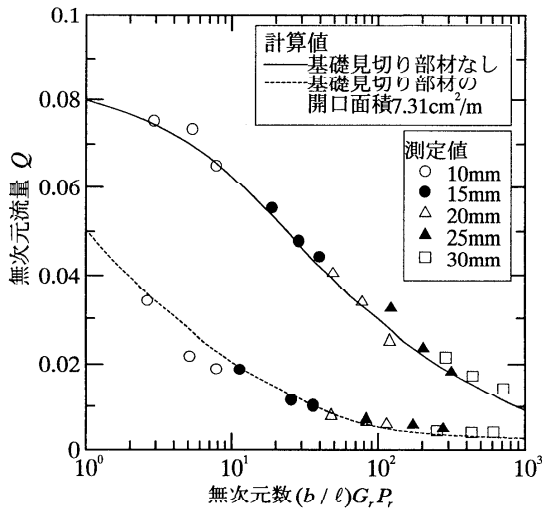


図17 無次元流量 Q と無次元数 $(b/l)G_r P_r$ の相関

は躯体が含む水分(日射受熱により躯体から放出される湿気の拡散,いわゆる蒸し返し)が原因で発生する。そのため,冬季内部結露の防止には,内装材側の防湿や壁体内部の通気(外装材裏面)が,夏季内部結露の防止には壁体内部における湿気拡散の防止(内部防湿材の施工など),内装材側の透湿(低温部位における湿気の停滞防止),湿気容量の大きい内装材の使用(吸湿による高湿化抑制)などが効果的である。ただし,冬季内部結露を防ぐために内装材側を防湿すると夏季内部結露を助長する場合があるため,壁体の仕様は通年に亘る防露の観点から気候特性を考慮して地域別に決定する必要がある。

10) 通気層の熱・水分収支は,式(29),(30)で与えられる。ここで,通気層の換気流量 mV_{ol} は,無次元流量 $Q = b\bar{u}/vG_r$ (\bar{u} :通気層内の平均流速, v :動粘性係数)と無次元数 $(b/l)G_r P_r$ (b :通気層厚さ, l :通気層高さ, G_r :グラスホフ数, P_r :プラントル数)の関係(図17参照)から求める¹³⁾。

$$c\rho V_{ol} \frac{dT}{dt} = \sum_{i=1,2} S\alpha_{c,i}(T_{s,i} - T_v) + c\rho mV_{ol}(T_o - T_v) \quad (29)$$

$$\rho_d V_{ol} \frac{dx}{dt} = \sum_{i=1,2} S\alpha_i(\mu_{w,s,i} - \mu_{w,v}) + \rho_d mV_{ol}(x_o - x_v) + D'_v(S_{v,in} + S_{v,out})(\mu_{w,o} - \mu_{w,v}) \quad (30)$$

c :湿り空気の比熱, m :換気回数, S :通気層の表面積, $S_{v,in}, S_{v,out}$:通気層流出入口の面積, V_{ol} :通気層

容積, x_o, x_v :周囲空気と通気層空気の絶対湿度, D'_v :水分ポテンシャル差に対する水分拡散係数, $\mu_{w,o}, \mu_{w,v}$:周囲空気と通気層空気の水分ポテンシャル, ρ, ρ_d :湿り空気と乾燥空気の比重

参考文献

- 1) 尾崎明仁, 他:水分ポテンシャルによる湿気移動解析 湿流の駆動力, 日本建築学会計画系論文集 第488号, pp. 17~24, 1996
- 2) 尾崎明仁, 他:水分ポテンシャルと熱・水分移動方程式, 日本建築学会九州支部研究報告 第34号・2, pp. 85~88, 1994
- 3) 須貝 高, 他:壁体の結露と防露仕様 結露および壁体内部の高湿化を防ぐために, 建築技術 No.561, pp. 101~109, 1996
- 4) 尾崎明仁, 他:吸放湿材料の性能評価と実用解析, 日本建築学会環境工学委員会熱環境小委員会 第26回熱シンポジウム 湿気の応用的諸問題, pp. 53~62, 1996
- 5) 建設省住宅局住宅生産課監修:住宅の新省エネルギー基準と指針, (財)住宅・建築省エネルギー機構, 1992
- 6) 例えば, 尾崎明仁, 他:建築外壁の温湿度変動に関する基礎研究, 日本建築学会計画系論文報告集 第451号, pp. 41~54, 1993
- 7) 例えば, 松本 衛, 他:地盤の凍結と融解過程の解析に関する研究, 日本建築学会計画系論文集 第482号, pp. 25~34, 1996
- 8) 例えば, 堀口 剛, 他:芝生植栽の水収支特性に関する実験研究 屋上芝生植栽の熱環境調整効果 第2報, 日本建築学会計画系論文集 第483号, pp. 73~79, 1996
- 9) A.Katchalsky, P.F.Curran:生物物理学における非平衡の熱力学, みすず書房, 1975
- 10) 近藤精一, 他:吸着の化学, 丸善, 1995
- 11) 松本 衛:建築壁体における熱・水分同時移動および水分蓄積に関する研究, 京都大学学位請求論文, pp. 150~191, 1978
- 12) 松本 衛, 他:新建築学大系 10 環境物理, 彰国社, 1984
- 13) 尾崎明仁, 他:通気層の熱・湿気移動解析 その1, 2, 日本建築学会九州支部研究報告 第35号・2, pp. 105~112, 1995

セラミックスの乾燥収縮シミュレーション

Simulation of Shrinkage Behavior during Drying of Ceramics

板谷 義紀, 架谷 昌信

(名古屋大学大学院工学研究科エネルギー理工学専攻)

Yoshinori ITAYA and Masanobu HASATANI

(Dept. Energy Engineering and Science, Nagoya University)

1. はじめに

乾燥プロセスは、周知のように熱と物質移動が同時に伴う固液分離操作である。一般には溶剤として水が用いられるが、その蒸発に要する潜熱は大きい。そのため、乾燥促進はエネルギー効率向上のためには必須の技術となる。しかし、これまで乾燥が製造プロセスの中心的操作に位置付けられることは少なく、また被乾燥物が多品種にわたっていることもあって、比較的地道な技術開発にとどまっている感がある。それでも、粉粒体の乾燥装置は、最近優れたものが開発されてきている。一方、セラミックスに代表される成形体の乾燥は、依然経験による操作が中心となっている。これは熱伝導問題と同様、成形体内の熱と水分移動抵抗または速度を成形体周りの雰囲気から直接制御することが困難である上に、粘土の乾燥収縮による割れや変形が製造効率に大きく影響され、これに対する安全性が最重要課題となるため、乾燥炉の操作方法が保守的かつ機密事項になりがちなのが大きな原因となっている。しかし、今後セラミックス材料の需要増大に伴い、形状が益々複雑化することが予想され、またこれらの乾燥時間の短縮および乾燥後の成形体形状の精密予測や型の設計を可能とするためには、乾燥時の応力・変形シミュレーション法の確立を図る必要がある。

本稿では、まず粘土の乾燥収縮機構および既往の熱・水分移動の理論的取り扱いを簡単に概説した上で、著者らの乾燥応力および変形挙動に関する研究について一部紹介する。

2. 乾燥収縮機構

粘土の乾燥収縮機構に関しては古くから研究が行われ、特に Norton and Johnson [1]以降、数多くの定量的評価についての研究が見受けられる[2,3]。これらによると、水分は粘土を構成する微粒子間隙に

保有されており、この水分の減少に伴い粒子間隙が狭くなるために、除去された水分に相当する体積だけ粘土の収縮が生じ、粒子間が相互に接触した時点で収縮も停止することが報告されている。このときの微粒子と微粒子とを引き離す(見方を変えれば微粒子同士をある間隙を保ったまま引き付けておく)ときの力は毛細管力であるキャピラリーまたは化学的なオスモティックサクションフォースによって説明されている。このようなサクションフォースを含水率と関連させつつ実測やモデル化した研究も数多く見受けられる[4,5]。上述の収縮挙動は実測によってもほぼ近似的に成立することが示されている。しかし、成形体の乾燥プロセスでは成形体内での伝熱抵抗のみならず水分移動抵抗により大きな含水率分布が必然的に形成されるため、すべての微粒子間隙が理想的に均一に減少し、同時にすべての粒子どうしが接触して収縮が停止することはありえない。しかもこの含水率分布による収縮の差異が内部応力を生成するため、収縮挙動はさらに複雑なものになる。著者らは[6]、図1に示すように、乾燥操作条件により球形に成形された粘土の収縮挙動が平均含水率だけの関数で一意的に表せないことを示した。したがって、乾燥収縮挙動を精密に予測するためには、乾燥過程の内部応力とも関連しつつ論じる必要がある。次章では、これまで提案されているモデルの概略について紹介する。

3. 乾燥収縮モデル

3. 1 熱・物質移動

乾燥は熱・物質同時移動現象であるため、それぞれについて以下のような基礎方程式が書ける。

$$c_p \rho_m \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot \mathbf{J}_h + \dot{q} + \Delta H_v \varepsilon_L \frac{\partial C}{\partial t} \quad (1)$$

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \nabla \cdot \mathbf{J}_m \quad (2)$$

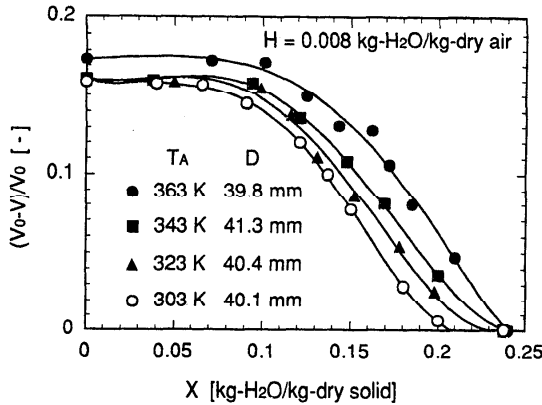


図1 乾燥収縮挙動に与える熱風温度の影響

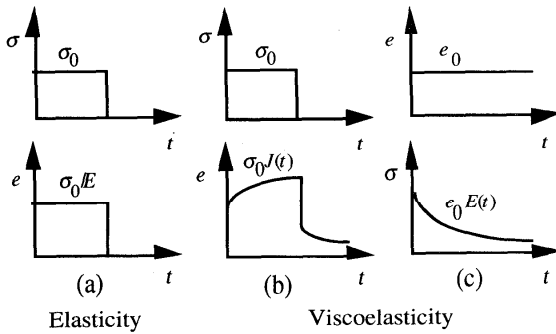


図2 弾性および粘弾性挙動

\dot{q} は、内部発熱速度、 ΔH_v は蒸発潜熱、 ϵ_L は水分移動速度に対する蒸発速度の割合を示す。Eq.(1)の右辺第3項は水分の内部蒸発による吸熱を表す。熱流束および物質移動流束は、一般に次式で与えられる。

$$\mathbf{J}_h = k_t \nabla T + k_c \nabla C + k_p \nabla p \quad (3)$$

$$\mathbf{J}_m = D_w \nabla C + D_l \nabla T + D_p \nabla p \quad (4)$$

上2式の右辺第1および2項は、それぞれ温度拡散および圧力拡散項である。粘土内部の水分は、先述したように間隙にサクシオンフォースにより保持されているため、その水分移動は水圧勾配を推進力として生じると考えることもできる。したがって、Eq.(4)右辺の第1、2項を無視しうるとすると、第3項に Darcy 則を適用して、Eq.(2)に代入すると、

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{k_s}{\mu_w} \nabla^2 p \quad (5)$$

が得られる。ここで、 k_s は透過係数、 μ_w は水の粘度である。サクシオンフォースに毛細管力を仮定すると、水圧 p は細孔構造と水分量に依存し、マクロ的

には含水率と収縮率または歪 e の関数で近似でき、次のように表される。

$$dp = v_1 dC + v_2 de \quad (6)$$

Eq.(6)を Eq.(5)に代入すれば、次式が得られる。

$$\frac{k_s}{\mu_w} \nabla^2 p = \frac{1}{v_1} \frac{\partial p}{\partial t} + \frac{v_2}{v_1} \frac{\partial e}{\partial t} \quad (7)$$

上式は、Biot[7]により一部異なる方法で誘導された水圧分布に関する方程式の一般形と同形である。

3.2 応力

粘土の内部応力に関しては、弾性、粘性および粘弾性モデルがよく用いられる。弾性モデルは簡易的であるため、数多くの研究で近似的に扱われる。一方、粘性および粘弾性は、クリープ変形または応力緩和現象を説明するために採用されることもある。図2は弾性および粘弾性変形の応力-歪関係を模式的に示したもので、弾性は粘弾性の一近似形と考えることができる。このような関係を定式化すると、構成方程式は以下のように書くことができる[8]。

$$e_{ij}(t) = \int_0^t C_{ijkl}(t-\xi) \frac{\partial \sigma_{kl}(\xi)}{\partial \xi} d\xi \quad (8)$$

または、

$$\sigma_{ij}(t) = \int_0^t D_{ijkl}(t-\xi) \frac{\partial e_{kl}(\xi)}{\partial \xi} d\xi \quad (9)$$

ここで、

$$D_{ijkl}(t) = (1/3)[G_2(t) - G_1(t)]\delta_{ij}\delta_{kl} + (1/2)G_1(t)[\delta_{ik}\delta_{jl} + \delta_{il}\delta_{jk}] \quad (10)$$

$$G_1(t) = 2G(t), \quad G_2(t) = 3K(t) \quad (11)$$

G は剪断モジュラス、 K は本体モジュラスを示す。等方性の媒体に対しては、Eq.(9)は次式のように表すことができる。

$$\sigma(t) = \int_0^t \mathbf{D}(t-\xi) \frac{\partial \mathbf{e}(\xi)}{\partial \xi} d\xi \quad (12)$$

ただし、

$$\mathbf{D} = \begin{bmatrix} K+4G/3 & K-2G/3 & K-2G/3 & 0 & 0 & 0 \\ K-2G/3 & K+4G/3 & K-2G/3 & 0 & 0 & 0 \\ K-2G/3 & K-2G/3 & K+4G/3 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & G & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & G & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & G \end{bmatrix} \quad (13)$$

弾性体の場合には、 \mathbf{D} が時間に対して一定となるため時間積分は不要となる。

一方、平衡方程式は、

$$\sigma_{ij} + F_i = 0 \quad (14)$$

F_i は外力を表す。

歪-変位関係は、

$$\mathbf{e} = \mathbf{A} \cdot \mathbf{U} \quad (15)$$

ここで、 \mathbf{U} は変位ベクトルで、

$$\mathbf{U}^T = [U_x \ U_y \ U_z]$$

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} \partial/\partial x & 0 & 0 \\ 0 & \partial/\partial y & 0 \\ 0 & 0 & \partial/\partial z \\ (1/2)\partial/\partial y & (1/2)\partial/\partial x & 0 \\ 0 & (1/2)\partial/\partial z & (1/2)\partial/\partial y \\ (1/2)\partial/\partial z & 0 & (1/2)\partial/\partial x \end{bmatrix} \quad (16)$$

応力解析では、Eqs.(12)、(14)および(15)を連立して解かなければならない。

乾燥収縮の応力解析では、上記の熱・物質移動方程式と応力方程式をさらに連立させる必要がある。Biot は乾燥速度を既知として、内部歪と水圧分布の相関関係に関する一連の研究[7,9]を行っている。粘土の弾性歪は内部応力と細孔壁が受ける水圧 p_w により生じるとすると、次のように表わすことができる。

$$\mathbf{e} = \mathbf{C} \cdot \boldsymbol{\sigma} + \mathbf{p}/3H \quad (17)$$

$$\mathbf{p}^T = [p_w \ p_w \ p_w \ 0 \ 0 \ 0] \quad (18)$$

Eqs.(15)および(17)を平衡方程式に代入して整理すると、変位と水圧に関する構成方程式が得られる。

$$\mathbf{G} \nabla^2 \mathbf{U} + \frac{\mathbf{G}}{1-2\nu} \nabla e - \alpha \nabla p_w = 0 \quad (19)$$

ここで、

$$\alpha = \frac{2(1+\nu)G}{3(1-2\nu)H} \quad (20)$$

Eq.(19)をEq.(7)と連立することにより、論理的には変位ベクトル \mathbf{U} および水圧分布 p_w を解くことが可能となる。しかし、これらの方程式の物性定数を求めることは容易ではないため、解析解が得られる系はかなり限定される。また本解析では伝熱方程式が考慮されていないため、乾燥速度まで含めた解析を行うことはできない。

4. 内部応力および変形挙動

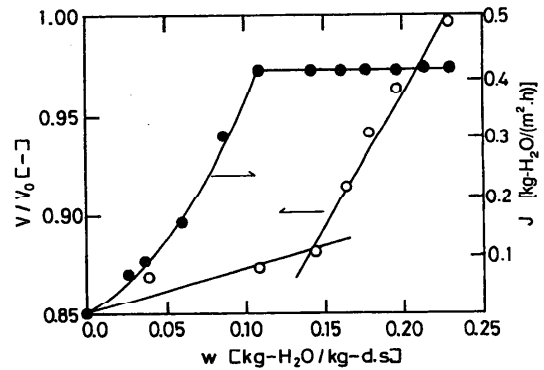


図3 粘度の収縮率

著者らは、任意形状に成形された粘土の乾燥収縮に伴う内部応力および変形挙動に関する研究を行っている。本研究では、物質移動と応力方程式のみならず、伝熱方程式も考慮に入れることにより、乾燥速度、温度と含水率分布、内部応力分布および形状変化を非定常かつ3次元で解析を行った。熱・物質移動方程式と応力方程式を連立させるにあたって、上述のような細孔内の水圧分布を求める手法では、水圧と歪との関係を表す Eq.(7)の中に、対象となる粘土の2つの物性パラメータが含まれており、これらの値が既知である必要がある。そこで、ここでは内部応力が全く作用していない粘土、すなわち温度および含水率分布が均一の状態では収縮率(自由歪に相当)が含水率のみの関数で表され、全歪とこの自由歪との差が内部応力に相関される応力歪になると仮定した。このような取り扱い、熱応力の場合と全く同様と考えればよいことになる。したがってこれらの関係は、次式のように書くことができる。

$$e_i(t) = e_i^f(t) - e_i^s(t) \quad (21)$$

ここで、 $e_i^f(t)$ は全歪、 e_i^s は含水率の関数で与えられる自由歪である。自由歪の実測にあたっては、球形に成形した粘土を極力遅い乾燥速度で乾燥させ、含水率と体積変化から求めた。図3は[10]、瓦用粘土の含水率と収縮率の実測例を示したもので、以後の解析には実線で示したように2本の直線近似の関係を用いた。

