

伝熱研究

1992

October

Vol.31

No.123

Journal of Heat Transfer Society of Japan

<特集：熱・流体解析における計算機利用の進展>

特集にあたって 第31期編集委員会

【スーパー・パラレル計算】

- 流れ解析のスーパーコンピューティング手法 谷口 伸行
 スーパーコンピュータによる高温度差熱・流体解析 秋葉 幸範
 連続体の並列計算における負荷の均等化 吉岡 顕、矢川 元基
 熱伝導・熱伝達問題の並列計算について 河村 洋
 超並列計算機による流体力学コードの開発 長沢 幹夫
 希薄気体直接モンテカルロシミュレーションの並列計算 宇佐見 勝
 モンテカルロ法による放射伝熱解析の並列化 工藤 一彦

【並列計算機】

- グランドチャレンジャースーパーコンピュータ 佐藤 謙一
 トランスピュータ「T9000」と超並列アーキテクチャ 平田 一行
 並列計算機A P 1000と応用例 藤崎 正英、奥田 基、小坂 真一

【結果の可視化】

- DNSデータベースによる壁乱流の可視化と構造解析 笠木 伸英
 A V Sによる解析結果の可視化 宮地 英生
 熱流体解析可視化評価システム「FIELDVIEW」 藤川 泰彦
 汎用流体可視化ツールDATA VISUALIZER 木本 則靖

<故棚澤 泰先生を偲んで>

- 棚澤 泰先生の御逝去を悼む 小林 清志
 棚澤 泰先生の御逝去を悼む 永井 伸樹
 棚澤 泰先生を偲んで 廣安 博之
 「百年の計」の教え 荒木 信幸

<国際学会報告>

- 第2回ミンスク国際熱および物質移動会議 小竹 進

<地方研究グループ活動報告>

- 中四国研究グループ第4回伝熱セミナー・松山 加藤 泰生

日本伝熱学会第31期（平成4年度）役員

会 長		藤 江 邦 男（新明和工）
副 会 長	（無任所） （事務担当）	伊 藤 猛 宏（九 大） 井 上 晃（東工大）
理 事	工 藤 一 彦（北 大） 望 月 貞 成（東京農工大） 滝 本 昭（金沢大） 加 藤 泰 生（山口大） 小 熊 正 人（石播重工） 池 崎 英 二（新日鐵） 吉 田 駿（九 大）（「伝熱研究」編集委員長） 前 田 昌 信（慶 大）（第30回日本伝熱シンポジウム準備委員長）	山 川 紀 夫（岩手大） 長 野 靖 尚（名工大） 坂 口 忠 司（神戸大） 本 田 博 司（九 大） 高 島 啓 行（住友金属）
監 事	二 階 勳（鹿島建設）	飯 田 嘉 宏（横国大）
評 議 員	窪 田 英 樹（室蘭工大） 菅 原 征 洋（秋田大） 三 浦 隆 利（東北大） 菱 田 公 一（慶 大） 吉 田 英 生（東工大） 山 下 博 史（名 大） 竹 内 止 紀（福井大） 片 岡 勲（京都大） 森 幸 治（阪 大） 鈴 木 洋（広島大）	馬 場 弘（北見工大） 円 山 重 直（東北大） 田 中 忠 良（電総研） 飛 原 英 治（東 大） 西 村 誠（岐阜大） 青 木 和 夫（長岡技科大） 東 恒 雄（大阪市立大） 千 田 衛（同志社大） 稲 葉 英 男（岡山大） 伊 藤 昭 彦（大分大）

伝 熱 研 究 目 次

<特集：熱・流体解析における計算機利用の進展>

特集にあたって	第31期編集委員会.....	1
---------------	----------------	---

[スーパー・パラレル計算]

流れ解析のスーパーコンピューティング手法	谷口伸行(東 大)...	2
スーパーコンピュータによる高温差熱・流体解析	秋葉幸範(N E C)...	8
連続体の並列計算における負荷の均等化	吉岡 顕、矢川元基(東 大)...	14
熱伝導・熱伝達問題の並列計算について	河村 洋(東京理科大)...	20
超並列計算機による流体力学コードの開発	長沢幹夫(計算流体力学研)...	26
希薄気体直接モンテカルロシミュレーションの並列計算	宇佐見勝(三重 大)...	32
モンテカルロ法による放射伝熱解析の並列化	工藤一彦(北 大)...	38

[並列計算機]

グランドチャレンジスーパーコンピュータ	佐藤謙一(インテルジャパン)...	44
トランスピュータ「T9000」と超並列アーキテクチャ	平田一行(SGSトムソン エレクトロニクス)...	50
並列計算機AP1000と応用例	藤崎正英、奥田 基(富士通)、小坂真一(富士通青森)...	56

[結果の可視化]

D N S データベースによる壁乱流の可視化と構造解析	笠木伸英(東 大)...	62
A V S による解析結果の可視化	宮地英生(クボタ コンピュータ)...	68
熱流体解析可視化評価システム「FIELDVIEW」.....	藤川泰彦(コベルシステム)...	72
汎用流体可視化ツール DATA VISUALIZER	木本則靖(住 商 エレクトロニクス)...	76

<故棚澤 泰先生を偲んで>

棚澤 泰先生の御逝去を悼む	小林清志(豊田工大)...	80
棚澤 泰先生の御逝去を悼む	永井伸樹(東 北 大)...	82
棚澤 泰先生を偲んで	廣安博之(広 島 大)...	84
「百年の計」の教え	荒木信幸(静 岡 大)...	86

<国際学会報告>

第2回ミンスク国際熱および物質移動会議	小竹 進(東 大)...	88
---------------------------	--------------	----

〈地方研究グループ活動報告〉

中四国研究グループ第4回伝熱セミナー・松山	加藤泰生(山口大)	90
-----------------------	-----------	----

〈お知らせ〉

新会誌の発行について	会長 藤江邦男	93
“Thermal Science and Engineering”への学術論文の投稿のお願い		94
第30回日本伝熱シンポジウム研究発表募集		95
第30回日本伝熱シンポジウムセッション分類表		96
第30回日本伝熱シンポジウム研究発表申込書		97
日本伝熱学会学術賞・技術賞公募のお知らせ		99
日本伝熱学会学術賞・技術賞申請・推薦書		101
中四国研究グループ山口地方(宇部)特別講演会及び見学会のご案内		103
日本機械学会関西支部195回講演会「燃焼診断を支援するレーザ応用計測」(実習付き) —入門から最先端まで—		104
第9回混相流レクチャーシリーズ「氷蓄熱システムと混相流」		106
第16回人間熱環境系シンポジウム		109
社団法人日本工学会主催第18回国際会議のための準備セミナー		110
ITEC-93 First International Thermal Energy Congress		111
第9回せん断乱流国際会議		113
第3回実験伝熱・流体・熱力学国際会議(ホノルル)		115
International Journal of Heat and Mass Transfer, International Communications in Heat and Mass Transfer, 編集委員交代のお知らせ		116
First ISHMT-ASME Heat and Mass Transfer Conference (12th National Heat and Mass Transfer Conference)		117
事務局からの連絡 学会案内と入会手続きについて		119
会員の方々へ		120
事務局について		121
正会員・学生会員入会申込み・変更届用紙		
賛助会員入会申込み届用紙		

Journal of Heat Transfer Society of Japan

Vol.31, No.123, October, 1992

CONTENTS

<Special Issue: Progress in Computer Utilization on Heat and Fluid Analyses>

Preface to Special Issue	Editorial Board	1
[Super/Parallel Computing]		
Supercomputing on Flow Simulation	Nobuyuki Taniguchi (Univ. of Tokyo)	2
Heat & Fluid Analysis with Large Temperature Difference by Super Computer Yukinori Akiba (NEC)		8
Load Leveling in Parallel Computing on Continuum-Structure Analyses Akira Yoshioka, Genki Yagawa (Univ. of Tokyo)		14
Parallel Computing of Heat Conduction and Convective Heat Transfer Hiroshi Kawamura		20
Computational Fluid Dynamics on Massively Parallel Computers Mikio Nagasawa (ICFD)		26
Parallel Peocessing of the Monte Carlo Direct Simulation for Rarefied Gas Masaru Usami (Mie Univ.).....		32
Parallel Computation on Radiation Heat Transfer by the Monte Carlo Method Kazuhiko Kudo (Hokkaido Univ.).....		38
[Parallel Computers]		
Grand-Challenge Super Computer	Ken'ichi Sato (INTEL Japan)	44
"T9000" Transputer and Massive Parallel Architecture Kazuyuki Hirata (SGS THOMSON)		50
Parallel Computer AP1000 and its Sample Applications Masahide Fujisaki, Motoi Okuda (Fujitsu), Shin'ichi Kosaka (Fujitsu Aomori)		56
[Visualization of Computed Results]		
Visualization and Structural Analysis of Wall Turbulence with Direct Numerical Simulation Data Bases	Nobuhide Kasagi (Univ. of Tokyo)	64

Visualization of Numerical Calculation by AVS	Hideo Miyachi (KCI)	68
“FIELDVIEW”: Visualization & Evaluation System of Heat & Fluid Flow Analyses	Yasuhiko Fujikawa (Kobelco System)	72
Design of an End-User Data Visualization System	Noriyasu Kimoto (SSE)	76

<In Memory of Prof. Yasushi Tanasawa>

Grieving for the Death of Prof. Yasushi Tanasawa	Kiyoshi Kobayashi (TIT)	80
Grieving for the Death of Prof. Yasushi Tanasawa	Nobuki Nagai (Tohoku Univ.)	82
In Memory of Prof. Yasushi Tanasawa	Hiroyuki Hiroyasu (Hiroshima Univ.)	84
Instruction by “One hundred year’s plan”	Nobuyuki Araki (Sizuoka Univ.)	86

<Report on International Conference>

The 2nd Minsk International Heat and Mass Transfer Forum	Susumu Kotake (Univ. of Tokyo)	88
---	--------------------------------------	----

<Reports on the Local Group Activities>

90

<Announcements>.....

93

特集にあたって

第31期編集委員会

かつては計算機センターの中の奥まった部屋の中にひっそりとおさまっており、完全なブラックボックスであった計算機も、この10年位の間に我々の身近にその姿を現し、有無を言わずそのハードとソフトに習熟することを我々に強いて(?)きた。ここ数年のその変貌ぶりは特に著しく、その能力から言っても、またそのシステムの複雑さから言っても、かつての計算機センターをまるごと室内にかかえこんだような状態となった。やれラムディスクだ、EMSだ、WINDOWSがどうした、UNIXもできた等ととどまるところを知らない金食い虫の情報を仕入てなんとか買い込み、マニュアルと首っ引きで悪戦苦闘していると、計算センターにスーパーコンピュータが入りましたとのお知らせ。ベクトル化にはチューニングなる作業が必要とか。海のむこうでは並列計算機なるものも開発されているらしい。我ら中年(年に関係なく、何事にも息切れするのは中年の特徴である)の研究者にとって、この猛スピードで進む計算機システムの高性能化、新しい構成を持つ計算機の登場、あるいはソフトの高度化に追いついて、現役としてこれらを使いこなすか、若い後輩にまかせてしまうかの瀬戸際に立たされているといっても過言ではないように思われる。

このような状況下、計算機利用の面からみた熱・流体解析の分野における最近の特徴を見渡してみることは、今後の研究開発の方向を考える上で大いに有益であると考えられる。そこで本特集号では、現在の先端の研究に多用されているスーパーコンピュータの利用法、各種の分野の問題に対してその適用法の検討が進み、実用化が間近となった並列計算機の使用例とハードの現状、および膨大な解析結果のデータを最大限活用するための可視化手法、および簡単に可視化するための各種ツール等についての解説を中心に企画することにした。

今回ご執筆くださった方々は、各々の分野で中心となってお活躍の方々であり、大変ご多忙中のところをご執筆賜りました。この場を借りて厚くお礼申し上げます。

1. はじめに

流れ解析の実行には一般に大きな計算パワーが必要であるため、コンピュータは不可欠なものとして積極的に利用されてきた。おそらく、流れ解析の研究者はスーパーコンピュータの科学技術分野における主要なユーザーの一人であろう。たとえば、乱流解析の規模とスーパーコンピュータの性能をプロットした図1をみると、演算速度と記憶容量のいずれの面でもコンピュータ性能を最大限活用した計算が試みられてきたことがわかる。

ところで、流れ解析における大規模配列の反復演算は現在のスーパーコンピュータの最も得意とする処理であることもあって、実用的な流れ場解析コードにおいてもコンピュータの最大性能に近い効率で実行が可能である。このことが流れ解析におけるスーパーコンピュータ利用を促していると思われる。また見方をかえれば、流れ解析では標準的で一般的な並列計算手法がきわめて有効であるともいえる。流れ解析に特有のスーパーコンピューティング手法があるわけではなく、むしろスーパーコンピューティングを必要とする背景、要因があるといった方が正確であろう。そこで、流れ解析のスーパーコンピューティング手法というタイトルではあるが、流れ解析のどこに大規模計算の必要が生じるのかを中心に話を進めていくことにする。

2. 流れ解析の規模

流れの数値予測という目的からみて、乱流現象は衝撃波を含む高速流解析とともに現在最も重要な研究対象と思われる。これらは、流れの基礎式であるナビエ・ストークス方程式の非線形で時間発展的な性質から生じる高波数の擾乱や不連続な解として理解されている。これらの解を数値的に表現するためには、少なくとも変動の最小スケールより細かな分割が必要である。たとえば、ナビエ・ストークス方程式を直接適用した数値解析によって乱流を表現するためには必要な計算点数はレイノルズ数 ($Re = uL/\nu$) の $9/4$ 乗と

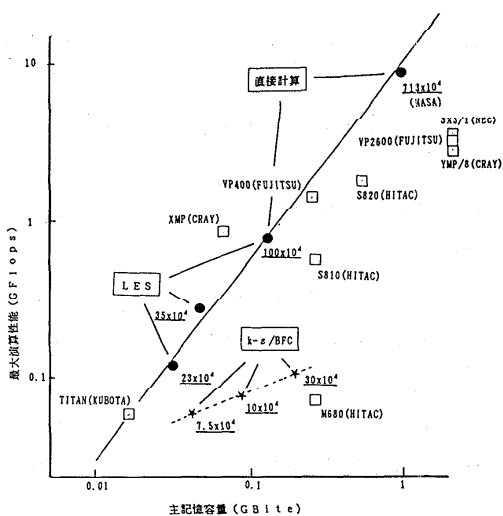


図1 乱流解析とコンピュータ性能

表1 乱流解析事例

計算対象	乱流モデル	格子点数	計算時間
バックステップ流れ	LES k-ε	234x54x24 234x54 40x40	約20時間 約30分 約2分
噴流	LES	104x54x54	約10時間
テイルザ	k-ε	51x51	約20分 (BFC)
自動車まわり	k-ε	100x45x35	約50分 (BFC)
水車翼列	k-ε	150x45x45	約1.5時間(BFC)
スノール弁	k-ε	48x32x46	約10時間 (非定常)

*いずれも、VP100による計算結果

見積もられる。工学的な問題の例として走行中の自動車の周り流れを考えると、

$$\text{代表長さ: } 4 \text{ m, 速度: } 60 \text{ km/h} \rightarrow \text{Re} = 5 \times 10^6$$

に必要な計算点数は約 1×10^{14} (十兆) となり、現在の計算機能力では実行不可能である。

より実用的な方法として乱流のモデル化を導入した解析では、レイノルズ方程式に基づく方法とLES (Large Eddy Simulation) が工学的適用において有力である(表1)。前者は原則として定常流れを対象とし乱流の時間平均量の方程式をモデル化により与える。レイノルズ方程式はナビエ・ストークス方程式に時間平均操作を加えることにより導出される平均運動量の輸送方程式である。必要とされる計算点は比較的少なく、2次元流れでは計算点数が数千程度の解析が行われている。工学的な流れ場への適用も広い分野にわたり行われている¹⁾。後者では空間的に小スケールの乱れをモデル化し、乱流の時間変動をシミュレートする。この方法は前者より細密な格子分割による3次元非定常解析を必要とし、現在のところ適用は基本的な流れ場に限定されている。

3. 流れ解析の計算アルゴリズム

ここからは、乱流解析を想定した非圧縮性粘性流れの計算に話題を絞ると、基礎方程式は

$$\nabla \cdot \mathbf{v} = 0 \tag{1}$$

$$\frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + (\mathbf{v} \cdot \nabla) \mathbf{v} = -\nabla p + \nu \nabla^2 \mathbf{v} \tag{2}$$

である。これを線形化して差分法などにより離散化して連立方程式を解くことに帰着する。これは(計算点数 $N \times 4$)の大規模な行列であり、また、圧力 p に関して解きにくい形式となっているため、実際の解析法では式(1)のかわり圧力のポアソン式

$$\nabla^2 p = -\nabla \cdot (\nabla \cdot (\mathbf{v} \mathbf{v})) + \nu \nabla^2 D - \frac{\partial D}{\partial t}, \quad D = \nabla \cdot \mathbf{v} \tag{3}$$

が適用されることが多い。このとき、各速度成分と圧力は分離して解くことが可能となる。それぞれの変数について形式的にはN元の連立式が得られる。

ここで、速度成分の式(ナビエ・ストークス式)には、非線形項に起因する高波数の変動を正しくシミュレートするために

$$c = u \delta t / \delta x \quad (\text{クーラン数}) \quad , \quad P = u \delta x / \nu \quad (\text{格子ペクレ数})$$

に関する制約が課せられ、これが解析格子 δx と時間刻み δt をきめる。

一方、圧力 p の式については熱伝導方程式と同形の典型的な線形方程式であり、解析法は理論的に十分検討されていて流れ解析に特別な問題は生じない。しかし、実際の数値解析でNの大きな場合には計算時間という現実的な問題が障害となる。つまり、Nが大きい場合に連立式は反復的解法で解かれるのが一般的であるが、行列の固有値の分布が大きいかほど反復計算の収束効率は遅くなり、ポアソン方程式から得られる差分式をSORなどの単純な反復法で解くと収束はNの増加と共に悪化していく。これは、非圧縮性流れにおける圧力変化が瞬時に全領域に影響を与えることを考えると、非圧縮性流れの物理的特徴に対応する当然の結果である。これらの2種類の方程式系の組み合わせは、渦度と流れ関数などを用いた他の数値解析法にも現れる基本的なものといえる。

よって、ポアソン式を効率よく解くというきわめて一般的な数値解析上の課題が、流れ解析においても最も重要な課題の1つである。ここでは、2次元ポアソン方程式の計算速度についての簡単な比較例として、差分法で用いられる代表的な2つの反復解法(SOR、ADI)による計算結果を図2に示した。

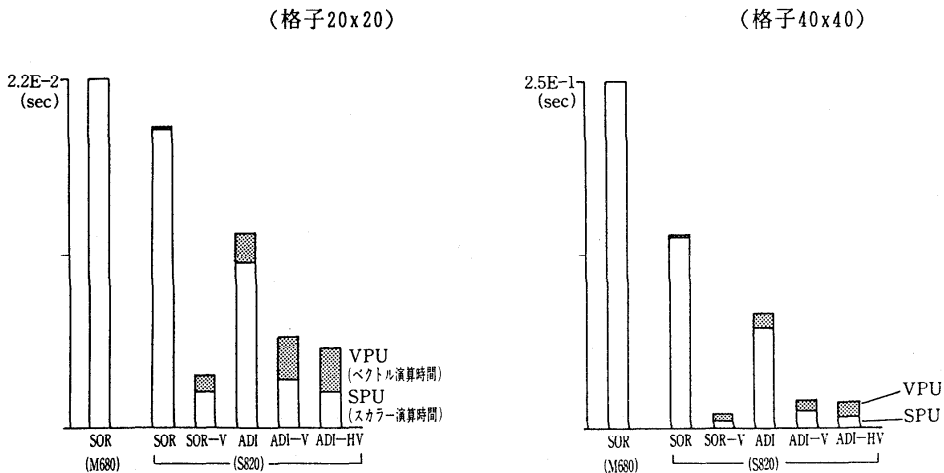


図2 ベクトル計算機における解法の手速比較

一般に、差分方程式の解法プログラムにおいてベクトル化を妨げているのは、

```
DO 10 I=1,M
10 F(I)=A(I)*F(I-1)+B(I)
```

の形の逐次代入式である。SOR、ADIでは陰解法的 (successive) な性質が収束性を高めているが、そのために逐次代入が一部に生じる。そこで、反復の順序を適当に変えて上記の逐次代入を避けることにより効率のよい解法 (SOR-V、ADI-V、-HV) が得られる。

実際のコンピュータによる計算効率は計算アルゴリズムの収束性と並列演算による加速率の双方によっている。後者のうち、並列計算による加速率の格子点数による違いなどは、アレイプロセッサ長などのコンピュータ・ハードウェア構成にも依存すると考えられる。

4. 複雑な流れ解析

実際の数値解析においては、乱流モデルや適合格子など付加的な要素が流れ解析手法に組み入れられている。これらは、数値解析の基本的なアルゴリズムを変えるものではないが、実際の計算時間などには大きく影響を与える。

まず、複雑な形状を近似するために一般座標系格子を導入した場合を考えると、微分方程式を連鎖則によって座標変換する際にヤコビアン・テンソル

$$J = \frac{\partial (\xi \eta \zeta)}{\partial (x y z)} \quad (4)$$

が現れる。また、速度ベクトルを座標変換するにはクリストッフエル・テンソルが必要で、一般に3次元では18の独立成分をもつ。これらの係数は格子形状が変化しなければ一定であるので反復計算ごとに計算する必要はないが、すべて各格子点に定義すると新たに (N×25) 要素の配列が必要であることになる。また、座標変換された方程式は正規座標系での表式の3倍以上の項数となり、これらを正確に離散化すると演算量は数倍に増加する。

表2 流れ解析コードの計算負荷 (HITAC S820/80 による)

	格子形状	計算次元	計算点数	記憶容量	計算時間
コード1	2D-BFC	2D	150x65	4MB	約12秒 (2.6e-6 s/step/N)
	x,y方向のみ	3D	150x65x45	43MB	約25分 (3.4e-6 s/step/N)
コード2	3D-BFC	3D	100x45x35	72MB	約50分 (2.0e-5 s/step/N)
コード3	2D非構造	2D	6700	16MB	約69秒 (2.0e-5 s/step/N)

*計算コード1、2は文献5)、3は文献6)

有限要素法などで用いられる非構造型格子における演算量もおよそ一般座標系格子と同等と見積られる。ただし、この場合に節点と要素の接合関係を示すリスト配列を用いると、構造格子的なメモリ構成をもつ現在のスーパーコンピュータでは演算速度がかなり低下することが多いことにも注意しなければならない。

3種の格子形式に対する定常解析コードを用いた乱流解析(k-εモデル)の例を表2に示した。同程度規模の3次元解析に対して、コード1、2では記憶要領で2倍弱、演算量で約6倍異なっており、これは座標変換に伴う計算量の差である。また、コード1、3での記憶容量の差は、非構造型格子で効率的なデータ構造を工夫することでかなり減少すると思われるが、演算量としてはほぼ同等と見積られる2つの計算方法の実計算時間が大きく異なることは、コンピュータの機能に依存する問題として注目される。

つぎに、実際の並列計算機での計算時間について、いくつかの乱流解析の例を表3に示した。ここで、圧力の式の解析に全体の半分近い実行時間が費やされているが、それ以外の演算量も必ずしも小さいわけではないことがわかる。ここで、k-εモデルやLESにおいて流れの基礎式(1)、(2)に付加される方程式には歪速度テンソル

$$S_{ij} = 1/2 \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right)$$

の積が含まれ、この部分だけでも6成分の積和(一般座標系では約3倍の演算量)の計算が必要となる。実際の計算コードでも計算時間のかなりの率を占めている。

レイノルズ応力モデルなどのより複雑な乱流モデルを導入する場合は、計算の収束性の問題を考慮しないとしても、特に一般座標系格子を適用する際に付加式の計算に要する演算量は少なくない負担となる。

5. おわりに

ここまで著者に身近な計算事例を取り上げて現状を述べたが、これらは流れ解析そのものに関する問題である。流れ解析のスーパーコンピューティングの方向として、流れ解析を含む数値シミュレーション・システムの発展が期待される。これには、伝熱化学反応を伴う流れや多層流、流体関連振動など複雑な物理現象の複合解析という興味深い研究対象がある。また、流れ解析は乱流モデルなどの検証実験手法として研究されてきたが、今後は、実用的な数値予測手法—たとえば、”数値風洞”—としての位置づけも重要になってくると思われる。そこでは、演算速度と記憶容量に加えて、MMI(マン・マシン・インターフェイス)の高効率性が重要である。ここでは触れなかった格子生成や解析結果の表示に関しては、すでに一部の研究成果はスーパーコンピューティングの範囲に入るものと思われる。そこでは、大規模データに関するネットワークの問題がスーパーコンピュータの重要な性能として加えられる。

