

伝熱研究

1987
April
Vol. 26
No. 101

Journal of Heat Transfer Society of Japan

——〈特集：伝熱の数値シミュレーション〉——

- | | |
|--------------------------------|-------|
| (1) 伝熱数値解析の現状と展望 | 小竹 進 |
| (2) 差分スキームによる解の相違について | 山下 博史 |
| (3) 広い空間におかれた物体周りに生じる自然対流の数値計算 | 竹内 正紀 |
| (4) 半導体製造に関連した伝熱の数値解析 | 木枝 茂和 |
| (5) 凝固プロセスのコンピュータシミュレーション | 大中 逸雄 |
| (6) 蓄熱システムのコンピュータシミュレーション | 齊藤 武雄 |
| (7) 原子炉における伝熱数値シミュレーション | 河村 洋 |
| (8) 軽水炉安全性に関する伝熱数値シミュレーション | 村尾 良夫 |

〈放談会、下〉

日本伝熱研究会のゆくえ

伝熱研究会メンバー8名

〈最長老会員・浅川勇吉先生を偲ぶ〉

浅川勇吉先生を偲んで

小竹 進

「アサカワ効果」——その発見と応用

故 浅川 勇吉

〈会議参加報告〉

(1) 第2回 ASME-JSME 熱工学会議に出席して

土方 邦夫

(2) 電子機器の冷却技術に関する国際シンポジウムに出席して

五十嵐 保

日本伝熱研究会
Heat Transfer Society of Japan

日本伝熱研究会第25期(昭和61年度)役員

会 長		長谷川 修(九大)
副 会 長	(無任所) (事務担当)	堀 雅夫(動燃) 小竹 進(東大)
地方連絡幹事	北海道 東北 関東 東海 北陸・信越 関西 中国・四国 九州	福迫尚一郎(北大) 斎藤武雄(東北大) 矢部 彰(機械研) 荒木 信幸(静岡大) 口向 滋(信州大) 片岡 邦夫(神戸大) 須藤 浩三(広大) 藤田 恭伸(九大)
幹 事 (23名)	坂爪伸二(釧路高専) 熊谷 哲(東北大) 山川紀夫(岩手大) 竹内正顕(東海大) 望月貞成(東農工大) 三田地紘史(豊橋技大) 森 茂(金沢大) 加治増夫(大阪大) 千田 衛(同志社大) 尾添紘一(岡山大) 岩淵牧男(三菱重工) 増岡隆士(九工大)	谷口 博(北大) 新野正之(航技研) 坂本守義(東芝) 田中宏明(東大) 新井紀男(名大) 竹越栄俊(富山大) 大場健吉(関西大) 芦沢昭示(京大) 藤井雅雄(三菱電機) 水上紘一(愛媛大) 福田研二(九大)
監 査(2名)	前田昌信(慶応大)	田中 修(三菱電機)
「伝熱研究」編集委員長		黒崎晏夫(東工大)
第24回日本伝熱シンポジウム準備委員長		二神浩三(愛媛大)
第21回伝熱セミナー準備委員長		大谷茂盛(東北大)

伝 熱 研 究 日 次

	頁
「日本伝熱研究会将来問題検討委員会」の発足とアンケートご回答のお礼 会長 長谷川 修 (九大)	1
〈特集：伝熱の数値シミュレーション〉	
(1) 伝熱数値解析の現状と展望	3
(2) 差分スキームによる解の相違について	6
(3) 広い空間におかれた物体周りに生じる自然対流の数値計算 竹内止紀 (福井大)	20
(4) 半導体製造に関連した伝熱の数値解析	30
(5) 凝固プロセスのコンピュータシミュレーション 大中逸雄 (阪大)	47
(6) 蓄熱システムのコンピュータシミュレーション 斉藤武雄 (東北大)	62
(7) 原子炉における伝熱数値シミュレーション 河村 洋 (原研)	82
(8) 軽水炉安全性に関する伝熱数値シミュレーション 村尾良夫 (原研)	101
〈放談会、下〉	
日本伝熱研究会のゆくえ	伝熱研究会メンバー 8名 120
〈最長老会員・浅川勇吉先生を偲ぶ〉	
浅川勇吉先生を偲んで	副会長 小竹 進 (東大) 132
「アサカワ効果」 その発見と応用	故 浅川勇吉 134
〈会議参加報告〉	
(1) 第2回 ASME-JSME熱工学会議に出席して	上 方 邦 大 (東工大) 151

(2) 電子機器の冷却技術に関する国際シンポジウムに出席して	五十嵐 保 (防大)	154
〈地方研究グループ活動報告〉		
(1) 九州研究グループ講演会		159
(2) 中国四国研究グループ講演会		161
(3) 関西研究グループ講演会		162
		164
編集後記	第25期編集委員長 黒崎 晏夫 (東工大)	164
〈お知らせ〉		
(1) 第25期(昭和61年度)総会のお知らせ		165
(2) 新会員名簿の発行		165
(3) 第24回日本伝熱シンポジウム		166
(4) 第21回伝熱セミナーのお知らせ		195
(5) 第8回日本熱物性シンポジウムのお知らせ		198
(6) 3rd Int. Symposium on Transport Phenomena		199
(7) 事務局より		200

「日本伝熱研究会将来問題検討委員会」の発足とアンケートご回答のお礼

会長 長谷川 修

昨年末、会員の皆様に、日本伝熱研究会の現状に関するご認識と、会の将来に関するお考えについて、アンケート形式によりお聞きしました。アンケートには会員の50.0%に当たる、627名の方からご回答を頂き、皆様の本会に対するご関心の高さを認識しました。ご回答を頂きました方々には厚くお礼を申し上げます。

アンケートの結果は簡単な区分けをし、表の形にして次頁にあげておきます。それによりますと、本会の現状あるいは会の行事等については割合に高いご判断を頂きましたが、回答者の60.6%の方々が本会の将来に関しては「検討した方が良い」とのご判断を示されました。このことは本期の幹事会において審議して参りました方向とも一致しましたので、第4回の幹事会（2月13日）において、「日本伝熱研究会将来問題検討委員会」を発足することとし、約一年位の期間で本会の将来の在り方についてご審議願ひ、ご答申を頂くことにしました。このご答申は今後の会の運営のための重要な指針とさせていただきます。

本会の委員長には甲藤好郎氏にお願いしたところ、快くお引き受け頂きました。委員の方々には専門分野、研究機関別等を考慮して下記の方々にお願いし、第一回の委員会を4月11日に開催する予定にしております。

147名の方々からはアンケートの際に、特に文章によるコメントを頂きました。これらのご意見はこの委員会に報告し、参考にして頂きますが、更にご意見のある方は委員の方々に、あるいは直接本会宛てにご連絡下さい。

記

日本伝熱研究会将来問題検討委員会委員

委員長	甲藤 好郎	(日本大学工学部)
幹 事	小竹 進	(東京大学工学部)
	越後 亮三	(東京工業大学工学部)
	荻野 文丸	(京都大学工学部)
	戸田 三朗	(東北大学工学部)
	藤江 邦男	(日立製作所技術管理部)
	藤田 恭伸	(九州大学工学部)
	前田 昌信	(慶応義塾大学工学部)
	矢部 彰	(工技院機械研究所)
	中原 崇文	(三菱重工名古屋研究所)

'86アンケートの集計(平均)

04/14/87 現在

集計総数 = 627
回収率 = 58.8 %

(1) 研究会の現状 (5点満点)

個人会員数 3.59
維持会員数 2.97
地方活動 3.47
「伝熱研究」 3.44
シンポジウム 4.23
セミナー 3.64
研究会事務 3.89

(2) 今後のあり方

研究会の維持について
現状で良い 47.0 %
会員を増強すべき 36.2 %
収入をはかる 22.6 %
その他 5.1 %

研究会の活動について
現状で良い 38.4 %
活性化すべき
地方活動を 23.1 %
シンポジウムを 15.3 %
セミナーを 13.1 %
「伝熱研究」を 28.7 %
新企画をすべき 7.0 %
その他の意見 6.2 %

会の将来について
検討すべき 60.6 %
自然に任せる 31.6 %
その他の意見 3.0 %

(3) 会の名称について
現在のままで良い 60.6 %
「学会」が良い 31.3 %
その他の名称 3.2 %

(4) 研究会への意見 154 件
24.6 %

<特集：伝熱数値シミュレーション>

伝熱数値解析の現状と展望

小竹 進 (東大)

「伝熱」関係の数値解析は、最近のコンピュータの発達にともなって急速にその量を増し、現象の数値解析はもとより複雑な機器およびシステムの設計・制御へとその利用が進んでいる。これらの状況を最近の学術誌、関連学術会議より概観してみると、

* Int. J. Heat Mass Transfer に掲載された論文の中で、数値解析関係の論文の過去5年ごとの割合は 18/175 (1981), 38/170 (1986) と倍増している。

* 「Numerical Heat Transfer (Int. J. of Computation and Methodology)」は、今年で11巻であるが、隔月の発刊誌で年間約 30 件の論文を掲載している。

* 国際会議「Numerical Methods for Thermal Problem」は2年ごとに開催されるが、今夏で5回目であり、約 150件の論文が発表される。

* 機械学会では「伝熱数値解析技術の応用調査研究分科会」を設置し、50社以上の会社関係委員と30人以上の大学関係委員により精力的な研究討論が行われている。

などなどである。

しかし、こうした国際的な学術誌や国際会議における日本の研究者の「伝熱数値解析」関係の発表論文数は、他の分野の発表論文数から見ると極端に少ない。既製品の「伝熱数値解析コード」に至っては日本で開発されたものは皆無である。これらは、伝熱問題はまだ現象の解明が重要であり数式にのせるには疑問があるとする研究者の謙虚な態度の現れなのか、伝熱数値解析「技術」という実務的な問題に興味をしめさないためなのかよく分らない。おそらく両方に原因があると思われる。

伝熱関係におけるコンピュータ利用を分類すると

利用法としては

- 1 現象の数値解析……………現象の理解と予測
- 2 数値解析による設計……………パラメータの選択
- 3 数値解析による制御……………パラメータの最適化

その手法としては

- 1 支配方程式の数値解析
- 2 モデル化による数値解析
- 3 データベースによる数値解析

となる。基礎的な伝熱工学現象においてその支配方程式が分かっている場合は、現象をさらに詳細に把握するためや支配パラメータの影響などを調べるために、数値解析は数値実験的な意味において大きな威力を発揮する。しかし、多くの実際的な現象において

は、支配方程式およびその境界条件が分かっていない場合が多く、適当な現象モデルによる数値解析が必要となる。このような場合、数値解析はモデリングの検証とその結果による現象予測に主眼が置かれる。さらに現象のモデル化もできない複雑な問題においては、統計的なデータベースによる数値解析・設計・制御ということになる。

伝熱工学的な問題は現象論的には

- 1 電磁波的な熱移動-----ふく射
- 2 分子論的な熱・物質移動-----熱伝導・物質拡散
- 3 流体力学な熱・物質移動-----対流拡散
- 4 分子の構造変化に伴う熱・物質移動-----化学反応
- 5 分子の集合状態の変化に伴う熱・物質移動-----相変化

と大きく分けることができる。これらの現象の支配方程式は必ずしも確立されているとは限らず、また確立されている場合でも非常に複雑な場合が多く、現在の計算機能力では適当に単純化せざるを得ない。例えば、ふく射伝熱では灰色ふく射、物質拡散では二三成分の拡散、化学反応では総括反応、相変化では不連続界面などの仮定である。乱流による対流拡散においても高次の乱流方程式は考慮できず、たかだかレノルズ応力程度までである。

空間時間次元としては

- | | | |
|-------|-------|-------|
| 1 1次元 | 2 2次元 | 3 3次元 |
| 1 定常 | 2 非定常 | |

対象物質としては

- | | |
|--------|--------|
| 1 均質系 | 2 非均質系 |
| 1 単成分系 | 2 多成分系 |

が問題になる。伝熱工学の問題においては、最も簡単な1次元定常均質単成分系から最も複雑な3次元非定常多成分非均質系までの問題があるが、現在の数値解析の現状は3次元定常均質単成分系あるいは2次元非定常非均質多成分系というところまでである。

対流熱伝達・拡散の問題としては、熱交換器のフィン周り・シェル/チューブの流れと熱伝達特性、タービンデスクおよび翼の冷却に関してその内外流れと熱伝達・熱応力、半導体チップ周辺の対流熱伝達、建物内外の流れと断熱特性、部屋内の流れと空調特性などの定常・三次元・乱流問題が取り扱われ始めている。メッシュ数は(30~50)までである。いずれの問題でも対流効果が大きくなった場合、どのような乱流モデルを用いるかということと、1次差分の対流項をどう処理するかということが、解の精度と安定性を大きく左右しその解決がキーポイントである。

相変化問題としては、凝縮・凝固現象の鑄造、溶接、ヒートパイプなどの問題が多く取り扱われてきているが、比較的簡単な相変化を仮定して非定常な温度分布特性を問題にしている場合が多い。核生成・成長を含む相変化を考慮して金属材料などの生成凝縮過程を数値解析するまでには至っていない。また、核沸騰・膜沸騰の問題も非定常相変

化現象として数値解析された報告は見当らない。これらはいずれも、非定常・三次元で温度場流れ場の非線形干渉の強い問題であり、現在以上の高速・大容量の計算機を必要とするからである。

化学反応を含む問題としては、燃焼炉・内燃機関・ガスタービンなどの燃焼器の問題が数多く取り扱われてきているが、化学反応として燃料+酸化剤（空気）の簡単な総括反応を仮定する場合は殆んどである。ふく射を含めて燃焼の素反応過程を含む乱流燃焼を取り扱うまでには至っていない。この場合は計算機の容量に問題があると言うよりも燃焼の素反応過程および乱流燃焼そのものの現象把握がまだできていないところに問題がある。辛うじて NOx生成問題にはこうした取り扱いが試みられてきている。

熱工学的な問題の数値解析は、流体力学的な問題と異なり、数値解析技術ばかりでなく、現象そのものの把握が十分でないために未開発な部分が多くあり、逆に数値解析によりその物理化学過程が理解される可能性を含んでいる。したがって、数値解析による現象理解、現象理解による数値解析という相乗効果により、この方面の数値解析は急速に発展することが予測される。一方では、現象自体にある程度のブラックボックス的な要素を残して、それらを実験的なデータでカバーした数値解析コードも、伝熱問題の設計・制御関係で急激に増加するものと思われる。

しかし、数値解析の問題は常に計算機能力との相談であり、現在の計算機能力範囲で苦勞して精度・安定性の良い数値解析手法を開発しても、計算機能力が上がるとあまり意味の無いものになってしまうところに問題がある。現在の計算機能力で苦勞して計算した結果は、将来のより大きな能力の計算機では簡単により精度よく計算できることになる。非定常3次元問題では現在の計算機能力の約1000倍のものが必要であり、このような計算機は当分望めそうもないからといってもこうした計算機が実現されるのはほぼ確実である。しかし、こうした計算機が実現されればされたで、より一層複雑な問題が待ち構えているであろう。問題は計算機能力（ハード）の進歩と数値解析技術（ソフト）の進歩の速度差である。現在、特に我が国では、後者の速度が遅く、計算機能力を十分に活用できず、活用できる（ソフトが完成する）ころになると計算機能力がさらに進歩してしまうということになっている。これらは、こうした問題と取組む大学や研究機関の研究者がいないことと、計算機ソフト関係の会社も現象の専門家の不足から本格的なソフトの開発ができないことに原因がある。今後は、ソフトな若い研究者達がこうした問題をどんどん解決してくれると思われるが、計算機ハードとともに伝熱現象のハード面も十分に両立させたソフトの開発研究が必要であることを念頭に置かなければならない。どんなに計算機能力が大きくなっても、数値解析理論や情報数学では「伝熱数値解析」は解決できず、「伝熱」屋が自ら取組まなければならない問題である。

1. はじめに

伝熱数値シミュレーションに関して何かポイントをしぼって書けということでしたが、とくに計算手法そのものについて詳しく調べたこともないので、著者がこれまで行った数値計算の中から、差分スキームによって異なった解が得られた例を示すことにしたい。

著者が最初に流動および熱伝達に対して行った数値計算は、熱交換器における单相強制対流場での高性能伝熱促進法としての波形流路の研究における流れ関数-うず度法による二次元定常流の解析⁽¹⁾であったが、そのときには Gosman らの著書⁽²⁾を参考にして、スキーム自体には何の疑問も持つことなく計算を行っていた。その後、同時に行っていた波形流路⁽³⁾およびその基本的な構成要素としての屈折管⁽⁴⁾における実験で、少しレイノルズ数が大きくなると、層流的ではあるが非定常的な現象がしばしば出現し、これを数値計算で再現することを試みたが、なかなかうまくいかなかった。結局、従来の一次の風上差分では定常解しか得られず、スキームを変更することによって目的を達成することができた⁽⁵⁾。また、最近行っているプレートフィンチューブ形熱交換器の研究では、やはり Patankar の SIMPLE 法⁽⁶⁾を参考にして、v-p 法によって三次元流動および熱伝達⁽⁷⁾⁽⁸⁾について計算を行ったが、同様に、非定常的な挙動についてはスキームによる差異が大きいくことが明らかとなった⁽⁹⁾。一方、燃焼器への応用を目的とした対向噴流の研究も行っているが、この場合にもスキームによって結果が異なっている⁽¹⁰⁾。

このように、数値計算では用いた差分スキームにより得られた解が異なることがある。ここでは、著者の行った上述の限られた問題ではあるが、二次元屈折管、プレートフィンチューブ形熱交換器および対向噴流の場合について、風上差分法と中心差分法による解の相違を中心とし、時間きざみの大きさ、人為的なかく乱の有無、計算領域の大小、三次元的な自由度などによる影響を交えて紹介したい。

2. 使用した差分スキームについて

流れ関数-うず度法 ($\psi-\omega$ 法) による二次元解析では、基礎方程式は流れ関数 ψ 、うず度 ω および温度 θ について次式のようなになる。

$$\frac{\partial^2 \psi}{\partial x_1^2} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial x_2^2} + \omega = 0$$

$$\frac{\partial \omega}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_1} \left(\omega \frac{\partial \psi}{\partial x_2} \right) - \frac{\partial}{\partial x_2} \left(\omega \frac{\partial \psi}{\partial x_1} \right) - \nu \left(\frac{\partial^2 \omega}{\partial x_1^2} + \frac{\partial^2 \omega}{\partial x_2^2} \right) = 0$$

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_1} \left(\theta \frac{\partial \psi}{\partial x_2} \right) - \frac{\partial}{\partial x_2} \left(\theta \frac{\partial \psi}{\partial x_1} \right) - \alpha \left(\frac{\partial^2 \theta}{\partial x_1^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial x_2^2} \right) = 0$$

ここで、 ν および α は動粘度および温度伝導率である。この基礎方程式の数値解法については Gosman の方法⁽²⁾、すなわち、基礎方程式を格子点まわりの小領域における積分により差分近似し、SOR法による繰り返し計算を行う方法を用いた。

また、速度-圧力法 ($v-p$ 法) による三次元解析では、基礎方程式は速度 \mathbf{u} および圧力 p について次式のようなになる。

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0$$

$$\frac{D \mathbf{u}}{D t} = - \frac{1}{\rho} \nabla p + \nu \Delta \mathbf{u}$$

$$\frac{D \theta}{D t} = \alpha \Delta \theta$$

ここで、 ρ は密度である。この基礎方程式の数値解法については Patankar の SIMPLE法⁽⁶⁾を用いた。

ここでは、上述の $\psi-\omega$ 法および $v-p$ 法のいずれにおいても、移流項の差分近似として風上差分法と中心差分法の両方を用いて、それによる解の相違を示すことにする。なお、文献(2)および(6)では、いずれも風上差分法あるいはその修正されたものを用いることが推奨されている。境界条件は、以下でとくに明示したもの以外は通常の方法で設定した。また、非定常計算の場合には、準定常状態での流れの周期的な変動を取り扱うので、適当な初期条件から計算を開始し、十分な時間経過した後の状態を求めた。時間ステップは完全な陰解法によって進めたが、時間きざみによっても解に差異が生じており、その影響についても示すことにする。

3. 差分スキームによる解の相違について

3.1 二次元屈折管の解析

3.1.1 $\psi-\omega$ 法による二次元解析

(1) 解析モデル

$\psi-\omega$ 法による二次元解析の解析モデル I を図 1 に示す。流路は幅 H で直角に一度だけ折れ曲がる二次元屈折管である。流路壁の凸および凹部をそれぞれ角 V および C とし、直角座標系を角 V の上流側および下流側でそれぞれ角 V を原点としてとり、流れ方向の壁に沿

って $x_1' = x_1 / H$, また、壁に垂直方向に $x_2' = x_2 / H$ とする。時間は代表時間 T を用い、 $t' = t / T$ とする。ここで、流路内平均速度を u_m として、 $T = H / u_m$ と定義する。また、レイノルズ数は $Re = u_m 2H / \nu$ で定義する。差分格子は、 x_1 方向に上流側で 50 および下流側で 89, x_2 方向には 33 の格子点を取り、壁近傍および折れ曲がり部近傍において細くなるようにした。以下の図では、無次元化された流れ関数 $\psi' = \psi / (\rho u_m H)$, うず度 $\omega' = \omega / (u_m / H)$ および温度 $\theta' = RePr (\theta - \theta_{in}) / (H q_w / \lambda)$ について示されている。

なお、レイノルズ数が小さいとき、非定常的な変動を得るためには、人為的にかく乱を流れに与えることが必要である。このため、角 V のすぐ上流側の断面 ($x_1' = -0.0123$, $x_2' = 0 \sim 1$) の各格子点において、うず度のみに対して、適当な周波数と振幅の正弦波のかく乱を時間ステップごとに与えた。

(2) 解析結果

この解析では、レイノルズ数 $Re = 1000$ および 2000 の場合を取り扱ったが、両者では、非定常解の出現のしかたに差異が生じた。

まず、人為的な操作の不必要な $Re = 2000$ の場合から説明する。風上差分法による非定常計算では、変動は起こらず、収束も早く、定常計算による結果とほとんど一致した。中心差分法を用いると、定常計算では発散し、非定常計算では、時間きざみ $\Delta t' \leq 0.0125$ では収束し、人為的にかく乱を与えなくても変動が生じた。また、 $\Delta t' = 0.0125$ と 0.00625 の場合の結果は、収束の状況は異なるがほぼ完全に一致した。

中心差分法による非定常計算 $\Delta t' = 0.0125$ の結果を中心として説明する。初期条件の影響のない時刻 $t' = 0 \sim 18.75$ (時間ステップにして 1500回) の間の ω' および θ' の時間軸波形について図 2 (a) および (b) に示す。 ω' および θ' の添字 a~h は、図 1 に示した位置での値であることを表す。この波形は、いずれもやや不規則であるが、周期的な変動を示しており、とくに角 V の下流側 $x_1' = 2 \sim 6$ で振幅が大きいことがわかる。この変動の周波数 f はストローハル数にして $St = f 2H / u_m = 0.53$ 程度である。図 2 の時刻 $t' = 12.5$ における瞬間的な ω' , ψ' , $C_0 = (p - p_0) / (1/2 \rho u_m^2)$ および θ' の等値線について図 3 (a) , (b) , (c) および (d) に示す。ここで、 C_0 は位置 s (角 V の上流側 $x_1' = 0$, $x_2' = 0.5$) での圧力 p_s を基準とした圧力係数である。また、図 2 の時間範囲全体で積分平均したものを、図 3 に対応させて、図 3 (a) , (b) , (c) および (d) に示す。風上差分法による定常的な結果を、同様に図 5 (a) , (b) , (c) および (d) に示す。瞬間的な等値線はきわめて複雑な様相を示しており、折れ曲がりによる変動が激しいことがわかる。積分平均したものでは、かなり変動がならされているが、風上差分法による定常的な等値線とはかなり異なる。とくに、角 V の下流側のはく離域の様相、角 C の下流側のはく離域の出現、流線の屈曲、等温線の巻き込みなどに変動の効果がみ

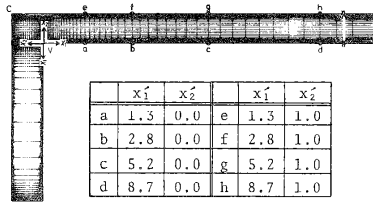


図1 二次元屈折管の解析モデル I

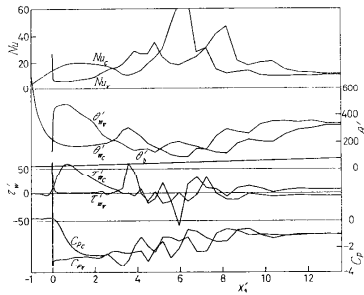


図6 二次元屈折管 I における流れ方向分布
($Re=2000$, 中心差分法, 瞬間)

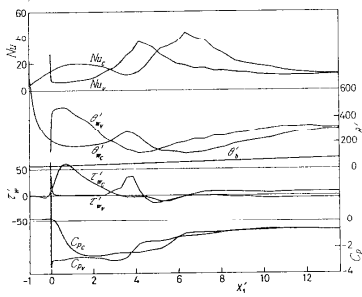


図7 二次元屈折管 I における流れ方向分布
($Re=2000$, 中心差分法, 積分平均)

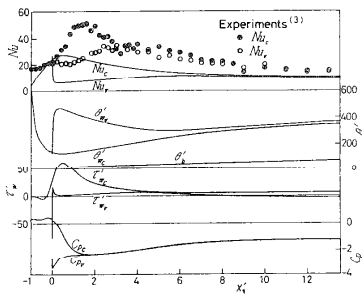
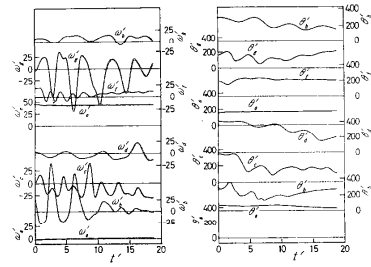


図8 二次元屈折管 I における流れ方向分布
($Re=2000$, 風上差分法, 定常値)



(a) ω' (b) θ'

図2 二次元屈折管 I における時間軸波形
($Re=2000$, 中心差分法)

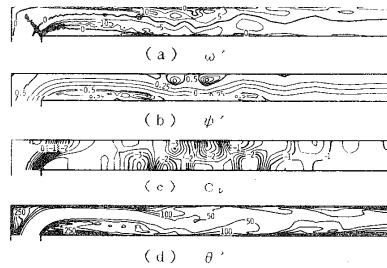


図3 二次元屈折管 I における等値線
($Re=2000$, 中心差分法, 瞬間)

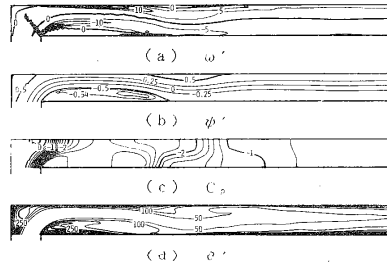


図4 二次元屈折管 I における等値線
($Re=2000$, 中心差分法, 積分平均)

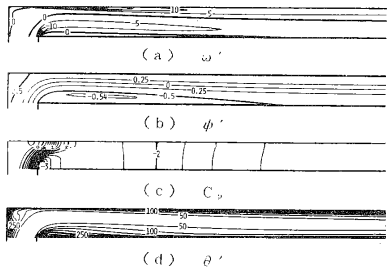


図5 二次元屈折管 I における等値線
($Re=2000$, 風上差分法, 定常値)

られる。

壁面におけるせん断応力 τ_w' 、 C_D 、 θ' およびヌセルト数 Nu の流れ方向分布について、中心差分法による瞬間値および積分平均値を図6および7、また風上差分法による定常値を図8に示す。また、ヌセルト数に対する実験結果⁽⁴⁾を図8に記号 ● および ○ で示す。ここで、 τ_w' および Nu は以下のように定義する。

$$\begin{aligned}\tau_w' &= \omega' |w \\ &= \tau_w / (1/2 \rho u_m^2) Re / 4 \\ Nu &= h 2H / \lambda \\ &= (q_w / \lambda) 2H / |\theta_w - \theta_b|\end{aligned}$$

なお、 h は熱伝達率、 θ_w は壁温および θ_b はバルク温度である。この τ_w' および Nu は、直管ではレイノルズ数によらず $\tau_w' = 6$ および $Nu = 8.235$ となる。とくに、ヌセルト数に関して、中心差分法による結果は、瞬間値はもちろん、実際に重要となる積分平均値についても、折れ曲がり後、風上差分法による定常値に比べてかなり大きくなっている。

このように、風上差分法でなく、中心差分法を用いた非定常計算によれば実験結果を一応再現でき、屈折管における流動および熱伝達に対しては非定常的な変動の影響が大きいことが明らかとなった。しかし、定量的には未だ不十分であり、とくに、変動のストローハル数は実験値 $St = 2.6$ の 0.2 倍程度であり、ヌセルト数も角 V の下流側では実験値にかなり合っているが、角 C の下流側では分布の傾向も異なっている。また、変動の流れ方向への減衰は実験結果に比べかなり早過ぎる。また、ここで用いた差分格子間隔よりも小さな変動は、当然、再現できておらず、乱流計算における Large Eddy Simulation のようなモデル化が必要である。

次に、 $Re = 1000$ の場合について説明する。 $Re = 2000$ の場合と同様、風上差分法による定常および非定常計算の結果は容易に収束し一致した。また、中心差分法による定常計算の結果は発散した。中心差分法による非定常計算では、人為的にかく乱がない場合、 $\Delta t'$ を小さくすれば収束し、かつ変動は起こらず定常解となった。この解は、後で示すように、風上差分法によるものとはやや異なっている。一方、人為的にかく乱を入れた場合、そのかく乱の周波数および振幅に依存する規則的な周期変動が生じた。風上差分法と中心差分法による差異、あるいはかく乱の周波数および振幅による差異を検討するために、 $Re = 1000$ の場合の瞬間流線を図9に示す。中心差分法による結果 (b) は、風上差分法のそれ (a) と比べて、とくに角 V の下流側のはく離域が小さくかつ強くなっている。また、 $Re = 1000$ では、 $Re = 2000$ の場合と同様、角 C の下流側ではく離域が出現している。かく乱の周波数については、各レイノルズ数について、折れ曲がり部下流での増幅の程度が最も大きい値 f_{max} を調べたが、実験値⁽⁴⁾の 0.5 倍程度であった。そこで、以下では、 f_{max} とその 20 倍のかく乱を用いた場合の結果を示す。かく乱による影響については、周波数が $20 f_{max}$ では流線の形状

を変化させるほどには現れず、ほとんどかく乱のない場合と一致している。周波数が f_{max} で、振幅が 0.1 倍の場合の結果 (c) では、はく離域内でうずが分裂するようになり、かなりかく乱の効果が現れている。 $Re = 1000$ において、かく乱の周波数が $20 f_{max}$ で振幅が 0.01 倍の場合、および周波数が f_{max} で振幅が 0.1 倍の場合に対するうず度の時間軸波形について、図 10 (a) および (b) に示す。ここでは、縦軸は絶対量ではなく、定常値となるかく乱のない場合との差 $\Delta \omega'$ を拡大して示してある。時間については $t' = 0 \sim 16.448$ (時間ステップにして 500 回) の範囲を示してある。かく乱の周波数が $20 f_{max}$ の場合に対する周期変動については、その変動の周波数が、かく乱の周波数とは異なり、 f_{max} 程度のきわめて弱いものとなっている。一方、かく乱の周波数が f_{max} の場合に対する周期変動については、その周波数がかく乱の周波数と同じ値となっている。このように、 $Re = 2000$ の場合と同様、実験で得られた周期変動を一応再現できるが、人為的なかく乱が必要であり、また、その最も増幅率の高いかく乱周波数は実験値の 0.5 倍程度である。なお、与えたかく乱の範囲では、周期変動によるせん断応力あるいはヌセルト数などの壁面特性の変化はきわめて小さいものであった。

以上のように、レイノルズ数が大きい場合には、移流項(対流項)が支配的となり、その差分近似の方法によって、計算結果に差異が生じる可能性がある。とくに、格子間隔が大きい場合には、風上差分法は一次の精度であるために、数値粘性による影響が大きいことが知られている。この屈折管の場合、とくに、 $Re = 1000$ では、折れ曲がり後のはく離域が小さくなること、また、 $Re = 2000$ では、非定常的な変動が抑えられ出現しなくなることなど、粘性がより大きい場合に相当するような解となっている。しかし、後述の対向噴流における振動現象に対する計算においては、風上差分法によっても非定常的な解を得ている。これらのことより、主流と比較して二次的な大きさの変動が問題となるような場合には、風上差分法では、その数値粘性のために、非定常的な挙動を再現することはできないものと思われる。

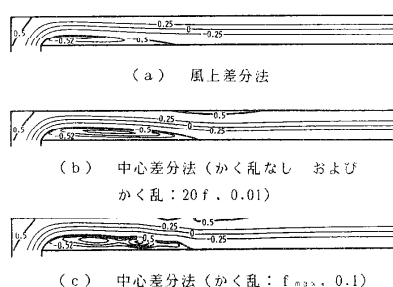


図9 二次元屈折管 I における瞬間流線
($Re=1000$)

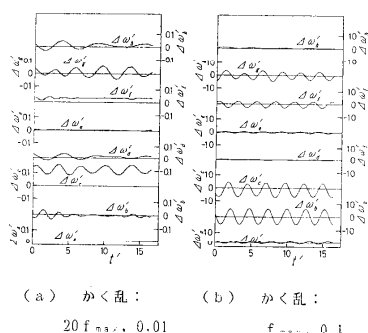


図10 二次元屈折管 I における $\Delta \omega'$ の
時間軸波形 ($Re=1000$, 中心差分法)

3. 1. 2 v-p法による三次元解析

(1) 解析モデル

v-p法による三次元解析の解析モデルⅡを図11に示す。この解析は二次元屈折管に対しスパン方向の自由度をも考慮するために、三次元屈折管の解析⁽¹¹⁾で用いた方法を、モデルのスパン方向の側壁を取り除き、変数のその方向の変化がないとする境界条件を設定した以外はそのまま適用して解析した⁽¹²⁾。差分格子の構成方法は ψ - ω 法の場合とほぼ同様であるが、流れ方向には上流側および下流側の全体で 59、幅方向およびスパン方向にはそれぞれ 11 の格子点をとった。

(2) 解析結果

前項の中心差分法による二次元解析でも、実験との定量的な一致は十分ではないが、その原因としては、この場合のような流路幅に比べてスパン方向が無限に大きな流路内流れでは、ス

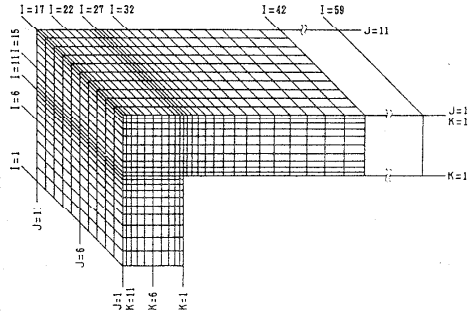


図11 二次元屈折管の解析モデルⅡ

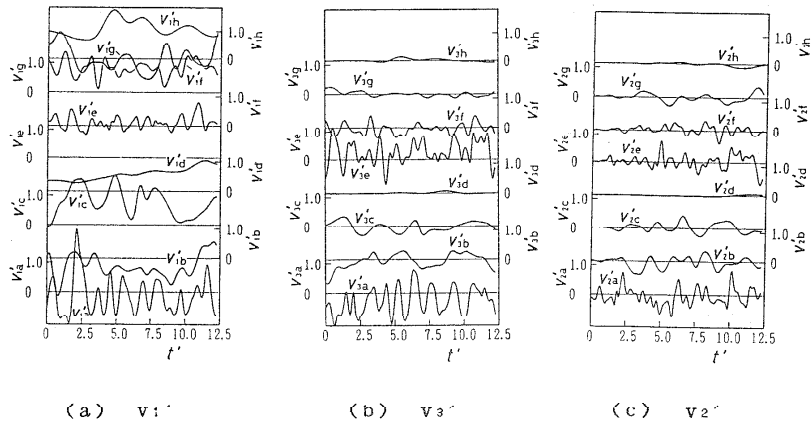


図12 二次元屈折管Ⅱにおける時間軸波形 (Re=2000, 中心差分法)

パン方向への流れが生じやすく三次元的な流動となりやすいことが考えられる。これに対し、解析では二次元的な拘束のために、変動が生じにくくなり、変動の流れ方向への減衰も早くなると思われる。このため、定量的な評価には三次元計算が必要と考え、 $v-p$ 法による三次元解析も行った。この計算では、多くの格子点数をとることができず、精度は十分ではないが、以下にその結果を示す。

$Re = 2000$ の場合に対する中心差分法による計算結果を図12および図13に示す。図12は、図2に対応する流路下流側における速度の3成分 v_1 , v_3 および v_2 の時間軸波形である。図13は、格子番号 $I = 30, 36$ および 42 の断面内の速度ベクトルの時間変化である。図からわかるように、スパン方向にもかなり変動しており、流れの三次元化の影響は無視できない。また、変動の周期もかなり短くなっており実験結果に近づいている。また、 $Re=1000$ の場合においても、 $\psi-\omega$ 法による二次元解析では人為的なく乱が必要であったが、この解析では不要であった。

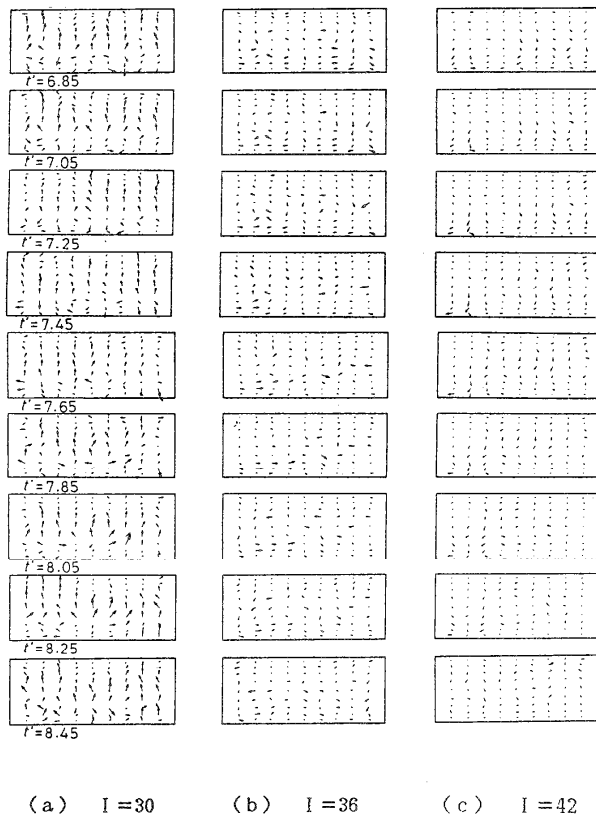


図13 二次元屈折管IIにおける速度ベクトルの時間変化
($Re=2000$, 中心差分法)

3.2 プレートフィンチューブ形熱交換器の解析

(1) 解析モデル

この場合には、本質的に三次元的な流れであるので、 $v-p$ 法によって解析した。この解析モデルを図14に示す。流路幅 H の平行平板間に辺長 $d (=H)$ の正方形断面を有する角柱を設置し、角柱の中心を原点 O とする三次元直角座標系を考え、流れ方向に x_1 、平行平板壁面に垂直方向に x_2 、またスパン方向に x_3 軸をとる。また、レイノルズ数は $Re = u_m 2H / \nu$ で定義する。差分格子は x_1 方向には 46、 x_2 方向には 11、 x_3 方向には 39 の格子点をとった。流路入口では、角柱のない場合の平行平板間流路内の十分に発達した層流における速度および温度の分布を与えた。

(2) 解析結果

以下では、レイノルズ数 $Re = 1000$ かつプラントル数 $Pr = 0.71$ の場合の結果について示す。節3.1と同様に、風上差分法による非定常計算では、変動は起こらず、収束も早く、定常計算による結果とほとんど一致した。中心差分法を用いると、定常計算では発散し、非定常計算では、時間きざみ $\Delta t' \leq 0.05$ では収束し、人為的なかく乱を与えなくても変動が生じた。また、 $\Delta t' = 0.05$ と 0.025 の場合の結果は、収束の状況は異なるがほぼ完全に一致した。

中心差分法による非定常計算 $\Delta t' = 0.05$ の結果を中心として説明する。初期条件の影響のない時刻 $t' = 0 \sim 40$ (時間ステップにして 800回) の間の適当な流路内位置における速度の3成分および θ' の時間軸波形について図15に示す。また、 $t' = 30.8$ における瞬間流線を図16に示す。角柱の上流において流路スパン方向中央近傍の断面 ($K=19.95$) および下壁面近傍の断面 ($J=1.5$) における時間平均的な流線を図17(a)および図18(a)に示す。一方、風上差分法による定常的な流線を図17(b)および図18(b)に示す。図からわかるように、中心差分法による結果は、馬蹄形渦がより明確に現れている。また、時間平均的な角柱まわりの壁面におけるヌセルト数分布を図19に示す。ヌセルト数は前述の速度変動により、風上差分法におけるものよりもかなり大きくなっている。

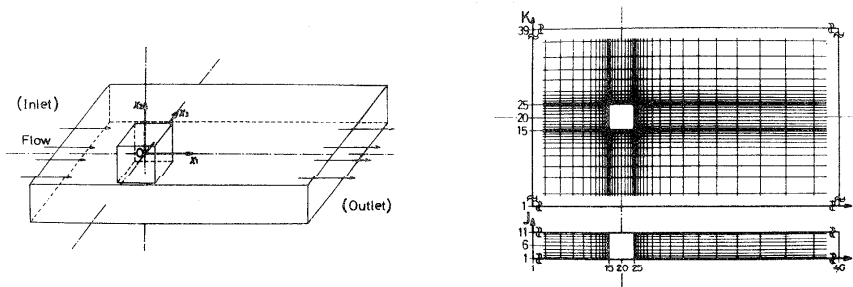


図14 プレートフィンチューブ形熱交換器の解析モデル

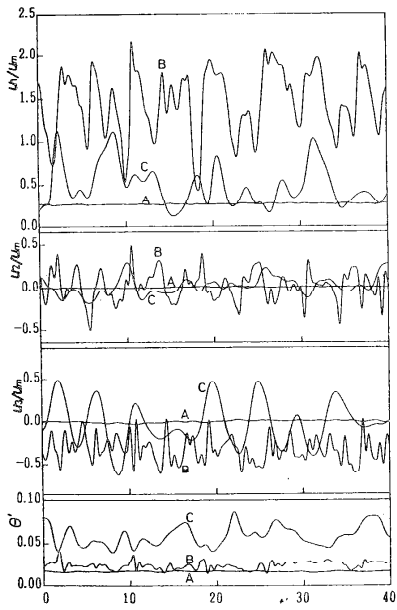


図15 プレートフィンチューブ形熱交換器における時間軸波形 (Re=1000, 中心差分法)

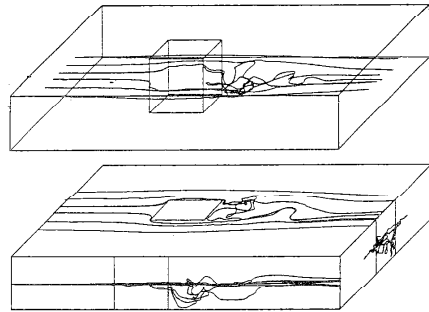


図16 プレートフィンチューブ形熱交換器における瞬間流線 (Re=1000, 中心差分法)

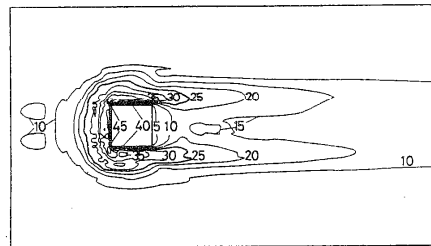
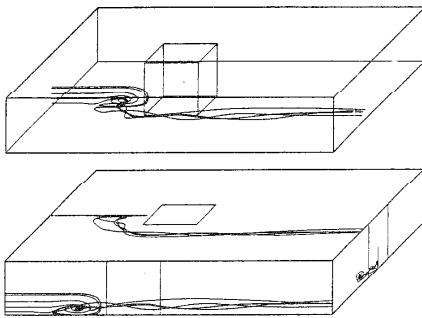
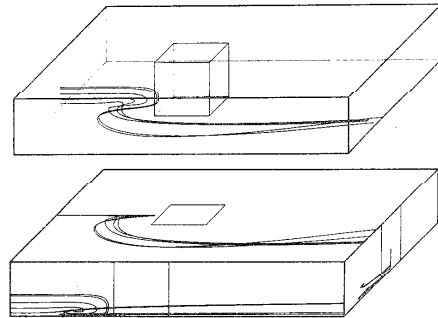


図19 プレートフィンチューブ形熱交換器における局所ヌセルト数 (Re=1000, 中心差分法)

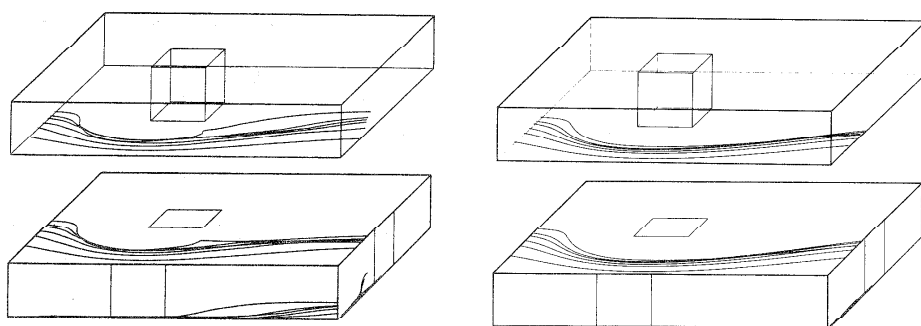


(a) 中心差分法



(b) 風上差分法

図17 プレートフィンチューブ形熱交換器における平均流線 (Re=1000, K=19.95)



(a) 中心差分法

(b) 風上差分法

図18 プレートフィンチューブ形熱交換器における平均流線 ($Re=1000$, $J=1.5$)

3.3 二次元対向噴流の解析

(1) 解析モデル

$\phi-\omega$ 法による二次元解析の解析モデルを図20に示す。一様流中に噴口幅 $2b_0$ 、肉厚 b_0 の二次元ノズルを対向させたものである。ノズル出口では、一様速度および温度分布 $u = u_0$ および $\theta = \theta_0$ とし、一様流入口では、一様な速度 U および温度 θ とした。また、噴流レイノルズ数は $Re_0 = u_0 b_0 / \nu$ で定義する。直角座標系をノズル噴口中心を原点としてとり、噴流の流れ方向に $x' = x / b_0$ 、それに垂直方向に $y' = y / b_0$ とする。また、時間は代表時間 T を用い、 $t' = t / T$ とする。ここで、 $T = b_0 / u_0$ と定義する。なお、計算領域は大小2種類用いており、以下の座標値および格子番号で () 内に示した数値は大きい計算領域に対応する。差分格子は、 x 方向に $I=1\sim 49$ 、 y 方向に $J=1\sim 33(65)$ の格子点を取り、図20の右部に示すように、ノズル近傍において細くなるようにした。

(2) 解析結果

この解析では、噴流レイノルズ数 $Re_0 = 1500$ 、速度比 $\alpha = u_0 / U = 3.75$ 、プラントル数 $Pr=0.71$ の場合を取り扱った。以下の図では、無次元化された温度 $\theta' = (\theta - \theta) / (\theta_0 - \theta)$ について示されている。

主として、小さな計算領域を用いた場合で層流に対する結果について、計算方法による差異について説明する。中心差分法を適用した場合、定常計算ではもちろん $\Delta t' = 1.25$ の非定常計算でも収束しなかった。また、 $\Delta t' \ll 1.25$ とかなり小さくしても非現実的な振動解のみが出現し収束解は得られなかった。この点は節3.1および3.2の場合と異なる結果となっている。一方、風上差分法を適用した場合、定常計算では収束しなかったが、 $\Delta t' \leq 10.0$ の非定常計算では収束解を得ることができた。しかし、時間ステップ $\Delta t'$ の大きさによって、図21のように異なる結果となった。この図は、図20における e 点 ($x' = 13.43$)

10.64), $y' = 0$ }での温度 θ' の時間軸波形を示したものであり, 上段より $\Delta t' = 10.0$, 5.0, 2.5 および 1.25 に対応しており, $\Delta t' = 5.0$ および 2.5 の場合には $\Delta t' = 10.0$ の場合の $t' = 3000$ での値を初期値として計算し, $\Delta t' = 1.25$ の場合には $\Delta t' = 2.5$ の場合の最終値を初期値として計算した. $\Delta t' = 10.0$ の場合の波形は周期的ではあるが不規則であり, $\Delta t' \leq 5.0$ では規則的な周期変動となる. $\Delta t'$ が小さくなると周期は短くなる

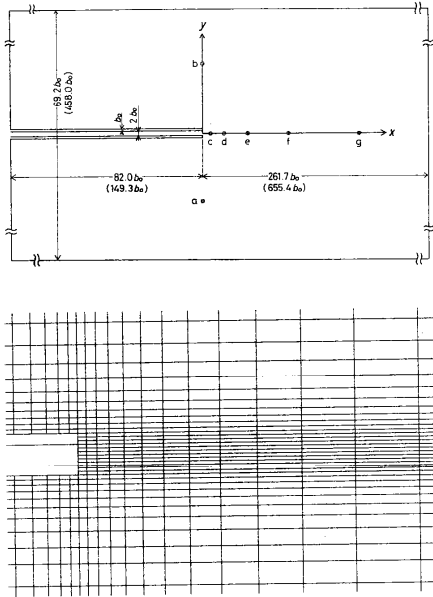


図20 対向噴流の解析モデル

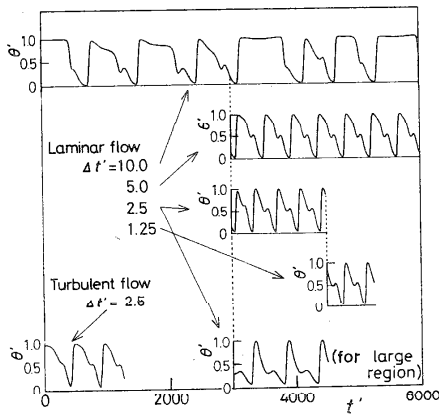


図21 対向噴流における時間軸波形
($Re_0 = 1500$, 風上差分法)

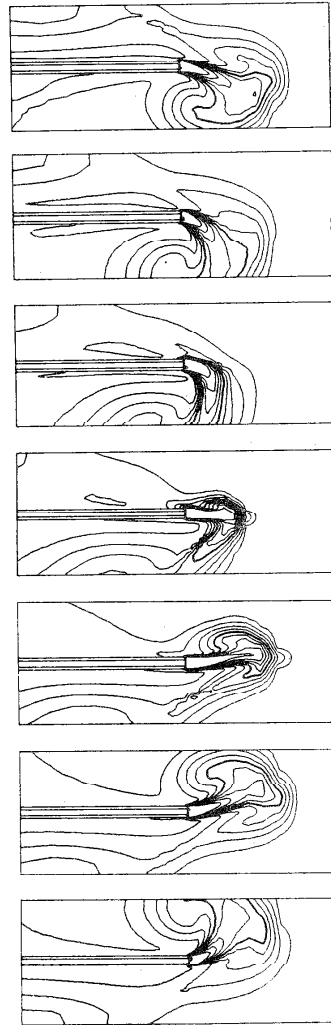


図22 対向噴流における等温線の時間変化
($Re_0 = 1500$, 風上差分法)

る傾向があるが、 $\Delta t' = 2.5$ と 1.25 の周期はほとんど一致した。このように $\Delta t' \leq 2.5$ では時間ステップに依存しない解となると考えらる。計算領域をかなり大きくとるとともに、とくに幅方向の長さが約7倍異なる場合（その方向の格子点数は2倍異なる）について、とくに、 $\Delta t' = 2.5$ に対する結果を図21の右最下段に示した。図からわかるように、計算領域の大きさが異なると多少変動の周期に差異がでるが、定性的にはほぼ同様な結果となった。乱流の場合にも、同様に風上差分法により非定常的な変動を生じたが、図21の左最下段に $\Delta t' = 2.5$ に対する結果について示した。

温度 θ' のノズル出口周辺での等値線の時間的な変化の様相を、ほぼ半周期にわたり、図21の $t' = 3025 \sim 3625$ で100ごとに対応させて図22に示す。噴流がやや下方に傾きかけてから、振れ戻り、前方に伸び、さらに反対側の上方へ振れるまでについて示されている。このように、対向噴流の場合には、風上差分法により、その挙動を理論的に再現し、その発生機構をより明確にすることができた。前述の屈折管の場合には、一次の風上差分法では定常解しか得られず、中心差分法によってのみ実験と対応する非定常解が得られた。ここでは、中心差分法では収束解が得られず、風上差分法によってのみ非定常的な収束解が得られた。これについては次のように考える。すなわち、対向噴流における流れ場は、二つの周波数のオーダが異なる振動を含みかなり不安定なため、中心差分法では収束しにくく、また、この内の低周波数の振動はきわめて大きなスケールの挙動であり、風上差分法の数値粘性効果が及ばず、これだけが数値解として得られたものと考えられる。

また、 $v-p$ 法による計算も試みたが、定性的には同様な結果となった。

4. おわりに

非定常的な流動および伝熱に対して数値シミュレーションを行う場合には、用いた差分スキームにより異なった解が得られることを、二次元屈折管、プレートフィンチューブ形熱交換器および対向噴流の場合について紹介した。

なお、ここで示した計算例は、名古屋大学工学部助手 榎田玄一郎氏を初め、当研究室の多くの方々の協力によって得られたものである。ここに深く感謝の意を表する。

文献

- (1) 泉・ほか2名, 機論, 46-412, B (昭55), 2375.
- (2) Gosman, A.D., ほか4名, Heat and Mass Transfer in Recirculating Flows, (1969), 97, Academic Press.
- (3) 泉・ほか3名, 機論, 47-416, B (昭56), 657.
- (4) 山下・ほか3名, 機論, 52-476, B (昭61), 1672.