本解析では、伝熱には熱伝導方程式、水分移動には含水率を推進力にする拡散方程式を解くことにより温度、含水率分布および乾燥速度を求めた。得られた含水率分布から Eq.(21)を Eq.(12)へ代入し、こ

れと Eqs.(14)および(15)を連立させることにより粘弾性応力および歪を算出する。これらの解析には、有限要素法を用いた。

図4は[10]、60x60x10mmの平板に成形した瓦用粘土を343K、相対湿度1%の熱風で乾燥させた場合の平均含水率、平板中心とコーナー温度および体積の経時変化について実験結果と計算結果の比較を示したもので、両者はかなり良好な一致が得られた。なお、熱・物質移動方程式の初期および境界条件は次式のように与えた。

$$t=0; c=c_0, T=T_0 \quad (22)$$

$$t>0; h(T_a-T_s)+\sigma_r\phi(T_a^4-T_s^4)-k_p\Delta H(P_e-P_a)=\mathbf{J}_h \cdot \mathbf{n} \quad (23)$$

$$k_p(P_e-P_a)=\mathbf{J}_m \cdot \mathbf{n} \quad (24)$$

ここで、 P_e は表面の飽和水蒸気圧、 P_a は熱風の蒸気圧、 σ_r はステファン-ボルツマン定数、 \mathbf{n} は成形体表面に対する単位直交ベクトルを示す。本図のような一致に基づき、乾燥特性に与える諸操作の影響について種々の検討を行った。

乾燥プロセスにおいて、成形体の不均一乾燥は予期しない反りなどの変形や割れなどの問題を引き起こす。図5は[11]、60x60x15.9mmの平板について、底面の熱伝達係数および物質移動係数のみを零として解析を行った場合の温度、含水率および主応力分布を示す。本図は、図6の斜線部分の面における乾燥時間0.5および1.0時間後の分布を示している。破線の外形は平板初期の大きさを示しており、不均一な乾燥により時間とともに上方への反りが生じている。このことから、不均一乾燥が不規則な変形の大きな原因になることが明らかとなった。温度は比較的均一な分布を示しているのに対して、含水率の等高線は約1時間後ではかなり密になっており、粘土内部での水分移動抵抗の大きさが顕著に示されている。主応力分布図では、線の長さが強さを、方向が紙面と同一の面に投影した応力の作用方向を表している。また、実線が引っ張りおよび破線が圧縮応力を示している。応力挙動は、比較的含水率が低く収縮の大きい表面近傍で強い引っ張り応力として現れ、特に含水率の等高線が密となる端の部分で著しく強い引っ張り応力が作用している。割れの発生原因は、多くの場合最大引っ張り応力が降伏値を越えたためと考えられており、このような解析結果は、成形体の端部分で乾燥時に割れが発生しやすいという経験的事実と良好に対応している。

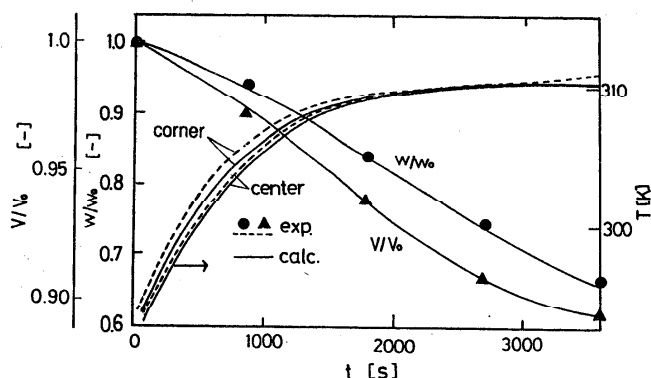


図4 平板の温度、平均含水率、体積の経時変化(熱風温度343K)

図7は[12]、割れの大きな原因と考えられる最大引っ張り応力に与える乾燥の不均一性の影響を示したものである。ここでは乾燥の不均一性をモデル化するために、平板底面だけの境界条件にパラメータ ϕ を導入し、以下のように与えた。

$$\phi h(T_a-T_s)+\sigma_r\phi(T_a^4-T_s^4)-\phi k_p\Delta H(P_e-P_a)=\mathbf{J}_h \cdot \mathbf{n} \quad (25)$$

$$\phi k_p(P_e-P_a)=\mathbf{J}_m \cdot \mathbf{n} \quad (26)$$

パラメータ ϕ は0から1の値を持ち、0のとき不均一性が最大、1のとき均一乾燥となる。図から、同一の平均含水率で比較した場合、不均一性の増大に伴い最大応力も大きくなる傾向が見受けられた。このことから、不均一な乾燥は不規則変形のみならず割れも発生しやすい状態となることが示唆されている。

5. まとめ

本稿では、セラミックス製造プロセスで今後益々重要となると考えられる乾燥収縮問題に関するこれまでの理論的考え方および著者らの研究の一端を紹介した。成形体の乾燥過程における不規則変形および応力割れを抑制しつつ乾燥時間の短縮を図るためには、熱・物質移動と同時に内部応力生成に関する情報が不可欠となる。そのためにも、ここで紹介したようなシミュレーションは有用と考えられ、このような手法を活用することにより極力高い限界の乾燥速度が得られる操作条件の模索が解析的に可能となる。しかし、著者らが行っている粘弾性まで考慮した応力解析では、上述のように構成方程式が時間に関する積分形となり、歪ベクトル

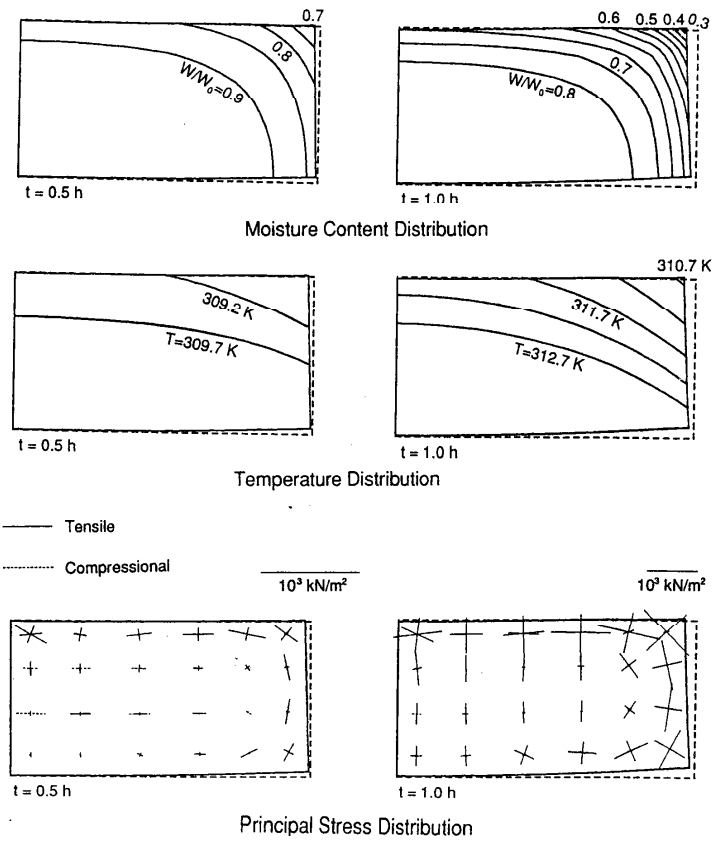


図5 温度、含水率および主応力分布（熱風温度 343.2K）

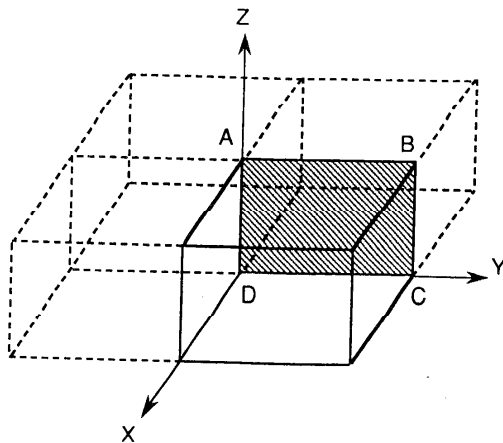


図6 理論解析の座標系

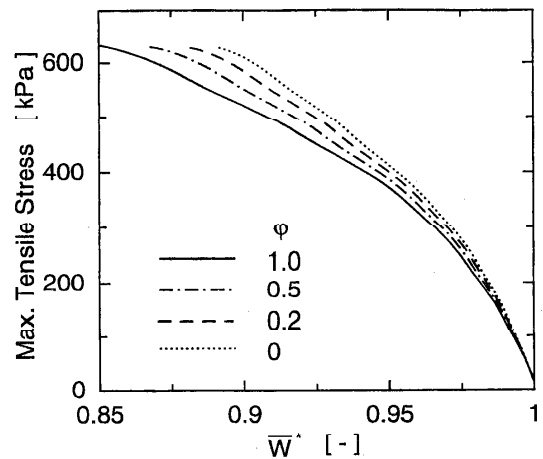


図7 最大引張り応力に与える乾燥の不均一性の影響

の履歴をデータとしてすべて記憶させておかなければならないため、3次元解析を行おうとすると膨大なコンピューターメモリーが要求されることになる。したがって、このような解析を汎用的に行なえるようにするためには、今後、弾性応力のような簡易モデルによりどの程度の精度で解析が可能か明らかにしつつ、簡略化を図る必要がある。また、現状では種々の物性値がほとんど不明であり、これらの整備が期待される。一方、理論的解析とは別に、内部応力の抑制のためには含水率勾配を小さくすることが必要となり、例えば加熱用空気中の水蒸気圧の増大や減圧乾燥のように物質移動抵抗を低減させうるパッシブまたはアクティブ乾燥促進技術の開発も望まれる。

参考文献

1. Norton, F. H. and Johnson, A. L., Fundamental Study of Clay: V, Nature of Water Film in Plastic Clay., *J. American Ceramic Society*, **27**(3), 77-80 (1944)
2. Kamei, S. and Toei, R., Studies on Drying Shrinkage., *Kagaku Kikai*, **16**(11), 372-377 (1952)
3. Newitt, D. M. and Coleman, M., The Mechanism of Drying of Solids part III The Drying Characteristics of China Clay., *Trans. Instn. Chem. Engrs.*, **30**, 28-45 (1952)
4. Wakabayashi, K., Yamaguchi, S., Matsumoto, T. and Mita, T., Liquid Moisture Movement in a Fine Particle Bed during Drying Process, *Kagaku Kogaku Ronbunshu*, **3**(2), pp. 189-194 (1977)
5. Shishido, I. Maruyama, T., Funaki, M. and Ohotani, S., On the Drying Mechanism of Shrinkage Material, *Kagaku Kogaku Ronbunshu*, **13**(1), pp. 78-85 (1987).
6. Hasatani, M., Itaya, Y., Muroie, K and Taniguchi, S., Contraction Characteristics of Molded Ceramics during Drying., *Drying Technology*, **11**(4), 815-830 (1993)
7. Biot, M. A., General Theory of Three-Dimensional Consolidation., *J. Applied Physics*, **12**(2), 155-164 (1941)
8. Findley, W. N., Lai, J. S. and Oneran, K., Creep and Relaxation of Nonlinear Viscoelastic Materials. With an Introduction to Linear Viscoelasticity., Dover Publications, Mineora, pp. 50-107 (1976)
9. Biot, M. A., Theory of Stress-Strain Relations in Anisotropic Viscoelasticity and Relaxation Phenomena., *J. Applied Physics*, **25**(11), 1385-1391 (1954)
10. Hasatani, M., Itaya, Y. and Hayakawa, K., Fundamental Study on Shrinkage of Formed Clay during Drying -Viscoelastic Strain-Stress and Heat/Moisture Transfer., *Drying Technology*, **10**(4), 1013-1036 (1992)
11. Itaya, Y., Mabuchi, S. and Hasatani, M., Deformation Behavior of Ceramic Slabs by Nonuniform Drying., *Drying Technology*, **13**(3), 801-819 (1995)
12. Itaya, Y., Taniguchi, S. and Hasatani, M., A Numerical Study of Transient Deformation and Stress Behavior of a Clay Slab during Drying., *Drying Technology*, in press.

湿紙の乾燥過程における熱及び物質移動現象の研究

特集

A Study on Mass and Heat Transfer Phenomena
on Drying Moist Fibrous Pulp Sheet

岸浪 紘機 (室蘭工業大学機械システム工学科), 山崎 幸次 (日本製紙株式会社石巻工場技術課),
斉藤 図 (室蘭工業大学機械システム工学科), 鈴木 淳 (室蘭工業大学機械システム工学科)
Koki KISHINAMI (Muroran Institute of Technology), Koji YAMAZAKI (Nippon Paper Industry L.T.D.),
Hakaru SAITO (Muroran Institute of Technology) and Jun SUZUKI (Muroran Institute of Technology)

1. はじめに

製紙業では、多くの水分を含む紙の原料から水分を除去する伝熱工学上重要な工程がある。この水分除去は、脱水・圧搾・乾燥により行われるが、中でも熱的乾燥による役割が最も大きな比重を占めている。脱水と圧搾のみでは、紙の繊維質を破壊する恐れがあり、水分除去に限界があり、最終的な水分除去は熱的な乾燥により行われている。¹⁾このような乾燥工程では、莫大な熱エネルギーの消費となるため、乾燥をいかに効率よく(乾燥時間と熱エネルギーの節約)行うかが重要な問題である。また、紙の品質上、むらなく、均一に乾燥させることも重要である。

本報では、製紙業で最も一般的な蒸気加熱シリンダ乾燥法²⁾(内部に加熱蒸気の入ったシリンダが多数配列されており、その加熱されたシリンダ上をパルプシートが走行することによって乾燥を行う)について取り上げ、湿紙底面が高温固体面から加熱され、湿紙表面が対流場の空気と接している底面加熱・上面对流条件での乾燥過程における湿紙内の熱と水分移動挙動について検討する。

2. 熱及び物質伝達の基本的取り扱い

(1) 乾燥過程における含水繊維物質のモデル化

紙の多孔性構造に着目して、湿紙を等方性含水多孔物質として取り扱う。このような含水物質モデルに対し、以下の定義及び仮定を行う。

- a. 空隙部が均一に分布している多孔物質とする。
- b. 多孔物質の空隙部は、水(液体)と蒸気(気体)で満たされている。
- c. 多孔物質内の水と蒸気は、その温度において飽和状態とする。つまり、水は飽和液、蒸気は飽和水蒸気の状態である。
- d. 含水多孔物質は、水分除去の最終段階において変形ないし縮小する事が認められるが、ここではこれらの影響は無視する。

このように含水多孔物質モデルは、固体部分と空隙部で構成されており、この空隙部には、水分が液体と気体の状態で存在する。このことから、以下の

関係式が得られる。

$$\text{含水物質 } 1\text{ m}^3 = \varepsilon_C + \phi, \quad \phi = \varepsilon_L + \varepsilon_S \quad (1)$$

ここで、 ϕ は空隙率、 ε_L は体積水分率、 ε_S は水蒸気の体積分率であり、単位は m^3/m^3 である。(単位中の m^3 は含水多孔物質 1m^3 を意味する)

また、含水多孔物質の密度 $\rho_P [\text{kg}/\text{m}^3]$ とエンタルピ $i_P \rho_P [\text{J}/\text{m}^3]$ は、以下のように表される。

$$\rho_P = (1 - \phi) \rho_C + \varepsilon_L \rho_L + \varepsilon_S \rho_S \quad (2)$$

$$i_P \rho_P = (1 - \phi) \rho_C i_C + \varepsilon_L \rho_L i_L + \varepsilon_S \rho_S i_S \\ = (c \rho)_P T + r \varepsilon_S \rho_S \quad (3)$$

上式中の ρ_L 、 ρ_C は温度 T の関数で以下のように表される。

$$\rho_L = f'(T) \quad (') \text{は飽和液の状態を表す} \quad (4)$$

$$\rho_C = f''(T) \quad (') \text{は飽和蒸気の状態を表す} \quad (5)$$

また、 i_C 、 i_L 及び i_S は以下のように表される。ただし、 T の単位は摂氏温度 $^{\circ}\text{C}$ である。

$$i_C = C_{pC} \times T \quad (6)$$

$$i_L = i' = C_{pL} \times T \quad (7)$$

$$i_S = i'' = C_{pL} \times T + r \quad (8)$$

上式(3)中の $(c \rho)_P$ は含水多孔物質の単位体積当りの熱容量 $[\text{J}/(\text{m}^3 \text{K})]$ で以下のように表される。

$$(c \rho)_P = (1 - \phi) \rho_C C_{pC} + (\varepsilon_L \rho_L + \varepsilon_S \rho_S) C_{pL} \quad (9)$$

(2) 熱及び水分移動に関する基礎方程式

図1は、乾燥過程における含水多孔物質内の厚さ方向(x 方向)に関する水分移動・熱移動の物理モデルである。すなわち、繊維性物質、例えばパルプのような物質を厚さ b の平板状に固め、下部 $x=-b$ より加熱している。その際、 $x=-b$ においては、等熱流束 q_b (あるいは等温度 T_b)で加熱されていて、底面において物質流れはないものと仮定している。一方、上面は対流にさらされていて、物質表面から対流流れへの熱伝達及びそれにもなう物質伝達が行われ

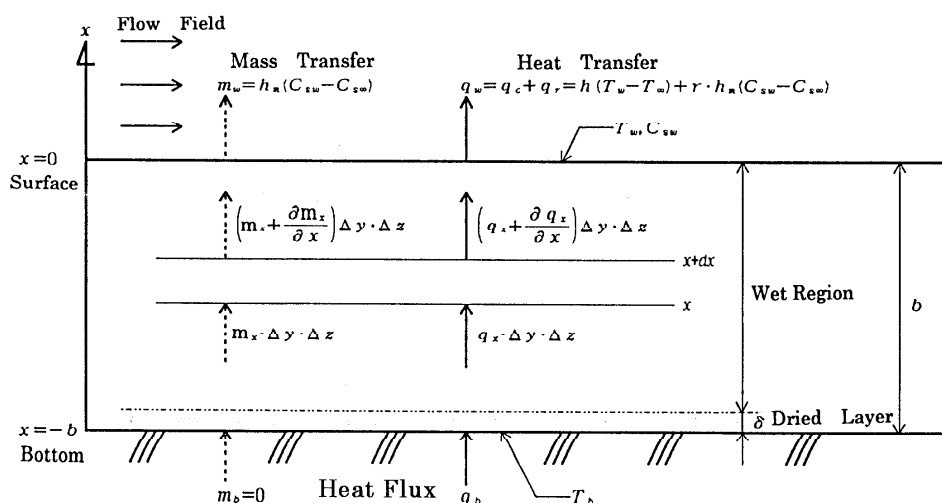


図1 含水多孔物質内水分・熱移動の物理モデル

るものとしている。このような物理モデルに対して、物質内任意点 x における水分移動量 m_x [kg/(m²·s)] を以下のように表す。

$$m_x = m_v + m_c \quad (10)$$

式(10)中の m_v は拡散による水蒸気移動， m_c は毛細管力による液状水分移動であり，以下のように定義する。

$$m_v = -D_p \frac{\delta \rho_s}{\delta x}, \quad m_c = -C_a \frac{\delta(\epsilon_L \rho_L)}{\delta x} \quad (11)$$