参考文献

- 1) 保原、大宮司 数値流体力学、東大出版会(1992)
- 2) 村田、名取、唐木 大型数値シミュレーション、岩波(1990)
- 3) 棚橋 機械の研究 37(1985)、383-388、501-505
- 4) Y. Morinishi, T. Kobayashi Engineering Turbulence Modelling & Experiments (ed. W. Rodi, E. N. Ganic) (1990) 279-286
- 5) 谷口、荒川、小林、田古里 機論B、55-513(1989)、3026-3033
- 6) 谷口、荒川、小林 機論B、55-518(1989)、1324-1329
- 7) 谷口、小林、鈴木、長藤 ターボ機誌、20-5(1992)、295-300

表4 流れ解析コードにおける計算時間の配分

	case 1	case 2	case 3
乱流解析法	L E S		k - ε (B F C)
運動方程式	6.911s (70.4%)	1.685s (50.0%)	2.553s (30.6%)
空間微分	6.890s (70.2%)	1.677s (49.7%)	1.930s (23.1%)
時間微分/行列解法	0.021s (0.2%)	0.008s (0.2%)	0.632s (7.5%)
圧力解法	2.900s (29.6%)	1.688s (50.0%)	3.810s (48.1%)
行列解法			3.007s (35.9%)
乱流モデル	—	—	1.657s (19.8%)
生成項計算			0.803s (9.6%)
計算機種	VP-100(285MFlops)	S-820/80(3GFlops)	TITAN (32MFlops)
格子数/使用メモリ	130x66x29/24MB	204x94x29/45MB	40x25x20 / 4MB
V P U / C P U	約85%	約85%	約80%

* 計算時間は1 stepあたりのCPU時間でしめた。

* 計算時間の小さいループは切り捨てたため、総計時間は必ずしも正確でない。

* 計算コードは文献4), 5)

1 はじめに

半導体製造工程では、熱と物質の流れが重要な役割を果たしている。例えば、半導体の結晶成長法の一つとして、化学的気相成長法 (Chemical Vapor Deposition, CVD) がある。CVD は、半導体の原料となるガスの中に摂氏 600 度以上に加熱した基板を置き、ガスの熱分解により基板に結晶を成長させる技術である。基板付近の温度分布が結晶の成長速度に影響を与えることから、CVD における熱・流体解析が重要になって来ている。しかしながら、従来より非圧縮流体の熱対流解析に用いられて来た Boussinesq 近似では、このように気体中の温度差が数百度に達する、すなわち気体密度が大きく変化する問題を取扱うことができない。

一方、差分法による三次元流体解析では、数十万～数百万元の大規模な連立一次方程式をいかに速く解くか、言い替えると、スーパーコンピュータ上ではいかにベクトル化するかが計算時間短縮のカギとなる。

本報告では、高温差熱・流体問題に関しては圧縮性を考慮した定式化 [3] について、また、連立一次方程式求解の高速化手法に関しては、ベクトル化に適した前処理付き共役勾配法 [1] について説明する。さらに、これらの手法を採用した熱流体解析コードによる、CVD 反応管内の熱対流シミュレーション結果を紹介する。

2 高温差熱対流の計算法

熱を伴う流体運動を支配する圧縮性 Navier-Stokes 方程式は次の通りである。

- 質量保存式

$$\frac{D\rho}{Dt} = -\rho \frac{\partial u_i}{\partial x_i}, \quad \left(\frac{D}{Dt} = \frac{\partial}{\partial t} + u_i \frac{\partial}{\partial x_i} \right) \quad (1)$$

- 運動量保存式

$$\frac{Du_i}{Dt} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial x_j} \left\{ \mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right\} + f_i \quad (2)$$

- エネルギー保存式

$$c_p \frac{DT}{Dt} = \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial x_j} \left(k \frac{\partial T}{\partial x_j} \right) \quad (3)$$

ここで、 ρ : 流体密度、 u_i : x_i 方向の流速 ($\mathbf{u} = (u_1, u_2, u_3)$)、 T : 温度、 μ : 静粘性係数、 c_p : 定圧比熱、 k : 熱伝導係数である。なお、ここでは μ, k を一定とし、熱源は考慮していない。

いま解析の対象としている流速が音速に比べ十分小さいので、圧縮性流体の支配方程式から圧力変動を取り除かなくてはならない。そこで、圧力を一定かつ一様な大気圧 p_0 と流れによる変動分 p_d とに分けて考える。

$$p = p_0 + p_d \quad (4)$$

流れによる圧力変動は大気圧に比べて十分小さい ($p_d \ll p_0$)。これを無視すると理想気体の状態方程式は、

$$\rho RT = p \approx p_0 = \text{const.} \quad (5)$$

となる。この両辺の微分をとり、

$$\frac{1}{\rho} \frac{D\rho}{Dt} = -\frac{1}{T} \frac{DT}{Dt} \quad (6)$$

なる関係式を得る。このとき質量保存式(1)は次のように書ける。

$$\frac{\partial u_j}{\partial x_j} = \frac{1}{T} \frac{DT}{Dt} \quad (7)$$

これをエネルギー保存式(3)に代入する。

$$\frac{DT}{Dt} = \frac{k}{\rho c_p} \frac{\partial^2 T}{\partial x_j^2} \quad (8)$$

以上より、温度による密度変化(圧縮性)を考慮した次式が導出される。

$$\frac{\partial u_j}{\partial x_j} = \frac{k}{\rho c_p T} \frac{\partial^2 T}{\partial x_j^2} \quad (9)$$

この近似を MAC 法に組み込み次の手順を得る。

- Step1 エネルギー保存式(3)を解き T^{n+1} を求める。
- Step2 運動量保存式(2)の両辺の発散をとった圧力方程式

$$\frac{1}{\rho} \nabla^2 p + \nabla \frac{1}{\rho} \cdot \nabla p = -\frac{\partial(\nabla \cdot \mathbf{u})}{\partial t} + \nabla \cdot \left(-\mathbf{u} \cdot \nabla \mathbf{u} + \nabla \frac{\mu}{\rho} \nabla^2 \mathbf{u} \right) \quad (10)$$

より圧力 p^{n+1} を求める。右辺第1項の差分近似式

$$\frac{\partial(\nabla \cdot \mathbf{u})}{\partial t} \approx \frac{\nabla \cdot \mathbf{u}^{n+1} - \nabla \cdot \mathbf{u}^n}{\Delta t} \quad (11)$$

の $\nabla \cdot \mathbf{u}^{n+1}$ 項は通常の MAC 法では零とされるが、本定式化では、熱による密度変動の効果として Step1 で得られた T^{n+1} と式(9)より値が計算される。

- Step3 運動量保存式(2)より流速 \mathbf{u}^{n+1} を計算する。
- Step4 Step1-Step3 を必要なだけ繰り返す。

離散化に関しては、時間項に一次精度の陰解法、移流項に3次精度の風上差分法[4]を使用する。

3 連立一次方程式解法の高速度化

流体解析では CPU 時間の9割以上が行列の求解計算で占められる。3次元境界適合座標系では、圧力方程式は隣接19点と接続する差分方程式に離散化され(図1)、その係数行列は規則スパースな非対称行列となるが、従来これらの方程式はSOR法などの緩和反復法で解かれて来た[5]。しかしながら、圧力方程式では境界条件のほとんどがノイマン条件であること、さらに前章の定式化では $\nabla(1/\rho) \cdot \nabla p$ 項が加わり、密度勾配すなわち温度勾配が大ききところでは行列が非対角優位となることから、従来の緩和反復法では収束性が非常に悪い。

そこで、これらの方程式のベクトル計算機向き高速求解法として、行列要素のうち主要7点のみを前処理に用いる非対称の共役勾配法を提案する[1]。いま連立一次方程式が

$$\mathbf{A}\mathbf{u} = \mathbf{b} \quad (12)$$

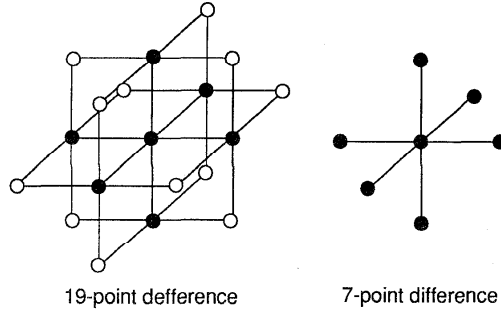


図 1: 差分離散化による節点間の接続関係

で表されるとすると、前処理共役勾配法とは、前進後退代入による反転計算が容易な近似行列

$$M - A + R \quad (R: \text{残差行列}) \quad (13)$$

を生成し、この行列 M により式 (12) を等価変換した前処理方程式

$$(M^{-1}A)u = M^{-1}b \quad (14)$$

に双対共役勾配 (BCG) 法や共役勾配二乗 (CGS) 法などを適用するものである [6]。

主要 7 点要素のみを前処理行列 M として利用することによって、不完全 LU 分解 (ILU) 法や三重対角分解 (TF) 法 [2] を適用できる。式 (12) の係数行列 A は、対角項 D と各格子方向の要素 $A_{x_1}, A_{x_2}, A_{x_3}$ およびその他の非零要素 A_r の和として次のように表わせる。

$$A = D + A_{x_1} + A_{x_2} + A_{x_3} + A_r \quad (15)$$

TF 法では近似行列 M_{TF} を次式で定義する。

$$M_{TF} = (D + A_{x_1})D^{-1}(D + A_{x_2})D^{-1}(D + A_{x_3}) = A + R_{TF} \quad (16)$$

TF 法では、 M_{TF}^{-1} の計算が各格子方向に並列性を持つので、容易にベクトル化できる。

4 CVD 反応管内の熱対流シミュレーション

円筒状の反応管モデル内の流れ解析を行った (図 2)。気体は窒素で、流入境界ではレイノルズ数 $Re = 1000, 10$ に応じた温度 $300K$ の一様流を与え、流出境界では温度、流速ともにノイマン条件とした。管面および基板の温度は各々 $300K, 900K$ とし、速度はすべり無し条件を与えた。格子数は $81 \times 51 \times 51 = 210681$ 点で、3000 ステップまで計算をした。このときの CPU 時間は NEC SX-2 で各々約 5 時間であった。また、前処理法の違いによる 1 ステップあたりの平均反復回数および CPU 時間の比較を行ったところ、TF 法は ILU 法に比べて約 1.85 倍高速であった (表 1)。

図 3 は $Re = 1000$ 、図 4 は $Re = 10$ の計算結果で、無次元時間 3.2 から 0.2 毎の温度および速度分布を二つの断面で可視化したものである。高温に加熱されたガスが基板上部よりプルームとなって上昇するのがわかる。また、レイノルズ数が小さくなる、すなわち流入速度が小さくなると、強制対流より自然対流の影響が強くなることが確認された。

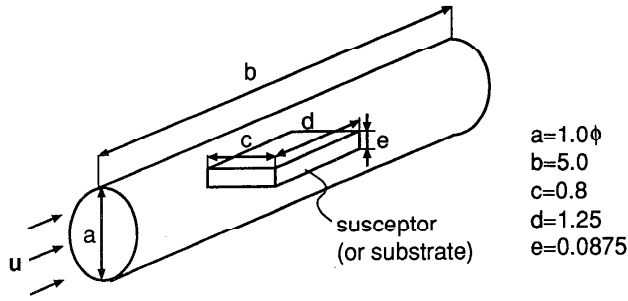


図 2: CVD 反応管モデル

表 1: ILU 法と TF 法の比較

解法	反復数		CPU 時間	
	回数	比	秒	比
ILUBCG	83	1.00	10.58	1.00
TFBCG	98	1.18	5.68	0.54

5 おわりに

高温度差による密度変動を考慮した熱対流の定式化、および、連立一次方程式高速解法としてベクトル化に適した TF 前処理共役勾配法について説明し、CVD 反応管内の 3 次元熱対流シミュレーションに応用した。これらの手法を用いた熱流体解析コードでは、NEC SX-2 においてベクトル化率 99.7%、実効速度約 700 MFLOPS の性能が得られている。流体解析での計算時間短縮のためには、連立一次方程式求解の高速化が重要である。熱対流の定式化に関しては、固体との熱伝達を考慮することによって、例えば LSI の冷却問題などへの応用が可能であろう。

参考文献

- [1] 秋葉, 土肥, 速水, 石原, “高速連立一次方程式解法を用いた 2 次元, 3 次元流体解析システム”, 第 7 回航空機計算空気力学シンポジウム論文集, NAL SP-10, 19-25 (1989).
- [2] Doi, S. and Harada, N., “Tridiagonal Factorization Algorithm: A Preconditioner for Non-symmetric System Solving on Vectorcomputers”, J. Info. Proc., 11, 138-146 (1988).
- [3] Kuwahara, K., “Computation of Thermal Convection with a Large Temperature Difference”, Proc. of 4th Int. Conf. on Appl. Num. Modeling, (1984).
- [4] Kawamura, T. and Kuwahara, K., “Computation of High Reynolds Number Flow around a Circular Cylinder with Surface Roughness”, AIAA paper, 84-0340 (1984).
- [5] 藤野, 田村, “一般座標系 2,3 次元における SOR 法のベクトル化について”, 情知研報. 89-NA-30 (1989).
- [6] 例えば 村田, 名取, 唐木, “大型数値シミュレーション”, 岩波書店 (1990).

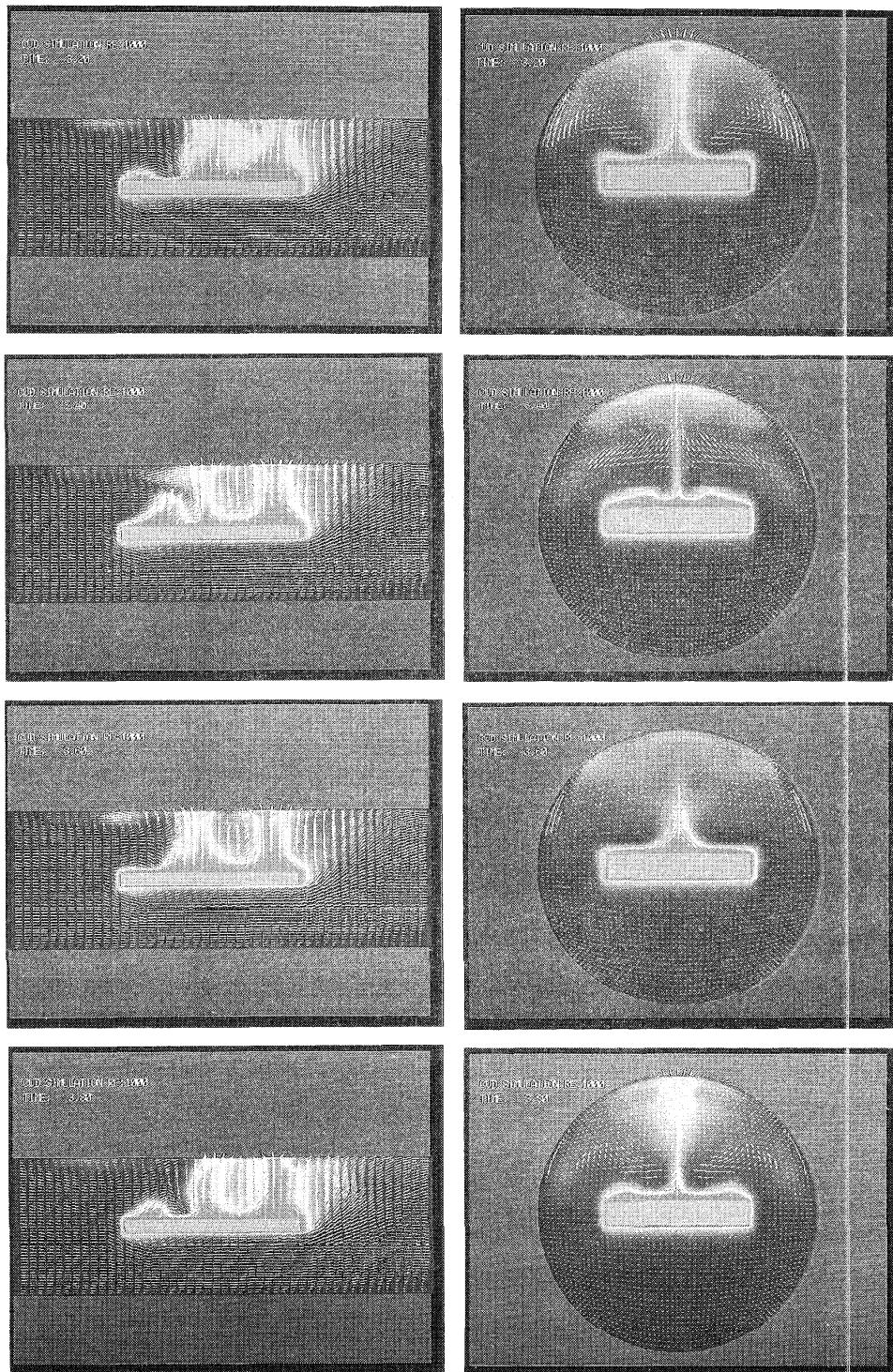


図 3: $Re=1000$ の場合の流速および温度分布

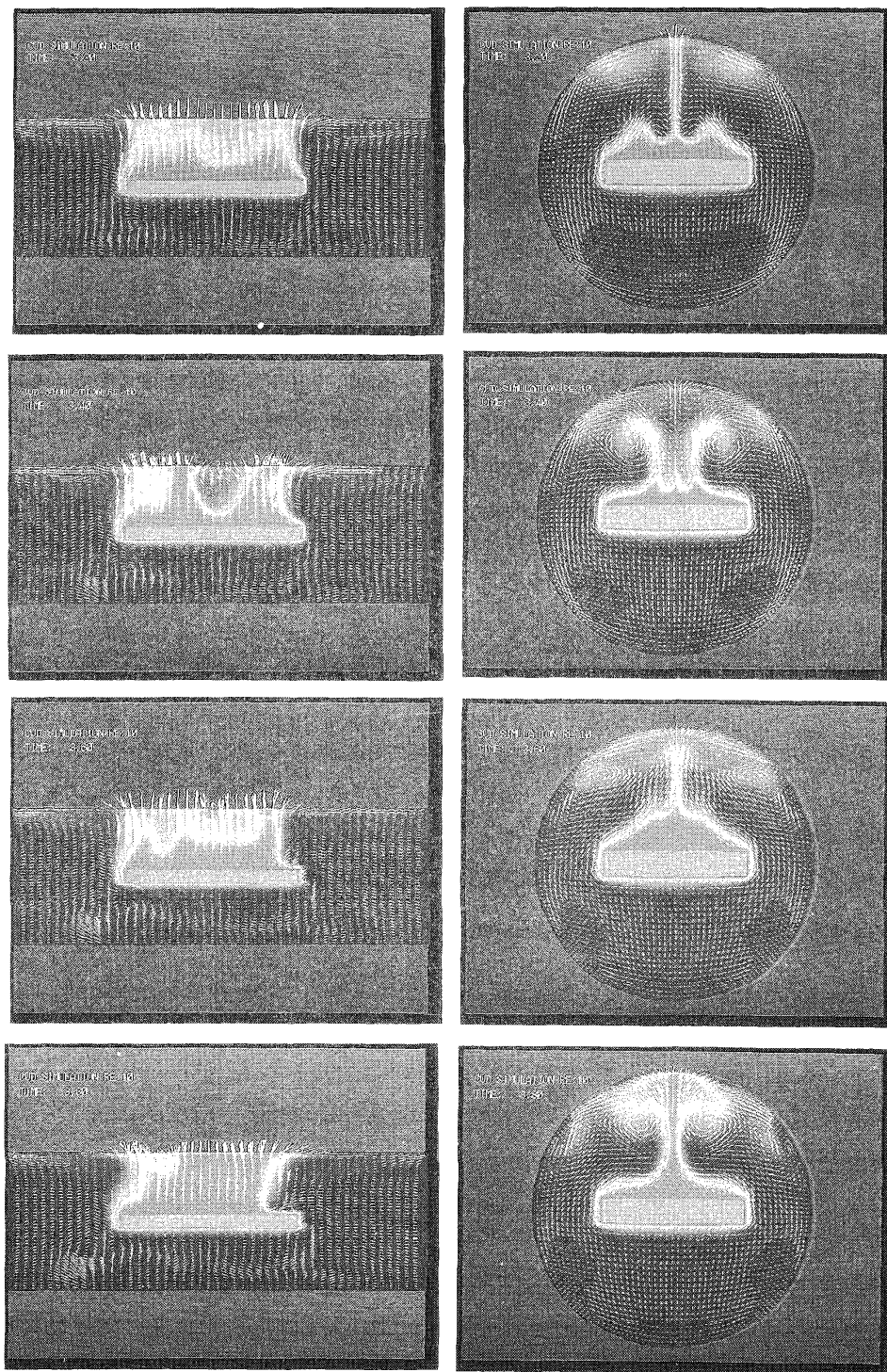


図 4: $Re=10$ の場合の流速および温度分布

連続体の並列計算における負荷の均等化
—— スーパーコンピュータ・ネットワークへの応用 ——

吉岡 顕、東京大学大型計算機センター
矢川 元基、東京大学工学部

1. 緒言

近年のコンピュータ技術の急速な進歩により、これまで設計や現象の解明のための予備的検討手段にすぎなかった「数値解析」が、「理論」、「実験」と並ぶ実現象の分析手法として認められるようになった。これは、相当に大規模なモデルを高速に解くことが可能になったことによるが、逆に、そのことが数値解析手法に対する期待を高め、より大規模なモデルをより高速に解析したい、という需要を生じさせている。

一方、コンピュータ技術においては、すでに1プロセッサでの処理の高速化は限界に達し、より高速なコンピュータを開発するためには、複数のプロセッサを同時に利用する並列アーキテクチャの採用が確実視されている。

並列アーキテクチャを採用したコンピュータ（以下並列コンピュータと記す）においては、当然のことながら並列処理可能な部分の比重が大きい（すなわち並列化率が高い）アルゴリズムを採用したプログラムでなければ高速化することができない。一般に、既存のプログラムをそのまま高速化できるケースは少なく、数値解析においても、並列処理に適したアルゴリズムを開発することが必要である。

ところで、実際の並列コンピュータ環境下で、効率良い並列処理を行うためには、

- ・並列化率大
- ・粒度大
- ・通信量小
- ・負荷の均等化

といった条件を満たさなければならない。ここで、「並列化率」については、ほぼ採用するアルゴリズムに依存するが、「粒度」、「通信量」、「負荷の均等化」については、アルゴリズムだけでなく、そのアルゴリズムの実際の並列コンピュータへの実装方法に依存する。したがって、数値解析において、高効率な並列処理を実現するためには、単に並列性の高いアルゴリズムを用いれば良いというものではなく、最後に完成した解析コードが、上述した条件を満たす必要がある。言い換えると、アルゴリズムを選択する、あるいは開発する段階から、実装時における粒度、通信量、負荷均等化などについて予測しながら、それらが適切な状態である

か、考慮することが必須である。

本稿では、筆者がこれまで行ってきた主に固体構造解析を対象とした有限要素解析の並列化の研究例 [1]-[4] をもとに、効率良い並列処理を実現する手法についてまとめる。なお、以下においては、静的な構造弾性解析を例に実装例を述べるが、非線形構造解析、熱流

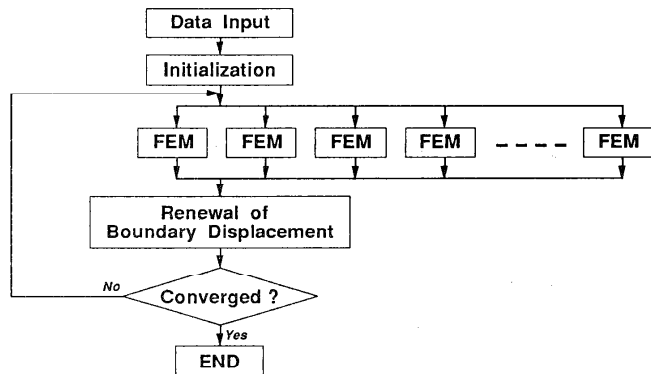


図1 領域分割法の処理の流れ

体解析およびそれらの動的解析などあらゆる連続体解析に適用可能であり、応用範囲は広い。

2. 領域分割法

前述した条件を満たす有限要素法の並列化手法として、領域分割法が有力である。本手法では、一つの解析領域を複数の小さな部分領域に分け、各部分領域で独立に解析を行う[5]。この場合、部分領域間において、変位の連続性と力の釣り合いが満たされていることが必要である（固体力学の場合）。このため、部分領域間において、適当な変位境界条件を与えて解析を行い、力の釣り合い条件については共役勾配法* [6]を用いて反復的に満足させる。この手法では、各部分領域の有限要素解析を単位に並列化が可能のため、非常に粒度の大きな並列計算となる（図1参照）。また、境界条件の更新に要する計算量は各部分領域での有限要素解析に比べ格段に小さい（前者は自由度に比例し、後者は自由度の2乗に比例する）ため、並列性も非常に高く大規模解析に適したアルゴリズムである。