- (5) 山下・ほか2名, 機論, 52-479, B (昭61), 2670.
- (6) Launder, B.E. 編, Studies in Convection, 1 (1975). Academic Press.
- (7) 山下・ほか2名, 機論, 51-472, B (昭60), 4004.
- (8) 山下・ほか2名, 機論, 52-476, B (昭61), 1726.
- (9) Yamashita, H., ほか2名, 2nd ASME-JSME Thermal Engineering Joint Conference Proceedings, (1987).
- (10) 山下・王, 投稿中.
- (11) 山下・ほか2名, 機論, 50-449, B (昭59), 68.
- (12) 未発表

自然対流の数値計算は種々の方法で行われている。その内の限られた分野ではあるが、広い空間におかれた物体周りに生じる自然対流の数値計算について、私の行った差分法を用いた方法について、差分式も含めてかなり詳しく以下に記述する。

1. 基礎式

図1のように十分広い空間に広がる一様温度の静止した流体中に、それより温度の高い物体がおかれると、物体周りの流体は遠方の流体より温度が高くなるので、通常の流体では密度が小さくなり物体近傍の流体は浮力のために上昇流を起こす。このような自然対流を支配する方程式は、流れが層流、二次元、定常であり、流体が非圧縮性、浮力項以外の物性値が一定であるとすると、次の連続の式、運動量の式、エネルギーの式で表される⁽¹⁾。

$$\frac{\partial U}{\partial X} + \frac{\partial V}{\partial Y} = 0 \quad \dots\dots\dots(1)$$

$$U \frac{\partial U}{\partial X} + V \frac{\partial U}{\partial Y} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P^*}{\partial X} + g\beta(T-T_\infty) + \nu \left(\frac{\partial^2 U}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial Y^2} \right) \quad \dots\dots\dots(2)$$

$$U \frac{\partial V}{\partial X} + V \frac{\partial V}{\partial Y} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P^*}{\partial Y} + \nu \left(\frac{\partial^2 V}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial Y^2} \right) \quad \dots\dots\dots(3)$$

$$U \frac{\partial T}{\partial X} + V \frac{\partial T}{\partial Y} = \kappa \left(\frac{\partial^2 T}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial Y^2} \right) \quad \dots\dots\dots(4)$$

ここに、X, Y は座標変数、U, V は速度、T は温度、 T_∞ は周囲流体の温度、 $P^* = P - (P_0 - \rho_\infty g X)$ は流体の運動によって生じた静圧の変化分、g は重力の加速度、 ρ , ν , κ , β は流体の密度、動粘度、温度伝導率、体膨張率である。ここで、流れ関数 Ψ 、渦度 Ω を用いると、式 (1) は自動的に満足され、式 (2), (3) は次のように書き換えられる。

$$U \frac{\partial \Omega}{\partial X} + V \frac{\partial \Omega}{\partial Y} = -g\beta \frac{\partial (T-T_\infty)}{\partial Y} + \nu \left(\frac{\partial^2 \Omega}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 \Omega}{\partial Y^2} \right) \quad \dots\dots(5)$$

$$U = \frac{\partial \Psi}{\partial Y}, \quad V = -\frac{\partial \Psi}{\partial X}, \quad \Omega = \frac{\partial V}{\partial X} - \frac{\partial U}{\partial Y} \quad \dots\dots\dots(6)$$

また、物体が鉛直平板（図 1 (a)）の場合のように、物体に沿う流れが境界層の取扱ができる場合には、式 (1)～(4) は

$$\frac{\partial U}{\partial X} + \frac{\partial V}{\partial Y} = 0 \quad \dots\dots\dots(7)$$

$$U \frac{\partial U}{\partial X} + V \frac{\partial U}{\partial Y} = g \beta (T - T_{\infty}) + \nu \frac{\partial^2 U}{\partial Y^2} \quad \dots\dots\dots(8)$$

$$U \frac{\partial T}{\partial X} + V \frac{\partial T}{\partial Y} = \kappa \frac{\partial^2 T}{\partial Y^2} \quad \dots\dots\dots(9)$$

のように書き直せる。

2. 計算領域と境界条件

さて、式 (4)～(6)の楕円型方程式あるいは式(7)～(9)の放物型方程式を差分法で数値計算する際には、計算領域と領域境界での境界条件を定めねばならない。この際、X方向に2階微分を持つ楕円型方程式と1階微分を持つ放物型方程式とでは、取扱に大きな違いが生じる。すなわち、楕円型方程式では計算領域をX-Y方向に広がった対象とする現象がすべて含まれる領域にとり、その境界上で境界条件を設定する必要がある。図 1 (e) のような密閉容器内に入れられた流体に生じる自然対流の場合には、容器の壁が計算領域の境界になり、壁面上で速度と温度を定めるのがこの様な場合の例になる⁽²⁾。放物型の方程式では X=0 における Y軸上の速度分布と温度分布がわかれば、それから下流の速度分布と温度分布はきざみ ΔX 毎に繰り返し計算で求めて行けば良い。図 1 (a)の鉛直平板に沿う自然対流の計算がこの例になる⁽³⁾。したがって、計算領域は Y方向に速度と温度が変化しなくなる領域まで十分に大きく取れば良い。

ところで、図 1 (b)～(d)のような場合は自然対流現象は物体の周囲の無限に広い範囲に広がっているが、そのうち温度と速度が大きく変化するのは物体の近傍に出来る境界層領域と物体の上方に出来る浮力流れの領域である。この様な場合は、物体近傍の流れを求めるには楕円型方程式を解く必要がある。このための計算領域として、加熱面の大きさに比較して十分に大きい領域を取り、物体より遠方の境界上で速度が零（従って、流れ関数及び渦度が零）及び温度が一定とおく方法がある⁽⁴⁾。これは大きな密閉容器内の流れを解き、そのうちの加熱面付近のごく一部分にのみに注目することになる。また、式 (4), (5) に非定常項 $\partial T / \partial t$, $\partial \Omega / \partial t$ (t: 時間) をつけ加えた非定常の方程式を、加熱面より十分はなれた位置における十分大きな領域の渦度が零に、温度が初期温度のまま一定に保たれるとして、静止の状態から計算を行い、加熱面付近の温度分布や流れの状態がほとんど変化し無くなった状態を定常状態と見なす方法もある⁽⁵⁾。これは、静止の状態から加熱を開始すると、時間の経過と共に加熱面近くから徐々に動き出し、ある程度の有限の時間を経過すると温度分布と流れの場が遠方ではゆ

つくりとした変化があっても加熱面近傍ではほとんど変化しなくなることを利用している。これらの方法では、計算上の無限遠点に相当する境界として、加熱面周辺の解への影響が無視できる程度の有限の距離を取ることで、計算領域が広がる。しかし、前述のように、速度と温度が大きく変化するのは物体の近傍と浮力流れの領域に限られ、浮力流れでは、流れの場が流れの健忘性の為に、下流に行くほど物体が集中熱源におき変わった場合の流れの場に似てくることを利用すれば、集中熱源に生じる浮力流れと同様の境界層型の方程式をその浮力流れに適用することによって、計算領域を小さくすることも考えられる。以下に、図1(b)のように、一部分が一様発熱する水平面上の自然対流を例に、この方法を説明する⁽⁹⁾。基礎式は式(4)~(6)と同じであるが、慣性項と対流項を保存型に書き直すと次のようになる。

$$\frac{\partial(u\omega)}{\partial x} + \frac{\partial(v\omega)}{\partial y} = -Gr^* \frac{\partial\theta}{\partial y} + \frac{\partial^2\omega}{\partial x^2} + \frac{\partial^2\omega}{\partial y^2} \quad \dots\dots(10)$$

$$\frac{\partial(u\theta)}{\partial x} + \frac{\partial(v\theta)}{\partial y} = \frac{1}{Pr} \left(\frac{\partial^2\theta}{\partial x^2} + \frac{\partial^2\theta}{\partial y^2} \right) \quad \dots\dots(11)$$

$$-\omega = -\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} = \frac{\partial^2\psi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2\psi}{\partial y^2} \quad \dots\dots(12)$$

$$u = \frac{\partial\psi}{\partial y}, \quad v = -\frac{\partial\psi}{\partial x} \quad \dots\dots(13)$$

ここに、座標変数 x, y 、温度 θ 、流れ関数 ψ 、渦度 ω などは加熱部分の幅 W 、熱流束 q 、流体の熱伝導率 λ を用いて次のように無次元化されている。

$$x = \frac{X}{W}, \quad y = \frac{Y}{W}, \quad u = \frac{UW}{\nu}, \quad v = \frac{VW}{\nu}$$

$$\psi = \frac{\Psi}{\nu}, \quad \omega = \frac{W^2\Omega}{\nu}, \quad \theta = \frac{T - T_\infty}{qW/\lambda} \quad \dots\dots(14)$$

$$Gr^* = \frac{g\beta qW^4}{\nu^2\lambda}, \quad Pr = \frac{\nu}{\kappa}$$

図2のように座標軸と計算領域をとると、現象は x 軸に関して対称と考えられるので、式(10)~(13)の計算領域の境界で境界条件は次のようになる。

上向水平面(加熱部分) AB :

$$u = v = \psi = 0, \quad \omega = -\frac{\partial^2\psi}{\partial x^2}, \quad \frac{\partial\theta}{\partial x} = -1 \quad \dots\dots(15)$$

上向水平面(断熱部分) BC :

$$u = v = \psi = 0, \quad \omega = -\frac{\partial^2\psi}{\partial x^2}, \quad \frac{\partial\theta}{\partial x} = 0 \quad \dots\dots(16)$$

対称軸 AD :

$$\frac{\partial u}{\partial y} = v = \psi = \omega = \frac{\partial \theta}{\partial y} = 0 \quad \dots\dots\dots(17)$$

水平無限遠方 CE : 物体近傍に生じる境界層の外側に境界を取り，そこでは流体は水平に吸い込まれるものとし，温度は変化しないものと考えて

$$u = \frac{\partial v}{\partial y} = \frac{\partial u}{\partial y} = \frac{\partial \psi}{\partial y} = 0, \quad \omega = -\frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2}, \quad \theta = 0 \quad \dots(18)$$

鉛直上方遠方 DE : 浮力流れの領域に境界を取り，そこでは流れが境界層型に流出するものと考えて，式 (7)~(9) と同じ次の式が成り立つものとする。

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} &= 0 \\ u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} &= Gr^* \theta + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \\ u \frac{\partial \theta}{\partial x} + v \frac{\partial \theta}{\partial y} &= \frac{1}{Pr} \frac{\partial^2 \theta}{\partial y^2} \quad \dots\dots\dots(19) \end{aligned}$$

$$\psi = \int_0^y u \, dy, \quad \omega = \frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y}$$

ただし， 点Dにて： $\frac{\partial u}{\partial y} = v = \frac{\partial \theta}{\partial y} = 0$

点Eにて： $u = \theta = 0$

3. 差分式と計算方法

式 (10)~(19) を差分法により数値計算するために，図3に差分割子を示すように，計算領域を x, y 方向にそれぞれ微小要素 $\Delta x_i, \Delta y_j$ に区切り，その微小要素の中央に格子点 (i, j) をとる。計算領域の境界も格子点にくるようにするため，境界に接する微小要素の幅は内部領域の微小要素のとりかたの半分にする。また，微小要素の幅は発熱面，対称軸，及び加熱部分の端近くでは細かく，発熱面から遠い計算領域に近づくほど粗くする不等間隔格子とする。

式 (10)~(12) の差分式を誘導するに当たっては，それらの式を図3の微小要素 PQRS について面積平均を取り，式 (10) の慣性項と式 (11) の対流項には風上差分を用いる⁽⁵⁾。たとえば，式 (10) の各項は次のように差分される。

$$\begin{aligned} \frac{\partial (u\omega)}{\partial x} &= \frac{1}{\Delta x_i} \left(\frac{\overline{u_{PQ}} + |\overline{u_{PQ}}|}{2} \omega_{i,j} + \frac{\overline{u_{PP}} + |\overline{u_{PQ}}|}{2} \omega_{i+1,j} \right. \\ &\quad \left. - \frac{\overline{u_{SR}} + |\overline{u_{SR}}|}{2} \omega_{i-1,j} - \frac{\overline{u_{SR}} + |\overline{u_{SR}}|}{2} \omega_{i,j} \right) \dots\dots(20) \end{aligned}$$

$$\frac{\partial^2 \omega}{\partial x^2} = \frac{1}{\Delta x_i} \left(\frac{\omega_{i+1,j} - \omega_{i,j}}{\Delta \xi_i} - \frac{\omega_{i,j} - \omega_{i-1,j}}{\Delta \xi_i} \right) \dots\dots(21)$$

$$\frac{\partial \theta}{\partial y} = \frac{1}{\Delta y_j} \left(\frac{\Delta y_j \theta_{i,j+1} + \Delta y_{j+1} \theta_{i,j}}{2 \Delta \eta_j} - \frac{\Delta y_{j-1} \theta_{i,j} + \Delta y_j \theta_{i,j-1}}{2 \Delta \eta_{j-1}} \right) \dots\dots(22)$$

したがって、式(10)~(12)の差分式は次のようになる。ここに、 f, g, h はダミー変数であり、 $f = \omega, g = \theta, a = b = 1, c = Gr^*$ 、 $d = 0$ とおくと式(10)に、 $f = \theta, a = 1, b = 1/Pr, c = d = 0$ とおくと式(11)に、 $f = \psi, h = \omega, a = c = 0, b = d = 1$ とおくと式(12)になる。

$$A_i f_{i-1,j} + B_i f_{i,j} + C_i f_{i+1,j} = D_i \dots\dots\dots(23)$$

$$A_i = \frac{a}{2 \Delta x_i} (\overline{u_{SR}} + |\overline{u_{SR}}|) + \frac{b}{\Delta x_i \Delta \xi_{i-1}}$$

$$B_i = \frac{a}{2 \Delta x_i} - (\overline{u_{PQ}} + |\overline{u_{PQ}}|) + (\overline{u_{SR}} - |\overline{u_{SR}}|) + \frac{a}{2 \Delta y_j} - (\overline{v_{QR}} + |\overline{v_{QR}}|) + (\overline{v_{PS}} - |\overline{v_{PS}}|) - \frac{b}{\Delta x_i} \left(\frac{1}{\Delta \xi_i} + \frac{1}{\Delta \xi_{i-1}} \right) - \frac{b}{\Delta y_j} \left(\frac{1}{\Delta \eta_j} + \frac{1}{\Delta \eta_{j-1}} \right)$$

$$C_i = -\frac{a}{2 \Delta x_i} (\overline{u_{PQ}} - |\overline{u_{PQ}}|) + \frac{b}{\Delta x_i \Delta \xi_i}$$

$$D_i = f_{i,j-1} \left(-\frac{a}{2 \Delta y_j} (\overline{v_{PS}} + |\overline{v_{PS}}|) - \frac{b}{\Delta y_j \Delta \eta_{j-1}} \right) + f_{i,j+1} \left(\frac{a}{2 \Delta y_j} (\overline{v_{QR}} - |\overline{v_{QR}}|) - \frac{b}{\Delta y_j \Delta \eta_j} \right) + c \left(\frac{g_{i,j+1}}{2 \Delta \eta_j} + g_{i,j} \left(\frac{\Delta y_{j+1}}{2 \Delta y_j \Delta \eta_j} - \frac{\Delta y_{j-1}}{2 \Delta y_j \Delta \eta_{j-1}} \right) \right) - \frac{g_{i,j-1}}{2 \Delta \eta_{j-1}} - d (h_{i,j})$$

ここに、 $\overline{u_{PQ}}, \overline{u_{SR}}, \overline{v_{QR}}, \overline{v_{PS}}$ は微小要素の境界上の平均速度であり、点P,Q,R,Sにおける流れ関数を用いて次の式(24)で計算する。しかし、式(23)では点(i,j)の流れ関数は計算されても、点P,Q,R,Sの流れ関数は計算されないため、これらの点の流れ関数は次式(25)により、内挿によって求める。

$$\overline{u_{PQ}} = \frac{\psi_Q - \psi_P}{\Delta y_j}, \quad \overline{u_{SR}} = \frac{\psi_R - \psi_S}{\Delta y_j}$$

$$\overline{V_{QR}} = \frac{\psi_R - \psi_Q}{\Delta X_i}, \quad \overline{V_{PS}} = \frac{\psi_S - \psi_P}{\Delta X_i} \quad \dots\dots\dots(24)$$

$$\begin{aligned} \psi_Q = \psi_{i+1/2, j+1/2} = \psi_{i,j} \frac{\Delta X_{i+1} \Delta y_{j+1}}{4 \Delta \xi_i \Delta \eta_j} + \psi_{i+1,j} \frac{\Delta X_i \Delta y_{j+1}}{4 \Delta \xi_i \Delta \eta_j} \\ + \psi_{i,j+1} \frac{\Delta X_{i+1} \Delta y_j}{4 \Delta \xi_i \Delta \eta_j} + \psi_{i+1,j+1} \frac{\Delta X_i \Delta y_j}{4 \Delta \xi_i \Delta \eta_j} \quad \dots(25) \end{aligned}$$

次に、境界条件を差分近似することを考える。まず、上向水平面の渦度は式(15)、(16)より、次式で近似する。

$$\omega_{1,j} = - \frac{2}{(\Delta \xi_1)^2} \psi_{2,j} \quad \dots\dots\dots(26)$$

水平無限遠方の境界 CE (j = N) における流れ関数と渦度は式(18)に3点近似式を適用して次式で計算する。

$$\begin{aligned} \psi_{i,N} = \frac{(\Delta \eta_{N-2} + \Delta \eta_{N-1})^2}{\Delta \eta_{N-2} (\Delta \eta_{N-2} + 2 \Delta \eta_{N-1})} \psi_{i,N-1} \\ + \frac{(\Delta \eta_{N-1})^2}{\Delta \eta_{N-2} (\Delta \eta_{N-2} + 2 \Delta \eta_{N-1})} \psi_{i,N-2} \quad \dots\dots\dots(27) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \omega_{i,N} = - \frac{2}{\Delta \xi_i (\Delta \xi_{i-1} + \Delta \xi_i)} \psi_{i+1,N} + \frac{2}{\Delta \xi_{i-1} \Delta \xi_i} \psi_{i,N} \\ - \frac{2}{\Delta \xi_{i-1} (\Delta \xi_{i-1} + \Delta \xi_i)} \psi_{i-1,N} \quad \dots\dots(28) \end{aligned}$$

鉛直上方遠方の境界 DE (i = M) における温度と渦度は i = M-1 の点の温度と渦度が既知であれば、式(19)を差分近似することによって、次式で計算される。

$$A_j f_{M,j-1} + B_j f_{M,j} + C_j f_{M,j+1} = D_j \quad \dots\dots\dots(29)$$

$$A_j = \frac{1}{\Delta \eta_{j-1} (\Delta \eta_{j-1} + \Delta \eta_j)} (\Delta \eta_j v_{M,j} + 2a)$$

$$B_j = - \frac{\Delta \eta_j - \Delta \eta_{j-1}}{\Delta \eta_{j-1} \Delta \eta_j} v_{M,j} - \frac{1}{\Delta \xi_{M-1}} u_{M,j} - \frac{2a}{\Delta \eta_{j-1} \Delta \eta_j}$$

$$C_j = \frac{1}{\Delta \eta_j (\Delta \eta_{j-1} + \Delta \eta_j)} (-\Delta \eta_{j-1} v_{M,j} + 2a)$$

$$D_j = - \frac{1}{\Delta \xi_{M-1}} u_{M,j} f_{M-1,j} - b (g_{M,j})$$

ここに、f = u, g = θ, a = 1, b = Gr* とおくと速度 u_{M,j} の計算式に、f = θ, a = 1/Pr, b = 0 とおくと温度 θ_{M,j} の計算式になる。また、速度 v_{M,j} は

$$v_{M,j} = v_{M,j-1} - \Delta \eta_{j-1} \frac{u_{M,j} - u_{M-1,j}}{\Delta \xi_{M-1}} \quad \dots\dots\dots(30)$$

で計算する。速度 $u_{n,j}$ 、 $v_{n,j}$ が計算されると、流れ関数は $u_{n,j}$ をシンプソン公式で積分して、また渦度は次式で計算される。

$$\omega_{n,j} = \frac{v_{n+1,j} - v_{n-1,j}}{2 \Delta \xi_{n-1}} - \left(\frac{\Delta \eta_{j-1}}{\Delta \eta_i (\Delta \eta_{j-1} + \Delta \eta_j)} u_{n,j+1} + \frac{\Delta \eta_j - \Delta \eta_{j-1}}{\Delta \eta_{j-1} \Delta \eta_j} u_{n,j} - \frac{\Delta \eta_j}{\Delta \eta_j (\Delta \eta_{j-1} + \Delta \eta_j)} u_{n,j-1} \right) \dots (31)$$

以上の差分式を数値計算するには次の手順による。

(1) 例えば、 Gr^* の異なる収束解を基にして、計算領域の温度、渦度、流れ関数の予測値を定める。

(2) 式 (23) により、線反復法を用いて計算領域内の流れ関数を計算する。

(3) 式 (25) により流れ関数の内挿値の計算を、式 (26)、(28) により境界の渦度を計算する。

(4) 式 (23) により、線反復法を用いて計算領域内の温度と渦度を計算する。

(5) 上向水平面の温度を5点近似式を用いて計算する。

(6) 式 (29)、(30) により、流出境界 DE ($i = M$) の温度、速度を計算する。式 (29) は非線形であるので、1回前の反復の速度 u 、 v を用いて反復計算を行い、 u 、 v の最大値の相対誤差がそれぞれ 0.2 % 以下になるまで計算を繰り返す。

(7) $i = M$ の解を基に、 $i = M+1$ の解を手順 (6) と同じ方法で計算する。

(8) 式 (31) により流出境界の渦度を、シンプソン公式により流れ関数を計算する。

(9) 計算領域内の流れ関数、温度、渦度が収束するまで手順 (2)~(8) を繰り返す。

繰り返し計算には逐次緩和法を用いるが、緩和係数として、式 (10) には 0.13~0.18、式 (11) には 0.7~1.0、式 (12) には 0.3~0.5 を使い、反復による各々の相対誤差が 0.03 % 以下に収束するまで反復した。なお、緩和係数はグラスホフ数が小さくなるほど大きくした。計算を反復するたびに、任意の断面を通過する熱量と加熱面で流体に加えられる熱量がどの程度一致するかを検査を、次式がどの程度満足されるかを調べることによって行い、収束判定の補助にした。

$$\int_0^{\infty} \left(u \theta + \frac{1}{Pr} \left(- \frac{\partial \theta}{\partial x} \right) \right) dy = \frac{1}{2 Pr} \dots (32)$$

4. 数値計算結果の例

以上の解法は流出境界の流れが鉛直上向きの境界層形の流れになるという仮定を用いている。この仮定の妥当性を線熱源の浮力流れに関する相似解と比較することによって検討する。図4は図2に示す境界 DE を $x = 4$ 、境界 CE を $y = 2$ とした場合の $x = 2$ と $x = 4$ の水平断面における温度分布と速度分布を示している。図の横軸は藤井ら⁽⁷⁾の線熱源に関する解析の用いら

れた相似変数，縦軸は同じ相似無次元温度あるいは相似無次元速度である．また，図中の点線は平面の発熱量 qW と等量の加熱を去れる線熱源が原点（図2の点A）におかれた場合の藤井らの相似解を示す．図から解るように，本解法の温度分布と速度分布は線熱源の相似解と一般的に一致しており，さらに詳細にみると， Gr^* あるいは x が大きいほどそれらは相似解により近づいている．したがって，式 (10)~(12) を計算した $x = 2$ に於ける分布形が式 (19) で与えられる境界層方程式をといたせん熱源の解とほぼ一致しているので，流出境界が境界層形の流れになるという仮定は妥当であると考えられる．なお，境界 CE を $y = 2$ とし，境界 DE を $x = 2$ とした場合は $x = 4$ とした場合に比較して， $x = 2$ ， $y = 0$ における相対誤差は $Gr^* = 10^4$ ， 10^7 の各々の場合に 0.6，0.3 %， $x = 2$ ， $y = 0$ における速度の相対誤差はそれぞれ 1.3，0.09 %，加熱面の平均温度の相対誤差はそれぞれ 0.1，0.002 % にすぎなかった．また，境界 DE を $x = 2$ とし，境界 CE を $y = 2$ とした場合は $y = 4$ とした場合と比較してかね積めんの平均温度の相対誤差は $Gr^* = 10^4$ ， 10^7 の場合にそれぞれ 0.5，0.08 % にすぎなかった．したがって，ここで問題にしている現象を把握するには計算領域の境界 DE を $x = 2$ ，境界 CE を $y = 2$ として実用上十分であると考えられる．図5はこの解法で得られた等温線と流線の一例を示す．加熱面近傍および浮力流れの領域に境界層が出来るのが解る．

図6は上向き水平面的一部分が一様温度に加熱される場合の平均ヌセルト数を本解法で数値計算したものと，阿部らの数値計算結果⁽⁵⁾との比較を示している．ただし，本解析は非加熱部分が断熱に保たれるとして計算しているのに対し，阿部らは周囲流体と同じ一様温度に保たれるという条件で計算している．図より， Gr の小さい方で本解析結果は阿部らの計算結果より若干小さいが， Gr が大きくなるほど両者は良く一致するのがわかる．この差異は非加熱面の境界条件の違いによると思われる．すなわち，断熱条件の場合は図5の等温線から分かるように非加熱面の端（発熱面の端）の近傍で非加熱面近傍の流体は Gr が小さいほど温度が高くなるのに対し，等温条件の場合は周囲と等しい状態に保たれるので，断熱条件の方が等温条件の場合より温度の高い流体が加熱面へ流入することになり，熱伝達も悪くなるからである．

図7は本解法を断面長方形の物体（図1(c)）周りの自然対流の計算に適用した場合⁽⁸⁾の等温線と流線の一例を，図8は発熱面と干渉物体の間の自然体対流の計算に適用した場合⁽⁹⁾の流線と等温線の一例を示している．いずれも発熱面上に渦が生じるのが計算されているが，この様な渦は実験でも確認されている．また，図8の場合は流出境界が物体にそうながれとなり，自由空間中の浮力流れとは異なるが，この様な場合にも，流出境界で流れが境界層的になる限り本解法が適用できる．

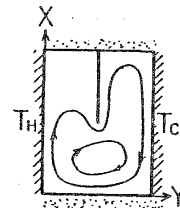
なお，前節の計算方法の説明では，式 (10)~(12) の差分式を誘導するのに，微小要素の面積平均を考え，境界上の平均速度は式 (24) のように微小要素の角の流れ関数の差を用いた．しかし，この計算法を使用し始めた当初からこの様な差分法を用いたわけではなく，当初は式 (10)，(11) の慣性項と対流項には風上差分，式 (13) の速度には5点差分近似，その他の項に

は3点差分近似(中心差分)を用いた差分計算を行った。この差分法によった場合は、特に角のある物体周りの流れを計算する場合に、図9に局所ヌセルト数の一例を示すように、グラスホフ数が大きくなると角付近に物理的に理解の出来ない熱伝達の極大値が現れ、反復を何度繰り返してもその現象は消失しなかった。計算結果を用いて、式(10)~(13)の各項を調べた結果、これは計算された速度 u 、 v が角付近では式(1)を正しく満足しないためであり、5点差分近似で速度を計算する際に対象となる格子点のとり方が角で急に変わるためであると考えられた。なお、流れ関数の差から計算される平均速度にはこの様な不都合はなく、図9の局所ヌセルト数の変化の仕方も自然である。

以上、広い空間におかれた物体周りの自然対流の数値計算をする際に、鉛直上方の計算上の境界では流れが境界層形に流出するという仮定を用いることによって、有限の比較的狭い領域で数値計算が出来ることを示した。この方法が何かの役にたてば幸いである。

文献

- (1) 藤井, 自由対流熱伝達の基礎, 伝熱工学の進展, 3, 養賢堂.
- (2) 例えば, 部谷ら, 日本機械学会論文集, B編, 50(昭59), 724.
- (3) 例えば, 藤井・森岡, 日本機械学会論文集, 40(昭49), 1674.
- (4) Suriano, F.J. and K.T. Yang, Int. J. Heat Mass Transfer, 11(1968), 473.
- (5) 阿部・石黒, 日本機械学会論文集, 41(昭50), 3577.
- (6) 竹内・他2名, 日本機械学会論文集, B編, 51(昭60), 600.
- (7) 藤井・森岡, 九州大学生産科学研究所報告, 52(昭46), 57.
- (8) 竹内・他3名, 日本機械学会論文集, B編, 51(昭60), 674.
- (9) 竹内・他3名, 日本機械学会論文集, B編, 52(昭61), 886.



(e)

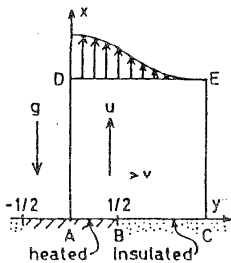


図2 座標軸と計算領域

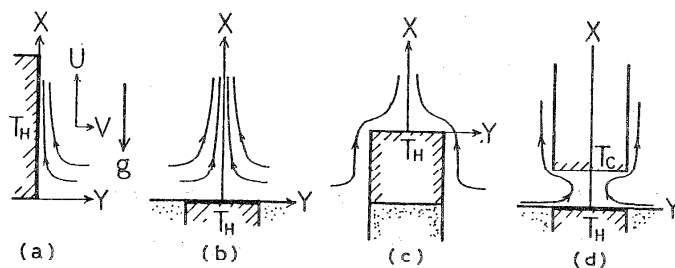


図1 物体周りの自然対流の例

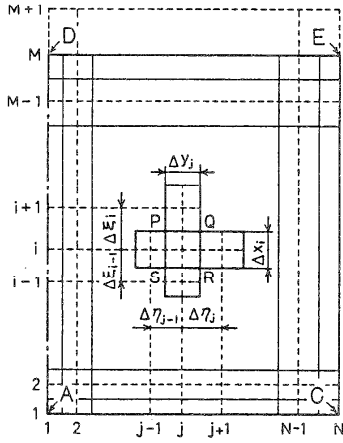


図3 差分格子と微小要素

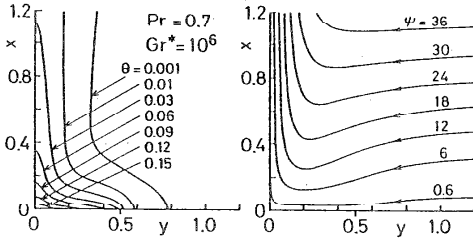


図5 等温線と流線の一例（一様発熱する上向面）

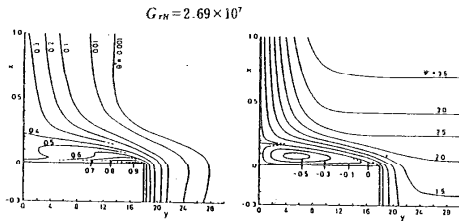


図7 等温線と流線の一例
（等温加熱される断面長方形物体）

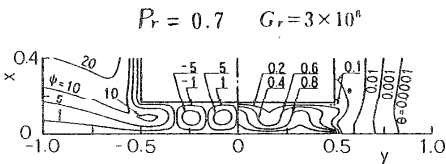


図8 流線と等温線の一例
（等温発熱面と干渉物体間の流れ）

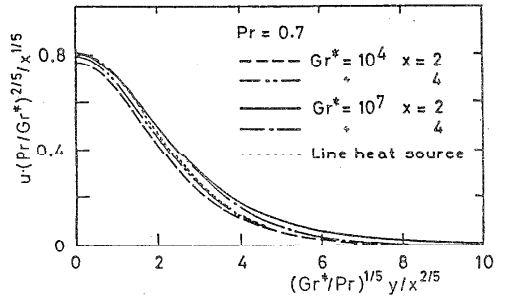
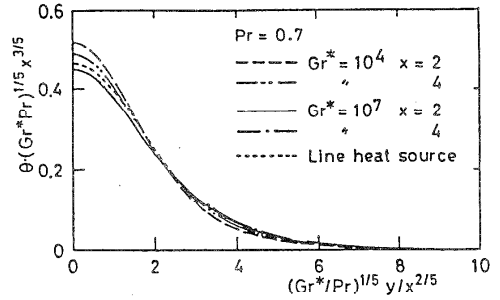


図4 浮力流れ領域の温度分布と速度分布

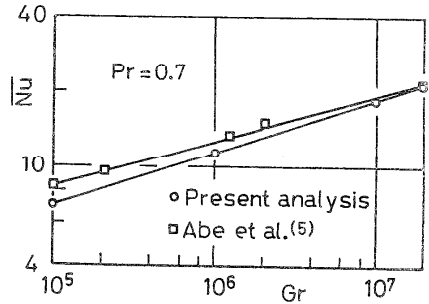


図6 平均ヌセルト数
（等温加熱される上向面）

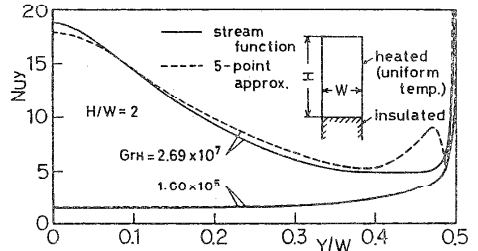


図9 上向水平面の局所ヌセルト数の分布
（等温加熱される断面長方形物体）

1. はじめに

半導体製造プロセスには多くの熱処理が含まれ、複雑で多岐にわたる伝熱問題を提供している。近年プロセスの微細高精度化、生産性向上のためのウエハの大口径化などに伴い、半導体製造における伝熱研究の役割は増大している。最適なプロセス条件や装置構造を検討する上で、実験に比べて、種々の物理的要因を調べ、形状や境界条件の変更が容易にできる数値解析が重要視されるようになってきた。半導体製造には多くのプロセスがあるが、ここではその中で、結晶成長、CVD、酸化・拡散工程に関連した伝熱問題の数値解析による研究例を紹介し、併せて新しい解析手法についても触れることにする。なお、プロセス全般にわたる研究動向については、文献(1)に詳しく解説されている。

2. 結晶成長

結晶成長法には大別してチョクラルスキー法 (Czochralski Method, CZ法)、浮遊体法 (Floating Zone Method, FZ法)、およびブリッジマン法(Bridgman Method)がある(図1)。この内、CZ法は高温のるつぼに入れた結晶材料の融液から結晶を引き上げるもので、大口径シリコンの単結晶製造に多く用いられている。また、CZ法の一つで、融液表面を封止液体で覆うLEC法(Liquid Encapsulated Czochralski Method)は、GaAs等の化合物半導体の有力な製造法として期待されている。CZ法に対する数値解析による研究は多く、融液内の対流や結晶周辺の伝熱について研究がなされている²⁾。まず、CZ法の数値解析の内でもかなり高度な取扱いをしているDerbyとBrown³⁾⁴⁾のLEC法によるGaAs製造の研究を例にとり、見ていくことにする。図2は彼らの用いた物理モデルである。るつぼに入れられた結晶材料(Ga, As)は壁からの加熱により溶融状態となり、上方から支持された単結晶を種として引き上げられる。融液表面は蒸気圧の差によるAsの逃げを防ぐため、封止液体 (B₂O₃)で覆ってある。

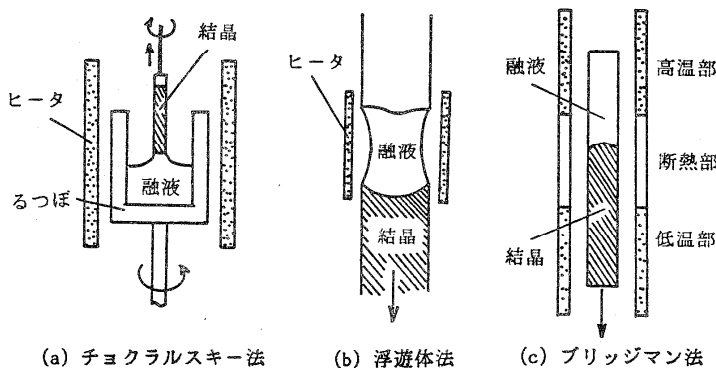


図1. 結晶成長法

この系の熱的に重要な因子としては、①融液、結晶、封止液体内の熱伝導、②表面から外部へのふく射ならびに対流熱伝達、③融液から結晶への相変化、④結晶・融液、融液・封止液体の界面ならびに封止液体の表面形状、および⑤融液、封止液体内の対流があげられよう。ただしDerbyらは、融液および封止液体内では熱伝導が支配的として⑤の対流の効果は無視している。このプロセスを制御するパラメータには、るつぼの壁温分布（厳密にはヒータの発熱量）、結晶の引き上げ速度などがあり、さらに装置の形状も重要な影響を及ぼす。結晶欠陥を減少させるには結晶中の温度

勾配の低減を図らねばならず、るつぼ壁から結晶にいたる熱の流れを明らかにすることが重要となる。数値解析面から見たこの問題の困難さは相変化を含んだ複合伝熱を扱わねばならないことと、界面形状が不明であり、非定常で解く際には計算領域自体が変化することであろう。自由境界問題を扱った従来の研究の多くは、界面形状を仮定して温度分布などを解き、その結果から再度界面形状を決定するものであった。DerbyらはNewton法による有限要素法を用いて、特に界面の位置をも他の未知数と同時に解くことに成功している。これにより、温度分布と整合性のある界面形状が得られ、また界面が滑らかな曲線で表せることから、メニ

スカスや結晶の径の変化についてもより詳細な解析が可能となっている。図3(a)~(c)は温度分布の一例であり、(a)は封止液体がない場合、(b)は封止液体がふく射に対して透明である場合、及び(c)は封止液体が不透明である場合の結果である。(b)ではふく射損失は融液表面から直接生じるため結晶中心部に比べて表面側で冷却され、結晶・融液界面は凸面となっている。これに対し、(c)では封止液体が断熱の役割を果すため、結晶周辺部の温度が高くなり、界面は凹面となっている。このように結晶成長においては熱伝導と共にふく射伝熱の影響が大きく、周囲の熱的環境や装置形状に大きく左右される。DerbyとBrownはさらにるつぼの壁温が時間的に変化する場合についても計算を進めており^{〔5〕}、結晶表面の凹凸をPI制御

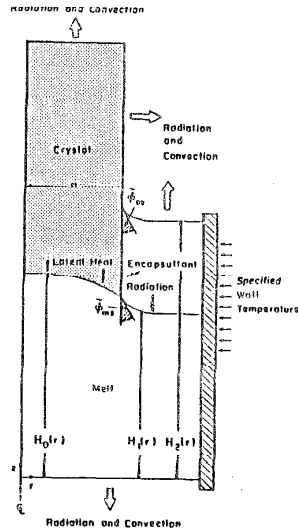


図2. LEC法によるGaAs成長の物理モデル
(Derby and Brown^{〔3〕} Fig.1より)

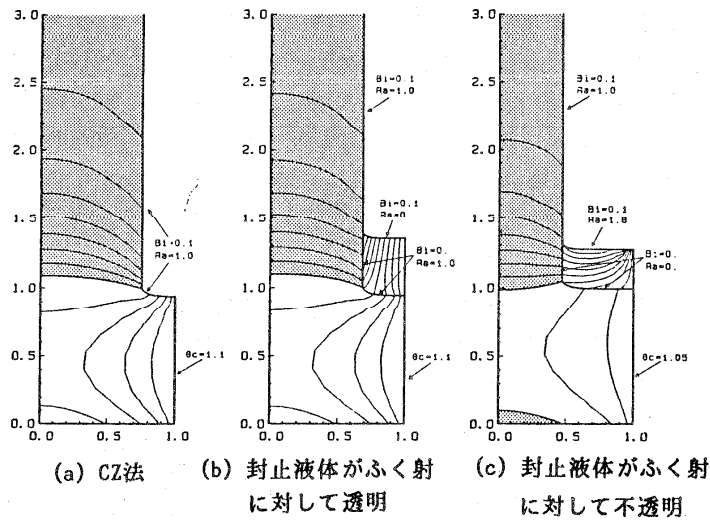


図3. 封止液体のふく射性質の差異による
等温線と界面形状の違い
(Derby and Brown^{〔3〕〕 Fig.10より)}

を用いて均一化する方法を検討している。温度分布の詳細な解析と共に、熱的境界条件が時間的に変化する場合について、自由境界面や計算領域の変化を込めた計算が可能となれば、単に現象の解析や構造検討のみならず、プロセスを制御するための指針を得る上でも有用である。このような制御を対象とした非定常解析は、今後の数値解析の一つの方向を示していると考えられる。なお、FZ法による結晶成長においても自由境界面と計算領域の変化が重要であるが、Derbyらはこれについても同様の解析を行っている^{〔6〕}。

界面形状の変化と融液内の対流の在りかたが重要となる例の一つに、ブリッジマン法による結晶成長がある。この方法は化合物半導体製造に利用されており、種結晶を温度勾配のある熱雰囲気中で移動させることにより結晶を成長させるものである。垂直ブリッジマン法(図1c)では融液内で温度差あるいは濃度差による対流が発生する。種結晶の下方に融液がある場合(図1cで上下が逆の場合)、高温面は融液下方にあるため流れは不安定となりやすく、また循環流が発生するため、非一様な界面形状や不均一な不純物の分布が起こりやすい。この問題について、Brownらは系を下面を加熱した円筒容器内の流れ(Rayleigh-Benard問題)として扱い、流れのパターンと安定、不安定性について調べている^{〔7〕}。図4にレイレ数Ra(ただし容器上面と下面の温度差基準)と界面でのヌセルト数の結果を示す。図中の実線は安定な解を意味し、また点線は不安定な解を表している。ただし不安定な解とは、その解に微小擾乱が与えられたとき、時間的に擾乱が増大して元の解から離れることを意味している。

図4で、特に同一のRaに対して複数の解が得られていることに注意されたい。さらに $Ra=10^6$ 付近で安定解が不安定解に変化しており (パターン1Dが2U)、ある臨界点が存在していることがわかる。この臨界点を越えてRaを増加させた場合、流れは急激に別の安定なパターンに移行することが予想され、カタストロフ的な変化が生じることが考えられる。同一のRaに対して得られる複数の流れパターンはそれぞれ循環流の位置や界面形状が異なっており (図5)、したがって結晶の品質も異なっていると考えられる。この解析を行うためにBrownらはbifurcation analysis (解の分岐解析、後述) の手法を用いた。これは、解曲線に沿って解を追跡していく手法であり、同一の条件下で複数の解が得

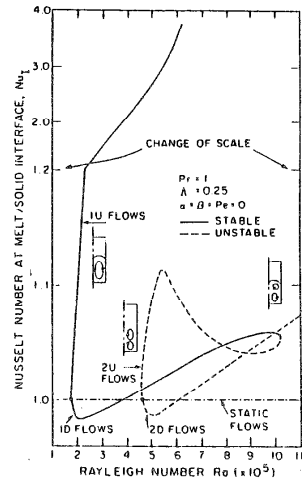


図4. レーレー・ベナール問題に対する軸対称定常解の解の挙動 (Chung and Brown⁷⁾ Fig.4より)

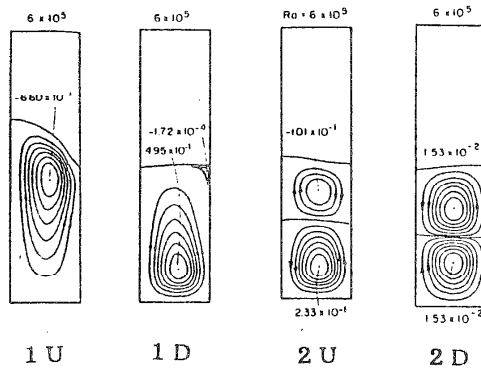


図5. レーレー・ベナール問題に対する軸対称定常解の流線分布 $Ra=6 \times 10^5$, 1U~2Dの記号については図4参照 (Chung and Brown⁷⁾ Fig.5-8より)

られる場合や解が分岐する場合の計算手法として非常に有力なものである。流れが複雑で非線形性が強い場合には、ここで現れたような複数の解が存在することも考えられ、この bifurcation analysis のような解析手法が重要になるものと思われる。ブリッジマン法に関して、Brownらはさらに融液が種結晶の上方にあるより安定な場合についても解析を行い、流れの不純物の偏析への影響を調べている^{〔8〕}。

結晶欠陥や転位の発生、不純物の非一様な分布など結晶の品質に関わる現象の多くは、微視的なものであり、従来行われてきたような大規模の数値解析の直接的な対象とはなりにくい。中山は個々の現象を支配する時間的、空間的スケールの違いを指摘し、現象に応じたスケールリングを行うことの重要性を指摘している^{〔9〕}。この意味でここに紹介した数値解析例は、ヒータ発熱量から結晶欠陥にいたる一連の熱の流れの大枠を与えるものと解釈すべきであろう。今後はさらに融液内の対流や3次元性の影響を検討し、また表面からの熱伝達をより詳細に調べることにより、このような大規模の数値解析を微視的な現象の解明につなげていくことが必要であろう。

3. CVDプロセス

CVD法(Chemical Vapor Deposition、化学気相蒸着法)は反応性のガスを用いて化学反応によりウエハ表面に膜をつけるものであり、反応に必要なエネルギーは熱、プラズマあるいは光で与えられる。CVD装置には横形、縦形、パレル形などがあり(図6参照)、膜の種類によって使い分けられている。このプロセスでは所定の電気的特性を持つ膜を均一につけることが要求される。膜生成に関与する化学反応にはガスの熱分解等の気相反応および表面反応があり、様々なプロセスでの反応について研究されてきた。さらに膜生成の機構はウエハに供給されるガスの流れに大きく影響されるため、ガスの流れを知ることも重要となる。したがってCVDプロセスのシミュレーションでは反応機構の解明と流動特性の把握が中心課題となる。

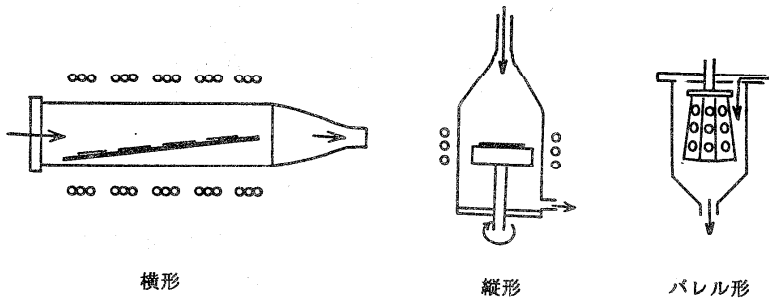


図6. 構形CVD装置の例

横形装置で SiH_4 を用いたSiのエピタキシャル成長(単結晶薄膜成長)についてはColtrinらの一連の研究がある。彼らは反応機構に対して詳細な検討を行っており、120の素反応の内から主要な20の反応を選択した。ついでこれらの反応モデルを用いて、長方形断面の装置内の流れを2次元(平行平板間の流れ)として数値解析を行った^{〔10〕}。彼らは反応定数を調整することなしに実験値と良く一致する結果を得、Siのエピタキシャル成長では気相反応が重要であることを明らかにしている。

横形装置では高温のサセプタ表面(約1000K)と冷却された反応室上面との間の温度差により縦渦が生じ、3次元的な流れが生じることが知られている。MoffatとJensenは $\text{Ga}(\text{CH}_3)_3$ と AsH_3 からGaAsを成長させる場合の、3次元性を考慮した解析(partial parabolic、流れ方向の各断面では楕円型、流れ方向には放物型として解く方法)を行い、渦構造と成長速度の関連を調べている^{〔11〕}。渦構造は反応室壁面の温度条件に大きく依存し、これに対応して膜の成長速度の分布も変化することが示された。側壁を冷却(300K)した場合の結果を図7に示す。流れ方向の各断面では浮力により速度は壁側で下降し、中央で上昇する分布となる。このため、外向きに回転する渦が発生する。したがって膜の成長速度はガスが押しのけられる中央部で小さく、ガスが巻きこまれる側壁部で大きくなる(図8)。一方、側壁を断熱とした場合は、渦の回転方向は逆になり、中央部の成長速度が大きい分布となる。計算結果は実験値と中央部では一致するものの、側壁部では不一致も見られる。これは、壁の温度分布、また入口でのガスの速度分布形状が実験と計算とで一致していないことなどによると考えられる。実験的に壁温が与えられない場合は壁内の熱伝導とサセプタからのふく射を考慮した解析が必要となろう。実用面では、膜厚の横方向の均一性を検討することは非常に重要であり、このような3次元解析が今後重要視されると思われる。Moffatらの計算は流れ方向の各断面では楕円型の方程式を解いているものの、流れ方向には放物型としているため、流速が遅く流れ方向の拡散が無視できない場合、また入口で段差があり循環流が生じる場合や、サセプタの傾斜が急な場合には有効ではない。完全に3次元として扱う試みも一部でなされているようであるが、まとまった報告例は見あらず、今後の課題であろう。なおMoffatらと同様の系について、Incroperaらが半導体製造プロセスとは別の観点から詳細な数値解析(partial parabolic)と実験を行っており、複数のきのこ型をした縦渦の発生について調べている^{〔12〕}。

縦形のCVD装置についても、数値解析が行われている。Wahi^{〔13〕}は枚葉形(ウエハを一枚ずつ処理するもの)の装置内の流動を計算し、可視化実験と良く一致する結果を得ている。種々の流量、圧力条件下での流動様式の違いについては、楠本ら^{〔14〕}が計算を行っている。楠本らは浮力による渦の発生限界を求めているが、興味深いことにある場合には温度と流量が同一であっても異なった流れパターンが発生することを示し、パラメータ(流量)の変化のさせ

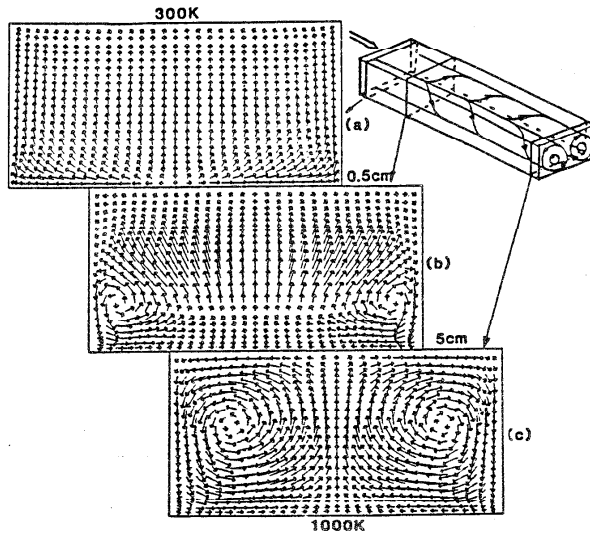


図7. 横形CVD装置の流れ方向各断面の横方向速度分布 (側壁冷却)
 (Moffat and Jensen¹¹⁾ Fig.7より)

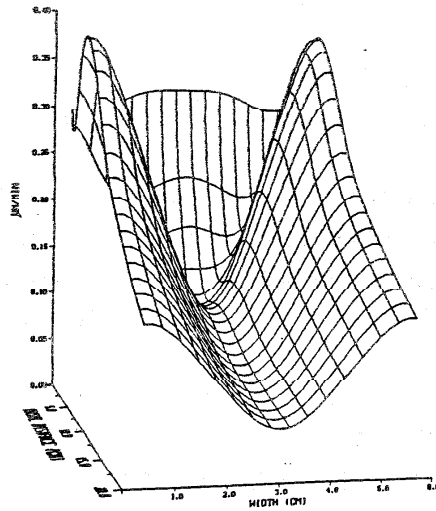
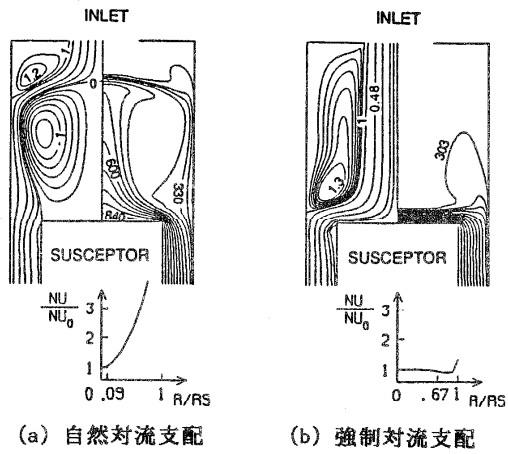


図8. 横形CVD装置によるGaAsの成長速度分布 (側壁冷却)
 (Moffat and Jensen¹¹⁾ Fig.8より)

方に応じてヒステリシス現象があることを指摘している。筆者らは同様の系についてさらに進んだ計算を行い、解の構造を明らかにした⁽¹⁵⁾。図9はその結果の一例であり、装置内の流線と温度分布を示している。図中で装置の左半分に流線、右半分に等温線を示した。図9aではサセプタ上方には自然対流による循環流領域が生じ、装置の上部中央より流入するガスはこの循環流領域を迂回して流れる（自然対流支配のパターン）。一方、図9bでは流入ガスは直接サセプタ面に衝突し、自然対流渦は見られない（強制対流支配のパターン）。実は両者は同一の流量、温度、圧力条件での解であり、どちらのパターンが現れるかは、流量、温度、圧力等の変化のさせ方に依存する。流れを支配するパラメータとしてはレイノルズ数 Re 、浮力効果を表す $G=Re^2/Fr$ (Fr はフルード数)がある。ただし Re, Fr の代表速度、物性値は流入入口における処理ガスの値、また代表寸法は流入入口とサセプタ間の距離を用いている。(Re, G)平面上の解の構造を図10に示した。縦軸はサセプタ表面での平均ヌセルト数である。解は強制対流支配と自然対流支配の二つのパターンが重なりあう二層構造を有しており、(Re, G)平面の斜線部($0' B' C'$)が複数解の存在する領域である。強制対流および自然対流支配の解領域は OD で交叉しており、この OD を低レイノルズ数側より横切るようにパラメータを操作する場合は自然対流支配の流れ、また横切らないように操作して Re を増加させる場合は強制対流支配の流れとなる。図中の OB, OC は臨界点の集合であり、 OB より低レイノルズ側、 OC より高レイノルズあるいは低 G 側では解が存在しなくなる。このため OB を高レイノルズ数側から越える場合、あるいは OC を低レイノルズ側より越える場合は、急激に流れパターンが変化し他の安定な解に移行すると考えられる(カタストロフ現象)。また Re を増大、減少させた場合、流れは自然対流と強制対流の二つのパターン間を往き来するヒステリシス現象も生じることが予想される。この解の構造はくさびのカタストロフと考えられ⁽¹⁶⁾⁽¹⁷⁾、bifurcation analysisを用いればうまく計算することができる。流れがこのような構造を持つとすれば、流量や圧力の操作手順によっては膜の均一性に再現性がなくなることも予想され、問題である。ここに示した流れは、自然-強制共存対流であるが、自然対流場での解の分岐や複数解の存在についてもいくつかの計算例⁽¹⁸⁾⁽¹⁹⁾がある。ただし、実際には流れの3次元性や非定常性の問題があると考えられ、今後計算と実験との対比が必要である。なお楠本らは解の詳しい構造は明らかにはしていないものの、この問題について重要な知見を与えている。彼らは計算にあたって16ビットのパソコンと市販のFortranプログラムを用いており、大型計算機によらずともかなりの計算が可能であることは特筆に値する。

以上のようにCVDプロセスでは詳細な流れ解析と詳細な反応機構の解明の両面から研究を進めていかねばならない。流れ解析については、3次元性や非定常性、複数解の存在の有無、また壁、サセプタ面の温度分布を与えるための熱伝導、ふく射を含んだ複合伝熱解析が必要となろう。



NITROGEN $T_s = 900 \text{ K}$ $T_w = 300 \text{ K}$ $AR = 1$
 $G = 1114600$ $Re = 550$

図9. 縦形CVD装置内の流線と温度分布
 同一条件下での異なったパターンの例
 (Kieda and Jensen^[15]より)

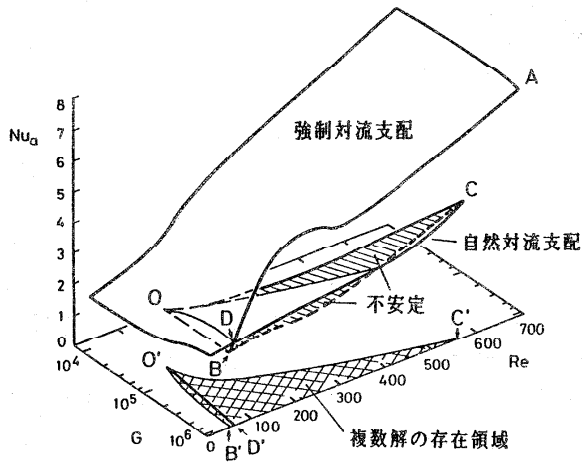


図10. 縦形CVD装置。(Re,G)平面で見た解の構造
 (Kieda and Jensen^[15]より)

4. 酸化・拡散プロセス

酸化・拡散プロセスでは、ウエハを加熱し表面に絶縁層となる SiO_2 膜を形成したり、ウエハ内に不純物を拡散させて所定の電気特性を持つ層を形成する。装置の概略を図11に示した。高温の反応管内に数十から百枚程度のウエハを挿入し熱処理を行う。ウエハの温度均一性は厳しいものでは $1000 \pm 0.5^\circ\text{C}$ の精度を要求されるため、厳密な温度管理が必要となる。一般に温度管理はヒータ発熱量をモニタ熱電対の指示値に基づいて制御する方式を用いている。多数のウエハを同時に処理するため、品質管理の観点からは同一ウエハ面内のみならず各ウエハ間でも温度分布を均一にしなければならない。このプロセスで問題となるのは、熱処理中およびウエハ出し入れ時に、温度が均一となるための最適な温度制御法と装置構造を検討することである。ウエハ間、ウエハと装置内壁、また内壁相互の間ではふく射伝熱が支配的である。数値解析の点からすれば、このふく射伝熱をどのようにモデル化するか、さらに伝熱計算と制御とをどのように結びつけるかが重要な課題となる。ウエハ面は最初は鏡面であるが、膜の成長とともに変化する。またウエハ面のふく射率のスペクトル分布は、膜の種類によって大きく異なる。ウエハのふく射伝熱を扱う場合に、鏡面反射とすべきか、あるいは灰色拡散面として扱えるのか、さらにはスペクトル分布や指向性まで考慮する必要があるのか、現状では明らかでない。このため、筆者らはまずウエハが無い状態での装置内部の温度分布シミュレーションを行い、構造と制御法の検討を行った^{〔20〕}。計算では装置内面でのふく射伝熱と部材内の熱伝導を組合せ、PID制御を模擬したヒータ発熱量を与えて非定常の温度分布を調べた。図12に結果の一例を示す。図はウエハ出し入れ口を開放し、さらに30分後に閉鎖した場合の装置内壁（均熱管）の温度分布である。出し入れ口開放に伴い、ふく射伝熱損失のため壁温は減少するが、ヒータの配置、およびPID制御法をいろいろ変更して壁温の均一化を図ったものである。計算によりヒータ構造および制御法に関する知見が得られ、有用な設計指針が得られている。実際にはウエハを処理する反応管内部と外気との温度差に基づく密度差のために対流が発生することが知られている。特に横形装置では、流れは3次元性を持った非定常流でありその影響は大きいものの、数値解析で扱うのはまだ困難である。

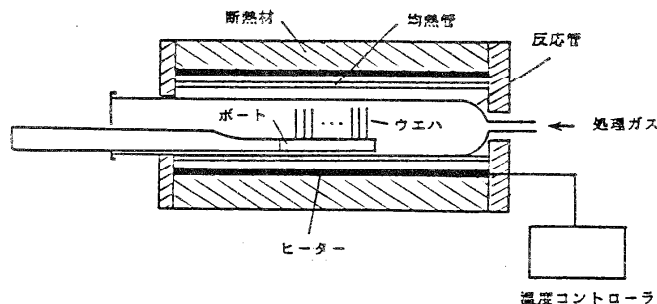


図11. 酸化・拡散装置の概略

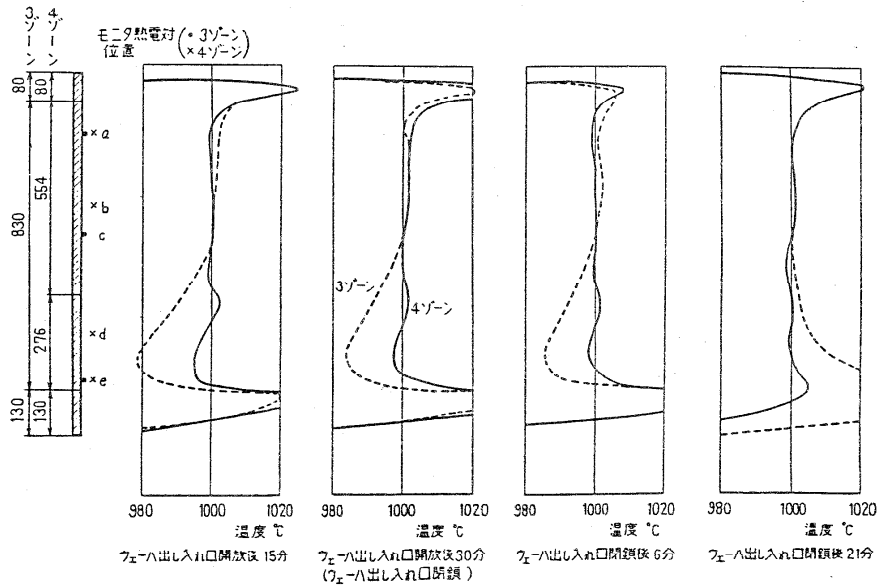


図12. 酸化・拡散装置内温度分布、ウエハ出し入れ口開放、閉鎖後の温度変化と均一化のための制御²⁰⁾

ウエハ群が挿入される過程では、ウエハは急激に加熱されるとともに、装置自身も冷却される。このような状況での温度制御法を検討するにはウエハ群と装置の相互作用を考慮した非定常の計算が必要となる。ウエハ間およびウエハと内壁との間のふく射伝熱について、仮にウエハを灰色拡散面として形態係数を用いた取扱いが可能だとしても、数十枚以上のウエハ全部について、それぞれに対する形態係数を各時間毎に変更し、複雑なふく射-熱伝導計算を行って温度分布を計算するには、膨大な記憶容量と計算時間を必要とし、実用的ではない。さらにふく射物性にも不明な点が多く、このことから数値解析は容易ではない。数枚のウエハのみに着目して鏡面反射を仮定した複雑なふく射伝熱の計算を行い、ウエハ面内温度分布を示した例²¹⁾²²⁾もあるが、ヒータ発熱量を与えてウエハ温度を計算した例は見当らず、両者の関係を調べられる実用的な計算手法の開発が今後の課題であろう。このプロセスにおいても CVDプロセスと同様に、酸化、拡散に関する反応機構の研究が重要であり、最近特に薄い酸化膜形成の機構が注目され研究が進められている。

5. Bifurcation Analysisについて

結晶成長および CVDプロセスでみたように、Bifurcation Analysisを用いた数値解析は、従来困難であった複数個の解が存在する場合や解が分岐する場合に非常に有力な計算手法と考えられる。この手法は非線形微分方程式の解の構造に関して進められてきた研究であり、大型計算機の発達に伴ってその実用的な数値解析手法が開発されつつある。これに関する数学的な基礎および解説については文献(16)(23)などを参照していただきたい。以下では簡単な例を用いて説明を試みる。

まず解が分岐したり、複数個存在する簡単な例を図13に示す。図13は X に関する3次方程式 $X^3+AX-B=0$ を(X, A, B)空間でプロットしたもので、方程式を満たす解集合 X はパラメータ A, B の値に応じて図に示したような曲面となる。 $A < 0$ の斜線部で示した領域では解曲面は折り重なりあっており、明らかに同一の A, B に対して3個の複数の解が得られることがわかる(複数解の存在)。またこの領域の境界(臨界点、limit point)を越せば、解の個数はただちに1個となる(図14a参照)。一方、 A 軸($B=0$)に沿って $A > 0$ から A を減少させる場合、 $A=0, B=0$ で解は分岐し、解の個数は1から3へと変化する(解の分岐、図14b参照)。この場合 $A=0, B=0$ は分岐点(bifurcation point)と呼ばれる。また、 $A > 0, B < 0$ であるような点 P から出発して、 A を減少させ、ついで B を増加させて到達する点 Q_1 と、同じく点 P から出発して、まず B を同じだけ増加させ、ついで A を同じだけ減少させて到達する点 Q_2 とでは、 A, B の値が同じであるにもかかわらず、異なった点であることがわかる。以上簡単な例で示したが、解の分岐と複数解の存在についての概略は理解していただけたことと思う。よく用いられる実用的な解析手法にKellerの方法²³⁾があるが、これは解曲面が連続であるという条件を用いて解を追跡し、外部パラメータ(レイノルズ数、レーレ数など)も未知数として他の速度や温度などの変数と同時に解くものである。この方法によれば、解曲面に沿って解を求めていくため、臨界点を明らかにすることができ、解が複数個ある場合にも系統的にそれらをとらえることが可能となる。また解が分岐する場合に別の分枝に移る方法も提案されている。さらに、方程式の係数行列式を調べることにより、解の安定・不安定性も検討できる。このように、bifurcation analysisは、対象としている基礎方程式が持っている解の構造を調べるものであり、非線形性の強い問題を扱う場合には有力な解析手法といえよう。具体的にこれらを計算するアルゴリズムについてはたとえば文献(18)(24)などを参照されたい。

6. まとめ

半導体製造プロセスの内、熱処理を伴うものを中心に筆者が関係したもの、および興味を持っているものについて最近の数値解析による研究例を紹介させて頂いた。当然のことながらここに掲げた以外にも重要なプロセスは多数あり、それぞれ興味深い流れや熱の問題を提

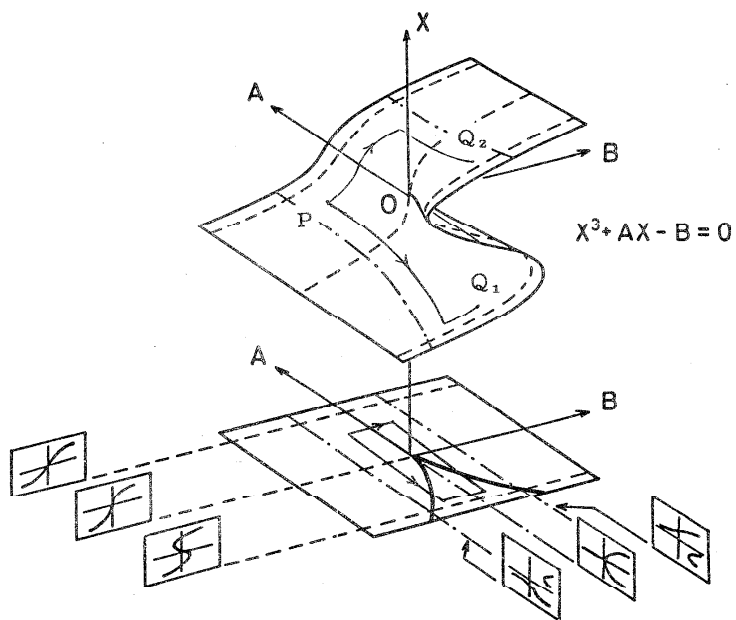


図13. 解の分岐および複数解の存在する簡単な例

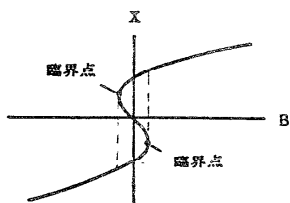


図14(a) 複数解の存在
(図13のA=一定(<0)断面)

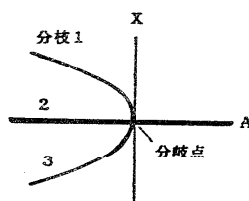


図14(b) 解の分岐
(図13のA軸上の分布)

供している。従来の伝熱問題に比べて、半導体製造プロセスの伝熱は実に幅広い性格を持っていることがご理解していただけよう。このような伝熱問題を数値解析で扱うには、いくつか特徴的な点が指摘できると思える。以下ではそれについて述べてみたい。

まずこの問題では、複合伝熱系として扱うことが必要である。より具体的に示すために表1にここで引用したプロセスで支配的と考えられる伝熱学的要因を列挙した。多様な伝熱形態が組み合わさっていることがわかる。数値解析の技術からみると、熱伝導と対流についてはかなり進んでいるものの、相変化により境界面が移動する問題や自由境界問題はまだまだ容易でないように思える。またふく射を含む場合は、ふく射のモデル化が大きな問題であろう。さらにふく射と対流や熱伝導を組み合わせていく際には、表面での熱バランスを厳密にとること、温度の4乗の項が現れることによる非線形性、ある一点の温度に影響を与える点の数が非常に多くなり方程式の係数行列式が密になることなどが具体的な問題点となる。

プロセス	対流							熱伝導	ふく射	相変化	化学反応	物質輸送
	自然	強制	乱流	回転	磁場	電場	3次元					
結晶成長	◎	○		◎	○		○	◎	◎	◎		
CVD法	◎	◎	○	○			○	○	○		◎	◎
酸化拡散	○	○					○	◎	◎			○

表1 代表的なプロセスにおける伝熱学的要素
(◎ 印は特に重要と思われるもの)

数値解析を行う上での障害の一つに物性値のデータ不足がある。筆者の経験したところによると、特に断熱材の熱伝導率と比熱、ならびにシリコン（ウエハ）、溶融石英、およびいろいろな薄膜がある場合のシリコンにたいするふく射物性の入手が困難であった。処理温度は最高1200~1600℃に達するため、常温からこの温度範囲までの、温度依存性をこめた物性値のデータが要求される。また CVDで反応を扱う場合には種々のガス成分の拡散係数と温度拡散係数が必要であるが、これらについても十分なデータは見当たらない。今後このような物性値の集積も必要である。

現象解明を目的とした高精度の数値シミュレーションと並行して、制御法の検討と結びつけた非定常の伝熱計算は、今後の実用的な研究課題であろう。制御を検討する上で数値解析を用いることの利点は、制御の方式を自由に設定できることと、熱がどのように移動するか定量的に知ることができる点にある。PID制御にしても、P,I,Dそれぞれの値をどのように設定すればよいかの知見が得られるばかりでなく、フィードバックのかけかたの方式を調べ

たり、ヒータ配置やモニター熱電対の位置まで検討できる。もちろん実験による検証が必要であるが、経験や簡単な熱計算に頼っていた従来の方法に比べて、より多くの情報が得られ、設計やプロセスの最適化に役立つと考えられる。

新しい数値解析技術の開発が必要なことも言うまでもない。ここでは界面が移動する場合、および解が分岐する場合の計算例を紹介した。特に後者の計算法は、伝熱以外の問題にも利用できる応用性の広いものである。これ以外にも、より速い行列演算法、収束性の優れかつ安定な反復法、より精度の高い有限要素法、そしてスーパーコンピュータに適したプログラミング技法などについても研究を進めねばならない。さらに誤差解析も重要な課題である。これらの研究は応用数学の問題であろうが、数値解析を意味あるものにするには避けることのできないものであろう。

以上見てきたように、半導体製造に関わる伝熱の問題は多岐にわたっている。しかるに半導体製造においては、熱の問題は単に熱のみにとどまらず、結晶の品質や膜の組成、またウエハの熱応力、パッケージの強度などと重要な関連があり、これらを含めた統合的な検討が最終的な目標といえる。このことが半導体製造の伝熱を扱う上で最も難しい点であろう。なお本稿はさる62年12月に筑波で行われた機械学会分科会で話したものをまとめたものである。ここでとりあげた個々のプロセスでの問題については、それぞれ専門の方々からすればいろいろと批判も多いかとおもうが、ご容赦いただきたい。本稿が半導体製造の伝熱に興味を持っていただける機会となるならば幸いである。

7. 参考文献

- (1) Jensen, K. F. (1986). Micro-reaction Engineering: Applications of reaction engineering to process of electronic and photonic materials, Ninth International Symposium Chemical Reaction Engineering, Philadelphia. to appear in Chemical Engineering Science
- (2) 白木、単結晶育成プロセスにおける熱、流体工学的問題、機誌、88-802 (昭60)、1054
- (3) Derby, J. J. and Brown, R. A. , Thermal-capillary analysis of Czochralski and liquid encapsulated Czochralski crystal growth. I Simulation., J. Crystal Growth 74, 3 (1986), 605-624.
- (4) Derby, J. J. and Brown, R. A. , Thermal-capillary analysis of Czochralski and liquid encapsulated Czochralski crystal growth. II Process Strategies., J. Crystal Growth 75, 2 (1986), 227-240.
- (5) Derby, J. J. and Brown, R. A. (1986). submitted to J. Crystal Growth

- (6) Duranceau, J. L. and Brown, R. A. , Thermal-capillary analysis of small scale floating zones: steady state calculations, *J. Crystal Growth* 75, 2 (1986), 367-389.
- (7) Chung, C. J. and Brown, R. A. , Natural convection in steady solidification: Finite element analysis of a two-phase Rayleigh-Benard problem, *J. Comp. Physics*, 53, 1 (1984), 1-27.
- (8) Chung, C. J. and Brown, R. A. , Radial segregation induced by natural convection and melt/solid interface shape in vertical Bridgman growth. *J. Crystal Growth*, 63 (1983), 343-364.
- (9) 中山、 チョクラルスキー法による大直径単結晶の成長、*機械の研究* 39, 1 (1987)、 131-134.
- (10) Coltrin, M. E. , Kee, R. J. and Miller, J. A. , A mathematical model of the coupled fluid mechanics and chemical kinetics in a chemical vapor deposition reactor , *J. Electrochem. Soc.* 113, 2 (1984), 425-434.
- (11) Moffat, H. and Jensen, K. F. , Complex flow phenomena in MOCVD reactors, I. Horizontal reactors, *J. Crystal Growth*, 77 (1986), 108-119.
- (12) Incropera, F. P. and Schutt, J. A. Numerical simulation of laminar mixed convection in the entrance region of horizontal rectangular ducts, *Numerical Heat Transfer*, 8 (1985), 707-729.
- (13) Wahl, G. ,Theoretical description of CVD processes., *Proceedings of the Ninth Int. Conference on Chemical Vapor Deposition, Electrochem. Soc., Pennington, New Jersey, (1984) 60-77.*
- (14) 楠本、林、小宮、 CVD のフロー解析、*応用物理*、 54、 7 (1985)、 708-713.
- (15) Kieda, S. and Jensen, K. F. , submitted to *J. Crystal Growth*
- (16) Ioose, G. and Joseph, D. D. , *Elementary stability and bifurcation theory*, Springer-Verlag, New York, (1980)
- (17) T. ポストン、 I. スチュワート、 野口 訳、*カタストロフィー理論とその応用 (理論編)* サイエンス社、 (1978)
- (18) Yamaguchi, Y., Chang, C. J. and Brown, R. A., Multiple buoyancy-driven flows in a vertical cylinder heated from below, *Phil. Trans. R. Soc. Lond.* A312, (1984) 519-552.
- (19) Cliffe, K. A. and Winters, K. H. , A numerical study of the cusp catastrophe for Benard convection in tilted cavities, *J. Comp. Physics*, 54 (1984), 531-534.