ここで， D_p [m²/s] は含水多孔物質内における拡散係数³⁾， C_a [m²/s] は毛細管移動係数⁴⁾である。

また，エネルギー移動量 q_x [W/m²] については，以下のように表される。

$$q_x = i_s \cdot m_v + i_L \cdot m_c + q_h \\ = C_{pL} T (m_v + m_c) + r \cdot m_v + q_h \quad (12)$$

式(12)中の q_h は含水物質内熱伝導による熱移動であり，以下のように定義する。

$$q_h = -\lambda_p \frac{\delta T}{\delta x} \quad (13)$$

ここで， λ_p [W/(mK)] は含水物質の熱伝導率であり，各成分の熱伝導率の成分和として近似した。

上述した水分及び熱移動について，含水多孔物質要素体積中の物質及び熱収支を検討することにより，以下の水分移動方程式及びエネルギー方程式が導出される。ただし，一次元(x 方向)のみの取扱とする。

水分移動方程式：

$$\frac{\delta(\epsilon_L \rho_L + \epsilon_S \rho_S)}{\delta t} = -\frac{\delta(m_v + m_c)}{\delta x} \quad (14)$$

エネルギー方程式：

$$(c \rho)_p \frac{\delta T}{\delta t} + r \frac{\delta(\epsilon_S \rho_S)}{\delta t} = \\ -C_{pL} (m_v + m_c) \frac{\delta T}{\delta x} - r \frac{\delta m_v}{\delta x} - \frac{\delta q_h}{\delta x} \quad (15)$$

また，本報での境界条件は以下のように表される。

$x = 0$ (含水物質表面での対流条件)：

$$m_w = (m_v + m_c)_{x=0} = h_m (C_{s,w} - C_{s,\infty}) \quad (16)$$

$$q_w = [C_{pL} (m_v + m_c) T + r \cdot m_v + q_h]_{x=0} \\ - h (T_w - T_\infty) + r \cdot h_m (C_{s,w} - C_{s,\infty}) \quad (17)$$

$x = -b$ (含水物質底面での加熱条件)：

$$m_b = (m_v + m_c)_{x=-b} = 0 \quad (18)$$

等熱流束加熱の場合；

$$q_b = [C_{pL} (m_v + m_c) T + r \cdot m_v + q_h]_{x=-b} \quad (19)$$

等温加熱の場合；

$$T_b = T_{(x=-b)} \quad (20)$$

3. 数値解析による乾燥現象の取り扱い

(1) 数値解析手法の概要

数値解析を行うにあたり，まず，基礎式(14),(15)の離散化をコントロールボリューム法を用いて行う。この際，含水物質内の水分・熱移動項に関しては中心差分を使用する。時間項 t については前進差分とし，完全陰解法の形の離散化式を導出する。

Setting Condition : $b_0 = 10[\text{mm}]$, $\phi_0 = 0.7[\text{m}^3/\text{m}^3]$
 Initial Condition : $T_0 = 20[^\circ\text{C}]$, $m_{L0} = 6.93[\text{kg}/\text{m}^2](\varepsilon_{L0} = \phi_0 \times 99\%)$
 Convective Condition : $u_\infty = 6[\text{m}/\text{s}]$, $T_\infty = 20[^\circ\text{C}]$, $C_{s\infty} = 0.007[\text{kg}/\text{m}^3]$
 $Re_L = 1.97 \times 10^5 (L = 0.5[\text{m}])$

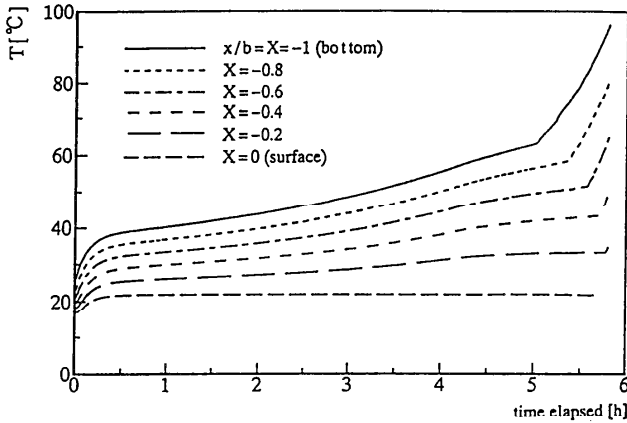


図2 含水物質内温度の時間的变化
(等熱流束加熱の場合)

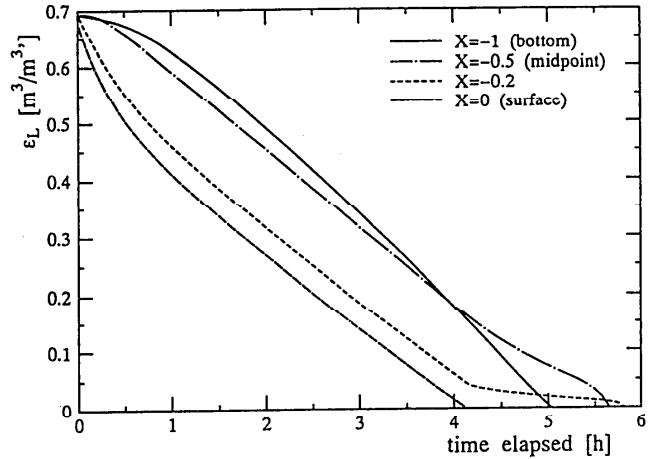


図3 含水物質内体積水分率 ε_L の時間的变化

本計算において、先ずエネルギー方程式から陰解法により、含水多孔質内の温度 T が求められる。そして、求められた温度から水の液相、気相の密度 ρ_L 、 ρ_S を算出し、これらの物性値を用いて水分率 ε_L は、水分移動方程式より陽解法で計算する。本報の計算手法では、温度場を算定して、次に水分率が個別に計算される陰と陽の組み合わせ解法としてあるが、ある時点において温度 T 、水分率 ε_L として諸物性値など全ての変数が水分移動とエネルギー式を満足するまで繰り返すことで、全体としては Gauss-Seidel 陰解法による数値解析法である。

以下では、厚さ方向の一次元基礎方程式に対して行った数値解析結果について検討する。ここで、このような一次元的取扱は、乾燥挙動の解明において非常に有効なことである。それは、紙のような薄い含水繊維物質の乾燥過程においては、厚さ方向の物質及び熱伝達が物質内の水分と温度変化をほとんど決定するものであり、それ外の方における水分・熱移動については非常に小さいものと予想される。

尚、本計算では含水物質表面上の対流場における熱伝達および物質伝達率は、本報の次章での実験で得られた関係式を適用している。

(2) 数値解析結果による乾燥挙動の検討

a. 含水物質内の温度変化

図2は、含水物質底部分を等熱流束加熱した場合の物質内温度の時間的变化を示したものである。図より、底部分 ($X=-1$) では、乾燥開始から熱を受け取るため、温度が急激に上昇することが認められる。

この温度上昇率は、含水物質内部、表面側へと伝わり、乾燥初期において物質内温度が上昇することになる。この温度上昇は、当然、底部分で最も大きく、この上昇傾向は時間経過とともに緩やかになる。これは、底部分に与えられた熱量は、乾燥初期には底部付近の温度上昇のために使われるが、その後、次第に底部分の液状水分の蒸発に費やされる緩慢な温度上昇となる。一方、含水物質の表面部分 ($X=0$) では、乾燥初期に温度上昇するが、やがて一定温度となることが認められる。これは、含水物質内部から表面近傍へ流入する熱量と表面から対流空气中へ移動する水蒸気潜熱及び流出熱量が釣り合うことによる。さらに、乾燥時間が経過すると底部分の液状水分がなくなり、乾いた領域が形成される。この状態では、加熱固体面からの熱は、この部の液状水分が存在しないため、底部分の温度上昇のみに使われ、底部分の温度は再び急激に上昇する。そして、底部側から次第に液状水分がなくなり、乾いた部分の温度が底部から逐次急上昇する。

b. 含水物質内の体積水分率 ε_L の変化

図3は、含水物質内の体積水分率の動的挙動を示したものであり、図中には、含水物質内の厚さ方向無次元距離 $X=0$ (表面)、 -0.2 、 -0.5 及び -1 (底部分) の地点における水分率の時間的变化を示している。含水物質の底部分では、乾燥開始直後、この部分に与えられた熱が底部温度の上昇に費やされ、水分減少率は非常に小さい。しかし、時間経過とともに、加熱固体面からの熱量が液状水分の蒸発に使われ、水

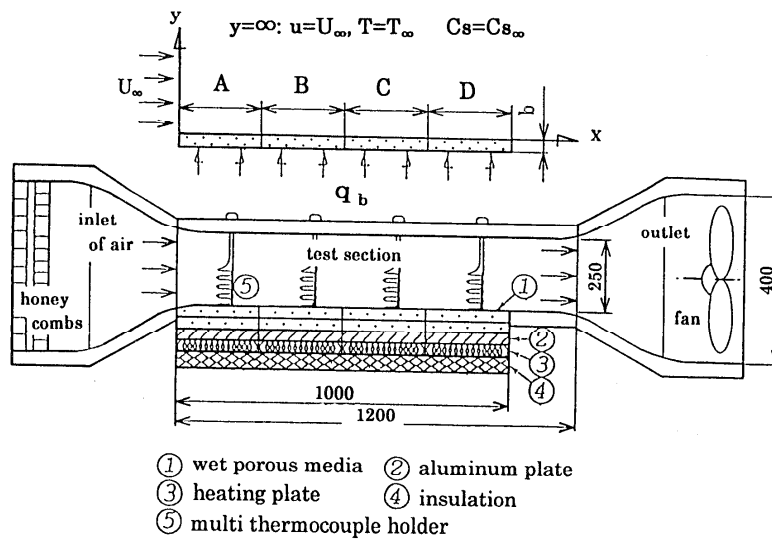


図4 実験装置概略図

分減少率は徐々に大きくなる。そして、本条件の場合、 $t=5$ 時間で底部分の液状水分が完全になくなる。一方、表面部分では、乾燥開始から水分が対流場へ移動するため、乾燥初期において水分減少率は非常に大きい。この減少率は、時間経過とともに小さくなり、次第に図3に示すような直線的な減少傾向となる。表面近傍の $X=-0.2$ 地点では、乾燥開始から表面における減少傾向に遅れる形で水分率が減少する。そして、表面の水分率 $\varepsilon_L=0$ になると、 $X=-0.2$ 地点の水分率の減少傾向は非常に緩やかになる。これは、表面部分における液状水分がなくなると、下方から表面側へと拡散と毛細管現象により移動する気・液状水分量が増加し、表面での熱・物質伝達量に対応して近傍における減少率を小さくさせている。また、中心部 $X=-0.5$ 地点では、乾燥初期における減少率は小さいが、時間経過とともに大きくなり、次第にほぼ一定の直線的な減少傾向となる。さらに、時間が経過して表面及び底部分の液状水分がなくなると、中心部における水分率の減少は緩やかになり、中心部の液状水分がなくなる直前では、減少率は再び上昇して完全乾燥となることが認められる。

4. 強制対流下における湿紙乾燥現象の実験的検討⁵⁾

(1) 実験装置及び方法

図4に実験装置概略図を示す。本実験装置の風洞は、入口部、測定部及び出口部から成り、中の様子が観測できるようアクリル板で作られている。出口部後方には、所定流速を得るためインバータ制御可変速モーター駆動吸い込み式ファンを設置した。測定

部は、下方側に加熱装置（熱源は電気プレートヒータ③を使用）があり、その上に受皿4枚を設置、各皿の中に湿紙を格納した。受皿はアルミ板②（底板）とベークライト板（側板）で作られており、入口部よりA部（各部中心位置 $x=0.125\text{m}$ ）、B部（ 0.375m ）、C部（ 0.625m ）及びD部（ 0.875m ）とした。また、水分を含ませた厚さ5mmのパルプシート2枚重ね（ $b=5 \times 2 \text{枚} = 10\text{mm}$ ）のものを使用した。対流場及びシート温度の測定には直径0.1mmのC-C熱電対を、速度分布測定には熱線風速計を使用した。各部の対流場温度測定用の熱電対支持装置⑤は、薄く流線形の断面をもつ木製の櫛形のものを使用した。また、シート内温度は底面、内部（2枚のシート間に熱電対を設置）及び表面の3ヶ所を測定した。

実験では、加熱ヒータの電源を固定し、等熱流束条件とした上で任意に設定した測定時間毎に水分蒸発量を精密天秤で測定した。実験条件として主流速度は $2 \leq u \leq 6\text{m/s}$ 、加熱流束は $500 \leq q_b \leq 4000\text{W/m}^2$ の範囲とした。主流温度 T_∞ ・初期温度 T_0 は実験室内の温度、主流水蒸気濃度 $C_{s\infty}$ は実験室内の湿度とした。

(2) 本実験における定義式と無次元数

湿紙の含水率 ε を絶乾状態における紙の質量を基準とした含有水分量で以下のように定義する。

$$\text{含水率 } \varepsilon = \frac{W - W_d}{W_d} \quad (21)$$

ここで、 W は湿紙質量[kg]であり、添字 d は絶乾状態を表す。

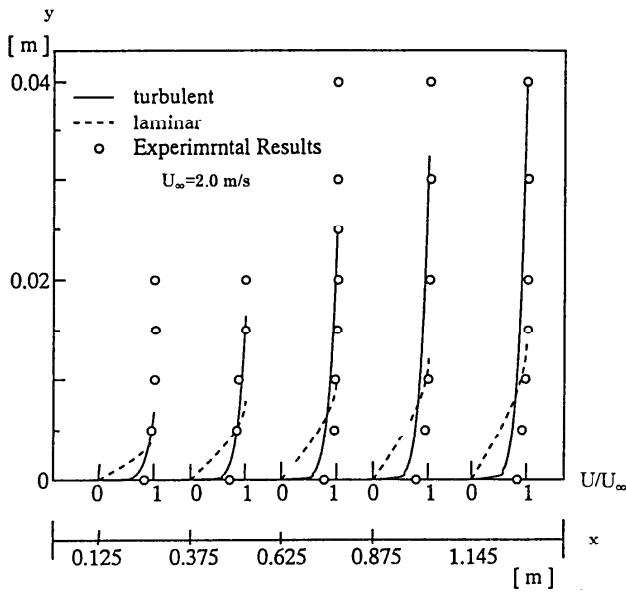


図5 対流場の速度分布
(実験結果と理論値の比較)

本実験において局所熱伝達率 h_x は、湿紙表面から対流場へ流出する熱流束 q_c と水蒸気潜熱 q_r の総和に対して定義する。また、局所物質伝達率 $h_{m,x}$ は、湿紙表面から対流場へ移動する全水分量（水蒸気）に対して定義する。

$$q_w = h_x (T_w - T_\infty) = q_c + q_r$$

$$= -\lambda_m \frac{\delta T}{\delta y} \Big|_{y=+0} + r \cdot m_w \quad (22)$$

$$m_w = h_{m,x} (C_{s,w} - C_{s,\infty}) = \frac{1}{A} \frac{dm}{dt} \quad (23)$$

ここで、 q_w 、 m_w は湿紙表面から対流場へ移動する全熱流束及び質量流束、 λ_m は空気熱伝導率、 A は乾燥表面積、 dm/dt は乾燥速度である。

本実験で使用する無次元数については、

$$j_h = \frac{Nu_x}{Re_x Pr^{1/3}}, \quad Nu_x = \frac{h_x \cdot x}{\lambda_m}, \quad Pr = \frac{\nu_m}{\alpha_m}$$

$$j_m = \frac{Sh_x}{Re_x Sc^{1/3}}, \quad Sh_x = \frac{h_{m,x} \cdot x}{D}, \quad Sc = \frac{\nu_m}{D}$$

$$Re_x = \frac{u_\infty \cdot x}{\nu_m}$$

(3) 実験結果と考察

a. 対流場における流れの挙動

図5は、主流速度 $u_\infty = 2\text{m/s}$ における湿紙上の対流

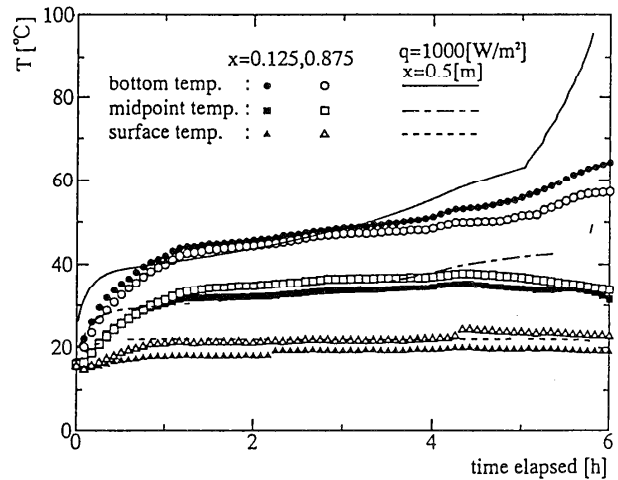


図6 湿紙内温度の時間的变化
($U_\infty = 2\text{m/s}$, $q_b = 1840\text{W/m}^2$)