3. 負荷分散のための実装

本システムにおいては、負荷分散の機能を持たせるために、一種のデータ・フロー方式を採用した。まず、全体の処理を、部分領域の解析を行う‘Domain Analyzer’（単にアナライザと略す）と、全体の管理および部分領域間の境界条件の更新を行う‘Domain Connectivity Controller’（コントローラと略す）の2種類に分け、利用できるプロセッサのうち1個をコントローラに、残りをアナライザに役割分担する。

多くの並列化手法では、解くべき対象の部分分割とプロセッサとを1対1に静的に関係づけ

* ここで言う共役勾配法は、探索法としての共役勾配法であり、連立一次方程式のソルバとしての共役勾配法とは異なる。

ているが、このことが負荷の均等化を難しくしていると考え、本システムでは、部分領域とそれを解析するアナライザとを「動的に」対応付けることとした。なおここで前提として、部分領域の分割数はアナライザ数に比べて十分に大きいものとする。本システムが必要となる大規模解析の場合、1領域の大きさを（1つのプロセッサで解析可能なように）十分に小さくするため、この仮定は現実的なものである。以下に、コントローラとアナライザの役割をまとめる。

コントローラ：

- ・全体の解析データの入出力
- ・アナライザにおける解析用入力データの作成
- ・アナライザからの解析結果の処理と解ベクトルの更新
- ・アナライザの作動状況の監視
- ・部分領域間の境界条件の更新と収束判定

アナライザ：

- ・各部分領域の有限要素解析

ここで、各アナライザは解析している全体のモデルを全く知らないまま、単に与えられた部分領域に対する有限要素解析のみを行い、その解析結果をコントローラに返送するのみである。言い換えれば、コントローラによって用意された解析用の“入力データ”が、アナライザに送られ、そこで“解析結果”に加工されて、コントローラに戻される、という流れ作業のラインがアナライザの個数と同じだけ準備されている、とみなすことができる。さらに、各アナライザは、他（コントローラあるいは別のアナライザ）からの指令を受けて作業を行うのではなく、上流からデータが与えられれば自動的に作業を行い、下流へデータを渡すような構造となっており、解析すべきデータが存在する限り、全てのアナライザが遊ぶ（idling状態になる）ことなく常に動作する。

次にコントローラの処理の流れを図2に示す。

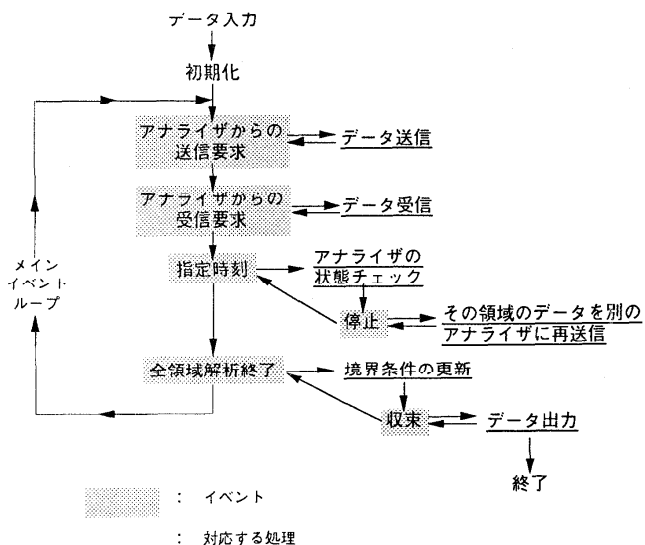


図2 コントローラの処理の流れ

コントローラにおいては、任意のタイミングで生じる送信・受信要求に即座に応答できるようにイベント駆動型と呼ばれるアルゴリズムを採用している。すなわち、イベント・ループと呼ばれる無限ループが存在し、あるイベントが生じた時（ある条件を満たす時）にある特定の処理を行う、というプログラミングを行う。図中、影をつけた項目がイベントを、下線をつけた項目がそれに対応する処理を表す。また、このイベント・ループ内において、定期的にアナライザの状態をチェックする処理を行うことにより、フォールト・トレラント性能も実現されている。

4. 実装・解析例

前述したように、本システムは、解くべき対象の部分分割とプロセッサとを動的に対応づけるため、いろいろな形態の並列コンピュータに実装可能である。ここでは、米国ミネアポリスのCray Research社のスーパーコンピュータ3台が接続されたネットワークを一種の並列計算機と考え実装した例と、そこでの解析例を紹介する[3]-[4]。なお、データの入力などはInternetを介して東京大学内の研究室から行った。

図3にシステム構成を示す。Crayスーパーコンピュータはそれ自体が並列コンピュータであるが、ここではそれぞれの持つProcessing Unitを1つのプロセッサと見なし、システムを構築した。後述する例題を解く際には、メモリおよび他のユーザとの関係から、sn1101(Cray XMP/EA)から1プロセッサ、sn1001(Cray YMP/EA)から7プロセッサ、sn1033(Cray YMP)から8プロセッサを利用できたため、この場合、16プロセッサの並列コンピュータを用いたことになる。

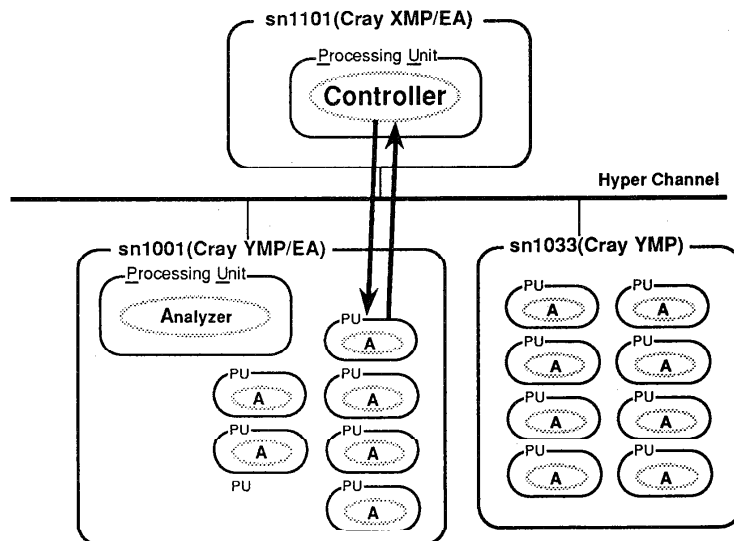


図3 システム構成

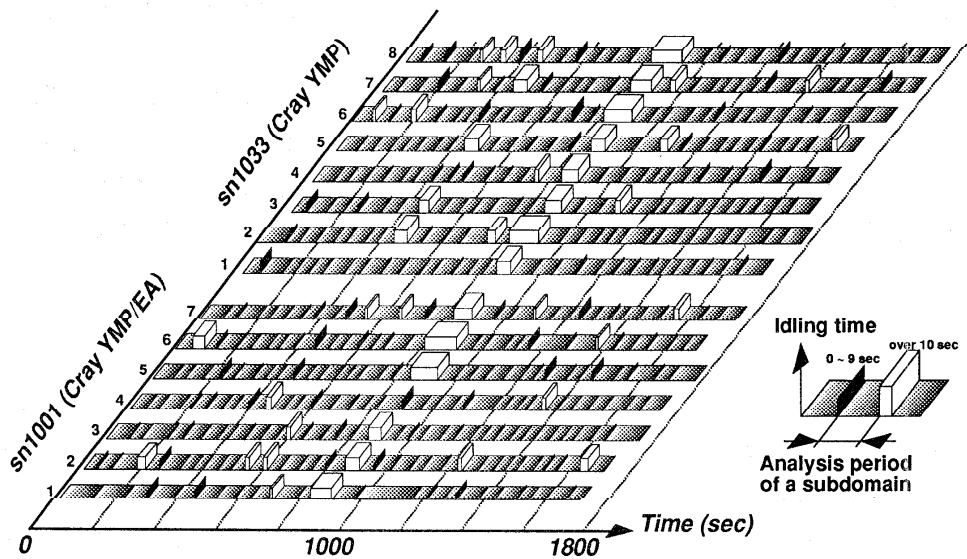


図4 動的負荷分散の様子

例題として、一様引張を受ける立方体形状の弾性体を $72 \times 72 \times 72$ 分割したメッシュを用いて解析を行った。なお、 $12 \times 12 \times 12$ 要素をまとめて1領域とし、 $6 \times 6 \times 6$ 領域に分割した。図4に本システムにより解析した際の各プロセッサの稼働状況のダイアグラムの一部を示す。この図において、横軸は時間の経過を示し、白から黒へのグラデーション・パターンはある1部分領域の解析時間を示す。アナライザにおいてソルバとして反復法である共役勾配法を採用したため、1領域の解析時間はかなりばらつきを持っている。また、鉛直方向の黒いパネル、および白いボックスは解析と解析の間の待ち時間を示す。（待ち時間が10秒未満と短い場合には黒で、10秒以上と長い場合には白で表示している。）ここで、900秒付近にほとんど全てのプロセッサについて現われる待ち時間は、領域分割法の境界条件の更新の際に生じる同期待ちである。一方、500秒付近にsn1033 (Cray YMP)のプロセッサ2, 3, 5, 7 および8で生じている待ち時間は、ネットワーク上での通信トラブルによるものである。このため、これらのプロセッサでの作業は滞りを見せているが、動的に負荷を分散させているため、他のプロセッサでの解析は休むことなく行われている。また、通信トラブル自体も適当な待ち時間の後に再送信することにより自動的に回避されている。このように、動的負荷分散、フォールト・トレラントといった性質が有効に働いていることがわかる。

なお、本解析例において、その平均計算速度を実測した結果、1台のCrayスーパーコンピュータでは実現することの困難な、1.7GFlops以上という高速性能が得られたことを付記す

る。

5. 結言

数値解析の並列化において問題となる、計算負荷の均等化について、解くべきモデルの部分分割とプロセッサとを動的に対応づけることにより、自動的にかつ均等に負荷を分散することができ、結果的に効率良い並列処理が可能になることを示した。

本稿では、構造弾性静的解析を例に議論を進めたが、負荷分散のためのアイデアは、多くの分野での並列処理にも応用可能である。なお、筆者らのグループは、構造非線形解析[7]、非圧縮性粘性流体解析[8]-[9]、およびその動的解析[10]への応用、超並列計算機への実装[11]も試みていることを付記する。なお、この方面の最近のレビューについては文献[12]-[13]を参照されたい。

参考文献

- [1] 矢川、曾根田、パラレルコンピューティング、培風館、1991.
- [2] G. Yagawa, N. Soneda, and S. Yoshimura, *Int. J. Computers and Structures*, 38, 1991, pp.615-625.
- [3] 吉岡、矢川、吉村、曾根田、日本機械学会論文集A編、57-541, 1991, pp.1964-1972.
- [4] G. Yagawa, A. Yoshioka, S. Yoshimura and N. Soneda, *Int. J. Computers and Structures*, submitted for publication.
- [5] R. Glowinski, Q. V. Dinh, and J. Periaux, *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 40, 1983, pp.27-109.
- [6] 戸川、共役勾配法、教育出版、1977.
- [7] 曾根田、矢川、吉村、日本機械学会講演概要集、900-69, 1990, pp.193-194.
- [8] 湯浅、矢川、吉村、機械学会講演概要集、900-14, A, pp.504-505, 1990.
- [9] 矢川、吉村、東海、吉岡、構造工学における数値解析法シンポジウム論文集、15, 1991, pp.527-530.
- [10] 大石、山田、吉村、矢川、日本機械学会論文集A編、印刷中.
- [11] 矢川、吉村、塩谷、吉岡、日本機械学会講演概要集、910-79, 1991, pp.133-134.
- [12] G. Yagawa, *Theoretical and Applied Mechanics*, 39, 1990, pp.3-9.
- [13] 欠川（編）、計算力学における並列コンピューティング、コンピュータロール、40, コロナ社、1992.

熱伝導・熱伝達の並列計算について

河村 洋（東理大）

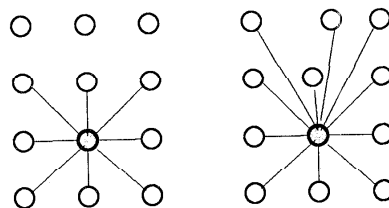
1. ま え が き

いうまでもなく「伝熱」とは熱の移動であるから、必ず注目する領域内のなんらかの相互作用によって生ずる現象である。しかも、その相互作用は、局在化されたものではなく、領域内の各部分が複雑に相互作用を及ぼし合い、それらが同時に進行している。これを数値的に解析しようとする、そこに支配方程式を見出し、それを計算機が処理できるようなアルゴリズムに変換するとともに、領域をなんらかのディスクリートの要素に分割し、それらに計算機のメモリーをそれぞれ割り当てることが必要になる。従来、そして現在の大部分の計算機では、演算素子(CPU)は一つしかないから、これらの要素について、何らかの人為的な順序をつけ、順次計算している。しかし、元来、これらの要素間の相互作用は同時進行的に生じているのであるから、多くの演算素子(CPU)を用いて並列的に解くことができれば、その方が自然現象そのものもより良く反映している。したがって伝熱における並列計算は、単に計算速度を速くするのみならず、プログラミングをも容易にすることが期待される。

初歩的な話で恐縮であるが、いわゆる伝熱の三形態を「熱伝導」、「対流熱伝達」、「熱放射」として、それぞれの場合について各要素間の相互作用を考えると、基本的には、熱伝導と対流熱伝達が隣接部分間の近接相互作用であるのに対し、熱放射ではすべての要素間に相互作用が存在する。したがって、並列化の方法は、「熱伝導」「熱伝達」と「熱放射」では非常に異なる。放射伝熱は本特集でも別にご専門の方が執筆されており、また筆者の任でもない、以下では熱伝導と対流熱伝達を中心に話を進めることとしたい。

並列計算機の構成とその種類については最近解説書^(1,2)や記事も多く、また今回の特集の中でもいくつかの例が紹介される予定である。

一般に並列計算というと、スーパーコンピュータのベクトル演算もその範疇に含まれるが、ここでは我々の「パラレル計算」というイメージである「マルチプロセッサ方式」について簡単に概観し、気付いている点などを述べさせていただきたい。



熱伝導および
対流熱伝達
熱放射
図1 伝熱現象の相互作用（模式図）
◎が注目する要素

2. マルチプロセッサによる並列計算

逐次計算と異なる並列計算の特徴の一つとして、計算手法がハードの構成と独立しては存在し得ない点がある。

(1) 分割方式

並列演算を行う方法は、基本的に、次の2つに大別される。

- ① 領域分割
- ② アルゴリズム分割

領域分割とは、計算領域を分割してそれぞれに演算プロセッサ(P E)を割当てるもので、それに対し②のアルゴリズム分割とは、それぞれのP Eに別々の方程式を割当てるものである。筆者ら⁽⁴⁾も一度アルゴリズム分割を試みたことがあるが、この方法ではそれぞれのP Eが計算した全データを互いに交換しなければならず、また計算負担の均等化もむづかしいので、伝熱計算には、アルゴリズム分割は適さないようである。

(2) 並列計算方式の分類

命令(Instruction)の処理とデータ(Data)の流れがそれぞれ単 (Single)か、複数(Multiple)かによって、

- S I S D (Single Instruction Single Data Stream)
- S I M D (Single Instruction Multiple Data Stream)
- M I M D (Multiple Instruction Multiple Data Stream)

の構成に分類できる。従来の逐次処理計算機は、S I S Dの範疇に入る。複数のデータを単一命令によって同時に多数の演算素子で処理するS I M D方式はベクトルプロセッサに代表されるし、複数命令によって処理を行えば(M I M D)、いわゆるマルチプロセッサ方式となりメモリ構成と関連して、最も多種多様な並列計算機が構成される。トランスピュータを用いた並列計算機は、以上の分類からいえば分散メモリ型M I M Dで

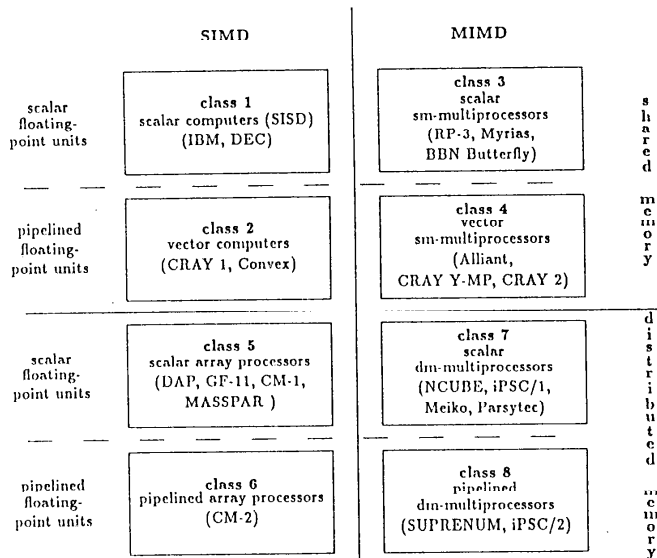


図2 各種の並列及びスーパーコンピュータ⁽⁴⁾

ある。図2に代表的な並列計算機の構成とメモリの関係を示す⁽⁴⁾。

プログラム及びデータを記憶するメモリは、各プロセッサが共有し、どのプロセッサからもアクセスされる主メモリ共有型と、多数のプロセッサが独立にメモリを持っている分散メモリ型とに分類される。メモリ共有型の場合にはメモリアクセスの帯域幅が狭く、プロセッサを増設すればするほど帯域幅に影響が出やすいという問題点がある。一方、分散メモリ型の場合は、プログラム及びデータの分割や各プロセッサへの配置、あるいは配置されたプロセッサ間のデータを共有するときの通信等のスケジュールや同期待ち問題がある。

(3) 並列規模(粒度)

一つの演算要素(P E)が受け持つ計算量を、粒度(granularity)と呼んでいる。したがって並列規模との対比では

並列規模(小	中	大)
粒 度(大	中	小)

となる。

並列規模が小さく粒度の大きな並列計算機は、従来のスーパーコンピュータのCPUを並列化する方向で実現している。例えばCRY Y-MPでは8CPU、SX-3では4CPUである。

このような大型機では、従来のプログラム方式の延長としてユーザーは並列性をできる限り意識しなくてもよい方向で開発がなされており、コンパイラーがDOループ、サブルーチンなどのように粒度の大きいタスクの並列性を見つけ出して並列化を行う。しかし我々一般のユーザとしては、このような大型機で複数のCPUを専有して使うことはむずかしく、またたとえスループットは速くなっても、課金制度がCPUあたりの計算時間を積算することになっていることが多く、料金上のメリットは少ないので、企業で特定目的のために高速計算を行うというようなケースを除いては、我々研究者が実際にこの種の並列計算をするのは難しいようである。

逆に「細粒度」の極限は、一つのPEが一つの要素を受け持つ場合である。しかし、伝熱計算の場合これに要するPEの数は、数十万～数百万と極めて莫大で、現在超並列といわれるマシンでも千～万のオーダーの数であるから、近い将来には実現しそうにない。したがって、当面は、一つのPEが複数の要素を受け持ち、その要素間の計算を行いつつ、他のPEに属する要素との間に必要なデータの交換を行いつつ計算を進めるという「中粒度」の計算が中心になると思われる。現在大学の研究室で4個～16個程度のトランスピュータを並べて行っている計算も、素子数の上では小規模、粗粒度であるが内容的には中粒度であり、他方たとえ超大規模並列計算機が実現したとしても、当面はやはりできる限り詳細な計算をしようとするであろうから、一つの演算素子にかなりのメッシュ数を割り当てる中粒度とあまり変わらない計算を

することになる。また、「超並列」の方向では、むしろ専用マシン(たとえばナビエ・ストークス・ソルバー)の開発が進むことも考えられる。

(4) 結合方式

どのような結合方式が実現できるかは、演算素子の持つ通信リンクの本数に依存する。図3に各種のスタティックなネットワークを示す。これらの結合方式の中では、筆者のように差分法で逐次緩和系の解法を主としてきた者にとっては、直感的に格子結合(ニアネイバ・メッシュ)が適当と思いつく。現在のトランスペュータ(T800系)では、通信リンクを4本持つため、格子結合は容易に組める。図4は筆者の研究室で17個のトランスペュータを用いてテストを行ったときの構成である。しかし、実際にやってみると計算結果を1か所(ルート)に集めるのが大変である。いわゆるバケツリレー式にやらざるを得ず、むしろそれで可能なのではあるが、隣の人はデータの内容は何であるかを云わないで渡してくる来るので、受けとる側が次はAだと思っているときに、間違ってもBが来ても分からないため、デバッグの段階ではかなり大変であった。また、素子数が増えると通信時間も増加する。現在アナウンスされている新しいT-9000系のトランスペュータでは、これまでの4本のリンクの他にバーチャルリンクという別の通信チャンネルを有し、この点を改良しようとしている。

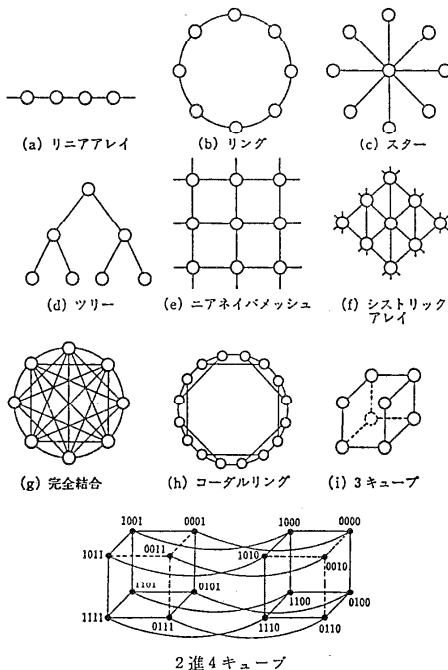


図3 各種の結合方式⁽²⁾

どのような結合方式が良いかは、採用する解法に大きく依存する。有限要素法のような非構造格子から生ずる帯行列を計算する場合には、リング状、トリー状等が試みられている⁽⁵⁾、高速フーリエ変換の並列化には2進nキューブが適している

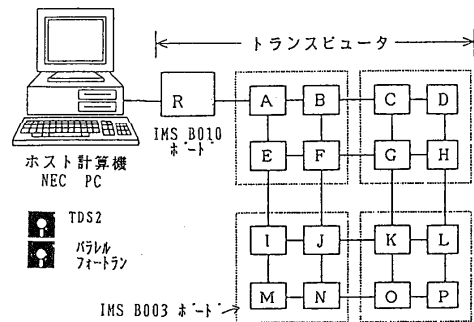


図4 トランスペュータの格子接続

ようである⁽¹⁾。また対象とする伝熱現象が「熱放射」のように遠隔相互作用の場合には、要素間のできる限り密な結合が重要である。

3. 並列演算の性能

並列処理の効果を測る目安に速度向上率と計算効率（プロセッサ利用率）が定義されている。P台のプロセッサによる計算時間をT(P)で表すと、速度向上率Sと計算効率E_pはそれぞれ

$$\text{速度向上率} \quad S = T(1)/T(P) \quad (1)$$

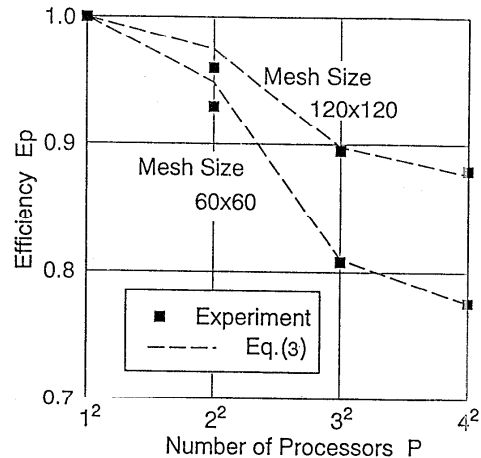
$$\text{計算効率} \quad E_p = T(1)/PT(P) = S/P \quad (2)$$

である。いずれも1に近いほど並列処理の効果が上がっているといえる。

効率に影響する要因についても、もちろん並列アーキテクチャによって異なる。Groppら⁽⁶⁾は、同一の問題を分散メモリのMIMD型を共有メモリのベクトル型並列演算で比較し、後者ではいくつのプロセッサが同時にメモリーにアクセスできるかが、主要な因子になることを示している。筆者らが経験した格子結合(ニアネイバメッシュ)で熱伝導方程式のようなポアソン方程式を領域分割で解く場合には、

$$E_p = 1 - m(b/a)(\sqrt{P}/N) \quad (3)$$

と近似できる。ここで、b/aは1格子点の通信時間と計算時間の比、mは分割領域の周辺領域との通信回数（通常はm=4）、Nが一辺の格子点数、Pがプロセッサ数である。図5は筆者の研究室で行った熱伝導問題の並列計算結果であり、格子点数をパラメータにして計算効率とプロセッサ数の関係を示している。式(3)は実験値の傾向をよく再現している。



式(3)は並列計算効率が高くなる条件が

図5 実測値と予測式の比較⁽³⁾

- ① m b / a 小, すなわち通信時間m b が計算時間a に比して小さいこと
- ② P / N² 小, あるいは N² / P 大, すなわち, 1プロセッサあたりの格子点数(粒度)が大きいこと

であることを示している。(これらは、定性的には並列演算に対して、一般的に成り立つ傾向である。)

上記の内①はむろん当然で、通信の順序、回数を整理してできる限り並列にし、かつ同期待ちをなくすことが必要である。つぎの②はやや興味深い点であり、並列度が低いほど並列計算

効率は上昇することを示している。例えば、同じプロセッサ数で格子点数を増加させれば、並列化アルゴリズムはそのままでも、計算効率は向上する。したがって、むしろ並列計算効率は高いほど良いのであるが、逆説的な表現をすれば、並列計算効率が高いということは、まだまだ並列度を上げる余地が大きいことを意味しているといえる。

4. あ と が き

以上、熱伝達計算における並列化についてまとめもなく気付いていることを述べてきた。実際にある目的に並列計算を用いようとするときには、ある種のトレードオフ点が存在するように思われる。たとえば演算素子が2～4個程度の並列では確かに数倍程度のスピードアップは得られるものの、この程度では実際にはプログラムを並列化してデバッグして使用しようとするインセンティブとはなり難い。実際に並列化の効果をあげるには、大略10個以上を使用して10倍程度のスピードアップを得ることが必要である。他方もし同じ計算性能が同程度の価格で得られるのなら、やはり汎用性やプログラミングの容易さからいって、EWSの方が有利である。したがって、多少大雑把な議論ではあるが、10倍程度のスピードアップが数分の一程度の設備投資で可能になるとというのが並列演算のトレードオフ点ではないかと思われる。実際、市販の並列計算機(素子)の路線も、その辺を目標としているように見受けられる。

現在、EWS(ワークステーション)の性能・価格比は、RISCチップ等の普及によって急速に向上している。したがって並列演算機(素子)に対しても、より一層の価格の低下と要素間の通信機能の向上が望まれる。

他方、アルゴリズムについては、従来の計算手法は、どちらかといえば、大型のマトリックスを逐次計算でいかにして高速に解くかという視点から発達させられてきたものであり、そのまま並列化するには適さない手法も多い。今後は、単なる逐次計算方式の踏襲ではない並列計算に適した新しい手法の開発が必要である。そしてそのような手法は、冒頭にも述べたとおり、とくに伝熱の計算においては、より明解で自然な計算手法であると期待される。

参 考 文 献

- (1) 富田眞治, 並列計算機構成論, 昭晃堂 (1986).
- (2) 笠原博徳, 並列処理技術, コロナ社 (1991).
- (3) 河村洋, 稲垣詠一, 日本機械学会論文集(B編), 57-540, (1991), 2702-2707.
- (4) McBryan, O.A., ら, Impact of Computing in Sci. and Eng., vol.3(1991), 1-75.
- (5) 矢川元基, 曾根田直樹, パラレルコンピューティング, 培風館 (1991).
- (6) Gropp, G.W., E.D.Smith, Computer & Fluids, 18-3, (1990), 289-304.