- (20) 鳥居, 高垣, 不純物導入, 拡散プロセスにおける熱的問題, 機誌 89, 809, (昭60) 396-402.
- (21) 松葉, 松本, 吉中, 半導体炉内のウェハ温度分布, 電気通信学会論文誌(C) J67-C, 4, (昭59-4) 332-338.
- (22) 杢屋, 松葉, 松本, 吉中, 半導体酸化・拡散装置におけるウェハ温度過渡解析モデル 電気通信学会論文誌(C) J8-C, 6, (昭60-6) 425-432.
- (23) Golubitsky, M. and Schaeffer, D. G. , Singularities and groupes in bifurcation theory, Vol. I, Springer-Verlag, New York, (1985).
- (24) Keller, H. B. , Numerical solution of bifurcation and nonlinear eigenvalue problems, Applications of Bifurcation Theory, edited by P. Rabinowitz, Academic Press, New York (1977) 354-384.

1. はじめに

液相から固相への変態である”凝固”を利用した多くのプロセスが工業的に利用されている。例えば鉄鋼材料は金属材料の中でも最も多用されているものであるが、我国では約90%程度の鉄鋼材料が連続鋳造プロセスを経て生産されている。また、シリンダブロックやタービンブレードなど種々の機械部品、ケース類が生型鋳造法、精密鋳造法、ダイカスト法といった各種鋳造法で生産されている。さらに種々の電子材料用単結晶が引上げ法により生産されている。あるいは融接、溶射、蒸着、アトマイズ法による合金粉末の製造法なども一種の凝固プロセスである。

このような種々の凝固プロセスにより高品質の製品を低コストで製造するには、最適なプロセス設計と合理的な生産管理、制御が必要となる。このためには凝固プロセス自体をシミュレートし、凝固現象を定量的に予測できねばならない。ここではコンピュータの進歩と共に近年著しく進歩した凝固プロセス、特に鋳造プロセスにおけるコンピュータ・シミュレーションについて簡単に紹介する。

2. 凝固現象

凝固現象は極めて複雑な現象であり、未だ十分には理解されていない。例えば、図1に示すように極めて単純な鋳型に入っている溶融合金（溶湯と呼ぶ）の凝固を考えてみよう。

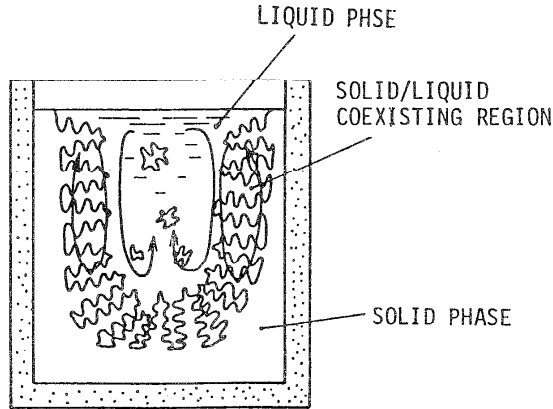


図1 鋳型内での合金の凝固と流動

まず最初溶湯の温度は液相線温度（固相が生じない温度）以上の高温になっているから、低温の鑄型に熱が奪われ、温度が低下する。この時の熱移動は熱伝導によるものが支配的であるが、溶湯中では対流、溶湯と鑄型の間では熱放射も無視し得ぬ場合が少なくない。溶湯温度が低下し、液相線温度以下になると固相が晶出しはじめる。液相線温度以下の何度の時（つまり過冷度が何度で）凝固開始するかは、核生成の問題であり、溶湯中の異質核の種類と数によって決定される。しかし、普通の凝固プロセスでは過冷はあまり大きくない。あるいは大きくならぬよう溶湯処理を行う。

核生成後固相は成長するが、多くの合金は図2に示すように樹枝状に成長する（図2のような結晶を樹枝状晶あるいはデンドライト、このような凝固をデンドライト凝固という）。図2のような固相の成長は、当然、固液界面での潜熱の放出を伴うが、この他、溶質の再分配が行われる。すなわち、液相中に含まれる溶質濃度と固相中に含まれ得る溶質濃度は異なるため、もし、固相中の濃度が低い場合には溶質が液相中に排出され濃縮される（平衡状態での液相中の濃度と固相中の濃度の比 $k = C_s / C_L$ を平衡分配係数という）。この溶質の再分配により、化学組成の不均一分布（これを偏析という）が生じる。この場合の物質移動は拡散を対流によるものである（根本的駆動力は化学ポテンシャル差によるものである）。

このようにして液相中に固相が成長し、固液共存域を形成し、デンドライトがさらに太く成長し、全てが固相に変態する。この間、溶湯中あるいは固液共存域には温度分布、濃度分布に基づく自然対流、固相と液相の密度差による凝固収縮などにより、液相、場合によっては固相自体も流動する。あるいはデンドライトが溶断され、界面エネルギー効果によりデンドライトの形状が変化する。また、温度低下と共に溶解度が下がるため、溶湯中に溶解されていたガス元素が気泡となって現われることがある。

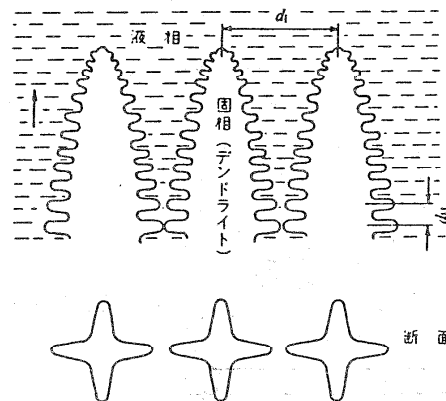


図2 成長中のデンドライト
(d : デンドライト1次アーム
間隔, $d/2$: 2次アーム間隔)

ほとんどの合金では平衡分配係数は1ではなく、ミクロ的な化学成分の不均一分布（ミクロ偏析）が発生する。このミクロ偏析は炭化物や種々の化合物を形成し、材料の性質を変化させる。また液相の流動はマクロな化学成分の不均一分布（マクロ偏析）をもたらす、やはり材料特性を変化させる。気泡の生成はひげ巣やポロシティ欠陥となり、強度や耐圧性を劣下させる。生成された固相の核（溶断されたデンドライトも核となる）の数とその成長速度できまる結晶粒の数、寸法やデンドライトの寸法、形状によっても材料の性質は変化する。

さらに凝固後も固相中には温度分布が残っており、不均一変形や残留応力が発生する。特に固相変態を生じる場合で変態相と母相の密度が異なる場合（例えばマルテンサイト変態）には著しい変形、場合によっては亀裂が発生する。この他、溶湯あるいは凝固相と鑄型が反応し、焼着きを生じたり、溶湯中にガスが吸収されピンホールや異常組織を生じることがある。

シリコン単結晶の成長のように純金属の場合や、極めて大きい温度勾配の場合には上記のようなデンドライト凝固ではなく平滑な界面を持つ凝固となるので現象は比較的簡単になる。しかし、アルミニウムなどでは99.7%といたいわゆる工業用純アルミニウムでも冷却速度が遅いと上記のデンドライト凝固となる。また電子材料などでは酸素などのわずかな不純物の分布（偏析）や、わずかな熱ひずみ（転位密度に関係する）が問題となるのでその解析は容易でない。

さらに砂型鑄造などでは鑄型内のキャビティを溶湯が充満する間の熱移動、物質移動（特に溶湯のガス吸収、砂かみ）、鑄型の変形などが問題となる（図3）。あるいは連続鑄造や単結晶の引上げでは電磁力を外部から作用させ凝固を制御させることが少くない。また溶接などでは表面張力の温度依存性にもとづくマランゴニ対流も問題となる。

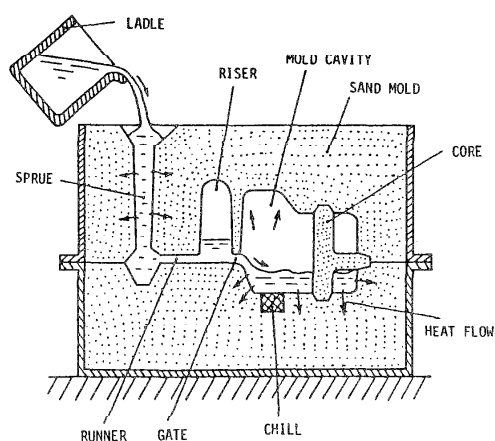


図3 砂型鑄造法における注湯と熱移動

3. 凝固モデル

凝固現象は以上のように非常に複雑であるから、全てを考慮に入れてシミュレートすることは困難であるし、実用的にも必ずしも必要ではない。従って目的に応じて必要最小限の現象を考慮したモデル化がなされる。

3. 1 熱伝導モデル

最も簡単なモデルであるが鋳造品のCAEなどに実用的に利用できる基本的なモデルである。このモデルでは物質移動を考慮せず、熱伝導による熱移動と凝固潜熱のみを考慮する。

3. 2 ダルシー流れモデル

固液共存域における凝固収縮による流動をダルシー流れと近似して液相の流動をも考慮するモデルである。ひけ巣やポロシティ発生のより正確なシミュレーションに必要なモデルである。

3. 3 ダルシー、層流モデル

固液共存域ではダルシー流れ、完全液相域では層流を考慮するもので、マクロ偏析のシミュレーションに重要なモデルである。

3. 4 ダルシー、乱流モデル

実際には層流状態は少いため、より実際に近い乱流状態をも考慮するモデルである。

3. 5 固相流動モデル

3. 1～3. 4までは固相は流動しないと仮定しているが、固相流動を考慮する必要がある場合も少くない。

3. 6 ミクロモデル

ミクロ偏析やデンドライト成長機構を理解するためのもので、熱および物質移動、固液界面エネルギー効果などがより厳密に達成したモデルとなる。

4. 解析方法

上記のようなモデルにより、温度、固相の分布、溶質濃度分布、凝固組織、ひけ巣欠陥の発生、応力状態などを推定するには、モデルを数式で表現し、解くことになる。この場合、解析的手法の適用は実用性に乏しく、一般に数値解析が必要となる。

数値解析法としては、原理的には有限差分法（テラー展開差分法と呼ぶべきである）、有限要素法、境界要素法、コントロールボリューム法などが利用できる⁽²⁾。しかし、筆者は直接差分法を推奨している。

4.1 テラー展開差分法

本方法は単純な形状、境界条件の場合には最も経済的な方法である。しかし、実際の問題はほとんどの場合、複雑な境界条件となっているため、本方法で解析できる問題は少ない。また本方法は、本来 ”代表点（メッシュ・ポイント）” が支配する明確な ”領域” の概念を持っておらず、複雑な多相問題になると形状が簡単でも必ずしも実用的ではない。

4.2 有限要素法

複雑な境界条件に適した方法として有限要素法（特にガラーキン法）が良く用いられる。確かに構造解析や上述の熱伝導モデルなどには有限要素法は優れた方法である。しかし、有限要素法は物理的というよりも、むしろ数値的な方法であり、形状関数や重みの適切な選択に注意しないと不自然な解析誤差が生じる。例えば冷却開始直後に温度が上昇する（図4、P点）ような解が有限要素法で得られることがある⁽³⁾。これを潜熱の発生のため温度が上昇し

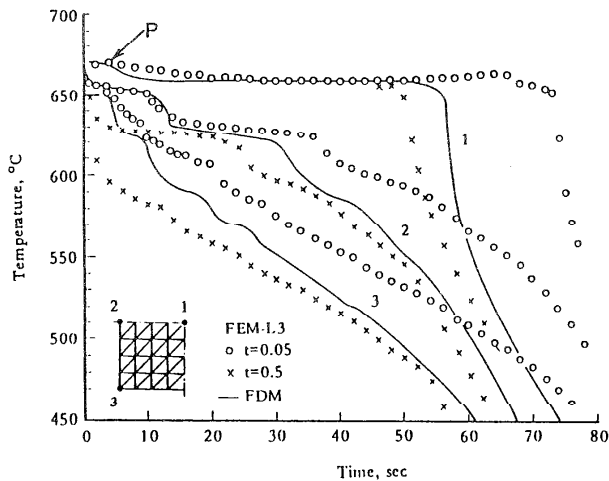


図4 比熱の線形分布を仮定した有限要素法による凝固解析例⁽³⁾。この場合P部で温度が上昇しているが、比熱の集中分布によりなくなる。

たと説明している研究者が居るが、過冷を考慮しない限り、潜熱が放出されても温度が上昇することはあり得ない。このような異常な解は比熱を要素内で線形あるいは2次分布させ、平均値を求めていることに起因するもので、比熱を節点に集中分布させることにより防ぐことができる⁽⁴⁾。このようなことは数学的に証明することは容易ではなく、要素における物理現象と数式の関係（微分方程式ではなく、離散化式が重要である）を物理的に検討することにより明らかにすることができる。

さらに複雑な多相問題となると単に微分方程式を微小要素に対し、積分するガラーキン法で、経済的なプログラムが開発できるかどうかは未だ明らかになっていない。従って、上記の3、2のガルシーモデル以上のモデルによる解析例は極めて少い。ただし、残留応力などの解析には今のところ、有限要素法以外の適切な方法がない。

4.3 境界要素法

境界要素法は定常問題に対しては極めて優れた方法であるが、凝固問題はほとんどが非定常問題であり、しかもガルシー流れモデル以上の複雑なモデルになると実用的でなくなる。ただし金型設計などに簡易的手法として利用するには便利である。

4.4 コントロールボリューム法

有限要素法が、微小有限要素に対し、微分方程式に重みをかけて積分するのに対し、この方法では重みをかけずに（あるいは重みを1として）積分する。つまり、無限小要素に対する保存則である微分方程式を積分することにより微小有限要素に対する保存則に変換している。

しかし、その積分は極めて近似的なものであり、むしろ形式的と言っても良いぐらいである。

しかし微小有限要素における保存則を解くという点では物理的なもので、比較的安心して使用することができ、プログラム化も容易であるので、流動解析にはよく利用され、汎用プログラムが開発されている⁽⁵⁾。

4.5 直接差分法

これは筆者が名付けた方法で、上記の微分方程式や積分形式による保存則を出発点とする方法ではなく、解析対象を微小有限要素に分割し（図5）、代表点（節点）と、節点により代表される領域（節点領域）を定義し、節点における物理変数で、節点領域における物理現象を”直接”、離散化式（差分式）で表現し、コンピュータで解くものである^{(6)・(7)}。従って近似的な積分を用いるコントロールボリューム法よりも、より安心して使用できる。また微分方程式が分からなくてもシミュレートできることになる。従って、数値解析法というよりも、よりコンピュータ・シミュレーションにふさわしい方法である。ただし、当然のことながら、適切な有限要素法やコントロールボリューム法で得られる離散化式は直接差分式で得られる式と一

致するはずであるから、究極的にはこれらは同じことになるはずであろう。

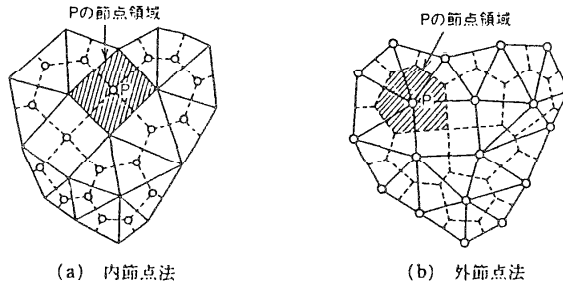


図 5 直接差分法における節点 (P) と節点領域

4. 6 界面追跡法あるいはラグランジュ法とオイラー法

上記のような数値解析法の分類の他に、固液界面位置を変数として解く、界面追跡法や固相領域の変化に応じて分割要素を変化させる、ラグランジュ法、固相分割要素を使用し、固相率分布を推定するオイラー法にも分類される。単純形状で、固液界面位置を精度良く求めたい場合には前2者が望ましいかも知れないが、一般的にはオイラー法が実用的と考えられている。

4. 7 潜熱の考慮と固相率と温度の関係

微小時間 Δt 間に固相界面が $\Delta \varepsilon$ 進行したとすると、放出される単位断面積当りの潜熱 $\rho \cdot \Delta H \cdot \Delta \varepsilon$ (ρ は密度、 ΔH は潜熱) と熱伝導等により除去される熱量のつり合いにより

$$\lambda_L \frac{\partial T_L}{\partial n} - \lambda_S \frac{\partial T_S}{\partial n} = \rho \Delta H \frac{\Delta \varepsilon}{\Delta t} \quad \text{————— (1)}$$

が成立する (λ は熱伝導率、 T は温度、 η は法線方向座標)。単結晶などではこの式の適用が可能であるが、図 1 のような場合には分割を極めて小さくしないと適用できない。

従って、分割要素内に固相が分布している時には、次の熱エネルギー保存則を使用する。

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla(\lambda \nabla T) + \rho \Delta H \frac{\partial f_s}{\partial t} \quad \text{————— (2)}$$

ここで、 f_s は固相率 (単位質量中に含まれる固相質量あるいは単位体積中に含まれる固相体積) である。従ってこの場合には、移動境界問題を未知変数 f_s を含む単なる初期値問題に変換されることになる。

未知変数 f_s を求めるには (2) 式 以外の情報が必要である。このため、固相率と温度の間には既知の関係

$$T = F(f_s) \quad \text{————— (3)}$$

の関係があると仮定する。この関数は実験的あるいは平衡状態では熱力学的に求められるも

ので、状態図が分っていれば、容易に求めることができる（より正確には溶質濃度と固相率、液相線温度と溶質濃度の関係から(3)式が求められる）⁽²⁾。

(2)式と(3)式を変形することにより実際には温度回復法、等価比熱法、エンタルピ法、仮想熱流法などが採用される。

5. シミュレーション例

(1) 溶湯時の熱移動解析

図6は砂型を鑄鋼溶湯がせき C-1, C-2, C-3 からキャビティ内に流入する時の、1.9s, 3.4s における等温度分布を示している⁽⁷⁾。流動はポテンシャル流れと仮定し、対流熱移動を考慮して内節点直接差分法で解いたものである（砂型内の温度分布は図では省略している）。せきの位置により温度分布も変化し、最終凝固位置（ひけ巣欠陥が発生しやすい）が変化することが分る。

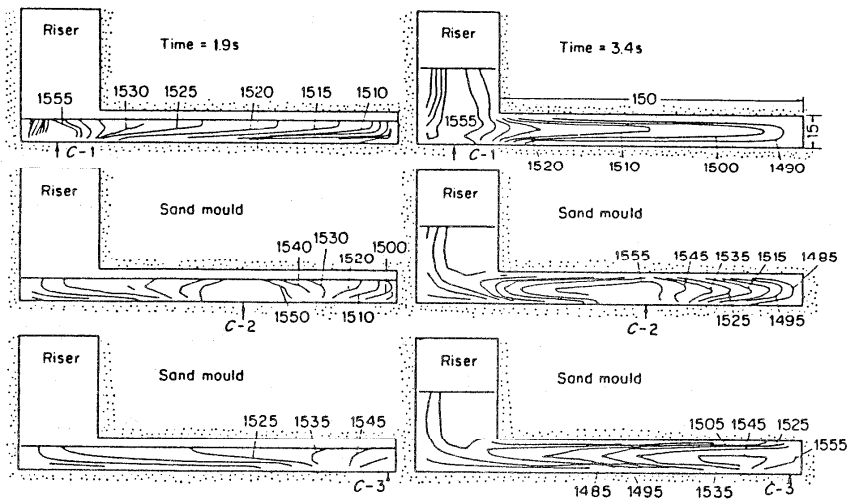


図6 注湯時の熱移動と凝固のシミュレーション例⁽⁷⁾
 (鑄鋼, 砂型, C-1, 2, 3はせきの場所, 等温線は℃)

(2) 押湯近傍の凝固の進行

図7は砂型鑄鋼品の押湯近傍での凝固解析を熱伝導モデルで3次元内節点直接差分法で行ったものである。ひけ巣発生位置の推定はこの場合、固相率 0.7の領域の進行情況から判断でき⁽²⁾、(b)に示すように押湯底部の形状を変更することにより、ひけ巣位置が製品部（鎖線で示す）にかからぬようにすることができた。

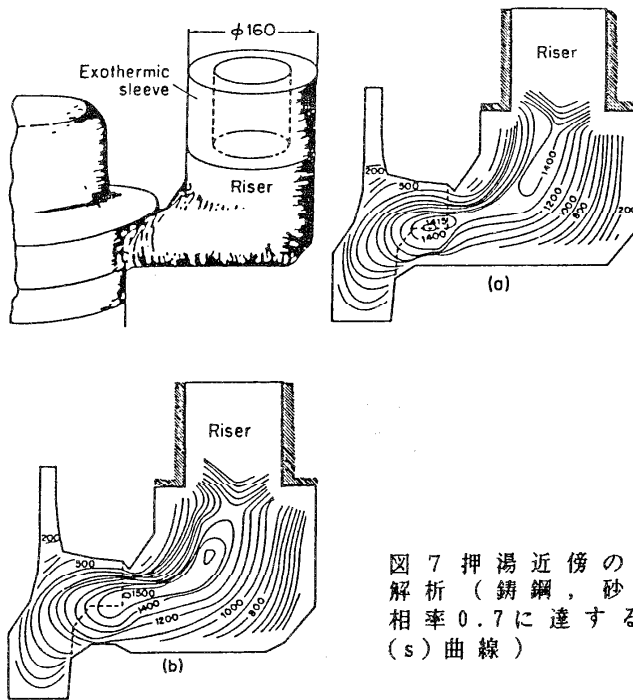


図7 押湯近傍の3次元解析（鑄鋼，砂型，固相率0.7に達する時間（s）曲線）

(3) 鑄鉄製クランクシャフトの解析例

図8は直接差分法を採用した実用的な凝固解析ソフトウェア⁽⁸⁾（（財）素形材センターで開発）”SOLAN”により、クランクシャフトの凝固解析を行ったものである⁽⁹⁾。実用的なソフトウェアでは複雑な形状をコンピュータに入力し、解析用のデータを作るプリプロセッサが極めて重要である。SOLANでは図8(a)に示すようにソリッドモデルにより鑄造品の形状を作り、立方体から差をとることにより（図形の集合演算）鑄型部を形成する。次に分割情報を与えて(b)に示すように直交分割する（解析システムでは、4面体要素や5面体要素なども使用できるが、今のところ簡単に分割できるということから直交分割を採用している。今後種々の分割方法を採用する予定）。このようにして得られたデータにより解析した結果の一例が(b)に示してある。

この解析は熱伝導モデルにもとづくものであるから、得られる直接的情報は温度と固相率の時間変化である。従って、ひげ巣などの鑄造欠陥を推定するには、これらから得られるパラメータと欠陥との関係を実験的に求めておき、そのパラメータにより推定する。よく利用されるパラメータとして温度勾配、固相率勾配がある⁽²⁾。図(b)には温度勾配が示してあり、温度勾配が $0\sim 0.1^{\circ}\text{C}/\text{mm}$ の場所にはひげ巣が発生する可能性がある。

この種の凝固解析システムは我国で、この他4種類ほど発売されており一部の鑄造工場では日常的に利用されている。

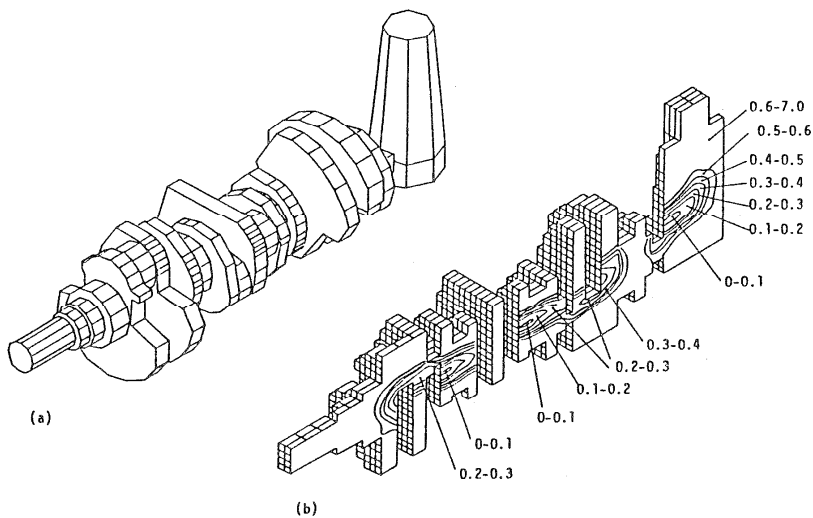


図8 凝固解析ソフトウェア“SOLAN”による
 鋳鉄製クランクシャフトの凝固解析例。(°)(a)は
 製品部の表示例、(b)は分割と固相率0.7における
 等温度勾配曲線(°C/mm)

(4) ひけ巣の定量的推定

ひけ巣は凝固収縮および過飽和ガスの放出により生じるものであるから上記のようなパラメータでは情報不足で、正確な定量的推定は困難である。図9,10はダルシーモデルにより、凝固収縮による圧力低下と、気泡の発生を考慮して解析した例である⁽¹⁰⁾。今のところ複雑な3次元解析への適用は計算コストの点から実用的でないが、ハードの進歩と共にこのような

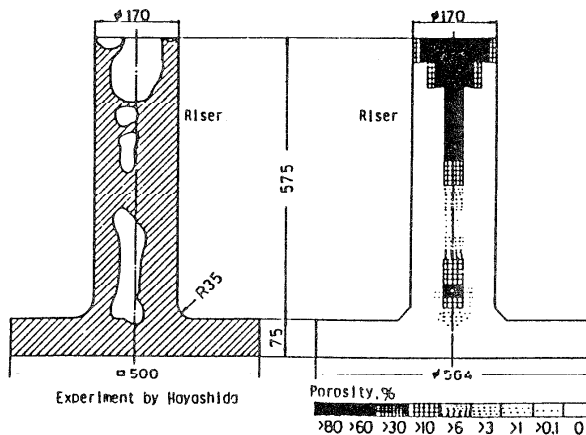


図9 砂型鋳鋼品に発生するひけ巣欠陥
 の定量的予測例(ダルシーモデル)⁽¹⁰⁾

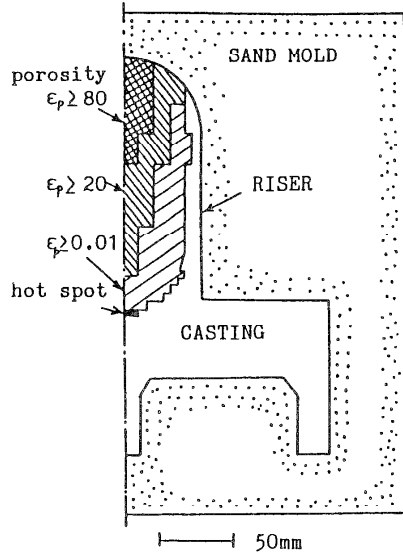


図10 砂型球状黒鉛鑄鉄に発生する
ひけ巣欠陥の予測 (ダルシーモデル)

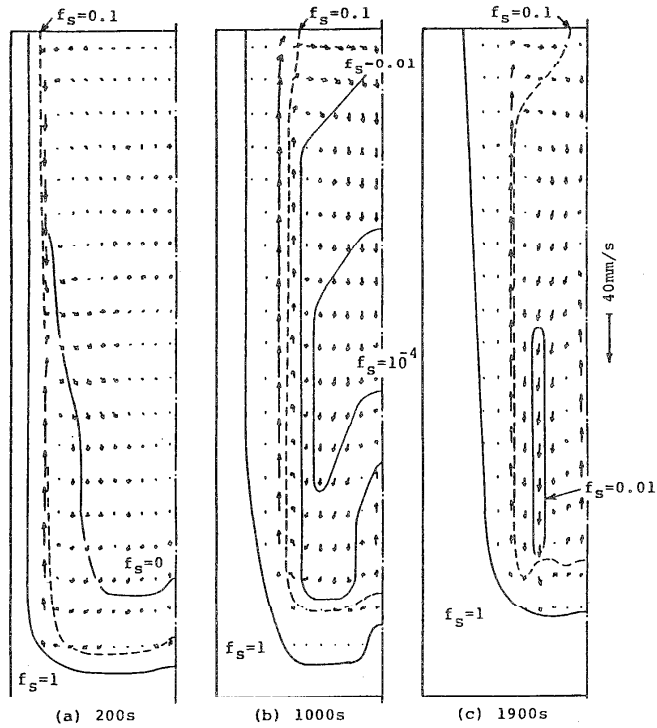


図11 大型鋼塊 (高さ1000mm, 巾500mm) の凝固
時に生じる流動 (ダルシー・層流モデル) (11)

解析が行われるようになるであろう。直接差分法ではこのような解析も容易である。

(5) 大型鋼塊の凝固解析

図11は大型鋼塊に生じる流動を考慮した凝固解析結果の一例⁽¹¹⁾である。これは、直接差分法、ダルシー・層流モデルによる解析で、固液共存域では主にダルシー流れ、液相域では層流を仮定している。

固液共存域における上向きの流れはマイクロ偏析による液相密度の減少によるものである。液相のこのような流動により、マクロ偏析や凝固組織が非常に変化をうけることが予想される。

(6) マクロ偏析の推定

図12～14は凝固収縮や自然対流による液相の流動と物質移動を解き、マクロ偏析を直接シミュレートした結果である⁽¹²⁾。実験結果とかなり一致した結果が得られている。このような解析では固液共存域は初期には極めて狭く、時間と共に増大し、最後にまた狭くなるので、固液共存域と完全液相域を分離して、境界条件を導入する方法で解析することは容易でない。

この解析では常にダルシー抵抗と粘性抵抗を考慮して（固相率によりその大きさは自動的に変化する）解いている。また、流速と圧力代表点は同一の節点に定義しているが、いわゆるZig-Zag問題は生じていない。

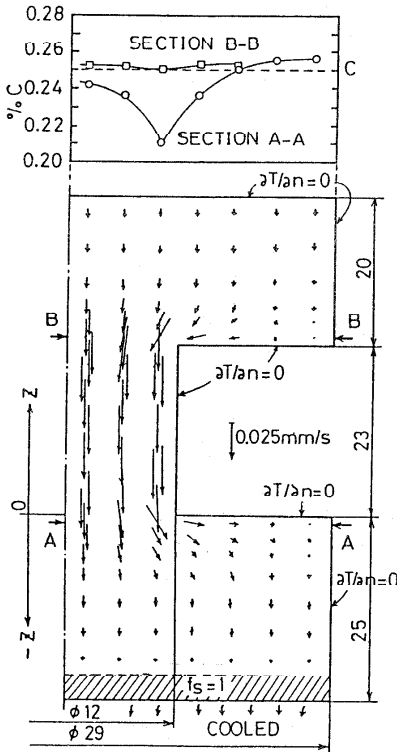


図12 段付炭素鋼（0.25% C）を下部から一方向凝固させた場合の凝固収縮流とAA, BB断面における凝固後のマクロ偏析⁽¹²⁾

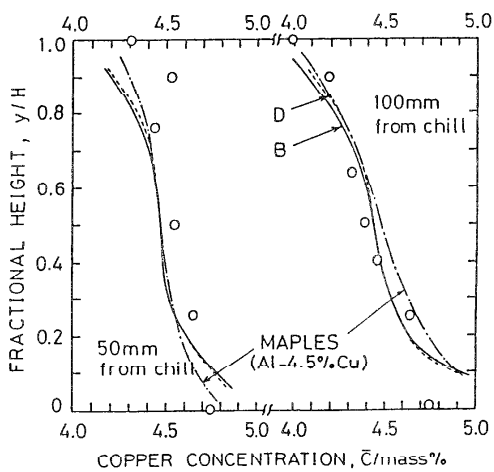
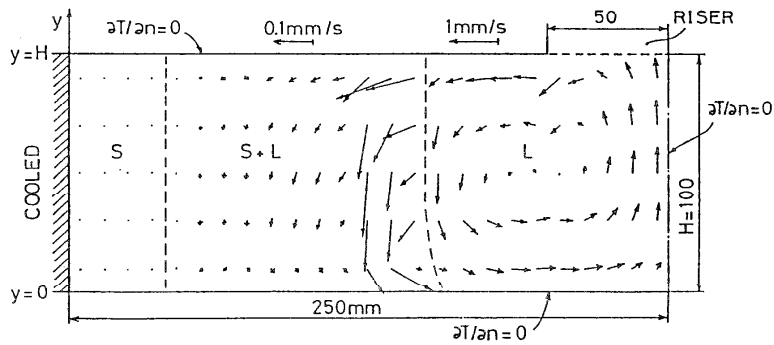


図13 (a) Al-4.4%Cu合金インゴットを水平一方向凝固させた場合の自然対流（冷却開始後400S），（b）発生したマクロ偏析の実測値（○印）とシミュレーションの比較

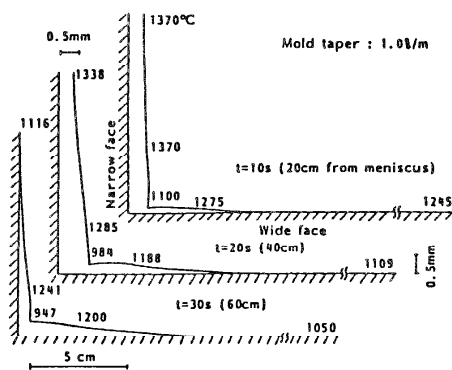


図14 鋼の連続鋳造におけるモールド内の凝固シェルの変形(13)

(7) 鑄造応力と変形の解析

図14は連続鑄造における水冷銅モールド内での鋼の凝固と、凝固シェルの変形を熱伝導モデルによる凝固解析と有限要素法による弾塑性解析を組み合わせで行った一例である⁽¹³⁾。凝固シェルが下降する(時間が経過する)に従ってコーナー部にギャップ(空隙)が生じることが分る。このギャップにより凝固シェルと鑄型内の熱移動量が変化し、凝固シェルの厚さも変化する。また、凝固シェルに発生するき裂などの予測もある程度可能である。

6. あとがき

以上、凝固プロセス、特に鑄造におけるコンピュータ・シミュレーションの現状(筆者の研究が主になってしまったが)について述べた。単に境界条件を与え、熱伝導方程式を解く種の問題はほとんど解決してしまっており、現象のより深い理解と適切かつ実用的なシミュレーション技術の開発が要求されている。また、高温融体や鑄型の熱物性値、鑄型-溶湯間の伝熱係数、固液共存域における透過率といったデータが要求されている。しかし、これらは単なる物性値ではなく、(例えば砂型では水分の蒸発、移動も関係する)、正確で一般的な値を求めることは容易ではない。いずれにしても、現象をより深く認識することが重要で、単なる伝熱工学的な知識のみでは役に立つ研究は困難であろう。

文 献

- (1) 例えば B.Chalmers : Principles of Solidification, John Wiley and Sons, (1964)
M.C.Flemings : Solidification Processing, McGraw-Hill (1974)
などを参照されたい。
- (2) 大中 逸雄 : コンピュータ伝熱・凝固解析入門、丸善 (1985)
- (3) I.Ohnaka and T.Fukusako : Tech. Rep. Osaka Univ. 24 (1974) 1200, p.461
- (4) I.Ohnaka and T.Fukusako : Sixth Int. Heat Transfer Conf. 3 (1978), p.251
- (5) S.V.Patankar : Numerical Heat Transfer and Fluid Flow, McGraw-Hill (1980)
- (6) 大中 逸雄 : 鉄と鋼, 65 (1979), p.1737
- (7) 長坂 悦敬, 大中 逸雄, 福迫 達一 : 鋳物, 56 (1984), p.22
- (8) 大中 逸雄 : 素形材 (1987) 3, 掲載予定
- (9) 大塚 幸雄, 小野 高興, 坪井 晋悟, 水野 邦明 : 同上
- (10) 大中 逸雄, 森 康尋, 長坂 悦敬, 福迫 達一 : 鋳物, 53 (1981), p.673
- (11) I.Ohnaka and K.Kobayashi : Trans. JISI, 26 (1986), p.781
- (12) 大中 逸雄, 松本 雅充 : 鉄と鋼 投稿中
- (13) 大中 逸雄, 八島 幸雄 : 連続鋳造における力学的挙動, 日本鉄鋼協会 (1985.4), p.105

1. はじめに

近年、コンピュータの性能の飛躍的向上と相まって、数値解析あるいは数値シミュレーションの手法が、基礎的現象の解明および各種機器の設計に積極的に用いられるようになってきている。

表1に、数値解析あるいは、数値シミュレーションが必要とされる問題の例を示す。

表1 数値解析(シミュレーション)または、理論解析が必要とされる問題例

問 題	内 容 お よ び 例
(I) 非線形問題	解析的に解けない問題
(II) 極限状態における問題	<ul style="list-style-type: none"> ・高温、高圧、高真空、無重力、過重力、高磁場、超臨界 ・極低温、地球深部、他天体などの状態または場所 ・爆発、可燃性、危険性を伴う現象 ・測定手段がない現象(例えば、液体水銀中の気泡の挙動)
(III) 空間スケールの大きい問題	<ul style="list-style-type: none"> ・気象予測、ヒートアイランド、海洋大循環 ・超高層ビルの耐震解析 ・森林および都市火災 ・地下石油備蓄タンクまわりの熱伝導解析、耐震解析など
(IV) 時間スケールの大きい問題	<ul style="list-style-type: none"> ・ソーラシステムなどのシミュレーション ・年単位の大気大循環 ・放射性廃棄物の長期保管のシミュレーション ・土壌温度分布の季節変化

数値解析あるいはシミュレーションを必要とするケースは一般の非線形問題のほか、危険性を伴うため人間が近づけない状態や、地球深部および他天体のように容易に人間が到達できない場所、あるいは、測定する方法がない現象などを含むケースである。地球外の惑星の探査や、海底資源探査、超臨界状態の各現象の応用など人間活動の範囲が拡大するにつれ、将来、ますますこのような場合の数値シミュレーションの必要が生じてくるに違いない。

数値解析が重要となる他の問題としては、空間および時間のスケールが大きい問題があげられる。すなわち、現象が年単位(1年を周期とすることが多いが、中には10年以上におよぶこともある)の長期間を要するため実験が極めて困難である場合、および空間ス

ケールが大きく観測や実験設備などのため莫大な費用を要する場合である。

本稿では、複雑な伝熱過程を含む問題の1例として、球カプセル潜熱蓄熱システムのシミュレーションについて述べる。

エネルギー貯蔵は、近年、エネルギーの高効率利用の上から不可欠の要素となっており我が国でも今後、ますます普及が図られるとみられる。

この問題は、球カプセル内の相変化とその周囲の熱媒体による熱伝達が重畳する非定常問題であり現象はかなり複雑である。またシミュレーション解析も多少困難となる。しかし、このシステムの最適設計を実験的に行おうとすると、集熱系（例えばコレクター管）などのほか、球カプセルの直径、材質および肉厚、相変化物質（PCM）の種類、熱媒体の流速、配管系の熱損失、蓄熱槽寸法（アスペクト比）などを逐一変化させる必要があり、時間および費用の点で実現が困難である。まず、エネルギー貯蔵の必要性をのべ、次に潜熱蓄熱システムのシミュレーション手法について述べる。

2. エネルギー貯蔵はなぜ必要か

エネルギーの貯蔵には大きく別けて次の3つが考えられる⁶⁹⁾。すなわち、

- (i) 熱貯蔵
- (ii) 電力貯蔵
- (iii) 一次または二次エネルギー貯蔵

である。(iii)は、石油や石炭、LNGなどの一次エネルギーあるいは、水素や濃縮ウランなどの二次エネルギーの形で貯える、いわゆる備蓄にあたる。

この貯蔵法をエネルギーの形 (form of energy) から分類すると表2のようになる。

表 2 エネルギー貯蔵法の分類⁶⁹⁾

貯蔵エネルギーの形態		貯蔵技術例
熱の形のエネルギー	顕熱 潜熱（融解、蒸発）	顕熱蓄熱（水、岩石） 潜熱蓄熱（氷）
力学的エネルギー	運動エネルギー（回転など） 位置エネルギー 弾性エネルギー 圧力エネルギー	フライホイール 揚水発電 ばね 空気蓄圧
電磁気エネルギー	電気エネルギー 磁気エネルギー	コンデンサ 超電導コイル
化学エネルギー	電気化学エネルギー 化学エネルギー 水素エネルギー	バッテリー 合成燃料、化学蓄熱 金属水素化合物

一般に、エネルギー貯蔵は次に掲げる目的から必要とされる。いずれも、需要と供給の時間的整合性を図るのが狙いである。

(i) 高密度化 例えば、自然エネルギー利用の場合が、これにあてはまる。太陽エネルギー密度は水平面平均で、せいぜい 1 kW/m^2 程度の希薄エネルギーであり、その実際利用に際しては、貯蔵して高密度化する必要がある。この点は、あとで述べる (iii) の高効率化による設備容量削減にもつながる。また、これは、エネルギー発生の変動（例えば、太陽エネルギーの間欠性）に対応する貯蔵とも言える。

(ii) 平準化 例えば、電力需要の1日の需要変化をみると、日中の最大需要時と夜の最小需要時の負荷比は、2.0～2.4となっており*、その変動はかなり大きい。もし、この需要の大きい部分についてエネルギー貯蔵技術が適用できれば、発電設備の削減が図れる訳である。

また、深夜電力を用いた蓄冷システムを用いれば工場やスーパーマーケット、ホテルなど冷房用電力の低減が図れ、定格容量低減も兼ねた大幅なコストダウンが可能である。

(iii) 高効率化 エネルギーを貯蔵することにより冷暖房などの設備の大きさが小さくなったり、定格容量が小さくなることもある。居住空間の狭いわが国にあっては、空間の効率的利用は重要であり、この意味でもエネルギー貯蔵技術は有効である。

次に、蓄熱技術を大別すると、(i) 顕熱型、(ii) 潜熱型、(iii) 化学型、(iv) 濃度差型、(v) 光化学型に分類できる。その特徴を表3に示した。

このうち、一般によく用いられるのは、温度差を利用する(i)の顕熱型で、例えば、まほう瓶や水を用いた給湯用蓄熱タンクがその代表例である。簡便ではあるが貯蔵密度が比較的 low 将来の本格的貯蔵法は、(ii)～(v)の方式となるものとみられる。

表 3 蓄熱方式の分類

蓄熱方式	例
1. 顕熱型	水、岩石、コンクリートなどの温度差利用
2. 潜熱型	塩水和物、パラフィン、有機化合物などの相転移も含む
3. 化学型	$\text{Ca(OH)}_2 \rightleftharpoons \text{CaO} + \text{H}_2\text{O}$ などの可逆的の反応利用
4. 濃度差型	硫酸溶液の濃縮と希釈など
5. 光化学型	アンソラセンの光二量化

* 例えば、東京電力の1978.7.25の負荷比は2.4となっている⁶⁹⁾。

3. 潜熱蓄熱

潜熱 (latent heat) とは、たとえば、水の融解や水の凍結のように、固体が液体に変わったり、液体が固体に変わったりする (これを相変化; phase change という) ときに吸収されたり放出されたりする熱のことで、1761年、ブラック* (Joseph Black, 1728 ~ 1799) によって発見された。勿論、固体-液体変化のみならず液体-気体 (蒸発・凝縮, evaporation and condensation), 固体-気体 (昇華, sublimation) の相変化の時にも潜熱が介在する。

潜熱の蓄熱・蓄冷への利用は、いま始まったことではなく、すでに、我々の日常生活において、たとえば氷まくら、オンザロック、清涼飲料水用の氷などとしてよく用いられてきた。最近では、アイスボックス用のフリーズバック、凍結食品運搬用のPCMカプセル、アイスクリーム製造器、冷めないコーヒーカップ⁷⁰⁾ およびとっくり⁷⁰⁾ などに応用されている。

潜熱蓄熱・蓄冷は、このような相変化 (あるいは相転移) 時に放出・吸収される大きな潜熱に着目するもので各種形状の容器またはカプセルにPCMを封入して、何らかの熱交換デバイスを介してエネルギーの授受を行わせるものである。

3. 1 これまでの研究と問題点

潜熱蓄熱の研究は、Maria Telkes女史をこうしとし、約40年近くの歴史がある³²⁾⁻⁴⁴⁾。

その間、デラウェア大学のソーラーハウス“SOLAR ONE”などに実際に組み込まれた例はあるが、いまだに、本格的な実用化の道は開かれていない。

わが国においては、理論および実験の両面に亘る本格的な基礎研究が、主に、東京工業大学⁴⁶⁾⁻⁵⁹⁾、および東北大学¹⁾⁻³¹⁾において行われ、PCM探索を含む実用化に向けた研究が、名古屋工業試験所⁶⁰⁾⁻⁶⁴⁾、電子総合研究所⁷¹⁾⁻⁷⁶⁾、および日立製作所⁶⁵⁾⁻⁶⁸⁾などにおいておこなわれている。

また、発展途上にあるため断片的な経過報告の形となっているが、解説・総説・展望が、齋藤¹⁰⁾⁽¹²⁾⁽¹⁵⁾、小坂・植西⁷⁷⁾、伊藤・三浦⁷⁸⁾、小坂⁷⁹⁾、小沢・阿部⁸⁰⁾⁽⁸¹⁾、によって報告されている。

潜熱蓄熱をテーマとしたテキストは、未だ刊行されていないが、テキストの一部としては、Telkes⁴³⁾、Garg et al.⁸³⁾ およびViskanta⁸⁹⁾⁽⁹⁰⁾により著されている。

*イギリスの科学者。潜熱、熱容量およびCO₂を発見した。

Telkes 女史ほかの40年近くの研究に拘らず、これまで本格的実用化に至っていない最大の要因は、適当な相変化物質が得られなかったことと、熱を出し入れするサイドのデバイスの開発がおくれたことによる¹⁶⁾。

この他の問題点としては、次の諸点が挙げられる。

- (i) PCMのコストが一般的に高い。
- (ii) 用途に合う条件（適当な融点をもつこと、単位体積あたりの潜熱が大きいこと、熱容量が大きいことなど）を具備するPCMがいられにくいこと。
- (iii) PCMによっては、過冷却、相分離および反復使用による劣化がおこる。
- (iv) カプセルなどの容器あるいは、シェルアンドチューブ型など熱交換器に似た特殊構造が必要である。
- (v) 一般的に固相の熱伝導率が小さく、蓄・放熱速度が小さい。

このうち、(i)のコストの問題は、近年の、とくに大都市における地価の急激な上昇や設備の効率化、高密度化へのニーズの高まりと共に次第に解消されつつある。また、(iv)および(v)についても最近の高性能熱交換デバイスの改善などにより解決のメドがつついた。

したがって、残る問題は、(ii)および(iii)の、いずれもPCMそのものに係わる問題である。

潜熱の大きさからいうと、無機水和塩がPCMの有力候補であるが(表4参照)、これらは多かれ少なかれ過冷却(supercooling)という致命的な欠点を有する。

表 4 潜熱蓄熱物質と特徴

物 質	例	特 徴						総合 評価
		潜熱	熱容量	過冷却	相分離	コスト	体積 変化	
無機水和物	$\text{Na}_2\text{HPO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$, $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$, $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	○	○	×	×	○	△	○
パラフィン系	n-Octadecane	×	×	○	○	×	○	○
有機化合物	PEG #4000	×	×	○	○	△	○	○
包接形化合物	$\text{C}_4\text{H}_8\text{O} \cdot 17\text{H}_2\text{O}$	△	△	×	×	△	△	○
高分子	高密度ポリエチレン(HDPE)	×	×	○	○	×	○	○
水	H_2O (主に蓄冷)	○	○	×	○	○	×	○

たとえば、リン酸水素2ナトリウムは、融点は36℃であるが、凝固実験の結果は、過冷却度が13℃以上に達することを示している。

硫酸ソーダ(芒硝, $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$) に対しては、Telkesは、Borax (ほう砂, $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$) という核発生剤(nucleator)を用いて過冷却を緩和できるとしているが、このよう

な核発生剤が発見できるケースは、極まれであって一般的にはほとんど望めない。

したがって、実用的な潜熱蓄熱システムの開発には、上記とくに、(iii)の問題を考慮することが重要である。

代表的なPCMの特性⁸⁴⁾ (融点範囲-40~120℃)を図1に示す。なお、主なPCMのリストについては、文献⁸⁴⁾を参照されたい。

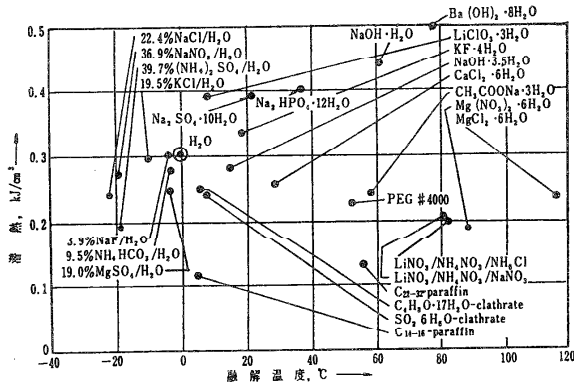


図 1 代表的な PCM の特性⁸³⁾

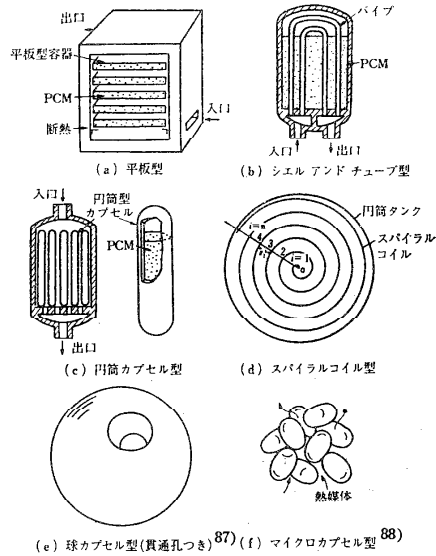


図 2 潜熱蓄熱方式のいろいろ

次に潜熱蓄熱の各方式の概略を図2に示す。

3・2 潜熱型と顕熱型蓄熱の性能比較

潜熱蓄熱(冷)の有効性を端的に示す目的で表5に、蓄熱と蓄冷の兩者について、蓄熱

槽容量を一定とした場合の性能比較を示す。

表 5 潜熱蓄熱と顕熱蓄熱との性能比較

蓄熱条件	蓄熱容量 0.5 m ³ 充填率 0.75			
	蓄冷		蓄熱	
PCM	H ₂ O		Na ₂ HPO ₄ ·12 H ₂ O	
温度スウィング (K)	5		40	
蓄熱方式	顕熱	球カプセル 潜熱	顕熱	球カプセル 潜熱
蓄熱重 (kJ) 比	10,400 1	12,140 11.6	84,000 1	209,500 2.5

PCMとして、Na₂HPO₄·12 H₂O を用いてある。この比較から潜熱型方式は、とくに蓄冷の場合に顕著な効果（顕熱型に比し10倍以上）があることが知れる。これに対し、蓄熱の場合は、せいぜい2.5倍にとどまり蓄冷のケースと比べるとその効果は小さい。これは、温度スウィングが40℃と大きいことに起因している。このことは、潜熱蓄熱の将来の適用範囲を示唆するものであって、一定温度熱源や温度振幅の小さいエネルギーシステム^{*}への応用が望まれる訳である。

以上から、当面は、まず、蓄冷サイドから実用化が図られるとみられる。

4. 球カプセル型潜熱蓄熱システムのシミュレーション

高熱交換効率と取り扱いの容易さから、近年、球カプセルを用いた潜熱システムが提案されている。

図3に示す球カプセル型潜熱蓄熱方式には次のような利点がある。

- (i) 伝熱特性に優れ、放熱時間を大幅に短縮できる。
- (ii) 球体形状であるため蓄熱槽形状を問わない。
- (iii) 蓄熱槽内流体の自然対流を抑制できる。また、蓄熱槽壁付近のPCMが速く凝固するため熱損失が小さい。
- (iv) 融点の異なるPCMを槽の重力方向に適当に分布配置することにより熱交換効率の高い蓄熱が可能である。

4・1 基礎方程式

カプセル型潜熱蓄熱のこれまでの研究によって、凝固過程が蓄熱槽性能を決定すること

^{*}例えば、スターリングエンジンの熱源とか、低温集熱が望まれるソーラーシステムなど。

が、すでに知られているので凝固過程に焦点をあてることにより球カプセル蓄熱ユニットの性能シミュレーションを行う。

図4にはシミュレーションのモデルおよび座標系を示した。座標系は、流れ方向を z とし球カプセルについては中心を原点とし半径方向を r とした。

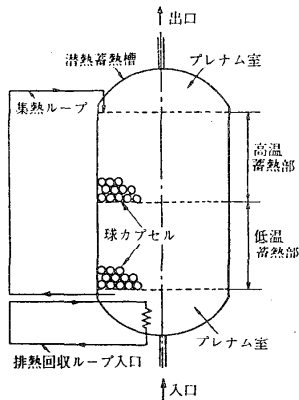


図3 球カプセル型潜熱蓄熱ユニット

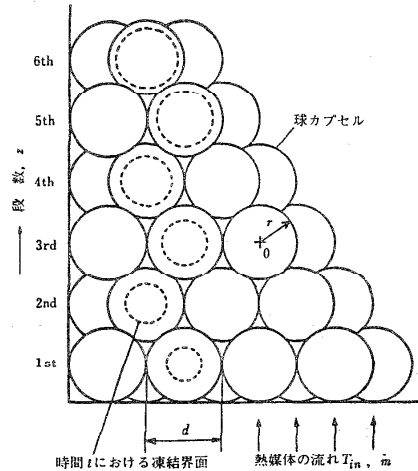


図4 球カプセル蓄熱ベッドのシミュレーションモデル図および座標系

図4に示すように、初期温度が融点の蓄熱槽に温度 T_{in} の熱媒体（ここでは水）が、流量 \dot{m} で流入する。

解析を進めるにあたり、以下の仮定を導入する。

- (i) 球カプセル内の熱移動は準定常である。
- (ii) 相変化は、潜熱集中型である。
- (iii) 液相の初期温度は一律で融点とする。
- (iv) 相変化による体積変化は考えない。
- (v) 温度場は点対称である。

相変化を伴わない場合のペブルベッドについての解析は、すでにSchumann⁶⁵⁾によってなされている。

本解析では各々の球カプセルにおいて凝固が進行するとし潜熱発生を考慮する。

球カプセル蓄熱槽内に単位体積の微小要素をとり、槽内の温度は同じ段では一律であり、 z 軸方向のみ温度分布が存在し、流速 u で水が流入するとする。

解析にあたり次の無次元化を行う。

$$\left. \begin{aligned} T^* &= \frac{T}{|T_{in} - T_f|}, \quad u^* = \frac{R_c}{a_f} u, \\ t^* &= \frac{a_f}{R_c^2} t, \quad R^* = \frac{R}{R_c}, \quad z^* = \frac{z}{R_c} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

球カプセルまわりの熱媒体のエネルギー保存則は次のようになる。

$$(1-\alpha) \frac{\partial T^*}{\partial t^*} + u^* \frac{\partial T^*}{\partial z^*} = \frac{\partial^2 T^*}{\partial z^{*2}} + q^*(z^*) \quad (2)$$

ここに、 $q^*(z^*)$ は、PCMを封入した球カプセルによる単位体積あたりの発熱速度を表し、凝固の際の界面の移動量から以下のように与えられる。

$$q^*(z^*) = \Gamma \frac{k_s}{k_f} \frac{\frac{T_f}{dT} - T^*}{\frac{1}{R^*} - 1 + \beta} \quad (3)$$

ここに、 Γ は単位体積あたりの球カプセル個数により定まる係数であり、直径および配列により定まる。

積層球殻の総コンダクタンス U は、次式で与えられる。

$$\frac{1}{U} = \frac{1}{R} \frac{1}{4\pi k_s} + \frac{1}{R_c} \frac{1}{4\pi k_c} + \frac{1}{R_o} \frac{1}{4\pi R_o^2 h} \quad (4)$$

ここで、 h は充てん球群の熱伝達率を示し、Ranz⁸⁶⁾の式により定める。球の周りのみかけの流速は、空塔速度の9倍の値を採用した。なお、Ranzの式の適用範囲は、 $1 < Pr^{2/3} Re < 10^4$ である。式(4)を用いれば、球カプセル固相の温度分布が次の式で表される。

$$\frac{T_s - T_f}{T - T_f} = \frac{\frac{1}{R} - \frac{1}{r}}{\frac{1}{R} - \frac{1}{R_c} + \left(\frac{1}{R_c} - \frac{1}{R_o}\right) \frac{k_s}{k_f} + \frac{k_s}{hR_o^2}} \quad (5)$$

凝固界面における熱バランスの式

$$-4\pi R^2 k_s \left. \frac{dT_s}{dr} \right|_{r=R} = -4\pi R^2 \rho_s L \frac{dR}{dt} \quad (6)$$

と式(5)から、次の無次元界面位置 R^* を求める式がえられる。

$$(R^*)^2 + \frac{2}{3}(\beta-1)(R^*)^3 = 2 \frac{a_s}{a_f} Ste \int_0^{t^*} \left(\frac{T_f}{dT} - T^* \right) dt + \frac{1}{3}(2\beta+1) \quad (7)$$

ここに、 Ste はStefan数を示し、以下のように定義する。

$$Ste = \frac{C_{p,s} \Delta T}{L}, \quad \Delta T = |T_{in} - T_f| \quad (8)$$

また、 β は球カプセルの熱伝導および球カプセルと周囲流体との熱伝達の寄与を表し、次式で与える。

$$\beta = R_c \left[\left(\frac{1}{R_c} - \frac{1}{R_0} \right) \frac{k_s}{k_c} + \frac{k_s}{h R_0^2} \right] \quad (9)$$

初期条件および境界条件は次のように与える。

$$t^* = 0 : T^* = \frac{T_f}{\Delta T} \quad (10)$$

$$\left. \begin{aligned} z^* = 0 : T^* &= \frac{T_{in}}{\Delta T} \\ z^* = \frac{H}{R_c} : \frac{\partial T^*}{\partial z^*} \Big|_+ &= \frac{\partial T^*}{\partial z^*} \Big|_- \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