場速度分布を示したものであり、前縁からの距離が $x = 0.125, 0.375, 0.625, 0.875$ 及び 1.145m での無次元速度 $U (= u/u_\infty)$ を表している。図より、実験結果は乱流の解析値 (1/7乗則) に近い傾向を示している。これは、実験測定部には表面が凸凹の粗面を有するパルプシートが設置され、さらに風洞内ダクト Reynolds 数が遷移臨界値を越えているため、風洞内の流れは前縁より乱流的影響を受ける。また、受皿の縁とパルプシートの高さにも多少違いが生じるため、流れは決してスムーズには流れない。したがって、風洞全域の流れは乱流的傾向にある。

b. 湿紙内温度の挙動

図6は、パルプシート底面、内部及び表面温度の時間的变化を示したものであり、図中の実線、一点鎖線及び点線は、上述の数値解析により得られた結果である。この図より、実験値は数値解析結果と定性的に一致した温度挙動を示しているのがわかる。ただし、実験では底面付近の液状水分がほとんどなくなり、底面温度が再び急激に上昇する過程で内部温度が低下する逆の傾向を示す。これは、底面側の水分が極端に減少し、パルプシートが物理的に変形し、底面側シートが反ってくるため、底面側の下層シートと表面側の上層シート間に隙間ができて湿紙内部の熱伝導が設定条件と異なってくることによる。また、定量的には数値解析結果は温度が再び急激に上昇する乾燥終了過程における温度上昇率が非常に大きくなることを示している。これは、パルプシート内では底面付近の残余水分を蒸発させるのに多く

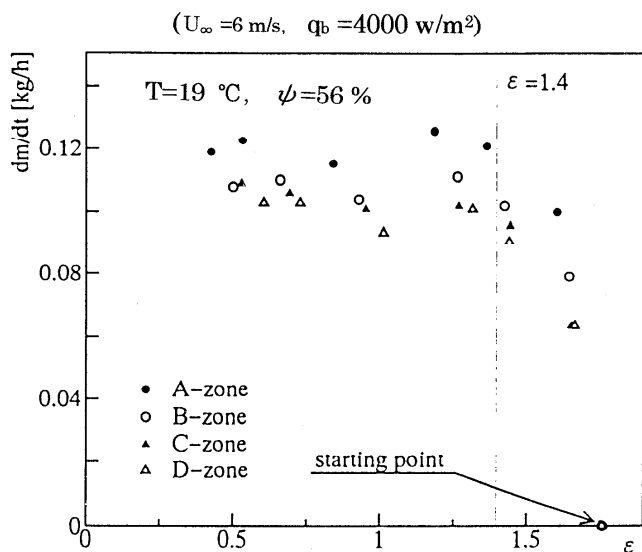


図7 含水率 ϵ と乾燥速度 dm/dt の関係

の熱エネルギーが必要であるため、数値解析結果で見られるような急勾配の温度上昇にはならない。このような残余水分は、実際、結合水として繊維部分と非常に強い力で結合されており、この状態の水分を蒸発させるには多くの熱エネルギーが必要となる。

c. 含水率と乾燥速度の関係

図7は、含水率と乾燥速度の関係を示したものであり、縦軸は乾燥速度 dm/dt 、横軸は含水率 ϵ である。図中には、実験開始点を **starting point** としており、乾燥時間の経過とともに含水率は減少することから $\epsilon=0$ の方に行くに従い乾燥が進行することになる。この図より、乾燥速度は実験開始点から含水率の減少とともに急激に上昇するのがわかる。そして、含水率がある値以下でこの上昇傾向が緩やかになり、ほぼ一定値となる傾向を示している。このように、含水率がある値以下になると乾燥速度の上昇傾向が緩やかになることが認められ、本実験においては、含水率 $\epsilon=1.4$ 付近で見られる。また、主流速度が大きな場合/加熱流束が小さな場合には、上述のような乾燥速度の急激な上昇後、乾燥速度が一定となる傾向が顕著に現れてくる。

d. 局所 Reynolds 数と Colburn 因子の関係

図8, 9は、局所 Reynolds 数 Re_x と Colburn の熱伝達因子 j_h 及び物質伝達因子 j_m の関係を示したものである。両図とも、表面温度、乾燥速度がほぼ安定している準定常状態における実験結果を示している。また、図中の点線と一点鎖線は定常状態における層流、乱流の場合の解析値⁶⁾を示している。

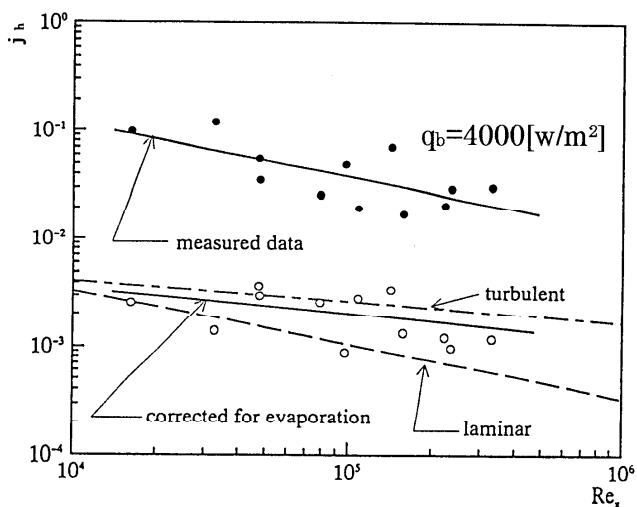


図8 Re_x と j_h の関係 (対流熱伝達特性の傾向)

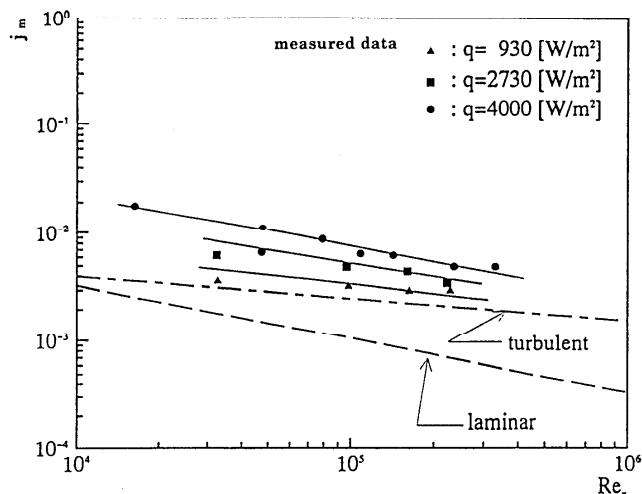


図9 Re_x と j_m の関係 (対流物質伝達特性の傾向)

図8より、湿紙表面における全熱流束 q_w に対して本実験では熱伝達率 h_x^* を定義しているため、実験結果●は層流と乱流の場合の点線、一点鎖線より、高い値を示している。全熱流束 q_w は、対流流体へ伝わる熱流束 q_c と同様に移動する水蒸気の潜熱 q_r の総和で表されるため、実験結果の方が水蒸気拡散の潜熱分だけ高い値を示す。図8には、熱伝達率の定義において水蒸気拡散の潜熱を考慮しない場合の結果を○で表している。白丸○は、乱流及び層流の場合の解析値に近く、これら実験結果の平均的傾向を示す実線は点線と一点鎖線の間にある。また、この平均的挙動(実線)は、乱流の場合(一点鎖線)に近いことが認められる。

図9は同様に物質伝達の結果を示すが、層流と乱流の場合に対する物質伝達の解析値⁶⁾を点線及び一点鎖線より高い値を示しているのがわかる。これは、パルプシート底面を加熱乾燥している本実験条件ではシート内部における水分蒸発が良好であり、シート表面から対流場へ移動する水蒸気量が熱的な拡散が重なるためである。また、シート表面は粗面であるため、風洞内の乱流的流れにより、表面における水蒸気移動が促進されることも一つの要因である。従って、加熱流束 q_b 値が大きくなるほど物質伝達因子 j_m が高い値を示している。一方、 $q_b=930\text{W/m}^2$ の小さい場合、一点鎖線で表される乱流の場合に近い傾向を示している。局所Reynolds数とColburn物質伝達因子は以下の関係式で近似される。

$$j_m = a \cdot R e_x^n$$

$$\text{ただし, } a = 0.0296 \times (1 + 9.971 \times 10^{-4})^{q_b} \times S c \\ n = -6.085 \times 10^{-5} \cdot q_b - 0.2$$

上式では、加熱流束 $q_b=0$ のとき、乱流の場合の一点鎖線を表すものである。図9には、各加熱流束条件に対して上式の関係を実線で示しており、実験結果とほぼ同じ傾向を示している。

5. おわりに

以上、乾燥過程における熱・水分同時移動現象について解析的、実験的に取扱、物質内部及び対流場の熱と物質伝達特性について関係する諸因子のもとで検討した。本報における厚さ方向の一次元的数値解析手法は、乾燥挙動の解明上、非常に有効な手段であり、解析的、実験的に得られる対流熱伝達及び物質伝達の関係を用い、本数値解析手法を応用することで様々な乾燥条件下における現象解明が可能であると思われる。

参考文献

- 1) 石黒久三郎 "湿紙乾燥と化学的諸問題に関する若干の考察" 紙パルプ技術タイムズ Vol.27, 1984
- 2) 佐藤敏浩ほか "回転してローラーまわりの流動拡散解析" 日本機械学会論文集 Vol.58 No.548 1992
- 3) 日本冷凍協会 冷凍空調便覧 森北出版 1990
- 4) Peter F.Lee and Jeffrey A.Hinds "Optimizing Dryer Performance" TAPPI Engineering Conf. pp.117-124 1981
- 5) Yamazaki K., et.al "An Experimental Investigation On Drying Process of Moist Paper in Forced Convection" Proceeding of '94 Int. Conf. On Fluid and Thermal Energy Conversion ISSN pp.103-108 1994
- 6) 日本機械学会 伝熱工学資料 改訂第4版 丸善

日本, ヨーロッパ, 米国における
工学研究についての感想

世界のホットユース

*Some Selected Views on the Engineering Communities
in Japan, Europe and the United States of America*

徳廣 明 (動力炉・核燃料開発事業団)

Akira T. TOKUHIRO (Power Reactor and Nuclear

Fuel Development Corporation)

本文を書き始める前に先ず自己紹介をさせていただきます。

徳廣 明, 東京渋谷で生まれました。その後, 日吉に住み, 田園調布の幼稚園に東横線に乗って通ったというのが私の日本での生活の最後の記憶です。5才のときに父がアメリカで仕事をする事になり, オハイオ州立大のあるコロンバスに移住致しました。従って教育はすべてアメリカで受けております。その間, 日本語学校にもいかず又, 日本人の同年の友人もいなかったのもので日本語は家庭内でのみ話しておりました。私位の年齢でアメリカに来てアメリカで育った色々な国の人を知っていますが, 多くの方が何年かの後には英語しか話せなくなってしまっています。私が現在でも日常生活に差し支えない程度の日本語が出来るのは両親の努力のお陰です。

ミシガンで高校を卒業後, インディアナ州のPurdue University (PU) に入り, 工学/科学の専攻で卒業しました。修士課程はニューヨーク州にあるRochester University に入り機械工学の専攻を致しましたが, 自分の研究に対する関心を考えて又, Purdue University に戻り, Dr.Lykoudis のもとで原子力工学博士号を習得しました。

現在は科学技術庁管轄下の動燃 (PNC) 大洗工学センター (OEC) で国際研究員として招聘されて同センターのメンバーと共に研究に携わっています。ご存じのように動燃は日本の流体金属のFast Breeder Reactor (LMFBR) の研究, 技術開発に携わっておりますが, 私の所属は安全工学部原子炉工学室です。

話は10年ほど遡りますが, 私の卒業したPurdue Universityは工学部ではアメリカでは最高5位の中に数えられる大学で生徒数約3万5千人もの大きい大学です。月に最初に足を踏み入れたNeil Armstrong, 又, 女性パイロットとして有名なAmelia Earhartも同大学の卒業生です。

熱伝導, 多相流などの分野で知られている

Dr.R.Viskanta, Dr.M.Ishiiも同大学の教授としておられます。Rochester UniversityはRochester市にキャンパスがあり, 市内にはアメリカでも屈指の大会社, Kodak, Xerox, Bausch and Lombが所在しています。同大学にはアメリカに2つしかない光学工学科が有るのが特徴であり, この3つの会社と同市に所在している理由ともなっていると思います。Rochester大そのものは学生数8千人とこじんまりとした落ち着いた大学です。

Purdue Universityの学部にて在学していた際に, プログラムの一部としてColumbus, OHIOにあるBattelle LaboratoryでResearch Internとして働きました。ここで自分が学部で学んだ事を実社会に生かして仕事をするチャンスが与えられたわけです。又, 修士課程終了後, Purdue Universityの博士課程に再入学(大学院)するまでの間は, Argonne National LaboratoryでDr.M.Ishiiの下で仕事をするチャンスに恵まれました。私が熱水力学に入ったのは, この時期において短時間ながらDr.Ishiiの下で働いたのがきっかけとなったと思います。

Purdue University大学院博士課程に入ってからDr.Lykoudisの研究室に属しておりました。Ph.D.の論文の題目は“Natural Convection heat transfer enhancement in mercury with gas injection and in the Presence of a magnetic field”です。

私の学位論文のテーマのうち, 応用部門として特に重要なものの一つは, 核融合原子炉の第1壁における対流熱伝達の促進とされます。この研究についての私の見解は, ガス導入で3~5倍の促進が行われたとしても磁場は気泡流による攪拌を完全に押さえることであると考えております。

大学院終了後, ヨーロッパでの研究生活を体験してみたいと考えておりましたが, 幸いにもスイス, チューリッヒ郊外にあるPaul Scherrer Instituteに研究員として1990年秋から参加することになりました。ここで1995年2月まで研究生活を送っていたわけで

す。同研究所のことを紹介致しますと、この研究所はチューリッヒから約45kmのVilleggenと言う町にあります。ここはスイスでは唯一のエネルギー工学、中間エネルギーの素粒子物理、放射線医学の国立研究所です。同研究所では私はスイスのヨーロッパ、Fast Reactor グループに属して流体金属の熱力学、ALPHA-PANDA プロジェクト (GEのSBWR) 等の研究をしていました。後者については凝縮しない気体と混合した水蒸気凝縮を研究するために分離効果実験装置を設計しました。

1994年に動燃が海外から研究者を招いて共同研究をするというプロジェクトがあると聞きました。研究費の関係でPSIでの研究に些か行き詰まりを感じておりましたので、是非一度は住んでみたい日本でもあり、応募しましたところ幸運にも国際研究員のメンバーの一人として選ばれたので1995年2月に動燃大洗工学センターに移って来ました。

大洗工学センターにおいては私は実験熱水力学グループに属しております。このグループの主な研究目的は将来のLMFBR器の安全運転に関連した実験で、この中には測定法の開発、特にナトリウム冷却のFBRも将来、運転可能と予測されるので高温(250~550℃)での測定方法についても研究が進められています。この様な高温において使われる速度測定法の幾つかの方法の一つに超音波によるドップラー速度計測法(UDV)があります。UDVを高温の液体金属に応用するために測定法、すなわち2D、または3Dの速度分布や高温に耐えることの出来るトランスデューサーの開発を進めており、更にUDVの応用範囲についても流れの構成、流れのパラメータ、流れの型(低、通常、そして高いブランドル係数)と相の数(多相系の流れ)といった因子を予想して研究を進めています。

幸運にも世界の3つの違った国での研究所で研究生活を通して体験、感じたことについて多少書いてみます。

第一の一つの国(例えばスイス)の生活、習慣、人々の物の考え方を理解し、ある形として自分の中にイメージを造り上げる事ができるのは少なくとも7~10年の時が必要と思います。私の今までの人生のうち25年をアメリカで過ごしたので私の生活習慣、物の考え方の基礎となるものはアメリカのものになっていることでしょう。しかしその様なものを

ベースにして見た幾つかの国の学問、研究に対する姿勢の類似性、相違、特に熱工学学会の中での比較は興味があることと思うので、私なりの理解、意見を記してみます。

他の分野の科学、工学と同じ様に最近の熱工学界は非常に国際的になっていると思います。同学会への貢献者、学会のメンバーの顔ぶれを見ると世界の夫々の国がこの分野において一つの歴史を持っているということが分かります。国際学会も頻繁に開かれており、学会誌などを通じて、又、Internet等の普及によって学会内の交流は広がっていくばかりです。科学的研究(調査)に於ける先進国の水準の差は本当にわずかしかないが、学術的に後進国から見ると2者の差はまさに各国の社会経済状況ほど千差万別と言えましょう。世界中の国を訪れたわけではありませんが、総括的には熱工学の研究も他の科学や工学の多くの分野と共に、科学に関係ない政治、経済、物の価値観への思惑、そして歴史などに非常に影響、制約されていると思います。

工学は人間生活の一部であるということ認識して頂きたいと思います。つまり、工学とは発電所のような大きいものから微小機器まであらゆる種類の“道具”を作るという人間生活の一部です。これが工学の純粋科学と違う点であると言えます。熱工学は基礎的には古典物理から発展した物であっても、現在の熱工学ではもっぱら“道具”の設計、製造、安全性、使用法、その他の点については勉強、研究されています。このようにこの“道具”が人間の日常生活を便利に維持してくれるので、即ち、人間の生活に深く関わりを持っているので、学問/研究とは別のものであるべき政治、経済、価値観等が必然的に工学の学問/研究の中に入り込んでくるのでしょう。ある種の工学関係の研究においては多額の研究費が必要なため、熱科学、熱工学についてのプロジェクトは資金供給側の事情で研究の進歩が左右されることが非常に多く、熱工学のような伝統的工学分野での研究は絶えず研究費の欠乏状態で研究者の悩みの種になっています。こうなった理由の一つはコンピューター、電子工業の大きな進歩にも原因があります。過去20年に於いての電子工業革命はまさに19世紀の産業革命にも匹敵します。産業革命は機械/道具に依って日常生活の水準を大幅に引き上げる事になりましたが、電子工業革命は今世紀の終わり近くになってパソコンを見ても分かるように、今までの機械/道具に更に大幅な進歩、改良をもたらした

ました。その進歩によって産業革命のもたらした物である重工業、即ち鉄工業、造船、発電等の工業が落ち目になったと同様に、フィルム、自動車、建設、化学等の工業にも不振状態が起こりこれに伴って熱科学への研究費も一般的には減少傾向にあると思います。これは特にアメリカでこの傾向が強いです。

もし工学の研究、開発、製造といったようなことに関する研究の条件（資金、設備等）を全く無視しては色々な国のエンジニアという人達の人間性の部分、特徴というものを比べてみるのは簡単ですが、その裏にあるものを考えると一概に言い得ないものがあるという気がします。