超並列計算機による計算流体力学コードの開発

長澤幹夫(計算流体研)

1. はじめに

並列演算命令を含む拡張言語 Fortran90 により、Thinking Machine社の CM-2 および DEC社の DECmpp12000上で、非圧縮流れの差分法、多体問題、粒子流体法などのコーディングを実際に行なった結果について報告する。ベクター型スパコンの能力を越えようとする、これら超並列計算機の性能評価を行ない、開発環境の問題点、高速通信を用いた可視化環境など、今後の計算流体力学分野における超並列計算機の有効性について考察する。

従来のスパコンに用いられてきたパイプライン式のベクター処理は基本的に逐次処理であり、情報が光速より速く伝わらないことを考えれば、クロックスピードを向上するには、必ず高密度実装の物理的限界がある。一方、現状の多くの大型システムでは、プロセッサの演算速度に比べて、メモリアクセスが低い効率で行なわれているため、ここに飛躍的な性能向上を狙える余地がある。Tflops Tbyteの計算を目指している超並列計算機は、プロセッサを1000台以上並べ、個々のプロセッサが管理するメモリー領域を分割して独立処理することにより、逐次処理型のボトルネックを克服しようと設計されている。ここで問題となるのは、プロセッサ間通信である。今までのノイマン型計算機でのコーディングは、演算量を減らすことを目標としてきたわけだが、並列計算機では、通信量を減らすようなプログラミング技法が、その性能向上のために重要となる。

計算物理の分野で、並列処理が有効となる問題は数多い。計算流体力学における隣接格子点の差分計算、粒子間相互作用の距離計算、ピクセル単位での画像処理などだが、これらのアプリケーションは、すでに最適化ノウハウも蓄積されている。以下で述べる報告は、単なるベンチマークテストの結果ではなく、スパコン上で稼働するようなアプリケーションを、実際に並列計算機にのせる際に必要となる新たな着眼点について記したものである。

2. 超並列計算機

2.1 CM-2の仕様

Thinking Machine社のCM-2は多データ同一命令のSIMDアーキテクチャーを採用している。8192体の物理プロセッサを使って1600万点の仮想プロセッサまで利用でき、最大装備は65,536のプロセッサ(8Gbyteの主記憶)を7MHz/10MHzで動かせる。プロセッサ間通信は隣接するNEWS通信とハイパーキューブ通信をとり、最大31次元配列まで対応可能となっている。並列入出力用ディスク装置(25Mbyte/sec)は1スロットあたり40Gbyte(最大5Tbyte)が実装可能で、計算速度は6GIPS, 27Gflops(理論値), 17Gflops(LINPACK), 5.6Gflops(Poisson solver)の高いコストパフォーマンスを示している。また、X-WindowやFrame Bufferを用いた可視化環境が整備されている。この報告で使用したCM-2(8K, 7MHz)は1Gbyteのメモリーを持ち、20Gbyteのディスク装置(Datavault)に並列入出力ができる。実測された計算速度は8192プロセッサで0.2~0.3Gflopsであった。

2.2 CMFortran コンパイラー

Fortran90対応のコンパイラー CMFortranにより並列命令 Parisが使える。Fortran90 固有の文法部分は並列処理され、フロントエンドでスカラー処理したい部分は Fortran77 で書くことになる。論理条件のような選択処理は、マスキングのビットを備えたプロセッサにより、並列命令処理できる。一般に、リストベクトル(リンクリスト)の並列処理ができるかどうかは、グローバル通信の設計に依存するところが大きい。そのため、CMFortran Ver.1.0 ではマスキング(WHERE)のみ並列化可能で、リストベクトル(FORALL)は、フロントエンド処理あるいはライブラリー呼び出しによる高速化を行なう。

Fortran90の特長としてsubroutine単位での配列の動的メモリー割り当てができるようになった。そのかわり、subroutineの引き数による次元変更は許されない。したがって、スパコンのパイプライン処理のために、多次元配列を一次元化していたコードなどは書き換えを要す。

2.3 DECmpp12000 の仕様

DECmpp12000もSIMDアーキテクチャーを採用している。並列プロセッサの他に、アレイコントロールユニット(ACU)が4GByteの仮想命令空間を持ち、将来的にはスカラー演算をこのACUで担当し、フロントエンドから独立したコンピューティングサーバーになる。最大装備は16,384のプロセッサ(1GByteの主記憶)を25MHz/40MHzのフロントエンドクロックで動かせる。単一プロセッサ性能は、1.6 MIPS(32bit整数加算)で、各4bit並列プロセッサは40個の32bitレジスタを持つ。計算速度は最大構成で2.6 GIPS, 1.2 Gflops(理論値), 0.2 Gflops(LINPACK), 1.0 Gflops(FFT)のパフォーマンスを示す。今回使用した4096プロセッサモデルDECmpp12000(4K, 25MHz)の実測性能は0.1~0.2 Gflopsであった。

隣接するプロセッサ間通信はX-Net(最大23Gbyte/sec)と呼ばれる二次元メッシュ構造+トロイダル回り込みをとる。任意のプロセッサ間のRouter通信(最大1.3Gbyte/sec)には三段クロスバースイッチを用いる。通信に依存したアドレス制限はなく、実装メモリーに依存して配列サイズの最大長が決まる。開発環境としてOpen-Window上でのデバッガー、対話的プロファイラーDPPEが提供され、ビットマップイメージでのデータ可視化もできる。また、並列入出力用ディスク装置(14Mbyte/sec, 最大11Gbyte)も持つ。

2.4 DECmpp Fortran コンパイラー

DECmpp FortranはFortran77にFortran90のサブセットを拡張したものであって、基本的にはCMFortranと互換である。Fortran90部分を並列命令に翻訳する点も、共通している。ただし、組み込み関数の引き数の順番が異なったり、COMMON割り当てのデフォルトがフロントエンドだったりする違いは少々注意を要す。また、並列入出力機能はFortranではなく、Cの拡張言語DPL(DECmpp Programming Language)のライブラリーとして提供されている。

大きな特長として、サイズ限界などの実行時エラーをコンパイル時に検出してくれる。ところが、三次元の大型計算では、コンパイル作業領域が実行領域と同程度になる場合があり、フルサイズのメモリーを使うコードでは、コンパイル時間が1時間近くかかる例もあった。コンパイラーがフロントエンドで、最適通信網を試行実験しているのではないかと推測される。しかし、これは実行時のオーバーヘッドを、コンパイル時に処理しているとも解釈でき、その結果、後で述べるように、DECmppの実行モジュールはスカラーのオーバーヘッドが無く、立ち上がりが速い。

3. 並列化と最適化

ここでの考察は、問題プログラム内の負荷の大きい部分を探し、そこにある演算の並列性、独立多重性を見つけたすのは、当然のこととして、その次に何を考えるかである。

3.1 プロセッサの把握

Fortran90 は、ひとつのループだけでなくグローバルなデバッグが必要である。まず第一に、実行プログラムが、どのプロセッサに、どのような通信手段をもってロードされたかを把握することが、不可欠である。配列の値が、どのメモリー上にあるのかを理解していないと、並列コードのデバッグは一步も進まない。最初は、いままでの常識と逆に、メモリーの節約は考慮しないほうがよい。特に、Fortran90 のメモリー割り当てと開放は subroutine の段階で動的にできるため、どの配列とどの配列がどのような通信つまり、並列演算を行ったかに依存して占有されてしまう。したがって、物理モデルをプロセッサ配置やメモリー割り当てに反映させること。二次元格子系のモデルなら、二次元の通信網の上に、プロセッサが配置されるような宣言をすべきである。いいかえれば、データ駆動型オブジェクト指向の型宣言をすればよいことになる。

スカラー計算部をフロントエンドのマシンが担っている場合には、ターンアラウンド時間にフロントエンドのスケジューリングが影響してくるが、単なる並列度の向上よりは、フロントエンドと並列プロセッサで比較し、それぞれの得意不得意を振り分けると効率があがる。最終的には、Fortran90 を使うという発想ではなく、それが発行する並列命令を意識してコーディングすること、フロントエンドと並列プロセッサの関係、プロセッサ間通信の構造を理解してコード開発する必要がでてくる。ニューラルネットワークの理論と同じく、非定常ネットワークの構築には「教師」がいたほうが良いのである。

Table 1 は、Fortran90 の標準関数の実行速度とローディングのオーバーヘッドを調べるため、二種類の命令を繰り返した例である。並列命令以外の数学関数をロードしたりするのに、CM-2 では、スカラーの負荷が大きいのにに対して、DECmpp では立ち上がりの負荷はない。巡航速度に達した時点で、CM-2 : 247 MFlops , DECmpp: 123 MFlops であった。

Table 1. Scalar overhead with real array(4096,4096)

	CM-2 (8K 7MHz)			DECmpp (4K 25MHz)		
	Elapse (sec)	CM-busy (sec)	P-rate	Elapse (sec)	PE-busy	P-rate
log	3.579	0.815	0.282	2.011	.....	.....
maxval	0.297	0.297	0.999	0.082	.....	.....
square	0.213	0.069	0.462	0.134	.....	.....
log	0.813	0.813	0.999	2.015	.....	.....
maxval	0.297	0.297	0.999	0.082	.....	.....
square	0.068	0.068	0.998	0.133	.....	.....

Table 2 は、平滑粒子法 (SPH) で、近接粒子からの寄与を足しあげて、圧力勾配を計算する部分の時間測定である。ステップを繰り返し、巡航速度に達した時点での値である。 $N=1024$ 体程度では、個々のプロセッサの性能からして、DECmpp のほうが上回っているが、多重度がふえるにつれて、両者のトータルでの性能比が現われてくる。

Table 2. N -body SPH pressure gradient

N	CM-2 (8K 7MHz)	DECmpp (4K 25MHz)
	Elapse (sec)	Elapse (sec)
1024	2.3	1.5
8192	19	25
16384	55	102
32768	201	385

3.2 通信方法の選択

並列計算では、二種類のメモリー領域を用いること、二種類のコンピューターを同時に使用していることを意識すべきである。つまり、大切なことは、フロントエンドと並列プロセッサの通信の関係を意識することである。その点を曖昧にしておくと、「観測すると値が変化する」といった現象に悩まされたりすることになる。Fortran90 では、配列 A(2,3,4) は、単に 24 個の変数領域を確保する Fortran77 の配列 A(24) と同じではないのである。三次元配列は、三次元構造を持つ。それはまた、並列プロセッサの三次元配置にも、二次元配置にも割り当てられるのである。各次元方向の通信が並列通信なのか、それともシリアル通信なのかは、並列プロセッサの割り当て型で異なってくる。例えば、第一、第三次元を並列通信宣言あるいは並列命令でアクセスすれば、 2×4 配置の並列プロセッサが、動作実行することになる。したがって、不用意に二次元配置にロードされた配列の値を、走査線のようにスキャンして読もうとすると、通信網つまりコネクションが破壊されて、値が変化してしまったりすることもある。一方、DECmpp のように通信網が確定しているマシンでは、若干の性能劣化は起こすが、並列メモリー上の変数を、スカラー処理することが可能である。

N 個の粒子の相互作用を計算する際に、計算量が $O(N^2)$ になる困難があるが、これを並列計算機では、どのようにコーディングすべきだろうか。ひとつは、 N^2 サイズの配列をとり、転置行列操作を用いて、すべての二体間の距離を行列要素上に記憶する方法、もうひとつは、 N 体の座標データをフロントエンドと並列プロセッサの両方にコピーしておき、ブロードキャスト通信と並列総和命令を使うやり方である。どちらも $O(N^2)$ の計算を $O(N)$ で行なえることになる。前者“CM-CM”は、完全に並列プロセッサだけを、後者“FE-CM”は、フロントエンドも同時使用している。一見すると、前者は、数学的に美しく、並列度も非常に高いから、高い性能を上げられると思われるが、実際の結果は、並列度の低い後者のほうが三倍も速く答えを出している (Table 3)。これは、転置命令がそれほど単純ではないことと、“CM-CM”が $O(N^2)$ の仮想プロセッサを用いているのに対して、“FE-CM”は、 $O(N)$ の物理プロセッサですんでいることが考えられる。実のところ、前者は、CM-2 で 4096 体の計算しかできないことになり、実用的ではない。

Table 3. Modeling of Connection with $N = 4096$

	Elapse(sec)	CM-busy	FE-busy	ratio
CM-CM	18.13	13.99	2.67	0.83
FE-CM	5.96	3.00	3.63	0.50
CM-CM	13.98	13.98	0.21	0.99
FE-CM	6.58	3.60	3.52	0.54
CM-CM	14.10	13.98	0.19	0.99
FE-CM	4.13	2.91	3.47	0.70

3.3 スケーラビリティについて

SIMD (Single Instruction Multiple Data) では、データ要素ひとつあたり、一台のプロセッサがあると想定してコーディングすればよい。これは、ソフトウェアの高い拡張性を維持するために大切である。並列計算機の本質はプロセッサ間通信である。したがって、計算点数の変化に対する性能も、単に、仮想プロセッサを割り当てるのに十分なメモリーがあるかどうかではなく、効率的な通信方法が利用できるかどうか強く依存している。

Table 4 に緩和法で二次元 Laplace 方程式を解く過程の計算時間が示されている。CM-2 ではハイパーキューブのネットワークを組むため、二のべき乗を境に、計算効率が激変する。高次元通信への拡張性に富むハイパーキューブだが、実行上、適した計算点数は非常に限られたものになってしまう。DECmpp では、二次元 X-Net の仮想プロセッサ割り当て数に応じて、少々無駄がでるかといった程度の変化である。また、比較的少数の計算点に対しては、ネットワーク準備の負荷が少ない DECmpp が有利である。

Table 4. Laplace equation (2D, 100 iterations)

Size	CM-2 (8K 7MHz)		DECmpp (4K 25MHz)
	Elapse (sec)	CM-busy (sec)	Elapse (sec)
64×64	2.2	0.2	0.1
65×65	3.0	1.0	0.6
512×512	5.3	2.8	6.4
1023×1023	22	20	29
1024×1024	12	11	24
1025×1025	263	260	35
2048×1024	20	19	48
4096×4096	139	137	—

4. 今後の展望

4.1 並列計算機の利用目的

並列計算機は、機種選定も含め、目的を明確にしてから利用すべきである。本報告で使用した並列計算機は、ともに同じSIMDマシンであった。しかし、設計思想の違いはあきらかで、ベンチマークの結果としては、個々のプロセッサの能力と通信方法の特徴が顕著に現われた。通信がかなり最適化されてしまっているDECmppは完成したアプリケーションを走らせる業務用マシンとして適している。それに対してCM-2は、プロセッサの性能からみて多重度の低い問題には全く不向きだが、通信手段の自由度が大きい点で、並列アルゴリズムを研究開発する基礎科学分野での利用に適している。CM-2で効率的なプログラムができたなら、それを専用ハード化してしまうのも、良い利用法といえよう。

SIMDでの並列コード最適化の経験からいって、MIMDの利用は、人工知能など、従来の計算物理で未開拓のアルゴリズム研究と同時進行するものだろう。計算流体のように、はっきりと物理モデルの確立した分野では、SIMDあるいはSIMD的な使い方で十分と考える。

4.2 専用計算機と汎用計算機

Fortran90は、エンタリーレベルのユーザーには、非常になじみやすく、書きやすいものである。しかし、自動並列化と最適化はつねに相反する存在である。我々の並列計算の目的は、あくまで演算能力の向上であって、スパコンにとってかわるマシンを期待している。そこでは、Fortran77までの財産を捨てる勇気と、今までの最適化ノウハウではなく、物理モデルの本質を理解しているかどうかが問われてくる。

計算物理学は新しい時代に入った。三次元問題を一次元化してベクター型スパコンにのせる必要はなくなった。基礎方程式を解くのではなく、対象とするモデルの世界をそのまま電子回路上に写像すればよい。物理的な論理世界を再構築するのである。近接相互作用には、近接の通信網をめぐるせば、それが結局、並列計算の最適化への近道となるのである。汎用性の維持は、コストを高くしてしまうが、CM-2は数値モデルと計算機ハードの対応をつけやすく、専用ハード開発がソフトでできることになる。はじめから専用ハードを設計するのに比べてアルゴリズムの改良が容易だといえる。

4.3 ダウンサイジングと分散処理

今後の大型数値計算のスタイルは、まちがいに変わっていくだろう。プロセッサの得意不得意を振り分けることが、並列計算機最適化の要領であったように、そのマクロ版であるところの分散処理環境でも、種々のサーバーを組み合わせさせてシステムを組むようになる。ユーザーはUNIX OSをプラットフォームとするワークステーションに向かって、Open-Windowなどを用いた可視化環境を利用しながら作業をする。そのとき、並列計算機はコンピューティングサーバーであって、大型ホストコンピューターはいらなくなる。CM-2もDECmppも、その中のコンピューティングサーバーとして、立派に機能する。

また、並列計算機利用はTSSではなくNQSのようなネットワークパッチシステムによる複数ユーザー環境が理想である。超並列計算機が、大型ホストコンピューターを目指しては、ダウンサイジングの流れに逆行する。超並列とは、高能率の処理をしようとする多くのプロセッサを並べたマシンを意味するのであって、多くのユーザーが並んで使うことではないのだから。

1. はじめに

モンテカルロ直接シミュレーション法 (MCDS法)⁽¹⁾ は、1963年にオーストラリアの Bird が均質気体に適用して以来、ボルツマン方程式に対する位置づけ、あるいは、分子間衝突に関する各種アルゴリズム等の議論を経て、希薄気体数値解析法として十分な信頼性を得るに至った。そのMCDS法のさらなる発展に課せられた問題としては、ベクトル計算あるいは並列計算によるシミュレーションの高速化であろう。ベクトル計算機による高速化については、著者がその方法についてすでに報告を行い可能性を示している⁽²⁾。一方、専用の並列計算機についてもNASA等ではすでに作られているが、ここでは、比較的安価で容易に並列計算が実行できるトランスピュータによる方法について述べる。

2. モンテカルロ直接シミュレーション法 (MCDS法) の概要^{(1) (3) (4)}

モンテカルロ直接法は、1万~100万個 (場合によっては500万個以上) の分子の位置座標と速度成分を計算機内に記憶し、時間の経過とともに、それらの値を合理的に変更していくことによって、気体の流れを計算機上で再現するものである。この手法は、本質的に非定常流だけを取り扱うものであるが、非定常流が最終的にある状態へ収束した場合に定常流が形成されるので、どちらの流れもほぼ同様なアルゴリズムで計算することができる。以下に、モンテカルロ直接シミュレーション法の概要を述べる。

(I) 分子は、まず、乱数により初期座標と初期速度成分とを与えられて、対象となる物理空間に配置される。その物理空間は、セルと呼ばれる微小体積要素に分割されている。このセル一辺の大きさは、平均自由行程よりも小さくとらなければならない。

(II) 分子の物理空間内での移動計算 (固定境界壁との衝突あるいは領域境界での流入流出計算を含む) と、分子間衝突の計算は、それぞれ、微少時間ステップ Δt ごとに分離され、独立して計算される。すなわち、次の3段階の過程で計算が行われる。なお、 Δt は、平均衝突時間よりも小さくなるように決められる。

① 各々の分子は、その速度に応じて Δt 時間だけ、他の分子と無関係に移動する。その際、固定境界壁における反射あるいは領域境界からの流出が生じれば、それに応じた運動量およびエネルギーのやりとりが計算される。また、領域境界からは、境界条件に従って新しい分子が流入させられる。

②分子の移動によって、各々の分子の位置座標が変化するので、各セルに属する分子が調査され、分子間衝突の計算を容易にするために、参照用配列 (Cross-Referencing Array) 上で分子の並べ替えが行われる。

③分子間の衝突は、衝突の法則に基づき、セル単位で計算が行われる。衝突ペアの選択、および、衝突パラメータ (衝突後の速度成分) の決定に乱数が用いられるが、セル内の分子位置に関する考慮は行われない。

(Ⅲ) 上記(Ⅱ)の過程が繰り返され、非定常問題にあっては、アンサンブル平均が、定常問題にあっては、定常状態達成後の時間平均が計算される。

3. トランスピュータによるMCD S法の並列計算

MCD S法において、分子移動の計算は、個々の分子が独立に物理空間を移動するので並列計算可能であり、また分子間衝突の計算も、セルごとに独立であるので並列化できる。しかし、流れ場空間を複数の領域に分割し、各々を1台のトランスピュータに割り当てて並列化を図る場合、領域を越えて飛行する分子が問題となる。そこで、領域間を移動する分子については高速データ転送によりトランスピュータ間でその分子情報を交換しながら計算を続けていくことにする。今回用いたINMOS社製のT800トランスピュータは、20Mbit/sの通信速度で他の4台のT800とデータ交換できる。以下では、二次元ダクト (二次元スリット) を通過する希薄気体流について、4台までのトランスピュータを用いて並列計算を行った例を紹介する。1台あたりの記憶容量は、5MB ないしは 4MBである。なお、この問題は、すでにベクトル計算機を用いて結果を得ているものであり⁽²⁾、今回の並列処理における計算条件はそれに準じて決定している。

トランスピュータ間で通信される情報には、(a)初期入力データ、(b)エラー情報、(c)領域境界を通過する分子の情報、(d)中間転送を要する巨視的量に関する情報 (境界壁が時間とともに温度変化するような場合、境界壁に流入出するエネルギー情報の転送が必要)、(e)プログラム制御情報、(f)結果 (流れ場空間の物理量等) を集計するための情報などが考えられる。いま、一つのルートトランスピュータの下に、サブトランスピュータを順に結合して並列システムを構成した場合、(a)の情報はルートトランスピュータからサブトランスピュータへ最初に1回だけ転送され、(f)の情報はサンプル時間ごとに1回サブトランスピュータからルートトランスピュータに転送されるだけである。最も頻繁に転送される情報は(c)であり、 Δt 時間ごとに分子移動の計算終了直後に転送される。(b)と(d)の情報は主たる繰り返しループの範囲外に置くことができ、(c)に比べると転送頻度も転送量も十分小さい。(e)のプログラム制御情報には、各トランスピュータの計算負荷を一定にするための情報も含まれるが、(c)の情報転送時に同時に通信可能である。したがって、以下では、(c)の境界通過分子の情報転送を主に考えていく。

図1に示した流れ場は、二次元ダクトを通過する希薄気体が、ダクト内面の表面あらしにより、どの程度の流量減少を生ずるかを計算するものである。並列化に際し、まず2台による計

算を試みた。図1におけるA領域をルートトランスピュータに割り当て、B領域とC領域を1台のサブトランスピュータに割り当てた。ダクト幅の2倍を代表長さを選んだとき、クヌッセン数（平均自由行程を代表長さで除したもの） $Kn=1/70$ においては、 Δt 時間あたり約60個の分子がA領域とB領域の間の境界を交差する（総分子数は約85000）。したがって、それら分子の情報（位置座標、速度成分）を Δt 時間ごとにトランスピュータ間でデータ交換しなくてはならない。このような条件下で、2台のトランスピュータで並列計算した場合と、1台で通常計算した場合との速度比較をしたところ、図2（○）のような加速率を得た。図2において、初期加速率1.75の値が時間とともに改善されていくのは以下の理由による。最初はサブトランスピュータの受け持つ分子の数が一割程度多く、また、BとC領域における分子移動の計算がA領域に比べて多少複雑なために、サブトランスピュータの計算負荷が大きく、データ交換直前にルートトランスピュータが時間待ちさせられる。しかし、計算の進行とともにBとC領域内の分子数が減少し、計算負荷がしだいに近づいて加速率は改善されるものである。今回のような流れ場の場合、トランスピュータ2台に割り当てる領域の境界を計算の進行とともに自動調整して、2台をたえず最適の計算負荷で動作させることは可能である（図3参照）。トランスピュータには、約 $64\mu s$ の分解能をもつ時計が組み込まれているので、これを用いて各トランスピュータの待ち時間を計測し、この待ち時間を少なくする方向に領域境界を変化させる。ただし、境界調整を

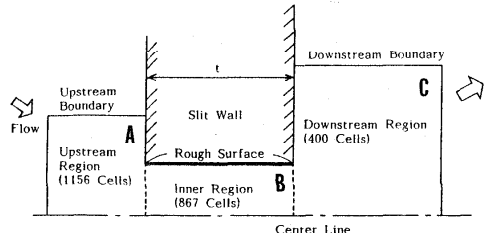


Fig. 1 Simulated domain for two dimensional duct-flow with three regions.