4.2 シミュレーション手順

上記の基礎式の式(2)、(3)、(7)を式(10)、(11)の条件のもとに連立させて差分法を用いて数値シミュレーションを行う。これにより周囲流体および球カプセル内部の温度が求められる。0.3 m²タイプの蓄熱槽の場合、z方向の分割数を10、タイムステップを 1.66×10^{-4} としたとき、蓄熱槽内の温度が流入温度と等しくなるまでの計算時間(CPU)は10秒程度(東北大学NEAC2200ACOS1000)であった。

このシミュレーションでは、完全凝固後の球カプセルの有する顕熱量を加味するため発熱速度 $q^+(z^*)$ を近似的に次式で仮定した。

$$q^+(z^*) = q^+(z^*)|_{t^* = t_0^*} \exp(-A\tau^*) \quad (12)$$

$$A = \frac{d \ln(q^+(z^*))}{d\tau^*} \Big|_{t^* = t_0^*} \quad (13)$$

上式中、 t_0^* は無次元界面位置 R^* が0.05に到達した時刻であり、 t^* は時刻 t_0^* からの時間を表す。

PCMを変えてシミュレーションを行う場合は上式中の物性値、 a_s 、 k_s および Ste を入れ替えることにより、また、温度差を変えるときには、同じく ΔT を変化させることにより計算すればよい。

4.3 シミュレーション結果

以下に実用的な球カプセル型潜熱蓄熱槽について、種々のパラメータを変えた場合のシ

ミュレーション結果を示す。

用いたPCMは、ポリエチレングリコール#600(PEG #600)、りん酸水素2ナトリウム ($\text{Na}_2\text{HPO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$) および硝酸マグネシウム [$\text{Mg}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$] である。主な物性値は、表6に示す。

図5には、PEG #600 の場合の球カプセル直径 d を変化させた場合の流出水温の時間変化を示す。これから d が小さくなると初期の一定温度範囲が拡大すること、および流出水温の変化が急激になりステップ変化に近づいたことがわかる。また、この蓄熱槽では d を適当に選ぶことにより蓄熱槽として要求される性能に応じて、その応答性を設定することが可能である。

表 6 PCM の主な物性値

物性値	記号	単位	相	PEG #600	$\text{Na}_2\text{HPO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$	$\text{Mg}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$
融点	T_f	K		291-295	309	362
融解潜熱	L	kJ/kg		146	263	124
熱伝導率	k	W/mK	固体	—	1.59	1.63
			液体	0.16	1.00	—
比熱	c_p	kJ/kgK	固体	2.26	1.63	1.99
			液体	—	1.93	3.27
密度	ρ	kg/m ³	固体	—	1,520	1,640
			液体	1,100	1,450	1,530

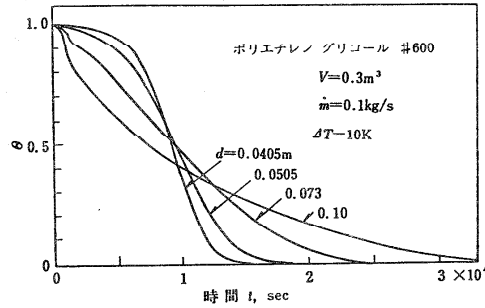


図 5 流出温度の時間変化に対する球カプセル直径の影響

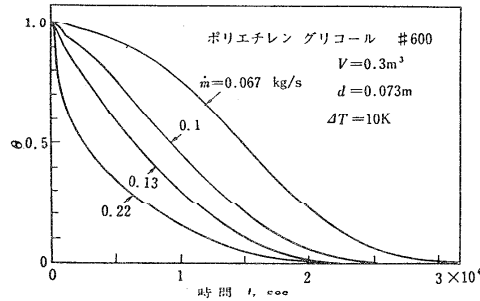


図 6 流出水温の時間変化に対する流量の影響

図6には、図5と同じ条件でパラメータとして流量を変えたときの温度応答を示す。

次に、図7には、前と同一条件のもと球カプセル材料による違いをみたもので、高密度ポリエチレンなどのプラスチック材料も十分使用できることを示している。

なお、計算に用いた球カプセルは外径0.073 m、肉厚0.0015mのものである。

図8には、PCMを変えたときの特性を示した。このときの球カプセル材料はステンレスである。結果の整理のために融点を流入温度との差を等しくするよう流入水温を定めた。

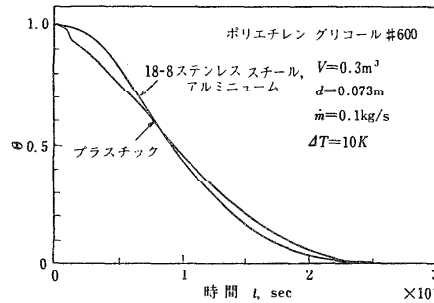


図 7 流出温度の時間変化に対する球カプセル材質の影響

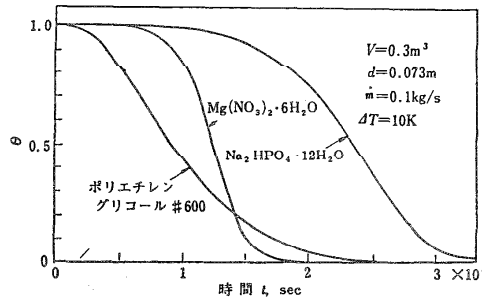


図 8 流出温度の時間変化に対する PCM の影響

図9には、放熱過程の蓄熱槽内の温度分布の時間変化を示した。初期温度が融点の槽内温度分布が徐々に平坦になり全体が流入水温 T_{in} に近づき放熱過程が終了する様子が明確にわかる。

次に、図10に、融解過程のシミュレーション結果を示す。PCMは、 $\text{Na}_2\text{HPO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ である。同図には、実験結果も併せて示してある。

この解析では融解面の移動は熱伝導のみで支配されていると仮定し、内部の対流は考えていない。しかし、この図からわかるように実験とシミュレーション結果はよく一致している。これは容器が球であるため熱伝導が支配的である内壁面近傍での融解量が大きいいた

めである²⁰⁾

この点は、他の形状、たとえば円筒や平板の場合と対照的である。

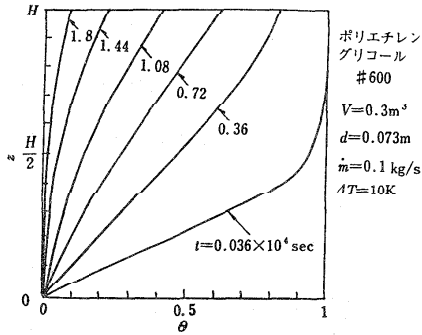


図 9 蓄熱槽内の温度分布の時間変化

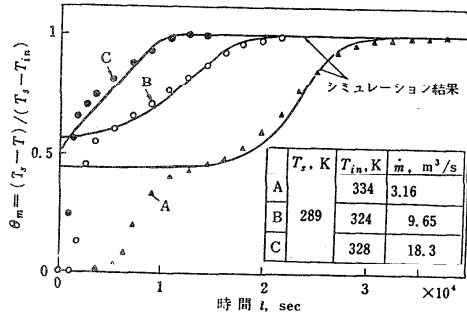


図 10 流出水温の時間変化 (融解過程)

5. 潜熱蓄熱/ヒートポンプシステム

前節で述べた潜熱蓄熱の実用化を阻む欠点を克服するため、筆者らが提案している潜熱蓄熱/ヒートポンプシステムについて簡単に紹介しておく。本格的な潜熱蓄熱の実用化は、恐らく、このような形でしか実現しないものとする。

提案したシステムは次の特長を有する。

- (i) PCMの過冷却の問題を解決できる。
- (ii) PCMの選択の幅を拡大できる(融点の許容範囲が広がる)。
- (iii)たとえば、ソーラーシステムとして組み込んだ場合、そのまま夏の冷房に使える。

また集熱効率が高い。

- (iv) 定温度熱源であるためヒートポンプの成績係数(COP)が大きい。

球カプセル型潜熱蓄熱ヒートポンプシステムの構成図(ソーラーシステムとして組み込んだ例)を図11に示す。本システムは、集熱系(ソーラーコレクタ、排熱、深夜電力などを熱源)、暖房・給湯系、およびヒートポンプ系からなる。蓄熱タンクの詳細を図12に示す。

このシステムは、蓄熱タンクの温度レベルにより3つの稼働モードを有する。すなわち、

- (1) 直接暖房、冷房モード(ヒートポンプなし)
- (2) 間接暖房、給湯モード(ヒートポンプバックアップ)
- (3) 冷房モード

である。これら(1)~(3)のモードを図11中、それぞれ \Rightarrow 、 \rightarrow および \dashrightarrow の

3つの矢印で示す。

PCMの過冷却が関与するのは、このうちの(2)のモードで、のちの図14に示すように、過冷却が存在するため、あたかも融点が低下した場合と同様の結果を示す。

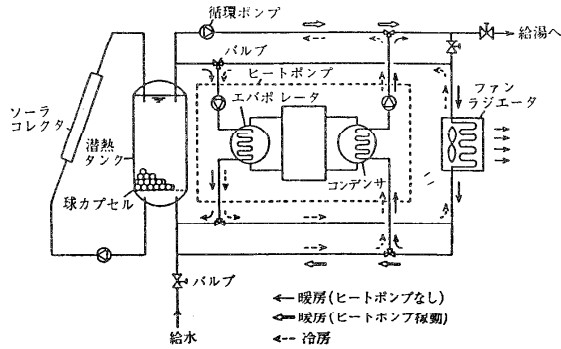


図 11 潜熱蓄熱ヒートポンプシステムの稼働説明図

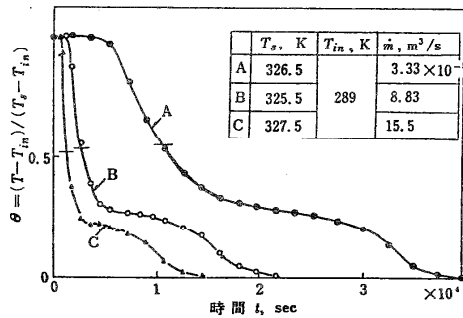


図 13 流出水温の時間変化(凝固過程)

図13には、流入水温一定の場合の凝固(放熱)において流量をパラメータとして変化させたときの槽出口温度の時間変化を示した。図中の横線はPCMの融点を表している。潜熱発生のため途中からフラットな部分が見れる。

図14には、凝固時の球カプセル中心温度の変化を示す。図中の曲線の番号は熱電対の位置および段数に対応している。図から最大12K程度過冷却することがわかる。

図15に、ヒートポンプの成績係数(COP)とエバポレータ入口温度の時間変化を示した。実験開始直後は、コンデンサなどの熱容量によりCOP*は低く抑えられるため初期にピークが見れる。COPは、4.1~4.2と高い水準が維持される。

*実消費電力に対するコンデンサまたはエバポレータでえられる熱量の比。

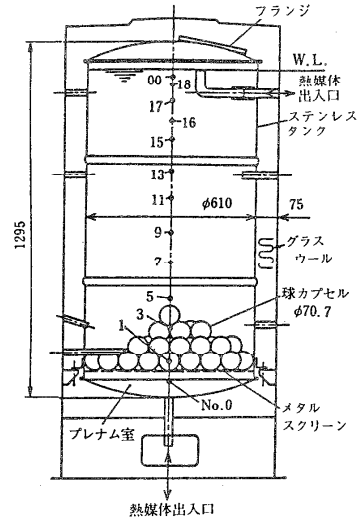


図 12 球カプセル蓄熱槽詳細

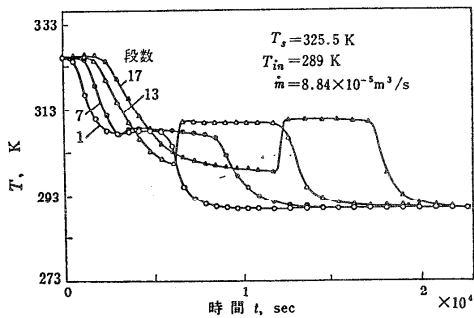


図 14 球カプセル中心温度の時間変化(凝固過程)

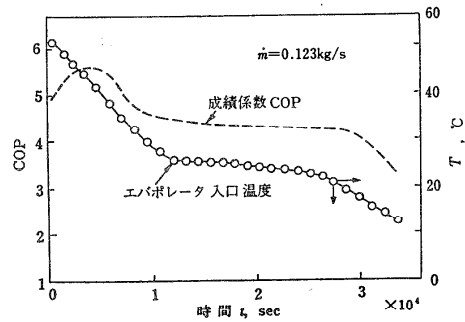


図 15 ヒートポンプの成績係数とエバポレータ入口温度の時間変化(暖房モード)

5. 1 潜熱蓄熱/ヒートポンプソーラーシステム

熱源として太陽エネルギーを利用した例として潜熱蓄熱/ヒートポンプソーラーシステムを最後に紹介する。

シミュレーションは、コレクタによる集熱過程と蓄熱槽による蓄熱過程に分けて考えられる。シミュレーションは大別して次の二つの過程に分けられる。一つはコレクタによる集熱過程、もう一つは潜熱蓄熱槽における蓄熱過程である。これについてそれぞれ概説する。

5. 1. 1 コレクタによる集熱過程

コレクタによる集熱量を求める場合、コレクタの傾斜を考慮した入射日射量を算出する必要がある。シミュレーションにおける日射量のデータとしては、仙台管区気象台による時間別水平面全天日射量を用いており、このままでは傾斜面における入射日射量とはならない。これは水平面全天日射量 I_H が直達日射成分 I_{HD} および散乱日射成分 I_{HS} からなっているためである。このうち直達日射成分については平行光と考えられるため、太陽の位置および傾斜面の角度および方位が定まれば傾斜面への直達日射量 I_{FD} は次式で表される。

$$I_{FD} = I_{HD} [\cos \epsilon + \sin \epsilon \times \cot h_0 \cos(\varphi - \phi)] \quad (14)$$

また天空日射に関してはすべての方向から一様な強さで入射しているとして、入射量は傾斜面から天空を見る形態係数に比例することになり、傾斜面天空日射量 I_{FS} は次式のようなになる。

$$I_{FS} = I_{HS} (1 + \cos \epsilon) / 2 \quad (15)$$

他方、残余の形態係数 $(1 - \cos \epsilon) / 2$ については地面からの反射日射を受けることになるため地面反射率 γ とすると、傾斜面での全日射量 I_F は次式で推定できる。

$$I_p \approx I_{ns}[\cos \epsilon + \sin \epsilon \times \cot h_0 \cos(\varphi - \phi)] + I_{ns} \frac{1 + \cos \epsilon}{2} + \gamma I_H \frac{1 - \cos \epsilon}{2} \dots\dots\dots (16)$$

このように水平面全天日射量を二つの成分に分離する方法としては一般に用いられるIEAの方法 によった。

コレクタの集熱効率 η_c は次式で与えられる。

$$\eta_c = F' \left\{ \tau \alpha - K_t \frac{T_m - T_{air}}{I_p} \right\} \dots\dots\dots (17)$$

ここで F' はプレートファクタを表す。また T_m は平均温度を表す。

$$T_m = \frac{T_{out} + T_{in}}{2} \dots\dots\dots (18)$$

コレクタの集熱面積は 1.89 m^2 / 枚であることから前述の量が得られれば、コレクタ枚数を N_c とすれば、単位時間当たりの集熱量 Q は次式で与えられる。

$$Q = 1.89 \eta_c I_p N_c \dots\dots\dots (19)$$

これにより熱媒体がコレクタを通過することによる温度上昇分が計算され、コレクタ出口温度が得られる。

集熱・蓄熱過程のシミュレーション結果と実験結果の比較の例を図16に示す。白丸および黒丸印は、それぞれ蓄熱槽入口、出口温度を示す。この図からもわかるように、潜熱発生による低温集熱が可能であるので、潜熱蓄熱とソーラーシステムとの適合性は極めて良好である。

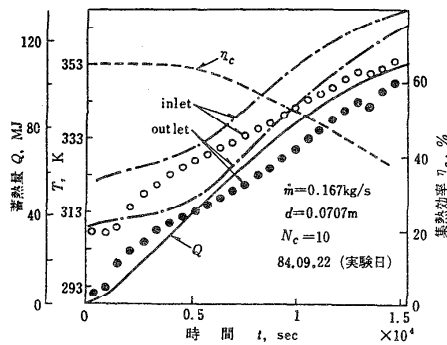


図 16 シミュレーション結果と実験結果との比較 (白丸、黒丸は実験点を示す)

表 7 熱源、潜熱蓄熱およびヒートポンプの間の相互補完関係

構成要素または熱源	自然エネルギー*	潜熱蓄熱	ヒートポンプ
利 点	・無 尽 蔵 ・ク リ ー ン	・エネルギー密度大 ・一定温度熱源	・COP 大 ・省エネルギー
欠 点	・希 薄 性 ・間 欠 性	・過 冷 却 ・適当な PCM が ない	・熱源を必要 ・昇温幅を大きく できない
欠点をバックアップするパートナー	潜熱蓄熱	ヒートポンプ	潜熱蓄熱 自然エネルギー(熱源)

* 熱源は深夜電力または各種排熱などでもよい。

表 7 に、熱源、潜熱蓄熱、およびヒートポンプの 3 者の相互補完関係を示す。このように、お互いに欠点を補い合うシステムを構成することが、潜熱蓄熱の実用化上重要な点である。

6. おわりに

複雑なシステムの数値シミュレーションの 1 例として、潜熱蓄熱システムのシミュレーション手法を詳しく述べ、その結果についても解説した。

このようなシステムの性能の評価および最適設計を実験的に行うことが可能であるが、パラメータの数があまりに多く、またその規模も広範囲に亘るため、費用と時間の制約から極めて困難であり、数値シミュレーションが大きな威力を発揮する。

なお、潜熱蓄熱システムは現在、漸く実用化の段階に入り、有望なシステムが世に出るのも近い状況にある。

おわりに、永年潜熱蓄熱研究の筆者のパートナーである広瀬宏一氏に心から謝意を表したい。

記号

a : 温度伝導率	T_f : 融 点
c_p : 定圧比熱	T_0 : 初期温度
d : 球カプセル直径	u : 流 速
h : 熱伝達率	U : コンダクタンス
H : 蓄熱槽高さ	V : 蓄熱槽容量
k : 熱伝導率	z : 高さ方向座標
l : 蓄熱槽代表長さ	α : 球カプセルの体積比
L : 潜 熱	β : 係 数
m : 流 量	Γ : 球カプセルの配列による係数
$q(z)$: 発熱速度	$\Delta T = T_{in} - T_f $

Q : 熱 量	$\Theta = (T - T_{in}) / (T_f - T_{in})$
r : 半径方向座標	ρ : 密 度
R : 界面位置	τ : 時刻 t_0 からの時間 $= t - t_0$
R_c : 球カプセル内半径	添 字
R_0 : 球カプセル外半径	+ : 無次元数
Ste : Stefan 数 $= c_{p,c} \cdot \Delta T / L$	c : 球カプセル
t : 時 間	f : 熱 媒 体
T : 流体温度	s : PCM 固相
T_{in} : 流入温度	

参 考 文 献

- 1) T. SAITOH: Technol. Repts, Tohoku Univ., **41** (1976), 61
- 2) T. SAITOH: Appl. Sci. Res., **32** (1976), 429
- 3) T. SAITOH: J. Heat Transfer, ASME, **100** (1978), 294
- 4) 斎藤武雄: 冷凍, **53-612** (1978), 891
- 5) 斎藤武雄・広瀬宏一: 冷凍, **54-624** (1979), 845
- 6) 斎藤武雄・広瀬宏一: 機論, **46-405** (1980), 971
- 7) T. SAITOH and K. HIROSE: J. Heat Transfer, Trans. ASME, **102** (1980), 261
- 8) 斎藤武雄: 冷凍, **55-636** (1980), 875
- 9) 斎藤武雄: 冷凍, **55-637** (1980), 1005
- 10) 斎藤武雄: シンポジウム「伝熱工学」, 化学工学協会 (1981), 1
- 11) 斎藤武雄: 伝熱研究, **20-75** (1981), 22
- 12) 斎藤武雄: 冷凍, **57-654** (1982), 369
- 13) T. SAITOH and K. HIROSE: J. Heat Transfer, Trans. ASME, **104** (1982), 545
- 14) 斎藤武雄: 日本学術振興会融体超急冷加工委員会資料 (1983), 1
- 15) 斎藤武雄: 冷凍, **58-670** (1983), 749
- 16) 斎藤武雄・広瀬宏一: 冷凍, **58-672** (1983), 933
- 17) T. SAITOH and K. HIROSE: The 22nd Nat. Heat Transfer Conf., Niagara Falls, N. Y. (1984); see ASME Paper No. 84-HT-9
- 18) T. SAITOH and K. HIROSE: Technol. Repts, Tohoku Univ., **49-1** (1984), 17
- 19) 斎藤武雄・広瀬宏一: 冷凍, **59-680** (1984), 519
- 20) 斎藤武雄・広瀬宏一: 冷凍論, **1** (1984), 157
- 21) 斎藤武雄・広瀬宏一: 機論, **51-462** (1985), 705
- 22) 斎藤武雄・広瀬宏一: 機論, **51-467** (1985), 1867
- 23) T. SAITOH and K. HIROSE: Proc. Int. Symp. Thermal Appl. Solar Energy (1985), 319
- 24) 斎藤武雄・広瀬宏一: 機論, **51-469** (1985), 3060
- 25) 斎藤武雄・広瀬宏一: 豊田理化学研究所報告, **38** (1985), 45
- 26) 斎藤武雄・広瀬宏一: 岩谷財団報告, **8** (1985), 9
- 27) T. SAITOH and K. HIROSE: Chem. Eng. Comm. (1985)
- 28) T. SAITOH: Freezing and Melting Heat Transfer in Engineering (K. C. Cheng ed.), Academic Press (in Press)
- 29) 斎藤武雄: 機械の研究, **37-11** (1985), 1275.
- 30) 斎藤武雄: 機械の研究, **37-12** (1985), 1397.
- 31) 広瀬宏一: 東北大学博士学位論文 (1984. 3)
- 32) M. TELKES: Heating and Vent., **44** (1947), 68

- 33) M. TELKES: *ibid.*, **46** (1949), 79
- 34) M. TELKES: *ibid.*, **46** (1949), 79
- 35) M. TELKES: *Ind. Eng. Chem.*, **44** (1952), 1308
- 36) M. TELKES: *Heating and Vent.*, **47** (1950), 72
- 37) M. TELKES: *US Pat* 2, 666, 664 (1954)
- 38) A. OLCYAY and M. TELKES: *Prog. Archit.* (1959), 195
- 39) M. TELKES: R-380, *Rep. Inst. Lab., MIT* (1963)
- 40) M. TELKES: *Proc. NSF/RANN* (1973), 57
- 41) M. TELKES: *ASHRAE J.*, **38** (1974), 382
- 42) M. TELKES: *ASME 64-WA/SOL-9* (1964)
- 43) M. TELKES: *Critical Materials Problems in Energy Production* (C. Stein ed.), *Chapt. 14* (1976), 440
- 44) M. TELKES: *Solar Energy Mat.*, **2** (1980), 381
- 45) K. KATAYAMA and M. HATTORI: *Bull. JSME*, **19-115** (1975), 41
- 46) K. KATAYAMA et al.: *Solar Energy*, **27** (1980), 91
- 47) 片山功蔵ほか: 第 16 回伝熱シンポ講論 (1979), 208
- 48) 片山功蔵ほか: 第 17 回 " (1980), 505
- 49) 片山功蔵ほか: 第 17 回 " (1980), 508
- 50) 片山功蔵ほか: 第 15 回空気調和・冷凍講論 (1981), 73
- 51) 斎藤彬夫: 山梨地方講論 (JSME), (1982), 118
- 52) 斎藤彬夫ほか: 第 20 回伝熱シンポ講論 (1983), 556
- 53) " : 21 " (1984), 637
- 54) " : 21 " (1984), 640
- 55) 斎藤明宏ほか: 第 22 回 " (1985), 455
- 56) A. SAITO et al.: *Proc. 7th Int. Heat Transfer Conf.*, 6-EU 8 (1982), 485
- 57) 斎藤彬夫ほか: *機論*, **49-440** (1983), 843
- 58) " : " , **49-443** (1983), 1485
- 59) " : " , **50-458** (1984), 2393
- 60) 朝比奈正・小坂岑雄: *名工試報告*, **26-3** (1977), 66
- 61) 小坂岑雄ほか: *ibid.*, 71
- 62) " : " , 76
- 63) 小坂岑雄・朝比奈正: *ibid.*, 80
- 64) 小坂岑雄ほか: *ibid.*, **29-2** (1980), 53
- 65) 架取美智雄・増田隆司: *冷凍*, **56-643** (1981), 367
- 66) " : " , **56-647** (1981), 749
- 67) " : " , **57-658** (1982), 799
- 68) 豊田直樹ほか: *冷凍講論* (1982), 25
- 69) 上之園博: *電気学会誌*, **101-6** (1981), 507
- 70) 特許公開, 昭 60-123373
- 71) Y. TAKAHASHI et al.: *Thermochem. Acta*, **50** (1981), 31
- 72) 阿部宜之: *化学工学*, **56-7** (1982)
- 73) Y. ABE et al.: *Proc. ASME/JSME Thermal Eng. Joint Conf.* (1983), 365
- 74) M. KAMIMOTO et al.: *Proc. 18th Intersoc. Energy Conv. Eng. Conf.* (1983), 1790
- 75) Y. ABE et al.: *J. Solar Energy Eng., Trans. ASME*, **106** (1984), 465
- 76) 神本正行ほか: *電総研研究報告*, No. 850 (1984)
- 77) 小坂岑雄・植西 晃: *電気学会誌*, **101-6** (1981), 516
- 78) 伊藤定祐・三浦直勝: *最近の化学工学* (1984), 化学工学協会, 69
- 79) 小坂岑雄: *機論*, **82-724** (1979), 231
- 80) 小沢丈夫・阿部宜之: *機械の研究*, **84-10** (1982), 1110
- 81) " : " , **84-11** (1982), 1235

- 82) H. P. GARG, S. C. MULLICK and A. K. BHARGARA: "Solar Thermal Energy Storage", D. Reidel Publ. Co., (1985)
- 83) J. SCHRODER and K. GAWRON: Energy Res., 5 (1981), 103
- 84) 小沢丈夫ほか: 電総研集報, 48-5 (1979), 289
- 85) T. E. W. SCHUMANN: J. Franklin Inst 208 (1929), 405
- 86) W. E. RANZ: Chem. Eng. Prog., 48-5 (1952), 247
- 87) 久保田鉄工(株)技術資料 (1985)
- 88) 田中俊六・須田礼二: ソーラーハウスの常識, オーム社 (1983)
- 89) R. VISKANTA; Solar Heat Storage: Latent Heat Materials, Vol. I (G. A. Lane ed.) CRC Press, Florida (1983)
- 90) R. VISKANTA et al.: Alternative Energy Sources III, Vol. I (T. N. Vezioglu ed.) Hemisphere Publ. Corp., Washington (1983)
- 91) 斎藤武雄・加藤秀樹: 第23回日本伝熱シンポジウム講演(1986), 695.
- 92) 斎藤武雄: 冷凍論, 3(1986), 105.
- 93) 斎藤武雄: 潜熱蓄熱システムの理論と実際, '86ニューテクノロジーシンポジウム(1986), 235.
- 94) 斎藤武雄: 「数値伝熱学」, 養賢堂(1986).
- 95) T. SAITOH and H. KATO: A Numerical Method for Multidimensional Phase Change Problem with Arbitrary Geometry, The 2nd ASME-JSME Thermal Engineering Conf., Honolulu(1987).
- 96) T. SAITOH: Numerical Solution of Multidimensional Melting Problem with Bouyancy Driven Flow, Int. Symp. on Cold Region Heat Transfer, Alberta, Canada(1987).

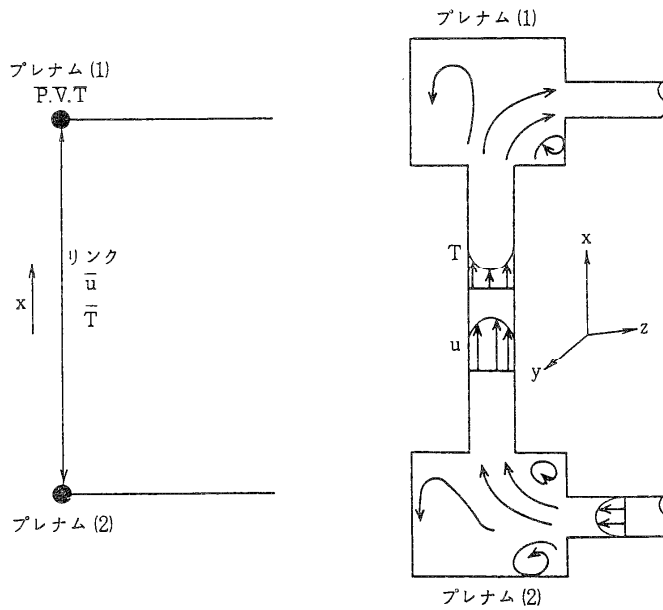
1. はしがき

原子力技術は巨大システムであると同時に潜在的なリスクを内含するシステムであるため、その開発の過程において、リスクを予測し安全を確保するために各種の数値シミュレーションが果してきた役割は極めて大きい。また、原子力の開発は電子計算機の進歩とほぼ時を同じくして進行したため、大型計算機にとっても、原子力は航空機、気象などの分野と並んで、つねに最大のユーザーの一つであった。

原子炉における数値シミュレーションのなかでも中性子輸送の解析は、方程式系が線型であることと、体系の形状にバリエーションが少ないこともあって、極めて高度な進歩を遂げ、素人目には、文字通りの”予測”がほぼ可能になっているように見える。

この他、原子炉について数値シミュレーション技術の開発が大規模に行われてきた分野として、原子炉の安全性を確認するための安全性評価解析が挙げられる。これは、多数のコンポーネントからなる巨大システムの過渡変化を数値的にシミュレートしようとするもので、秒以下の極めて短いタイムスケールから数日にわたるゆっくりとした現象までを追跡することが要求される。しかもとくに軽水炉の安全性解析においては、相変化を含む極めて複雑な流動状態を取扱う必要があるため、一方で大規模な模擬実験を行い、それと対比させながら解析コードの改良が行われて来た。その結果、現在の安全性解析コードは、与えられた原子炉システムの過渡現象を十分よく予測できるに至ってはいるが、数多くの経験式に依存しており、今後の発展に待つところも大きい。これについては、本号においても項を改めて解説されることとなっている。

以上のような従来からの原子炉内伝熱流動解析においては、大部分の場合、各プレナム内の流体を、圧力及び温度が一樣なある容積を持った”ポイント”で近似し、それをつなぐ各流路も、流れに直角な断面内では温度、圧力、流速の一樣な一次元の”リンク”として扱われる(図1(a))。この場合、プレナムについては内部の混合状態等についての経験式が、リンクについては流れの圧力損失や温度分布についての経験式が必要となる。これに対して比較的最近、計算機の大型化と数値計算法の進歩にともない、プレナム内及びチャンネル内についても、流体の流速や温度の分布を求める方法が進歩しつつある。これは、プレナム内やチャンネル内にも二次元あるいは三次元の要素分割を行い、連続の式や運動方程式、エネルギー式をそれぞれ適用するもので、その手法については、本号でも詳しく解説されている。もっ



(a) 一次元リンク接続 (b) 多次元流動解析

図1 原子炉内流動の解析手法

とも、流れが二相流になる場合は、二相界面の輸送現象が極めて複雑なため、単相流と同じレベルでの取扱いは未だむずかしい現状にあるので、以下では、流れが単相に留まる場合に内容を限定することとする。

流れが単相の場合でも、流動状態が層流であるか乱流であるかによって、解析手法のレベルは異なる。

(1) まず、流れが層流である場合には、すでに原理的な問題は一部を除いてほぼ解決しており、特別な経験則を用いることなしに、三次元流の予測が可能となっている。今後は計算機の一層の大型化と高速化に並行して、ますます複雑な形状や境界条件についての解析が可能となると考えられる。

(2) つぎに、流れが乱流になる場合には、計算による現象の完全な再現は未だむずかしい。しかし、乱流の不規則な変動については平均化を行い、流速や温度の平均量のみを最終的なプロダクトとして得ることを目標とすれば、現在でも計算による三次元的な乱流の再現が可能となりつつある。この場合、乱流現象についての経験則の導入(モデル化)が必要となる。しかし、図1(a)のように断面内や容積内にわたって平均化を施した場合に要求されるマクロな経験則が流路やプレナムの形状等に強く依存するのに比較すれば、乱流現象についての経験則はほぼ普遍的な法則であると考えられるため、個々のケースに依存することの少ないシミュ

レーション手法の開発が可能である。今回本項で紹介しようとするのは、この分類の手法による最近のいくつかの成果例である。

(3) なお、乱流現象についても特別な経験則を導入することなく乱流の不規則な変動までをも含めてシミュレートすることも可能になりつつある。この種の手法は、現在のところ簡単な体系について、アカデミックな関心と現象の理解の進展のために行われているが、乱流現象の定式化という面からは、モデル化を含まないだけに、むしろ問題のない手法であり、数値計算能力の進歩と共に今後進展することが期待される。

以下では、さしあたり現在最も実用的な応用範囲が広い(2)の手法による原子炉内の伝熱流動シミュレーションの例を紹介する。

2. 管群燃料の伝熱流動シミュレーション

原子炉、とくに軽水炉と高速炉においては燃料は管群構成となっており(図2)、これについての伝熱流動解析が、一つの重要な課題となっている。

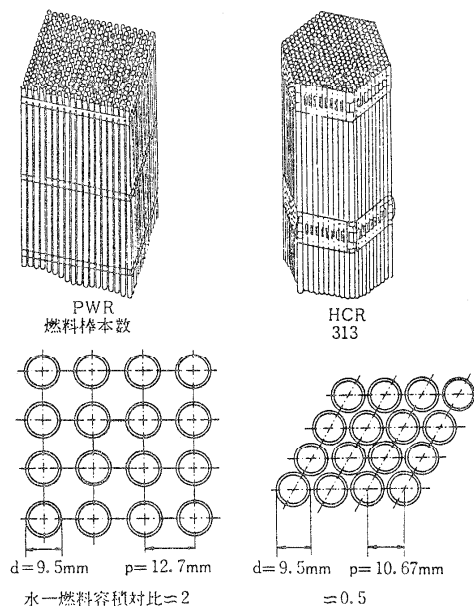


図2 軽水炉の燃料棒配列 (左:現在の軽水炉(PWR) 右:高転換軽水炉)

管群の配列は、通常の軽水炉(PWR)では配列を四角形とし充填も比較的疎であるが、高転換軽水炉や高速炉では配列を三角形として充填を密にするため、燃料棒の温度や流速の周方

向の不均一性が大きくなる。したがって、管群断面内の温度や流速の周方向分布の不均一性が大きく、これらを求めるための解析が試みられている。

この場合のポイントは、流れ場の非等方性のために乱流渦乱性係数 (ν_t) の非等方性が重要になる点と、軸方向流れと直角の断面内に二次流れの生ずることである。BartzisとTodreas⁽¹⁾ は $k-\epsilon$ 二方程式モデルを用いて、この問題の解を試みている。座標系は図3に示す

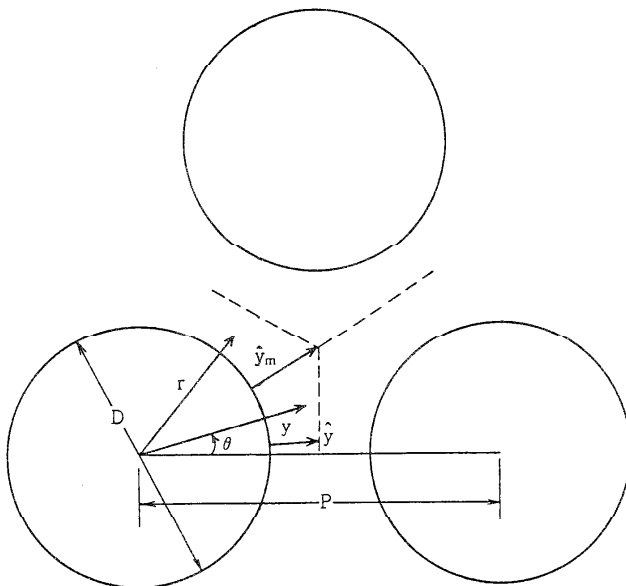


図3 三角形配列の管群

とおりで、三つのレイノルズ応力について、

$$\overline{u_r' u_z'} = -\nu_{rz} \frac{\partial \overline{u_z}}{\partial r}$$

$$\overline{u_z' u_\theta'} = -\nu_{z\theta} \frac{1}{r} \frac{\partial \overline{u_z}}{\partial \theta}$$

$$\overline{u_r' u_\theta'} = -\nu_{r\theta} \left[r \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{\overline{u_\theta}}{r} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial \overline{u_r}}{\partial \theta} \right]$$

とし、主たるせん断応力 $\overline{u_r' u_z'}$ に対する渦粘性係数 ν_{rz} については、通常の $k-\epsilon$ モデルの関係

$$\nu_{rz} = c_\mu k^2 / \epsilon$$

を与える。その他の二方向については、まず $r-\theta$ 方向については $\nu_{r\theta} \approx \nu_{rz}$ と仮定し、つぎに $\theta-z$ 方向に対しては

$$v_{z\theta} = (\ell_\theta / \ell_r) v_{rz}$$

とする。ここに、 ℓ_θ と ℓ_r はそれぞれ θ 及び r 方向の乱れの長さスケールで、 ℓ_r は通常の壁面境界層流の混合長とするが、 ℓ_θ は θ によらず、

$$\ell_\theta = K c_L \hat{y}_m$$

とするのがよいとしている。ここに y_m は図3に示すような流速最大点までの距離、 c_L は定数で約 0.4 である。

このような非等方性の取扱いによって、たとえば流速分布の計算値は、図4に見られるように、等方的取扱いに比して大いに改善される。

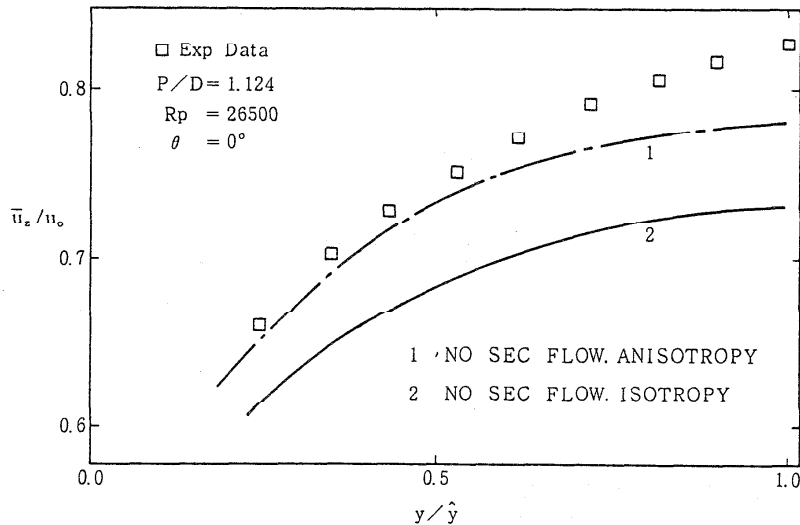


図4 管群における軸方向流速分布 (1: 非等方性渦粘性係数, 2: 等方性)

また、熱伝達に対する影響も大きく、渦粘性係数の非等方性を考慮することによって、周方向の温度分布も顕著に平坦化される(図5)。

但、このような取扱いは近似的なものであるため、二次流れを再現することには成功していない。管群流路内の二次流れについては、Rapley⁽²⁾ が算術応力式モデル (ASM) を用いた解析を行っている。その手法は、本誌の前号で中山氏⁽³⁾ が詳しく解説されているのと同じである。互いに接した ($P/D = 1$) の管群についての解析結果は図6 (a, b) に示すとおりで、二次流れを無視した計算結果 (一点鎖線) に比して、二次流れを考慮することにより、実験結果 (破線) との一致が顕著に改善されていることがわかる。

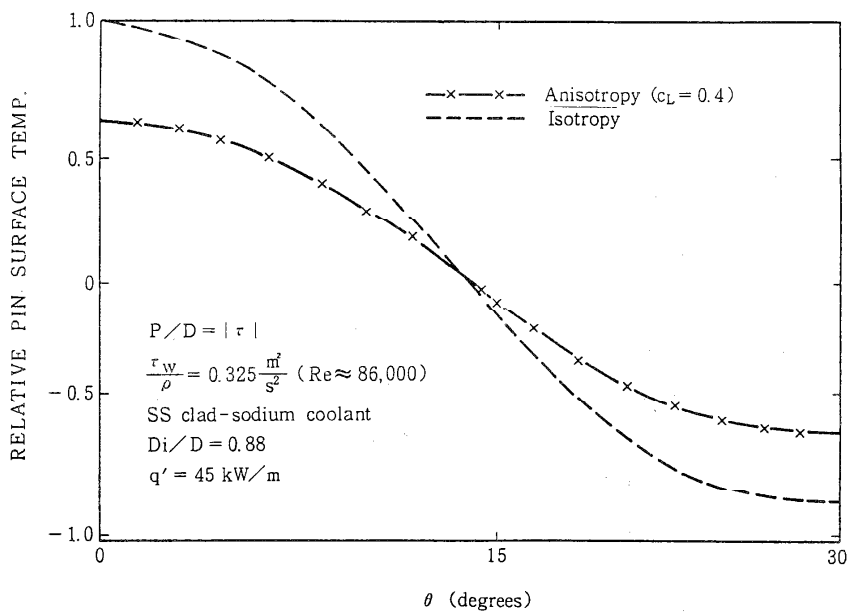


図5 管群燃料棒周囲の温度分布

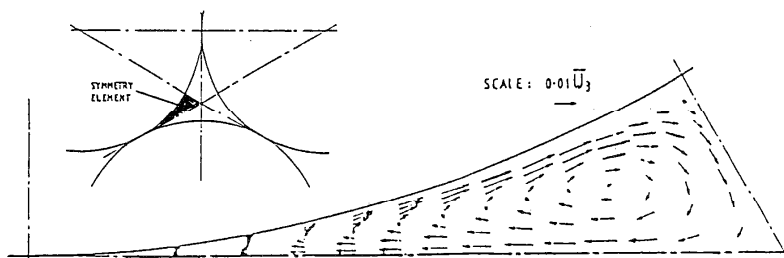


Figure 3. Secondary velocity vectors, $Re = 95000$.

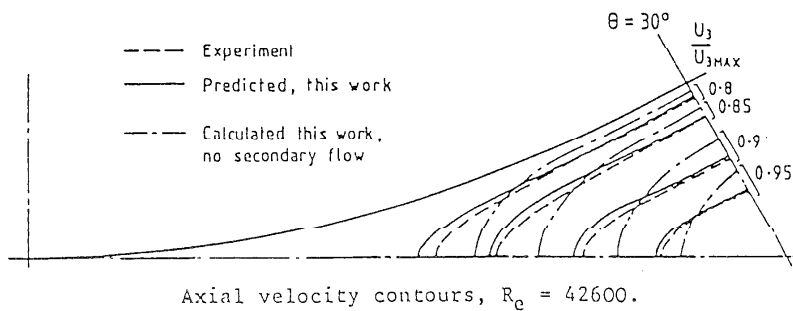


図6 三角形配列管群内の二次流れ⁽²⁾

3. 高速増殖炉における伝熱流動シミュレーション

高速増殖炉とは、エネルギーを発生する一方で消費した燃料と同量以上の新しい燃料物質を炉内に生産する原子炉で、現在我国では、動力炉・核燃料開発事業団（動燃）によって、実験炉“常陽”が運転されている。この常陽を用いて、冷却材の循環機を停止し、自然循環のみで炉停止後の崩壊熱を除去する実験が行われ、試験の結果について、二つのコードSSC-LとCOMMI X-1 Aを用いた解析が動燃において実施された^(4,5)。SSC-Lは図1(a)の一次元リンク接続型のコード、COMMI X-1 Aは $k-\epsilon$ 二方程式を用いた多次元伝熱流動解析コードである。

まず一次系ループの全流量の変化をSSC-Lで解析した結果を、図7に示す。この図で65sまでの流量減少はポンプの慣性に支配された領域で、その後自然循環に移行し流量はほぼ一定値に保たれるが、解析結果はこの両方の領域を十分良く再現している。

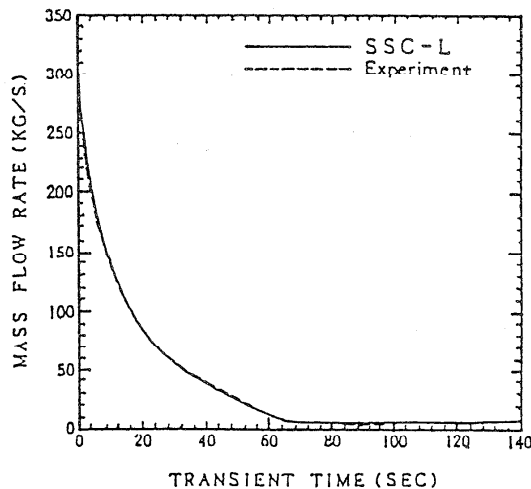
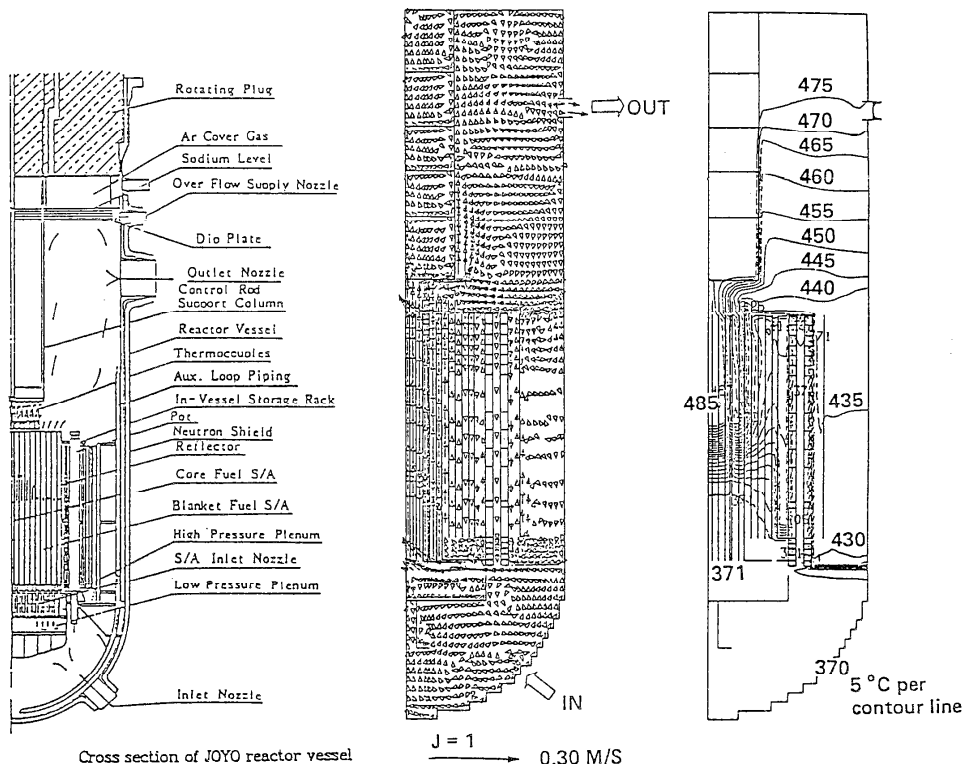


図7 冷却材流量の減少と自然循環への移行（常陽による実験）⁽⁴⁾

さらに図8は $t=130s$ における原子炉容器内の流動状態をCOMMI X-1 Aによって解析した結果を示すものである。この時点では炉心はまだ完全には冷えきっていないため、炉心で暖められたナトリウムが炉心上部構造物に沿って上昇しており、上部プレナム内で周囲のナトリウムと熱交換を行っている。

上記の“常陽”は压力容器や熱交換器、ポンプ等を配管で接続してループを構成しているためにループ型と呼ばれるが、これに対し、これらの構成要素を一つの大きなタンクの中に収めたタンク型の高速炉も考えられている。図9は、英国におけるタンク型高速度炉の設計例である。この型の場合、タンク内の三次元流動解析を行う必要があり、現在国内外の多数の機関で、この種の解析が行われている。



Analysis of JOYO (75 MW) natural circulation test by COMMIX-1A : flow and temperature distributions during transient (at $t=130$ sec.).

図8 自然循環時の原子炉容器内流動状態の解析⁽⁵⁾

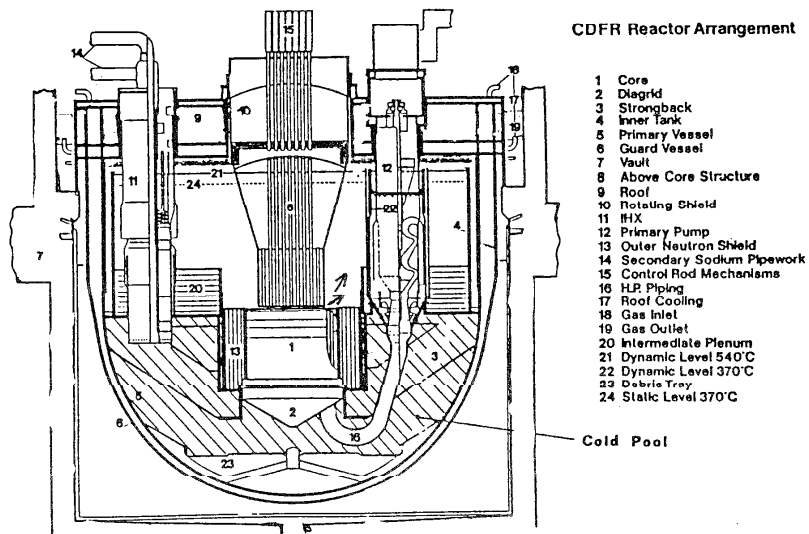


図9 タンク型高速炉の設計例 (英国 CDFR)

図10は、6413要素から成る三次元の有限要素法を用い、 $k-\epsilon$ 型乱流モデルによってタンク内の流動状態を解析したもので、炉心から吹上げた冷却材が、上部炉内構造物（UIS）に衝突したのち上部プレナム内に噴出する様子が現われている⁽⁶⁾。

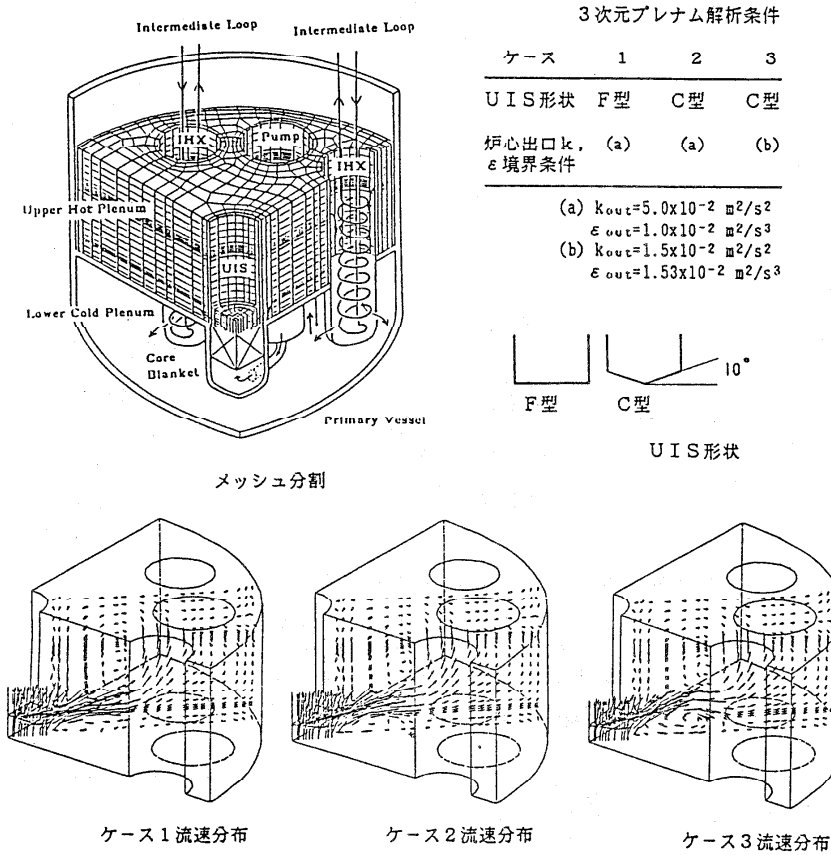
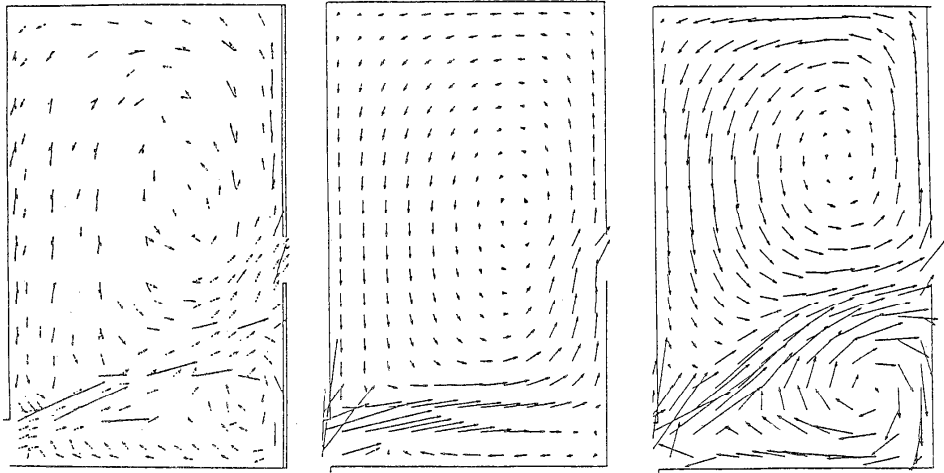


図10 有限要素法を用いたタンク型高速炉のプレナム内流動解析⁽⁶⁾

上述のCOMMI X-1 Aについては、プレナム内流動についてのベンチマークテストがおこなわれた⁽⁷⁾。実験では、炉心上部から吹上げて上部構造物に衝突したのちタンク内に流入する流れを、軸対称の模型で模擬した。図11の左端が実験結果であるのに対し、二次の風上差分を用いた中央のcase Bでは、数値粘性のために実験とはかなり異なる流動状態となっている。右端のcase Cは運動方程式に二次精度の差分スキームQUICKを導入したもので、これによって解析結果は顕著に改善されている。

次に、高速炉の蒸気発生器（SGU）に関する汎用伝熱流動解析コードPHOENICSを用いた解析例を図12に示す⁽⁸⁾。図12（a）は比較の対称とするための模型実験で、空気がまず上記の環状部から内部へ流入し、下向きに流れた後再び環状部へ流出する構造となっている。解



Experiment

Case B : Turbulent Calculation
momentum - upwind
k-ε - upwind

Case C : Turbulent Calculation
momentum - QUICK
k-ε - upwind

図11 COMMI X-1Aのタンク内流動ベンチマークテスト⁽⁷⁾

CDFR SGU MODEL SCHEMATIC

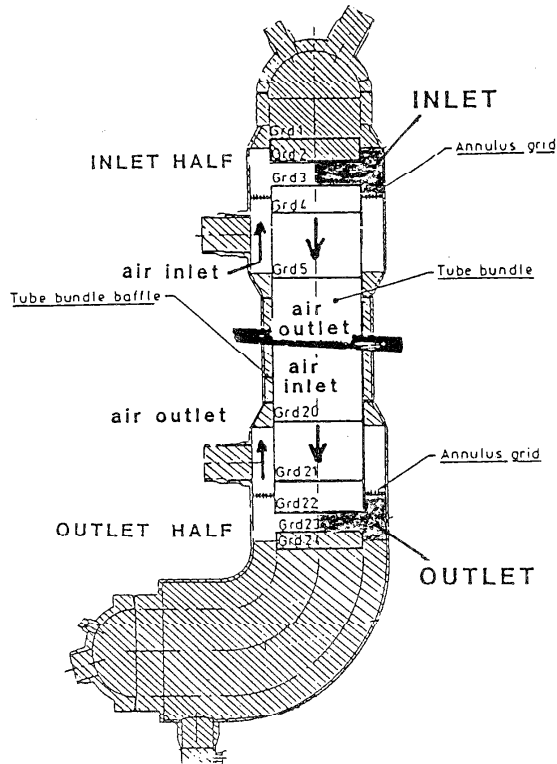
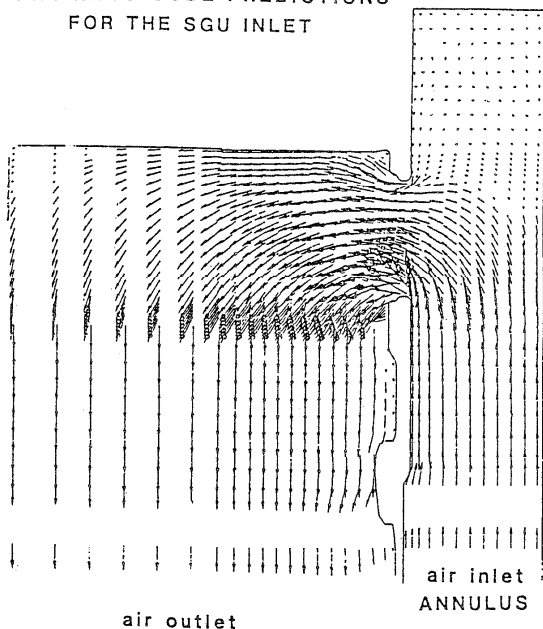


図12(a) 高速炉用蒸気発生器の流動模型⁽⁸⁾

PHOENICS CODE PREDICTIONS
FOR THE SGU INLET



VELOCITY PROFILE ACROSS
THE INLET WINDOW

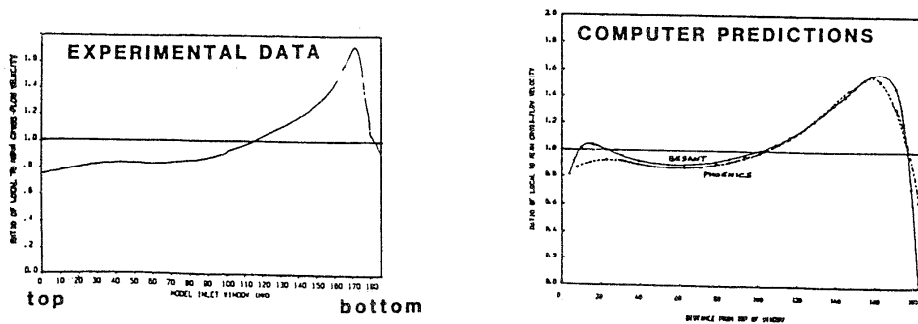


図12(b) 入口部の結果

析と実験の結果を比較すると、入口部（図12（b））では両者の一致は良いが、出口部（図12（c））については、その一致は必ずしも良くない。すなわち、両者の流速ベクトル図は一見よく一致しているように見えるが、詳細に見ると、出口上部に形成された渦の位置が解析では実験よりも高くなっており、この差が出口部流速分布の大きな差となって現われている。この原因としては、管群を横切る部分の流動抵抗や乱流モデルの不確かさにあると考えられている。

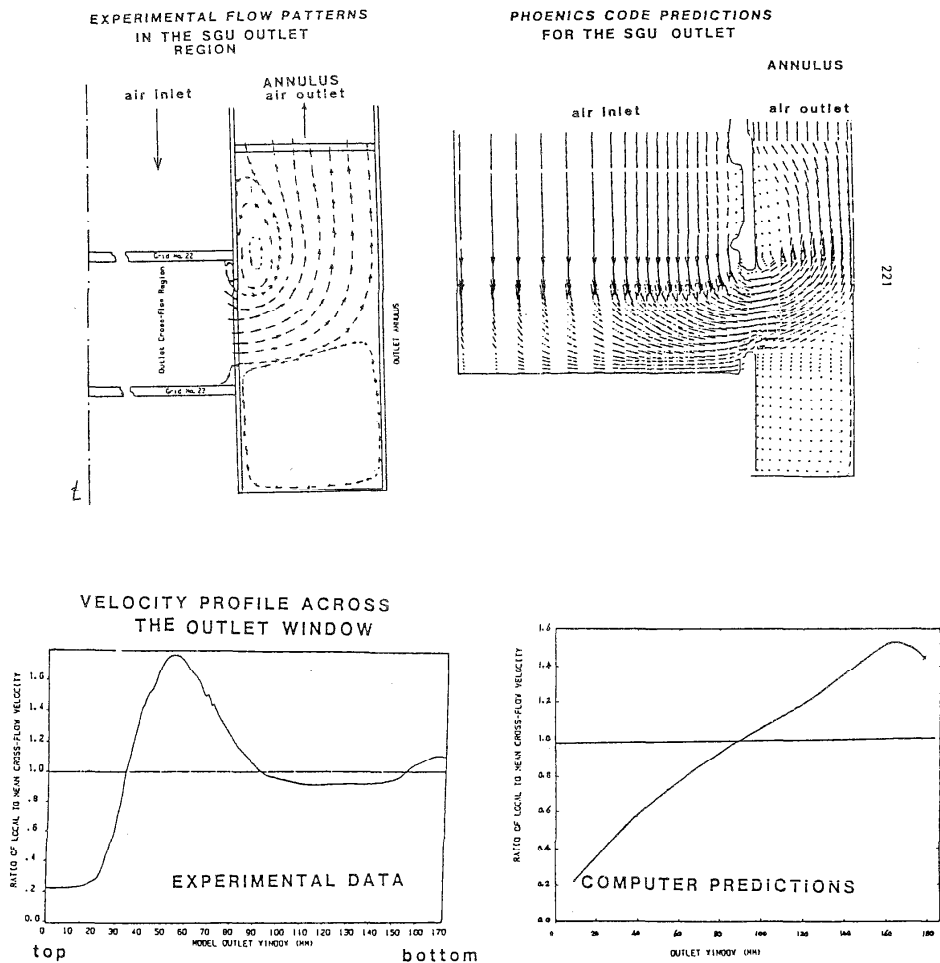


図12(c) 出口部の結果

4. 高温ガス炉における伝熱流動シミュレーション

高温ガス炉は、750~950℃のヘリウムガスを発生することにより、熱効率の向上及び原子力の利用分野の拡大を図ろうとするもので、その炉心は、主として黒鉛及び炭素材料から構成されている。