一応、ここでは研究、開発は一種の競争活動であるとして話を進めてみます。この競争には独創力、または開発能力といったものを持った人がいて、しかもその人達が間接的には何らかの形で製造工程に結び付いているということが、競争を有利にする一つの原因となります。製造する、商品として市場に出るといったことは経済面にとって（特に研究資金を出す側に）重要な因子となり、個人、個々の企業のみならず国際間での国力、開発能力といったようなものの競争にもなっていくと思います。

エンジニア個人として見た場合、アメリカの一流大学を出たエンジニアは一言で言えば競争に強いということです。これはアメリカの社会、教育のシステムというか、その辺りに原因があります。大雑把に言って30～40%の大学一年生は勉強について行けなくなり、大学に止まるのが出来なくなるのが当たり前で、更に2年目にも10～20%ほどの学生が落第するといった状況の中で生き抜かなくてはならない、更に成績次第で初任給の額も大幅に違うという事から、社会に出ない前から競争をして生き抜いていくといった能力を身につけている人々だと思ふのです。それに比べてヨーロッパでも日本でも最初から大学に行くということは、ある種のエリートと見なされています。殊にヨーロッパではそうです。限られた一部の人達の特権とも言えましょう。日本では学生でも会社でもグループとして勉強、研究、仕事をしていく傾向が強く、社会の構造から来る、先輩、後輩の関係、仕事関係の役の序列等に従っていかないと都合が悪い面が多々見られます。アメリカでもグループで研究に取り組むことも無いではないけれど、ほとんどが個人で研究に取り組んでいるのが実情でしょう。仕事上の意見は年齢、序

列に関係なく発言し、仕事ができれば後輩でも先輩を追い越して重要な地位に着くことが当たり前に行われる社会に人々が生きていけると言えましょう。日本ではどこそこのメンバーである、または先輩、上役であるという様な事が価値があり、ヨーロッパではものごとを達成する（目的を達成する）という点が価値観の第一であるとされている様に思えます。また人間関係、社会的地位も日本同様に価値を認めているようです。また身内、友人などのお互いのコネを利用するといったことは、日本ではかなり当たり前となっているように思えますが、アメリカはこの点は厳しいのです。ヨーロッパは日本とアメリカの中間と言ったところでしょうか？

アメリカではサッカーの様な集団スポーツがあまり流行らないということは、アメリカ人がグループで働くことが出来ないといった点に繋がりがあられるかも知れません。

アメリカでは仕事をする場合、一人一人の独創性は非常に尊重され、独創性のない人間は駄目だと見られますが、日本では個人の独創性はグループで仕事をするせいか、あまり重要な事とはされていない感じがします。ヨーロッパではこの中間でしょうか？日本人は物を作るといったことに興味があり（即ち製造）、アメリカ人は新しいアイデアを生み出すということには関心があるが、物を作ることには直ぐに飽きてしまう欠点があります。しかし独創性を高く評価する事はアメリカがBill Gates, Seymour Crayの様な人々を生み出すのを見ても分かります。もう一つアメリカには誰にでも“チャンス”があるということは世界の他の国には見られないことです。アメリカの研究、開発に関する特性はオリジナリティとチャンス、そして色々な意味での競争力の組み合わせであると言えましょう。

日本とヨーロッパには長い歴史があり、既成された社会構造が出来上がっているの、自ずから様々に規制が有り、個人の可能性を制御してしまう傾向があり、この壁にぶつかった多くのヨーロッパの人達が自分の可能性の追及とチャンスを求めてアメリカに移住し、目的を達成したということは良く知られていることです。最近ではアメリカでも各分野の境界が定義されつつあり、この様な機会を掴んで一躍踊出するという様な例は少なくなりつつありますが、それでも社会的に一応地位を成した人が仕事を止めて大学院に戻り今までと違った学問を専攻して学位

を取り、第2の人生の出発をして仕事に成功するといった程度の自由度は未だかなり残っていると思います。

ここで工学の世界でのコンピューターの役割といたことを話したいと思います。工学社会ではもはやコンピューターなしでは何もやって行けないという程にコンピューターが日常の研究に役立っています。コンピューター（ソフトウェア、ハードウェアともに）を自由に使いこなすかどうかということが研究の成果にまで影響するようになって来ているので、その点ではアメリカは日本やヨーロッパに対してはかなり優位な位置にあるように感じます。日本ではアメリカに次ぎ、新しい技術を取り入れることに慎重／ためらいがあるヨーロッパはその点、かなり遅れています。アメリカのコンピューター市場は競争が激しく、そのためヨーロッパや日本に比べて、かなり安く手に入り、又、ソフトウェアも無制限とっていいほどの数があり簡単に手に入ります。コンピューターの所有、使用度はアメリカと日本はあまり変わらないのではないかとと思うが、ヨーロッパでは欲しいものが簡単に手に入りにくい損な立場であるという事も確かです。

私の考えでは言葉というものは人間同志の意思の表現、科学の進歩、その他、色々な意味で大切なものだが、科学の進歩によって政治、経済、研究、そして日常生活さえも国際的になりつつあるこの頃、言葉が通じないということから起きる障害は大きいと思うのです。

例えば研究にしてもある言葉で書かれた本、または論文が読めなければそれが自分の理解し得る言葉に翻訳されるまで待たなくてはならない、又は自分でその言葉を勉強しなくてはならないといったことに費やされる時間と努力は膨大なものです。言葉のために重複せざるを得ないといった一つの例が NEC-98 コンピューターです。このコンピューターの持つ国内向けのみでの使用と生産は言葉の問題があるが為に起きた重複生産であると思います。これは日本国内にしか使えないのです。この言葉の問題が

全く無かったと予想したら研究の進み方はもっと早いのではないのかとすら思うのです。

最後に熱工学分野にいる我々は（他の科学研究に携わっている人々も）この地球上に我々が作り出した“廃棄物”をどうするかということを決める義務があると思います。これは絶対に無視されて良いものではありません。地球は過剰人口で埋まり、自己の利益のみ考える人で世界が動きつつあり、国々と人間の貧富の差が益々大きくなっています。地球は我々が作り出した廃棄物を摂取してそれを又もとの形に戻すという驚異的な力を持っており、数千年にわたってその役割を果たして来ました。現在、我々は自分たちの手で地球を破壊しつつあるということを考えていただきたいのです。例えば、“Greenhouse effect”は否定できない事実です。その根源は冷凍剤の過剰使用、石油系統の物質の燃焼であることは誰でも分かっています。現在、“きれいな燃焼”ということについての研究は随分進歩していますが、これをもう一歩進めて燃焼というものに頼るのを止めるべきだと思うのです。これは容易な仕事ではありません。なぜかエネルギーを作り出す会社は自然のエネルギー資源（太陽、風、地熱、水など）を利用する事に反対のほうに動いているのです。熱工学が地球に与える影響は大きいのです。その熱工学の研究分野にいる我々が真剣に“地球を救う”方法を考えるべきだと思います。今、その様なことを始めない限り、我々の研究も生活その物までもその様なことを考えない他の人間に依って制限されてしまうのではないかとこの事を恐れます。

最後にこの文は英語で原文を書き、両親に頼んで翻訳、タイプして貰いました。私が日本語で文を書いたわけではありません。厳密には直訳ではありませんが、私の意図していることはすべて入っております。出来たら英語の方も読みいただきたいのです。

私にこの様なチャンスを与えてくださった編集、企画室の方々に心からお礼申し上げます。

（なお、英語の原文につきましては、伝熱研究ホームページ <http://www.mes.titech.ac.jp/htsj/misc/misc.html> に掲載しておりますので、ご覧下さい）

高効率フィンチューブ熱交換器の開発

Development of a High Efficiency Fin-Tube Heat Exchanger

李 承甲 (三星電子生活システム研究所)

Seung-Kap LEE (Samsung Electronic Co., Ltd,

Living System Research Center)

ABSTRACT

In this paper the results of a development of the fin shapes for a compact fin-tube heat exchanger being used to the air-cooled absorption refrigeration system are presented. Five types of new fins were designed, simulated and tested. To reduce experimental effort, a theoretical method to predict fin-performance with respect to the fin shape was developed also. The experimental results indicated that the j-factor of five new fins were increased much with relatively small increase in f-factor than those of previous flat fin. From the viewpoint of fin-performance newly defined from present study, all fins were enhanced about 40% in performance compared to previous flat fin. The results from 3-dimensional numerical analysis were compared with those of experimental work, and good agreement were achieved. The theoretical method developed is able to be useful tool to design another new fin shape for any kinds of heat exchanger, hereafter.

MATHEMATICAL MODEL

Figure 1 shows the geometry of the model 5 fin designed for the numerical analysis. The dotted section was selected as a representative interesting region, with one pitch in the x-direction and y-z section, as shown in the figure.

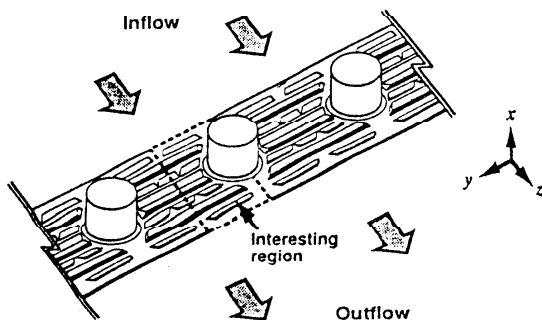


Fig. 1 Geometry and interesting region

The fluid flow is governed by the Navier-Stokes equations, written as generalized conserved transport equation in (1.1). PHOENICS code was used in this analysis. Physical and numerical parameters as well as description of the discretization procedure

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\rho u \Phi - \Gamma \frac{\partial \Phi}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\rho v \Phi - \Gamma \frac{\partial \Phi}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\rho w \Phi - \Gamma \frac{\partial \Phi}{\partial z} \right) = S_{\Phi}(x, y, z) \quad (1.1)$$

and numerical scheme used in this study can be found in [1].

RESULTS

The fin performance can be showed with the f- and j-factor, indicated the pressure drop characteristic and heat transfer characteristic, respectively. The f- and j-factor of the flat fin were measured and compared to the those of Gray & Webb[2], in order to verify the experimental apparatus and method. The comparison between present experimental data and Ref.[2] were fairly good agreement within 13% error. The representative new designed fin's correlation of the f- and j-factor with respect to Reynolds number are as follows:

$$f = 1.145 Re_D^{-0.584}, j = 0.341 Re_D^{-0.507} \text{ for flat fin}$$

$$f = 0.874 Re_D^{-0.418}, j = 0.449 Re_D^{-0.527} \text{ for new fin}$$

Figure 2 shows that the performance of all new fins were enhanced about 35~40% in comparison with respect that of flat fin. Especially, model 5 designed with mixed shape of louver and lance was superior to other models.

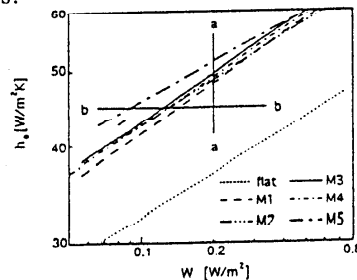


Fig. 2 Comparison of fin performance for various fin models

References

1. Bae, J.H., Lee, J.H., Oh, M.D., and Lee, S.K., 1995, SAREK Spring Conf., p46
2. Gray, D.L., and Webb, R.L., 1986, 8th Int. Heat Transfer Conf., San Francisco, p27

(株)東芝 原子力技術研究所

Nuclear Engineering Laboratory, Toshiba Corporation

師岡 慎一 (株)東芝 原子力技術研究所)

*Shinichi MOROOKA (Nuclear Engineering Laboratory,
Toshiba Corporation)*

1. はじめに

(株)東芝原子力技術研究所は、東京湾、羽田空港を眺望できる、神奈川県川崎市の東京湾に面した工業地帯に位置している。図1に当研究所入口の外観を示す。当研究所はエネルギー事業本部原子力事業部のワークスラボであり、当事業部の主力製品である沸騰水型原子炉(BWR)を初めとして、次世代型BWR、高速増殖炉(FBR)、核融合炉再処理などを対象として、研究開発を実施している。伝熱研究の分野では、BWRの特徴である二相流、FBRでのNa伝熱、単相流などの研究に力を入れている。特に、従来実験に頼っていた機器内部の流体现象の解明も、数値計算による試みが色々な分野で活発になされている。ここでは、二相流に関連した代表的な試験研究およびシミュレーションについて紹介する。



図1 研究所入口の外観

2. 二相流の試験研究

2.1 BWR炉心内の二相流

BWRの炉心には、燃料集合体が数100体装荷されており、この燃料集合体には約70気圧、284Cの蒸気・水二相流が流れている。燃料の設計および信頼性を評価する上で各種の二相流特性(限界熱流束、圧力損失など)を正確に把握する必要がある。そこで図2に示した様な伝熱試験装置により、BWRと同じ流体条件で定常および非定常状態での各種試験を実施している^{(1),(2)}。図3は世界で初めてX線CTスキャナにより測定し燃料集合体内の蒸気ボイド率分布である⁽³⁾。

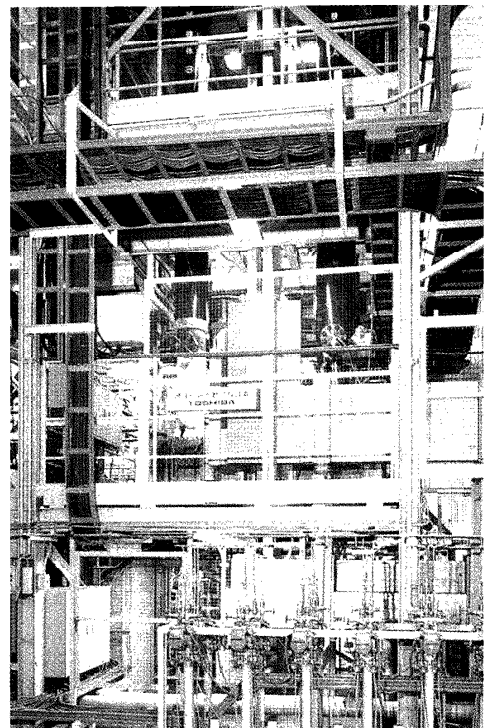


図2 高圧過渡伝熱装置

2.2 安全研究

以前は主として、事故時における緊急炉心冷却系の冷却性能を調べる試験研究を実規模試験装置を用いて実施していた。現在は、passive safetyの特徴を有する新型BWRの炉概念を固める基礎研究を実施している。特に、単純化BWR(SBWR= Simplified BWR)の研究では、事故時にポンプを使

用せずに重力を利用して炉心の冷却をするシステム性能を実証する試験を、図4に示す高さ方向は実寸大の装置により行っている⁽⁴⁾。

S B W Rでは、通常運転時に炉心冷却は自然循環で行うため、自然循環時の挙動を把握する基礎研究(小型装置による可視化試験、自由表面からのカロオーバ、ガイゼリングなど)を実施している。

これらの他に、混相流現象が関連するものとして、B W Rの二相流安定性、苛酷時のエアロゾル挙動、F B Rのナトリウム加熱蒸気発生器、再処理施設の廃液処理用乾燥機などの数多くの研究を行っている。

3. 代表的な混相流シミュレーション

(1) 燃料集合体内の解析

高限界出力のB W R燃料を開発する場合、蒸気流中の液滴の動きを把握する必要がある。そのため、燃料集合体内での液滴の動きを解析するコードを開発している⁽⁵⁾。図5は燃料スペーサ近傍の液滴の挙動の解析例である。

(2) 気水分離器内の流れ解析

B W Rの炉心を出た二相流を、遠心力により蒸気と液体に分離するのが気液分離器であるが、これを高性能化する研究に取り組んでいる。圧力損失および分離されないで気水分離器より排出される水を低減するのが課題である。このため、気水分離器内の

二相流の流れを解析するコードを開発し、気水分離器内の部品の形状により、どのように性能が変化するかを評価し、新型気水分離器の開発に役立てている⁽⁶⁾。図6は、旋回羽根以降の蒸気と液体の速度分布の解析例である。

(3) ドライヤ内の流れ解析

気水分離器から排出された蒸気中に同伴される液滴を分離するドライヤーを高機能化する開発研究も行なっている。開発した液滴挙動解析コードにより蒸気中のほとんどの液滴が入口近傍で分離されており、ドライヤーの小型化が可能な事が明らかになった。

以上、代表的な解析結果について示したが、これらの解析コードの精度を向上するためには二相流の詳細な挙動を把握する必要があり、このため、液膜厚さ、液膜速度、液滴飛散量、液滴付着量、ポイド率分布などを独自に開発した計測器により測定している。

代表的な二相流シミュレーションについて説明したが、これ以外にも、B W Rプラントの色々な運転

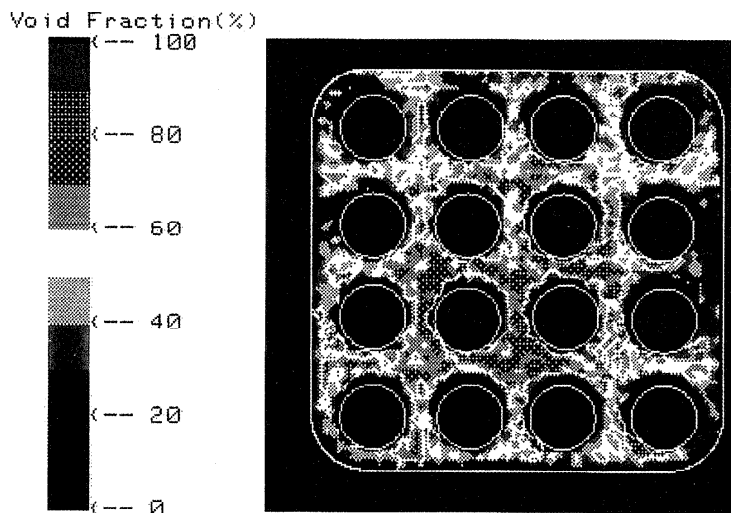


図3 模擬燃料集合体内ポイド率分布
X線CTスキャナによる測定結果



図4 静的格納容器冷却試験装置

状態での挙動をシミュレーションするシステムコードによりBWRの安全性の評価を実施している。

4. おわりに

ここでは、当社の主力製品であるBWRを特徴づける二相流に関する代表的な研究について紹介した。これらの技術は、原子力以外の分野へも応用されている。

5. 参考文献

- (1) 師岡ら、“高性能BWR燃料集合体の開発”、日本原子力学会誌, Vol.38, No.9 (1996) ,pp.69.
- (2) S. Muto et.al., "An experimental study in transient conditions of BWRs ", Nuclear Engineering Design, 120 (1990) , pp.311.
- (3) 師岡ら、“X線CTスキャナによる二相流局所ボイド率分布の測定”、日本原子力学会誌, Vol.26, No.5 (1988) ,pp.925.
- (4) 栗田ら、“ブローダウン後期における重力落下注水系試験”、日本機械学会第73期通常総会講演論文集(Ⅲ)、(1996-4) ,pp.489.
- (5) 山本ら、“BWR燃料集合体の沸騰遷移現象—スパーサ形状による限界出力への影響”、日本原子力学会誌, Vol.38, No.4 (1996) ,pp.315.
- (6) 秋葉ら、“巡回羽根による気液二相流の分離と分離液膜の管外排出機構”、日本機械学会第73期通常総会講演論文集(Ⅲ)、(1996-4) ,pp.373.