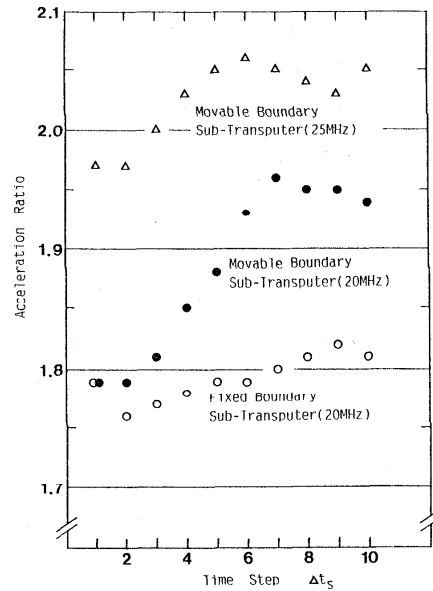


Fig. 2 Speed ratio of calculation with two transputers to that with only one transputer.

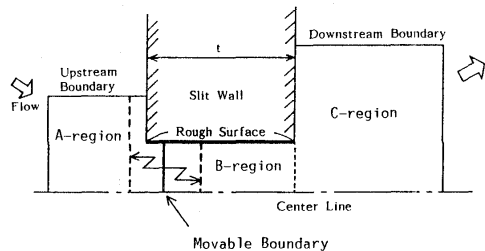


Fig. 3 Simulated domain for two dimensional duct-flow with a movable boundary to obtain even computational loads of two transputers.

行った場合には、境界付近のセルが一方のトランスピュータから他の一方に移ることが生じる。そのときには、セル情報の転送作業もプログラムで行う必要がある。図2 (●) は、計算負荷の自動調整を行った結果であるが、計算の進行とともに、急速に加速率が改善され、最終的に1.95の値に達して、そのまま一定の加速率を維持する。また、境界の自動調整は、計算速度の異なるトランスピュータ同士の並列処理においても有効で、各トランスピュータの待ち時間をゼロにするよう処理能力に応じて計算負荷が割り当てられるので、むだのない並列動作が実現できる。図2 (△) は、20MHzのT800と25MHzのT800を並列で動作させたものであるが、1台のトランスピュータ(20MHz)に比べて約2.05の加速率を達成している。

次に、3台あるいは4台のトランスピュータによって、計算空間を一方に領域分割(ダクト中心軸方向に、中心軸に垂直な境界を用いて3分割あるいは4分割)したとき、領域境界の自動調整によって加速率がどのように改善されていくか調査した。図4は、3台並列の場合のデータ転送位置を示す流れ図である。図4から、各トランスピュータが分子移動の計算を終了した直後にデータ交換のために時間待ちすることが分かる。

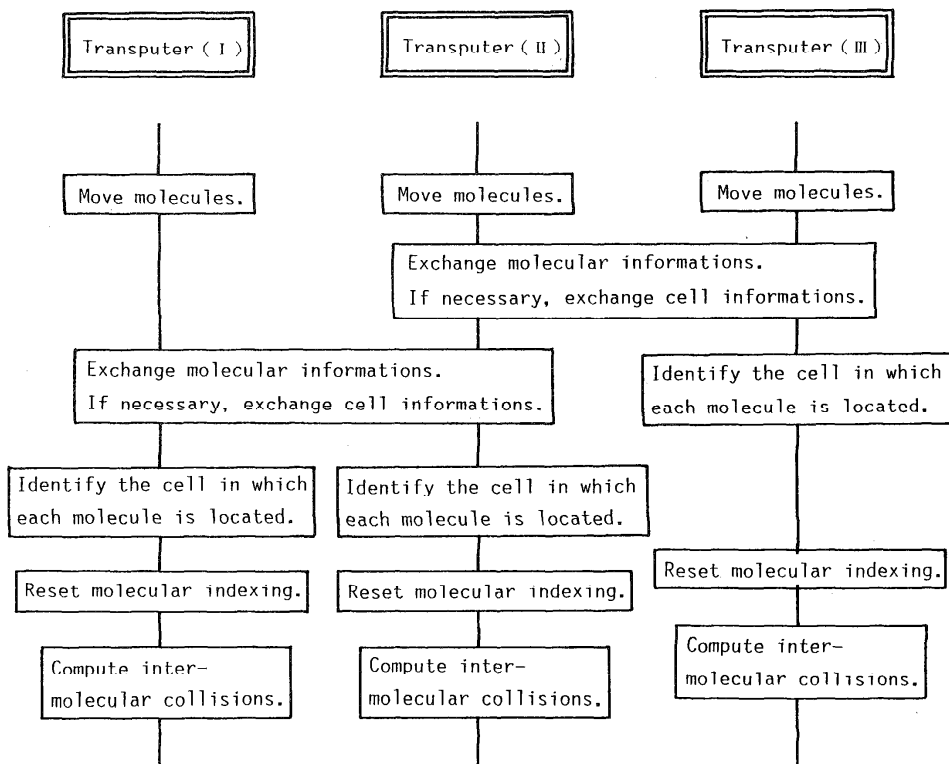


Fig. 4 Flow chart of the MCDS method with three transputers controlled automatically to have even computational loads.

以下ではさらに、領域Ⅰと領域Ⅱを受け持つトランスピュータ間でどのような順序でデータ交換がなされるかを両者を対比して示す。なお、このデータ交換が行われる時点では、すでに、領域Ⅱと領域Ⅲの間でのデータ交換は終了しているものとする。

◎領域Ⅰを担当するトランスピュータⅠから見た 分子移動計算終了直後のデータ交換動作 (トランスピュータⅡとのデータ交換)	◎領域Ⅱを担当するトランスピュータⅡから見た 分子移動計算終了直後のデータ交換動作 (トランスピュータⅠとのデータ交換)
<ul style="list-style-type: none"> ①待ち時間タイマーをスタートさせる ②データが転送されて来るまで待ち続ける 領域Ⅱに存在する分子数データを受取 ③待ち時間タイマーをストップさせる ④領域Ⅲに存在する分子数データを受取 ⑤トランスピュータⅡの待ち時間データを受取 トランスピュータⅢの待ち時間データを受取 ⑥トランスピュータⅠの待ち時間データを転送 ⑦領域ⅠからⅡへの流出分子数データを転送 ⑧流出分子に関する情報(位置座標、速度成分等)を全て転送 ⑨領域ⅡからⅠへの流入分子数データを受取 ⑩流入分子に関する情報を全て受取 ⑪領域ⅡからⅢへの移動分子数データを受取 領域ⅢからⅡへの移動分子数データを受取 ⑫もし領域ⅠとⅡの境界が領域Ⅱの方へ移動する場合(領域Ⅰ拡大、領域Ⅱ縮小)には、該当するセルに関する情報(セル内最大相対速度等)を受取。逆に、境界が領域Ⅰの方へ移動する場合には、該当するセルの情報を転送。 	<ul style="list-style-type: none"> ①待ち時間タイマーをスタートさせる ②領域Ⅱに存在する分子数データを転送 転送データが受け取られるまで待ち続ける ③待ち時間タイマーをストップさせる ④領域Ⅲに存在する分子数データを転送 ⑤トランスピュータⅡの待ち時間データを転送 トランスピュータⅢの待ち時間データを転送 ⑥トランスピュータⅠの待ち時間データを受取 ⑦領域ⅠからⅡへの流入分子数データを受取 ⑧流入分子に関する情報(位置座標、速度成分等)を全て受取 ⑨領域ⅡからⅠへの流出分子数データを転送 ⑩流出分子に関する情報を全て転送 ⑪領域ⅡからⅢへの流出分子数データを転送 領域ⅢからⅡへの流入分子数データを転送 ⑫もし領域ⅠとⅡの境界が領域Ⅱの方へ移動する場合(領域Ⅰ拡大、領域Ⅱ縮小)には該当するセルに関する情報(セル内最大相対速度等)を転送。逆に、境界が領域Ⅰの方へ移動する場合には、該当するセルの情報を受取。

(注意：上記の領域境界変更に関する判断は、プログラムの別の部分で、トランスピュータの待ち時間の平均値を比較して決定されるもので、直前に得られた待ち時間データだけで判断されるものではない。)

図5は、2～4台までの並列計算による高速化の結果を示している。シミュレーションの初期段階で計算負荷の最適化が行われて、3台の場合は加速率約2.85、4台並列の場合には加速率約3.70が達成されている。なお、その後加速率はほぼ一定に維持され続ける。

今回の、たとえば2台並列計算における Δt 時間あたりの境界通過分子数は約60で、総分子数約85,000に比べて非常にわずかなものであるため、データ転送のための時間はほとんど無視できた。しかし、境界を横切る分子数が多くなった場合には、それが負担となって並列計算の効果が現れない場合も考えられる。そこで、このプログラムのデータ転送部分だけを繰り返し計算させて、データ転送に要する時間を調べてみた。データシートでのリンクスピードは20Mbit/sとなっているが、実際にFortran上で行ってみると、単精度実数配列の要素の転送は毎秒約12万個程度であることがわかった。例えば、二次元流れの場合、分子一個あたり5個のデータを転送するとして、2万4千個の分子の情報転送に約1秒必要となる。境界通過の分子数を把握し、これをできる限り小さくするための領域分割を行うことも並列演算による高速化には重要となろう。

4. おわりに

トランスピュータを4台まで用いてMCD S法の並列計算を行い、計算速度に関しては十分な結果を得た。何十あるいは何百台と結合した場合の並列化では、領域割当あるいは結合方法さらには計算負荷の均等化等、今回とは比べものにならない問題が生じてくるであろうから、その可能性について一概には結論できないが、MCD S法の高速化に有望な方法であることは間違いない。

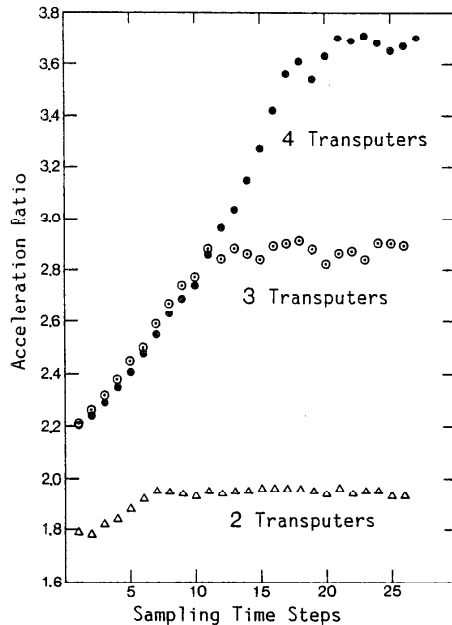


Fig. 5 Speed ratio of calculations with multi-transputer to that with only one transputer. (Automatic control of loads of transputers by movable boundaries.)

参考文献

- (1) Bird, G. A., Molecular Gas Dynamics (1976), Oxford University Press.
- (2) M. Usami, et al., Monte Carlo Simulation on Mass Flow Reduction due to Roughness of a Slit Surface, AIAA Progress in Astronautics and Aeronautics, Vol. 116 (1989), 495.
- (3) Bird, G. A., Monte Carlo Simulation in an Engineering Context, AIAA Progress in Astronautics and Aeronautics, Vol. 74, Part I (1981), 239.
- (4) Bird, G. A., Perception of Numerical Methods in Rarefied Gasdynamics, AIAA Progress in Astronautics and Aeronautics, Vol. 118 (1989), 211.

1. モンテカルロ法による放射伝熱解析の特徴と並列演算への適合性

1. 1 はじめに

放射伝熱解析においてモンテカルロ法は、実用的な問題を解く際に取り扱わねばならない各種の条件を、近似をほとんど用いずに機械的に数値解析することが可能であり、また流れ解析との結合も容易である。またその精度は、各種解法の妥当性を確認するためのベンチマーク⁽¹⁾として用いられることに示されるように、使用するエネルギー粒子数を増加させることにより、理論的にはいくらでも上げられる（実用的には、与えられた条件に対して数%程度の精度で解が得られる）。唯一の問題点はその計算時間の長さにある。この方法では、問題とする対象領域を分割した多数のガス要素および壁要素の間での放射による熱交換を、図1に示すように、

これら各要素からその周囲に射出された多数のエネルギー粒子の要素間での交換に置き換えることにより模擬しており、このために各要素から射出される個々のエネルギー粒子の軌跡を決定する必要があるが、実用的な精度を得るためには多数のエネルギー粒子を用いる必要があり、計算時間

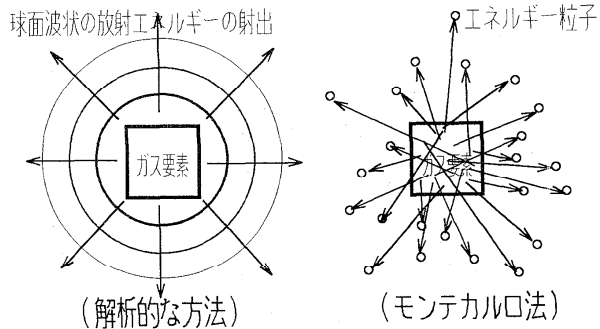


図1 モンテカルロ法による放射エネルギーのガス要素からの射出の模擬

時間が長くなっている。そこで本報では、モンテカルロ法による放射伝熱解析の特徴と、それを利用した計算時間の短縮法について述べることにする。

1. 2 解析手順と特徴

以下、このモンテカルロ法による放射伝熱解析の中核をなす、各エネルギー粒子の軌跡の決定方法⁽²⁾の概略を述べ、その特徴を生かした計算時間の短縮法について考えてみたい。各エネルギー粒子の軌跡を決定するためには、それぞれの粒子について、

- (1) 射出位置
- (2) 射出方向
- (3) 飛行距離

を定める必要がある。ここで1個のエネルギー粒子は、物理的には、同じ位置から同じ方向に

射出される非常に大きい一定個数の光子群を代表しているため、他のエネルギー粒子との間に衝突や引力、斥力等の相互作用はなく、他のエネルギー粒子の軌跡に関係なく独立にその軌跡を決定し得る。従って、各粒子の軌跡を定めるのに必要な上記の3種類の変数の値は、それぞれの現象が従うべき確率分布関数を与えることにより決定することができる。すなわち、この確率分布に従って発生される乱数列（値の出現頻度がこの確率分布に従うような乱数列）によって、各エネルギー粒子に対するこれらの変数の値を決定すれば、多数のエネルギー粒子の全体としての挙動は、使用した確率分布に従うことになる。たとえば、等温の気体塊中では放射エネルギーはその中のどの位置からも等確率で射出されるので、上記のエネルギー粒子の射出位置としては、3個の一樣乱数（3次元の場合）を用いて、この気体塊中にランダムに選定した位置を用いれば良い。2番目の射出方向についても、気体からの射出は全周方向に等確率で射出されるので、これに従う乱数列によって各粒子の射出方向を定めることができる。また、ガス中を透過する放射エネルギーの強度は指数関数的に減少するので、エネルギー粒子の飛行距離は、確率的には短いものが多く、長いものが非常に少ないような、指数関数で表される確率分布に従う。したがって各粒子の飛行距離は、このような確率分布に従って発生される乱数列によって順に決定することができる。このように各物理現象が従っている確率分布を与え、この確率分布に従って発生される乱数列を用いて個別の事象を決定するのがモンテカルロ法の特徴であり、またその名称の由来でもある。蛇足ながら、モンテカルロとは、フランスとイタリアの国境近くの地中海に面するモナコ公国の有名なカジノの町で、ここでおこなわれているギャンブルは（どこのギャンブルでもおなじことですが）、全体的には（いかさまがない限り）一定の統計に従い、個々のお客の損得は確率的に決定されることから、このような解析法の名称として使用されている。

1. 3 解析目的とモデル化の度合いの関係

モンテカルロ法では、このように全体の物理現象を多数の単位事象に分割し、個々の単位事象を個別に計算し、それを集計することで全体の物理現象を解析している。個々の単位事象の解析は、これらが従う物理現象のうち、解析可能な部分は決定論的な方法で行い、取り扱いにくい部分を確率現象とみなしてその確率分布関数を与え、これに従って発生される乱数列を用いてその部分の現象の模擬を行っている。たとえば、個々の光子が乱反射壁に当たったときの反射方向は、壁面を構成する固体分子との相互作用を、壁表面の凹凸や分子の運動を入れて考慮することで、決定論的に求めることが可能であるが、これはやっかいであるので、モンテカルロ法による放射伝熱解析では、マクロ的な乱反射の法則（余弦法則）を与え、これに従う確率分布関数を与えることで、確率的にその反射方向を決定している。すなわちモンテカルロ法では、この確率分布関数を与えるという操作を通じて、この部分の現象のモデル化を行っていることになる。

この際、どの段階の現象までを決定論的に取り扱い、どの現象を確率的に取り扱うかは、一義的には決定されず、目的によって異なる。分子運動のレベルまで決定論的に取り扱い、確率的な取扱いを0にしたのが最近伝熱の分野でも話題となっている分子動力学の方法である。モンテカルロ法による放射伝熱の解析においては、放射エネルギーを伝達する光子と、気体分子、気体中に浮遊する固体粒子、およびこれらを取り囲む固体壁等との相互作用（吸収、散乱、反射）を、これらの物質の各種光学物性値を含む吸収、散乱、反射のマクロ的な物理法則を与えることによりモデル化し、これらに従う確率分布関数を用いて解析を行っている。ただしこれらのモデル化に関しても、どこまで現象を細かく模擬するか程度によっていくつかの段階があり、たとえば気体中に浮遊する粒子群中での放射エネルギーの透過・減衰についていえば、この粒子群を均質媒体とみなして、その平均的な減衰特性を与えるか、個々の粒子の位置を定め、それらの表面での吸収、散乱を具体的に計算する⁽³⁾（各固体粒子の表面での反射に対しては、乱反射の仮定をしたりして確率的な取扱いをする）ことによって全体の減衰特性を求めるといった違いがある。また前述の固体表面での乱反射に関しても、乱反射の物理法則を与える場合と、実際の固体壁表面の凹凸の統計的性状を模擬して表面の凹凸形状を確率的方法で与え⁽⁴⁾、これを用いて決定論的に反射特性を求める場合がある。これらのように、モンテカルロ法のモデル化は、モデル化を比較的高いレベルで行って、どちらかという実用的・マクロ的な解析を行う前者のような場合と、できるだけモデル化を少なくして物理現象を忠実に解析し、どちらかという現象をモデル化する際のデータを提供するための数値実験としての役割をになう後者のような場合とに分けられ、後者を直接モンテカルロシミュレーション（DMS：Direct Monte Carlo Simulation）と呼んでいる。一般的には後者のほうが計算時間を大幅に必要とする。

1. 4 解析で考慮可能なパラメータと計算時間の関係

前節に述べた実用的・マクロ的な放射伝熱解析においても、モンテカルロ法による解析で考慮するパラメータにより、その計算時間は大幅に異なる。現状で考慮可能なパラメータは以下のとおりである。

- (1)次元：1～3次元
- (2)座標系：直交、円筒、非構造格子
- (3)壁面境界条件：熱流束所与、壁温所与、熱貫流率と外部温度所与
- (4)気体中散乱：等方性、非等方性（任意の位相関数）
- (5)光学物性値（気体吸収係数、壁面の反射特性（鏡面、乱反射面）と放射率、気体中粒子群の吸収、散乱断面積）：一様、非一様
- (6)波長依存性：非依存（灰色）、依存（非灰色）

これらのパラメータの選択あるいは採用は、計算時間に直接かわりあっており、例えば次元

を1次元から3次元にすると、1.2節に述べた射出位置の決定に必要な乱数の数が1個から3個に増加するというように、より複雑な現象に対応したパラメータの選択、あるいは新たなパラメータの追加は、計算時間の増加に直接つながってくる。最近筆者等が行っている非灰色ガス中での放射伝熱解析においても、放射伝熱の波長依存性を考慮するために、800の波数領域に分割して解析を行っているため、これまでの灰色解析に比較すると、単純に考えれば800倍の計算時間を要することになる。

1.5 計算時間短縮の手法

上記のようなモンテカルロ法による放射伝熱解析の長い計算時間を短縮するためには、プログラムの改良によるソフト的な手段によるものと、各種の高速計算機を用いたハード的なものが考えられる。前者については、すでにREAD法⁽²⁾とよばれる方法を提案し、所要メモリの増大と引換に、計算時間を1けた程度減少させることを可能にした。ハード的には、スーパーコンピュータと並列計算機の使用が考えられる。

モンテカルロ法のプログラムは、通常IF文を多数含んでいるため、そのままスーパーコンピュータにかけてもあまり加速されないが、軌跡を追跡すべき多数のエネルギー粒子のうち、同じ条件にあるもの同志をまとめ、これらについて一括して計算するようにすれば、スーパーコンピュータによる加速が可能となる。一例では、約30倍の加速が可能であった⁽⁵⁾。

並列計算に関しては、1.2節に述べたように、各エネルギー粒子の軌跡の解析が相互に独立に行えるという特徴を有しているため、モンテカルロ法による放射伝熱解析は並列演算に非常に適した解析法であると言える。100万個のエネルギー粒子の軌跡を決定する計算を100個のセルを有する並列計算機で行うためには、基本的には、各セルに1万個づつの解析を割り振ってやり、各セルの解析が終了した時点で結果を1つのセルに集約すればよい。各粒子の挙動が互いに独立であるため、これらの各セルの計算の途中で他のセルとの間のデータのやりとりは発生しない。モンテカルロ法による放射伝熱解析の計算時間のほとんどはこの各エネルギー粒子の軌跡の決定の計算で費やされるため、各セルにおける1万個の粒子に関する計算時間がほぼそのまま全体の計算時間となり、したがって計算時間をほぼ1/100にできることになる。

並列化の方法としては、解析の領域を並列計算機のセルの数に分割し、各領域での一定時間の間の解析を各セルで行った後、隣接セルとのあいだでデータを交換し、また次のタイムステップの解析を各セルで行うという、領域分割法が他の分野で良く用いられるが、この手法はタイムステップごとにセル間の通信が入るため、並列化の効率(単一セル時の計算時間/(多セル解析時の計算時間*セル数))が低くなりやすい。これにたいし上記の方法は、全領域についての解析を各セルで行っているため、セルの解析が終了するまでセル間での通信の必要がなく、並列化効率は高いが、各セルに全領域を計算するためのプログラムとデータを入れておく