現在、日本原子力研究所(原研)で建設を目指している高温工学試験研究炉の燃料要素は、図13に示すとおりで、六角柱の黒鉛ブロックに約10本の燃料ピンを挿入し、燃料ピンと黒鉛ブロックの間の中数mmの間隙に冷却材ヘリウムを流す構造となっている。炉心出口で出来る限り高温のガスを得るためには、燃料の線出力密度を高くする一方、冷却材の流速を低くする必要がある。そのため炉心入口でのレイノルズ数は、約8000~10000と比較的低く、ガス流の

加熱による”層流化”の発生が懸念された。

層流化とは、流路の入口で乱流であった流れが、下流で層流になる現象であるが、完全に層流にまで至らなくとも、乱れが下流に向かって顕著に減衰する場合をも、通常は層流化と呼んでいる。層流化の原因としては、加速、浮力磁場などの影響があるが、高温ガス炉で問題となるのは、ガスが強く加熱されて膨張することによる加速に起因する層流化である。

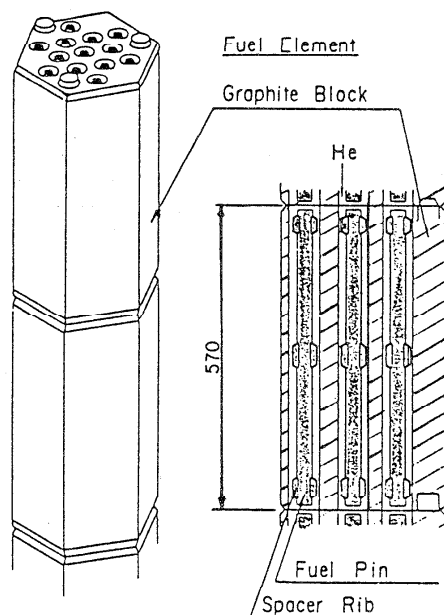


図13 高温ガス炉の燃料要素

円管内のガス流を加熱する場合について、実験と数値シミュレーションの両方から層流化の発生限界を調べた結果を図14に示す⁽⁹⁾。ガスは加熱されると粘性が増加するため、バルクのレイノルズ数は流れ方向に低下する。図14からわかるように、加熱が弱い場合には下流に向かってバルクレイノルズ数が低下してもスタントン数はほぼ乱流の値に留まるが、加熱が強くなると層流値まで減少する。解析は $k-k_L$ 型二方程式モデルによるもので、層流化発生の傾向を良く再現している。

以上は流路が円管の場合であったが、実際の燃料体では、図13に示すように、冷却材流路の形状は環状である。そこで、環状流路内のガス流を内側から加熱する場合についても実験を行った結果を、図15に示す。この場合には、加熱を強くすると確かにスタントン数は低下するが、加熱を相当強くしても層流値にまで低下することはなく、乱流と層流の中間値に留まるように見える。 $k-k_L$ 型二方程式モデルによる解析結果も、全く同様の傾向を示している。

以上のように、環状流路内のガス流を内側から加熱する場合には、熱伝達率が層流値にまで

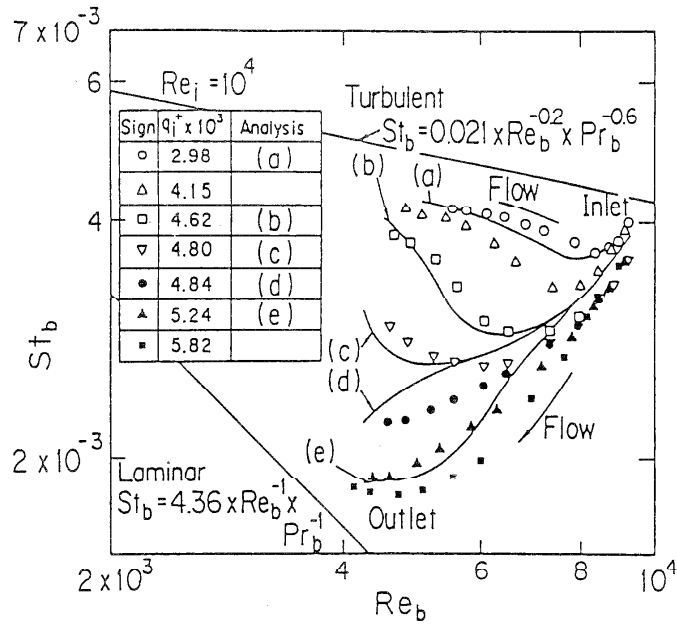


図14 円管内ガス流の加熱による層流化の実験と解析⁽⁹⁾

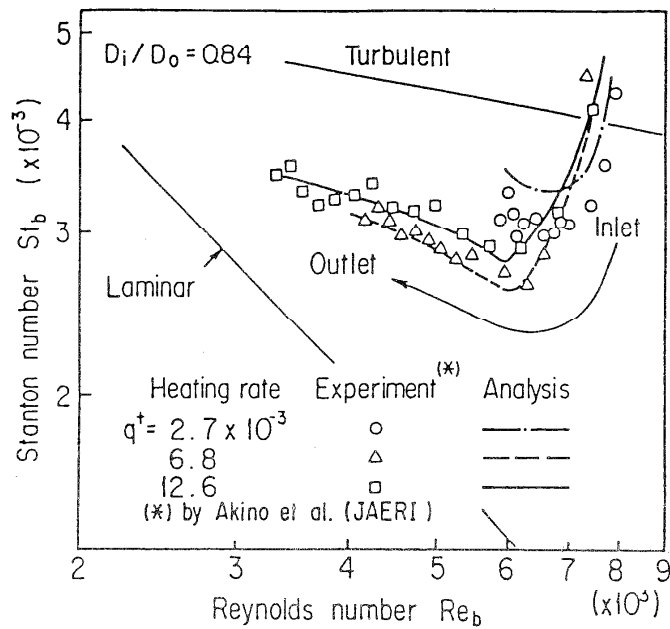


図15 環状流路内ガス流を管内から加熱する場合の熱伝達率の実験と解析

低下するような極端な層流化は発生しないことが実験と解析の双方から確認され、高温ガス炉の熱設計上の制限因子の一つを除去することができた。加熱が強い場合の流路内の状況は、解析結果から見ると、加熱面には層流化が発生し、非加熱面側には乱流が残っている状態となっているが、実験的にはかなり広い範囲にわたって乱れが観察されており、現象の解釈については、今後の研究に待つ部分が残されているといえる。

5. あとがき

以上、原子炉における伝熱流動シミュレーションのいくつかの例を紹介したが、これらは当然全てを尽した訳ではない。またさらに、原子炉以外の原子力分野にまで視野を広げると放射性棄物の長期貯蔵における除熱、核融合炉ブランケットの除熱などの問題の他、最近のチェルノブイリ事故で話題となった放射性物質の地球規模での拡散なども、今後この種の数値シミュレーションの発展が期待される分野である。

付 記

本”伝熱研究”誌には通常の論文や学会誌には書かないような苦労話やコツをも書くようにとの編集委員長からのご指示があり、思案したが、筆者が経験的に気付いているk-ε二方程式モデルの定数の若干の性質について紹介することで、ご指示にお応えすることとしたい。

円管に対するk-ε二方程式モデルは

$$\frac{Dk}{Dt} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[\left(\frac{\nu_t}{\sigma_k} + \nu \right) r \frac{\partial k}{\partial r} \right] + \nu_t \left(\frac{\partial \bar{u}}{\partial r} \right)^2 - \epsilon \quad (1)$$

$$\frac{D\epsilon}{Dt} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[\left(\frac{\nu_t}{\sigma_\epsilon} + \nu \right) r \frac{\partial \epsilon}{\partial r} \right] + c_1 \frac{\epsilon}{k} \nu_t \left(\frac{\partial \bar{u}}{\partial r} \right)^2 - c_2 \frac{\epsilon^2}{k} \quad (2)$$

$$\nu_t = c_\mu k^2 / \epsilon \quad (3)$$

と表され、経験定数 σ_k 、 σ_ϵ 等については

$$\sigma_k = 1.0, \sigma_\epsilon = 1.3, c_1 = 1.44, c_2 = 1.92 \quad (4)$$

$$c_\mu = 0.09$$

と与えたものを、通常”標準型”と呼んでいる。しかし、この定数の組についてはいくつかの難点があることがわかっており、その一つに、円管内の乱流渦拡散係数の分布が壁から中心に向かって単調に増加し、Reichardt の式で表されるような極小値を示さないことがあげられる(図16)。

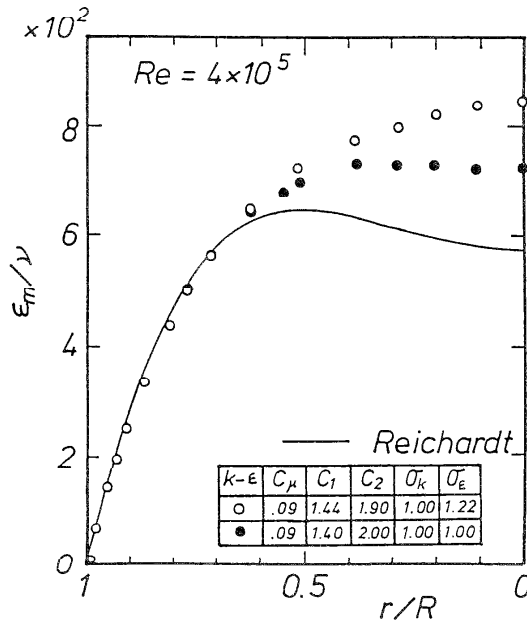


図16 k-ε乱流モデルによる円管内乱流の渦拡散係数の分布

この原因は次のように考えられる。すなわち、管中心付近では $(\partial \bar{u} / \partial r) \approx 0$ となるため、 k 式、 ε 式共、発生項はゼロとなり、主として拡散項が正の寄与をすることになる。しかるに式(4)の標準型では $\sigma_k < \sigma_\varepsilon$ となっているため、 ε の拡散は k の拡散に比して相対的に小さくなり、そのため式(3)からわかるとおり、 ν_t は相対的に大きくなる。したがってこの点を改善するためには σ_ε を小さくするか σ_k を大きくして $\sigma_k \approx \sigma_\varepsilon$ とすればよい。実際これによって、 ν_t の分布形は図16に見られるように改善される。この際注意すべき点は、 σ_ε の値を変えると、

$$c_2 - c_1 = \kappa^2 / (\sigma_\varepsilon \sqrt{c_\mu}) \quad (5)$$

の関係より、 $c_2 - c_1$ に影響を及ぼす点である(κ はカルマン定数 $=0.4 \sim 0.42$)。したがって、単に ν_t の分布形状のみから σ の値を定める訳には行かない。筆者もかつては $\sigma_k = 0.9$ 、 $\sigma_\varepsilon = 1.0$ 、 $c_1 = 1.45$ 、 $c_2 = 2.0$ とする値の組を使っていたが、 $\sigma_\varepsilon = 1.3$ とする組も円管の中心付近での ν_t の挙動以外には特に不都合はないと考え、最近では $\sigma_\varepsilon = 1.3$ とする式(4)の組を使っている。しかし、片側から円管を加達するような場合には中心付近の ν_t の分布形状が重要であるとの指摘を最近受け(笠木先生、東大)この問題をもう一度見なおす必要があるかと考えている。

次にいわゆる低乱流レイノルズ型の $k - \varepsilon$ モデルにおける定数 c_1 について述べる。Jones-Launder⁽¹⁰⁾は乱流レイノルズ数($R_t = k^2 / \varepsilon \nu$)が低い壁近傍への適用を図るため、定数の内、 c_μ 及び c_2 を R_t の関数として

$$\begin{aligned} c_\mu &= 0.09 \exp[-2.5/(1+R_t/50)] \\ c_2 &= 2[1-0.3 \exp(-R_t^2)] \end{aligned} \quad (6)$$

と与えた。しかし、 c_1 は R_t によらない一定値($c_1 = 1.55$)としている。のちにJonesに聞いたところ、 c_1 についても R_t の関数形を試みたが、特に大きな影響を与えないので、関数形を導入しなかったと、述べていた。

筆者も図14の層流化の解析を試みる中で最初は同じ印象を受けたが、その後 c_1 を R_t の関数にすることにより、乱流から層流への遷移のレイノルズ数が変化することに気付いた。しかもこの特性は、他の変数を変化させてもほとんど変わらないこともわかった。

これを示すのが図17である。すなわち、円管の入口にある一定の k と ε の分布を与え、下流に向かって計算を進める(物性値は一定とし、加熱による層流化は生じないようにする)。この場合、レイノルズ数がある値以下になると乱れは維持できなくなり、下流では流れは層流になる。図17に見るとおり、Jones-Launderによる定数値 $k - \varepsilon$ (JL)は、かなり低い遷移レイノルズ数を与える。(この点は、彼らの論文でもすでに認識されていた。)これに対し、 $k - \varepsilon$ (M)では、 c_1 を

$$c_1 = 1.55[1 + 0.15 \exp\{-R_t/50\}] \quad (7)$$

とした結果、図17のように $Re \approx 2,200 \sim 2,500$ の遷移レイノルズ数を得ている。

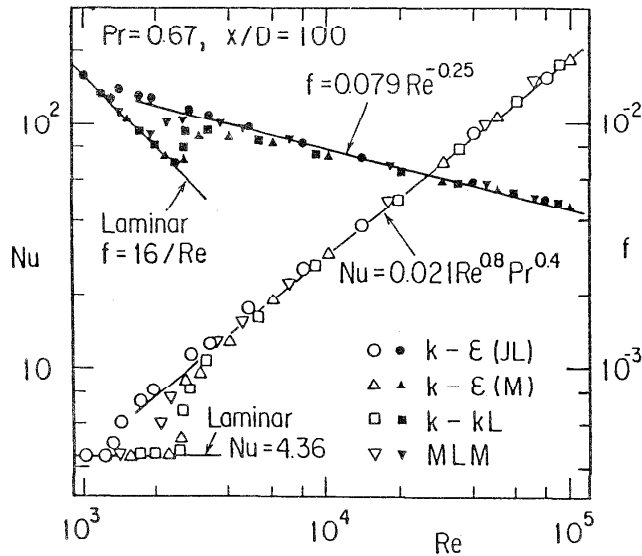


図17 二方程式乱流モデルによる円管内乱流の熱伝達と管摩擦係数⁽¹¹⁾

式(7)の関数形は、筆者⁽¹¹⁾が非常乱流の実験との比較から定めたもので、この場合にも c_1 を R_i の関数とすることが有効であることがわかった。(脚注)但これを図14のガス流の加熱層流化に適用すると、満足な結果を与えない。これに対し、図14と図17の $k-kL$ モデルは同じ定数の値を用いている。元来、 ϵ 方程式と kL 方程式は、とくに拡散項を中心として互いに互換ではないことが導けるので、これらの点に ϵ 方程式の改良のヒントがあるのではないかと考えている。

(脚注) 文献(11)中で c_1 を $c_1=1.55(1-0.15\exp\cdots)$ としているのは、 $c_1=1.55(1+0.15\exp\cdots)$ の誤記であるので訂正したい。

参考文献

- (1) Baotziz, J.G., and Todreas, N.F., "Turbulence modeling of axial flow in a bare rod bundle", 101-4 (1979) pp.628-634.

- (2) Rapley, C.W., "The limiting case of rods touching in turbulent flow through rod bundles", Numerical Methods in Laminar and Turbulent Flow, (1983) pp.93-103, Pineridge Press
- (3) 中山,"直管路内の乱流(第二種二次流れの数値解析)", 伝熱研究 26-100, (1987) pp. 57-64.
- (4) Yoshikawa, S., et al., "An international analysis of natural circulation test in JOYO using SSC-L and COMMIX-1A", Proc. International Topical Meeting on Fast Reactor Safety, Knoxville, (1985) p.293.
- (5) Ninokata, H., "Current practice in fast reactor safety thermohydraulic analysis", Proc. International Topical Meeting on Reactor Thermal Hydraulics, Newport, (1985) Paper 12.A.
- (6) 奥田他;" $k-\epsilon$ 乱流モデルを用いた原子炉上部プレナム内流れの3次元有限要素法解析" 第2回生研 NSTシンポジウム講演梗概集,(昭62) pp.43-46.
- (7) Maekawa, I and Muramatsu, T., "Higher order differencing schemes in fluid flow analysis and their applications to in-vessel thermal-hydraulics", 5th IAHR Liquid Metal Working Group Meeting, Grenoble, (1986)
- (8) Broun, G.A., et al., "Shell-side hydraulic phenomena in the inlet and outlet regions of the CDFR steam generators", Numerical Simulation of Fluid Flow and Heat/Mass Transfer Processes, (1986) pp.215-224. Spinger.
- (9) Sanokawa, K., et al., "Heat transfer studies in relation to the VHTR", Gas Cooled Reactors Today, London, 3, (1982) pp.241-246.
- (10) Jones, W.P. and Launder, B.E., "The prediction of laminarization with a two-equation model of turbulence", Int. J. Heat Mass Transfer, 15, (1972), p.301.
- (11) 河村,"現象論的乱流モデルを用いた非定常乱流の解析", 日本伝熱シンポジウム論文集, B 114, (1984).

1. 軽水炉安全解析と伝熱数値シミュレーション

一般に設計においては、運転上考えられる比較的狭い条件での伝熱流動に関して精密な予測法を確立する。そのため、小規模実験、プロトタイプまたは、実機での実測により、予測法の精度の評価を行い、必要があれば、予測法を改良し必要な精度で現象が予測出来るようにする。初めは小規模な簡単な体系の機器の設計の予測に使用し、少しずつ大型化、複雑化した機器の設計の予測に拡張しながら予測法の高精度化を図って行くことができるので、たとえ現象の物理的理解が不十分であっても使用する予測法を実用上十分な精度に高めることができる。

これに対して、軽水炉の安全性においては、運転条件から著しく逸脱した広範囲な条件での伝熱流動の予測を行う必要がある。すなわち、起こりうると考えられる最も厳しい条件またはより厳しく設定された条件での過渡事象を十分な安全裕度を持って予測する必要がある。また制御系との干渉、運転員の操作との干渉を現象の予測に考慮しなければならない。それゆえ、予測法の妥当性の検証が困難であった。

例えば、初期の安全評価解析に用いられた手法(RELAP2,3等のLOCA解析コード)は、既存の知識と保守的な仮定を組み合わせで開発されたものであり、検証は行われていなかった。結果は実際よりも保守的な値を与えるので、本手法は直接伝熱数値シミュレーションに使えるものではなかった。安全評価手法の実験的検証の必要性を最初に示したのが、Semiscale 実験⁽¹⁾の結果である。すなわち、压力容器単体のブローダウン等の基礎的実験の後、1970年11月から翌年2月にかけて行った6回の蓄圧注入系を用いた非常用炉心冷却系(ECCS)実験で、注入水が炉心に向かわず破断口から流出してしまう、所謂ECC水のバイパスと呼ばれる現象が観察された。それ以来、ECCS作動時の1次系の熱水力学的挙動に関する研究、とりわけ全システムを備えた試験装置による総合実験と、それらの研究成果を採り入れた安全解析コードの開発が進められた。また、現象のモデル化のための多くの個別効果実験が行われた。

RELAP4等⁽²⁾の安全解析コードはこれらの研究の成果を取り込んで、信頼性の高いものになってきた。これらのコードにおいては、安全審査の立場から安全解析の評価指針を満足し、かつ現象の把握が不十分な部分をカバーするため、必要な部分を保守的な(より厳しい)予測を与えるモデルで置き換え、解析の結果が「現実の事故がこれよりも悪くなることのないような予測を与える」ように作成された。原研においては、これらのコードの改良

が行われるとともに、ROSA実験、大型再冠水実験などが行われて、コードの検証、モデルの改良等が行われた。

1979年 3月28日、米国スリーマイルアイランド原子力発電所 2号機(TMI-2) の事故は、事故発生条件の厳しさと事故の結果の厳しさとの関係を改めて問うた形になった。また、運転上、「事故はこれ以上にならない」という安全評価解析もさることながら、「運転員には事故がどう見えるか」という観点からも事故事象を把握すべきであると認識されるようになった。

そして、小破断の冷却材喪失事故等の実験、解析が進められるとともに、現象をリアルに予測する最適予測コードの開発が行われてきた。

そして、安全性に関係した事故事象の物理的現象把握は、大きく前進し、二流体モデルを用いた最適予測コードTRAC-PF1⁽³⁾、RELAP5⁽⁴⁾、TRAC-BD1⁽⁵⁾等の信頼性、予測精度も大きく向上した。

最適予測コードがさらに高精度なものになれば、安全評価コードの保守性の検証、設計計算、運転特性評価用の数値実験に用いられるであろう。すなわち、最適予測コードの高精度化により、伝熱数値シミュレーションが可能になるからである。

このためには、今までに国内外に蓄積された知見を整理し、総合化する努力が必要となるが、今まで歳月を重ねて蓄積してきた基礎研究の成果ならびに多くの投資のなされた応用研究の成果を総合化し、適用性の広い数値シミュレーション法が確立できれば、将来、大型実験に投資する必要性が減り、経済的にも、時間的にも有利になると考えられる。

現在、わが国には、研究の集大成を行う価値のある多くの研究成果があると考えられる。例えば、PWR に関して、大破断の冷却材喪失事故についての原研におけるROSA-IV 実験⁽⁶⁾とRELAP5コードの検証と改良、ならびに PWR電力共研での実験⁽⁷⁾とCANAC-IIコードの開発⁽⁸⁾、新評価コードの開発⁽⁹⁾がある。また、大破断の冷却材喪失事故については、第 2節で述べる再冠水最適予測コードREFLA の開発がある。

BWR に関しては、原研におけるROSA-III実験⁽¹⁰⁾とRELAP4,5コードの検証と改良、BWR 産業界によるECCS実験研究とSEFER^{(11),(12)}のような現象把握に基づいた新評価コード等の開発⁽¹³⁾が行われた。

また、大学においても、多くの基礎研究がなされ、日本全体のこの方面のポテンシャルは、欧米にひけを取らないようになってきている。是非、日本において、個々の研究成果の総合化を実現できることを期待している次第である。

ここでは、再冠水最適予測コードREFLA の開発の過程での物理モデル改良の実際についての説明と、二流体モデルコードの問題点の検討とを通して、最適予測コード高精度化のために必要な物理モデル改良に対して、我々が何をできるかについて考えるてみることにする。

2. 原研における再冠水現象のモデル化と再冠水最適予測コードREFLAの開発 (14)

ここで扱う再冠水炉心熱水力現象とは、軽水炉の冷却材喪失事故時に冷却材の減少により炉心が過熱し、燃料棒表面に液相の冷却材が接触できない状態となった場合に、非常用炉心冷却系の作動により炉心を冠水し、その冷却材の飽和温度に近い温度に復帰させる際の炉心熱水力現象を意味している。

再冠水現象は、軽水炉、特にPWRの大破断事故時において、炉心燃料棒の被覆管最高温度(Peak Clad Temperature:PCT)を決定する場合は被いことから精力的な研究がなされてきた。燃料棒の被覆管は核燃料および核分裂生成物を閉じ込めるための一番内側の構造体であり、万一、被覆管表面温度が過度に上昇すると、化学反応、金属の相変換、機械的強度の低下等のために高温時または冷却状態で被覆管の健全性が損なわれ、放射性物質の放出、冷却材流路の変形による長期間冷却能力の低下が起こる恐れがあるからである。

それ故に、事故時のPCT、被覆管の酸化、炉心内の水素発生についての許容限界が安全評価基準で定められており、その評価のためには、被覆管の温度履歴を正確に評価する必要がある。

再冠水の過程においては、一般に、炉心が冠水するにつれて、炉心内燃料棒の被覆管の温度上昇は制限され、最高温度(Turnaround Temperature:ターンアラウンド温度)に達し、その後、冷却され始め、ある状態で被覆管表面は急冷(Quench:クエンチ)される。炉心発熱部下端に冷却材が達し、液面が上昇を開始する時刻(再冠水開始時刻)からの経過時間(Time after flood)と炉心中央部の被覆管表面温度との関係を模式的に図1に示す。

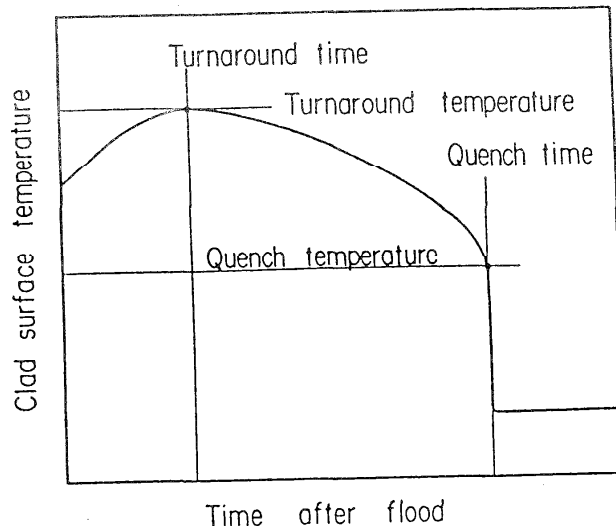


図1 再冠水開始後(Time after flood)の被覆管表面温度履歴模式図

既にクエンチした領域と未だクエンチしていない領域との境界を、クエンチフロントと定義する。また、クエンチフロントの移動速度をクエンチ速度と定義する。

再冠水現象の特徴は、炉心の冠水速度が低い場合があることと、再冠水開始時の炉心燃料温度が高く、炉心全体を冷却するのに時間がかかることである。そのため、炉心内の流動様式と熱伝達形態が共存している。しかし、原研において、PWR を対象として、本現象の研究を開始した時点では、クエンチ現象をはじめ、未クエンチ部分の熱水力挙動等について、十分な現象把握がなされていなかったため、共存している種々の流動様式および熱伝達形態を組み合わせて再冠水現象を総合的に把握することが困難であった。

このような状況下で現象を総合的に把握するためには、現象を素過程に分解し、各々にモデルを設定し、それ等を再構成し、そのモデル全体を定量的かつ、総合的に評価し、個々のモデルの問題点を探り改良するという方法をとった。そして、モデルの再構成のために、一次元再冠水解析コードREFLA の開発を同時に進めた。これは、実験結果と予測結果との定量的比較を行うのも容易であり、かつ研究の最終的な成果が計算コードの形で広く利用可能であると考えたからである。

(1) 第 1期作業

(15)

米国ウエスティングハウス社のPWR-FLECHT実験ならびに、原研で行った外側を加熱した透明石英管の内側に水を注入した単管再冠水実験で観測された流動パターンに基づいて、図 2 のような流動様式を考えた。Type1 とType2 との違いは、クエンチフロントで水温が未飽和か飽和かの違いによる。

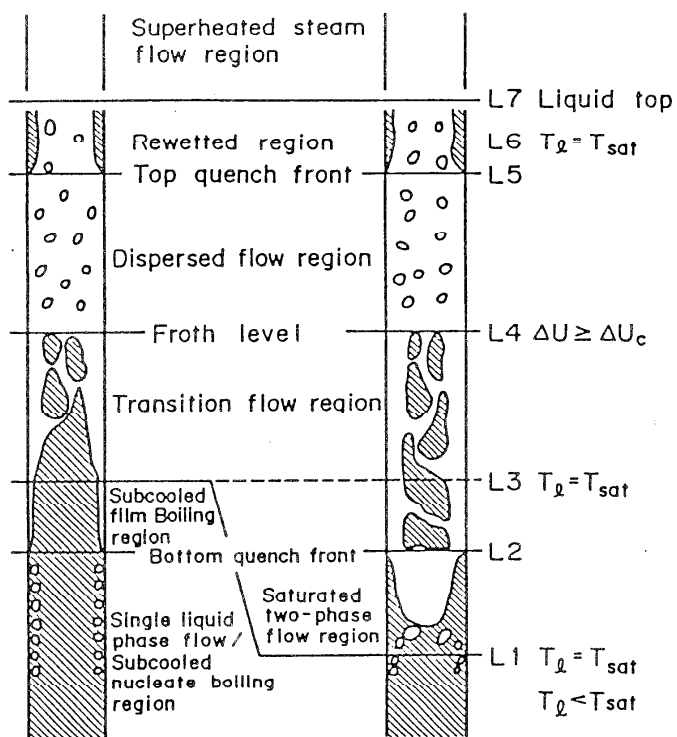
流動様式が決まれば、各流動領域の熱水力相関式を求め、流動領域の境界を定める関係式を求め、基礎方程式を解けばよいことになる。

既クエンチ領域については、従来の相関式が使えると考え、また、液滴分散流領域(Dispersed flow region)に対しても従来の手法が適用できると考えた。

遷移流領域(Transition flow region)については、Bromley 型の膜沸騰熱伝達の式と Lockhart-Martinelli のボイド率相関式が成り立つと仮定した。クエンチフロントの進行は、山内の考えのように被覆管の一次元熱伝導を考え、熱伝達は沸騰曲線で表せるものと考えた。

サブクール膜沸騰(Subcooled film boiling region)については、実験から導くものとした。実験式が数土によって導かれた。(16)

以上の仮定に基づいて組み立てたREFLA コードは、多くの問題を有していることが分かった。すなわち、沸騰伝熱として常識的な熱流束を仮定してもクエンチ速度が実測値よりずっと小さく、膜沸騰熱伝達は、遷移流領域で過小評価された。また、液滴分散流領域並びに過熱蒸気流領域では計算が不安定なため、タイムステップを非常に小さくする必要が



Type 1
 $T_l < T_{sat}$
 at quench front

Type 2
 $T_l = T_{sat}$
 at quench front

T_l : Liquid Temperature
 T_{sat} : Saturation Temperature
 ΔU : Slip velocity between two-phases
 ΔU_c : Critical slip velocity

図2 再冠水時の流動様式と流動領域の定義

あり、計算時間が非常に長くなってしまった。

(2) 第 2期作業

先ず、クエンチ速度の式を、Blair⁽¹⁷⁾、Tompson⁽¹⁸⁾の式を改良して導いた。⁽²⁰⁾これは、二次元熱伝導を解いたものであり、新たにクエンチが液体の最高過熱温度で生じ、その温度はGroeneveldが水の状態方程式から数値計算によって導いた熱力学的最高過熱温度⁽¹⁹⁾である。また、クエンチフロントでは熱伝達率ではなく熱流束が規定されており、それはサブクーラ度の関数である。と仮定し、実験データより熱流束の相関式を導いた。

液滴分散流、過熱蒸気流の計算では、基礎方程式のエネルギー式をラグランジェ型にして、タイムステップの時間で積分して、計算の安定性を確保した。蒸気の熱容量が小さいので、差分では、あるノードで壁が蒸気より十分に温度が高いと、その上のノードでは入熱のため蒸気温度が壁温度より高くなり、その上のノードでは逆に低くなる。このような不安定性を排除するためである。

また、遷移流領域の膜沸騰の式も数士の式と置き換えた。

計算の安定性は向上し、作業ははかどるようになってきた。すなわち、タイムステップが1 msのものと、100 msのものとは、試計算が数日でてくると、数分で出てくるのとのちがいであり、モデルの改良、プログラムのデバッグの能率の差は大変大きい。数分でてくれば、まだ頭は「ホット」な状態であり、結果に対して即対応がつかからである（もっとも、よく考えを整理しないで対応するようになりやすいが）。

多くの予測計算を行った結果、低冠水速度での膜沸騰熱伝達を過大評価するとともに、炉心の下方でのクエンチの進行の予測が不十分であることが分かった。

(3) 第 3期作業

そこで、膜沸騰の主流側にボイドが存在し、蒸気膜に作用する主流の静圧が(1-ボイド率)倍になると仮定して、村尾・杉本の式⁽²¹⁾を導いた。遷移流領域に本式を適用することにより、かなりよい予測ができるようになった。

原研で行った小型再冠水実験により、炉心内差圧のデータが得られるようになり、REFLA コードにより予測したところ、差圧の予測に大きな誤差があることが分かった。Yeh の式等を参考にし、ボイド率の予測のため、村尾・井口の式⁽²²⁾を導いた。この式により、よい予測が得られるようになったが、一方で、炉心内の蓄水の仕方に二つのケースがあることも分かってきた。すなわち、クエンチフロントの上に液滴分散流が主に存在するケースと短時間の内に液滴が合体しスラグ流またはチャーントービュレントフローのように成るケースである。前者は、米国のFLECHT-low-flooding 実験の低冠水速度実験で現れ⁽²³⁾

ている。ここでは、前者をケース1、後者をケース2と呼ぶことにする。

炉心下方でのクエンチフロントの進行の問題については、なかなかよい解決策が見出されなかったが、ある時、厚肉のステンレス板上でライデンフロスト実験を行っていたところ、壁温によって、液滴の挙動に定性的な違いがあることが分かった。すなわち、300度以下では、液滴の下面は激しく振動しているのに対して、より高い温度では、比較的穏やかであった。激しく振動しているのは、Berensonが極小膜沸騰温度の導出に用いた蒸気膜の水力学的不安定性モデルに対応した状態であり、穏やかな状態は壁温が熱力学的最大液体過熱温度を越えた状態に対応していると考え、この現象は説明できることが分かった。すなわち、水力学的最大液体過熱温度を考える必要のあることが分かった。桜井等の膜沸騰の実験から得られた極小膜沸騰温度は、圧力が上がるにつれて、熱力学的最大液体過熱温度に近づく傾向がある。このデータを用いてクエンチフロントの速度の式を改良した。⁽²⁵⁾

また、液滴の発生と合体についてのモデルを改良した。液滴はクエンチフロント近傍でのfloodingによる低蒸気速度で発生すると仮定し、液滴の合体については実験式を作成した。REFLAにおいては、ボイド率は気・液相対速度で与えており、流動領域の境界も気・液相対速度で与えて境界での計算量の不連続性が生ずるのを避けるようにした。

以上のようにして開発したのが、再冠水最適予測コードREFLAである。図3～図5にいくつかの計算結果を示す。原研の小型再冠水実験では、流路外管は飽和温度であり、テスト部上方で分離された液体は液膜として外管に沿って落下できる。FLECHT-low-flooding実験の場合も初めはケース1と考えられるが、流路外管がクエンチすると、ケース2に似た傾向になる。FLECHT-SEASET実験では、流路外管の肉厚が薄く熱容量が小なるため外管はすぐにクエンチするため、ケース2に近い傾向を持つのであろう。本コードは、大型再冠水試験の大型炉心に対する試験結果もケース2でよく予測できることが分かっており、流路が広いかまたはテスト部流路外管がクエンチし外管を液膜が落下できるようになり、流れに不均一性が生ずる場合、流れは一次元的ではなくなり、蒸気により吹き上げられた液体は、炉心上方で分離され、炉心を落下し、再び蒸気流により吹き上げられる。このような炉心内の再循環流(リフラックスフロー)により、炉心内蒸気流は炉心下端に流入してくる流量より高流量の冷却材を上方に吹き上げなければならず、液体は十分に加速されなくなり、ケース2が実現すると考えられる。

本コードに保守性を加えたREFLA-EMコードは、原子力工学試験センター・安全解析所において、PWRの安全評価解析のクロスチェック計算に使われる予定である。また、第4節で述べるJ-TRACコードにも、REFLAコードのモデルが組み込まれている。REFLAコードは、

燃料集合体の燃料保持用グリッドスペーサの効果、被覆管材質効果、被覆管—ペレット間ギャップ効果、半径方向出力分布効果等の原子炉の現象をより精密に表現するためのモデルの改良を進めており、最新版には、そのいくつかのものは組み込まれている。

このように、複雑な現象も個々の素過程の分析しつつ、総合化することにより、実用的なモデルをつくることができる。

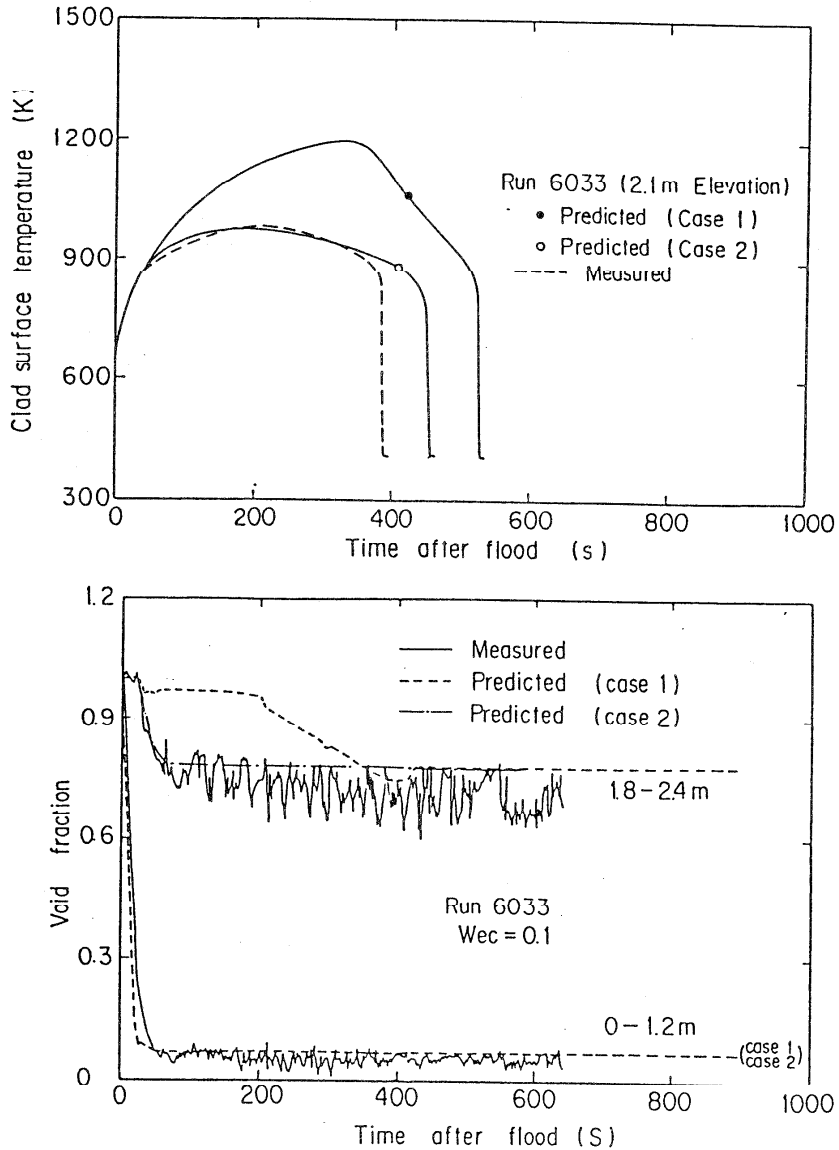


図3 原研の小型再冠水実験のREFLAコードによるシミュレーション
(上：被覆管温度履歴， 下：炉心内ボイド率)

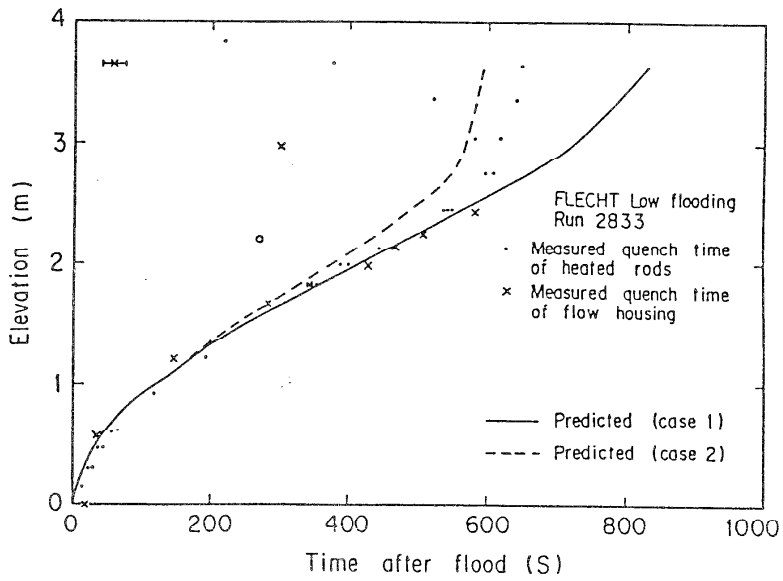
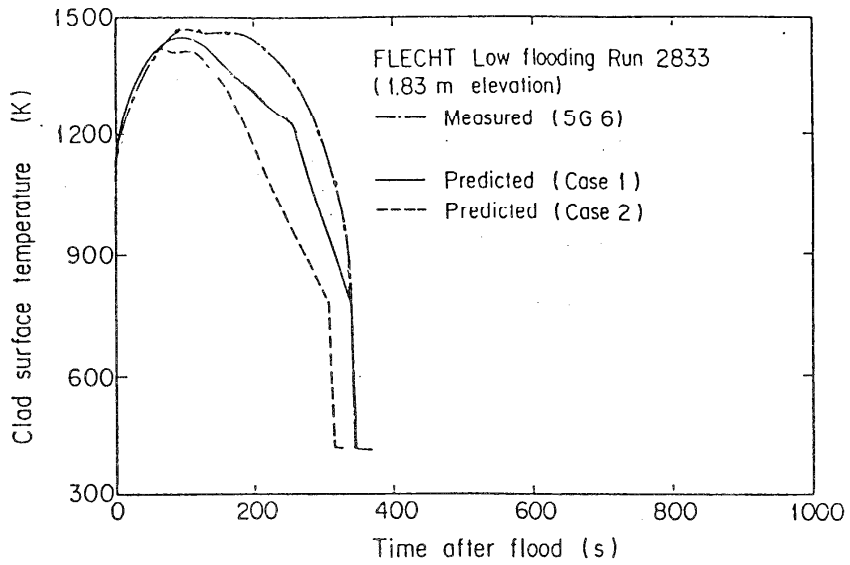


図4 FLECHT-low-flooding 実験のREFLAコード
によるシミュレーション
(上：被覆管温度履歴， 下：クエンチフロント進行)

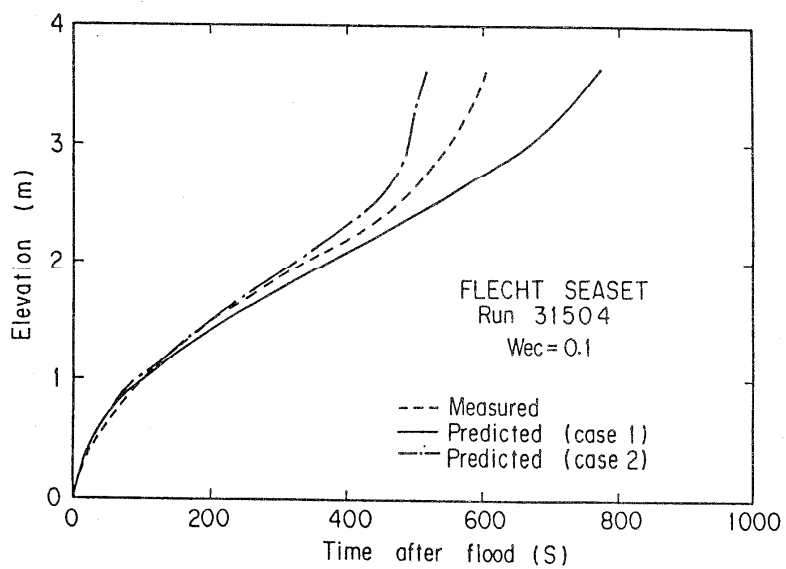
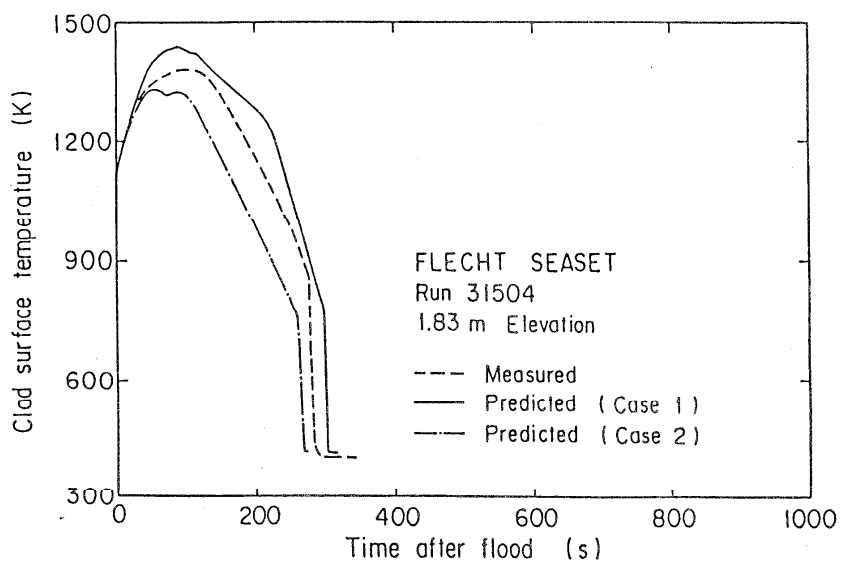


図5 FLECHT-SEASET 実験のREFLAコード
によるシミュレーション
(上：被覆管温度履歴， 下：クエンチフロント進行)

3. 二流体モデルコードにおける現象モデル化の問題点

気液二相流の気相と液相それぞれに対して質量保存則、運動量保存則並びにエネルギー保存則を立てて現象を予測するコードである。気液の運動並びに内部エネルギーに対して平衡状態を仮定する必要がないので、広範囲の過渡現象の予測に使用できるものと考えられている。

代表的なコードとしては、米国ロスアラモス国立研究所で開発されているPWR用のTRAC-PF1と米国アイダホ国立工学研究所で開発されているPWR、BWR両用のRELAP5/MOD2とBWR用のTRAC-BD1とがある。いずれも類似のものであるので、TRAC-PF1(以下TRACコードと呼ぶ)について述べることにする。

TRACコードは、現在、軽水炉の過渡事象の研究において最も注目されているコードの一つである。その理由は、本コードがコード開発者、ユーザ、安全性実験・解析者の「夢」にかなり近い形をしているからである。

TRACコードの主な特徴は次のとおりである。

- (1) 二流体モデルに基づく基礎方程式を用いた定式化
- (2) 二相流の三次元解析が可能
- (3) 物理的なメカニスティックな熱伝達モデルの組み込み
- (4) 事故シーケンスの一貫解析が可能
- (5) コンポーネント単位、機能単位のプログラムのモジュール化
- (6) 一次元熱水力方程式の解法への予測子修正法の一つであるSETS法(Stability Enhancing Two-Step Method)の使用により大きなタイムステップでの計算が可能
- (7) 制御系の模擬が可能

以上どれをとっても、利用者には魅力的なものである。本コードは、いわゆる最適予測コードの一つであり、熱水力学的現象を物理的に忠実に扱っており、原子炉システム内の広範囲の過渡事象を高精度に予測することが期待されている。実際、RELAP5、TRAC-BD1とともに、広い応用分野で各種事故、実験のシミュレーションに用いられており、実用的に大変有用なコードである。

TRACコードの心臓部は次のようになっている。

基礎方程式として、液相、混合気体、非凝縮気体、ほう素に対する連続の式、液相、混合気体についての運動方程式、混合気体、二相混合体についてのエネルギー式とドルトンの法則が用いられ、ボイド率、各相の密度、流速、内部エネルギー、圧力の連立方程式とみなして解が求められる。

上記の基礎方程式を解くためには、熱力学的な関係式に加えて、気・液相の壁面剪断応力、界面剪断応力、気・液相の壁面熱伝達、界面熱伝達、ほう素のソース項に対する関係式すなわち構成方程式を導入することが必要である。

二相流においては、これらの構成方程式は流動様式に依存するので、流動様式のマップを用意する必要がある。

ここで、本コードの物理的モデルについて、二相流研究の立場から問題点を検討してみよう。

(1) たとえ一次元の二相流に対してでも、現在このような構成方程式や流動様式マップを記述するに十分な知識を我々は有しているか。

方程式そのものの検討は他の文献に譲るとして、ここでは基礎方程式の物理的な意味を運動方程式を例として簡単に述べる。

液相の運動方程式は、ラグランジャン型にすると、ニュートンの式となるので、圧力場における液相の加速を表していることになる。蒸発と重力の効果を無視すれば、液相の加速は図 6 のように壁面剪断力と界面剪断力に影響を受けている。

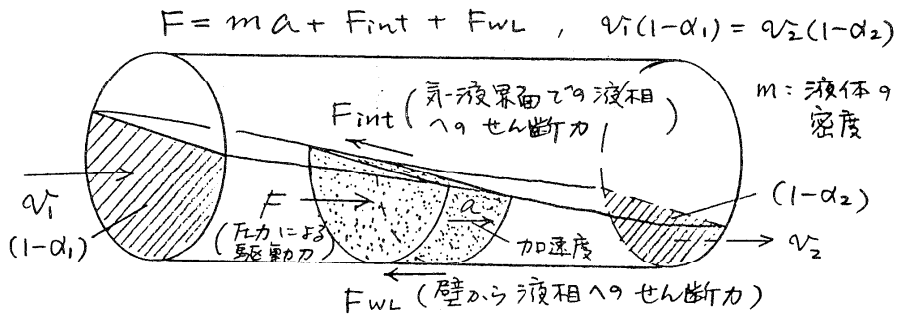


図 6 二相流内液相の加速と圧力ならびに剪断力との関係

加速度を積分して液相の速度が得られると、液相の連続の式より液体存在率、すなわち(1-ボイド率)が定まる。勿論、実際は圧力場が気・液両相の運動方程式に依存し、また各相への入熱による蒸発、各相の温度差による蒸発、凝縮、重力の項が気・液相の加速に影響を与えるために全ての基礎方程式を同時に解かなければならない。

しかも実用上許される時間内にシステム全体にわたって同時に解くため、数値解法に工夫がなされているが、物理モデルの精密化は犠牲にされてきた。二流体モデルの数値解法も種々提案されており、解法によって解が異なるとの指摘もあるが、実用的には、現在のTRACコードの解法は妥当なものであると考えられる。またこのような大規模なコードの数値計算ロジックの検討に多くの労力を割かねばならず、二相流伝熱流動の物理的な面の検証には十分な労力が割かれていないものと思われる。

例えば、上図において、液相に作用する剪断力と界面に作用する剪断力についての確立した相関式はない。これは、実験において、上記の剪断力を高精度で評価する手法が確立していないからであるとともに、一般に大型の二流体モデルコードを用いて相関式の検証

をすることも充分には行われていないからである。

次に、二相流の流動様式マップを考えることにする。TRACコードにおいては、気泡流、スラグ流と環状噴霧流が基本になっており、ボイド率と質量流量との間に図 7 のような関係を与えている。斜線の部分はその周辺領域に対応した値の内挿した値になっている。

定常二相流においても、流動様式マップは種々のものが提案されており、未だ決定版はない。さらに、過渡状態では、どの位空間的、時間的履歴の影響があるか分かっていない

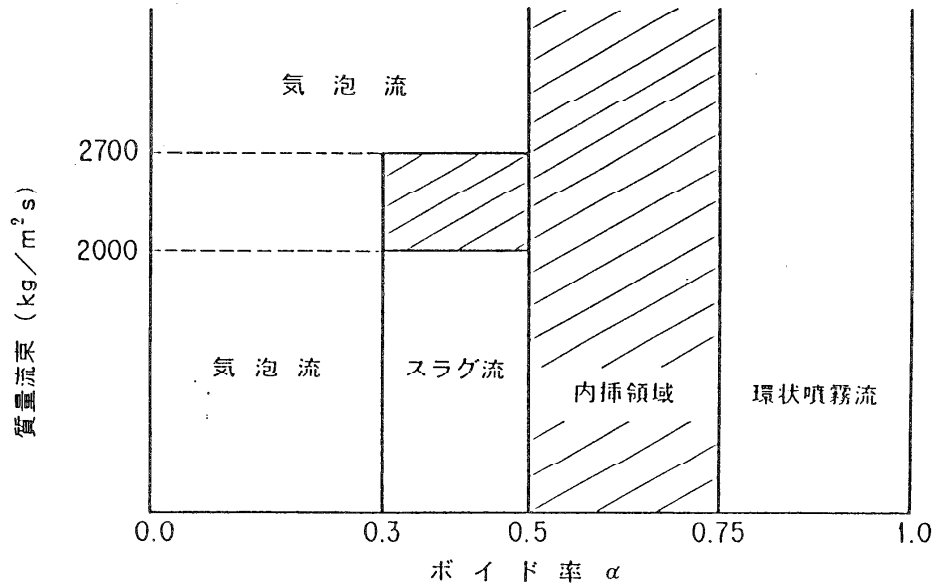


図7 TRAC-PF1 流動様式マップ

(2) 本コードにおいては、流れに直角方向の加速のない層状二相流で複雑な二相流を記述しているが、気・液各相をそれぞれ一つの速度、内部エネルギーで代表し、各相共通の圧力をあたえることで二相流は近似ができるか。

液体の存在率の変化は流れの方向と直角な方向への液体の移動によって生ずるので、液体の直角方向加速を評価する必要があるが、気・液各相の圧力を等しく置いている二流体モデルでは評価できない。

(3) 一般に二相流の測定値は有限の空間的、時間的平均値であるが、これで二相流の動特性を表現できるか。

一般に、定常二相流の実験においても、ボイド率と二点間の差圧の測定値は時間的に変動しており、時間的平均値が「測定値」として使われている。また、差圧は空間的平均値であり、ボイド率も空間的平均値である場合がある。時間の変動は、気・液界面の形状が複雑に変化するとともに、流れに直角方向への液体の移動と気体の圧縮性とのため圧力伝播速度が低下しているため、変動に対するダンピングが悪い体系になっているからであろう。

定常二相流の関係式と基礎方程式とにより、どの程度二相流の動的特性を表現できるかよく検討する必要があるだろう。

(4) 三次元二相流に対する知識は十分かどうか。

更に、TRACコードにおいては、以上述べてきた一次元においても問題があると考えられる解析手法を三次元二相流解析にも拡張している。

(5) 熱伝達については現象の理解は十分であるか。

熱伝達について考えて見ることとする。TRACコードで扱う伝熱形態は、以下のとおりである。図 8 に示す沸騰曲線によって以下に示す(A)、(B)、(C)並びに(D)の場合分けをしており、極小膜沸騰温度 T_{MIN} の選定が重要であることが分かる。また、他の条件により、(E)、(F)、(G)並びに(H)の場合分けが行われる。

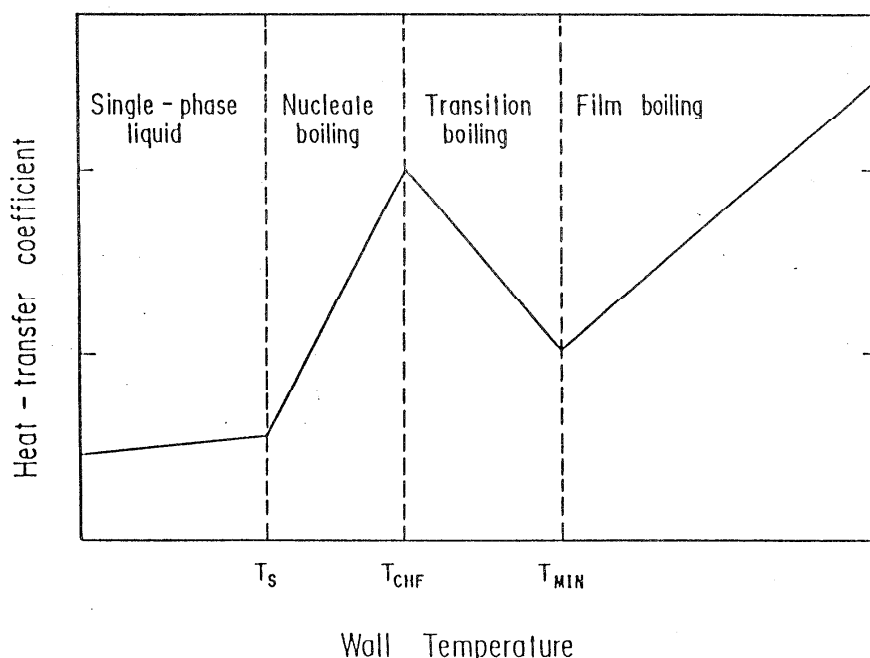


図 8 TRAC-PF1 沸騰曲線

- すなわち、
- (A) 単相液体の強制対流伝熱
 - (B) 核沸騰伝熱
 - (C) 遷移沸騰伝熱
 - (D) 膜沸騰伝熱
 - (E) 単相気体の強制対流伝熱
 - (F) 二相混合体の強制対流伝熱
 - (G) 凝縮熱伝達
 - (H) 液体による自然対流伝熱

これらのうち、(C)、(D)、(F)並びに(G)については、未だ決定版の関係式はない。また、極小膜沸騰の発生条件についても決定版はない。(G)については、サブクール液体の形状によって界面の面積が大幅に変化し伝熱量も大きく変わる。また、凝縮は図9に示すように、マイクロなものであり界面の温度境界層の発達と破壊とに大きく依存し、この温度境界層の安定性は界面のマイクロな流動による。TRACコードでは、マクロなセルの中の平均的な伝熱流動を扱っており、高精度の凝縮の予測はできないことになる。

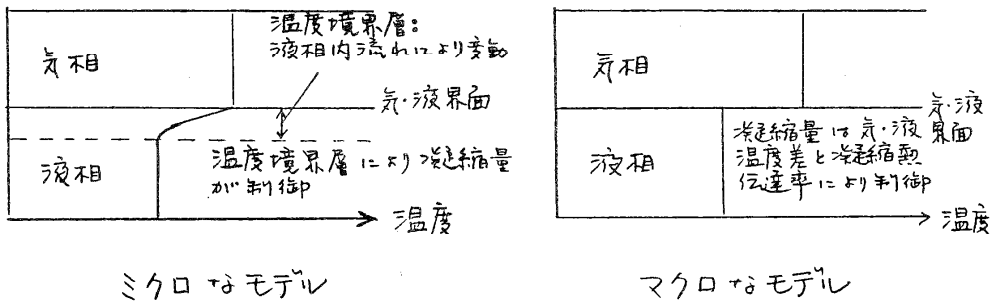


図9 凝縮挙動のマイクロなモデルとマクロなモデルとの比較

以上、物理的問題点を述べてきたが、実用的には、常識的な構成方程式、流動様式マップの選択のため、かなりよい予測結果が得られているので、少なくとも実験により検証された範囲の付近の計算に用いるには十分な精度を有していると考えられる。

しかし、適用範囲を広げ、精度を上げるためには、現象をよく理解している伝熱流動の研究者がコードの構造を十分理解した上で、現象の実用的モデル開発に参加する必要があると考えられる。

4. 今後の課題

以上、軽水炉安全性に関して、伝熱数値シミュレーションにおける物理モデルの問題点について述べてきた。現象を高精度に予測するためには、物理モデルの広範囲な条件の下での検討が必要である。そのためには、先ず、コードに使われている物理モデルの評価が必要である。原研では、二流体モデルコードの相関式をパソコンのプログラムに組み込み、国内の学会のメンバーに依頼してその相関式の評価を計画している。皆様の御参加により問題点が明らかになるものと期待しています。

問題点が明らかになれば、解決法も考えられる訳である。そうすれば、数値計算ロジックをほとんど変更しないで、例えば図 10 に示すように、ダイナミックに流動様式マップ、相関式の係数とか判定文のロジックを変化させ、数値計算ロジックを「だまし」て、よりリアルな物理モデルを計算コードに組み込むことも可能である。

経験的知識の蓄積はあるが、具体的な関係式のないものでも、AI(人工知能)の手法で計算コードに組み込むことができるであろう。

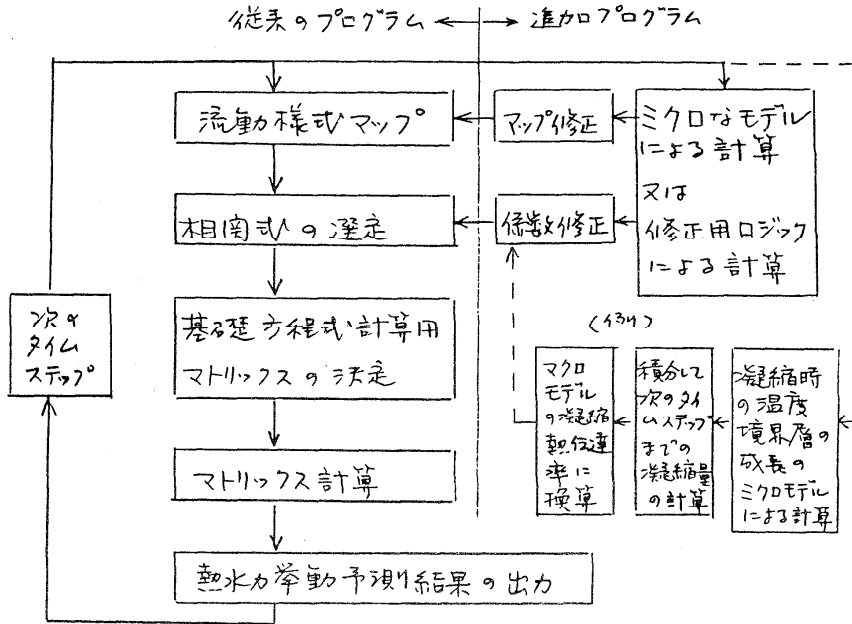


図 10 二流体モデルコードの物理モデル改良の一方法

原研においては、TRAC-PP1コードの約10万行のリストを分析し、高精度の物理モデルの組み込みの準備を進めている。J-TRACまたは、ジャリトラック(JAERI-TRAC)コードと呼び、現在、第2節で述べたREFLAコードのモデルを組み込んでいる。その試作版で大型再

冠水円筒炉心試験のシミュレーションを行った結果、図 11 に示すような良好な成果が得られた。しかも、計算速度は、原TRACコードの約40倍の速さであった。これは、原TRACコードでは計算が不安定で、小さいタイムステップで計算せざるを得なかったのが、J-TRACコードでは、計算が安定になったため、TRACコードのSETS法が有効に働き、クーラン限界より大きなタイムステップで計算できたからである。