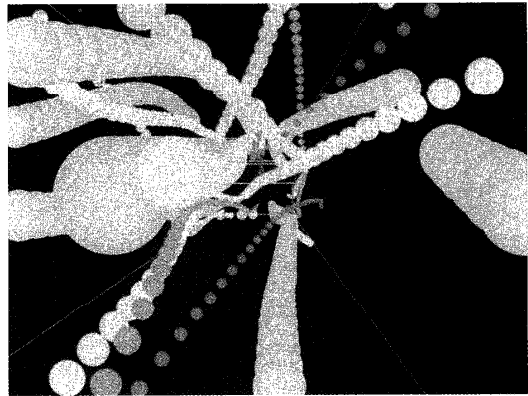


図5 燃料集合体内の液滴挙動の解析結果

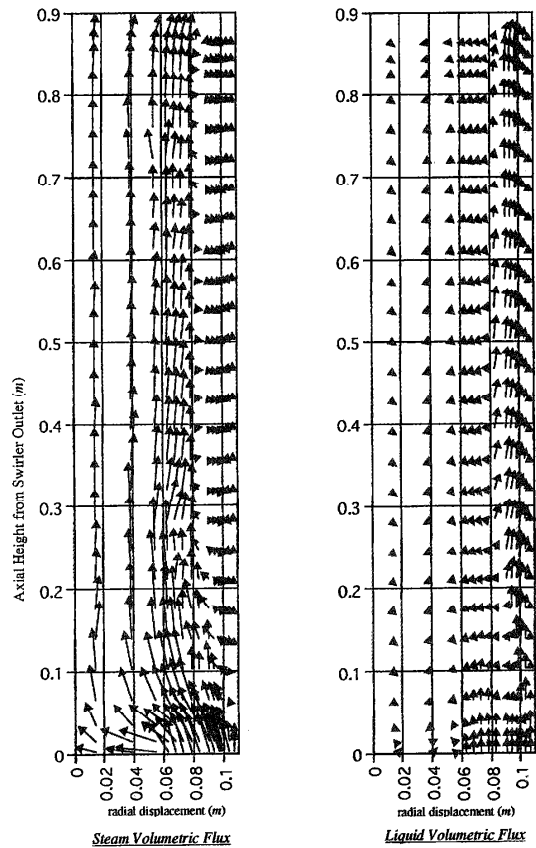


図6 気液分離器内部の速度分布の解析結果

混相流用語事典

*Encyclopedia of Multiphase Flow*編著：日本混相流学会，発行所：コロナ社
定価（本体 3800 円，税 114 円）

加治 増夫（大阪大学工学部）

Masuo KAJI (Faculty of Engineering, Osaka University)

混相流とは、気液、固気、固液、固気液のように、文字通り複数の相が混ざり合って流れる現象を扱う学問分野であるが、これらはボイラーや原子炉蒸気発生器内の気液二相流、流動層、粉体輸送、スラリー輸送、土石流、火砕流などといったように、それぞれが独自の応用分野において発展してきました。これらの現象の物理的解明が進むにつれ、お互いの共通点が明確になり混相流学会が設立され、今年で10周年を迎えます。その節目に当たって用語事典の編纂が行われたことは、今後の発展にも重要な役割を果たすものと思います。

私の研究専門分野は気液二相流ですが、学生時代に論文講読の際に専門用語の意味が分からなかったり、英文論文では適当な訳語の見当がつかず、その都度先輩から教えていただくなど、苦勞したことが多々あります。その時このような事典があったらと、今更ながらこの事典の必要性を痛感しました。教員になってからは、研究室の学生と一緒に英論文輪読をする際に、簡単な英和対訳語集をつくって配ったこともあります。

この種の事典の編纂では企業の研究者や技術者、大学の研究者、学生など、どの程度の専門知識をもった人が利用すると考えるかによって、語彙数や説明内容もかなり違ってくると思われますし、出版物の価格も大きな要素であると思われます。本書では合計1144の用語が収められており、まずは及第点

と言えましょう。

本文は実用編と基礎編に分けられており、とくに基礎編の用語は懇切に説明されているので、専門外の方についても内容が容易に理解できるように工夫されています。その意味で、初学者にとっては福音書のようなものです。ただ、初学者が使用するとき、その用語が実用編と基礎編のいずれかの判断がつかない場合には少し不便を感じるのではないかと思います。また、図を混じえた説明は大変わかり易いので、改訂版発行の機会があればこの点を補足して頂けるとありがたいものです。いずれにしても、研究者や技術者には必携の事典であることは間違いありません。

ちなみに「混相流」(multiphase flow)の定義がこの事典で見ますと、「気相または液相を基質とし、その中に他の相(液相、固相のいずれであってもよい)が基質と界面で区別されて存在する媒質の流れ」と記述されています。また、最近大きな災害となった「土石流」は、「山地の小溪流から土砂と水の混合物が段波状に流出する現象を指す。土石流は、崖崩れと並んで人命の損失を伴う土砂災害の主たる原因にもなる。・・・」となっています。

被災者の方々に心からご冥福をお祈りするとともに、このような災害から人々を守るためにもこの分野の研究の進展を期待します。

行事カレンダー

	開催日	行事名(開催地)	申込締切	原稿締切	問合せ先	掲載号
	1997年					
2月	2(日) ~7(金)	The 1st Pacific Symposium on Flow Visualization and Image Processing (Hawaii, USA)	Abstract '96.5.1	'96.8.15	http://www.cc.tuat.ac.jp/psfvip-1/	Vol.35, No.136
	10(月) ~3/25(火)	パソコンによる 熱と流れの入門 (東京)	'97.1.27		先端科学技術・情報教育センター Tel: 03-3579-3431, Fax: 03-3579-3400	Vol.36, No.140
4月	22(火) ~24(木)	第31回空気調和・冷凍連合講演会 (東京, 総評会館)	'97.1.10	'97.2.21	第31回空気調和・冷凍連合講演会係 Tel: 03-3359-5231, Fax: 03-3359-5233	Vol.35, No.139
	25(金)	日本伝熱学会関西支部第4期定時総会・講演討論会 (京都, 京大会館)			京都大学大学院工学研究科 牧野俊郎 Tel&Fax: 075-753-5265	Vol.36, No.140
5月	21(水) ~23(金)	第34回日本伝熱シンポジウム (宮城, 宮城第一ホテル)	'97.1.24	'97.3.14	伝熱シンポジウム準備委員会事務局 橋爪秀利 Tel: 022 217 7902, Fax: 022 217 7900 E-mail: sympo@hll.nucle.tohoku.ac.jp http://fates.nucle.tohoku.ac.jp/sympo	Vol.35, No.139
6月	2(月) ~6(金)	The 4th World Conference on Experimental Heat Transfer, Fluid Mechanics and Thermodynamics (ベルギー, ブリュッセル)	Abstract '96.3.4	'96.7.19	東京工業大学工学部 黒崎晏夫 Tel: 03-5734-2540, Fax: 03-5734-2945	Vol.34, No.135
	16(月) ~19(木)	International Symposium on Heat Transfer Enhancement and Energy Conservation (中国, 広州)	Abstract '96.7.31	'96.10.20	九州大学機能物質科学研究所 本田博司 Tel: 092-583-7787, Fax: 092-583-7882	Vol.35, No.138
7月	28(月) ~8/1(金)	3rd International Thermal Energy Congress (Kitakyushu) ※右のようにアブストラクト・申込締切に変更あり	Abstract '97.2.1	'97.4.30	Congress Secretary/ 3rd ITEC Ms H. Okabe (AINEC Co., Ltd.) Tel: 092-852-1575, Fax: 092-845-5135 E-mail: ainec@jms09.jeton.or.jp	Vol.35, No.138
9月	8(月) ~11(木)	Eleventh Symposium on Turbulent Shear Flows (Grenoble, France)	Abstract '96.11.15	'97.5.15		Vol.35, No.138
	9(火) ~12(金)	International Symposium on Air Conditioning in High Rise Buildings '97 (Shanghai, P. R. China)	Abstract '97.3.31	'97.5.31	Tokyo Institute of Technology Professor Kunio Hijikata Tel: 03-5734-3172, Fax: 03-3729-0628	Vol.36, No.140
	30(火) ~10/4(土)	8th International Topical Meeting on Nuclear Reactor Thermal-Hydraulics (京都, 国立京都国際会館)	Abstract '96.6.15	'96.12.15	東京電力(株)原子力研究所 滝沢昭彦 Tel: 045-585-8946, Fax: 045-585-8958 E-mail: nereth-8@rd.tepco.co.jp http://www.rd.tepco.co.jp/nereth-8/	Vol.35, No.137
11月	30(日) ~3(水)	第10回輸送現象国際会議 (京都, 京都リサーチパーク)	Abstract '97.1.15		輸送現象国際会議事務局 鈴木健二郎 Tel: 075-753-5250, Fax: 075-753-5851 E-mail: ksuzuki@htrans.mech.kyoto-u.ac.jp	Vol.35, No.139

<支部活動報告>

北海道研究グループ活動報告

1. 北海道伝熱セミナー'96

寒冷地のアトリウム（高さ約40m）とコージェネレーションシステムの見学後、4件の講演と討論を行った。機械系の熱関連の方々ばかりでなく、建築系の熱や防災関連の参加も頂き、参加者は約40名と盛会でした。

セミナー開催日：平成8年7月22日（月）

見学会：14時～15時

講演会：15時～17時30分

(1) 「アトリウム内の熱の流れと日射」

絵内 正道（北海道大学）

(2) 「札幌ファクトリーのガスタービン・コージェネレーションシステム」

塚田 亮（北海道ガス株）

(3) 「建築の防災と熱・火災気流解析」

長谷見 雄二（建築研究所）

(4) 「アトリウムの防災設計と煙流動解析」

原 哲夫（大成建設株）

見学会では、札幌中心部にあるサッポロファクトリーのアトリウムの構造と地下のガスタービンによるコージェネレーションシステムを専門家と共に、見学し、その後の講演会では、4名の講師の講演があり、活発な質疑応答が行われた。また、セミナー終了後の懇親会にも、大勢の方々に参加して頂き、名物のラムシャブと生ビールを飲みながら懇親を深めた。

2. 北海道伝熱セミナー'96（秋）

上記の7月の夏のセミナーに引き続いて、秋の伝熱セミナーを北海道大学工学部機械会議室で行った。参加者は約20名と少なかったものの、討論会に先立ち、ポスターによる説明会・展示会を開くという、討論重視のセミナーを実施した。

セミナー開催日：平成8年10月11日（金）

ポスター説明会・展示会：

10時30分～14時30分

(1) 「太陽エネルギーと伝熱」

馬場 弘（北見工大）

(2) 「不溶性液中における氷層の融解」

メタウエ・エマンベラ・サイエド（北大工院）

(3) 「表面張力と対流伝熱」

戸谷 剛、佐藤 崇（北大工院）

(4) 「プール火炎と伝熱」

西村 健太、工藤 祐嗣（北大工院）

討論会：15時～17時30分

セミナー終了後の懇親会には、学生を中心に大勢の方々に参加して頂き、懇親を深めた。

（北海道研究グループ担当理事 早坂 洋史）

東北支部活動報告

1. 講演会

日時：平成8年7月27日（土）

13:00～15:00

場所：東北大学工学部機械系会議室

講演

(1) 回転体の対流熱伝達

講師 石巻専修大学理工学部

島田 了八

(2) 高効率コンバインドサイクル発電について

講師 東北電力〔株〕火力部

五十嵐喜良、佐藤実

参加者：30名

講演（1）では、対流熱伝達の促進に関連して永年にわたり研究を続けてこられた成果のうち、特に回転体の対流熱伝達についてわかりやすく解説、講演して頂いた。

講演（2）では、現在計画が進められている高効率コンバインドサイクル発電の要素技術開発および発電プラント計画についてわかりやすく解説、講演して頂いた。

なお、講演会終了後、講師をまじえた懇親会を開催し、にぎやかに懇談することができた。

2. 日本伝熱学会東北支部設立総会ならびに記念講演会

日時：平成8年11月9日（土）

13:30～19:00

場所：東北大学工学部 青葉記念会館

(1) 東北支部設立総会

かねてから準備を進めてきた、日本伝熱学会東北支部の設立総会を越後亮三会長ご臨席のもとで開催した。総会は、設立に至る経緯の報告の後、支部規則が提示され満場一致で承認された。ついで平成8年度の役員案が示され、原案通り齋藤武雄支部長以下が承認され、新支部長の挨拶の後、越後会長から御祝辞を頂戴した。

(2) 記念講演会

演題 伝熱工学と熱科学のはざままで

講師 東北大学教授 流体科学研究所
相原 利雄

相原先生が東北大学工学部機械工学科の学生として抜山四郎教授から教示して頂いたことから始まり、企業におられた時代、東北大学高速力学研究所そして現在の流体科学研究所で研究教育に取り組んでこられた膨大な成果を中心に、研究に向かう姿勢、考え方、進め方等々の示唆に豊かな内容を2時間にわたりご講演頂いた。

なお、講演会終了後、越後会長、相原教授をまじえた懇親会を開催し、にぎやかに懇談することができた。

3. 講演会

日時：平成8年11月22日（金）
13:30～15:00

場所：東北大学流体科学研究所
演題：エクセルギー再生燃焼

講師：東京工業大学教授 工学部機械科学科
越後 亮三

参加者：30名

東北大学流体科学研究所と日本伝熱学会東北支部との共催で、現学会長越後先生からエクセルギーの視点から新たに燃焼をとらえ直し、高価値なエネルギーを発生させる燃焼技術について、様々な角度から検討された内容についてご講演頂いた。

(以上東北支部担当理事 太田照和)

4. 秋期伝熱セミナー（秋田）

日時：平成8年11月16日（土）
～11月17日（日）

場所：秋田市秋田温泉プラザ
参加者：44名

東北支部は恒例の秋期伝熱セミナーを秋田市で開催した。講演件数は5件で、そのうち2件が女性によるものであり、そのためか、女子学生の参加者も例年になく多かったことが今回のセミナーの特徴であろう。企業から2人、大学・高専19人、学生23人の合わせて44名にのぼる多数の参加者を得て盛況のうちにセミナーを終えた。東北大学工学部の太田照和先生の挨拶で始まり、次に示すような講演が行われた。

- (1) 流路内突起物まわりの流れと熱伝達の数値解析
中島 円（東北大学大学院博士課程）
- (2) 被服材料の有効熱伝導率
高橋 カネ子（秋田大学）
- (3) 円管まわりの伝熱促進について
相場 眞也（秋田高専）

- (4) 分子動力学による熱流体解析
小原 拓（東北大学流体科学研究所）
- (5) Zメカエンジンの燃焼メカニズム
吉澤 保夫（吉喜工業株式会社）

講演（1）は、矩形断面を有する流路内の角柱状の突起物まわりの強制対流熱伝達に関する数値解析についてである。解析法はスタッガード格子によるSMAC法であり、2次元と3次元の両方について解析してある。プラントル数は0.7の場合で、レイノルズ数は100～1000のごとく比較的低い領域の結果である。レイノルズ数が約500付近から渦の放出が顕著になり、これが熱伝達に大きな影響を及ぼしている。剥離領域の大きさはレイノルズ数の増加とともに増加するが、レイノルズ数が500になると急激に減少する。そのほか、3次元の数値解析結果で、馬てい渦の議論もおこなった。計算領域の妥当性、乱流の影響、メッシュ数の影響などの討論があった。

講演（2）は、布地などの被服材料の熱伝導率の評価である。まず、重ね合わせた布地の伝熱系に下から水蒸気を供給して、熱と物質の同時移動下における布地の有効伝導率を測定した。布地の温度に対する有効熱伝導率には、明確な温度依存性が認められなかったようである。一方、湿分の吸湿側では有効伝導率が大きく、放湿側では逆に小さい値を示しているようである。これは、相変化による潜熱の影響であろう。それから、湿分を含んだ伝熱系をモデル化して有効熱伝導率の数値解析結果も合わせて示した。布地表面温度の測定法、相変化や熱及び物質の同時移動をともなう有効熱伝導率の評価などについて討論があった。

講演（3）は、熱交換器などに最も広く用いられている円管まわりの伝熱促進についてである。講演者の豊かな経験をふまえた実験の動機などユーモアを交えた講演は学生の興味を引いたようである。学生を対象とした円管まわりの熱伝達機構についてわかりやすく説明し、特に円管の前方に流れに直交して、置かれたフェンスの伝達促進効果や、円管の円弧の一部をカットして、直線にした変形円管の伝熱促進効果などは実用の面からも興味をそそるものであった。この種の研究に対する過去の研究成果などに対する議論があった。

講演（4）は、最近次第に発展してきている分子動力学による熱流体解析についてである。このテーマに関しては、多くの人が興味を抱いているものの、その難しさから、容易に入り込めないのが実状ではないかと思われる。しかしながら、講演者の持ち前の話術の巧さによる、平易かつ明快な分子動力

学の要点説明を聞く機会を得たことは意義あることであり、学生に対しても良い啓発効果があったと思われる。つまり量子効果をのぞけば、古典力学の基礎知識によって、それほど、苦勞せずに分子動力学の世界に入っていけると言った内容である。

講演(5)は、現在自動車エンジンなどに圧倒的に採用されているピストン・クランク機構と全く発想が異なるZエンジンについての講演である。従来の機構のクランクはピストンの直線往復運動とクランク軸は傾くのでエネルギー損失が大きい、Zエンジンは支点が動く機構があるので、こうしたエネルギー損失がなく、大変静かで振動がなく、しかも熱効率も良い理想的な動力伝達機構であるとの説明である。実際に、ビデオを用いた講演であるため説得力があり、特に車の好きな若い学生の興味を引いたようである。

(伝熱セミナー実行委員長 菅原征洋)