必要があるため、3次元・非灰色解析のように、解析に必要な全領域・全波数の物性値データが多量になって、各セルが占有しているメモリに入りきらなくなる場合には、手直しが必要となる。

2. モンテカルロ法による放射伝熱解析の超並列計算機による加速

非灰色ガスを間にはさんだ平行平板の高温壁側から低温壁側に伝達される放射熱流束とガス中の温度分布を求める1次元問題を例として、並列計算によるモンテカルロ解析の高速化の効果を示す。1.5節に述べた並列化の考え方を取り入れた解析フローを図2に示す。並列計算機の並列計算を受け持つn個のセルには、軌跡を追跡すべき

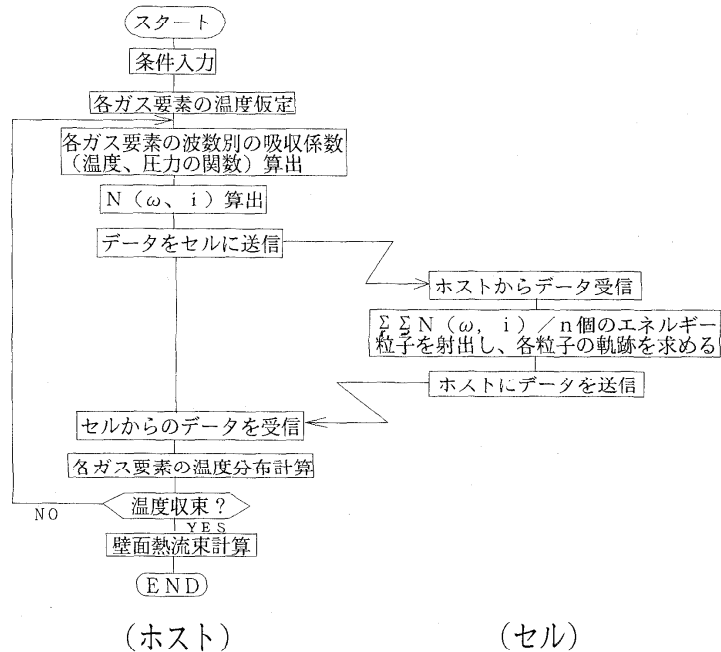


図2 並列計算フロー

$\sum_{\omega} \sum_i N(\omega, i)$ 個のエネルギー粒子をn等分して割当て、それぞれのセルで $\sum_{\omega} \sum_i N(\omega, i) / n$ 個のエネルギー粒子の軌跡を計算し、結果がでたらそれをホストセル(共通の計算を行うセル)にもどして、温度分布の計算等を行っている。ここで $N(\omega, i)$ は、各ガス・壁要素から単位波数幅あたりに射出されるエネルギー粒子の個数であり、その位置のその波数域での放射エネルギー流束に比例している(ω:波数、i:要素番号)。このフローの各部の計算時間を模式的に表すと図3のようになる。この図より、ホス

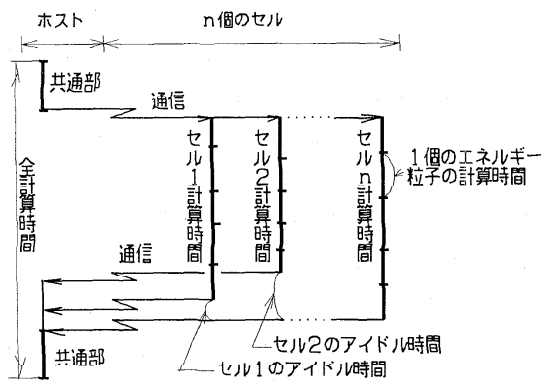


図3 並列計算時の計算時間模式図

トによる共通部分の計算時間と通信時間がセルの計算時間に比して十分短く、また各セルの計算時間のばらつきが小さい（アイドル時間が小）とき、全計算時間はセル数 n に反比例して短縮されることがわかる。またセル数の増加に伴って、セル部分の計算時間はこれにほぼ反比例して減少するのに対し、共通部分の計算および通信時間はほとんど変わらないので、セル数を非常に増加させると、全体の計算時間があまり減少しなくなってくるのが予想される。また、セル数 n を増加させると、各セルに割り当てられるエネルギー粒子数が減少してくるので、各セル毎の計算時間の相対的なばらつきが増加し、アイドル時間の割合が増加するため、全体の計算時間の減少の割合がやはり少なくなってくる。これらの効果を確認するため、図2のプログラムを並列計算機 AP1000 にかけての結果を図4に示す。AP1000 についての解説は本特集の別のところで述べられる予定であるので詳細は省略するが、最大1024個のRISCタイプのSPARCチップを結合した計算機で、各チップが16MBのメモリを所有している。図4より、512個のセルの使用によって、計算時間は1セルの場合の1/4.67（123秒）になり、1.5節に述べた並列化の効率は91%になっていることがわかる。100%との差のうち、3%が共通部分の計算の影響であり、残りの6%は各セルのアイドル時間の影響である。

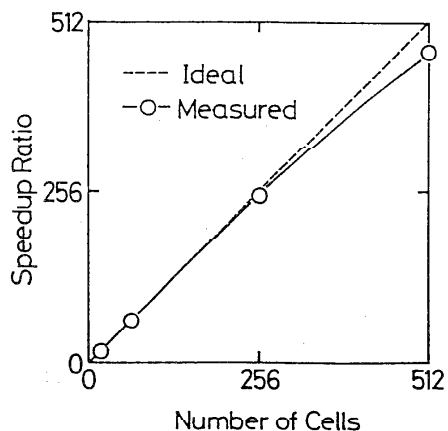


図4 セル数と計算速度の加速の関係

この結果より、エネルギー粒子の軌跡追跡部のプログラムとデータが各セルに格納できれば、並列化効率は非常に良好で、使用したワークステーションのチップ単体のスピードを4.67倍に増加させることが可能であることが示された。現在1セルに収容しきれない大型の問題の並列化に取りかかっているが、いっぺんに収容しきれない部分をホストに置いておき、必要なときに各セルに通信で送り込むことで、若干の通信時間の増加以外は同様の結果を得ている。

（参考文献）

- (1) R. Viskanta, Proc. 7th Int. Heat Transf. Conf., Vol.1(1982), pp.103-121.
- (2) 工藤, 伝熱研究, Vol.26, No.102(1987), pp.101-123.
- (3) 工藤、他3名, 機械学会論文集, Vol.57, No.537(1991-5), pp.1807-1873.
- (4) 藤田、牧野, 第29回伝熱シンポジウム講演論文集(1992), G232, pp.639-640.
- (5) 工藤、他5名, 第4回計算力学講演会講演論文集(1991), 234, pp.267-268.

グランドチャレンジスーパーコンピュータ

インテルは、1984年80286マイクロプロセッサをベースとした並列処理コンピュータ iPSC/1を発表し、1985年より出荷を開始しました。1987年には、これらの技術を継承した iPSC/2を発表し、ピーク性能では2.5GFlopsを達成しました。

1989年、米国DARPA(Defense Advanced Research Projects Agency)より、次期並列処理コンピュータ開発費として760万ドルの資金援助のもと、Touchstone Project がスタートしました。このTouchstone Projectこそ、米国政府が推進する"High Performance Computing and Communications(HPCC)"の一環としたプログラムのスタートだったのです。HPCCは、米国が1991年より5ヶ年計画で19億ドルの予算のもとに、"Grand Challenge"という目標を掲げて進めている一大国家プロジェクトで、高性能コンピュータの開発(Advanced High Performance Computer System)、ネットワーク、ソフトウェア、アルゴリズムの開発及び人材の育成を目的としています。

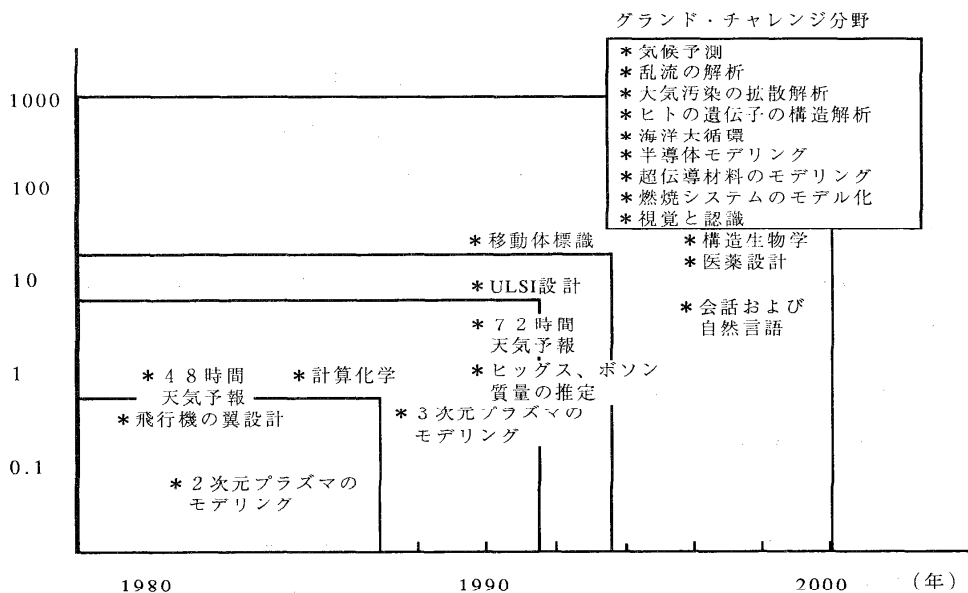
この"Grand Challenge"とは、今まで理論や実験では得ることが不可能だった情報を、数値演算により可能とするものです。そして、これに必要なAdvanced High Performance Computer Systemの開発は、従来の研究方法をも一新させるものなのです。

インテルは、Touchstone Projectにより、1989年 iPSC/860を発表、1990年にはインテル Delta Systemを、そして1991年11月には、米国アルバカーキのスーパーコンピュータ'91において世界最高スピード300G FlopsのParagon XP/Sを発表しました。更に今年2月21日には、Advanced Highperformance Computer Systemの開発に向け、新たにDARPAとの間で"Tera FLOPS Project"が発足しました。これにより、DARPAは5年間に2100万ドルの資金援助をインテルに行なうことを決定しています。

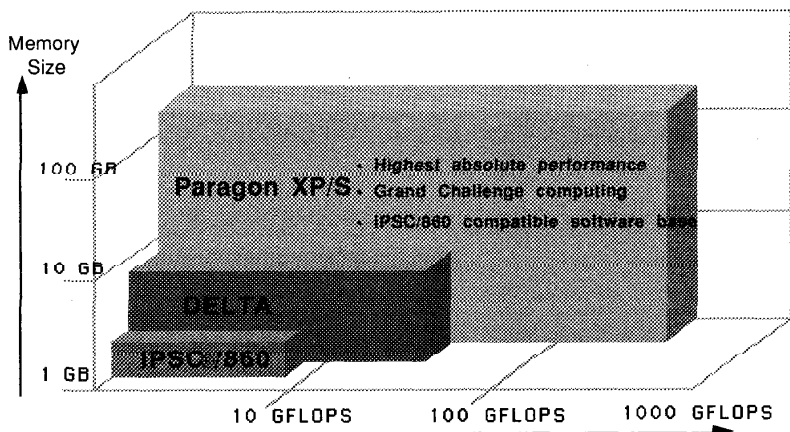
"Tera FLOPS Project"は、HPCCの"Grand Challenge"には欠くことのできないシステムであり、インテルが、これからのスーパーコンピュータのリーダーシップをとることを意味しているのです。

インテルジャパン株式会社

Grand Challenge に必要なコンピュータの演算速度 (GFlops)



Paragon XP/S の位置づけ A system for grand challenge computing



インテルジャパン株式会社

Paragon XP/S の概要

世界をリードするマイクロプロセッサ技術をベースにしたスーパーコンピュータ戦略もインテルの最重要事業の一つ。これまでのiPSC/860並列処理スーパーコンピュータの後継Paragonも登場し、近くテラFlopsコンピュータを目指します。

Paragonスーパーコンピュータのシステムには、250万個のトランジスタを集積したiPSC/860XPスーパーコンピューティング・マイクロプロセッサ(64ビット、RISC型)と、先進のプロセッサ間コミュニケーションアーキテクチャを採用し、5~300GFlopsのパフォーマンスを提供します。

更に、業界標準UNIX環境、整備されたI/O機能、市場に既に納入実績のあるiPSC/860ユーザ用コンパチブル・グロースバスも提供しております。

インテルが技術を駆使した、インターコネクト(接続)技術、共用仮想メモリ、高性能/多機能なソフトウェアツールセット等は、使いやすいスーパーコンピュータを構築するための、新たな標準になりつつあります。

Paragon XP/Sの特徴としては、以下の4つが上げられる。

1. 柔軟
2. スケーラブル
3. 簡潔
4. モジュール構造

システムには、スケーラブル(拡大自在)なマルチコンピュータアーキテクチャを採用。様々な処理ノードが二次元メッシュ接続ネットワークを形成し、それぞれが演算、I/Oサービス、オペレーティングシステムサービス、ネットワークとの接続等を行なう。

また、メインメモリは各ノードに物理的に分散されており、ノード間ネットワークも高速でインテリジェント。従って、プログラマはノードの物理的な位置や機能を意識せずに、あらゆるプログラミング方式を使用できるのです。

インテルジャパン株式会社

Paragon XP/Sのシステム概要

性能

- ・ 64ビット浮動小数点演算：5～300GFlops（ピーク時）
- ・ ノード間メッセージ転送速度：200Mバイト/秒（全二重）
- ・ メモリサイズ ：～128Gバイト（転送速度～12.8Gバイト/秒）
- ・ 内部ディスク容量 ：～1Tバイト（転送速度～6.4Gバイト/秒）

システムアーキテクチャ

- ・ スケーラブル（拡大自在）分散メモリ・マルチコンピュータ
- ・ MIMD方式

ノード

- ・ i860XP(50MHz)プロセッサをベース

ノード間接続アーキテクチャ

- ・ 二次元メッシュ
- ・ パイプライン方式

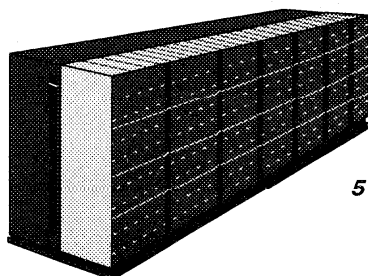
オペレーティングシステム

- ・ UNIX
- ・ POSIX、System V.3、4.3bsdに準拠
- ・ 仮想メモリ

高性能と高機能を兼ね備えたParagonシステムを利用すれば、"Grand Challenge"と言われる困難な演算問題に取り組む科学者やエンジニアの皆様も、より意義深い研究成果をあげることができるでしょう。膨大すぎて手付かずだった問題を調査し、より詳細な分析が行なえるだけではありません。結果の精度に大きな自信を持ち、「月・週」の処理時間を「時間・分」にまで短縮できるのです。

インテルジャパン株式会社

Paragon XP/S



*A family of
scalable systems from
5 GFLOPS to 300 GFLOPS*

- Scalable integer performance to 160K MIPS
- Scalable main memory to 128 Gbytes
- Scalable internal disk storage to a Terabyte
- Scalable external connections to 6.4 GB/sec

二次元メッシュ接続

ハードウェアアーキテクチャは、二次元メッシュを採用しています。超並列コンピュータでは、従来よりプロセッサ間の通信が最大の問題とされてきました。

インテルは、米国カリフォルニア工科大学との共同研究により、よりシンプルな二次元メッシュ構造が最適との結果が得られました。ここに示すように、それぞれのノードは、コンピューティングノードとフロントエンドコンピュータ部を自由にダイナミックに指定できる構造になっております。そしてノード間通信速度は実に200 MB/Sec.を達成しております。今までの並列コンピュータでは、数MB/Sec.であったバンド幅が100倍以上のバンド幅に拡張されたことは、インテルの半導体技術によりレイテンシー40 nsec.以下というメッシュルーティングチップの開発が成し遂げた技です。

インテルジャパン株式会社

OSF/1

OSは、超並列コンピュータでは初めてUNIX OSF/1を採用しました。これは、分散メモリ型並列コンピュータでありながらバーチャルシェアードメモリの環境を提供し、ユーザ側からはシングルプロセッサのイメージで取り扱える理想的な超並列コンピュータを意味しています。

まとめ

インテルの先端システムは技術の芽を育み続け、前例のないパワーが求められるような革新的な研究課題に対しても理想的なスーパーコンピュータを提供します。

Paragon XP/Sの最先端技術は、長年にわたって培われてきたマイクロプロセッサの設計、製造技術によって支えられています。今後は、サブミクロンの半導体プロセス技術とマルチチップパッケージ技術の進歩、そしてシステムソフトウェア、スケーラブルな方式を融合させることによって、次世代の低価格テラFlopsスーパーコンピュータを1990年代半ばまでに世に送り出す予定です。

従って、従来国産コンピュータメーカーや米国からのスーパーコンピュータいわゆるベクトルマシンは今後衰退し、これに代わって超並列マシンが技術の流れを変え、スーパーコンピュータ市場のシェアを拡大するでしょう。

インテルジャパン株式会社
佐藤 謙一

- (注) UNIXはUNIX System Lab.の登録商標です。
iPSCはIntel Corp.の登録商標です。
Paragon, i860XPはIntel Corp.の商標です。

インテルジャパン株式会社

1 トランスピュータとは?

熱・流体の解析やシミュレーション計算に膨大な計算量が伴うことは、皆さんが身をもって経験されていると思います。なにしろ、結果を得るまでに1時間～1日、長い時には1週間も待たなくてはならないのですから。この計算時間を減らすためには2通りの方法があります。1番目は計算アルゴリズムを改良すること。2番目は計算機のスピードを上げることです。そして、この2つの方法は密接に関係しています。それは、新しいアルゴリズムが開発された時、計算機はそれをできる限りハードウェアに近づけなければならないからです。なかでも並列性を持つアルゴリズムと計算機の持つアーキテクチャーやトポロジーは特に密接な関係があります。トランスピュータとは、「ユーザ自身がどのようなアルゴリズムと並列トポロジーを使った時でも対応できる」ことを目的とし、スーパーコンピューターの性能を誰でもが簡単に引き出せるように設計されたプロセッサです。1985年に英国政府の国営会社「INMOS社」によって第1号機(T414)が開発されました。ユーザ自身が自由に並列システムを組め、低価格でスーパーコンピューターに近い性能を得ることができるという意味では世界で唯一の疎結合並列処理をサポートするプロセッサです。このために、トランスピュータは、次の特色を持っています。

- (1) 単体(プロセッサノード)での計算能力が高い。
- (2) プロセッサノードが安価に簡単に作れる。
- (3) プロセッサノード間のデータ転送は、自動的に同期がとれ、かつ、計算処理の負荷にならない。
- (4) プロセッサノードの拡張性は無限である。
- (5) どのようなトポロジーも構築できる。

さらにトランスピュータは、現在までの間、シミュレーション関係の方、画像処理関係の方、リアルタイム信号処理関係の方々から多くのご助言を受け、さらにプロセッサの高速化に伴ういくつかの変遷を経て、現在(1992年8月)「T9000」という最新鋭のプロセッサに発展しています。以下、上記(1)(2)(3)については「2章T9000アーキテクチャー」で、(4)(5)については「3章C104ルーティングスイッチ」で述べさせていただきます。

2 T9000アーキテクチャー

2-1 主なユニット

トランスピュータ全体のブロック図を図1に示します。全体の構成は、「実行ユニット」、

「タイマ」、「キャッシュ/汎用レジスタ」、「PMI (Programable Memory Interface)」、「VCP (Virtual Channel Processor)」、「クロスバースイッチ」に分れます。また、動作周波数は、入力クロックが5MHzで内部で通信され50MHzで動作します。まず、「実行ユニット」は最大200MIPS (平均60VAXMIPS)、25MFLOPSの処理速度を誇り、「キャッシュ/汎用レジスタ」がこれをサポートします。「タイマ」は、1マイクロ秒間隔と64マイクロ秒間隔の2つのタイマをもちます。「VCP」は、100Mbpsのビットレートでデータを転送できるシリアルポートを4チャンネル持ち他のT9000のVCPと接続され、データ転送のハンドリングをします。「PMI」は、32ビットのアドレスバスと64ビットまで拡張できるデータバスを持ち、4つのメモリバンクに対してメモリアクセスタイミングを5ナノ秒間隔でプログラムできる信号線を持っています。「クロスバースイッチ」は、実行ユニット間のデータ転送レートを保償するためにマルチバス構成となり、32ビットデータ/32ビットアドレスバスを4セット用意しています。

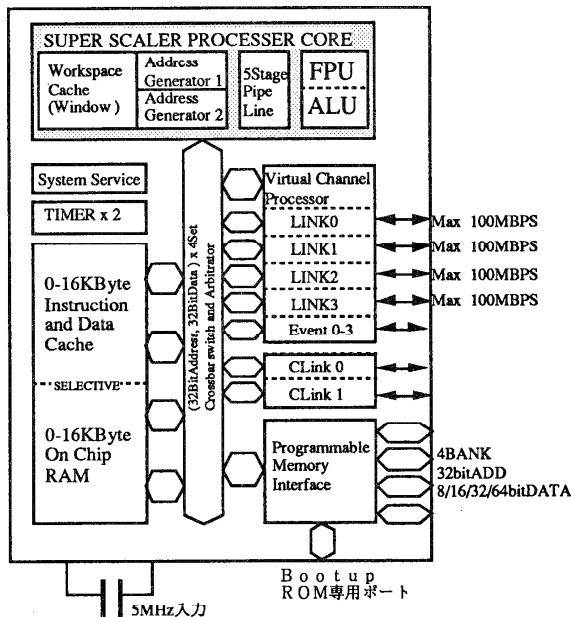


図1 T9000ブロック図

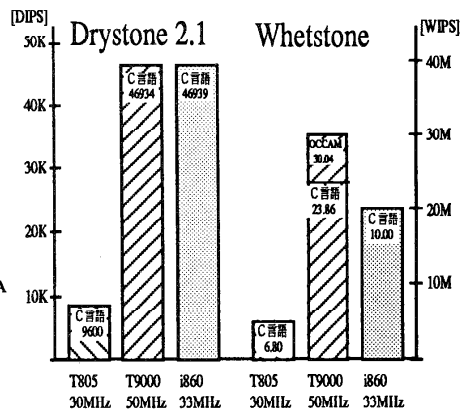


図2 T9000パフォーマンス

2-2 プロセッサノードにおける計算の高速化

トランスビューターは、疎結合型並列処理を指向していますので、各プロセッサノードの処理速度がシステム全体の性能に大きく影響します。このため、T9000は、図3のブロック図に示される実行ユニットを持ち、最大200MIPSの処理速度を実現しています。一般のベンチマークテストの結果は図2の通りです。図3からもわかるように実行ユニットは、(a) 2つのローカル変数のフェッチ、(b) 2変数のアドレス計算、(c) 2つのグローバル変数のロー

ド、(d) ALU、FPUによる2変数の演算、(c)結果のセーブ/条件ジャンプの5段のパイプラインステージがあり、各ステージがそれぞれ役割をもって別々の計算をします。

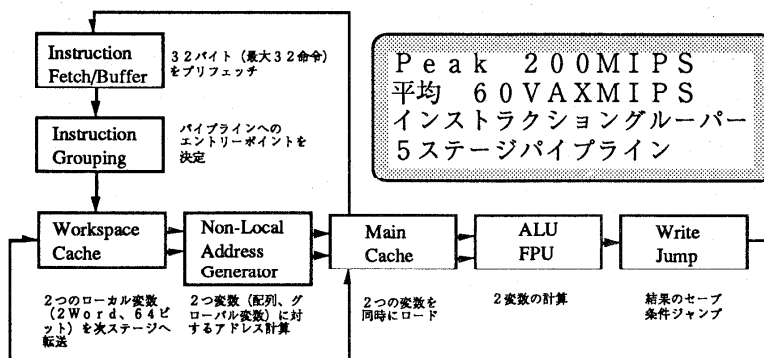


図3 実行ユニットのブロック図

従いまして、5段のパイプライン型スーパースケーラとなります。また、パイプラインの流れを最適化するためにパイプラインへのインストラクションの入り口には、バッファを介してグルーパと呼ばれるユニットがあり、関連のあるインストラクションがひとまとまりになってパイプラインにエントリしていきます。特に配列を伴う演算では、この実行ユニットは完全にアドレス計算とデータの計算がプロセッサ内部で並列処理されるため、ピーク性能の200MIPSに近い性能となります。例えば、 $a[i+1]=b[j+15]+c[k+7]$;の演算はアドレス計算も含めて3サイクル(60ナノ秒)で終わります。このスピードを維持するためにT9000は、16キロバイトのメインキャッシュを持ち、さらに32バイトのインストラクションバッファと32ワード(128バイト)のローカルキャッシュを介して、データ転送スピードを高めています。この結果、1サイクル(20ナノ秒)で、3ワード(12バイト)のデータ転送と8バイト分のインストラクションを同時に転送することが可能となっています。(図7参照)