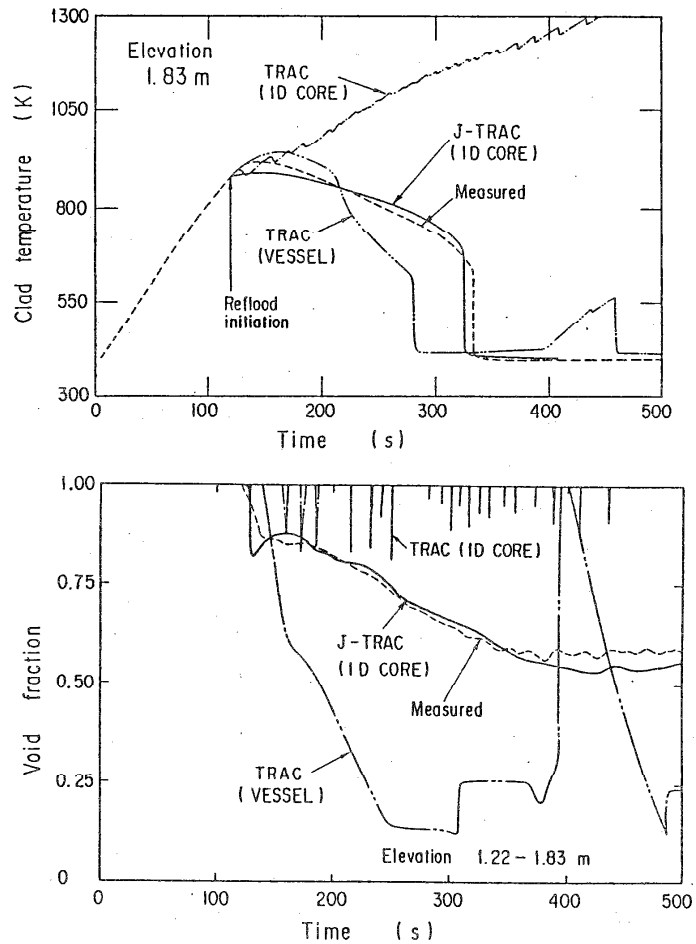


図 11 J-TRACコード（1次元モデル）による大型再冠水円筒炉心試験のシミュレーション（原TRACコードによる1D CORE（1次元モデル）、VESSEL（3次元モデル）を用いた場合の結果を比較のために示す。上：被覆管温度履歴，下：炉心内ボイド率）

このように、物理モデルの改良は比較的簡単なものでも、大きな成果が得られると考えられます。皆様の多方面にわたる知識・経験の蓄積が活用できれば、それらがJ-TRACコードのなかで総合化でき、真の熱水力最適シミュレーションが可能になるものと思います。是非とも、皆様の御協力をお願いする次第です。

参考文献

- (1) Ball, L. J. et al.: TREE NUREG-1210, (1978)
- (2) USAEC : WREM : Water Reactor Evaluation Model, NUREG-75/056, (1975)
- (3) Liles, D., et al;.: TRAC-PF1/MOD1; an advanced best-estimate computer program for pressurized water reactor thermal-hydraulic analysis, NUREG/CR-3567, LA-9945-MS, (1984)
- (4) Ranson, V. H., et al.: RELAP5/MOD1 code manual Volume 1 system models and numerical methods, NUREG/CR-1826, EGG-2070, (1982)
- (5) Taylor, D. D., et al.: TRAC-BD1/MOD1 ; an advanced best estimate computer program for boiling water reactor transient analysis volume 1 model description, NUREG/CR 3633, EGG-2294 volume 1, (1984)
- (6) Tasaka, K., et al.: Proc. CSNI Specialist Mtg. Decay Heat Removal Systems, Apr. 25~29, 1983. Wurenlingen Switzerland, (1983)
- (7) Hirano, Y., et al.: Proc. 2nd Int. Topical Mtg. on Nucl. Power Plant Thermal Hydraulics and Operations, April 15~17, 1986, Tokyo Japan, PPI-88 ~ 1-94 (1986)
- (8) Kuwabara, K., et al.: ibid., PP.2 41 ~ 2-47
- (9) Kikuta, M., et al.: Proc. 3rd Int. Topical MTg. on Reactor Thermal Hydraulics, Newport, Rhode Island, USA, Oct. 15 ~ 18, 1985
- (10) Tasaka, K., et al.: ROSA-III Program at JAERI for BWR LOCA/ECCS Integral Test, Proc. ANS/ENS Topical MTg. on Thermal Reactor Safety, Knoxville, Tennessee, Apr. 6~9, 1980
- (11) Murase, M., et al.: J. Nucl. Sci. Technol., 22[3], PP.213, (1985)
- (12) Nagasaka, H., et al.: J. Nucl. Sci. Technol., 22[11], PP.963, (1985)
- (13) 長坂, 他 :原子力学会「昭和60年分科会」予稿集, A43,他
- (14) 村尾 :再冠水過程における原子炉炉心内熱水力現象の研究, JAERI-M 83-032, (1983)
- (15) Cadek, F. F.他, WCAP-7665, (1971)

- (16) Sudo, Y., J. Nucl. Sci. Technol., 17[7], PP.516, (1980)
- (17) Blair, J. M., Nucl. Eng. Design, 25, PP.379, (1973)
- (18) Thompson, T. S., AECL-5060, (1975)
- (19) Groeneveld, D. C., AECL-4309, (1972)
- (20) Murao, Y.: Correlation of Quench phenomena for Bottom Flooding during Loss-of-Coolant Accidents, J. Nucl. Sci. Technol., 15[12], PP.675, (1978)
- (21) Murao, Y. and Sugimoto, J.: Correlation of Heat Transfer Coefficient for Saturated Film Boiling during Reflood phase Prior to Quenching. J. Nucl. Sci. Technol., 18[4], (1981)
- (22) Murao, Y. and Iguchi, T.: Experimental Modelings of Core Hydrodynamics during Reflood phase of LOCA, J. Nucl. Sci. Technol., 19[8], PP.613, (1982)
- (23) Lilly, G. P. et al.: WCAP-8834, (1977)
- (24) Sakurai, A. et al.: 1980 ICHMT International Seminar, Nuclear Reactor Safety Heat Transfer, Dobrovnik, Yugoslavia, (1980)
- (25) 村尾 : 熱力学的過熱限界温度以下でのクエンチ・モデル, JAERI-M-10000, (1982)
- (26) Rosal, E. R.他 : WCAP-9108 (1977)

<放談会、下>

日本伝熱研究会のゆくえ (放談会) (下)

(1986年の11月に機械系の数人が集り、アルコールの勢いもかりて放談しているのを収録することに成功しました。)

(1月号からの続き)

F: ちょっとひとつ疑問なのはね、アメリカと日本の人口比みたいなものを考えて、まあ、2対1くらいかな、それで今度のハワイのシンポジウムの投稿を見ますね、米国からはかなり限定されたテーマにかなり5編とか6編とかいう論文が集まっている訳ですね。特にアメリカのサンフランシスコの会議なんかでね、見たら、論文の内容というか、質的なものを比べたらね、日本の方がかなり高いものが多い。だけど、多様化と言うかな、ある特定のテーマに集中する能力っていうのは、アメリカはものすごく優れていますよね。

G: そうですね。

F: だから日本でもそういう方向に行かないと、新しい、種になるものもね、そういうものの積み重ねだと思っただけですね。ある特定の領域にコンセントレートしていったらね、決してコンセントレートした先で良いものができるんじゃないかと、むしろ、バラエティをもった中で出てくるんだと思っただけですね。

D: 僕は別の面もあると思うな。

F: そうですか。

D: 皆さんがそれだけ四苦八苦しているのになぜ出ないかって言うのはね、結局忙しいからなんです。それは、学生に論文を書せなければいけない。それがあから拘束されるので、それが無ければ自由になって、もっと仕事ができると思うな。教育や研究の補助の設備とかセクレタリーとか、外国並の組織が日本にもあれば余分な雑用をしなくてよくなる。(笑)。

H: アメリカでは、condensationとかboilingとかいう一般的なテーマじゃないものに対する、何と言おうか、志向性がもう少し強いんじゃないかな。ざつぱらんに言えば、そのテーマでお金を貰うというような面。日本では教科書的なテーマをやっていると、お金が貰える(笑)。そうしていると、予算も付くし科研費もくる。

D: なるほど、その面もある。

F: 完成度が低くても、ある特定の領域においてオリジナリティのある論文が出てくれば

良い。論文のクオリティを要求しないだけ、おもしろい方向に向けば良いと思っているんですけども。ですから、伝熱研究会でもテーマにバラエティを持たせることによって、各自のオリジナリティが出てくるように持っていく方が良いと思うんですけどね。

E: 何年も前に、甲藤先生が機械学会の校閲委員会の席で話されたことですが、ASMEに出ている論文を例にとって、このような論文は実用的価値が高いので掲載可として欲しいというのがありました。つまり、水の入っている槽の中に高温の粉体を入れていくんですが、粉体は下に沈降して急に突沸が起きる。それが危険を伴うので、それを防止するにはどうしたら良いかと言うと、下に粘土のような層を入れておくと全然突沸が起きないという論文でした。理屈は何も無いという。`粘土層を下に置けば安全ですよ`と言う。ところが、日本では下に粘土を置いて実験やったと、シンポジウムで発表もしないでしょう(笑)。

F: 僕は受け付けられない方がシステムとしては具合が悪いと思う。

E: こんな論文もある。ロケットの推進の方法のひとつに、ロケットの後ろに大きなプレッシャープレートを設けて、小さな原爆を作って爆発させてプレッシャープレートを押す。小さな原爆を何個も持って行って、ボンボン捨てながら推進していく。これはちゃんとした論文になっている。もう何十年も前に、このアイデアは原子力推進ロケットのひとつの中にある。こういうのが記録として残るという事で、書く勇気のある日本人は多分いないのではないか。

H: しかし、おかしい話ですよ。

D: そういう事だったら、アインシュタインの論文は、日本では、ボツになるね。式は、わかっていて解釈しただけですね。

F: だから、厳密さを要求させるということは必ずしもプラスになるとは限らない。

G: そういう意味では、伝熱研究会が全く査読なしに講演論文集に掲載してくれる役割は大きいのではないですかね。その上、大先生方が一応つきあって議論もして下さる。あの雰囲気は何としても残して欲しいですね。特に、最近、機械学会がガッチリ査読するようになりましたから、伝熱研究会の果たしている役割は大きいような気がします。

H: ただ、分野が広がらないと。

G: そうですね、ちょっと偏っていますね。

H: やっぱりトピックスを作って無理矢理でも出てきてもらわなければ。

A: 何年かはそうやって工夫していかなければいけないかも知れない。

B: ただ、今、伝熱シンポジウムの話で、去年は 250件くらいでしょ。そうしますと、目次のページ数でも大変で、誰がどんな研究をしているのか見るのは大変ですよ。バツと見てすぐわかるものを考えて欲しい。会場に5台くらいパソコンを置いて、検索が

パッとできるように。会場で逢っても、今度は何を発表したんですかということでは
... (笑)。

E: 今もそういうことを聞いても恥しくないでしょ (笑)。シンポジウム初期の頃は、誰
がどんな研究をしているか、手法、進行状況まで知っていないと門外漢のように肩身
が狭かった。お互い、相手の事を知っていたものですね。懐古趣味かな。

H: しかし、250編もあれば3日間でも一杯でしょ。

G: 何かあのセッションのやりかたを変えたいですね。

B: 何か良いアイデアはありませんか。

G: 私なんか地方なんですけど、地方の先生だと大過なくやる傾向があると思います。

B: それはそうでしょう。

G: そうすると冒険はできなくなる。

E: でも、次のシンポジウムでは、質疑応答できる方が登壇するように書いてあり、惰性
を破る努力は伺えますよ。

B: ところで、あなたがち学生が講演して、他の人が解答するのも良いんじゃないかと思
いますが。シンポジウムだから。何も全部受け答えまで一人でやることはないのでは
ないかとちょっと思ったのですがね。

E: 今は、伝熱シンポジウムに限らず、発表論文というのは大体大学院の修士の教育課程
と非常に関わりがあるでしょ。

D: それが間違っているんだ (笑)。

E: 大体同じ歩調になっているんですよ。

D: そうなんです。だから、こっちが苦勞するんで、良いものが出ないんだ (笑)。

F: だから、修士を大過なくまとめた結果なんだから、大過のありようが無い訳なんです
よ (笑)。ありようが無い。

G: 中身も二年で完結するようなものなんです。

E: だけど、私、1ヶ月半で修士論文を作ったことがありますよ (笑)。それは胃が痛く
なるように気掛りになっていたことでしたが、...。どうして覚えているかという
と、学生が修士2年生になったときの年賀状に日めくりカレンダーの絵を描いてくれた
んです。それが、修論の発表日が2月の何日かと書いてあるんです。そのとき日めく
りの綴った紙がずーっと上に並べて書いてあるんです。もう残り僅かとなりましたと
書いてある。ところが修論はそのときまで全然できていない。幾つかやったんだけれ
どもできなかった。だけどね、最後にワーッとやってね、1月ちょっとでやりました
。プラズマ中での固体ペレットの蒸発の問題で、結果的には解析だけですが割と良く
まとまり、印刷論文になりました。しかし、その意味では冒険しすぎたんですね。

D: でもね、それが一つだったから良いんで、二つも三つも、... (笑)。

C: だから、100%完成品でなくても良いという風潮を作れば良い。地方グループ活動あた

りでは完成品でなく、途上のやつでもしていますが、やっぱりどうしても、。。。できるだけパーフェクトに、資料も制限なしですからね、たっぷり付けてありますよ。

- A : 人前で話すのに変な事を喋べっちゃいけないというんで。
- C : 例えば、ああいうのも逆に考えればスライドも数枚とすると、かえってポイントで何を伝えなければいけないか。。。そうすると聞く方は薄まったものよりも得るものは多いと思う。
- D : しかしね、ここにおられる方はフランクに言えるかもしれないが、学生が話をするときも気になってしょうがない先生もいる訳よ。
- C : だから、そういうような雰囲気を作らないといけない。もちろん、緊張感を無くしたらいいんですが、あまり緊張していたら。形式ばかり追うような雰囲気じゃなくて、自由に本当の気持が述べられる、批判も自由に受け入れる。何となく、ごまかしじゃないけど、うまく言い抜けてという形じゃなく。
- B : 先程、F先生が言われた、日本と米国との人口の比率で2倍くらいで、研究者の層というのは数で言うとどういう具合ですか。
- E : 2倍以上でしょう。多いんじゃないかと思えます。
- F : どうも、工学部の学生の数からすれば、パーセンテージの上からは日本の方が上ですよ。
- E : ASMEは10万人を越えているでしょ。
- F : 11万人とか12万人とか。その3倍位いますねかね。
- E : 人口比率より、予算額にしても、人口比率以上に金が無いといっても。。。。
- F : 僕はね、米国の場合には専門に対する意識というのは、日本の工学部に対する学生の意識と大分違う。熱をやった学生は最後まで熱をやりたい意識が強い。だから、学会に対して、自分の専門分野に対する知識を得ようという欲求の程度が日本と米国では違うと思う。
- B : 米国では知識を売りものにしていかなければならない。
- F : だからその点、米国の方が楽と言えば楽ですね。ただその比率から言ったら、どういう格好にせよ、ある特殊なテーマを立てたときに集まる論文の数は絶対に日本の方が少ない。
- E : そういう気がする。
- B : あれはもう一つは、彼等はコントラクトを取らなければならないからですよ。
- F : 新しいものは、ドライビングフォースが金であろうとやっぱりそういうものがあつた方がクリエイティブなものが出てくる可能性が高い。
- H : それには、自分では行っても良いと思ってんだが、人目をはばかって行けない(笑)。

- H : 10年位やってから、そっちの方へ行ってみようかなどと考える。
- F : それは恥の文化だな。だけど、学会でこんな事を言ったら恥になるといった事が、ある特定の分野をものすごく深くする可能性はある。
- E : 日本の社会は恥では終らないんだよね。
- F : 終れば良いんだけど(笑)。
- E : もう落印を押されて、浮かび上がれない(笑)。
- F : 一時の恥では無い(笑)。
- D : それは、良くないね。
- F : それは確かにありますね。あの先生はああいうことをやったんだって。
- B : だから、付いて廻ってもいいような人しかやらない(笑)。
- D : それはそうかもしれないな。
- B : あの辺の先生が、あの位の事をやっているんだからと言ってね・・・。
- E : だけど、そういう範囲に収まらないですよ。あの先生この頃少しおかしいんじゃないかというようなことがさきやかれることがある(笑)。日本の社会は。
- E : 人生が変わることもある。
- F : だから、そういうのは決して良いことではないですよ。今からは大分変わるんだ(笑)。
- G : そういう意味で、皇室、特に天皇陛下あたりはお好きなテレビ番組を尋ねられても、なかなか答えないでしょう。うっかり答えると特定の番組をひいきにしてしまう。だから、大先生の発言は非常に重要ですよね。
- F : そうなんですよ。
- G : むしろ、中堅クラスの方が強烈に質問した論文を大先生がカバーして下さると、かなり思いきった研究も出てくる様に思います。
- H : しかし、日本的な発想でいえばね、そうやってシゴかれてもね、挫けずにとるのが大切なんですよ(笑)。
- G : 今日、ここにおられる方々はくじけなかった訳ですね(笑)。
- F : だけど、全体の雰囲気としてね、やっぱり異端的な事をやったら、潰そうというイメージがあったんじゃないかと思います。
- B : でも、今は大分良くなったね。
- H : まあ、年をとったからそういう事が言えるんじゃないか。
- D : そういった意味では良い面があるんだから、もっと伸ばさなければと思いますね。
- E : ここにおられる方は皆、機械工学の方なんですけど、最近、熱とかエネルギー関係に良い学生が来る傾向というのがありますか。
- D : 我々は幸福なんですけどね。
- B : エンジンとかハードとかは人気が無い。その点、光はこの頃大分良くなった。

- H : そのなかでも熱関係はやっぱり人気は無いようですね。
- E : オイルショックの頃はやっぱり有ったでしょ。
- H : うん、やっぱり、熱の人気というより、先生の人気によるところが大きい。あそこの研究室に行きたいとか。
- B : 僕の所は学部の人に`くじ引き`で卒論を決めるんです。そこで半年位いると、大学院になってもそこに残るといことになり、あまり先生がどうこうということは無い。
- H : 最近はそのいうふうになってきたかも知れないな。
- F : 先生のおっしゃることは、熱の人気が昔に比べて落ちてきているんではということですか。
- E : 僕は落ちてきているように思うんです。機械の方では、やはり、メカトロとかロボットの方に非常に受験生の関心が集まっていますね。受験生の中には、機械工学の中に熱とかエネルギーが入っているとは知りませんから。(笑) 我々も受験生に関しては全く無関心ですからね。 オイルショックの直後から、熱とか流体というのは、かなり人気があったと思うんですがね。
- C : 前々から、楽な仕事をしようというのが多いわけですね。
- E : それは多いですね。
- C : ですから、力学とか制御とか要するにコンピュータを使って、あまり実験をしなくていいような方へ行く傾向は強いですね。まあたまたま、そういうことでなく本当に好きなのに来たりしますけど、平均的にみてあまりいいのは来ていませんね平均するとやっぱり、どちらかと言うとソフト傾向の強い学問分野、研究分野に卒論の学生は行きますね。それから後は、先程の話のように大体、そこの研究室へ行くと、そのまま大学院へ行く傾向が強いですね。
- E : 伝熱学の将来と若い人に魅力があるという問題とかなり関係があると思いますね。
- B : 化学あたりは、かなり人気は落ちましてね、それで化学の各学会は高校生からPRをするということで、今、挽回してきたところですね。
- C : どこでもやっているわけですね、私の大学でも新素材は、化学の分野であると言って、いろんな事例を引いて、全部、応用化学とか合成化学とかと関係があるとかと言って・・・。本も出ていますしね。やはり、そう取り組むのが必要なんでしょうね。しかし、熱というとなんとなくバツとしていませんしね、物に直接結びつくと言えないですしね。
- F : もって嫌われる理由は、教えていてそう思うけれど、入って来て一番最初に、熱というのは熱力学を教えるでしょ、熱力学の第一法則はまだいいけれど、すぐに、第二法則が出て来て、あそこでエントロピーがあって dQ/T よりも大きいとか小さいと言われても、あれから入って行ける人は少ないと思うんですよね。伝熱学位いから教え

てそのバックグラウンドとして熱力の第二法則があるという教え方をしないとだめだ
と思いますね。

E：同感です。

A：僕もそう思うんだけど、教え方も歴史的なものに則っているんじゃないかという気が
します。伝熱というのは熱力学の後で教えている気がしますね。

D：伝熱の方が早い。熱力学よりも。

A：でも、伝熱学の授業としては遅いですよ。ですからね、2年生位に熱力を教えて、
3年生位に伝熱学を教えるという型通りの方法を一般にはとっています。

D：でも、歴史的には、そうではない。

A：いや、授業の歴史としては、伝熱の方が遅いですよ。

C：どこでもやはり熱力は、先に教えているでしょうでしょ。

D：何故、難しいかと言うと、論理でしょ。論理が弱いんだよ。近頃の人には。

B：それとね、伝熱というのは非平衡なんですけど熱力を教えてしまうものだから問題があ
る。もう一つは、多分どこの大学でも統計力学というやっているとと思うのだが、統計
力学と工業熱力学とのギャップがあるのかもしれないね。先程、F先生が言われた
ように、エントロピーというのは、分子運動の方からいくと情報のエントロピーとま
ったく同じで、非常に理解しやすい。ところが、 dQ/T のような、いわゆるクラジ
ウス理論でこういう定義だとしてやるものだから、ボルツマン流のエントロピーが理
解できない。だから、その辺を結びつけて教えてやらないとだめなんじゃないか。

F：エントロピーなんて最後の最後まで教えなくても、どこにも関係ないわけですよ。
常識的に言えば、「熱は温度の高いところから低いところへ伝わる」と言えば、すむ
事な訳ですよ。

B：いや、それは、どうしてかということですよ。それじゃ、もう学生達は興味を失う訳
ですよ。（大笑）

F：それなら、理解できるけどね。

B：いやいや、例えば水というものが高い方から低い方へ流れるものだと覚えろと言われ
れば、それは誰だって面白くなくなりますよ。

全員：大笑い

D：重要な問題なので、なかなかすぐには片付かないね。

F：でもやっぱり、教える順序としては伝熱学の方が興味を持ってくれると思いますね。

H：現象に即していますね。

F：はやい話がカルノーサイクルが出て来た所で、実際世の中どこでカルノーサイクルが
動いているんですか、頭の中の産物じゃないですか、...

B：じゃ何故カリキュラムに載せて置くんですか。取ってしまえば良い。

D：それは改めて議論しないとだめですな。（笑）

H : 難しい事は確かですね。

C : だから、熱力学が簡単にわかる人は、あれほど簡単なものはないという人もいますね。だから後はずっとスムーズに行く。あれで嫌いになると熱は嫌いということがありますね。でも今は割合熱の判からないのが多いですね。

F : 昔は、そのわからないところが良いという学生がいたと思うんですよ。今の学生には何も好き好んで苦勞はしなくてもというところがあると思うんですよ。

C : 省エネということですね。

G : それは強いですね。

C : 従来のやり方じゃなくて、相手に応じてやり方を変えなければいけないですね。難しいですね。

E : もうひとつは、今日まだ話題になってないんですけど、伝熱シンポジウムの外国人の発表をもっとフリーに、積極的に推進した方が良いんじゃないですか。

B : ただ、伝熱シンポジウムの会員でない人でもね。

H : 今は誰でも発表できるんですか。

A : 現在は、会員になれと言ってるんですよ。日本機械学会にも何も入っていないのでね。

G : 会員になるとしても大したお金ではないですよ。

F : 研究の内容をバラエティ化の意味で、日本のフィーリングではないものを積極的に取り上げることとできることだと思いますし。

A : 例えば募集要綱をね、call for paperを英語で書いて遠くへ出すとかね。中国と韓国にするとか。

E : 韓国あたりは、燃焼研究会、燃焼シンポジウムなんか、留学経験者が出てますよ。

D : だけど、中国が難しいですね。投稿しても来ないでしょうね。

H : そうでしょうね。

F : call for paperをアメリカに出すと、来るのかな、来るかもしれない。(笑)

F : 英語で良いとするならね。原則として来なければ取り上げないという格好で。この間のH先生のところの方のように英語で発表しても何の支障も無いわけでしたよね。採算ベースさえ合えば、いろんな分野からいろんな論文が来て良いと思うんですけどね。

H : 旅費に比べれば大したことは無いですね。

B : 何時の頃からか、後ろに英語でアブストラクトが載るようになりましたね。

E : あれは評判が良いですね。何人かのアメリカ人からいつも送ってくれと言われますね。3人位いますね。

G : 私も、欧米の方から、講演論文集に載ったpaperをくれ、という経験が何件がありますね。どうして日本語で書かれた研究の存在を知っているのかと思ったら、巻末の英

文アブストラクトを見て要求してきているみたいですね。

B：なるほどね。でも今、論文集はそんなルートが無いですね。

G：そうですね。どこからか、そういう情報が行くんでしょね。

B：アメリカは今、2件くらいしか来てないですからね。

B：今度のASMEとJSMEの会議で、韓国は何件位あるんですかね。

H：韓国は数件ありますね。韓国はこれから多くなるんじゃないですかね。

B：話は変わりますが、伝熱研究会の組織として、学会にするか、しない方が良いかという話が前からあるのですが、これに関する御意見はどうですか。今のところは2つ考え方がありまして、一つはやはり同好会的な要素でやるべきであると言うのと、もう一つはちゃんとした学会にして、論文発表が認められた業績として発行できるようにすべきであるという事です。まあ、大分議論されている問題なのですが。

H：経済的な事から言うと、文部省の認可を受けた社団法人のような学会にするのは難しいですね。今の程度の会員数と会費では、それは、まあ、やりたくてもできない。努力しても、おそらくできないだろうと。ただ、流れの可視化学会みたいに、学会を名乗って論文集を出すことはできるわけですね。ですから、それをやるかどうかという話になるのではないですかね。

B：文部省の認可を受けるのが難しいというのは、例えば、どの位だとできそうかどうかというのですか。

H：専任の事務員を雇うとか、ちゃんとした事務室を持つとか、いくつか条件があって、それは東京だと難しいという事かもしれませんね。それから、毎年文部省からの監査への対応をちゃんとやらなければいけない。それと基本財産か何かが必要なのですかね。

B：基本財産が何千万か要るでしょう。それは使ってはいけないものですね。

E：それは財団法人でしょ。

H：いや、社団法人もそうです。

E：財団法人というのは、ある程度基金があって、それを元にしていろいろ運営していくものですね。社団法人もそうですか。

H：ええ、そうですね。

E：社団法人というのは、会員の会費でいろいろ賄うというものです。

H：それは、塑性加工学会に聞きにいきましたね。何年か前に。それ位ではとても無理でしょう。大体わずらわしいからやめた方がいいですよと言われました。(笑)

H：あとは、論文集を出すか出さないかで意見が分れると思うんです。熱物性研究会は、わずか300人余りの会合で、今度は論文を載せようというわけです。

A：まあ、それは意欲の問題で、誰か一人献身的な人がいれば論文をのせる位はできますね。流体力学学会でも、そのような人がいてやっています。

- E : 流体力学学会は2,000人位はいるでしょ。
- B : いや、僕が聞いたところでは800人とかいう話でしたが。
- F : でも、流体力学学会は今度、流体という本を出しますよね。
- E : 今、「流れ」というのがありますね。
- F : いや、伝熱工学資料に相当するような本を。
- E : そうですか、ガスタービン学会というのは法人化したものですね。
- H : あれは企業の会員が多いですね。
- B : 太陽エネルギー学会は事務所を持って事務員が2人です。あれは会員1,000人、維持会員が70人。
- H : やっぱり大変ですね。
- A : 論文集とか出れば、また会員数を増やせる可能性もあるかもしれませんね。今、若い人ほとんどが会員になっていないですね。今やっているのは伝熱シンポジウムだけだから、伝熱シンポジウムに投稿するには、何も伝熱研究会に入っている必要は全く無く、機械学会かどこかに入っていればいいわけですから。調べたら、発表している若い人で伝熱研究会に入ってる人は、ほとんどいないです。
- G : 我々が若い時は、そういう発想はしませんでしたけれども。
- A : 特に、大学院あたりの人はものすごく少ないです。
- G : 私のところは全員入っています。
- A : 先生のところは、特別ですね。今、学生会員は、ものすごく少ないですよ。入る必要が、今のところは、無いわけですね。シンポジウムには機械学会入っていればいいわけだから、別にダブルに入る必要は全然ないわけですよ。
- F : でも、学会にしなければいけない必然性は全然ないんじゃないんですか。
- A : 今のところはね。ただ、このまま、ずっとそれでいいかどうかという問題だと思えます。シンポジウムだけやっていて、それで満足するというのであればそれでいいし。
- F : だけど、今までの議論からすれば、シンポジウムそのものがマンネリ化しているわけだから、その上、これで学会にしたところであまりうまく行くわけがない。
- A : だから、学会にでもして、シンポジウムを別の方向で全体的に広げて行くということやらなければならないかもしれない。そうでなく、シンポジウムやセミナーをやって今まで通りで良いというのであれば、そのまま良いでしょう。
- H : 折衷案として、伝熱学会という名前だけ名乗ったらどうかと思うんですが。中味は何もない。(笑)
- D : 研究会というのは、あまり格好良くないですね。
- H : 何処かで、20人位集ってやっている。
- D : 対外的には格好良くないですね。
- B : 維持会員を増強しようと言う時、ある先生に、「お前、事務局だから、こういう所へ

交渉してきたから、資料を持って説明に行け」と言われたわけですよ。まず、説明に行く前に、電話でこういう事で、説明に行きたいと言ったところ「研究会ですか」と言われてしまいました。向こうは、同好会だと思つたというわけですよ。「何人位の研究会ですか」と言われたので、「1,000人です」と答えたら、「そんなに大きな研究会ですか」と言われました。（大笑）

G：H先生の案が、すぐ出来るので、良いのではないですか。

B：すぐでもないのですよ。会則を変えなければならないから。

H：總會までいかなければいけないですね。

A：確かに、所属学会を書くという時に、伝熱研究会は書いて良いか、どうかと思ひますね。

E：私は迷わず書くけど。研究会とは、こういうものかと思つていたから。そこが、やっぱり、ある特定の先生が例えば自分の講座でちょっと何かやるものを研究会と名づけますよね。

G：名前だけ変えるのならば抵抗はないでしょうね。

F：いや、それが抵抗あるのではないですか。

B：名前だけでもあるかもしれないね。

H：第一歩だと思つると抵抗がありますね。（笑）

B：今のままで、段々位相がずれて、ある時、なくなる可能性があるのではないかと思うのですが。

C：会員の年齢構成がすり鉢形になっているのは、定常的になっているのか、あるいは、どんどん落ちて行くのか、どうなのでしょうね。下の方。

B：下の方は増えませんね。

C：今のままだと増えませんね。

H：会員でないと喋れないという形は取れないですか。

A：取ると減るでしょう。

G：どの世代が減るかですね。各世代のバランスがとれれば、ある意味の目的は達する訳ですね。

C：下は増えないんじゃないですかね。

G：指導教官としては、会員でなければ喋れないんだから、入会するように、1回は言うでしょうね。それで会社へ入ってからはどうなのかですね。

C：それは、参加費を払うんだから前刷が当然くるんだから会員になれと、言ってもなかなかですね。

G：ああそうですか、私のところは、何とか会員にさせていただきますね。

C：いる所だけコピーして。ひどいものになると参加費も払わないと。（笑）そういう考え方が結構多いですからね。今の会員の範囲内でしょうとするといろいろ難しいという

事でしょうね。ですから、学会にいろいろな企画もして、論文集も出したりして、そうすれば直ると思うんですが、難しいですね。

- A：今の「伝熱研究」をもう少し充実して若い人にも魅力あるようにできるかどうかわからないけど、何とかするというのも1つの方法ですね。
- C：そういうやり方である程度回復できるのかそれとも、伝熱研究というか学問としての内容を新しい方向に、若い人達が向くようにして行くのか。そちらの方が、ちょっと重要だと思いますが。
- B：もう一つは、先程ちょっとと言った機械学会のテクニカル・デビジョン構想というのがあるんですが、それがうまく機能しだすと伝熱研究会が大きな影響を受けるのではないかと思うのですが。
- F：僕なんか、個人的な意見かもしれないけれど伝熱シンポジウムに行くというのは、機械学会じゃない人にもあって、話しができて、という雰囲気だと思うんですね。
- B：それが、理想ではあるけれども、段々そういう機能を失ってきているでしょ。
- F：だから伝熱研究会が存続意義があるとするならば、むしろ、そういう所にある。
- B：だから積極的に何かをやらないとね。
- F：伝熱研究会じゃなくて、伝熱会議か何かになればどうですかネ。(笑)
- H：学術会議みたいですか。それは良いかもしれませんがね。
- F：そうですよ。会議という方が、いろんな人が来れて、研究会というはやけに小さそうだけど、会議というと偉い人が皆、集って来そうじゃないですか。
- C：英訳すると何なんですか。
- F：アカデミー。(大笑)
- G：少なくとも研究会は迫力がありませんね。
- D：とにかく、機械学会の人だけでなく、いろんな人が参加できるようにしなければ手はないですね。
- B：時間もだいぶ過ぎましたので、では、この辺で。。。どうも有難うございました。

以上

浅川勇吉先生を偲んで

副会長 小竹 進（東大）

「君ッ、日本の学会はケシカランよ！」

昭和61年 9月16日。肌寒い雨の音を聞きながら、薄暗い小さな会議室いっぱいにカンカンと響く先生のお叱りを、恰も日本の学会を代表するかのような錯覚にとらわれながら、ジッと拝聴していた。

「何か理屈をつけないと論文と認めない。理屈がなくても事実は事実だ。データが不足でも真実は真実だ……」

同席の黒崎先生（東工大）も身を固くして受け止めている様子。

8月、先生から論文を書いたのだが「伝熱研究」に載せてくれないかとの問い合せがあった。編集委員長の黒崎先生とともに一度お話をうかがってみようということになった。「時と場所を言ってくれ、どこへでも出かけていくよ。」と元気なお返事。

「先生、研究の思いつきや発想法などについて書いていただけますと、若い人たちにたいへん参考になると思うのですが……」

「アサカワ」効果は、砂粒を細管から落下してその粘性を計っているときに思いつかれ、電場をかけると砂粒が広がったり振れたりして落下するのを見つけられたことに端を発し、あらゆる「モノ」に電場をかけ始めたとのこと。

「……しかし、このごろはネ、電場 Offの現象に興味をもってネ。いままでは電場 Onの現象であったのだが……」

電場をかけてから電場を Offにした水をコップにいれて放置しておく、電場をかけないものが白濁腐敗しても清澄に保たれることを発見して、「これを農産物の貯蔵などバイオ関係に利用できないかと思ってネ。千葉の方に研究所をつくろうと思っているのだが……」

先生の研究意欲はますます盛んだった。

「ボクは書くよりもどこかで話（講演）をさせてくれないかね」

二週間後に関東地方グループ研究活動の「先端伝熱ショートコース in 筑波」があった。

矢部彰地方連絡幹事に無理をいってお願いしたら、自分の講演時間を犠牲にして、できあがっていたプログラムを変更して下さった。

昭和61年10月 4日 10:10-10:55 「アサカワ効果」 その発見と応用 浅川 勇吉

「あそこは荒川沖からバスがあるネ」

「イヤ、先生、車をひろってください」

「先生、お座りになってお話ください」

「イヤ、立ってやるよ」

予定時間を30分も過ぎられ、講演を終わられた先生のお顔は少年のように輝いておられた。

昭和61年11月 9日。それからほぼ1ヶ月。先生は、朝から原稿を書かれておられたが、10時ごろ

「床屋に行ってくるよ」

と出かけられ、家の前の路地を曲ったところで急に倒られて不帰の人となられてしまった。

日本伝熱研究会事務局の会員データベースには

氏名 浅川 勇吉

勤務先 浅川研究所 176 東京都練馬区春日町 5-6-9

生年 明治31年08月21日

最終校 東京帝大 大正12年卒

専門 熱伝導、蒸発、燃焼

と記されてあった。御令 88 才、5 月には多くのお弟子さんたちに囲まれて米字のお祝いを受けられたとのこと。

1986年12月 8日。日本伝熱研究会の最長老研究者その名簿より Deleted。

ご冥福をお祈りいたします。

本号の先生の論文は、他界される2週間前に編集委員長のもとに送って来られたもので、黒崎先生が難しいご手筆を判読され図面とともにワープロ化したご遺稿です。

1. アサカワ効果の由来

1976年10月14日に英国のBBC⁽¹⁾は「最近の科学・技術の思潮局」の1駒として、燃焼・蒸発・熱伝達が電場により著しく促進する現象を放映して、それをアサカワ効果と呼称して多大なる反響を呼んだ。そのBBCの取材に来られたプロジュウサーからは、最初はその春の5月20日にネイチュアに発表⁽²⁾した「Promotion and Retardation of Heat Transfer by Electric Fields」について取材するにあつたが、会見して論文について質疑を重ねた後に、この論文の由来を尋ねられるままに、その前段階ともいべき蒸発の促進、またその前駆の燃焼促進を実験を前にして説明したところ、特に燃焼促進としての燃焼の猛烈化には驚いてこの研究は誰かほかに行っているものはないかと訊かれたので、国内にはもち論いない、貴国のロンドン大学のJ.Weinberg教授は似た研究をされておられるが、方法が違うのでこのような現象は出ていない、と説いたので、納得されて予定外ながら燃焼・蒸発の促進も取材されるに至った。ところで放映のコピーを入手して試写して全く驚いた。燃焼・蒸発・熱伝達の著しい促進を示して解説し、このミステリーとも思われる現象はアサカワ効果と呼称すべきで将来の産業技術の基盤となるであろうと激賞したのであった。当方でいいたいところを100%に高く評価して電波に乗せたのであった。

2. アサカワ効果の発見経路

－ 流速の電場による促進 －

かつて中小学校向けの理化用器機で落砂試験があつた。手動の起電機から出る電気を漏斗に落せる砂に導くとき、電気の同性相反発する原理を示す－拵がって落下－ものであつた(図1)。それで終りである。

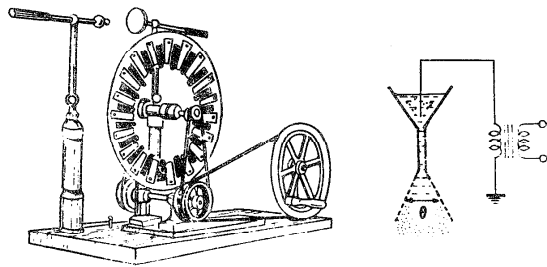


図1 ウィムスハースト起電機

(1) British Broadcast Corporation

(2) Natureへの発展: (Vol.261, No.557, p.p.220~221, 1976,5,20)

しかし、著者はこの現象は理工学向きの実験に適すると考えて、手動の起電機を高圧電源に換え、砂の拡がり、砂の流出量と電圧との関係を求めることを学生に課した。課する以上は自分でも調べることにした。当時は古いことで50年以上も前のことであるから、粉体力学の如きも芽も出ていないときであった。

それで無鉄砲に手当たり次第に試みた。やってみると、砂は面白いように拡がる。例えば10KV、30KVでは10°、105°に拡がる。流出量は0.7%、5%と増加する(図2)。交流でも瞬間毎には直流と同じと考えて試みて見ると直流と同じく拡がる。しかし、その拡がり、流出量の増加は直流に比して1桁近くも大きく、70°、290°と大きく、流出量も20%、27%と増加する(図3)。つぎに

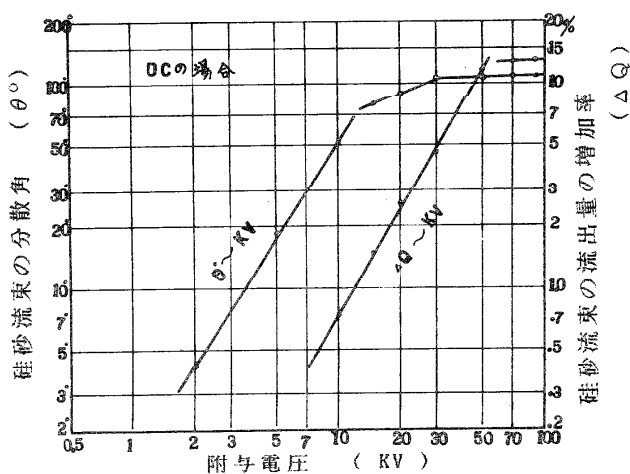


図 2

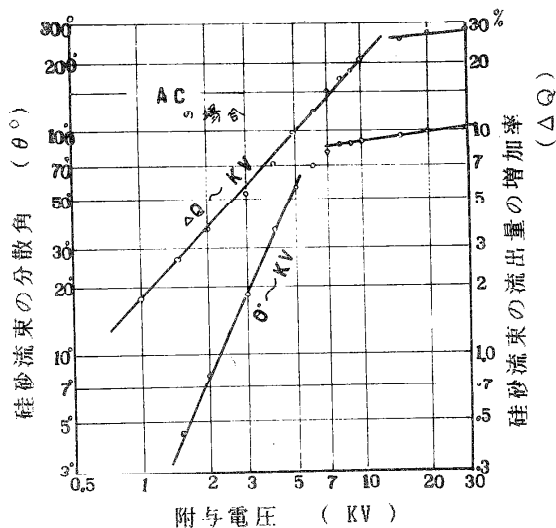


図 3

流体について試みる。

流体は粉体とは根本的に違うので、人には笑われたが、敢えて試みた。試料には粘度の高いディーゼルC油を使用し、ノズルの径は 1.0mmを使用する。C油は粘度が高いため流束とならず、滴下する。が、電場を与えると流束になって流出する。流出油量を計測すると、直流 10KV、70KV には 0.8%、12%増があるが、交流では 11%、28% (図には示さず) 増加と1桁大なるを知る (図4)。

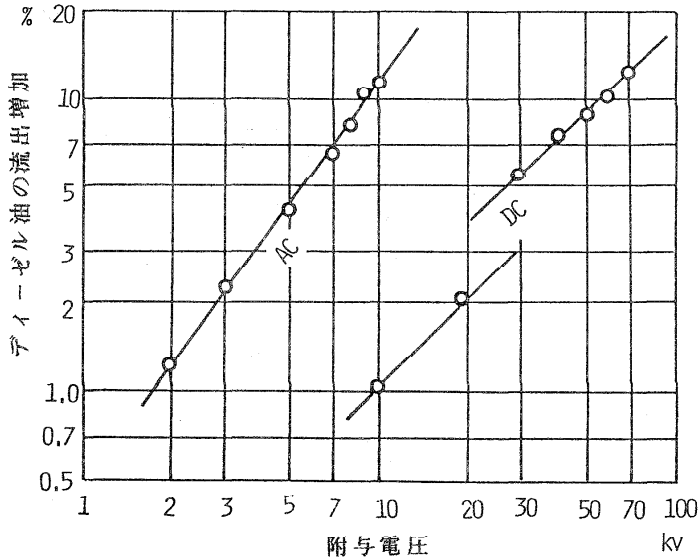


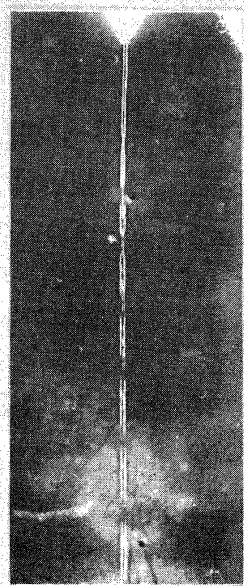
図4 ディーゼル油の流出増加と電場

このとき交流では0KVの瞬間では流出量に増加はないはず。それを簡易に観察するために、ネオン灯下で見た。結果は図5に示すように、流出の後までも流束に電場効果-膨れる部分と膨れない点の存在-が連続的に発生する。図の(a)は50サイクル、(b)は25サイクルである。これを見るとサイクルの大なるほど流出量の増加が大なることが知られるが、試みてその実なるを知った。

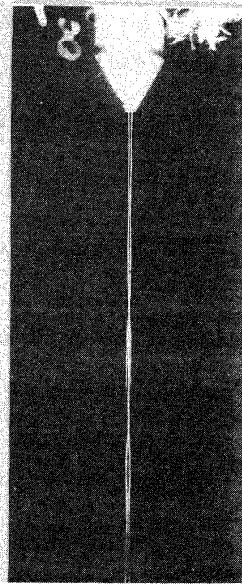
つぎに、考える。

気体は液体と同じく流体であるから、流体と同じく電場によりて流出の促進するは当然と考える。それを計測するに、ガスの通路にU字管を備え管内の水頭差による通常の方法を取った。しかし、ガスの比重が著しく小なるために少からず厄介であった。が、とにかくできた。ところで、可燃性ガスを使用すれば焰は長くなるはずと考えた。試みて見ると、予想に反して、焰は電場によりて短かくなり⁽³⁾ (図6)、還元焰は消失して酸化焰に転じる。燃焼は電

(3) 浅川：燃焼の新しい研究：機械学会燃焼研究会 昭和39年5月；燃焼シンポジウム (1964-12-12)

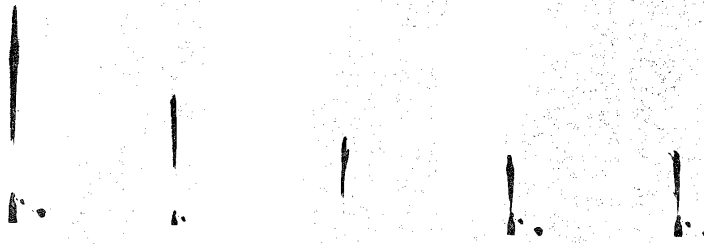


(a)
ネオン灯下
10KV, 50サイクル附与



(b)
ネオン灯下
10KV, 25サイクル附与

図 5



燃焼シツアル 直流電圧
ガス焰

二万六千ボルト 三万六千ボルト 五万六千ボルト 七万五千ボルト

図 6 焰の長さ と 電場

場によりて本質的に変貌するを知った。こゝに、流速の計測は放棄⁽⁴⁾され、研究テーマは”電場下の燃焼”と一転するに至った。

3. 燃焼の促進

こゝにあらためて前図 b に見たる焰の短縮を取扱う。それは、ガスの流出量の増加するに拘らず焰は短縮したのである。焰の長さはガスの燃焼する時間の表示とも見られるものであるか

(4) ガスの流速促進とガス計量器を使用するときは促進の計測にて終了したはずであった。

ら、短縮するは燃焼速度の促進するを意味するとしなければならない。多くを流出するに拘らず短縮するは、燃焼速度の促進をさらに確認するものである。と同時に、還元焰が消失して酸化焰に変貌—未燃焼分の存在ある還元焰を解消する—ことは、燃焼速度の促進するを補ていするものといえる。つぎに、

液体燃料について確認する。

それには軽油の燃焼を開放容器にて観察する。

結果は図7⁽⁵⁾に示される。図の(a)は通常燃焼であるが、3KV、6KV、10KV 附与にては、(b)、(c)、(d)に示すように漸次に猛烈化するを見る。

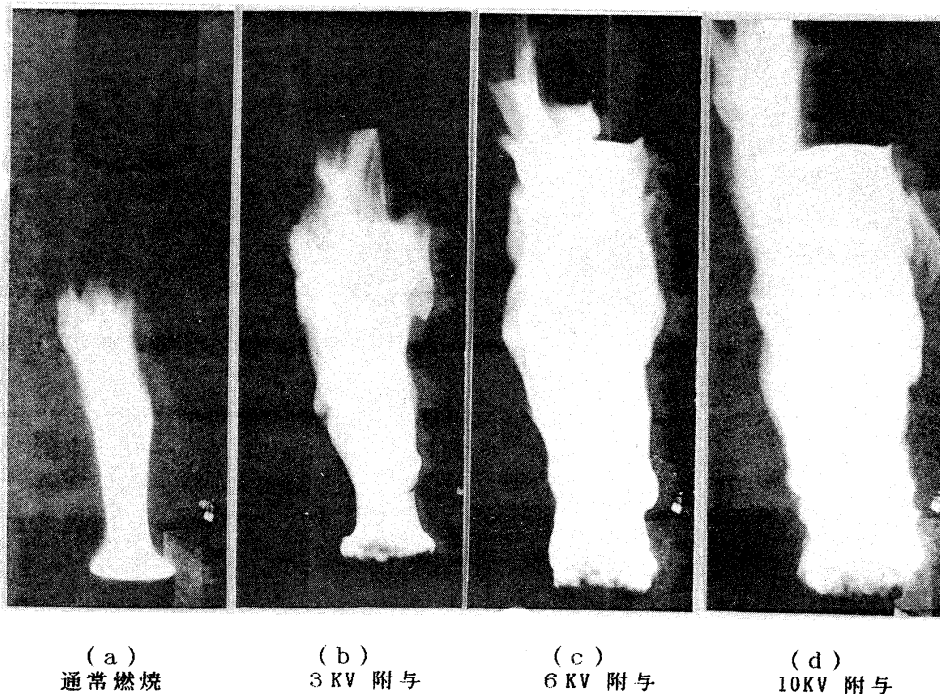


図 7

通常燃焼にては6ccの燃焼に74秒を要するに対して、38秒、18秒、17秒と短縮することは図8に示される。図には他の燃料についても示されるが、概ね1/3~1/5に減じる。

このように、電場燃焼は燃焼を促進するのであるから、一定量の燃料を燃焼するときには未燃焼分の減少を招来し、そのため発熱量、燃焼温度の上昇が生じ、燃焼効率は上昇し、燃料の節約が期待される。

また、燃焼促進は難燃焼物、難燃焼物と目される産業廃棄物にも利用されるべきである。

(5) 浅川：生産工学上における電場の応用（第1報）（燃焼の本質変化—燃焼速度の促進）
日本大学工学部紀要 1968年3月

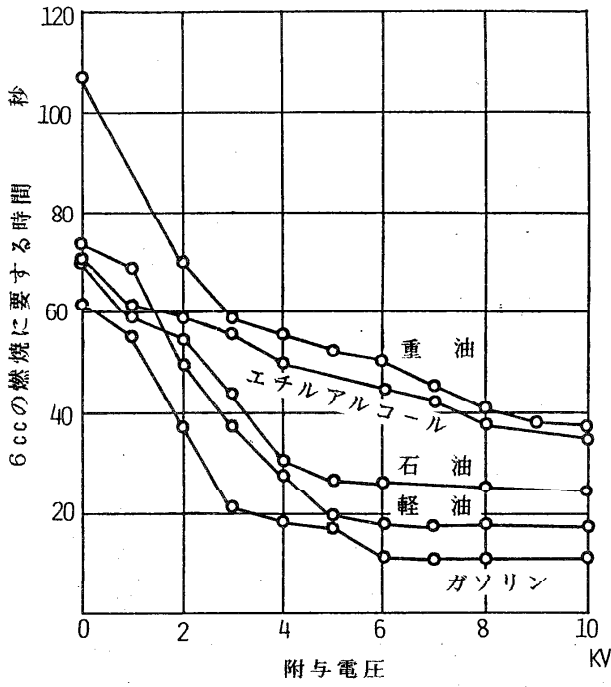


図8 附与電圧と燃焼時間

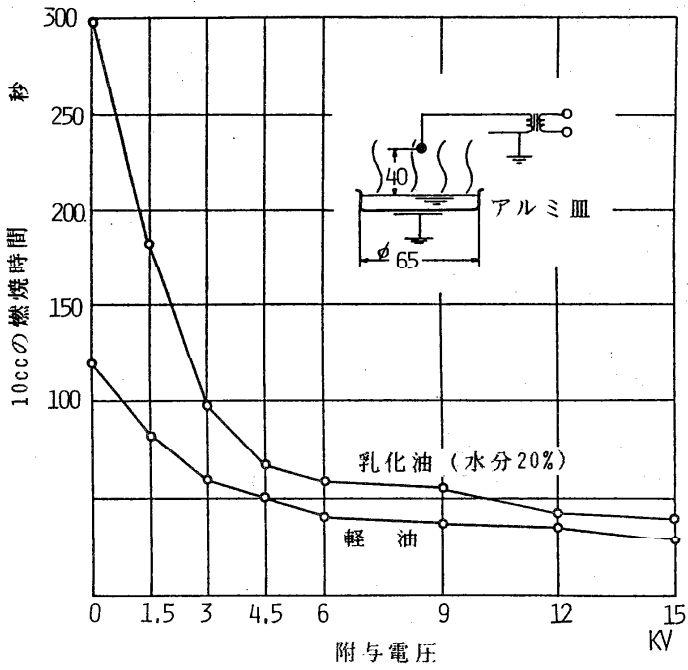


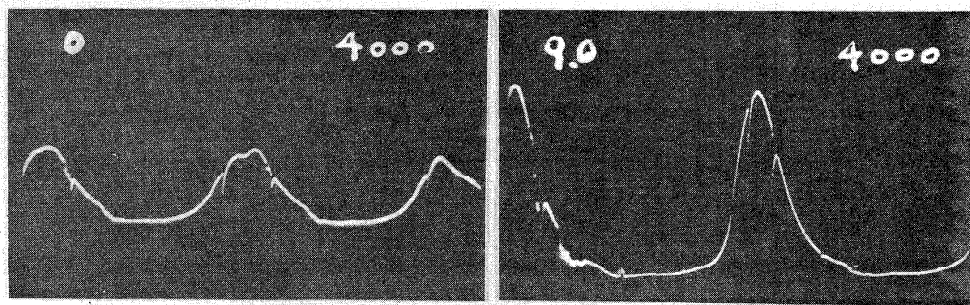
図9 乳化燃料の電場燃焼の効果

ここには液体燃料の節約に利用される乳化燃料油（軽油に 20%の水を混じる）について電場の効果を示す。図9には軽油についての電場の効果をも併記する。軽油は10ccの燃焼に 120秒を要するに対して、乳化油は 300秒と約3倍を要する。明らかに、乳化油は軽油に対しては難燃焼物である。しかし3KV附与によりては 100秒と軽油より若干短縮する。さらに電場を大にするとときは、漸次短縮し15KVにては40秒に減少する。これは軽油の6KV~10KV附与に應じるを知る。

これを要するに、20%の水を混じる軽油は電場燃焼を施すときは軽油オンリーに比して熱効率の上昇の得られるのである。

この事實は、電場燃焼によるときは燃焼温度の上昇により、含有水分が”水ガス反応”の周をなすことになり、そのために生じるメタンガスの燃焼によりて水の混入の不利を有利化するものと思われる。換言すれば、燃料節減のために添加する水が、電場による燃焼促進のためにメタン発生の特因となって、逆に燃焼にプラス効果を与えることが知られる。燃焼促進の効果としては、それが容器内において発生するときは、容器内の圧力は上昇するであろう。それは内燃機関の燃焼が好適と考えられ、エンジンの出力増大が期待される。

著者は90ccの2サイクルエンジンについて試みたるに出力の増大を得た⁽⁶⁾。図10に通常運転(a)と9.0KV附与(b)の場合の指圧線図が示される。(b)図のそれは(a)に比して約2倍なることが知られる。しかし、この場合のエンジンは戦前のもので圧縮比が4.7であった。現在のエンジンの圧縮比は8.0程度に高いので、電場効果は低く、出力の増加は10%~12%に過ぎない。



(a)
2サイクルエンジン(90cc)の電場附与
以前(KV=0)の指圧線図: RPM=4000の場合

(b)
2サイクルエンジン; 9KV附与;
RPM=4000の場合

図10

特にディーゼル機関では電場効果は皆無である。電場効果は圧力の高い環境では発生しないと思われる。電場を附与するも燃焼環境には通じず器壁を涌じて逃げるものと思われる。

(6) 浅川ら: 日本機械学会論文集 No.700-9 (第1回シンポジウム: 内燃機関の燃焼; 清水市; 1970-7)

つぎに燃焼効率を別途に考察する。

内燃機関の燃焼論によれば、燃焼効率は圧縮比の大なるにほど大であるとされる。

現在の高炉作業は 2.5Kg/cm^2 の圧力下にて操業されていると聞く。これは偶々ソビエトにての操業を見るに及んで、これに倣ったものとされ、所要コークスを減じて出鉄量が飛躍的に上昇すると聞く。これはエンジンの燃焼効率が圧力に応じて上昇するの原則に副うものとされるが、電場燃焼を加味するときは、さらに製鉄技術が上昇すると期待するは痴人の夢であろうか。

4. 蒸発の促進

流・個体の燃焼は蒸発を前提とするが一般である。したがって、前章にて説く燃焼促進とは蒸発促進が前駆とされる。こゝに燃焼を離れて直接に液体燃料に電場を附与して、蒸発を検討する。結果は以下に示すように、蒸発は電場によりて著しく促進⁽⁷⁾し、その効果は燃焼促進より大である。

ガソリンの場合

結果の1例は図11に示される。図の蒸発線図を見るにいずれも通常蒸発線図の上方にある。

即ち、通常蒸発に比して 4.5KV ; 7.5KV ; 10.5KV ; 15KVにては 4.5, 8.9, 10, 11 倍と異状に増加する。

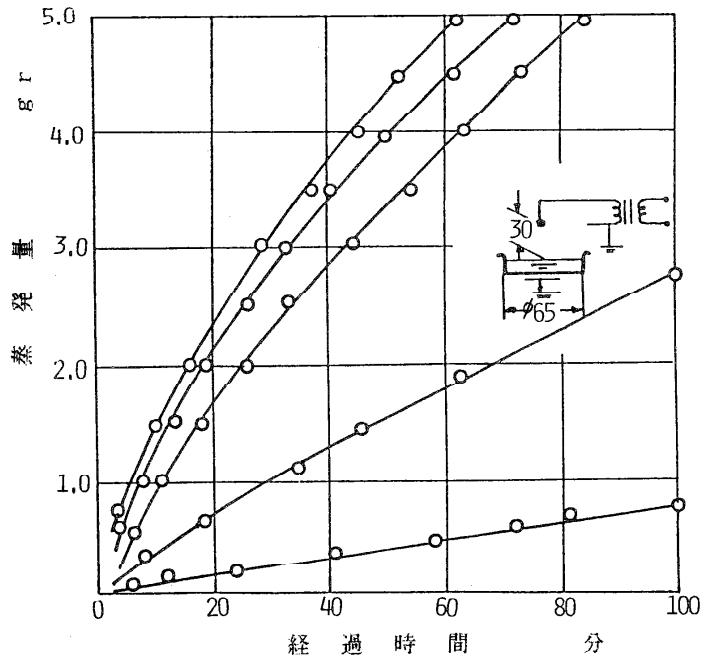


図11

(7) 浅川：生産工学上における電場の応用（第2報）蒸発促進の種々相一，
日本大学工学部紀要第10巻 1969年3月

なお、他の一般の流体、溶液および固体の昇華についても同様に促進を知った。つぎに、水の室温～90℃についての蒸発促進に触れる。15KV附与による促進を求めると図12に示すような結果⁽⁸⁾が得られる。温度の低くなるに応じて対数的に増加する。ボイラに電場を利用するの期待と低温乾燥に特に電場応用の有利なることが示唆される。つぎに

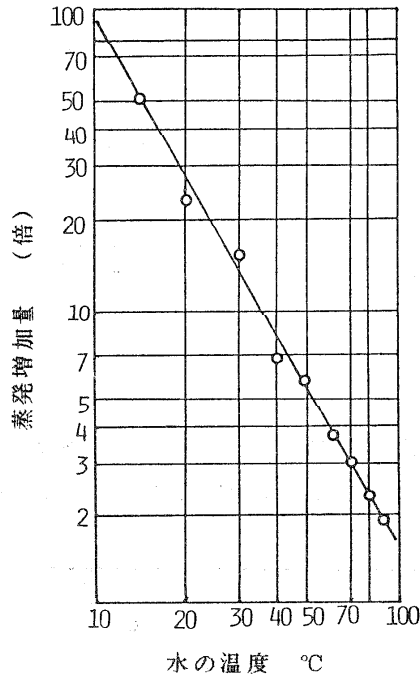


図12

電場蒸発の本質を攻究するために、いま15KVにて求められた各温度における蒸発線図より求める蒸発温度Aのlog_eAとその温度(絶対温度T)の逆数 1/Tとの関係を求めると図13の(b)の如き直線が得られる。図には通常蒸発より求められる関係(a)が(b)の下部に示される。

これらの関係は化学工学における反応式

$$A = A_0 e^{-\frac{\Delta E}{RT}} \quad ; \quad \log_e A = \log_e A_0 - \frac{\Delta E}{R} \cdot \frac{1}{T}$$

ただし、 ΔE : 活性化エネルギー, R : ガス常数を表わすものである。

したがって、現在の15KVの場合の直線の傾き $-\Delta E/R$ は小であるから、活性化エネルギーは通常蒸発の場合に比して小となることで、電場蒸発は通常蒸発に触媒の存在する、と同意義なるを示す論拠⁽⁹⁾である。これで蒸発が電場によりて促進するの論拠となるはずである。

(8) 浅川：前出(7)

(9) 浅川：電場の応用による蒸発の促進；日本機械学会セミ国際シンポジウム 1967, 東京 (英文)；生産工学上における電場の応用(第3報) - 蒸発促進の解明

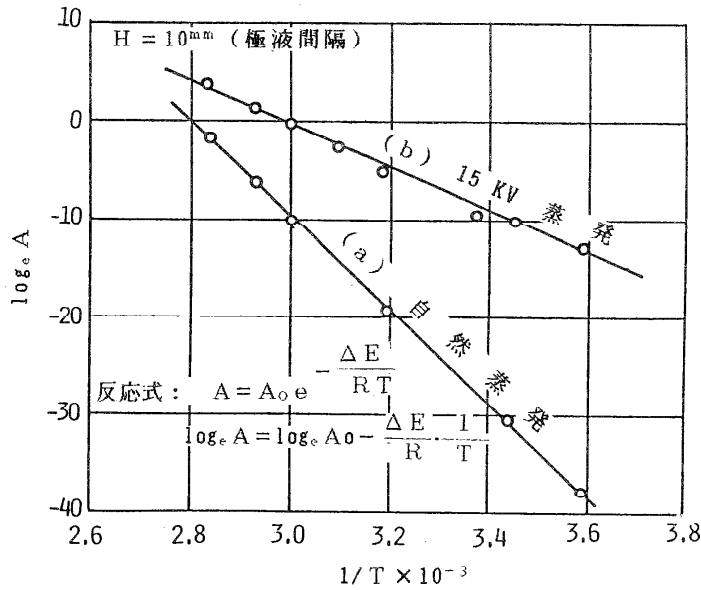


図 13

5. 熱伝達の促進

いま蒸発促進があるを考えると、気化潜熱はそれだけ多く消費されるとされる。それは、熱源から熱消費系にそれだけ早く熱移入が必要とされる。それは熱伝達促進にほかならない、と考えられる。