九州支部活動報告

1996年12月16日

九州支部では例年にならって伝熱セミナー、講演会を実施中であります。8月27日には、九州支部特別講演会を九州大学筑紫キャンパスで行った。講演を以下簡単に紹介する。

- 1、九大・機能研・助教授・高松洋氏は、微小重力下における密閉円管内の流体挙動の可視化結果と解析結果について講演した。
- 2、London 大学・教授・John Rose氏は「Enhanced Condensation Heat Transfer」について特別講演を行った。

両講演について、参加者から大変熱心な討論が行われた。その後簡単なビアパーティを行った。

伝熱セミナーは、国民宿舎「雲仙国民休暇村」で10月11日泊まり込みで行った。講演者は助手と講師層にお願いすることにして、若手層の参加を募ることにした。その結果、一般23名、学生27名の計50名の参加を得ることができた。

講演内容の紹介を簡単に行います。

- 1、九大・工・近縄一成氏は、パルス通電で直接通電加熱した液体中における気泡の発生と成長・崩壊に関する数値解析を行い、直接通電方法によるインクジェットプリンタの電極の形状の最適化を検討した。
- 2、九大・工・助手・野田英彦氏は、深海静圧頭を利用した逆浸透法海水淡水化装置内における狭い海水流路に誘発される自然対流場の速度分布及び濃度分布について数値解析し、淡水透過流量に及ぼす流路幅等の影響を調べた。また洋上で淡水取

得実験を行い、実験値は解析値とよく一致することを示した。

- 3、鹿児島大・工・助教授・鳥居修一氏は、anisotropic 乱流伝熱に関して温度場2方程式モデルを提案し、常温および一定熱流束壁面の二次元channel 流れにおける本解析結果が従来のDNS データとよく一致することを示した。
- 4、長崎大・工・助手・山口朝彦氏は、カリナ・サイクルの熱力学的評価について、まずカリナ・サイクルの動作媒体となるアンモニア-水混合物の熱力学的性質に触れ、ついでカリナ・サイクルの特徴を概観して整理し、最後にサイクルの計算結果を同じ動作媒体を用いたロレンツ・サイクルと比較してサイクルの熱力学的性能について検討した。
- 5、九工大・工・助手・高津康幸氏は、管群 Hele-Shaw 多孔質モデルを導入し、多孔質内部流動状況を可視化ならびに、多孔質内部速度・温度場の計測を行うことにより、高レイノルズ数域での流動および熱伝達特性について検討し、多孔質内の Forchheimer 流動抵抗及び熱分散を多孔質内部の乱流渦混合の概念から解釈した。
- 6、熊本大・工・修1・富野貴義氏は、ロッドバンドルを模擬した二つのサブチャンネル間の乱流混合実験を行い、乱流混合量におけるサブチャンネル間の間隙数などの影響を調査した。
- 7、三菱重工・長崎研究所・小阪健一郎氏は、多孔体熱電変換の数値シミュレーションを行った。
- 8、佐賀大・理工・助教授・宮良明男氏は、鉛直平面上で二次元的表面波を伴いながら流下する液膜について直接数値計算を用いて解析し、液膜内の流れに及ぼす表面波の影響に関して検討を行いました。なお、表面波は、流入境界で人工的な擾乱を与えることによって発生し、擾乱周波数を変化させた場合の表面波の特性の違いについても調べた。
- 9、三菱重工・長崎研究所・次長・村上信明氏には、石油、天然ガスについては近い将来、供給がひっばくする懸念があるため、埋蔵量が豊富で供給安定性も高い石炭の有効利用技術が強く要請されている背景のもとで、当社で開発中の環境との調和を目指した石炭関連エネルギー技術の現状について特別講演を行っていただきました。

最後の1件はビールつきの夕食後、ビールを飲みながらの講演聴講に致しました。

夜はいくつかの部屋で深夜まで放談会が続き、有意義なセミナーとなった。

(九州支部担当理事 尾添 紘之)

第34回日本伝熱シンポジウムのご案内

- ・開 催 日 平成9年5月21日(水)～5月23日(金)
ただし、5月20日(火)の午後にレクチャーコースを開催(2ページ後を参照)
- ・会 場 宮城第一ホテル(仙台市宮城野区榴岡1-2-45)JR仙台駅東口正面(徒歩約3分)
- ・シンポジウム参加費 一般 事前申込:7,000円 当日申込:8,000円
学生 事前申込:3,000円 当日申込:4,000円
(いずれも講演論文集は含みません)
- ・講演論文集
 - 1) シンポジウム参加者(会場受付にてお受け取り下さい)
日本伝熱学会員:無料(1セット)
非 会 員:8,000円(1セット)
 - 2) シンポジウム不参加者
日本伝熱学会員:無料(1セット)で後日郵送
非 会 員:8,900円(1セット・送料込み)で後日郵送
 - 3) 追加注文
会場受け取り:8,000円(1セット)
後 日 郵 送:8,900円(1セット)
- ・懇 親 会 日時5月22日(木) 19:00～21:00
会場 宮城第一ホテル
会費 事前申込:7,000円 当日申込:8,000円
(ご夫妻・お子様連れでのご参加の場合は、1名分の会費)
- ・参加申込方法 本号に挟み込みの郵便振替用紙を各人1名につき1枚ずつご使用になり、通信欄に「氏名(ふりがな)、会員・会員外の別、勤務先又は学校名、参加費、懇親会費(ご夫妻・お子様連れでのご参加の場合にはその旨を明記して下さい)、講演論文集(有料分)、払込合計金額」をご記入の上、その合計金額をご送金下さい。参加証は前日・当日受付にてお渡し致します。また、原則として領収書の発行を省略し、郵便振替払込兼受領書をもってかえさせていただきます。
(郵便振替口座 02260-7-1397, 第34回日本伝熱シンポジウム準備委員会)
- ・事前申込締切 平成9年4月18日(金) (消印有効)
- ・参加・講演の問い合わせ先 〒980-77 仙台市青葉区荒巻 東北大学大学院工学研究科量子エネルギー工学専攻
第34回日本伝熱シンポジウム準備委員会事務局・橋爪秀利
電話:022-217-7902 Fax:022-217-7900
E-mail:sympo@hll.nucle.tohoku.ac.jp
ホームページ: <http://fates.nucle.tohoku.ac.jp/~sympo>
- ・会場受付 宮城第一ホテル
5月20日(火) : 12:00～18:00
5月21日(水)・22日(木): 8:30～19:30
5月23日(金) : 8:30～17:30
- ・宿泊のご案内 宮城第一ホテル(割引料金)
シングル30室 一泊 8,667円(税込み)
ツイン 15室 一泊 17,334円(税込み)
となっております。上記第34回日本伝熱シンポジウム事務局に直接お申し込み下さい。お支払いは、各自、ホテルでお願い致します。締め切りは2月末日で、先着順となっております。その他のホテルについては次ページをご覧ください。

宿泊のご案内

第34回日本伝熱シンポジウムにご参加の皆様には便宜をはからせて頂くため、東北大学生協同組合トラベルコープに宿泊の斡旋を特別割引料金で委託しています。

○宿泊の取扱期間：平成9年5月20日（火）～5月23日（金）

○宿泊ホテル・料金（シングル、朝食無し）は以下の様になっています。満室になり次第締め切らせて頂きます。

記号	ホテル名	料金	場所
A	サンルート仙台	8,100円（税別）	仙台駅西口より徒歩3分
B	東横イン	6,800円（税別・96/12現在）	仙台駅東口より徒歩7分
C	チサンホテル	7,600円（税別）	仙台駅西口より徒歩6分
D	ホテル昭和	7,210円（税込）	仙台駅西口より徒歩5分

お申し込み方法

下の申込用紙に必要事項（ホテル名は記号で記入の上、下記の送付先までファックスでお申し込み下さい。ツインルームご希望の方は備考の欄にご記入下さい。

- (1) お申し込み締切日：平成9年5月6日（火）必着
- (2) 宿泊券の送付・精算：ご出発の10日～15日前までに宿泊券をお送り致します。
- (3) 同時に料金明細を同封いたしますので、恐れ入りますが1週間以内にご送金下さい。なお、取扱手数料として、お一人様1件につき520円を頂いておりますのでご了承下さい。
- (4) お客様のご都合による予約変更・取り消しに際しては、それぞれ、210円ずつ申し受けます。また、取り消しの場合、以下のように違約料を申し受けます。

3日前・2日前取消の場合：宿泊料の20%	前日の取消の場合：宿泊料の50%
当日の取消の場合：80%	無連絡の場合：宿泊料全額

- (5) 送り先 〒980 仙台市青葉区片平2-1-1 （宮城県知事登録旅行業 第2-141号）
 東北大学生協同組合 学会宿泊係 担当：大石、平間、鳩岡
 Tel:022-261-5040 Fax:022-261-1015

営業時間 平日 9:45～13:15 / 14:15～17:30
 土曜日 9:45～13:30

第34回日本伝熱シンポジウム宿泊申込書							
申込者氏名：		所属：		電話：			
住所（宿泊券送付先）：						電話：	
宿泊者氏名	性別	年齢	宿泊日と希望ホテル名				受付番号（業者用）
			5/20	5/21	5/22	5/23	
例：生協 太郎	男	50	A	A	A	A	
-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	
-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	
-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	
備考：							

発表申込者の方へ

第34回日本伝熱シンポジウムにご講演を申し込まれた方は、下記の要領に従って書類をご提出下さいますようお願い致します。

ご提出頂く書類

- 1) 講演論文原稿 (A4・2ページ)
次ページの原稿見本と書き方をご参照下さい。Faxによる原稿送付はお断り致します。
- 2) JICSTデータベース用抄録
本シンポジウムでの発表論文のアブストラクトは、すべて、JICSTデータベースに収録されます。原稿提出時に必ず、2ページ後の論文抄録用紙に和文アブストラクトをお書きの上ご提出下さい。
- 3) 原稿受理は、E-mail等にてお知らせ致します。
- 4) 1996年10月号の講演募集要項にごさいました「大学等研究機関の研究室単位で申込をされる場合には、1研究室当たりの発表件数の上限を5件」に関しましては、同一指導教官を含む場合の学生による講演のみを数えます。もし、この範囲内でご講演を追加されたい方は、本誌が配達されてから7日以内に第34回日本伝熱シンポジウム事務局までご連絡下さい。

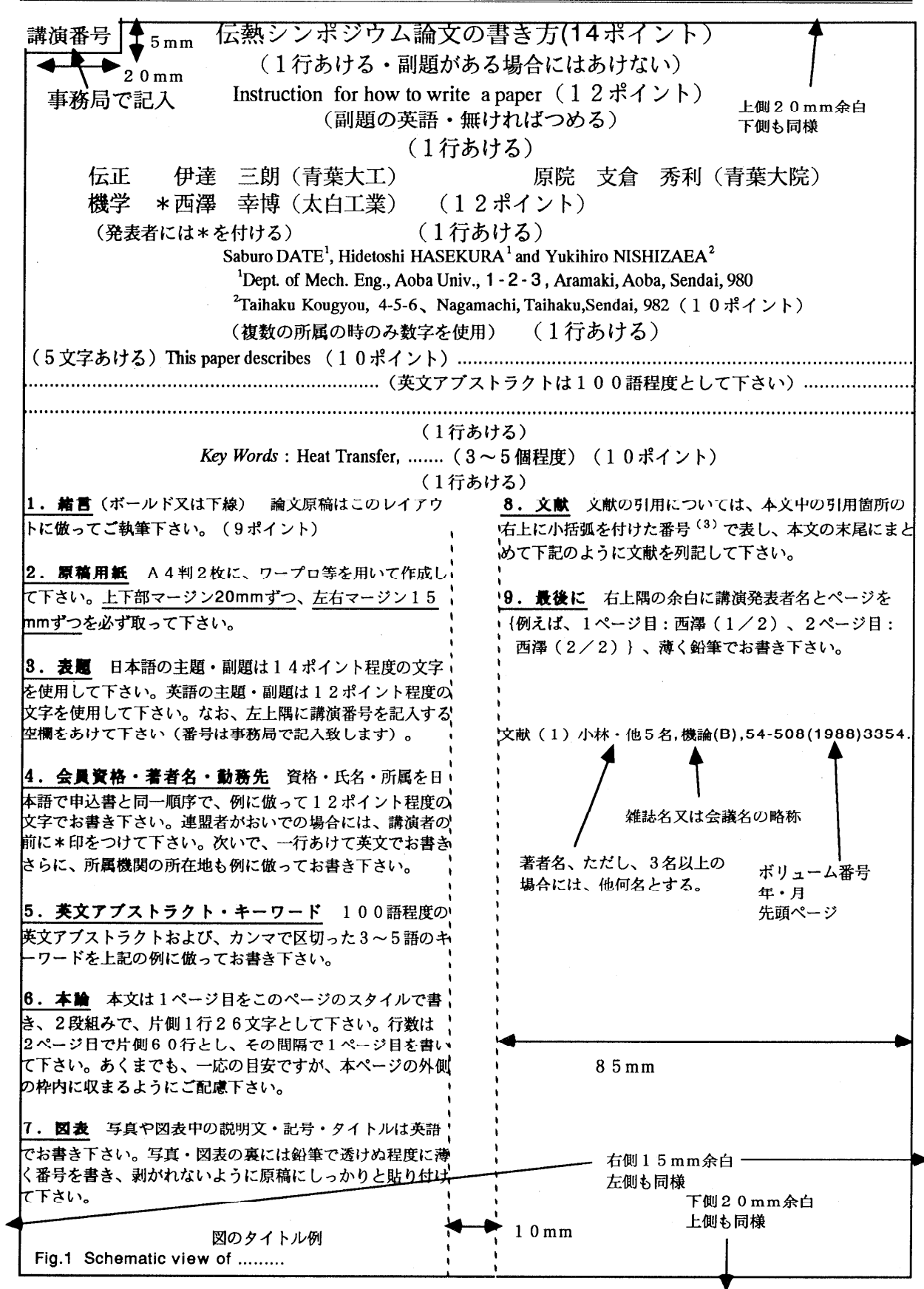
- ・論文原稿締切 平成9年3月14日(金) 必着(締切厳守)
- ・書類送付先 〒980-77 仙台市青葉区荒巻 東北大学大学院工学研究科量子エネルギー工学専攻
第34回日本伝熱シンポジウム準備委員会事務局・橋爪秀利
電 話 : 022-217-7902 FAX : 022-217-7900
E-mail : sympo@hll.nucle.tohoku.ac.jp
ホームページ : <http://fates.nucle.tohoku.ac.jp/~sympo>

第34回日本伝熱シンポジウム準備委員会
委員長 戸田 二朗

レクチャーコースのご案内

下記の予定で、第34回日本伝熱シンポジウムの前日にレクチャーコースを企画いたしました。参加資格は特にございませんので、お気軽にご参加下さい。

- ・開 催 日 5月20日(火) 13:30~18:00
- ・会 場 宮城第一ホテル(仙台市宮城野区榴岡1-2-45) JR仙台駅東口正面(徒歩約3分)
- ・参 加 費 一般: 2,000円 学生: 1,000円
(当日会場にて申し受けます)
- ・講 義 「電子機器の冷却技術(仮題)」 中山 恒 殿 (Univ. of Maryland 教授)
「建物空間のアメニティ(仮題)」 田辺 新一 殿 (お茶の水大 助教授)
- ・参加申込法 参加をご希望の方は、氏名、所属、一般・学生の別、連絡先を明記の上、5月8日(木)までに
東京大学 飛原 英治 宛
Fax: 03-3815-8356 又は E-mail : hihara@mech.t.u-tokyo.ac.jp
お申し込み下さい。



"The Frontiers Forum" 企画募集

日本伝熱学会 企画委員会委員長 笠木 伸英

「基盤強化委員会からの提案」(伝熱研究、Vol.35、No.137(1996.4)、p.48)にしたがい、第34回日本伝熱シンポジウムにおける The Frontiers Forum の開催を企画しております。つきましては、下記の趣旨等をご参考の上、ご応募下さいませようお願い申し上げます。

開催趣旨： 伝熱研究におけるトピックスや新たな手法、その他パラダイムシフトにつながる研究の進め方や展望について提案し、公開討論の場を通して伝熱研究の The Frontiers を発掘する。

応募資格： 企画代表者(応募者)が伝熱学会会員であること以外は、特に資格は問わない。

開催日： 第34回伝熱シンポジウム会期中(1時間半、1テーマ約30分)

開催場所： 第34回伝熱シンポジウム会場

応募締切： 平成9年2月28日(金)

応募要領： A4用紙に「The Frontiers Forum」と標記し、以下の内容を記載し下記の応募先に郵送。

①テーマ名、②企画者(代表者を含む若干名)氏名・所属・連絡先、③テーマの内容(400字程度)、④背景となっている研究会などの名称・活動状況(該当しない場合は記載不要)

連絡先： 林 勇二郎(金沢大学工学部 人間・機械工学科、TEL:0762-34-4740、FAX:0762-34-4743)

西尾 茂文(東京大学生産技術研究所 第二部、TEL:03-3402-6231、FAX:03-5411-0694)

応募先： 〒106 東京都港区六本木七丁目22-1

東京大学生産技術研究所 第二部 西尾 茂文

備考： The Frontiers Forum の趣旨にしたがい、応募いただきましたテーマの中から選択させていただき、フォーラムとしてのテーマの採否を3月15日までにお知らせいたします。

日本伝熱学会関西支部 第4期定時総会・講演討論会

日本伝熱学会関西支部は標記の支部総会・講演討論会を開催いたします。とりわけ支部会員各位にはよろしくご出席いただきたくご案内申し上げます。

日時： 平成9年4月25日(金) 13:00-19:30

会場： 京大会館 101号室

京都市左京区吉田河原町 15-9 TEL: 075-751-8311, FAX: 075-761-5403

講演： 13:00-14:00 司会 小澤守(関西大学工学部)

(1) 分散粒子の計測法の現状 佐藤行成(日本カノマックス(株))

(2) ディーゼル燃焼過程におけるすす生成の可視化

塩路昌宏(京都大学大学院エネルギー科学研究科)

14:10-15:10 司会 片岡勲(京都大学大学院工学研究科)

(3) 減圧沸騰噴霧の計測とモデリング 千田二郎(同志社大学工学部)

(4) 乱流場における液滴挙動の解析 松浦敬三(原子燃料工業(株)、京都大学大学院)

総会： 15:20-16:00

特別講演： 16:10-17:40 司会 荻野文丸(京都大学大学院工学研究科)

交通機関の高速化と次世代交通機関 赤木新介(大阪大学工学部教授)