2-3 プロセッサノードのハードウェア

T9000のように超並列によりスーパーコンピューティングを可能とするプロセッサは、1つの計算機システムの中で数千個も使用される場合があります。このような場合には、パフォーマンスとコストは必ずトレードオフの関係になります。もっとも、超並列コンピュータは、並のスーパーコンピュータよりも格安となるのは既知の事実ですが。ユーザー自身が構築するためには、コストの問題は重くのしかかってきます。そのような問題を解消するためにT9000では高速RISCチップに付き物の複雑な周辺回路を全て廃止し、プロセッサノードをプロセッサとメモリのみから構築できる画期的なインターフェース(PMI)を備えています。T9000は、チップセレクト、RAS、CASを4セット持ち、4種類の異なったアクセスタイム/バスサイズのメモリへ直接接続できるようになっています。各バンクへの信号は専用レジスタに

伝熱研究 Vol.31, No.123

値を書き込むことにより、全て5ナノ秒単位でタイミングをプログラムできます。DRAMに対してはページモード、リフレッシュサイクルやプリチャージタイムの設定ができ、その他、バンク切り替え時間、キャッシュON/OFFの設定も各バンクごとに設定できます。図4に4つの異なるバスサイズのため接続例を示します。また、T9000は組み込み用途向けにROMの専用ポートを持っています。

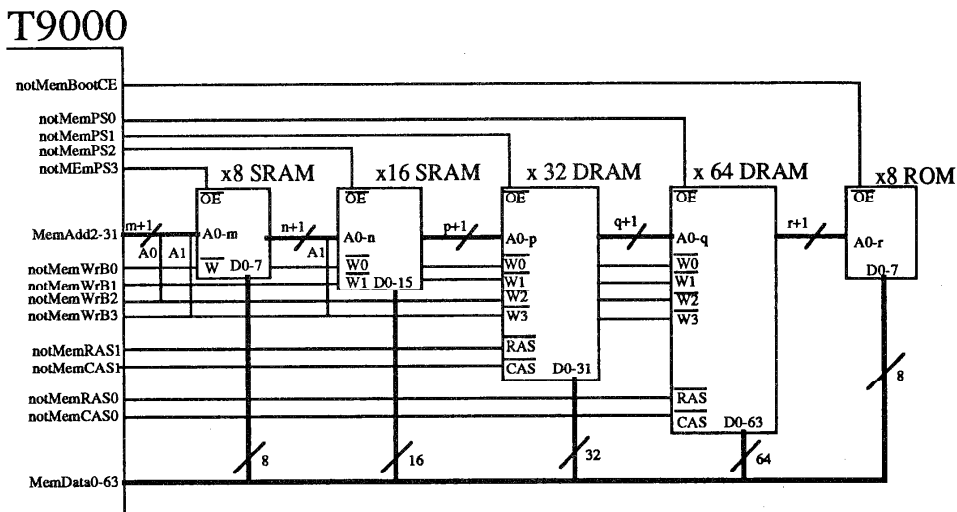


図4 T9000のメモリーインターフェース例

2-4 プロセッサ間のデータ転送

T9000は、疎結合並列をサポートするために独自のプロセッサ間通信チャネル（リンク）を4本持ち、1本のチャネルで20Mbyte/secの双方向シリアルデータ通信を実現します。4本のチャネルは独立して動作し、最大80Mbyte/secの速度となります（図5参照）。1本のチャネルは、データ線とストロブ線の2つの信号を持ち、これを他のT9000に直接接続するだけでマルチプロセッサシステムが構築できます。データは、バケットごとにヘッダー情報が付加されて転送され、VCPがヘッダ情報をデコードし転送先のプロセスにデータを渡します（図6参照）。この結果、プロセス間のPointToPointのデータ/メッセージ通信が完全に可能となり、複雑な並列アルゴリズムも簡単に効率よく実行できるだけでなく、プログラムの負担が劇的に減少します。

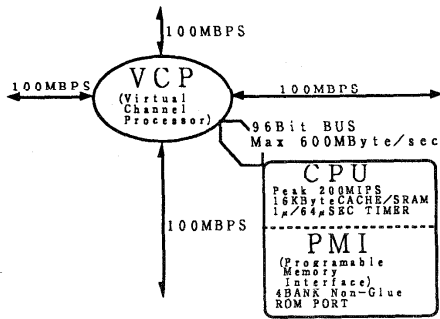


図5 VCPとCPU

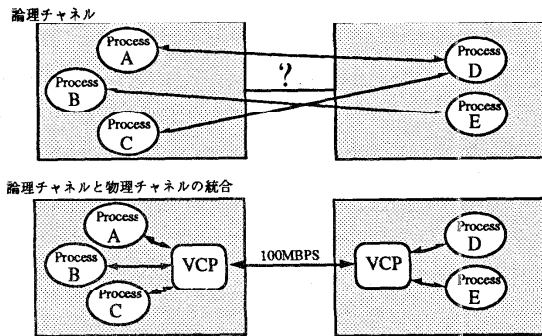


図6 VCPの基本機能

2-5 計算パフォーマンスとデータ転送のバランス

マルチプロセッサシステムを構築するとき最も注意しなければならないのはバストラフィックの問題です。データ転送中にプロセッサの処理を中断するのは好ましくありませんし、逆にプロセッサによるバスアクセスが頻繁に発生しデータ転送が遅くなるのも好ましくありません（これは、密結合並列システムの最大の問題でしょう）。T9000は、通信チャンネルと計算処理の完全同時実行を実現するために、4Wayのマルチバスを内蔵します（図7参照）。各ブロックが完全に独立動作し内部DMAによりデータ転送が行われ、かつ、データバスが4系統ありますので計算処理とデータ転送が干渉しあうことは全くありません。

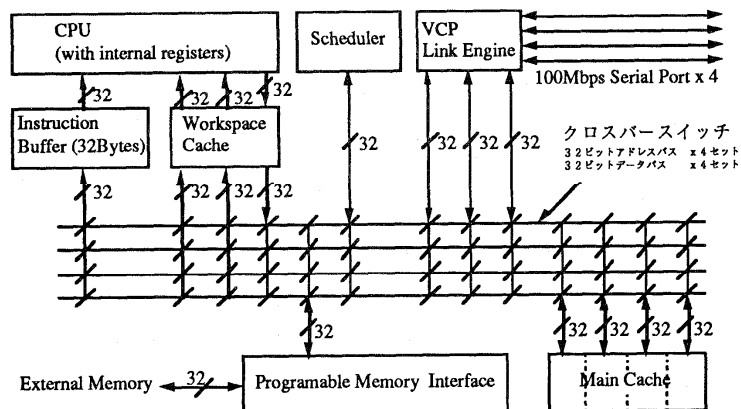


図7 内部バスアーキテクチャ

3 C104ルーティングスイッチ

疎結合並列では、ノードとノードの間が離れてしまいデータ転送速度が遅れてしまうケースがあります。（図8、左図参照）の問題があります。この問題を解決するために、郵便局の役割を受け持つ「C104 バケットルーティングスイッチ」がT9000プロセッサネットワークをサポートします。C104には32本のリンクを接続でき、全ての並列トポロジをハードウェア伝熱研究 Vol.31, No.123

の変更無しで実現できます。また、C104 同士も接続でき32本単位で接続できるリンクの数をふやすことができます。

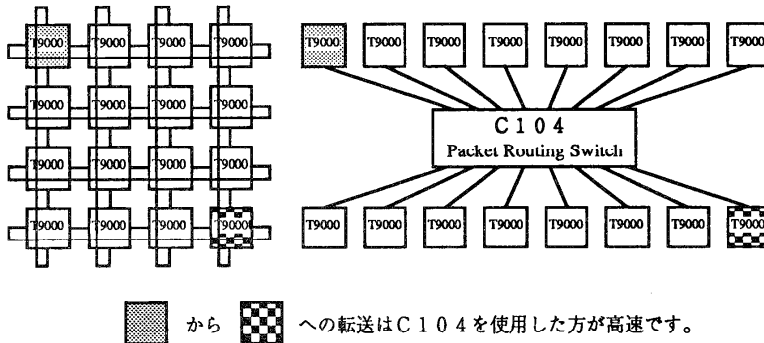


図8 プロセッサネットワークとC104

4 熱流体研究論文

トランスピュータを使用した熱流体に関する研究例を一部御紹介しますと、次のような論文があります。

「マイクロ構造における希薄気体流れのDSMC並列処理」

「最適潮流計算方における並列化」

「ガスタービンの動特性の並列処理」

「熱、流体数値解析の並列計算」

「並列コンピュータによる有限要素解析の高速化」

「ニューロンネットワークの並列化」

「モンテカルロ法の高速化」 ほか多数。

トランスピュータを使用した研究成果として、ほとんどのものが次の手順により実現されています。

「既存アルゴリズム」→「新並列アルゴリズム」→「複数プロセスの並列処理」

→「複数プロセッサへの展開」→「高速化の実現」

5 おわりに

「1章 トランスピュータとは？」で述べた5つの必要条件をT9000がどのように実現しているのかおわかりになったと思います。

スーパーコンピュータの性能を卓上のPC/WSで実現できるのは、別に難しいわけではありません。少なくとも皆さんを含め、T9000を知っている方はおわかりになると思います。

今後、皆様の御研究のなかでT9000のパフォーマンスとアーキテクチャが大いにお役に立てることを祈りまして筆を下ろさせていただきます。

藤崎 正英、富士通株式会社、計算科学研究部[富士通]、
奥田 基、富士通株式会社、計算科学研究部[富士通]、
小坂 真一、(株)富士通青森システムエンジニアリング[富士通青森]

1. はじめに

スーパーコンピュータとは、その時代時代で最高の計算速度を達成可能な計算機を指す。現在までは、演算パイプライン方式のベクトル計算機が中心であった。そして現在、次世代のスーパーコンピュータとして改めて注目されてきたものが並列計算機である。最近の並列計算機は、多数の高速なプロセッサから構成されたプロセッサ要素（以後PEと呼ぶ。）を結合することによって総合的な理論性能では従来のスーパーコンピュータを超える性能をうたっている。実効性能においてもその高速性が検証され初めており、 1000^2 行列のLU分解で既にギガフロップス級の性能を達成している[1]。実際に、米国ではシンキングマシーン社のCM-5やインテル社のパラゴンのように商用化が進んでおり、急速にユーザの間に認知されてきている。

一方、現在では、ハードウェアやアーキテクチャの研究が先行し、アプリケーション寄りの研究はまだ緒についたばかりである。特に日本ではその傾向が顕著である。現在の並列計算機の使用環境はかなり未整備であり、ユーザが手作業で高速化のための色々な工夫を考えているのが現状である。この高速化作業はベクトル計算機上では演算レベルで考えれば良かったが、並列計算機の場合は演算レベルだけでなく並列化部分全体を大域的に把握する必要がある。例えば、各PEで同じプログラムを違うデータで動作させる場合を考えると、そのデータによってプログラム上での動きが異なれば同じ時刻で異なる命令を実行している事になる。このことから、多数台のPEから成る並列計算機の動きを本当に捉えてプログラム設計を行なう事は、今までのベクトル計算機上の経験だけでは不足であることが想像できる。従って、並列処理特有な性質や観点を捉えて、実際のアプリケーションに適用する並列処理アルゴリズムの研究を推進し、並列計算機の高い潜在性能を実用問題で引き出すアプリケーションの適用研究が重要である。

富士通では、並列処理の研究ツールとして富士通研究所で開発された高並列計算機AP1000を使用してアプリケーションの適用研究を行なっている。

本報告では、並列処理の研究ツールAP1000の概要と、実用アプリケーションの並列処理適用の事例について述べる。2章でAP1000、3章でアプリケーションの並列化手段、

4章で簡単な応用例として流体解析分野における典型的な例題である2次元キャビティフローでの適用評価について述べる。

2. API000

並列処理研究ツールとして使用した並列計算機AP1000について述べる。AP1000は、小レイテンシ、高スループットの両方を実現することを設計目標に開発された。

2.1 ハードウェア

AP1000のハードウェア構成及び諸元を図1に示す。AP1000は、最大で1024個のプロセッサ要素(PE)を結合可能なMIMD(Multi Instruction stream Multi Data stream)方式の分散メモリ型並列計算機である[2]。PE単体は、汎用の演算ユニットと4種類のカスタムVLSI(ルーティングコントローラ、メッセージコントローラ、放送ネットワークインタフェース、メモリコントローラ)と16MBytesのメモリ、128KBytesのキャッシュメモリで構成され、A3版大のボードに2つのPEを実装している。また、3種類の通信網(放送ネットワーク、PE間ネットワーク、同期用ネットワーク)を持ち、Sファミリ(SUN)をフロントエンド(以後ホスト)として動作する。

アプリケーションへの適用で重要なPE間ネットワークのトポロジは、2次元トラスと呼ばれ、2次元メッシュ構造でさらに東西方向、南北方向それぞれについて端同士が結合したループになっている。PE間通信はルーティングコントローラ(RTC)でアプリケーションの計算と独立に行なえる。RTCは16ビット幅で最大転送レートが東西南北の各方向につき25MBytes/sである。通常、PE間での通信時間はその距離に依存するが、AP1000は、構造化バッファプールを組み入れたワームホールルーティング手法を採用し、RTC内にハードウェアで実現することによって、小レイテンシ、高スループット通信を実現している。

放送用ネットワークは、リングと階層バスを組み合わせた構成で、32ビット幅で最大転送レート50MBytes/sを持つ。アプリケーションではホスト上にあるデータをPEに分配したり、PEから収集したりする場合に使用する。同期用ネットワークは、物理的にはツリー構造であり、バリア同期と論理積を得るステータスに使用される。専用ハードを持つ事でバリア同期の要求から成立まで1.0 μ sで実現している。また、メッセージコントローラは、送受信におけるセットアップオーバーヘッドを削減するための専用ハードウェアである。特に小さなデータを最小限のオーバーヘッドで通信するため、キャッシュ上のデータを直接ネットワークに送り出すラインセンド機能は、行列のLU分解やFFT等細粒度並列アプリケーションを高速に実行するために有効である。

2.2 ソフトウェア

AP1000の各PEには、それぞれライトウエイトなマイクロカネルベースのセルOS

が動作し、ホストではUNIX上でAP1000のドライバが動作する。アプリケーションプログラムは、一般的にはホスト上で動作する1つのホストプログラムと各PE・各タスクに対応した1つ以上のセルプログラムの2種類で構成される。現状の応用では、ホスト、セルプログラムを各々1つ作成し、全てのPEに同じセルプログラムをロードして、異なるデータで実行するSPMD(Single Program Multi Data)モデルを使用することが多い。

2.3 プログラム開発環境

ユーザは、既存の逐次処理型アプリケーションプログラムをホスト用とセル用の2種類に分割して、各PEへの機能分割とデータ分割を考えて通信サブルーチンライブラリを挿入する事でPE間及びPEとホスト間のデータ通信を記述する。並列化における一連の作業過程の自動化は、現状では並列処理研究一般における課題となっており、並列計算機普及のための必須技術として研究開発を進めている。

ユーザは、Sファミリの提供しているCやFORTRAN言語でプログラムを書き、Sファミリのコンパイラやプログラミング・デバッグ環境をそのまま利用できる。これはAP1000が各PEにSファミリと同じSPARCの命令を採用しているためで、作業時間の低減とプログラムの信頼性の向上に寄与している。さらに、AP1000が身近にないユーザのためにSファミリ上で並列プログラムを開発することができるAP1000のシミュレータCASIMを用意している。このCASIMで開発されたプログラムは、ソースプログラムレベルでAP1000と互換性があるため、プログラミングの初期段階で16PE程度までのテスト、デバッグはSファミリ上で行なうことができる。さらにAP1000の実機上でも性能評価ツールやデバッグツールが使用できる。

現在、並列処理研究のためAP1000の512PEシステムが1セット、128PEシステムが1セット、64PEシステムが3セットある。64PEの1セットは学術ネットワークであるWIDEに接続され、世界中の登録利用者はWIDE経由で使用している。

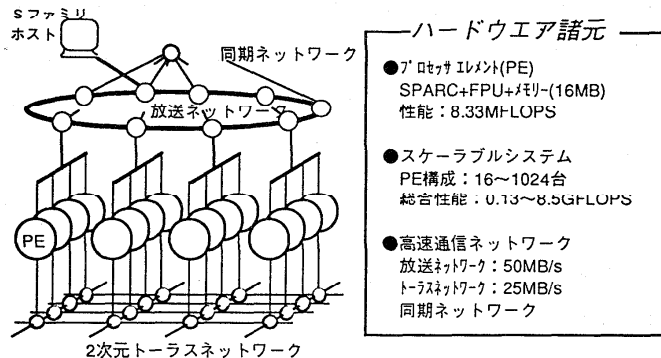


図1 AP1000のハードウェア構成と諸元

3. アプリケーションの並列化手順

アプリケーションの並列化について、既存の逐次処理プログラムを並列化する場合の一般的な手順について説明する。この手順を図2に示す。最初に逐次処理プログラムの構造やデータ参照関係について静的解析と実行時の動的解析を行い、支配的計算部分の並列性の考察、抽出を行う。

次にデータ分割と機能分割では、各PEへのデータ分割や機能分割方法が幾つかある場合、前フェイズの調査結果を用いて負荷分散や通信時間の削減、プログラミング作業量等を観点に総合的に判断し決定する。プログラム設計では、主に、通信のタイミングやその内容・量等を決定する。次にプログラミングとデバッグを実施する。

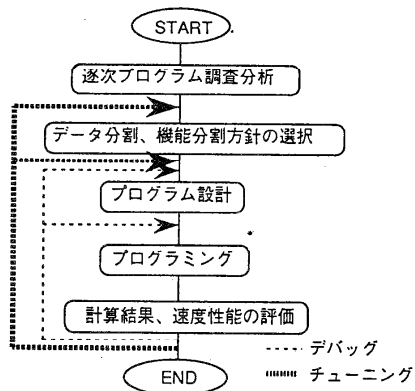


図2 並列化の手順

評価のフェイズでは、速度向上や物理的面からの考察を行い、その性能分析から性能向上を抑制している原因の追求とその対策を考察し、場合によっては前のフェイズに戻って高速化検討を行う。

4. 2次元キャピティフロー並列化

3章で説明した手順で並列化した例を具体的に示す。AP1000におけるアプリケーションの適用研究は様々な分野で行なっている[3,4]が、本報告では具体的な並列化評価や手順を示すため、流体解析のベンチマーク問題として典型的な2次元正方形キャピティ流れを計算対象として選定した。本問題は正方領域内に閉じ込められた流体の流れで、上を除く3方向を固定壁で囲まれ、上方の壁が一定速度で移動する。出力結果の1つである流速を図3に示す。

4.1 解析手法

流体の流れは、そのクヌーセン数が0.01程度を境に連続領域にあるか、希薄領域にあるかに分類される。ここではナビエストークス方程式を支配方程式とした非圧縮性連続流体として定常解を求める。本問題は、流れ関数及び渦度で質量保存を表す連続の式及び運動量保存を表す運動方程式を変形させて方程式化している。離散化は5点中心差分で行なった。行列求解手法は多くあるが、ここでは緩和法を用い、並列処理に向き、収束もヤコビ法等と比較して速いOdd-even SOR法を採用した。

4.2 並列化手法

差分法では各格子点の値を計算するためには隣接する格子点上の値のみが必要であり、

各格子点単位の並列性を持つ。そこで、2次元格子点領域を幾つかの小正方領域に分割し、AP1000のPE上に割り当てた。PE間通信は、各収束ステップで上下左右4方向の隣接するPE間で流れ関数や渦度のデータを境界同士で交換するために発生する。本問題は、図2で示した逐次処理プログラムの調査分析とデータ分割、機能分割方針の決定が容易であるが、3次元問題になるだけで領域分割手法も3次元の各方向で切り分けた小立方体をいかに2次元のトラスネットワークにマッピングするかという問題が発生してくる。

つぎに高速化のための手法について述べる。格子点数を一定にした場合、PE台数が増加すれば各PEが担当する格子点数が減少する。一方負荷分散は各PEに均等な格子点数を担当させることによって均衡化できる。従って、この問題を多数台のPEで効率的に実行させるためには、境界にある格子点に関するデータの送受信時間の削減を行なう事が並列化効率の向上につながる。そこで、以下に示すように通信量の削減、通信量とその回数の適正化、通信時間と計算時間のオーバーラップという観点で削減手法を施した。

(1) 通信量の削減

逐次処理プログラムのアルゴリズムを変更しないレベルで自PEでの計算に必要な最低限のデータ転送量にする。

(2) 通信量と通信回数の適正化

データ交換量を固定とした時、1回のデータ送受信量とその回数の適正な内訳は適用するアーキテクチャの性質に依存しており、その最適化も考慮する。

AP1000の場合は、データ送受信時のセットアップ時間が短い、通信路のコンテンションが多くなると通信時間が長くなるという性質を持つため、多くの格子点での計算を対象に考えると通信回数を犠牲にしてもデータの送受信量を減少させる事が通信時間の減少につながる。そこで、Odd-even SOR法を採用し、格子点計算のためのデータ参照関係に注目して、チェッカーボードのように2色(OddとEven)に塗分けて各色のグループごとに交互に計算を行なった。これによって、境界の全格子点を送信するヤコビ法等と比較して送受信回数は2倍になるが、1回のデータ送受信量は半減させる事ができる。

(3) 計算と通信のオーバーラップ

AP1000が通信専用LSIを持つことを利用し、計算部分と通信部分の順序を最適化する。計算の終了直後にできる限り早く送信を行ない、計算に必要なデータはできる限り遅く受け取ることによって、通信と計算のオーバーラップ時間を最長化することができる。

4.3 評価

並列化プログラムの速度向上効果を検証するため 64^2 、 128^2 、 256^2 の格子点数の時、PE台数64台まで処理時間の計測を行なった。その結果を図4に示す。この時、格子点数によって収束回数が増えるため、流れ関数計算部分と渦度計算部分におけるそれぞれ1
伝熱研究 Vol.31, No.123

回のSOR収束ステップに要する時間の和を用いた。また、数値計算結果は逐次処理プログラムと完全に一致している。

前述の並列化方針でAP1000にインプリメントすることにより、 256^2 の格子点数でPE台数64台で60倍と理想に近い効率が得られることが実証された。

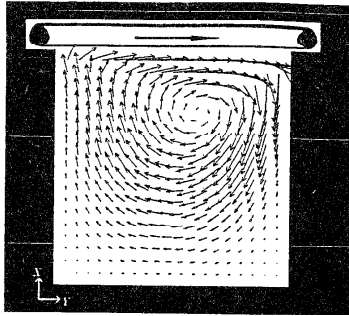


図3 2次元キャビティ流れの速度ベクトル

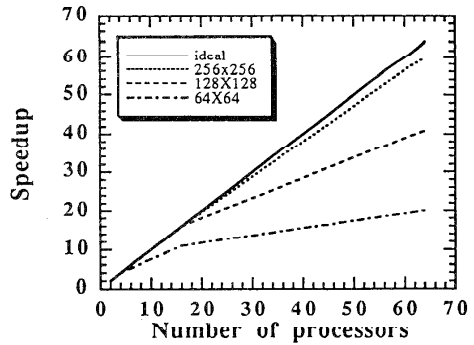


図4 並列化速度向上率

5. まとめ

高並列計算機AP1000のハードウェア、ソフトウェアについての概要についてアプリケーションの並列化の立場から述べた。また、流体解析のベンチマーク問題として典型的な2次元正方形キャビティフロー問題を領域分割しAP1000に適用し、並列化の手順と差分法を用いたアプリケーションでの並列化手法について述べ、実際に速度向上効果を実証した。ここで用いた並列化手法は、差分法を含む最近接のデータ参照の問題に広く応用が可能であり、またベクトル並列計算にも応用が期待できる。

参考文献

- [1] J.J.Dongarra, "Performance of Various Computers Using Standard Linear Equations Software", Technical Memorandum, Aug. 7, 1992
- [2] 堀江他, "高並列計算機AP1000のアーキテクチャと性能評価", Summer Workshop of Parallel Processing '92 宮崎, 1992年8月
- [3] H.Taniguchi, et.al, "Monte Carlo Simulation of Non-gray Radiation Heat Transfer on Highly Parallel Computer AP1000", 3rd International Symposium on Heat Transfer, Beijing, Oct. 6-10, 1992
- [4] K.Akemi et al. "QCD on highly parallel Computer AP1000", In Nuclear Physics B, number 26, pp. 644-646, 1992