ここに、蒸発を離れて、熱伝達が電場によりて如何に影響するかを検討する。

まず、気体⁽¹⁰⁾について取扱う。

結果は図14に示される。装置は電気ヒーターの上に鋼網を載せ、その上にアスベストボードを備え、上流する熱気体の定常化に努める。

その気流内にボードより60、65を離れてサーミスタの指針と電極を保持する。

通常加熱にては 400秒に56°Cに達するに対して、7.5KVにては70°Cと14°C上昇する。なお15KVにては90°Cと34°C上昇する(図には示さず)。

つぎに、液体⁽¹¹⁾(水)を取扱う。

結果は図15に示される。150ccの水を加熱するとき、電極は液面より間隔Hを10に取る。通常加熱にては沸騰までに 400秒を要するに対して15KV附与にては 200秒と半減する。なお、このとき1000秒までの蒸発量を見るに、通常加熱にては64grなるに対して電場では78grと 23%の増加がある。この温度の上昇と蒸発量の増加は、いずれも熱伝達促進の現われとされねばならない。つぎに

(10) 浅川：前出(2) Nature：エネルギー資源研究会第1回研究発表会(昭和57年10月)，
電場附与による熱伝達の解説，日本機械学会講演論文集 No.710-5 (1971年4月)

(11) 前出(2) Nature：伝熱促進に関する研究(第16報) 第11回日本伝熱シンポジウム (1974年5月)

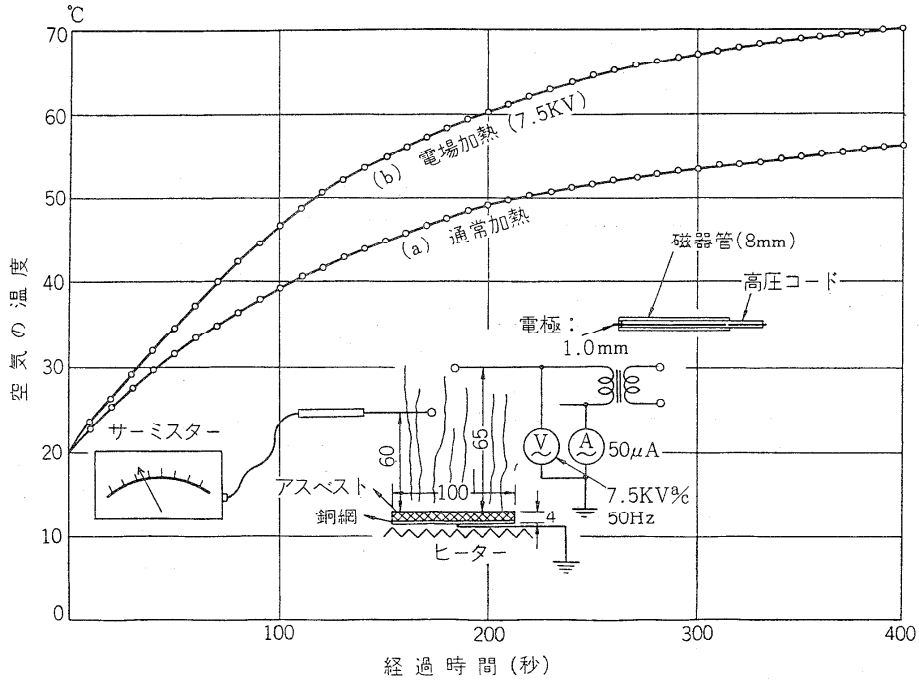


図14 水蒸気の通常、電場における凝結促進と遅退
(水蒸気の熱伝達促進と遅退)

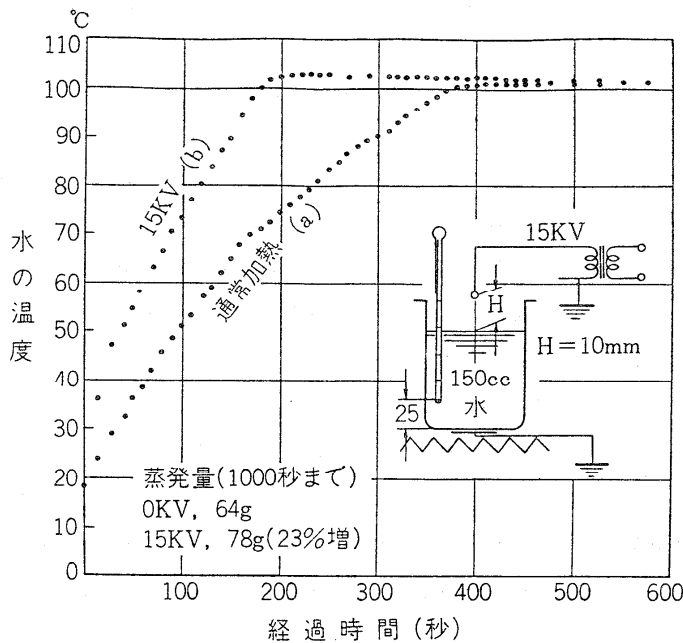


図15 水の通常および電場加熱曲線
(水の熱伝達促進)

固体を取扱う。

結果は図16⁽¹²⁾に示される。鉄の小片40×70を電気炉にて加熱するとき、熱源を35分にて遮断するとき、5アンペアでは通常加熱にては235°Cに達するに対して、9KV（電極は鉄片内に）では250°Cと27°C高く、8アンペアでは875°Cに対して960°Cと85°C高い。しかし、この最高温度より下降する冷却線図を見るに、電場冷却は通常に比して著しく緩慢である。これは熱伝達からいえば遅退である。即ち、加熱においては、電極が加熱物体の外側にある上側と同じく促進であるが、冷却においてはこれに反して遅退の現われるを示すことである。このような現象は、ほかに、硅砂⁽¹³⁾、水⁽¹⁴⁾についてもすでに得られている。

したがって、加熱においては電極の位置に関係なく伝熱は促進するが、冷却においては、電極が加熱物体内にあるときは、伝熱は遅退する、冷え難くなるのである。電極が加熱物体外に

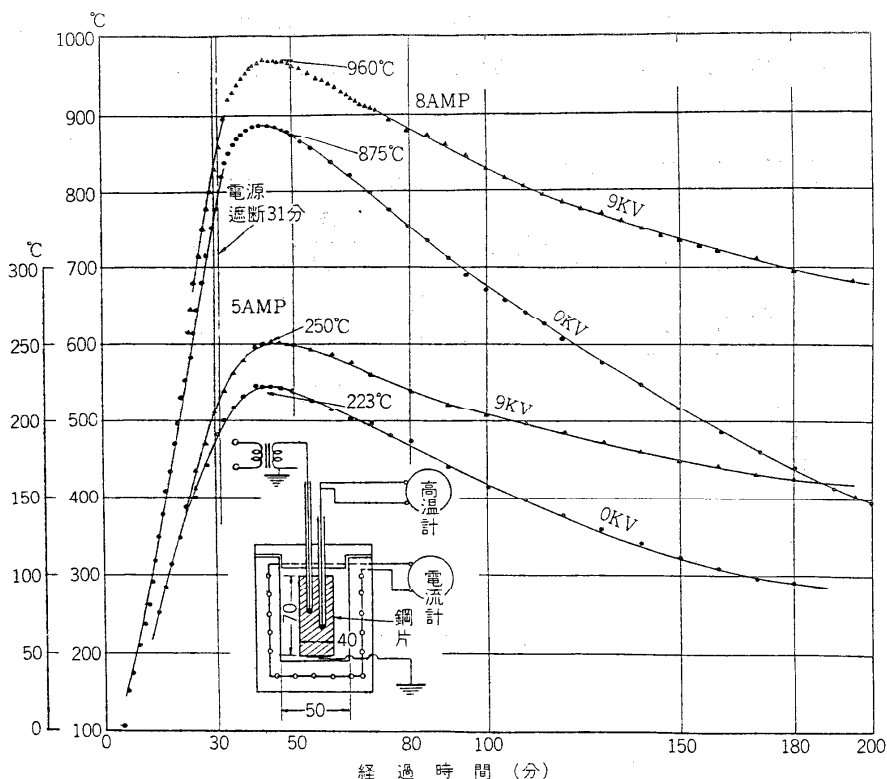


図16 鉄片の通常、電場における加熱冷却曲線
(熱伝達の促進と遅退)

(12) 前出 Nature: 前出 (11): 熱伝達の促進と遅退 (続) 日本機械学会全国大会 (名古屋), 昭和51年10月 No.1323

(13) 浅川: 伝熱促進に関する研究: 第11回日本伝熱シンポジウム (1974年5月). A.314

(14) 浅川: 電場応用による熱伝達促進第12回日本伝熱シンポジウム (1975年5月). A.117

あるときは伝熱促進して、冷却は速かになるのである。この後者の場合は、熱工学的に見れば当然であるが、前者は熱工学的に見れば解釈に困難になる現象とされねばならぬ、点であり、ネイチュアに投稿したゆえでもあった。

6. 熱交換

熱交換は本質的には熱伝達と異なるものではないので、電場によりて促進するは当然とされる。著者も液体相互間の熱交換⁽¹⁵⁾、固体とガスとの間の熱交換⁽¹⁶⁾について促進するを得ているが、こゝには代表的の例としてスチームと大気との間の熱交換に対する電場効果を取扱う。実験装置の要約を図17に示す。小型容器内の2500ccの水を800ワットのヒーターにて蒸気を発生し、これをエロフィン管(15×30)に通じ大気との間に熱交換をなさせる。エロフィン管に平行に備えたアルミ管は、電極相互の間隔を75に取りたる電極(釘を打込んだ)群を持ち、フィンとの間隔を15に取る。かくして電場は6KV~15KVに取り、熱交換を行う。

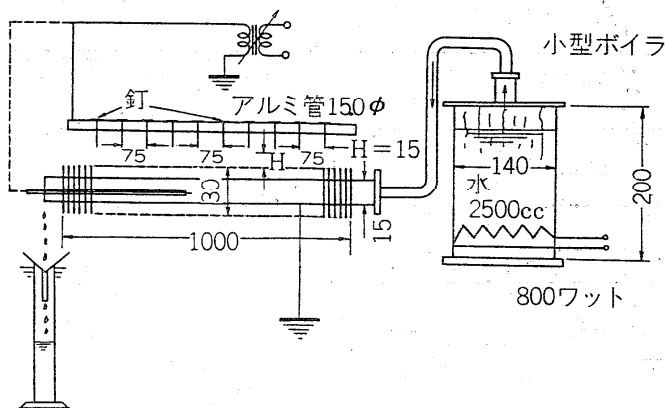


図17 水蒸気の凝結する実験装置

結果は図18に示される。凝結量は6KV~15KVにて5%~118%増が生じる。実に15KVにて118%増という活用するに値する増加である。

なお、エロフィン管内に電極10KVを導くときは、凝結量は通常に比して12%減少することも認められる(図示)。これは一応奇異に思えるが、前章に述べた冷却時においては、電極が加熱物体内にあるとき伝熱は遅退するの原則に副うものに即応する現象である。

(15) 浅川：電場応用の熱伝達の促進：日本伝熱シンポジウム（昭和50年5月）No.117

(16) 浅川：熱伝達の促進と遅退（続）日本機械学会論文集 No.760-16（1976年10月）No.1323;

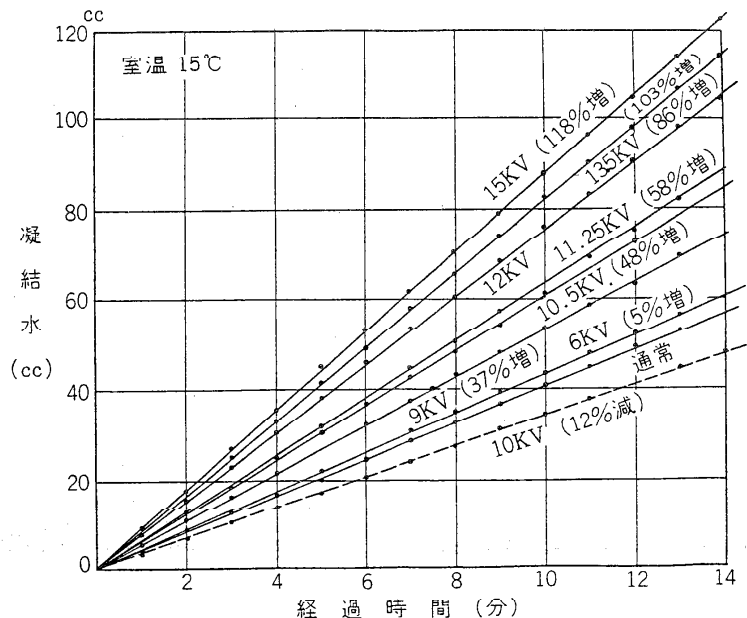


図18 各電場における水蒸気の凝結増加

7. アサカワ効果の応用

以上記述したる燃焼・蒸発・熱伝達・熱交換の促進についての応用は種々考慮されるが、こゝには小型ボイラに応用したる結果を述べる。

小型蒸気ボイラへの応用

(a) ボイラの構造

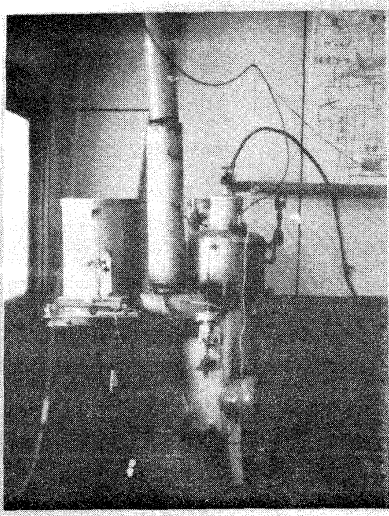
試験に供したる蒸気ボイラは堅型煙管式で6本の管にて太い中央の煙管を囲む形式で、外観は図19(a)に示され、頭部は(b)に示される。

(b)に見える詰物箱にて電極は保持される。ボイラの諸元は表1に示される。燃料は白灯油で、計量タンクを通じて自然流にてロータリバーナに給油される。その消費量はタンクの外側に備えるゲージグラス内の油面を、カセットメータにて1/10mmの精度にて読むので、消費油量は1/10ccの精度にて計測される。蒸気圧力は0.4Kg/cm²を自動的に一定を保持するように安全弁のバネで調整される。

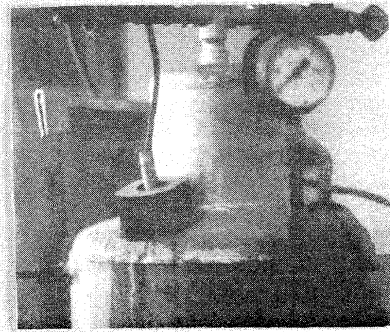
(b) ボイラの試験方法、実験結果⁽¹⁷⁾

ボイラの試験要領を図20に示す。電極(15KV)はボイラ水面より30隔てゝ保持し、かつバーナの火焰内にも保持する。発生するスチームは取出弁より復水管内のエロフィン管に導か

(17) 浅川：小型ボイラの性能改善：日本機械学会講演会（昭和44年5月）



(a)



(b)

図19

表 1 ボイラの諸元

諸 元	寸 法	備 考
高 サ	1 3 4 0	線高サ 1 7 5 0
胴 径	3 9 0	
伝熱面積	0 . 9 5 m ²	
燃焼方式	送 風 機	1 0 0 ワット
給水方式	水 道	自 動 給 水
蒸気管径	1 / 4 "	

れ、その外側を流れる冷却水により凝結され、メスシリンダに流下して計量される。同時に冷却水はその出入口にて測温されて熱勘定に資せられる。実験は凝縮水の増加が定常になるを待って計測を初める。計測は10分毎に燃料消費、蒸気発生量、冷却水温を計測し、60分まで続ける。その結果は図21に示される。

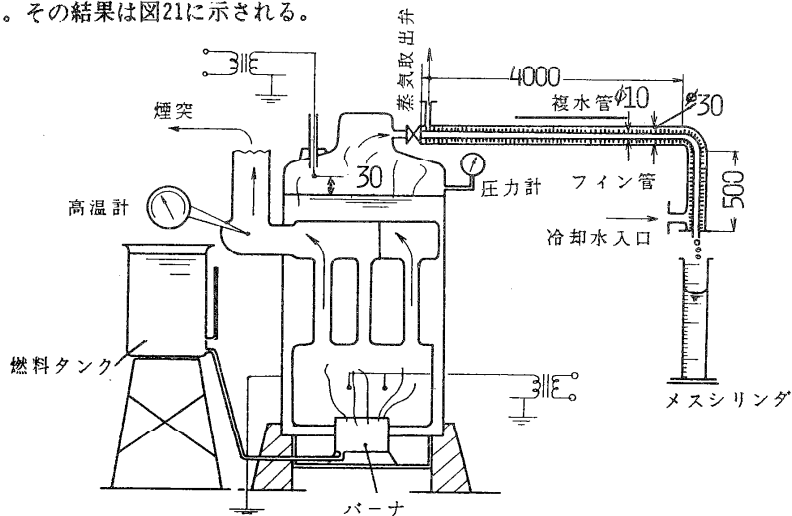


図 20

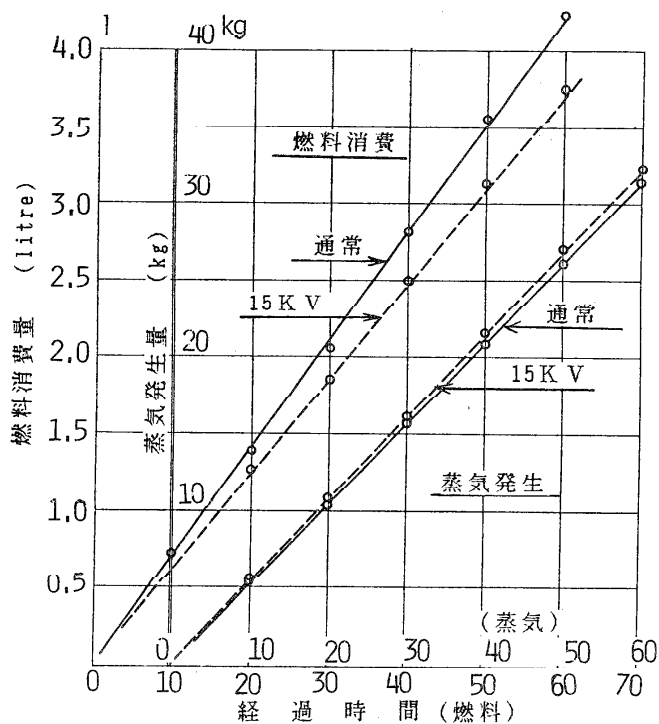


図 21

図には通常と15KV附与における燃料消費、蒸気発生が示される。図より算定するに、燃料消費は通常では4.271/時なるに対して15KVでは3.761/時と減少する。 $(4.27-3.76) / 4.27=0.135$ となるので 13.5%の燃料節約となる。

また、蒸気発生は図上より電場効果として3.5%増が得られる。これは蒸気圧力が 0.4Kg/cm^2 と一定であったので、一応奇異とされる。が、つぎの解説が用意される。

蒸気は電場下にて発生するので、電場による熱伝達促進が賦与される。したがって、冷却水により凝結は促進され、通常に比して背圧は低くなるので、蒸気がエロフィン管への流入は速やかになる、これが蒸気発生が3.5%増となって現われるのである。

要するに、簡単にいえば $13.5\%+3.5\%^{(18)}=17\%$ の燃料節約が得られたのである。

なお、温水ボイラ（能力：70℃にて 20,000kcal/時）⁽¹⁹⁾にて、電場 7.5KVを温水と燃焼火焰に附与したるに、燃料節約 12%、温水の加熱促進5.4%を得られた。単純に双方を加算するに $12\%+5.4\%=17.4\%$ の燃料節約が得られた。

(18) 浅川：蒸気発生は、ボイラの効率を考えると、燃料節約はボイラの熱効果を考えるべきで、この場合のボイラ効率は70%であるから $3.5/0.7=5\%$ を採用するべきであろう。

(19) 浅川：節エネルギー型ボイラの試験成績—電場附与形式—；日本機械学会論文集（1978年1月25日技術講演会）

<会議参加報告>

第2回 ASME-JSME熱工学会議に出席して

東京工業大学 土方 邦夫

昭和62年3月22日から27日の6日間、米国ハワイ州ホノルル市で開催された第2回 ASME-JSME熱工学会議に出席する機会を得、伝熱研究編集委員長より投稿依頼を受けたので、ここにその概要を報告させていただく。

御承知のようにこの会議は、4年前の昭和58年に同じホノルル市に於て第1回が開催され、その成果を踏まえて、更に日米間の研究交流を促進するとともに、環太平洋諸国との研究交流を促し、熱工学の進展に寄与することを目的に開催された。

論文募集は約1年前に締切られ、アブストラクト審査、本論文審査を経て、約380編が発表された。その国別の内訳は、米国204、日本105、カタダ17、中国16（台湾を含む）、オーストラリア8、英国8、韓国4、西独4、インド2、エジプト2、ブラジル2、アラブ首長国連邦、ニュージーランド、シンガポール、イタリア、メキシコ各1である。環太平洋諸国からの参加者の増加が見られるが、今後、更にこの傾向を推進する必要があると思われる。会議登録者の総数は同時に開催された太陽エネルギー会議への登録者を含めて600人（うち100人程度が太陽エネルギー会議への参加者と思われる。）であり、日本人の参加者は約150人で、アメリカで開催されたことでもあり、発表論文数の割合より少なくなっている。

発表論文分野の内訳は以下の通りである。

A. Combustion Fundamentals	16
A. Heat Mass Transfer in Compartment Fires	18
A. Modeling of Combustion	19
A. Experimental Techniques in Combustion	6
A. Unsteady Combustion	5
J. Forced Convection	6
A. Thermo-Fluid Dynamics of Rotating Machinery	18
A. Heat Transfer in Gas Turbine	8
J. Heat Transfer in Turbulent Flows	21
A. Heat Transfer in Porous media and Packed Beds	23
A. Heat Transfer in Discontinuous/Heterogeneous Media	5
J. Natural Convection	6

A. Natural Convection in Enclosures	25
A. Direct Contact Heat Exchange	8
J. Heat Exchangers	7
A. Multiphase Heat Exchangers	12
A. Fouling of Heat Transfer Equipment	5
A. Heat Exchangers for Alternative Energy Sources	11
A. Heat Transfer in Unsteady Flow	8
A. Internal Thermal Enhancement Mechanisms in Microelectronic Equipment	5
A. External Thermal Enhancement Mechanisms in Microelectronic Equipment	6
A. Heat Transfer in Manufacturing and Materials Processing	16
A. Fundamentals of Drying	4
A. Interfacial Heat Mass Transfer	11
J. Boiling Heat Transfer	7
A. Enhancement of Condensation and Boiling	12
A. Heat Transfer to Droplets and Bubbles	14
J. Two-phase Flow	12
A. Thermal-Hydraulic Aspects of Innovative Nuclear Reactor Designs	6
J. Thermophysical Properties	9
J. Measurement and Control	5
J. Numerical Simulation	10
A. Heat and Mass Transfer in Biomedical Systems	9
A. Fundamentals of Chemical Vapor Deposition	6
J. General Papers	19

なお、A.およびJ.はASMEおよびJSME企画のセッションをあらわし、数字は発表論文数である。JSME企画セッションの数が募集時より少ないのは、ASME企画のセッションと同一内容のものを合わせ一つのセッションとしたためである。

JSME企画のセッションとASMEのそれとの間には、基礎的かつ広域的テーマと限定的かつトピック的テーマという際だった差がある。これは、非限定的論文募集方法(JSME)とオーガナイザー方式(ASME)という論文募集方法の差の他に、日米における研究経費獲得方法の差も一因になっていると考えられる。このような基本的な募集方法の差に加えて、ASME企画セッションに申し込む場合には、日本人でもASMEに、その逆の場合には米国人でもJS

MEに論文を提出する必要があったため、ASME企画セッションでの発表者は米国人が、JSME企画セッションでは日本人の発表者がほとんどとなり、当初ジョイント会議としては不適切な構成のセッションが数多く出来てしまった。これらの大部分は、マルト、棚沢両委員長によるセッション組換えの努力により解消されたが、今後これらの経験を生かし、より適切なセッション構成が実現するよう、論文募集方法が改善されることを希望したい。

今回の会議は総数 600人を越えるマンモス会議であったため、数多くの研究者と接触出来た半面、並列に行われているセッションが多過ぎ、参加したいセッションに参加できないという欠点が生じてしまった。更に、開催場所がヒルトンハワイアンビレッジというマンモスホテルであったため、会議場以外の場所での参加者同志の交流が希薄であった様に思われる。このような欠点は旅行者の比較的少ないオアフ島以外の島で会議を開催するなどの方法によって、技術的に解決できる問題と考えられるので、次回以降、更に実り多い会議となるよう改善し、本会議が継続的に開催されることを希望したい。

その他の印象として、本会議には米国、中国などから多くの女性研究者の参加が見られたが、日本からの参加がなく、日本からもこのような会議に女性が参加できるよう、工学部、特に機械工学のイメージチェンジ積極的に取り組む必要があることを痛感した。

ハワイの降りそそぐ太陽と、紺碧の海が原因で、会議の学問的内容について、詳細にご報告出来ない点をお詫びし、特に、研究発表の内容に興味のある方のために、日本機械学会からプロシーディングが販売中（会員価格¥30000、非会員¥35000）であることを付記しておく。最後に、本会議の企画に参加した者の一人として、この場をお借りし、会議参加者各位のご協力に深く感謝する次第である。

電子機器の冷却技術に関する国際シンポジウムに出席して

五十嵐保（防衛大）

表題シンポジウム（International Symposium on Cooling Technology for Electronic Equipment, March 17-21, 1987, Honolulu, Hawaii, U.S.A）の概況を報告します。

このシンポジウムは米国 National Science Foundation の Dr. W. Aung らにより企画されたものである。開催の時期と場所は第2回ASME-JSME合同熱工学会議の前週に同じハワイ州ホノルル市であった。日本からの参加要請が森康夫教授（電通大）に伝えられ、日本側のシンポジウム組織委員として森教授の他に平田賢教授（東大）、中山恒氏（日立）が加わった。論文募集は本誌では報じられなかったと記憶しているが、時間的余裕が全くなかったためと聞いている。森教授が日本側の代表として、論文募集から審査、本論文提出まで、全ての事務連絡を一人でなされたようである。論文募集は、主に日本機械学会分科会P-SC66「電子機器の冷却技術に関する調査研究分科会」（昭和57年8月～昭和59年7月）の委員および上記分科会に強い関心をもっていた先生方に直接通知されたそうである。

シンポジウム参加者は約 100名程度であった。日本からの参加者は14名で次の通りである。大学からは森康夫（電通大）、平田賢、笠木伸英、院生 2名（東大）、相原利雄、丸山重直（東北大）、尾添紘之、藤井歪夫（九大）の諸先生と私、五十嵐保（防衛大）である。企業からは中山恒（日立）、石塚勝（東芝）、鈴木正博（富士通）、水野司（NEC）の諸氏が参加した。

会期は4日間で7セッションに分かれ、発表された論文は54編、Keynote Lecture 8件で、日本からの論文は10編、Keynote Lecture 2件であった。上記54編の論文を収めた Proceedings の目次を表1に示す。各セッションの始めに表2に示す Keynote Lecture が行われた。なお keynote Lecture は Proceedings には含まれず個々に配布されたが、いずれも 30～80ページに及ぶ力作であった。これらは後日編集されて Proceedings とは別に Hemisphere Publishing Co. より刊行されるとのことである。

シンポジウムの会場はワイキキ海岸に面した Hilton Hawaiian Village Hotel の Tapa Tower で、17日（火）は参加登録と夜6時より歓迎会が催された。当日配布されたプログラムと Proceedings および Keynote Lecture は日本に送られてきた Second Announcement とかなり異なっていた。18日（水）午前 8時30分より開会式が行われ、本シンポジウムは10時より2会場で、約1時間の Keynote Lecture から始められた。セッションIAでは相原教授がトップバッターを勤めた。

18日(水)、19日(木)はシンポジウムがどのような形で進められるのかわからない点や、テーマが絞られていることもあり参加者ほぼ全員が出席し、活発な討論が行われた。

19日(木)夜は晩餐会と賞の贈呈式があり、keynote Lecture をした8人(日本人では相原教授、中山氏)と森教授が受賞した。3日目の20日(金)ともなると、「ハワイに来たのに、何で薄暗い部屋で講演を聞いていなければならないんだ。ハワイは学会など開くところではない。」などというぼやきと観光に出かける人が出始めた。

シンポジウム全般を通じての印象の第1は、日本人はセッション全体を考えて自分の持ち時間を計算し、それに合うように講演内容を絞って発表しているのに対し、米国人には時間など無関係に沢山のスライドを用意し、Chairman の注意も無視して一方的に自分の研究の宣伝をする者がかなりいた。そのため次の講演者の討論がなくなる場合がしばしば見られた。質問に対する回答でも同様のことが言えた。自己主張の強さには驚かされた。第2の印象は、本シンポジウムが「電子機器の冷却」ということもあるが、日・米の大学の研究のあり方に大きな差異を感じた。すなわち、日本では大学において、実機あるいはそれに近いモデルでの研究は皆無と言ってよいほど基礎的研究に偏っているのに対し、米国では大学が企業と同じ研究を行っていることである。これは日・米の産・官・学の研究体制の差異に起因すると思うが、日本においてはもっと企業側が抱えている問題点を具体的に大学側に提示して、大学側が企業の期待に十分答えられる研究体制の確立が急務と感じた。第3は「電子機器の冷却」という具体的問題に関係する研究者の層の厚さである。恐らく、米国の研究者数は日本の1桁ないし2桁多いのではないかと思った。

最終日の21日(土)の午前中、森教授が Chairman となってセッションVIIの Workshop and Panel Discussion が開かれ、米国側からは Purdue Univ. の F. Incropera 教授が "Research Needs In Electronic Cooling" について話し、日本側から「電子機器の冷却技術に関する日本の現状」について、笠木、石塚、中山の各氏が報告しました。

余談になるが、森先生は外務省の仕事で8日よりハワイに滞在しているとのことで、レストランやABCストア、郵便局まで実に詳しく、大変お世話になった。越後亮三教授(東工大)が、本誌伝熱研究(Vol.24, No.95, 1985)でユーゴのドブロブニクでの国際会議で、森先生のスイートルームで連日 "Mori Bar" が開かれたと報告されているが、今回もダイヤモンドヘッドを望む Tapa Tower の3階の広いスイートルームで毎夜 8時~10時、時には11時過ぎまで "Mori Bar" が開かれた。6~7人が集まればアルコールを飲みながら飲談に興じた。森先生から米国の最近の研究の動向の解説や、研究テーマの選び方、研究の進め方、さらには講義の方法、内容に至るまで、森先生独特の考え方や生き方を拝聴し、深い感銘を受け、また大いに励まされた。

最後になりましたが、今回のシンポジウムで大変お世話になった森康夫先生に厚くお礼申し上げます。

表 1

I. AIR COOLING TECHNIQUES--NATURAL CONVECTION	
1. An Experimental Study of Heat Transfer in Inclined Rectangular Cells.....	1
G.-J. Kwang, K.C. Chlou and P.-J. Kao	
2. Analytical and Experimental Study on Natural Convection Between Isothermal Vertical Plates.....	12
Guo Zengyuan, Li Zhixin and Gu Yavel	
3. A Practical Formula for Thermal Design of Natural-Air-Cooled Electronic Equipment Casings.....	23
H. Ishizuka, Y. Miyazaki, T. Sasaki and Y. Yokono	
4. Optimum Design of Natural Cooling Heat Sinks with Vertical Rectangular Fin Arrays.....	31
T. Aihara and S. Maruyana	
5. A Program for Predicting Free Convection Card File Air Temperatures Using Three Dimensional Boundary Layer Theory With Radiation Boundary Conditions.....	51
R.E. Garner and E.E. Soferlund	
II. THERMAL SYSTEMS PROBLEMS IN ELECTRIC EQUIPMENT	
1. Radiant Emission Characteristics of Regularly Microcontigured Surfaces.....	63
P.-J. Hesketh, B. Gebhart and J.N. Zemel	
2. Energy Saving Cooling Package for the 5ESS Digital Switch.....	82
R.E. O'Brien, W.A. Gade, H.T. Hoesel, B.E. Davis and R.J. Prazak	
3. Cooling System for FACOM M-780 Large Scale Computer.....	96
N. Yamamoto, Y. Udagawa and M. Suzuki	
4. Cooling Technology for the NEC SX Supercomputer.....	110
T. Mizuno, M. Okano, Y. Matsuo and T. Watarai	
5. Numerical Modeling of the Internal and External Thermal Resistance of a Thermal Conduction Module.....	126
D. Agonafe, R.C. Chu and U.P. Hwang	
6. Phase Array Thermal Control System Concepts.....	138
J.L. Haus	
7. Thermal Design of A Multiple Channel Bidirectional Flow Coldplate for Solid State Phasid Array Radars.....	149
L.T. Yeh	
8. Heat Pipe Cooling for Thermoelectric Generators.....	161
H. Kolb	
9. Thermal Expansion Model of Fixed Disk-Drive Storage Systems.....	173
P.A.Eibeck, N.J. Shafer and G.J. Trzask	
10. Modeling and Measurements of Heatspreader Thermal Performance in Molded Plastic Packages.....	187
H.K. Chyu and M. Aghazadeh	
11. A Multisegment Wedgeclamp for a Low Thermal Resistance Interface.....	200
G.W. Scott	
III. LIQUID COOLING TECHNIQUES	
1. Analysis of Forced Convection in Microstructures for Electronic System Cooling.....	217
C.L. Tien and S.H. Kuo	
2. Forced Convection, Liquid-Cooled, Microchannel Heat Sinks for High-Power-Density Microelectronics.....	227
R.J. Phillips, L.R. Glicksman and R. Larson	
3. Forced Convection Cooling of Discrete Heat Sources With or Without Surface Enhancement.....	249
S. Ramadhyani and F.P. Incropera	
4. Experimental Investigation of Single Phase Multi-Jet Impingement Cooling of an Array of Microelectronic Heat Transfer.....	265
Latif Jijli and Zeey Dagan	

VI. AIR COOLING TECHNIQUES--FORCED CONVECTION

1. Analysis of the Heat Transfer Performance of Offset Strip Fin Geometries in a Cold Plate Operating as Part of a Two-Phase Thermosyphon.....	563
V.P. Carey, G.D. Mandrusiak and T. Roddy	
2. Reducing Flow Non-Uniformities in LSI Packages by Vortex Generators.....	583
Jung-Huz Chou and Jing Lee	
3. Effect of Oscillatory Flow on Heat Removal from Circular Fins.....	595
C.H. Amcn, B.B. Mikic and E. Korin	
4. High Performance Air Cooling for Microelectronics.....	608
M. Mahalingam and James Andrews	
5. Forced Air Cooling for High-Power Pin Grid Array Packages in Confined Spacings.....	626
S.L. Chao and E.D. Humm	
6. Vortex Instability Phenomena Relating to the Cooling of a Horizontal Isothermal Flat-Plate by Natural and Forced Laminar Convection Flows.....	637
K.C. Cheng and Y.W. Kim	
7. Cooling Enhancement of Forced Convection Air Cooled Chip Array Through Flow Modulation Induced by Vortex-Shedding Cylinders in Cross Flows.....	651
E. Ratts, C. Amon, B. Mikic and A. Patena	
8. Forced Convective Heat Transfer from Arrays of Finned Packages.....	663
M. Nakayama, H. Matsushima and P. Goel	
9. Small Cooling Fin Performances for LSI Packages.....	679
Y. Yokono, T. Sasaki and M. Ishizuka	
10. Heat Transfer Around Rectangular Cylinders.....	689
T. Igarashi	
11. Laminar Mixed Convection Heat Transfer Between Parallel Plates with Localized Heat Sources.....	701
T. Tomimura and M. Fujii	

12. Analytical Correlation of Thermal Design of Electronic Packages.....	716
K. Graham and S. Witzman	
13. Heat Transfer and Pressure Drop in a Staggered Array of Aircooled Components.....	732
B.R. Hollworth and H.A. Fuller	

VII. WORKSHOP AND PANEL DISCUSSION

1. Research Needs in Electronic Cooling.....	749
F.P. Incropera	

表 2

Keynote Lecture:

1. "Natural Convection Air Cooling "	
T. Aihara -- Tohoku Univ., Sendai, Japan	
2. "Design Considerations for Electronic Cooling Systems"	
R.C. Chu -- IBM, Poughkeepsie, NY, USA	
3. "Phase Liquid Cooling for Electronic Equipment"	
A.E. Bergles -- RPI, Troy, NY, USA	
4. "Experimental Methods for Air Cooling Electronic Components"	
R.J. Moffat -- Stanford Univ., Stanford, CA, USA	
5. "Theory and Applications of Constriction and Spreading Resistance Concepts for Microelectronic Thermal Management"	
M.M. Yovanovitch -- Univ. of Waterloo, Waterloo, Ontario, Canada	
6. "Survey of Design Approaches in Japanese Computers"	
W. Nakayama -- Hitachi Ltd., Ibaraki, Japan	
7. "Computer Modeling in the Thermal Management of Electronic Equipment"	
B.B. Mikic -- MIT, Cambridge, MA, USA	
8. "Heat transfer in Microelectronic Components"	
R.J. Hannemann -- Digital Equipment Corporation, Andover, MA, USA	

5.	Heat Transfer Characteristics of Simulated Microelectronic Chips With or Without Heat Sinks.....	284
	K.A. Parks and A.E. Bergles	
6.	Natural Convective Immersion Cooling with Near-Critical Fluids.....	299
	Y.C. Lee and Y.Y. Hsu	
7.	Boiling Phenomenon in Small Confined Space Between Two Flat Plates.....	312
	Shao-Yen Ko, Bo Liu, Yong-Qing Yao F.K. Isoz	
8.	Liquid Enhanced Cooling of Microchips.....	321
	T.A. Mosinski, S.J. Chen and J.C. Chato	
9.	Microelectronic Cooling by Fluorocarbon Liquid Films.....	340
	I.A. Mudawar, T.A. Incropera and F.P. Incropera	
10.	An Investigation of Short-Heating-Length Effects on Flow Boiling Critical Heat Flux in a Subcooled Turbulent Flow.....	358
	T.Y. Lee, T.M. Simon and A. Bar-Cohen	
11.	Enhancement of Film-wise Condensation Heat Transfer to the Downward Horizontal Cooled Surface of Small Enclosure by Vertical Fins.....	374
	M. Yamashiro, K. Hijikata, Yasuo Hori and M. Uchida	
IV. CONDUCTION COOLING AND INTERNAL RESISTANCES		
1.	Transient Surface Temperatures in Solids due to Small Heat Sources.....	395
	J.Y. Back and J.R. Lloyd	
2.	Parametric Study of Conduction Cooling for High Power Density Electronics.....	404
	A.J. Laderman, D.B. Osborn, R.M. Grabow and M.J. Bury	
3.	A Correlation of the Thermal Parameters which Influence the Difference Between One and Two Dimensional Conduction within PCB's.....	423
	D.W. Fiat, M.M. Yovanovich and J.R. Culham	
4.	The Effect of Metal Powder on Thermal Contact Resistance.....	431
	Shyan-Fu Chou and S.K. Jou	
5.	Thermal Contact Conductance of Silicon Chip Bonding Materials.....	438
	G.P. Peterson and L.S. Fletcher	
6.	A Technique for Making Rapid Thermal Contact Resistance Measurements.....	449
	V.M. Antonetti and J.C. Eid	
7.	A Novel Design Concept for Reduction of Thermal Contact Resistance.....	461
	E.J. Pinto and B.B. Mikic	
V. THERMAL ANALYSIS AND COMPUTER MODELING		
1.	Thermal Computations in a Semiconductor Die Using Surface Elements and Infinite Images.....	474
	K.J. Negus and M.M. Yovanovich	
2.	Three-Dimensional Natural Convection Cooling of an Array of Heated Protrusions in an Enclosure Filled with a Dielectric Fluid.....	486
	K.Y. Liu, I.T. Yang and M.D. Kelleher	
3.	Heat Transfer Enhancement by Flow Destabilization: Application to the Cooling of Chips.....	498
	G.Em. Karnadakis, B.B. Mikic and A.T. Patera	
4.	The Development of a Computational Scheme for Natural Convection in an Enclosure with Multiple Isolated Heat Sources.....	522
	H. Ozoe, H. Miyachi and K. Inai	
5.	Three-Dimensional Turbulent Diffusion from Discrete Heat Sources in a Two-Dimensional Channel Flow.....	535
	N. Kasagi, M. Hirata, R. Kaneko and H.K. Wong	
6.	A Multi-Method Study of Thermal Conduction in Bodies in Contact.....	550
	A. Hagi-Shiraki and R. Lakshminarayana	

<地方研究グループ活動報告>

(1) 九州研究グループ講演会

日 時：昭和62年2月9日(月) 13:30~17:10

場 所：九州大学工学部2号館 生産機械工学科314号室

講 演：

- 1) 熱伝達におよぼす気泡の液体のかくはん効果に関する研究
(相対向する鉛直平行平板伝熱面の場合)
玉利賢一(鹿児島大・工) 鳥居修一(九州大・総理工)
- 2) Stochastic model による円筒内固気二相流の数値解析
田川久人(九州大・総理工) 清水昭比古(九州大・総理工)
長谷川修(九州大・工)
- 3) 平板形集熱器の集熱効率改善と火山性降灰の影響
玉利賢一(鹿児島大・工) 村松博久(鹿児島大・工)
- 4) 矩形領域内の自然対流ならびに共存対流の数値計算について
尾添紘之(九州大・生研)

[講演概要]

講演1) 矩形断面垂直ダクトの対向する2面を加熱面、他を非加熱面として液体プール中に置き、ダクト内に空気泡を吹き込むことにより生じる液体かくはん効果に基づく伝熱促進について調べた。試験液体、空気吹き込みノズルの数、矩形伝熱面の幅を変化させて得られた実験結果は、プール中に置かれた単一の垂直矩形平板伝熱面の場合と同様に、気泡干渉係数の概念の導入によって整理できることを示した。

講演2) Stochastic Model を用いて粒子状物質を浮遊する乱流を解析するアルゴリズムを開発し、これを鉛直上昇管内の固気二相流に適用し、対応する実験データとの比較も行なって解法の妥当性を検討した。解析に際しては面相間の相互作用力としての通常の抗力、重力の他に Magnus 力、半径方向の Drift 力を考慮し、さらにレイノルズ応力場を模擬する結合確率密度関数の決定法、壁-粒子間の相互作用の記述法などに関する提案を行った。

講演3) 活火山に隣接した都市で用いられる太陽熱集熱器の性能を明らかにする目的で、集熱板表面のふく射および被加熱液体側の対流熱伝達から成る伝熱過程に及ぼす火山性降灰の影響について調べた。実規模の集熱器での熱伝達に及ぼす自然降灰の有無の影響を実測し、また、それを模擬するために人口降灰を用いた実験装置についても詳細な検討を行って、降灰時の熱伝達の整理式を見出した。また集熱板の表面性状が伝熱性能に与える影響についても検討を行った。

講演4) 渦度変数系の流速をベクトルポテンシャルのみならずスカラーポテンシャルを導入して定義することにより流入出のある問題を解くことができることを示した。この手法を床加熱、側壁の一部冷却、正方形四コーナーのスリット型流入出のある問題に応用した。これは同じ条件における水槽可視化実験結果とよく一致することを示した。また可視化実験をビデオで示した。

(九州地方連絡幹事 藤田 恭伸)

(2) 中国・四国研究グループ講演会

日時： 昭和62年2月6日（金） 13:10～17:00

場所： 山口大学工学部

特別講演： 半導体デバイスの製造技術における熱的問題

鳥居 卓爾（日立製作所機械研究所）

講演： 1) 気泡核の生成

千葉 徳男（広島大工）

2) 衝突板上流に多孔板をおいた場合の衝突噴流熱伝達の研究

※栗間 諄二（山口大工），宮本 政英（山口大工）

原田 俊光（山口大工院）

〈講演概要〉

特別講演 半導体産業の最近の趨勢についての解説および半導体デバイスの種類・構造，その製造プロセスについての説明があった。同時に，半導体素子製造工場の実情や各種製造装置・処理装置についても，その詳細が述べられた。統いて製造技術上の熱的問題として，熱拡散炉内に生じる温度分布をいかに均一化するかという問題から製造工場での空調機からの空気流の問題まで広い範囲のトピックスについての解説があった。

講演1) 沸騰における気泡核の生成機構を検討するため，均一場および不均一場について実験を行い，初気泡の発生を統計的見地から考察した結果についての報告である。均一場についての実験としては過熱度が一定の水滴を油中に保持し，水滴崩壊までの待ち時間を測定し，その分布形から気泡核生成に対するモデルと実験式が示された。また不均一場での実験として，細線を用いたプール飽和沸騰について沸騰開始温度を繰り返して求め，その統計的性質を考察した結果，上述の実験式が適用可能であることが述べられた。

講演2) 上流に多孔板を設けた衝突板に軸対称空気噴流を衝突させた場合の伝熱促進のメカニズムを実験的に検討したものである。実験は，多孔板の孔径，板厚を変化させて行い，局所及び平均熱伝達率の最適条件を検討するとともに，可視化実験によって流動特性が調べられた。その結果として，多孔板後方に生じる小噴流間の相互作用が伝熱を促進していること，淀み点での熱伝達率が最も促進される条件などが報告された。

（中国・四国地方連絡幹事 須藤浩三）

(3) 関西研究グループ講演見学会

日時：昭和61年12月8日(月)

場所：大阪大学附属図書館吹田分館 視聴覚ホール

講演：1) 原子炉事故後崩壊熱に関するデブリベッドの冷却性

宮崎慶次(阪大工)

2) 乳化燃料油滴の蒸発と燃焼挙動について

木本恭司(大阪府立高専)

3) アークプラズマとその応用

牛尾誠夫(阪大溶接工学研究所)

見学：大阪大学溶接工学研究所

大阪大学工学部原子動力実験棟

<講演概要>

講演1) 原子炉の仮想事故として炉心溶融事故を想定して、微粒化燃料が堆積して形成するデブリベッドからの崩壊熱に対する冷却性を調べるため、ドライアウト熱流束の測定を行った。内径 50 mm のパイレックスガラス製容器内に水と鋼球ベッドを入れ、20 kHz、30 kW 定格の高周波電力による加熱で模擬した。実験範囲は鋼球の粒径は 0.3~4 mm、系圧力は 0.02~0.5 MPa であった。また、TMI-1 型の損傷炉心デブリベッドを円柱形鋼製ペレットと Al_2O_3 球の混合物で模擬した。実験結果は主としてドライアウト熱流束の圧力および粒径への依存性および冷却剤の流れの影響についてまとめたが、対向二相流の概念を入れた Lipinski の 0-Dモデルが概ねよく合う。混合粒径ベッドに対しては、数を重みとする単純平均を等価直径として用いれば比較的良好、割合は低くても小径で数の多い粒子がドライアウトを支配する。ベッド底部からの冷却剤流入が許容される場合には、ドライアウト熱流束は冷却剤の完全蒸発のレベルまで増加し、極少量の質量流束や循環水頭によって大きく冷却性能が向上する。これは沸騰自然対流または部分的なポンプ循環により全炉心崩壊に対する冷却が可能であることを示唆している。

講演2) 乳化燃焼法による燃焼促進効果の有無に関連して、A重油-水(W/O)乳化燃料油滴の蒸発及び燃焼挙動を詳細に観察した。乳化燃料油滴中の水滴径の大小による蒸発寿命の相違に注目して加熱面上での蒸発実験を行った結果、水添加割合が一定であっても、水滴径が小さく(1~2 μm)、かつ均質な乳化燃料(乳化燃料1)では、二段蒸発現象が観察され、A重油単体の場合よりも油滴寿命はむしろ長くなる。一方、10 μm を超える粗大水滴のある滴径分布の広がった乳化燃料(乳化燃料2)では、高温の膜沸騰域で寿命がA重油の半分以下に激減する。高速度写真によると、これらの現象は油滴と加熱面との間の伝熱抵抗と

なる蒸気膜がマイクロ爆発により撃ち破られるか否かによる。一方、電気炉内での油滴の燃焼実験においても乳化燃料1では二段蒸発に似た二段燃焼の現象が観察され、乳化燃料2では燃焼末期に激しいマイクロ爆発が生じた。すなわち水添加割合ではなく、油滴内の水滴径の大きさ及びその分布がこれらの現象の主要因であることが判明した。

講演3) アーク放電やグロー放電は最も簡単にプラズマを発生させる方法であり、これらを物質の合成、材料表面の被覆や改質に応用しようとする技術が急激に広がりつつある。それらの中には、多くの輸送現象が含まれ、未解決の基本的問題もいくつか存在する。その現状を概観するために、主として、アークほうでんをとりあげ、

- (1) アークプラズマの特性と制御パラメータ
- (2) 電極現象と新しい熱陰極の開発
- (3) 冷陰極現象を利用したイオンプレーティング
- (4) 陽極現象と超微粒子の生成
- (5) プラズマ柱利用として種々の物質合成
- (6) 減圧アークと溶射への利用

等について現状技術研究の紹介と伝熱現象としての問題把握が提起された。

以上の講演の後、加治先生(幹事)、牛尾先生、宮崎先生のお世話で、溶接工学研究所と超高エネルギー密度熱源センターおよび原子動力実験棟を見学させていただいた。

(関西地方連絡幹事 片岡邦夫)

編集委員長を引き受けて1年、やっと任期最後の4月号の編集を終わり、ほっとしたところである。

4月号は、伝熱における数値シミュレーション特集を行い、その方面でご活躍の方々をお願いして、大変お忙しい中を皆様に力作を書いていただきました。会員からの要望もあり、「伝熱研究」を他の学会誌、論文集、ニュースレター等とは一味違った特色あるものとする一つの試みとして、解説一つ当たりの頁数も増やし、内容も十分に理解しやすい様をお願いいたしました。多分、御好評を頂けるものと思っております。

この1年間、何かと新しい試みをさせていただいたために、編集委員、執筆者、会員の方々には大変ご迷惑をおかけいたしましたことを、お詫び申し上げます。お蔭を持ちまして、「伝熱研究」のワープロ化もだいおゆきとどき、本号は前号よりは編集が少々楽でした。今後は、会員の協力をえて経済的にも楽になることと思えます。

最後に、「伝熱研究」が、これから更に充実されることを祈って、次の編集委員長へとバトンタッチいたします。

* お 知 ら せ *

(1) 第25期（昭和61年度）総会のお知らせ

本会の第25期（昭和61年度）総会が、日本伝熱シンポジウムの第2日目に下記のごとく開催されますので、会員各位のご出席をお願いいたします。

記

日 時 昭和62年 5月28日（木） 13:00～13:30

場 所 愛媛県民文化会館

〒790 松山市道後町 2-5-1 Tel 0899-23-5111

- 議 題
- (1) 昭和61年度会務報告
 - (2) 昭和61年度会計報告
 - (3) 第26期役員選出
 - (4) 旧・新会長挨拶

(2) 新会員名簿の発行

61年12月から62年 1月にかけて会員の皆様のご協力により会員データを更新し、新しい会員名簿ができあがりました。本号と前後して会員の皆様のところにお届けすることができると思います。データは昭和62年 4月15日現在のものです。

前回会員名簿は2年前の昭和60年 4月に発行しましたが、2年間に変更データは大小約 400件に上り、さらに今回のデータ更新でほぼ半分のデータが新しくなりました。今回の会員名簿には従来の勤務先、自宅住所のほかに「専門分野別会員名簿」を追加しました。この専門分野別名簿には、一つの専門と同時に他の専門分野もわかるように付記してありますのでいろいろご利用いただけることを期待いたしております。さらに、会員の地区別会員数分布、専門分野別会員数分布、年令別会員数分布および伝熱シンポジウム、伝熱セミナー関係の資料も追加いたしました。年令別会員数分布については、生年データをいただけないのが 165件ありますので不確さが15%程度あります。

伝熱シンポジウム期間中、昨年同様に会場で個人会員会費の受付事務をいたしますのでご利用ください（事務局）。

(3) 第24回日本伝熱シンポジウム

- 開催日 昭和62年5月27日(水) ~ 5月29日(金)
- 講演会会場 愛媛県県民文化会館
〒790 松山市道後町2-5-1 Tel. (0899) 23-5111
- シンポジウム
参加費 一般事前申込1名5,000円、当日申込1名6,000円、
学生・大学院生事前申込1名2,500円、当日申込1名
3,000円(いずれも講演論文集代を含みません)
- 講演論文集代 1冊5,000円(日本伝熱研究会会員には1冊無料進呈)。
ただし、郵送の場合は一冊5,550円
- 懇親会 5月28日(木) 18:00 ~ 20:00
会場 松山全日空ホテル
〔〒790 松山市一番町3-2-1 Tel. (0899) 33-5511〕
事前申込1名6,000円、当日申込1名7,000円、ただし、
同伴夫人は無料です。
- 申込要領 郵便振替払込書の通信欄に、(1)氏名(ふりがな)、(2)勤務
先または学校名、(3)講演論文集冊数(進呈分以外)、(4)懇
親会出欠(夫人同伴の方はその旨を明記)をご記入の上、当該費用
をご送金下さい。参加証は当日、受付にてお渡しいたします。
- 事前申込締切 昭和62年5月11日(月) 消印有効
- 申込先

郵便振替口座： 徳島 6-7100
第24回日本伝熱シンポジウム準備委員会

〒790 松山市文京町3
愛媛大学工学部生産機械工学科内
Tel. (0899) 24-7111 内線 3735又は3736

特別講演

5月28日(木) 13:30~14:30
「化学物質の地球規模における拡散」
講師 愛媛大学農学部 立川 涼 教授

講演次第

(* 印は講演者、各講演は10分、討論はそれぞれの講演群のうちで適宜まとめて行います。)

————— A 室 —————

第1日 5月27日(水)

[強制対流 (I)] 講演 (9:00~9:50), 討論 (9:50~10:40)

[座長 土方邦夫(東工大)]

- A 111 壁乱流における熱および運動量輸送の統計的性質
(第1報, 速度と温度の高次モーメントおよび確率分布)
機正 長野靖尚(名工大) 機正*田川正人(名工大)
機学 所 昭秀(名工大院)
- A 112 壁乱流における熱および運動量輸送の統計的性質
(第2報, 秩序運動と組織的乱流伝熱の微細構造)
機正 田川正人(名工大) 機正*長野靖尚(名工大)
- A 113 二次元チャネル乱流におけるスカラー量の非等方拡散
機正 笠木伸英(東大) 機学*金子隆一(東大院)
機准 明 賢國(東大院) 機正 平田 賢(東大)
- A 114 乱れの壁面漸近挙動を考慮した $k-\varepsilon$ モデルによる乱流熱伝達の予測
機准*明 賢國(東大院) 機正 笠木伸英(東大)
機正 平田 賢(東大)
- A 115 二次元剪断流における渦形成と混合の数値シミュレーション
機学*加守田 昌史(大阪大院) 機正 高城 敏美(大阪大)
機正 小宮山 正治(大阪大)

[強制対流 (II)] 講演 (10:50~11:30), 討論 (11:30~12:10)

[座長 五十嵐 保(防衛大)]

- A 121 後向きステップ・チャネル内の層流熱伝達
機正*近藤 維男(豊田中研) 機正 長野靖尚(名工大)
- A 122 後向きステップ下流の再付着域の熱伝達機構
機正 河村 隆雄(岐阜高専) 機学*田中 誠司(岐阜大院)
機正 熊田 雅弥(岐阜大) 機正 馬淵 幾夫(岐阜大)

A 123 前向きステップによるはく離点近傍伝熱特性の時空間的微小構造解明の研究
(層流および乱流境界層の場合)

機正 森 康夫 (電通大)

機正*小泉 博義 (電通大)

機学 野吾 祐一郎 (電通大院)

A 124 ディフューザの剝離流熱伝達率の予測式の考察

機正*涌坂 伸明 (船舶技研)

[強制対流 (III)] 講演 (13:10~14:00), 討論 (14:00~14:50)

[座長 高城 敏美 (大阪大)]

A 131 助走区間の乱流特性

機正*鶴野 省三 (防衛大)

A 132 矩形断面を持つ管内安定温度成層流の乱流熱輸送

(混合過程の流れ方向の変化)

機学 荻田 健之 (慶大院)

機学*小林 健一 (慶大院)

機正 菱田 公一 (慶大)

機正 前田 昌信 (慶大)

機正 横堀 誠一 (東芝)

A 133 一様吹き出しを伴う矩形ダクト内乱流の研究

(平均速度及び変動速度場の測定)

*馬場 利秋 (京大院)

機正 鈴木 健二郎 (京大)

Ali K. A.
Rahman (京大院)

機正 萩原 良道 (京大)

篠原 健治郎 (京大)

A 134 円管内乱流のステップ加速による過渡挙動の研究

機正 田中 宏明 (東大)

機学*汐崎 浩毅 (東大院)

A 135 円管内流れの乱れ特性に関する一考察

機正*千葉 徳男 (香川職短大)

機学 増田 誠司 (広島大院)

機正 吉廻 秀久 (バブル立)

[強制対流 (IV)] 講演 (15:00~15:40), 討論 (15:40~16:20)

[座長 長野 靖尚 (名工大)]

A 141 管内旋回流における乱流輸送の予測

機正*平井 秀一郎 (大阪大)

機正 高城 敏美 (大阪大)

機学 東谷 輝義 (大阪大院)

A 142 三次元楕円型方程式による曲り円管内乱流複合対流熱伝達の数値解析

機正 秋山 光庸 (宇都宮大)

*斉藤 正夫 (宇都宮大)

機正 杉山 均 (宇都宮大)

機正 西脇 一郎 (宇都宮大)

機正 K. C. Cheng (アルバータ大)

A 143 曲円管内乱流について

機正*青山 善行(愛媛大)

機正 土万 邦夫(東工大)

機正 二神 浩三(愛媛大)

野本 泰浩(愛媛大院)

A 144 低流速域における返しベンド内凍結熱伝達

機正*田子 真(北大)

機正 福迫 尚一郎(北大)

機学 大野 有也(北大院)

[強制対流 (V)] 講演 (16:30~17:10), 討論 (17:10~17:50)

[座長 秋山 光庸(宇都宮大)]

A 151 波状壁面を有する三次元管路内の流動

(乱流場の実験と検討)

機学*深沢 美紀(静岡大)

機正 中山 顕(静岡大)

機正 児山 仁(静岡大)

A 152 正弦波状管路内の乱流熱伝達特性

機正* M.R. MOTAMED
EKTESABI(広島大院)

機学 福島 紀充(広島大院)

機正 佐古 光雄(広島大)

機正 千葉 徳男(広島大)

A 153 固体壁内非定常熱伝導を考慮した乱流温度場の数値解析

機学*黒田 明慈(東大院)

機正 笠木 伸英(東大)

機正 平田 賢(東大)

A 154 部分加熱を受ける非円形断面管路の伝熱に対する壁内熱伝導の影響

(相当フィン効率による整理)

機正*佐藤 勲(東工大)

機正 黒崎 晏夫(東工大)

第2日 5月28日(木)

[強制対流 (VI)] 講演 (9:00~9:40), 討論 (9:40~10:20)

[座長 笠木 伸英(東大)]

A 211 円柱によりかく乱を受ける乱流境界層

(第5報, 円柱径の影響)

機学*鈴木 洋(京大院)

吉川 慈人(京大院)

機正 鈴木 健二郎(京大)

A 212 千鳥状配列円柱群を有する平行平板伝熱面に関する研究(第2報)

機正*矢尾 匡永(奈良高専)

機正 中谷 洵(奈良高専)

機正 鈴木 健二郎(京大)

A 213 突起付き伝熱面の熱伝達

機正*藤田 誠(原研)

A 214 スリット円柱による平板強制対流熱伝達の促進

機正*五十嵐 保(防衛大)

[強制対流 (VII)] 講演 (10:30~11:10), 討論 (11:10~11:50)

[座長 田中宏明(東大)]

A 221 流れ方向に振り角度をもつみぞ付きアルミ平板の熱伝達(第二報)

機正*古賀 薫(青山大)

寺崎 和郎(青山大)

松浦 健児(青山大)

竹村 啓(三菱アルミ)

金子 正文(三菱アルミ)

A 222 千鳥配列微細フィン面の熱伝達特性

*佐々木 伸一(NTT)

機正 岸本 享(NTT)

A 223 内壁に斜め突起列を有する管内乱流の熱伝達

機正 土方 邦夫(東工大)

機学*横井 基尚(東工大)

A 224 内管をもつ円管内の流動と熱伝達

機正*高本 慶二(東海大)

機正 青木 功(東大)

機正 小竹 進(東大)

[強制対流 (VIII)] 講演 (14:40~15:20), 討論 (15:20~16:00)

[座長 鈴木健二郎(京大)]

A 231 平面壁近傍にある円柱まわりの伝熱特性に及ぼす乱流境界層厚さの影響

機正*桧和田 宗彦(岐阜大)

松原 功治(岐阜大学)

機正 熊田 雅弥(岐阜大)

機正 馬淵 幾夫(岐阜大)

A 232 壁面近傍におかれた円管群の熱伝達

機正*相場 眞也(秋田高専)

機学 角田 孝(秋田高専学)

関谷 正(秋田高専学)

A 233 単相伝熱促進体周りの流動および熱伝達特性

機正*佐藤 浩(慶大院)

機正 菱田 公一(慶大)

機正 前田 昌信(慶大)

機正 高橋 研二(日立)

A 234 平板上に配列された直方体よりの強制対流熱伝達

機正 鳥越 邦和(ダイキン工業)

*栗原 利行(ダイキン工業)

機正 川添 政宣(ダイキン工業)

[強制対流 (IX)] 講演 (16:10~16:40), 討論 (16:40~17:10)

[座長 菱田公一 (慶大)]