懇親会： 17:40-19:30 京大会館特別室(懇親会参加費 5,000円)

本件に関するお問い合わせは下記にお願いします。

606-01 京都市左京区吉田本町 京都大学大学院工学研究科機械物理工学専攻

牧野 俊郎 TEL & FAX: 075-753-5265

伝熱技術フォーラム 見学講演会
大阪ドーム見学とコージェネレーションの動向と
ガスエンジンの高効率化 に関する見学会

見学講演会日時：平成9年3月7日（金）14：00～17：00

集合時間・場所：13：50

大阪ガス・ドームシティガスビル 4階大会議室

交 通：JR環状線大正駅下車 北向きに大阪ドームへ徒歩約10分
大阪ドームのエスカレーターまたは階段にて4階のドームシティガスビルの総合受付へ TEL 06-584-8856（エネルギー技術部 国分・藤本）
所在地：大阪市西区千代崎3丁目南2番37号

ドーム見学：約1時間（ただし、アリーナの催しにより見学内容が変わる）

講 演：コージェネレーションの動向（エネルギー技術部 深谷信彦氏）
ガスエンジンの高効率化（エンジニアリング部 深野行義氏）

講演終了後：懇親会をドームシティガスビル15階で予定。

参加費：ドーム見学・講演会のみ 2000円

ドーム見学・講演会・懇親会 5000円

申込み方法：大阪大学基礎工学部化学工学科 平田雄志まで
2月末までに下記 FAX または E:MAIL にて
TEL:06-850-6275 FAX:06-850-6277
E:MAIL hirata@cheng.es.osaka-u.ac.jp

会場への地図



パソコンによる 熱と流れの入門

数値解析法の基礎、モデリングの方法などの基礎的な知識と、熱伝導・層流伝熱・乱流伝熱などへの適用方法を実際に実機で演習。

さらに最近話題になっている分子動力学について熱流体分野への適用に関し、基礎から応用と実例などを解析。講義中ご使用の Floppy Disk はそのままお持ち帰りいただき、実際の実務にご利用いただくことができます。

会期：1997年2月10日（月）～3月25日（火） 合計6回：NEC/PC-9821Xa 演習

会場：(株)リース電子内「LEEパソコン教室」 東京都千代田区神田美倉町8番地 (TEL 03-3256-2388)

セッションガイド及び講師

S-1 2/10（月） 差分法による熱伝導解析 青木 和夫 長岡技術科学大学

1. 熱伝導方程式の考え方 2. 差分法の基礎 3. 熱伝導方程式の数値解法 4. 複雑な形状への適用

S-2 2/11（火） 層流熱伝達の解析 功刀 資彰 日本原子力研究所

1. 層流対流の基礎式 2. 数値解法と問題点 3. 境界条件と解の精度 4. 層流対流の実際

S-3 3/3（月） 乱流熱伝達の解析 吉田 英生 東京工業大学

1. まえがき 2. レイノルズ方程式と完結 (closure) 問題 3. 乱流モデル 4. 計算例

S-4 3/4（火） 相変化および移動境界問題の非定常シミュレーション 長崎 孝夫 東京工業大学

1. 相変化を伴う場の解析 2. 自由表面における波動を伴う流れの解析

S-5 3/24（月） ふく射伝熱の基礎と応用 圓山 重直 東北大学

1. 熱ふく射の基礎 2. 電磁場の伝播と物体間のエネルギー交換 3. ふく射要素法による任意形状・任意加熱条件下のふく射伝熱 4. ふく射伝熱解析の実用計算

S-6 3/25（火） 熱流体の分子動力学 小竹 進 東京大学名誉教授

1. 分子動力学の基礎方 2. 数値解法と境界条件 3. 物理量と平均操作 4. 応用と実例

後援：社団法人 日本伝熱学会

参加料：'97/1/27迄 後援・参加実績者（187,500）協賛団体（202,500）国公立研究機関（172,500）

会員外（213,750）大学院生・大学生（80,000）

資料請求先・問合せ先：先端科学技術・情報研究センター

〒173 東京都板橋区双葉町35-10 板橋ビル4階 TEL:03-3579-3431 FAX:03-3579-3400

日本混相流学会混相流第17回レクチャーシリーズ

——粉粒体のプラグ輸送——

（革新的、効率的な高濃度輸送技術の理論と実践）

<http://www-mupf.meim.eng.osaka-u.ac.jp/jsmf-lec.html>

日時 平成9年2月21日（金）

会場 日本大学理工学部駿河台校舎1号館（〒101 東京都千代田区神田駿河台1-8-4）

演題・講師

1. 「モノポンプによる粉体の高濃度輸送（デモによる実例紹介）」 玉村忠雄（兵神装備（株））
2. 「高凝集性粉体（飛灰）の高濃度空気輸送システムの安定化」 谷口貞司（日本スピンドル製造（株））
3. 「粉粒体のプラグ輸送特性とスケールアップ」 二村光司（（株）日本アルミ技術研究所）
4. 「微粒体の高濃度輸送」 廣田満昭（姫路工業大学）
5. 「高濃度プラグ輸送」 上野博之（日本大学）
6. 「プラグ輸送のシミュレーション」 田中敏嗣（大阪大学）

参加費 会員（協賛学協会会員を含む）20,000円、非会員30,000円、学生、院生5,000円

申込先 〒554 大阪市此花区春日出中2-14-9 (株)学術出版印刷内

日本混相流学会企画運営委員会 (Tel. 06-466-1588 Fax. 06-463-2522)

E-mail lecture@sernewsl.nucleng.kyoto-u.ac.jp

申し込み締切 平成9年2月14日（金）

問合せ先 〒606-01 京都市左京区吉田本町 京都大学大学院工学研究科原子核工学専攻

片岡 勲 (Tel. 075-753-5823 Fax. 075-753-5845 E-mail kataoka@sernewsl.nucleng.kyoto-u.ac.jp)

CALL FOR PAPERS

International symposium on

AIR CONDITIONING IN HIGH RISE BUILDINGS '97

September 9-12, 1997 Shanghai, P. R. China

Organized by the Chinese Association of Refrigeration and the Shanghai Society of Refrigeration

Sponsored by International Institute of Refrigeration (Commissions E1, E2 and B2)

This symposium will deal with different aspects of technologies of air conditioning and refrigeration in high rise buildings. The main topic will be concentrated on research and development of air conditioning and refrigeration systems, as well as energy conservation techniques. A range of subjects to be covered will include the following:

1. The state-of-the-art and the prospects of air conditioning in high rise buildings, 2. Indoor climate and IAQ, 3. Air conditioning systems (design, operation and maintenance), 4. Energy conservation, 5. Refrigeration, heat pump and thermal storage equipment, 6. Design of air conditioning and energy plants, 7. Fire protection and smoke control of high rise buildings, 8. Application of artificial intelligence in high rise building

Abstract

Paper selection will be based upon a review of abstracts (200 words, double-space, A4). One abstract should be sent to Prof.W.D.LONG before March 31,1997.

Deadlines

Abstract: March 31, 1997

Full Paper: May 31, 1997

Correspondence

Professor W.D. LONG
Shanghai Society of Refrigeration,
47 Nanchang Road, Shanghai 200020, P.R. CHINA
Phone: 86-21-63722229, Fax: 86-21-63277108
E-mail: icetju@online.sh.cn

Professor Kunio HIJIKATA
Department of Mechano-Aerospace Engineering
Faculty of Engineering, Tokyo Institute of Technology
2-12-1 Ohokayama, Meguro-ku, Tokyo 152, Japan
Phone:(03)5734-3172, Fax:(03)3729-0628

「伝熱研究」会告の書き方

印刷は原稿からそのままオフセット印刷を行いますので、鮮明な原稿にして下さい。大きさは、この外枠に入るように縦 115 mm 以内横 170 mm 以内に収まるようにして下さい。この範囲に入らないものは、「伝熱研究」原稿の書き方に従って下さい。

170 mm

115 mm

「伝熱研究」原稿の書き方

伝熱 太郎 (伝熱大学)

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

42 mm

1. 「伝熱研究」用原稿の標準形式

用紙サイズ：A4 縦長 (210mm×297mm), 横書き

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

コ ラ ム：2 段組とします。

1 コラム長 80 mm, コラム間隔 10 mm

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

1 行の字数：1 段あたり 23 文字程度

行 送 り：15 ポイント (15×0.3514=5.271 mm)

1 頁あたり 45 行となります。

2. 「伝熱研究」用原稿作成上の注意

- (1) 印刷は原稿からそのままオフセット印刷で行いますので、この点を考慮の上、写真・図表等には特に注意して鮮明なものをご使用ください。
- (2) 原稿枚数は原則として最大 10 枚 (図表込み) を越えないでください。
- (3) 原稿は出力フォーマットに従って作成の上編集委員会までご送付ください。
- (4) 図表は、原稿内に直接張り込んでください。
- (5) 原稿の頁数は各頁の上すみに青鉛筆で薄く 1/8, 2/8 のように記入してください。
- (6) 本手引きの各種寸法及び文字数等は、お手持ちのワープロの機能によっては、必ずしもこれらを満足できないかもしれません。このような場合には適宜これにできるだけ近くなるように、原稿をおつくりくださいますようお願い申し上げます。
- (7) 本文の体裁・項目の分け方などは、自由にお書きください。

15 ポイント行間

15 ポイント行間

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

22.5 ポイント行間あるいは半行を挿入

22.5 ポイント行間あるいは半行を挿入

その他の事項

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

20

20

30

事務局からの連絡

1. 学会案内と入会手続きについて

【目的】

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

【会計年度】

会計年度は、毎年4月1日に始まり翌年3月31日までです。

【会員の種別と会費】

会員種別	資格	会費(年額)
正会員	伝熱に関する学識経験を有する者で、本会の目的に賛同して入会した個人	8,000円
賛助会員	本会の目的に賛同し、本会の事業を援助する法人またはその事業所、あるいは個人	1口 30,000円
学生会員	高専、短大、大学の学部および大学院に在学中の学生で、本会の目的に賛同して入会した個人	4,000円
名誉会員	本会に特に功勞のあった者で、総会において推薦された者	8,000円 但し、 70才以上は0円
推薦会員	本会の発展に寄与することが期待できる者で、当該年度の総会において推薦された者	0円

【会員の特典】

会員は本会の活動に参加でき、次の特典があります。

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

【入会手続き】

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

(注意)

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

2. 会員の方々へ

【会員増加と賛助会員口数増加のお願い】

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

【会費納入について】

会費は当該年度内に納入してください。請求書はお申し出のない限り特に発行しません。会費納入状況は事務局にお問い合わせ下さい。会費納入には折込みの郵便振替用紙をご利用下さい。その他の送金方法で手数料が必要な場合には、送金額から減額します。フリガナ名の検索によって入金事務処理を行っておりますので会社名のみで会員名の記載がない場合には未納扱いになります。

【変更届について】

(勤務先、住所、通信先等の変更)

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

(賛助会員の代表者変更)

賛助会員の場合には、必要に応じて代表者を変更できます。

(学生会員から正会員への変更)

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

(変更届提出上の注意)

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

【退会届について】

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

【会費を長期滞納されている方へ】

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

3. 事務局について

次の業務を下記の事務局で行っております。

事務局

(業務内容)

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

(所在地)

〒113 東京都文京区湯島2-16-16

社団法人日本伝熱学会

TEL,FAX:03-5689-3401

(土日、祝祭日を除く、午前9時～午後5時)

(注意)

- 事務局への連絡、お問い合わせには、電話によらずできるだけ郵便振替用紙の通信欄やファックス等の書面にてお願いします。
- 学会事務の統括と上記以外の事務は、下記にて行なっております。

〒152 東京都目黒区大岡山2-12-1 東京工業大学 工学部

機械科学科 斎藤彬夫

TEL:03-5734-2167, 3308 FAX:03-5734-2167, 2893

日本伝熱学会正会員・学生会員入会申込み・変更届用紙

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

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

専門分野
 1: 自然対流 2: 強制対流 3: 熱伝導 4: 凝縮 5: 沸騰・蒸発 6: 混相流
 7: 物質移動 8: 反応・燃焼 9: 放射 10: 熱物性 11: 熱交換器 12: 流動層
 13: 蓄熱 14: 冷熱・空調 15: 内燃機関 16: ガス・スチム 17: 蒸気機関 18: 原子力
 19: 太陽熱 20: 環境 21: その他 ()
 例: 電子機器の冷却, 生体伝熱, 分子動力学等
 *) 学生会員入会申込者は学校名, 学部, 学科, 研究室名, 学年 (M2, D3 など) を記す。
 **) 郵送物発送先として通信先を必ず記入する。
 ***) 学生会員入会申込者は, 指導教官の署名・捺印を受ける。

日本伝熱学会 賛助会員新規入会申込み届用紙

0	申込年月日	1	9	9	年	月	日
*ご記入に際しての注意 日本伝熱学会からの郵送物は代表者にお送りしておりますので, 代表者の所属に変更 があります。事前に事務局宛ご連絡下さるようお願いいたします。							
1	会員資格	賛助会員					
2	代表者氏名						
3	ふりがな						
4	名称 (所属)						
5	代表者	-					
6	代表者						
7	勤務先						
8	所在地						
9	TEL						
10	FAX						
11	口数	共通・専用					

日本伝熱学会入会のご案内

1. 本学会の会計年度は毎年4月1日から翌年3月末日までです。
2. 賛助会員の会費は1口30,000円/年で, 申し込みは何口でも結構です。申し込み口数により, 次のように分けております。
 A (3口), B (2口), C (1口)
 「日本伝熱シンポジウム講演論文集」等をお申し込み口数1口につき1部無料で
 差しあげます。
 この伝熱研究は通常, 年4回 (4, 7, 10, 1月号) 発行しております。
 但し, 日本伝熱シンポジウム講演論文集につきましては, 前年度の会費を年度未
 までに完納された会員に限り当該年度のもを無料で差しあげます。
 尚, 年度途中でご入会の方には残部の都合でお送りできない場合がありますの
 で, あらかじめご承知おき下さい。
3. 本学会では, 事務作業簡素化のために会費の領収書の発行は郵便振替や銀行振込
 の控えをあて, 簡単な書式の領収書をご用意できますが, それ以外の場
 合には貴社ご指定の書式をご送付下さいますようお願いいたします。
 申込書送付先: 〒113 東京都文京区湯島 2-16-16
 社団法人日本伝熱学会事務局 TEL., FAX. 03-5689-3401
4. 会費の払込先:
 (1) 郵便振替の場合 郵便振替口座 00160-4-14749 社団法人日本伝熱学会
 (2) 銀行振込の場合 第一勧業銀行 大岡山支店 普通預金口座 145-1517941
 社団法人日本伝熱学会
 (3) 現金書留の場合 上記の事務局宛に御送金下さい。

複写をされる方に

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

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

Notice about Photocopying

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

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

伝 熱 研 究

ISSN 0910-7851

(Journal of The Heat Transfer Society of Japan)

Vol. 36, No.140

1997年1月発行

THERMAL SCIENCE AND ENGINEERING

ISSN 0918-9963

Vol. 5, No. 1

January, 1997

発行所 社団法人 日 本 伝 熱 学 会

〒113 東京都文京区湯島2-16-16

電話 03 (5689) 3401

Fax. 03 (5689) 3401

郵便振替 00160-4-14749

Published by

The Heat Transfer Society of Japan
16-16, Yushima 2-chome, Bunkyo-ku,
Tokyo-113, Japan
Phone, Fax : +81-3-5689-3401

伝熱研究 VOL. 36, NO. 140

〈随想〉

伝熱という名の学会 小竹 進 (東洋大学) 1

〈特集：多孔質体内の熱・物質同時移動〉

「多孔質体内の熱・物質同時移動」特集にあたって

..... 第35期編集委員会 松尾篤二 (三菱重工業(株)長崎研究所) 3

Heat and Mass Transfer Aspects of Gas Separation by Adsorption

..... A. Fedorov and R. Viskanta (Purdue University) 4

吸着ヒートポンプの吸着剤充填吸着器内熱・物質移動

..... 渡辺藤雄, 架谷昌信 (名古屋大学大学院工学研究科エネルギー理工学専攻) 12

改質触媒層における熱・物質移動

..... 福迫尚一郎, 山田雅彦 (北海道大学大学院), 宇佐美優 (東京電力(株)エネルギー・環境研究所) 18

多孔質体内燃焼研究の最近の発展

..... 上宇都幸一 (大分大学工学部生産システム工学科) 27

地下空間環境に及ぼす多孔質体内の熱物質移動現象

..... 藤井義久 (鹿島建設(株)技術研究所, 現: 新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO)) 33

生活環境下における被服材料の有効熱伝導率

..... 高橋カネ子, 山田悦郎 (秋田大学鉱山学部機械工学科) 39

回転式除湿器・回転式全熱交換器内での熱・物質同時移動

..... 田中宏史 (福岡工業大学電子機械工学科) 45

断熱材内の熱物質移動について 河合洋明 (北海道工業大学機械工学科) 50

建築壁体の熱・湿気移動解析 尾崎明仁 (福岡大学工学部建築学科) 57

セラミックスの乾燥収縮シミュレーション

..... 板谷義紀, 架谷昌信 (名古屋大学大学院工学研究科エネルギー理工学専攻) 67

湿紙の乾燥過程における熱及び物質移動現象の研究

岸浪紘機 (室蘭工業大学機械システム工学科), 山崎幸次 (日本製紙株式会社石巻工場技術課),

齊藤図 (室蘭工業大学機械システム工学科), 鈴木淳 (室蘭工業大学機械システム工学科) 73

〈世界のホットユース〉

日本, ヨーロッパ, 米国における工学研究についての感想

..... 徳廣明 (動力炉・核燃料開発事業団) 80

〈研究トピックス〉

高効率フィンチューブ熱交換器の開発 李承甲 (三星電子生活システム研究所) 84

〈賛助会員紹介〉

(株)東芝 原子力技術研究所 師岡慎一 (株)東芝原子力技術研究所) 85

〈書評〉

混相流用語辞典 加治増夫 (大阪大学工学部) 88

THERMAL SCIENCE AND ENGINEERING Vol.5, No.1

1. Space-Constrained Optimizations of Natural Convective Fin Arrays 1
Wei J., Hijikata K. and Inoue T.
2. Natural Convection Heat Transfer Enhancement using Microencapsulated Phase-change-material Slurries (in Japanese) 9
Kubo S., Akino N., Tanaka A., Nakano F. and Nagashima A.
3. Temperature Propagation in a Single Component Critical Fluid 15
Maekawa T. and Ishii K.