- A 241 横磁場下における液体金属リチウム流の流動・伝熱特性に関する研究
機正・原正*高橋 実 (東工大) 機正・原正 井上 晃 (東工大)
機正・原正 有富 正憲 (東工大) 松崎 充男 (東工大)
- A 242 コロナ放電を利用した対流伝熱の促進
(統報, 放電極の極性および配列の影響)
機正 滝本 昭 (金沢大) 機正*多田 幸生 (金沢大)
機学 山田 和豊 (金沢大院) 機正 林 勇二郎 (金沢大)
- A 243 直交平等電場による層流強制対流熱伝達の促進 (その2)
*藤野 敏明 (慶大院) 機学 横山 洋一 (慶大)
機正 森 康彦 (慶大)

第3日 5月29日 (金)

[強制対流 (X)] 講演 (9:00~9:50), 討論 (9:50~10:40)

[座長 荻野文丸 (京大)]

- A 311 3次元傾斜差分スキームの研究
機正*古藤 悟 (三菱電機) 機正 山中 晤郎 (三菱電機)
- A 312 円管合流路における熱伝達特性
化工正*川島 陽介 (姫路工大) 機正 村井 一弘 (姫路工大)
機正 中西 重康 (姫路工大)
- A 313 高濃度石炭-水スラリーの管内層流熱伝達
化工正*苅井 洋基 (山口大) 化工正 佐野 雄二 (山口大)
- A 314 海水噴霧による着氷挙動
機正 福迫 尚一郎 (北大) 機学*堀部 明彦 (北大院)
- A 315 流体中の可溶性物質の壁面付着に関する研究
機正・原正 石黒 亮二 (北大) 原正*坂下 弘人 (北大)
機正・原正 杉山 憲一郎 (北大)

[強制対流 (XI)] 講演 (10:50~11:20), 討論 (11:20~11:50)

[座長 片岡邦夫 (神戸大)]

- A 321 人規模粗さによる軸対称衝突噴流熱伝達の増進に関する研究
機正*三宅 常時 (東大院) 機正 平田 賢 (東大)
機正 笠木 伸英 (東大) 機学 岩崎 洋一 (東大院)

- A 322 衝突壁上流に多孔板を有する衝突噴流熱伝達 (第2報)
 機正*栗間 諄二 (山口大) 機学 原田 俊光 (山口大院)
 機正 宮本 政英 (山口大)
- A 323 よどみ点まわりの高性能均一冷却に関する基礎的研究
 機正 吉田 英生 (東工大) 機学*江尻 革 (東工大学)
 機正 越後 亮三 (東工大)

[強制対流 (Ⅻ)] 講演 (13:10~13:40), 討論 (13:40~14:10)
 (座長 熊田 雅弥 (岐阜大))

- A 331 衝突噴流熱伝達に及ぼす加熱片寸法の影響
 機正・原正 一宮 浩市 (山梨大) 機学*保坂 宣夫 (山梨大院)
 機正・原正 越後 亮三 (東工大)
- A 332 励起噴流における乱流伝熱機構
 化工正*片岡 邦夫 (神戸大) 化学 阿瀬 尚 (神戸大)
 化学 迫 紀幸 (神戸大)
- A 333 二次元対向噴流における流動および伝熱
 (非定常挙動に関する解析)
 機正*山下 博史 (名大) 機准 王 焱 (名大院)

[流動層] 講演 (14:20~15:10), 討論 (15:10~16:00)
 (座長 二神 浩三 (愛媛大))

- A 341 浮遊粒子中に置かれた管群まわりの流動と熱伝達特性
 機正 渡辺 吉典 (三菱重工) 機学*森川 敏夫 (岐阜大院)
 機正 熊田 雅弥 (岐阜大) 機正 馬淵 幾夫 (岐阜大)
- A 342 流動層中の水平加熱円管まわりの流動および伝熱特性の基礎的研究 (第2報)
 機正*石黒 博 (東工大) 機正 黒崎 晏夫 (東工大)
 安井 元一 (東工大)
- A 343 流動層のフリーボード域における水平円管群の熱伝達特性
 機正 宮本 政英 (山口大) 機正 加藤 泰生 (山口大)
 機学*千村 俊和 (山口大) 機正 出井 安正 (宇部興産)
- A 344 放射・対流併加熱を用いる振動傾斜型流動層乾燥機による粉粒体の乾燥
 化工正*板谷 義紀 (名大) 化学 三浦 光治 (名大)
 化工正 架谷 昌信 (名大)
- A 345 流動層蒸発器の着霜と防霜に関する研究
 機正 相原 利雄 (東北大) 機学*嶽間沢 秀孝 (東北大院)
 機正 円山 重直 (東北大) 機正 本郷 三夫 (東北大)

第 1 日 5月27日(水)

〔凝縮 (I)〕 講演 (9:20~10:00), 討論 (10:00~10:40)

〔座長 山 川 紀 夫 (岩手大)〕

B 111 水平管群を流れる冷媒 R113 の凝縮熱伝達

(ごばん目配列管群・下降流の場合)

機正 本 田 博 司 (岡大)

機正 内 間 文 顕 (岡大)

機正 野 津 滋 (岡大)

* 中 田 裕 紀 (岡大院)

B 112 水平ローフィン付管群の凝縮熱伝達

(管群内の液流動を考慮した解析)

機正 本 田 博 司 (岡大)

機正 * 野 津 滋 (岡大)

機学 武 田 泰 仁 (岡大院)

B 113 EHD凝縮器の実用化研究

(第一報, 大気圧下での螺旋電極の伝熱促進性について)

機正 * 渡 辺 裕 (東芝)

機正 熊 谷 幹 夫 (東芝)

機正 山 下 勝 也 (東芝)

電正 花 井 正 広 (東芝)

機正 菊 地 健 太 郎 (機技研)

機正 矢 部 彰 (機技研)

機正 竹 谷 隆 夫 (機技研)

B 114 EHD凝縮器の実用化研究

(第二報, 擬似滴状凝縮化促進方法について)

機正 * 山 下 勝 也 (東芝)

機正 熊 谷 幹 夫 (東芝)

機正 渡 辺 裕 (東芝)

機正 菊 地 健 太 郎 (機技研)

機正 矢 部 彰 (機技研)

機正 竹 谷 隆 夫 (機技研)

〔凝縮 (II)〕 講演 (10:50~11:30), 討論 (11:30~12:10)

〔座長 小 山 繁 (九大)〕

B 121 冷媒 R11 の内面溝付管内凝縮 (統報)

機正 本 田 博 司 (岡大)

機正 野 津 滋 (岡大)

機学 * 松 尾 宣 幸 (岡大院)

B 122 傾斜粗さをもつ粗面上における凝縮熱伝達

化工正 * 泉 正 明 (岩大)

機正 大 内 雅 樹 (岩大)

化工正 山 川 紀 夫 (岩大)

機正 武 山 斌 郎 (東北大)

J. W. Westwater (イリノイ大)

- B 123 過冷却臭化リチウム水溶液への水蒸気の吸収
 機正 森 岡 齋 (徳島大) 機正 清 田 正 徳 (徳島大)
 機学*福 井 文 雄 (徳島大院)
- B 124 水平冷却管上を流下する臭化リチウム水溶液膜への水蒸気の吸収
 機正*清 田 正 徳 (徳島大) 機正 森 岡 齋 (徳島大)
 機学 土 井 啓 利 (徳島大院)

〔凝縮 (III)〕 講演 (13:30~14:10), 討論 (14:10~14:50)

〔座長 綾 威 雄 (船舶技研)〕

- B 131 落下液滴上への非混合直接接触凝縮に関する研究
 *中 島 宏 (東大院) 機正・化工正 棚 沢 一 郎 (東大)
- B 132 滴状凝縮熱伝達における狭さく熱抵抗の理論的研究
 機正*鶴 田 隆 治 (九工大) 機正 田 中 宏 明 (東大)
- B 133 表面膜の粘弾性を利用した直接接触蒸発の促進の試み
 機正*森 康 彦 (慶大) 遠 藤 繁 樹 (慶大院)
 緑 川 悟 (慶大)
- B 134 電場による液滴への直接接触熱伝達の促進
 (正弦波状交流電場によって誘起される液滴の変形振動とその伝熱促進効果)
 機正*梶 信 藤 (職訓大) 機正 森 康 彦 (慶大)
 機正 榎 谷 吉 郎 (金沢工大)

〔凝縮 (IV)〕 講演 (15:00~15:40), 討論 (15:40~16:20)

〔座長 本 田 博 司 (岡山大)〕

- B 141 高速度比で混合する凝縮気液二相流に関する研究
 (混合部の圧力変動特性について)
 機正 花 岡 裕 (室蘭工大) 機学*永 田 秀 一 (室蘭工大)
 機正 前 野 一 夫 (室蘭工大)
- B 142 疎液性面上の膜状から滴状への凝縮遷移
 機正 宇 高 義 郎 (東工大) 機正 斎 藤 彬 夫 (東工大)
 機学*柳 田 浩 幸 (東工大) 山 根 正 司 (東工大学)
- B 143 プール水中での蒸気凝縮振動における熱の仕事への変換
 機正*綾 威 雄 (船舶技研) 機正 成 合 英 樹 (筑波大)
- B 144 分子線によるH₂Oクラスターの生成
 機正*井 上 剛 良 (東大院) 機正 小 竹 進 (東大)

〔凝縮 (V)〕 講演 (16:30~17:10), 討論 (17:10~17:50)

〔座長 野津 滋 (岡山大)〕

B 151 非共沸2成分混合蒸気の水平円管内凝縮熱伝達

機正 望月 貞成 (東京農工大) *富永 守 (東京農工大)

B 152 混合冷媒R22+R114の水平管内凝縮に関する実験的研究

機正 藤井 哲 (九大) 機正 小山 繁 (九大)

機正 高松 洋 (九大) 機准*宮良 明男 (九大)

B 153 2成分蒸気の強制対流凝縮に関する研究 (第2報)

機正 姫野 修廣 (東工大) 機学*後藤 恵之 (東工大)

機正 土方 邦夫 (東工大)

B 154 水と有機化合物との二成分混合蒸気の凝縮熱伝達

機正*荻野 立丸 (京大)

第2日 5月28日 (木)

〔自然対流 (I)〕 講演 (9:00~9:40), 討論 (9:40~10:20)

〔座長 藤井 丕夫 (九大)〕

B 211 液体金属の水平円筒まわりの自然対流伝熱特性

原正・機正*杉山 憲一郎 (北大) 原学 馬 英 (北大)

原正・機正 石黒 亮二 (北大)

B 212 鉛直平行平板間の自由対流における乱れ場の発達

機正 宮本 政英 (山口大) 機正*加藤 泰生 (山口大)

機正 栗間 諄二 (山口大) 機学 兼安 信太郎 (山口大院)

B 213 発熱性流体の水平管内非定常自然対流熱伝達

(報2, 流体の熱発生率が消滅する場合)

機正 三田地 紘史 (豊橋技大) 機学*寺野 哲浩 (豊橋技大)

機正 亀ヶ谷 博 (玉学大) 機学 五十嵐 睦典 (豊橋技大)

B 214 水平線熱源からのブルームの揺動

(温度成層内の乱流ブルームの特徴)

機正*能登 勝久 (神戸大) 堀井 勉 (神戸大)

機正 松本 隆一 (神戸大)

〔自然対流 (II)〕 講演 (10:30~11:10), 討論 (11:10~11:50)

〔座長 杉山憲一郎 (北人)〕

B 221 下端が閉じた垂直平行平板内の自然対流熱伝達

(第3報, 一様温度と断熱の2平板)

機正*山崎 郭 滋 (高知高専)

B 222 溝に埋め込まれた垂直平行平板列の自然対流熱伝達

機正*河合 洋明 (北海道工大)

機正 岡垣 理 (北海道工大)

B 223 障害板がある場合のフィンの放熱性能

機正*横野 泰之 (東芝)

機正 佐々木 富也 (東芝)

機正 石塚 勝 (東芝)

B 224 鉛直2平板間密度成層内の自然対流に関する研究

機正*姫野 修廣 (東工大)

機正 土方 邦夫 (東工大)

川本 浩一 (東工大学)

〔自然対流 (III)〕 講演 (14:40~15:20), 討論 (15:20~16:00)

(共存対流)

〔座長 能登勝久 (神戸大)〕

B 231 等熱流束加熱鉛直円管内上向流の強制・自然複合対流熱伝達

(温度助走区間の挙動)

機正 田中 宏明 (東大)

機学*正木 徹 (東大院)

B 232 分散熱源を有する平行平板間の層流共存対流熱伝達

機正*富村 寿夫 (九大)

機正 藤井 丕夫 (九大)

B 233 自然・強制共存対流場における複数定常解

機正*木枝 茂和 (日立)

AICHE K. F. Jensen (ミネソタ大)

B 234 垂直な平板に沿う強制-自然共存対流の乱流熱伝達

機准*稲垣 照美 (豊田高専)

機正 北村 健三 (豊橋技科大)

機正 小森 勝夫 (豊田高専)

〔自然対流 (IV)〕 講演 (16:10~16:40), 討論 (16:40~17:10)

(ループ)

〔座長 吉岡啓介 (大分大)〕

B 241 単相閉ループ内自然循環流動特性に関する研究

(加熱部内の流れ)

機正*石田 紀久 (原研)

機正 赤川 浩爾 (神戸大)

機正 藤井 照重 (神戸大)

橋本 和典 (三菱重工)

原正 石塚 信 (原研)

- B 242 短管路く形ループにおける単相自然循環流
 機正*忽那 泰章(神戸商船大) 機正 森田 駿樹(神戸商船大)
 機正 福田 勝哉(神戸商船大)
- B 243 傾斜自然循環ループ内の二次流れ
 機学*池亀 真一(九工大) 機正 増岡 隆士(九工大)
 機正 鶴田 隆治(九工大)

第 3 日 5月29日(金)

〔自然対流 (Ⅴ)〕 講演(9:00~9:50), 討論(9:50~10:40)
 (閉空間) [座長 増岡 隆士(九工大)]

- B 311 直立密閉空間内自由対流における境界層外縁の乱れ効果
 機正*吉岡 啓介(大分大)
- B 312 閉空間内自然対流伝熱に対する垂直仕切板の効果
 化工正*西村 龍夫(広島大) 化工学 白石 満広(広島大院)
 化工正 河村 祐治(広島大)
- B 313 環状空間内自然対流の高レーレー数域における研究
 機正*三木 康臣(九人) 原学 人屋 寿三(九大)
 守田 幸路(九大) 機正 福田 研二(九大)
 機正 長谷川 修(九大)
- B 314 円筒容器内のサーマル・スパイクに伴う自然対流
 機正・原正*戸田 三朗(東北大) 機正・原正 黒川 政秋(東北大)
 辰野 晋(東北大院) 原正 堀 豊(東北大)
- B 315 磁場と重力場における液体金属シリコンの二次元自然対流の数値計算
 機正・化工正*尾添 紘之(九大) 丸尾 英司(岡山大)

〔自然対流 (Ⅵ)〕 講演(10:50~11:30), 討論(11:30~12:10)
 (融解、凝固) [座長 斎藤 武雄(東北大)]

- B 321 融液よりの結晶育成過程における自然対流に対する磁場の効果
 機正*宗像 鉄雄(東大院) 機正 棚沢 一郎(東大)
- B 322 垂直円管まわりの水の凍結
 機正 岡田 昌志(青山大) 機学*中村 進(青山大院)
- B 323 垂直氷壁の融解挙動
 機正・冷正 服部 賢(長岡技科大) 機正・冷正 青木 和夫(長岡技科大)
 機正 岡田 昌章(長岡技科大) 機学*桐生 吉栄(長岡技科大)

B 324 海水中におかれた水平氷柱の融解熱伝達

機正 福迫 尚一郎 (北大)

機学*北山 邦彦 (北大院)

[自然対流 (VII)] 講演 (13:10~14:00), 討論 (14:00~14:50)
(多孔質)

[座長 尾添 紘之 (九大)]

B 331 三次元多孔質体内における自然対流

(疑似スペクトル法による数値計算)

機正*木村 繁男 (東北工試)

B 332 多孔質層内自然対流における壁面間隙層の影響について

機学*田中 辰和 (九工大院)

機正 増岡 隆士 (九工大)

機正 鶴田 隆治 (九工大)

B 333 対流ブルームの多孔質壁透過

機正*増岡 隆士 (九工大)

越野 英和 (九工大)

B 334 多孔質層内の加熱物体まわりの混合対流膜沸騰

機正*中山 頭 (静岡大)

機正 児山 仁 (静岡大)

栗原 不二朗 (静岡大)

B 335 多孔質物質内に水平に置かれた円柱まわりの自然対流・強制対流共存熱伝達

機正*岡田 昌志 (青山大)

[自然対流 (VIII)] 講演 (15:00~15:30), 討論 (15:30~16:00)

[座長 宮本 政英 (山口大)]

B 341 回転場におけるマランゴニ対流に関する研究

機正 庄司 正弘 (東大)

機学*小野 直樹 (東大院)

B 342 鉛直平行平板間の熱と物質の同時移動を伴う自由対流

機正*田中 宏史 (九大)

機学 佐々木 明彦 (九大院)

機正 宮武 修 (九大)

B 343 任意境界形状における対流・拡散問題の数値計算

機正 浅古 豊 (都立大)

機正 中村 博 (都立大)

*浅葉 信 (都立大院)

————— C 室 —————

第 1 日 5月27日(水)

[沸騰 (I)] 講演 (9:20~10:00), 討論 (10:00~10:40)

[座長 塩津正博(京大)]

- C 111 薄膜抵抗体をパルス加熱した場合の発泡・気泡生長および収縮III
機正*浅井 朗(キャノン) 柴垣 庄一郎(キャノン)
- C 112 反応度事故時の熱・流体挙動に関する基礎研究
機正*井上 晃(東工大) 高橋 恵樹(東工大)
平林 毅(宇開団)
- C 113 加速度変動時の限界熱流束について
機正*横村 武宣(原研) 原正 楠 剛(原研)
原正 大辻 友雄(神戸商船大)
- C 114 衝突噴流による過渡沸騰除熱量の増大に関する研究
*佐久間 正章(東工大院) 森田 毅(東工大)
機正・原正 小澤 由行(東工大) 原正 藤家 洋一(東工大)

[沸騰 (II)] 講演 (10:50~11:30), 討論 (11:30~12:10)

[座長 藤田恭伸(九大)]

- C 121 一様加熱垂直円管内の強制流動沸騰限界熱流束に関する研究
機正*横谷 定雄(東大) 機正 甲藤 好郎(日大)
機准 渡辺 誠(東大)
- C 122 冷媒の低流量域における水平蒸発管内熱伝達に関する研究
機正 吉田 駿(九大) 機正*松永 崇(九大)
機准 洪 海平(九大院) 船正 角田 哲也(大島商船)
- C 123 電場による沸騰限界熱流束増大効果の基礎的研究
(第1報, 沸騰熱流束の相変化分割に及ぼす電場の影響)
機正*矢部 彰(機技研) 機正 井口 光儀(機技研)
機正 竹谷 隆夫(機技研) 機正 菊地 健太郎(機技研)
- C 124 ブール沸騰の限界熱流束
(第一報, モデルの概要と2, 3の適用例)
機正*熊田 俊明(北人)

〔沸騰 (III)〕 講演 (13:10~14:00), 討論 (14:00~14:50)

〔座長 横谷定雄 (東大)〕

C 131 パラフィン系液体混合物の沸騰における初気泡発生温度

機正*山崎博司 (広島大)

機学 藤本均 (広島大院)

機正 佐古光雄 (広島大)

機正 千華徳男 (広島大)

C 132 サブクール液のプール核沸騰熱伝達 (第二報)

機正 藤田泰伸 (九大)

機正*大田治彦 (九大)

機正 日高澄具 (九大)

機正 庵原久夫 (有明高専)

C 133 低速流中に置かれた円柱面上の高熱流束飽和沸騰下の伝熱特性

機正*原村嘉彦 (神奈川大)

C 134 各種多孔質沸騰伝熱面の性能比較 (第3報)

機正 伊藤猛宏 (九大)

機正*田中克典 (九大)

玉利孝徳 (九大院)

C 135 低沸点流体による粒子層内沸騰熱伝達挙動

機正*福迫尚一郎 (北大)

機学 木下和彦 (北大院)

〔沸騰 (IV)〕 講演 (15:00~15:30), 討論 (15:30~16:00)

〔座長 西尾茂文 (東大)〕

C 141 サブクール膜沸騰下限界に関する研究

機正*菊地義弘 (神戸大)

原正 永瀬睦 (京都大)

原正 岐美格 (京都大)

C 142 超音波による膜沸騰伝熱の促進

機正・化工正 飯田嘉宏 (横国大)

化学工*筒井健太郎 (横国大院)

C 143 磁場下におけるカリウムの非定常膜沸騰熱伝達

原正*高橋修 (京大)

笠原伸一 (京大)

原正 永瀬睦 (千代田化工)

田中貞美 (同志社高)

原正 芹沢昭示 (京大)

原正 岐美格 (京大)

〔沸騰 (V)〕 講演 (16:30~17:00), 討論 (17:00~17:30)

〔座長 伊藤猛宏 (九大)〕

C 151 液体ヘリウムにおける膜沸騰熱伝達

原正 桜井彰 (京大)

原正*塩津正博 (京大)

原正 畑幸一 (京大)

原正 竹内右人 (京大)

- C 152 液体ヘリウムのプール沸騰熱伝達に関する研究
 (伝熱面姿勢の影響)
 機正 西尾 茂文(東大) 機学 * R. Chandra-
 tilleke (東大院)
- C 153 超電導コイル冷却安定性の改善法に関する研究
 機正 * 西尾 茂文(東大) 機学 R. Chandra-
 tilleke (東大院)

第 2 日 5月28日(木)

[沸騰 (VI)] 講演 (9:20~9:50), 討論 (9:50~10:20)

[座長 長坂 秀雄(東芝)]

- C 211 狭い間隙における核沸騰熱伝達 (第三報)
 機正 藤田 恭伸(九大) 機正 大田 治彦(九大)
 機正 * 内田 悟(九大)
- C 212 クレビス部における沸騰伝熱特性
 (第1報, 大気圧下における dry and wet 現象と熱流束との関係)
 機正・原正 * 木下 泉(電中研) 機正 河村 孝治(電中研)
- C 213 狭い長方形流路内を通過する気泡による熱伝達の促進
 機正 * 門出 政則(佐賀大) 機正 三原 信一(佐賀大)
 小野 芳幸(佐賀大)

[沸騰 (VII)] 講演 (10:30~11:00), 討論 (11:00~11:30)

[座長 門出 政則(佐賀大)]

- C 221 多孔干渉板により制限された極小間隙内の沸騰熱伝達とその促進
 機正 * 島田 了八(東北大) 機正 駒井 淳(住友金属)
 機正 広野 洋一(東北大) 機正 熊谷 哲(東北大)
 機正 武山 斌郎(東北大)
- C 222 狭あい流路における均一加熱条件での限界熱流束
 (クオリティ0近傍での特性)
 機正 * 成合 英樹(筑波大) 機正 稲坂 富士夫(船研)
 上原 一徳(筑波大)
- C 223 狭い格子間ギャップを有する原子炉燃料棒の限界出力特性
 機正 * 横堀 誠一(東芝) 原正 加藤 賢(東芝)
 機正 長坂 秀雄(東芝) 原正 吉村 邦広(東芝)

〔二相流 (I)〕 講演 (14:40~15:20), 討論 (15:20~16:00)

〔座長 大辻友雄 (神戸商船大)〕

C 231 気液二相流動様式の変換に関する研究

機正*小川直也 (東芝)

機正 橋詰健一 (東芝)

C 232 各種流路における環状流遷移条件

機正*刑部真弘 (原研)

機正 川崎裕仁 (原研)

原正 田坂完二 (原研)

C 233 凝縮を伴う管内二相流に関する研究

(管断面内気相通過周期分布)

原正*堀 豊 (東北大)

機正・原正 戸田三朗 (東北大)

機正・原正 黒川政秋 (東北大)

新保 仁 (東北大院)

C 234 非共沸混合媒体の蒸発二相流の特性

*村田圭治 (東芝)

機正・冷正 橋詰健一 (東芝)

〔二相流 (II)〕 講演 (16:10~16:40), 討論 (16:40~17:10)

〔座長 戸田三朗 (東北大)〕

C 241 液膜流の3次元界面形状と速度分布に関する数値解析

機正*萩原良道 (京大)

C 242 流下液膜の流動特性に関する研究

(静電容量法による波形の測定)

機正*関根郁平 (苫高専)

機正 熊田俊明 (北大)

機正 石黒亮二 (北大)

C 243 水平円管内気液二相流の液膜流動に関する研究

機正*萩原良道 (京大)

関 恭子 (京大)

E. Esmail- (イランタブリ
zadeh ス大)

機正 鈴木健二郎 (京大)

第3日 5月29日 (金)

〔ミスト冷却〕 講演 (9:00~9:50), 討論 (9:50~10:40)

〔座長 林 勇二郎 (金沢大)〕

C 311 高温壁面における液体金属ミスト冷却の伝熱特性 (第2報)

機正・原正*黒川政秋 (東北大)

機正・原正 戸田三朗 (東北大)

原正 堀 豊 (東北大)

今瀬 正博 (東北大院)

杉山直樹 (東北大院)

- C 312 噴霧状気液二相流の流動と熱伝達に関する研究
 (乱流平板境界層に関する実験)
 機学*長 沢 英 治 (慶大院) 機正 菱 田 公 一 (慶大)
 機正 前 田 昌 信 (慶大)
- C 313 高温面の水冷却に関する研究
 (第2報, フォグ冷却の実験)
 機正 伊 藤 猛 宏 (九大) 機正*高 田 保 之 (九大)
 機正 中 島 肇 (九大) 機准 劉 振 華 (九大)
 入 谷 昌 徳 (九大) 鉄鋼正 白 石 典 久 (川鉄)
- C 314 ミスト冷却に関する研究
 (第2報, 伝熱面表面粗さの影響)
 機正*大久保 英敏 (東大) 機正 西 尾 茂 文 (東大)
- C 315 加熱面に衝突する液滴の微細化現象とその発生機構
 機正*稲 田 茂 昭 (群馬大)

[二相流 (III)] 講演 (10:50~11:30), 討論 (11:30~12:10)
 [座長 成 合 英 樹 (筑波大)]

- C 321 単成分二相ノズル流れの数値解析
 機正*中 川 勝 文 (豊橋技科大)
- C 322 一成分二相流のノズル特性に関する研究
 (入口サブクール水の場合)
 機正 赤 川 浩 爾 (神戸大) 機正 藤 井 照 重 (神戸大)
 機正 太 田 淳 一 (神戸大) 機正 竹 中 信 幸 (神戸大)
 機学 谷 口 和 寿 (神戸大院) 機学*中 村 登 志 (神戸大院)
- C 323 水蒸気中に流入するサブクール水の温度上昇
 機正*堀 慶 一 (三菱重工) 笠 原 二 郎 (三菱重工)
 機正 柘 植 綾 夫 (三菱重工) 小 山 幸 司 (三菱重工)
- C 324 自然吸気攪拌時の二相流の研究
 (第1報, 吸込み渦と攪拌槽内の流動現象)
 機正*柴 田 裕 一 (茨城高専) 機正 清 水 勲 (茨城高専)
 機正 勝 山 昭 夫 (茨城高専) 機正 横 山 重 吉

[二相流 (IV)] 講演 (13:10~14:00), 討論 (14:00~14:50)
 [座長 中 川 勝 文 (豊橋技科大)]

- C 331 垂直対向二相流のフラッシングに対する流路出入口の効果
 機正*神 永 文 人 (茨城大) 遠藤 才二郎 (茨城大院)

C 332 矩形狭流路における対向流制限機構

機正*川崎 裕仁(原研)

機正 刑部 真弘(原研)

原正 田坂 完二(原研)

C 333 垂直流路の対向二相流下における落下水制限に関する研究 (I)

(流路断面形状・流路長の影響)

機正・原正 数土 幸夫(原研)

機正・原正*薄井 徹(日本鋼管)

原正 神永 雅紀(原研)

C 334 Inverted Two-Phase Flow の基礎研究

(細管における流動・伝熱特性)

機正*有富 正憲(東工大)

機正 井上 晃(東工大)

望月 謙治(芝浦工大)

C 335 Inverted Annular Flow の流動様相と熱伝達 (第3報)

機正 赤川 浩爾(神戸大)

機正 藤井 照重(神戸大)

機正 竹中 信幸(神戸大)

機正 西田 浩二(神戸大院)

機学 菊池 芳正(神戸大院)

機学*柴田 晶彦(神戸大院)

〔二相流 (V)〕 講演 (15:00~15:50), 討論 (15:50~16:40)

〔座長 有富 正憲(東工大)〕

C 341 単成分気ほう流中の圧力波

(続報:微小振幅波に対する実験結果)

機正 中川 勝文(豊橋技科大)

機学*野村 健作(豊橋技科大院)

C 342 4×4 ロッドバンドル内のボイド率に関する研究

機正・原正*師岡 慎一(東芝)

原正 飯塚 勝(東芝)

原正 石塚 隆雄(東芝)

原正 木村 次郎(東芝)

C 343 ストカスティックモデルによる円管内固気二相流の数値解析

*田川 久人(九大)

機正・原正 清水 昭比古(九大)

機正・原正 長谷川 修(九大)

C 344 固気混相媒体を用いた二次元衝突噴流の乱流構造と熱伝達

機正 吉田 英生(東工大)

機学*末永 潔(東工大院)

機正 越後 亮三(東工大)

C 345 固気液三相スラグ流の体積率の推定方法

機正 坂口 忠司(神戸大)

機正*南川 久人(神戸大)

佐原 健一(神戸大院)

斉部 剛(神戸大院)

— D 室 —

第 1 日 5月27日(水)

〔熱交換器 (I)〕 講演 (9:20~10:00), 討論 (10:00~10:40)

〔座長 宮 武 修 (九大)〕

D 111 コールドプレート内の流れと熱伝達

機正*鳥居 薫 (横浜国大)

機学 村瀬 有一 (横浜国大)

内田 精一 (石播)

機正 森岡 幹雄 (石播)

D 112 冷却オフセットフィン列への対流熱伝達

機正*小林 崇 (東北大院)

機正 島田 了八 (東北大)

機正 熊谷 哲 (東北大)

機正 武山 斌郎 (東北大)

D 113 オフセットストリップフィンの伝導を考慮した伝熱解析

機正・冷正*竹内 正 顯 (東海人)

機正 田中 順一郎 (ダイケン工業)

機学 山田 純 (東工大院)

D 114 ビンフィン熱交換器の空気側熱伝達率と圧力損失

機正*伊藤 正 昭 (日立)

〔熱交換器 (II)〕 講演 (10:50~11:30), 討論 (11:30~12:10)

〔座長 鳥居 薫 (横浜国大)〕

D 121 温度成層型蓄熱水槽の内部特性に関する研究

(水槽内に水平邪魔板を設置した場合)

機・化工・空正 宮 武 修 (九大)

機正・空学*永 渕 尚 之 (九大院)

D 122 円筒カプセルを用いた潜熱蓄熱装置の研究

機正 斎藤 彬夫 (東工大)

機正 宇高 義郎 (東工大)

機学*石岡 照康 (東工大院)

船津 準 (東工大学)

D 123 温度別蓄熱槽の特性解析

機正*竹内 正 紀 (福井大)

機正 木村 照夫 (福井大)

機学 浦辻 孝和 (福井大院)

D 124 冷媒の直接触伝熱を利用する氷蓄冷装置の研究

機正 宇高 義郎 (東工人)

機正 斎藤 彬夫 (東工人)

機学*新美 勝 (東工大院)

中田 直樹 (東工大学)

〔熱交換器 (III)〕 講演 (13:10~14:00), 討論 (14:00~14:50)

〔座長 山中 昭郎 (三菱電機)〕

D 131 垂直管内吸収型吸収器の研究

機正*河野 恭二 (日立) 冷正・機正 杉本 滋郎 (日立)
冷正・機正 大内 富久 (日立) 空・冷・機正 黒沢 茂吉 (東京ガス)
空・冷・機正 関納 真一 (大阪ガス) 空・冷・機正 竹本 貞寿 (東邦ガス)

D 132 吸収器性能の算定について

機正*井上 修行 (荏原製作所)

D 133 アンモニア蒸気吸収過程における物質拡散

機正・冷正*柏木 孝夫 (東京農工大) 岡島 次郎 (東京農工大)

D 134 吸収冷凍機の吸収器用伝熱管の研究

(第一報, 伝熱管の評価方法)

化工正 只木 禎力 (東北大) 空正 永岡 義一 (東京ガス)
機正・空正*西山 教之 (東京ガス) 鯨坂 和浩 (東京ガス)
澤田 篤 (日立電線)

D 135 吸収冷凍機の吸収器用伝熱管の研究

(第二報, 各種伝熱管の吸収特性)

化工正 只木 禎力 (東北大) 機正*川又 治 (日立電線)
空正 永岡 義一 (東京ガス) 機正・空正 西山 教之 (東京ガス)
鯨坂 和浩 (東京ガス)

〔熱交換器 (IV)〕 講演 (15:00~15:40), 討論 (15:40~16:20)

〔座長 架谷 昌信 (名大)〕

D 141 編込み細線を有する極細管熱交換器

機正 越後 亮三 (東工大) 機正 吉田 英生 (東工大)
機正 花村 克梧 (東工大) 機学*森 浩明 (東工大)

D 142 細線および細管より構成された空気熱交換器の伝熱特性

機正 鳥越 邦和 (ダイキン工業) 機正*川端 克宏 (ダイキン工業)
冷凍正 佐近 勇三 (ダイキン工業)

D 143 低圧力損失形流動層熱交換器の熱伝達特性に関する研究

(多列円管群の場合)

機正 円山 重直 (東北大) 機正 相原 利雄 (東北大)
*田中 義昭 (前川製作所) 機正 笠原 敬介 (前川製作所)

D 144 拡大・縮小を伴う多孔平板群の伝熱流動特性

(第2報, 形態パラメータの影響)

機正*藤井 雅雄(三菱電機)

機正 瀬下 裕(三菱電機)

機正 山中 晤郎(三菱電機)

〔熱交換器 (V)〕 講演 (16:30~17:00), 討論 (17:00~17:30)

〔座長 服部 賢(長岡技科大)〕

D 151 腐食汚染した伝熱面の沸騰伝熱特性

機正 鴨志田 隼司(芝浦工大)

機正 一色 尚次(日大)

機正 佐藤 運男(芝浦工大)

機学*大西 健二(芝浦工大)

D 152 管内三次元リブ付伝熱管の汚れ

機正*高橋 研二(日立)

保坂 信義(日立)

機正 小林 栞(日立)

篠原 義弘(日立電線)

D 153 太陽熱集熱器の熱交換に及ぼす火山性降灰の影響(第3報)

機正*玉利 賢一(鹿児島大)

機正 松村 博久(鹿児島大)

機学 粟ヶ窪 豊美(鹿児島大)

第2日 5月28日(木)

〔熱交換器 (VI)〕 講演 (9:20~9:50), 討論 (9:50~10:20)

〔座長 相原 利雄(東北大)〕

D 211 湿り空气中で凝縮を伴う空冷熱交換器の実験

機正*瀬下 裕(三菱電機)

機正 小川 和彦(三菱電機)

機正 丸本 健二(三菱電機)

機正 藤井 雅雄(三菱電機)

D 212 着霜を伴う空冷熱交換器の熱物質伝達特性

機正 瀬下 裕(三菱電機)

機正*小川 和彦(三菱電機)

D 213 着霜をともなうフィン付管群形熱交換器の特性に関する研究

(第3報, 霜層成長理論による特性解析)

機正 青木 和夫(長岡技科大)

機正 服部 賢(長岡技科大)

機学*平松 敏弘(長岡技科大)

〔ヒートポンプ〕 講演 (10:30~11:00), 討論 (11:00~11:30)

〔座長 柏木 孝夫(東京農工大)〕

D 221 可逆熱化学反応を用いる高温化学ヒートポンプの基礎研究

化工正 松田 仁樹(名大)

化学工*宮崎 光俊(名大院)

化工正 架谷 昌信(名大)

D 222 地下帯水層蓄熱法によるヒートポンプシステムの経済評価

機正*梅宮 弘道(山形大) 機正 羽賀 恵寿(山形大)
嶋 脇 勲(松下電器) 小池 広志(山形大)
佐々木 春人(山形大) 佐藤 良弘(山形大)

D 223 ソーラ・ヒートポンプシステム簡易計算法

機学*山本 政樹(北見工大) 機正 金山 公夫(北見工大)
機正 馬場 弘(北見工大)

〔ヒートパイプ〕 講演(14:40~15:20), 討論(15:20~16:00)

〔座長 梅宮 弘道(山形大)〕

D 231 金網ヒートパイプの最大熱輸送量に及ぼすウィック層数の効果

(100メッシュおよび350メッシュの場合)

機正*野田 英彦(大分大) 機正 吉岡 啓介(大分大)
機正 浜武 俊朗(大分大)

D 232 表面蒸発式加湿器の研究

((3) 加湿板内における水流・不純物移動の解析)

機正*丸本 健二(三菱電機) 機正 大串 哲朗(三菱電機)
村上 政明(三菱電機) 機正 山中 昭郎(三菱電機)

D 233 2成分混合媒体を用いたヒートパイプの研究

機正 土方 邦夫(東工大) 機学*長谷川 浩巳(東工大)
機正 長崎 孝夫(東工大)

D 234 水平管外流下液膜式蒸発器に関する研究

機正*小山 由夫(東芝) 機正 橋詰 健一(東芝)

〔熱物性〕 講演(16:10~16:40), 討論(16:40~17:10)

〔座長 岡田 昌志(青山大)〕

D 241 ふく射透過性物体の熱拡散率測定法(2)

機正 荒木 信幸(静岡大) *久保 徳男(静岡大院)

D 242 強制レイリー散乱法による液体の温度伝導率測定の研究

(第5報, 熔融塩の測定)

機学 島山 拓也(慶大院) 宮橋 義人(慶大)
機正*長坂 雄次(慶大) 機正 長島 昭(慶大)

D 243 充填層内熱分散の異方性に関する研究

*内田 康彦(富士通) 小室 淳(日立)
機正 横山 孝男(山形大) 地下水正 藤縄 克之(農大)
機正 桂木 公平(日本地下水開
発)

第 3 日 5月29日 (金)

〔熱伝導 (I)〕 講演 (9:00~9:50), 討論 (9:50~10:40)

〔座長 荒木 信幸 (静岡大)〕

D 311 二次元直交座標系における非定常熱伝導逆問題

機正*黒柳 利之

D 312 境界積分方程式法の未知境界形状推定問題への応用に関する研究

機正 庄司 正弘 (東大)

機学*大島 正道 (東大院)

D 313 非飽和超流動ヘリウム中の熱伝達 II

機正*岡村 哲至 (東工大)

低温正 佐藤 明男 (東芝)

低温正 巖松 征 (東工大)

低温正 梶島 成治 (東工大)

機正 塩田 進 (東工大)

D 314 配管系の非定常熱損失に関する解析

機正*藤原 正純 (電総研)

機正 田中 忠良 (電総研)

電正 谷 辰夫 (電総研)

機正 岡田 昌志 (青山大)

機正 鴨志田 隼司 (芝浦工大)

機正 片山 功蔵 (長崎総科大)

D 315 平板形真空断熱材の開発

機正*小林 延行 (日立)

〔熱伝導 (II)〕 講演 (10:50~11:20), 討論 (11:20~11:50)

〔座長 西村 龍夫 (広島大)〕

D 321 発熱反応を伴う充填層内の非定常2次元伝熱に関する研究

化工正 架谷 昌信 (名大)

化工正 松田 仁樹 (名大)

化学工*熊沢 勝久 (名大)

D 322 構造状炭素質多孔体の水蒸気吸・脱着に伴う発・吸熱特性

化工正*渡辺 藤雄 (名大)

化学工 杉浦 敏史 (名大)

化工正 架谷 昌信 (名大)

化工正 丸茂 千郷 (鐘紡)

D 323 粒子充填層内における粒子-液膜間の物質伝達について

機正*青木 和夫 (長岡技科大)

機正 服部 賢 (長岡技科大)

山中 直樹 (松下電器)

〔熱伝導 (III)〕 講演 (13:10~13:50), 討論 (13:50~14:30)

〔座長 福迫 尚一郎 (北大)〕

- D 331 一次元溶融問題の数値解および近似解
 (一様熱流束で加熱される場合)
 機正*藤井 哲(九大) 機正 藤井 丕夫(九大)
 陳 則韶(中国科大)
- D 332 Growth Ring Method による任意形状領域の凍結問題の解析法
 (続報, 流れを伴う複合問題への応用)
 機正 齋藤 武雄(東北大) 機学*加藤 秀樹(東北大院)
- D 333 高熱流束を受ける固体壁の溶融・蒸発挙動に関する研究(7)
 機正・原正*山崎 誠一郎(川崎重工) 機正・原正 関 昌弘(原研)
- D 334 低融点合金を用いたパッケージの冷却技術
 福岡 義孝(東芝) 松本 恵美子(東芝)
 機正*石塚 勝(東芝)

〔環境伝熱〕 講演(14:40~15:10), 討論(15:10~15:40)
 (座長 河村 祐治(広島大))

- D 341 水蒸気による融雪の研究
 機正*高島 武雄(横国大) 機正・化工正 飯田 嘉宏(横国大)
- D 342 都市大気境界層の3次元モデリング
 (2方程式モデルの適用)
 機正 齋藤 武雄(東北大) 機学*山下 浩司(東北大院)
- D 343 建築物によって形成される都市キャニオンにおける熱輸送
 (フィールド実験による研究)
 機正*吉田 篤正(京大) 富永 和秀(京大院)
 長谷 卓也(京大)

第 1 日 5月27日 (水)

[放射 (I)] 講演 (9:00~9:50), 討論 (9:50~10:40)

〔座長 吉澤善男 (東工大)〕

E 111 放射熱線法の応用に関する研究

(第 1 報, 2 次元モデルでの検討)

機正*早坂 洋史 (北大)

松村 憲秀 (四国電力)

E 112 発電用ボイラ火炉における水冷壁管の温度分布解析

*松村 憲秀 (四国電力)

機正 八木 信賀 (四国電力)

機正 芝山 宗昭 (四国電力)

機正 早坂 洋史 (北大)

E 113 モンテカルロ法による放射吸収散乱媒体中の放射伝熱解析

(非等方性散乱効果)

機正*工藤 一彦 (北大)

機正 谷口 博 (北大)

機学 福地 健 (北大院)

E 114 対流-ふく射共存伝熱系における新数値解析法

機正 宮内 敏雄 (東工大)

機学*糸 永 俊夫 (東工大院)

機正 平野 昌宏 (三菱重工)

機学 高比良 嘉一 (東工大院)

E 115 有限要素法を用いたふく射伝熱計算

((1) ふく射伝熱に用いる縮小マトリックスの提案とふく射と対流の管内複合伝熱の計算)

機正 黒崎 晏夫 (東工大)

*鈴木 浩 (東工大院)

機正 佐藤 勲 (東工大)

[放射 (II)] 講演 (10:50~11:30), 討論 (11:30~12:10)

〔座長 黒崎晏夫 (東工大)〕

E 121 蓄熱形熱交換器の燃焼室における熱伝達の解析

(第二報, 真空排気時およびアルゴン加熱時の熱伝達)

機正*金 潤植 (東工大)

機正 吉川 邦夫 (東工大)

品川 祐一 (東工大)

程 永元 (南京工学院)

E 122 スターリングエンジン用高温熱交換器の固体ふく射による伝熱促進

機正*山田 幸生 (機械技研)

王 捷 (上海交通大学)

機正 森 康夫 (電通大)

E 123 高性能輻射変換体を用いた熱交換器の反応装置への応用

(システムの提案と解析)

機学*林 昭彦(東工大)

機正 吉澤 善男(東工大)

機正 越後 亮三(東工大)

E 124 ふく射性ガスの非灰色性を利用したふく射伝熱促進

(温度差の大きな場合)

機正 平野 昌宏(三菱重工)

機正*宮内 敏雄(東工大)

機学 高比良 嘉一(東工大)

〔放射(Ⅲ)〕 講演(13:10~13:30), 討論(13:30~13:50)

〔座長 工藤 一彦(北大)〕

E 131 1日当りの日射量に含まれる有効日射量の検討

機正*馬場 弘(北見工大)

機正 金山 公夫(北見工大)

E 132 透明プレート境界を有する散乱性媒体のふく射物性の推定

機正*原正*上宇都 幸一(大分大)

機学 岩本 光生(大分大院)

〔電子機器等〕 講演(13:55~14:25), 討論(14:25~14:55)

〔座長 藤井 雅雄(三菱電機)〕

E 141 半導体拡散プロセスにおける積層ウエハの温度分布

機正*平沢 茂樹(日立)

機正 鳥居 卓爾(日立)

機正 高垣 哲也(日立)

E 142 サーマルプリンタにおけるプリントヘッド・感熱紙系の熱伝達特性と印字品質

機正 望月 貞成(東京農工大)

機学*工藤 雄一(東京農工大)

E 143 燃料電池の冷却方式の改善

機正*在間 信之(石播)

機正 渡辺 健次(石播)

機正 遠井 正明(石播)

機正 二階 勲(石播)

中沢 健三(石播)

〔測定法〕 講演(15:05~15:35), 討論(15:35~16:05)

〔座長 佐古 光雄(広島大)〕

E 151 感温トレーサによる温度成層ロール・オーバー現象の可視化

機正*竹中 信幸(神戸大)

機正 小沢 守(神戸大)

機正 赤川 浩爾(神戸大)

機正 坂口 忠司(神戸大)

- E 152 光ファイバー局所湿度測定装置に関する研究
 (境界層内の水蒸気濃度分布測定を試み)
 機正 田中 宏史(九大) 機学*佐々木 明彦(九大院)
 機止 宮武 修(九大)

- E 153 固液界面の濡れおよび接触角の測定に関する研究
 機正*加藤 健司(名大) 機正 藤田 秀臣(名大)
 佐々木 英治(名大院)

第2日 5月28日(木)

[蒸発(I)] 講演(9:00~9:40), 討論(9:40~10:20)
 [座長 飯田 嘉宏(横浜国大)]

- E 211 加熱された浴射セラミクス被覆面に衝突する液粒の蒸発
 機正*高野 孝義(豊田工大) 機正 小林 清志(豊田工大)
- E 212 ミスト冷却熱交換器に関する研究
 (第5報, 管群効果と熱伝達について)
 機正 林 勇二郎(金沢大) 機正*滝本 昭(金沢大)
 機正 松田 理(石川高専) 機准 本谷 克実(金沢大院)
- E 213 直接接触式蒸発器の伝熱過程に関する研究
 (第6報, 液々接触挙動に及ぼす温度差の影響)
 機正 藤田 恭伸(九大) 機正*平岩 国男(九大)
- E 214 水平管における液膜蒸発熱伝達の研究
 (第3報, 整流管の影響)
 機正 藤田 恭伸(九大) 機正*筒井 正幸(九大)
 機学 小林 政徳(九大院)

[蒸発(II)] 講演(10:30~11:10), 討論(11:10~11:50)
 [座長 井上 晃(東工大)]

- E 221 水面上における液化ガスの蒸発
 機正・化工正*飯田 嘉宏(横国大) 化学 小林 厚志(横国大院)
 機正 高島 武雄(横国大) 化学 山極 毅(横国大院)
- E 222 過熱無機塩溶液中での気泡成長
 機正・化工正 宮武 修(九大) 機正・化工正*田中 逸夫(九大)
 筒井 裕二(九大院)

E 223 非定常噴霧の蒸発過程の計測

機正*廣安博之(広大)

機正 田端道彦(広大)

機正 新井雅隆(広大)

E 224 気流中における液滴列の蒸発

機正 角田敏一(広島大)

機学*大田康夫(広島大院)

機正 角田長三多(広島大)

[燃焼] 講演(14:40~15:10), 討論(15:10~15:40)

[座長 廣安博之(広島大)]

E 231 触媒燃焼における表面発熱の測定

機正*竹内正雄(公資研)

E 232 帯電法による燃焼炉内の燃料液滴粒径分布測定法

化工正*玉野和保(広島工大)

化工正 中井資(広島工大)

E 233 ビッチーホスラリー噴霧燃焼シミュレーション

化工正 三浦隆利(東北大)

化工正*鷹嘴利公(東北大)

化工正 丹野庄二(東北大)

化工正 大谷茂盛(東北大)

(4) 第21回伝熱セミナーのお知らせ

1. 会期 昭和62年8月5日(水)～7日(金) 2泊3日
2. 会場 東北大学川渡共同セミナーセンター
宮城県玉造郡大口字逢田117
Tel.02298(4)7309
[新幹線 古川駅のりかえ 陸羽東線 川渡駅下車、徒歩30分
またはタクシーで5分(2.5km)]
3. 参加費 (宿泊, 食事代, 懇親会費を含む)
日本伝熱研究会会員 20,000円
学 生 17,000円
会 員 外 23,000円
なお、日程の一部に参加される方からも同額を徴集いたします。
4. 定員 先着80名
5. 申込 締切 7月6日(月)
方法 本号添付の郵便振替用紙に必要事項を記入の上参加費とともに申込んで下さい。
なお締切後の取消しには、参加費を返却致しません。
連絡先 〒980
仙台市荒巻字青葉
東北大学工学部機械工学科
熊谷 哲 助教授
Tel.022(222)1800 内 4110
6. 御参考 青森ねぶた祭 8月3日～7日
秋田竿灯祭 8月5日～7日
仙台七夕祭 8月6日～8日
山形花笠祭 8月6日～8日
(従って 混雑が予想されますので切符の手配はお早目に
どうぞ)

7. セミナー日程表

8月5日(水)

13:00～15:00	受付, テニス, 散策
15:00～15:10	準備委員長挨拶 相原利雄(東北大)

15:10 -17:30 パネルディスカッション：P 1
「熱工学で新材料開発はどこまで可能か」

司会 飯田嘉宏（横国大）

テーマ 講師

- (I) 半導体製造 単結晶育成 平沢茂樹（日立）
- (II) 太陽電池 黒川浩助（電総研）
- (III) 急速冷却技術 西尾茂文（東大）
- (IV) 新材料熱物性 荒木信幸（静大）
- (V) μg 宇宙材料 塩治震太郎（IHI）

18:30 ～ セミナーセンターで懇親会と夕食。

8月6日（木）

9:00-12:00 パネルディスカッション：P 2
「数値解析で伝熱のどこまで分るか」

司会 小竹進（東大）

テーマ

- (I) 乱流伝熱（1） 鈴木健二郎（京大）
- (II) 乱流伝熱（2） 笠木伸英（東大）
- (III) ふく射 黒崎 天（東工大）
- (IV) 熱伝導・相変化 斎藤武雄（東北大）
- (V) スーパーコンピュータ
による大規模熱流解析 前川 男（動燃）
- (VI) 数値解析と実験のはざま 荻野文丸（京大）

12:00-13:00 昼食

13:00-18:00 見学およびレジャー

◎見学コース（定員 55名）

観光バスで平泉（中尊寺，毛越寺など）を見学

◎レジャーコース（定員 50名）

- ・セミナーセンター近くのコートでテニス
- ・ゴルフ（希望者があれば）
- ・近くの体育館で卓球，バドミントン，その他。

18:00-19:00 夕食

19:00-22:00 大放談会 テーマ： 総合司会：棚沢一郎（東大）

「21世紀の伝熱」

“その予測をタイムカプセルに詰めよう”

パネリスト：

越後亮三（東工大）， 鈴木健二郎（京大），
土方邦夫（東工大）， 西尾茂文（東大），
塩冶震太郎（IHI）， 藤城俊夫（原研），
幾世橋 広（東北大）， 石垣 博（航技研），
林 一夫（東北大）， 三浦隆利（東北大），
宍戸郁郎（東北大）， 熊谷 哲（東北大）

8月7日（金）

9:00-10:20 特別講演： 司会：山川紀夫（岩手大）

「次世代の地熱開発としての高温岩体の利用」

講師 阿部博之（東北大）

10:30-12:30 パネルディスカッション：P3

「伝熱工学で極限環境下の安全性はどこまで確保できるか」

司会 越後亮三（東工大）

テーマ

- | | |
|-------------------------|------------|
| (I) 原発反応度事故
(メルトダウン) | 藤城俊夫（原研） |
| (II) 蒸気爆発 | 小木曾千秋（横国大） |
| (III) 過熱液体放出・熱衝撃 | 戸田三朗（東北大） |
| (IV) ジェットエンジン | 新岡 嵩（航技研） |
| (V) 地熱開発における伝熱 | 太田照和（東北大） |

12:30 ～ 昼食（昼食後解散）

(5) 第8回日本熱物性シンポジウムの開催と講演募集

開催日：昭和62年7月22日（水）～24日（金）

会場：阿蘇の司ビラパークホテル（熊本県阿蘇町坊中1230）

講演会申込締切：4月15日（水）

原稿締切：6月20日（土）（厳守）

用紙請求先・講演申込先

〒816 春日市春日公園5-1

九州大学生産科学研究所

熱及び物質移動部門気付け

第8回日本熱物性シンポジウム準備委員会

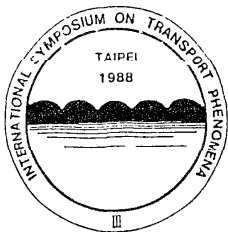
電話（092）573-9611 内線 663

①講演申込方法：A4版用紙1枚に、

- (1) 講演題目、(2) 著者名（講演者に○印）、(3) 所属、
(4) 連絡先を記入し、さらに(A) 研究目的、(B) 実験方法または理論、(C) 結果などの概略を記入して、期日までにお送り下さい。なお、講演の採否については第8回日本熱物性シンポジウム準備委員会にご一任下さい。採否決定は5月上旬頃までにお知らせし、その時原稿用紙もお送りします。

②研究発表の内容と対象物質：1. 測定法、測定機器、標準物質、標準データ 2. 熱物性値の評価、解析、相関、推算、理論 3. 気体、液体、熱媒体、動作流体、混合気体、熔融塩 4. 金属、合金、金属酸化物、熔融金属 5. セラミックス、プラスチック、複合材料、エレクトロニクス材料、絶縁材料 6. 建材、耐火材、断熱材（保温材、保冷材）、蓄熱材 7. 食品、衣料、生体 8. 土壌、岩石、石炭、凍結層、雪氷 9. その他

③参加費：（予定）[シンポジウム] 日本熱物性研究会会員および共催協賛学協会会員（事前申込み：6月20日迄）3500円、（学生2500円）、非会員（事前申込み）4500円；会員（当日申込み5500円（学生3500円））。日本熱物性研究会会員には講演論文集を無料で配布します。その他の方には、1冊5000円で頒布します。 [懇親会]（事前申込み）5000円。（当日）6000円。



(6) Call for Papers:

*3rd International Symposium on Transport Phenomena in
THERMAL CONTROL
Taipei, September, 1988*

Background and Objective of the Symposium

The Pacific Basin is rapidly becoming the economic, scientific and technological center of the world. The area meets successfully the challenge of the third industrial revolution resulting changes in two major elements: the drastically diminishing cost of computer memory units and the whole renewal of production processes. The real challenge is assimilating these basic changes in technology, specifically thermal-fluid engineering. The symposium, therefore, bears two significances: timely and right location. It is organized to stimulate the research activities in thermal-fluid engineering and to gather together the researchers for establishing cooperation and friendship. The 1st symposium focusing on the transport phenomena in rotating machinery was held fruitfully in April-May 1985 in Honolulu. The 2nd symposium emphasizing on the transport phenomena in turbulent flows will be held in October, 1987 in Tokyo. The 4th one focusing on the transport phenomena in other specific fields will be held in Australia in 1989.

Scope and Topics

Topics of interest include theoretical, numerical and experimental studies of transport phenomena in thermal control. The Symposium will comprise following provisional sessions on: Thermal Control in Electrical/Electronic Equipment
Transport Phenomena in Rotating Machinery
Flow Visualization and Measurement Techniques
Modelling and Numerical Methods in Heat Transfer
Fundamentals

Keynote Papers

Internationally recognized experts will be invited to address state-of-the-art review of subjects in conference sessions.

Tentative Deadlines

Final date for receipt of abstracts of 1000 words; March 1, 1988.
Authors informed concerning acceptance; May 15, 1988.
Final date for receipt of camera-ready manuscripts; July 15, 1988.

Submission of Abstracts

Paper selection will be based upon a reviewed abstract of about 1000 words which should be typed double spaced and state the purpose, results and conclusions of the work with supporting figures and tables as appropriate. Prospective authors should submit three copies of the abstract by March 1, 1988 to:

Professor G.J. Hwang
Chairman of the 3rd Int'l Symp. on Transport Phenomena in Thermal Control
Department of Power Mechanical Engineering
National Tsing Hua University
Hsinchu, Taiwan 30043, ROC

Local Organizing Committee

G.J. Hwang (Chairman) (National Tsing Hua University)
T.M. Liou (Secretary General) (National Tsing Hua University)
C.K. Chen (National Cheng Kung University)
S.F. Chou (National Taiwan University)
A.C.H. Ku (National Chung Shan University)
L.J. Fang (Industrial Technology Research Institute)
W.S. Fu (National Chiao Tung University)
W.H. Huang (Tatung Institute of Technology)
Y.H. Hung (National Tsing Hua University)
W.C. Duh (Tam Kang University)
T.F. Lin (National Chiao Tung University)
C.C. Su (Chung Shan Institute of Science & Technology)

Advisory Committee

W. Aung (U.S.A.)	K.C. Cheng (Canada)	J.P. Gostelow (Australia)
R.J. Goldstein (U.S.A.)	J.C. Han (U.S.A.)	M. Hirata (Japan)
G.J. Hwang (Taiwan)	K. Imaichi (Japan)	J.H. Kim (U.S.A.)
R.J. Moffat (U.S.A.)	W. Nakayama (Japan)	F. Ogino (Japan)
C.L. Tien (U.S.A.)	C.P. Tso (Malaysia)	G. De Vahl Davis (Australia)
S.H. Winoto (Singapore)	W.J. Yang (Chairman), (U.S.A.)	

事務局より

「事務局」といっても、事務員兼事務局長兼副会長が一人、大学の時間をやり繰りして奔走しているにすぎない実態のない事務局である。斎藤前副会長より引継いだこの伝熱研究会の事務局の仕事も、会計監査、「伝熱研究」4月号、会員名簿の発行、と終わり、総会資料の準備と総会そのものを残すのみとなった。この事務局の仕事は本来ボランティア的なものではあるが、副会長（事務担当）という名もとの事務局はそれ相当の義務と責任が課せられ、楽しめる要素は全くない。ただ、今回は、ルーチン的な事務処理は出来るだけ電算化し事務担当の労力を軽くしようということで、この2年間「伝熱研究会」の事務処理ソフト作りには多大の楽しみ(?)をさせていただいた。会計、入会、退会、変更、ラベル印刷、統計、幹事会資料等ほとんどの事務処理をコンピュータ化し、1月に4～6日のアルバイトで処理でき、会計監査の資料も2、3時間で用意できるし、会員名簿も1時間ほどで全員の印刷ができるようになった。今回の会員名簿に追加した専門分野別会員名簿や地区別会員名簿、年令別会員名簿なども要求があれば容易に作成でき、会員の皆様の便宜に供せられるようになった。

しかし、研究会事務の最大のもののは会費の徴収と管理であり、この問い合わせと苦情が一番多く、このトラブルが一番厄介である。これにはわがコンピューターもデータの表示以外はお手上げであり、事務局長兼事務員の副会長さんが一つ一つ丁寧に対応して処理しなければならない。自分の会費納入状況が何とかわかるようにならないかということで、宛名ラベルにこうした情報を記入するなど試みたが、結局「会費請求???'と直接的に表現するのが一番分りやすいということになった。どうか、宛名ラベルにこのような記入がされていたら、その金額だけ「郵便振込」(東京 6-14749, 日本伝熱研究会)くださるようお願いいたします。

計算機ソフト作りの一番の問題点は、間違った操作をしたときにどう生きのびるかということで、予め予想して取りかかるのであるが、いざ実戦というときには全然予想もしなかった問題が起こる。このような問題を数多く提起して頂くと同時に、少額のアルバイト費で献身的に細かい仕事を手伝っていただいた、斎藤事務局以来の原田長子さん、研究室の青木功君、井上剛良君に心から感謝の意を表します。

会員の皆様にはいろいろご迷惑ご不便をお掛けいたしましたことと思いますが、ご協力有り難うございました。次期(伝熱シンポジウム以降)の伝熱研究会の事務局は東工大の越後亮三教授がお引き受けくださる予定になっておりますので、さらによろしくご協力のほどお願い申し上げます。

(小竹 進)

日本伝熱研究会個人会員申込書・変更届書

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

1	会員資格	正・学						
2	氏名							
3	フリガナ							
4	生年月日	M・T・S		年		月		日

5	勤務先	名称						
6		〒		—				
7		所在地						
8								
9		TEL						
10								

11	自宅	〒		—				
12		住所						
13								
14		TEL						

15	通信先	勤務先・自宅						
16	学位							
17	最終出身校							
18	卒業年次							
19	専門分野		.		.			← (下記専門分野の番号)

20	学生会員の場合：指導教官名							
----	---------------	--	--	--	--	--	--	--

専門分野

- | | | | | |
|------------|----------|----------|-----------|----------|
| 1: 自然対流 | 2: 強制対流 | 3: 熱伝導 | 4: 凝縮 | 5: 沸騰・蒸発 |
| 6: 混相流 | 7: 物質移動 | 8: 反応・燃焼 | 9: 放射 | 10: 熱物性 |
| 11: 熱交換器 | 12: 流動層 | 13: 蓄熱 | 14: 冷凍・空調 | 15: 内燃機関 |
| 16: ガスタービン | 17: 蒸気機関 | 18: 原子力 | 19: 太陽熱 | 20: 環境 |
| 21: その他() | | | | |

*) 学生の場合は在学学校名、学年(M2、D3など)を記す。

伝熱研究

Vol. 26 No. 101

1987年4月発行

発行所 日本伝熱研究会

〒153 東京都目黒区駒場4-6-1

東京大学工学部境界領域研究施設気付

日本伝熱研究会

電話 03(485)3111 (代) 内線288,285

振替 東京 6-14749

(非売品)