1 緒言

乱流現象の予測と制御は工学的重要課題であり、従来より様々な視点から研究が行われている。乱流現象の予測については、計算機の発達に伴って、問題の複雑さや必要とする乱流場の情報に応じて乱流モデルや計算法を適宜選択し、具体的な数値予測結果を手にすることが可能になってきた[1]。かつては混合長理論に基づいた境界層計算が大半であったが、最近では応力方程式モデルを用いた3次元流れの予測やLES計算も行われるようになった。勿論、乱流モデルの精度向上など、この方面においても依然として今後の課題は多い。一方、乱流現象の制御においては、乱流摩擦抵抗や乱流騒音の低減、あるいは乱流伝熱の増進・低減などが中心課題であるが、これらに関する物理的知識は以外に乏しい。例えば、乱流摩擦抵抗の低減法として、ポリマー溶液の注入、LEBU板の導入、リブレット壁面の利用などが実際に効果のあることが経験的に知られているが[2]、それらの力学的機構については依然として明らかではない。これは、問題の困難さによることは勿論であるが、元来基本となる平滑壁面に沿う剪断乱流についてさえもその構造や機構に未だに不明の点が多いことが主たる原因であろう。

このような状況の中で、近年の各種計算機の性能向上により、直接数値シミュレーション (Direct Numerical Simulation, DNS) が可能となってきた。DNSは、一種の数値実験であり、これによれば各時刻の任意の点での物理量 (速度, 圧力, 渦度など) を知ることが可能であり、乱流モデルの開発や乱流現象の構造解析に極めて有効であることから、この方面の有力な研究手段として確立されつつある[3]。

2 DNSの計算手法

DNSは、現象を記述する微分方程式群を離散化し数値的に解いて、3次元な流れ場あるいは温度場の挙動を忠実に再現する方法である。計算手法としては、スペクトル法[4,5]が最良である。スペクトル法においては、空間微分は全て波数空間で解析的に行われること、直交関数の有限級数展開によって解を最適近似することにより、打ち切り誤差が項数に対して指数関数的に減少するという有利さがある。代表的な直交関数としては、周期的な領域にはFourier級数、非周期的な領域にはChebyshev級数がある。スペクトル法は、幾何学的に単純な流れ形態での採用に限られるが、複雑な形状の流れ場のDNSが高次有限差分法を用いて行われ始めている[6]。

3 DNSを利用した乱流工学研究

3.1 DNSの意義

DNSによれば、レイノルズ数に制限があるものの、実験室では実現、計測しにくい理想

的な流れ条件や、仮想的な流れ場を解析の対象とすることができる。また、壁面の近傍での乱流測定は極めて難しいが、DNSによって乱れ統計量の壁面漸近挙動などに関する詳細な解析が可能である。

3. 2 DNSを利用した研究

一般に、DNSの応用は、乱流現象の物理的理解や制御の手掛りの取得、乱流モデルの構築や完結仮設の検証、各種実験計測手法の乱流中での精度評価、乱流現象の直接予測、乱流構造解析など多岐にわたる。乱流構造解析の分野においては、従来の点計測や可視化結果から得られる実験情報は断片的かつ記述的なものであったが、最近のDNSの結果からは比較的詳細にわたる運動論的な、あるいは力学的な情報が得られつつある。例えば、Robinsonら[7,8]は、乱流境界層のDNSデータベースを可視化し、その中に準秩序構造と呼ばれる時空間的に特異な位相関係を保つ流体部分が存在することを確認し、多くの重要な知見を報告している。

ここでは、標準的な壁乱流の一つである発達したチャンネル乱流のDNSデータベースの3次元可視化を行い、壁面近傍の乱流構造について考察した研究例を紹介する。

4 DNSデータベースによる壁乱流の構造解析

4. 1 チャンネル乱流のデータベース

可視化に用いたデータベースは、黒田ら[9]の2次元チャンネル内乱流のDNSによるものである。計算は、空間的な離散化手法として流れ方向、スパン方向にFourier-spectral法を、壁垂直方向にChebyshev-tau法を用いている。スペクトルモードは流れ方向に128、壁垂直方向に97、スパン方向に128である。計算領域はチャンネル半幅を δ として、流れ方向に $5\pi\delta$ 、スパン方向に $2\pi\delta$ である。摩擦速度とチャンネル半幅で定義されるレイノルズ数は150、バルク平均速度とチャンネル幅により定義されるレイノルズ数は4580である。

4. 2 可視化方法

可視化方法の概略をFig.1に示す。DNSにより得られた瞬時場の物理量データ（1物理量当たり約7MB）を領域分割し、Ethernetを介してグラフィック・ワークステーション（TITAN 3020）に転送し、ソフトウェアAVS（Application Visualization System）[10]を用いて可視化を行った。AVSは、ユーザがモジュールと呼ばれるサブルーチン群を組み合わせることにより可視化ツールを作成する、汎用的な3次元可視化ソフトウェアである。流れ場の可視化領域は、流れ方向に $1.7\pi\delta$ 、壁垂直方向に δ 、スパン方向に $0.86\pi\delta$ の大きさであり、計算領域のおよそ14分の1の領域である。座標系は流れ方向をx、壁垂直方向をy、スパン方向をzとする(Fig.2)。

4. 3 渦構造の同定

渦構造は、乱流現象の中心的な役割を果たしていると言われていたが、一般に三次元非定常流中での渦運動の同定は難しく、共通した定義は存在しない。Robinsonら[7,8]は、「渦中心の対流速度で移動する座標系からみたときに、中心軸に垂直な平面に投影した瞬時の流線が大まかに円形あるいはらせん状を描く」と渦を定義したが、構造解析にはスカラー量を規準とした同定法が都合がよい。Fig.3(a)は、圧力変動が負の領域($p^+ < -3$)の等値面を示したものである。図中下部の格子面が壁面で、上端はチャンネルの中央であり、流れ方向

は左下から右上である。可視化領域の大きさは、粘性長さで流れ方向におよそ800、壁垂直方向に150、スパン方向におよそ400である。Fig.3(b)は、Fig.3(a)中に示したy-z断面内の瞬時の流線に圧力分布を重ねたものである。Fig.3(b)中のA, Bで示される強い渦運動は局所的な低圧領域と良く対応し、従って渦構造の同定に負の圧力値を用いることが可能である。Fig.3(a)で観察される渦形状は、壁面と浅い角度をなすバナナ状で、壁面近傍で最も発生頻度の高い形状[8,11]である。

一方、変形速度テンソルの第二不変量は、圧力ポアソン方程式の右辺に現れ、次のように書ける。

$$-\frac{1}{\rho} p_{,ii} = u_{i,j} u_{j,i} \equiv \Pi \quad (1)$$

$$\Pi = 2\overline{u'_{i,j} u'_{j,i}} + \overline{u'_{i,j} u'_{j,i}} + \overline{u'_{j,i} u'_{i,j}} \quad (2)$$

式(2)右辺の各成分のうち、第2項 $u'_{i,j} u'_{j,i}$ が支配的であり、これを Π' と記す。Fig.4は、 Π' のy-z断面内での分布を示したものである。 Π' は、渦の内部で負の大きな値をとっている。弱い渦運動は、低圧領域として捉えられないことがあるが、 Π' はこのような領域でも有為な負の値をとり渦の検出に有効であることがわかる。

4. 4 レイノルズ応力の生成と消滅

Fig.5は低圧領域とレイノルズ応力積 $u'v'$ が正の大きな領域の等値面を示したものである。渦の左右側方で、遅い流体が壁から離れる運動であるイジェクション、速い流体が壁に向かうスウィープが発生している。Fig.6にy-z断面におけるレイノルズ応力の生成 $-v^2 \partial U / \partial y$ の分布を示す。図中L, Hで示される領域は、それぞれ $p^{**} < -3.0$ の低圧領域、 $p^{**} > +3.0$ の高圧領域である。渦の周囲の左右の位置にレイノルズ応力の生成が存在していることがわかる。次に、同じ断面における速度圧力勾配相関項 $-(u' \partial p' / \partial y + v' \partial p' / \partial x)$ を、Fig.7に示す。速度圧力勾配相関項が正の値をとる領域は、渦の左右側方に存在し、Fig.6で示されるレイノルズ応力の生成領域の近傍に位置している。このことから、レイノルズ応力の生成領域と消滅領域が隣接して存在し、しかも渦運動がレイノルズ応力の生成と消滅に大きく貢献していることがわかる。さらに詳細な観察からFig.8のような模式図が得られた。すなわち、壁近傍に流れ方向に軸を持つ渦が存在するとき、その内部は低圧領域になり、渦運動によって誘起された流体が壁面に向かうことにより壁面付近に高圧領域が生じる。一方、渦の反対側では、低速の流体塊が上方に押しやられるため、上流側からの高速流体との干渉により高圧領域が生じる。レイノルズ応力の生成領域は、渦の左右側方に存在する。低圧領域、高圧領域の内部は、レイノルズ応力の消滅項としての圧力歪相関項が大きな領域となっており、圧力拡散項は、生成領域から消滅領域にレイノルズ応力を輸送する役割を担っていると考えられる。

5 結言

計算機性能の向上、数値計算法の信頼性の検証、そして効率的なポストプロセッシング環境の開発に支えられて、DNSは乱流現象の数値実験として確固たる地位を獲得したと言える。DNSで再現される流れ場・温度場の可視化により乱流諸量の空間的相互分布や非定常挙動が解析できることになり、今後乱流現象の力学機構・輸送機構に関する新たな知見

が得られるものと期待される。

謝辞 本稿をまとめるにあたり、東京大学大学院住谷安史君の協力を得た。記して、謝意を表す。

参考文献

- [1] Launder, B. E., "On the Computation of Convective Heat Transfer in Complex Turbulent Flows," ASME J. Heat Transfer, 110 (1988), pp. 1112-1128.
- [2] Bandyopadhyay, P. R., "Review-Mean Flow in Turbulent Boundary Layer Disturbed to Alter Skin Friction," ASME J. Fluids Eng., 108 (1986), pp. 127-140.
- [3] 笠木, 乱流工学研究におけるダイレクト・シミュレーションの応用, 日本造船学会誌, 751 (1992), 29.
- [4] Boyd, J. P., "Chebyshev and Fourier Spectral Methods," Lecture Notes Eng., 49, Springer, (1989).
- [5] Reynolds, W. C., "The Potential and Limitations of Direct and Large Eddy Simulations," in *Whither Turbulence? - Turbulence at the Crossroads*, J. L. Lumley, ed., Springer, (1990), pp.313-342.
- [6] Choi, H., Moin, P. and Kim, J., "Direct Numerical Simulation of Turbulent Flow over Riblets," CTR Manuscript 137, (1992), CTR, Stanford University.
- [7] Robinson, S. K. and Kline, S. J., *Near Wall Turbulence*, Kline, S. J. et al., eds., (1988), 218, Hemisphere.
- [8] Robinson, S. K., "The Kinematics of Turbulent Boundary Layer Structure," NASA TM-103859, (1991).
- [9] 黒田・笠木・平田, 二次元チャンネル内乱流の低レイノルズ数効果, 第6回生研N S T シンポジウム講演論文集, (1991), 7.
- [10] "AVS User's Guide and Developer's Guide", Stardent, (April, 1991).
- [11] 鈴木・笠木, 壁面乱流における準秩序構造の非定常挙動, 機械学会第69期全国大会講演論文集, No. 910-62 B (1991), 233.

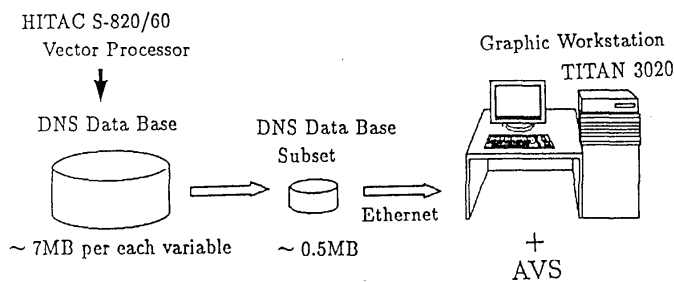


Fig. 1 Flowchart for visualization.

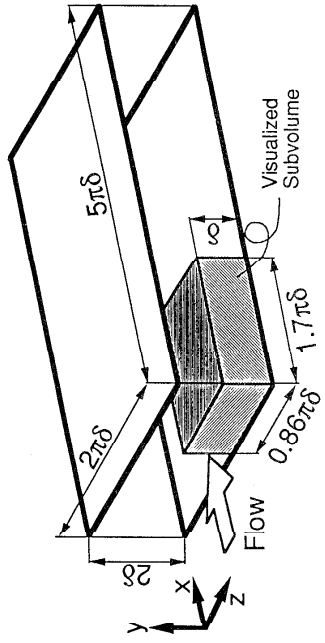


Fig. 2 Computational volume and visualized subvolume.

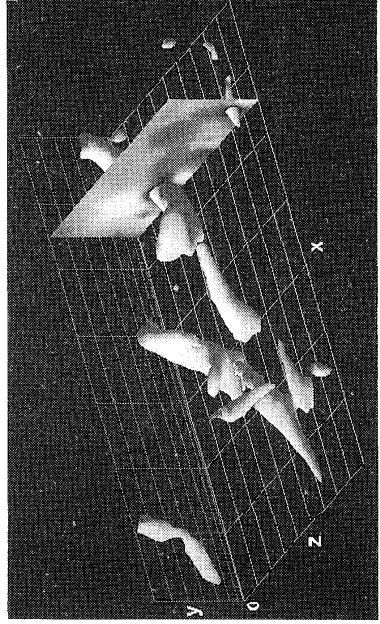


Fig. 3(a) 3D contour surface of pressure fluctuation:
White, $p'^+ < -3.0$.

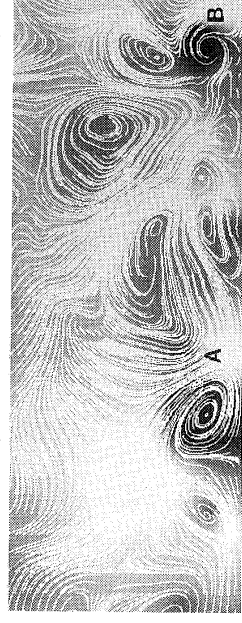


Fig. 3(b) Instantaneous streamlines and pressure fluctuation
in the y-z plane:
Gray to black, $p'^+ = 0$ to -3.0 ;
Gray to white, $p'^+ = 0$ to $+3.0$.



Fig. 4 Instantaneous streamlines and second invariant of the
deformation tensor in the y-z plane:
Gray to black, $u'^+_i u'^+_i = 0$ to -0.02 ;
Gray to white, $u'^+_i u'^+_i = 0$ to $+0.02$.

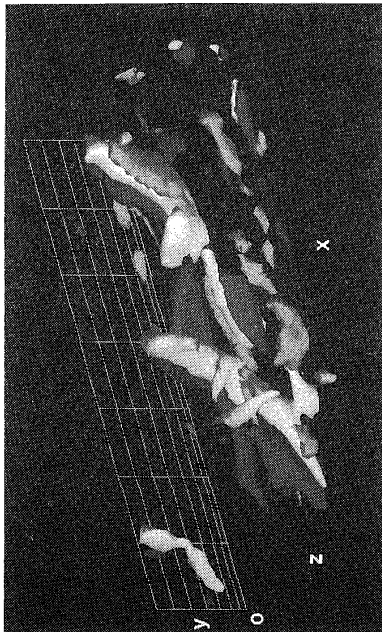


Fig. 5 3D contour surface of shear product:
 White, $p'^+ < -3.0$;
 Dark gray, ejection : $(u'^+v'^+)_2 < -3.0$;
 Light gray, sweep : $(u'^+v'^+)_4 < -3.0$.



Fig. 6 Production for $u'v'$ in the y - z plane:
 White to black, $-v'^+2\frac{\partial u'^+}{\partial y^+} = 0$ to -0.4 .

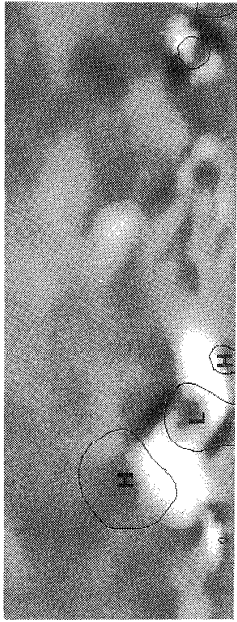


Fig. 7 Velocity-pressure gradient correlation for $u'v'$ in the y - z plane:
 Gray to black, $-(v'^+\frac{\partial p'^+}{\partial x^+} + u'^+\frac{\partial p'^+}{\partial y^+}) = 0$ to -0.4 ;
 Gray to white, $-(v'^+\frac{\partial p'^+}{\partial x^+} + u'^+\frac{\partial p'^+}{\partial y^+}) = 0$ to $+0.4$.

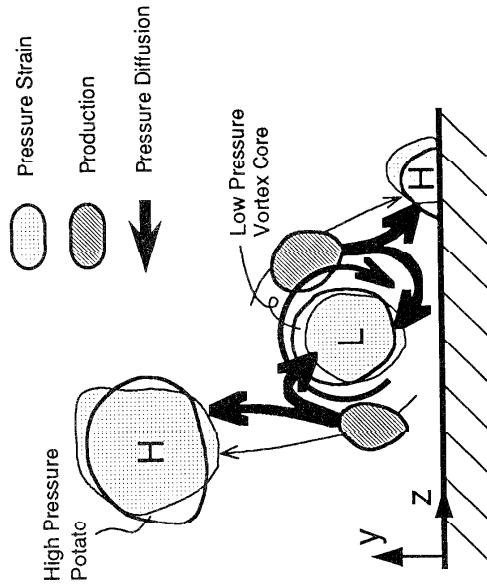


Fig. 8 Relationship between a near-wall quasi-streamwise vortex and production, dissipation and diffusion of Reynolds stress.

AVSによる解析結果の可視化

宮地 英生 (クボタコンピュータ)

1. はじめに

大型汎用機による中央集中型の環境から、小型ワークステーションによる分散環境へとダウンサイジングが進み、数値計算も手軽に各自の卓上マシンで行なえる時代となってきた。

カラービットマップディスプレイが個人利用できるようになり、ビジュアルなインターフェイスやグラフィックスがパーソナルに利用できる環境が整いつつある。それに伴い、ハードのみならずソフトウェアもパーソナルな環境が要求されている。しかし、解析自身がテーマの研究者は、ユニークな計算コードの開発に注力しても、結果を吟味／解析するためのオリジナルなグラフィックスソフト開発まで手が回らないのが現状であろう。

このような解析者の個人個人のニーズに答えるために開発された可視化ソフトが本稿で紹介するソフトウェアAVSである。

2. AVSの構成

AVS はアプリケーション・ソフトとソフトウェア開発環境の両方の特徴を備えている。

(1) アプリケーション・ソフトとしての機能

- ・ Image Viewer : イメージデータの表示／画像処理
- ・ Graph Viewer : グラフデータのプロット
- ・ Geometry Viewer : 3次元幾何データの表示／回転／拡大・縮小
データの書式を合わせるだけで表示を得ることができる。

(2) ソフトウェア開発環境としての機能

- ・ Network Editor : ノンプログラミングで可視化ソフトを構築するツール
- ・ Layout Editor : ユーザインターフェイスの構築ツール
- ・ Module generator : モジュール作成ツール

パーソナルな可視化環境を構築するための機能のうち、特にネットワークエディタとモジュールについて次の項目で詳細に述べる。

3. ネットワークエディタとモジュール

ネットワークエディタは、ノンプログラミングで可視化アプリケーションを構築するためのビジュアルなエディタである。図. 1は、ネットワークエディタ起動時の画面レイアウトの略図であるが、ユーザはモジュールと呼ばれる小さなプログラムを このネットワークエディタのワー

クスペース上で組み立てることでオリジナルの可視化アプリケーション（以下これをネットワークと呼ぶ）を作ることができる。

図. 2は、一部が加熱された平板上を流体が通過した場合の温度分布の表示例である。時間は上から下に経過している。これを表示

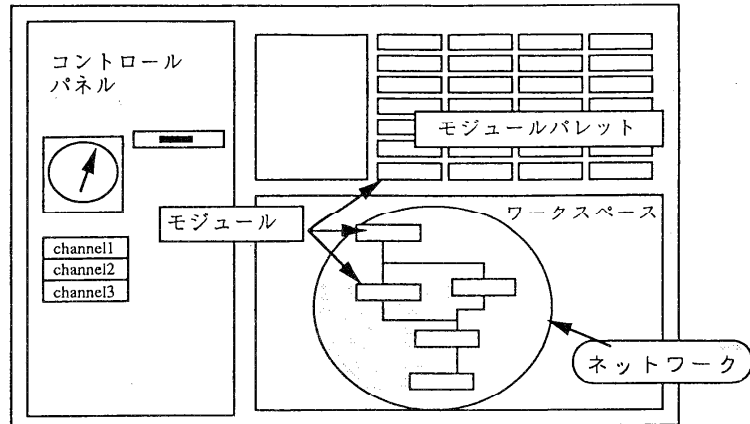


図.1 ネットワークエディタ画面レイアウト

するためのネットワークが図. 3である。図中で四角で囲まれたそれぞれがモジュールと呼ばれるもので、各モジュールはそれぞれ以下の作業を行なうことで1つの可視化アプリケーションの役割を果たしている。

- read field データを読み込む。
- extract scalar 温度データを取り出す。（計算データは速度／圧力も含む）
- generate colormap 温度に応じた色の割り付けをする。
- field to mesh 各格子の頂点に、温度に応じた色を付けたポリゴンを作る。
- geometry viewer ディスプレイに結果を表示する。

この表示は、シェーディングによる温度分布表示であるが、これをラインによる等温度線図にする場合は、シェーディングのコンタを生成している field to meshのモジュールを line contour モジュールに取り替えることで実現できる。（図.2 一番下）

この line contour モジュールは AVSの基本機能ではないが、AVSユーザ会のパブリックドメインモジュールを利用している。ネットワークエディタはノンプログラミングツールではあるが、モジュール自体が存在しない場合はアプリケーションを組み立てることはできない。しかし、ユーザが新たに不足したモジュールを作成するためのツールとして Module Generatorがあり、また各モジュールは特殊言語ではなくC言語またはFORTRAN で記述できるので、これまでのプログラム資産を利用することもできる。さらに、米国AVS National Centerや、日本AVSコンソーシアムでパブリックドメインソフトを管理しているので世界中で作成されたモジュールも利用できる。

4. データフォーマット

AVS で扱えるデータの中で数値計算に利用できるタイプは2種類ある。

- ・ field 型データ

field データは、差分法で解析されたデータを可視化するために利用できる。

各方向の格子数や各頂点の持つデータ数/タイプなどのヘッダと、データと座標値のための2つの配列からなる構造体である。

- ・ ucd 型データ

ucd は Unstructured Cell Dataの略で、有限要素法などで使われる非構造格子データを可視化するために利用できる。各ノードの座標値、各要素のタイプ、要素を構成するノード番号、各ノード/要素上のデータなどから成る構造体である。

どちらのデータタイプに対しても、スカラー量に対する任意の断面のコンタ図、等値面、ボリュームレンダリング、ベクトル量の矢印表示、などの基本的な可視化機能を利用することができる。(図. 4: 3次元室内空調計算時の等温度面表示例)

5. オリジナル可視化プログラムでの作成例

図. 5はオリジナルの2次元熱流体解析結果可視化ソフトのモジュール構成と可視化例である。計算は下加熱/上冷却の平行平板間の自然対流計算で、表示は流れ関数値の等値線表示である。本計算は U, V, P, T の変数を使って計算したため、オリジナルの出力結果には流れ関数値が含まれていない。そこで、従来利用していた可視化プログラムの中から、 U, V の速度から流れ関数値を計算するサブルーチンを AVSのモジュールにして可視化を行なった。従来からある FORTRANサブルーチンプログラムの入出力の引数を合わせただけなので10分程度で新しいオリジナル可視化プログラムを作ることができた。

図. 6は Graph Viewer を使った例で、レイリー数を変更して行なった複数の計算結果から、レイリー数-平均 Nu 数のグラフを表示したものである。過去の計算結果を実線で、本計算結果をマークで表示している。

6. おわりに

科学技術計算の可視化では「美しい3次元グラフィックスは必要ではない。分析・設計に必要な情報があればよい。」とよく言われる。確かに、カラーグラフィックスを見ていると、いかにもデータそのものを観察している錯覚に陥り易い。データ自身を見ているのではなく、数値を何らかの形で色や座標値に変換した結果を観察しているのである。計算データの何を、如何に見ているのかちうことを忘れると結果の評価を誤る可能性がある。

AVS は、これまでブラックボックスであった可視化の過程をビジュアルに見せることにより、ユーザに可視化が何をしているかを明確にしている。解析者自身の可視化への参加なしに、本当に見たいものが一瞬に表示できる理想の環境は構築できない。ぜひ、より多くの解析者が AVSによって可視化の世界へちよつとでも踏み込んで頂けることを願っている。

参考文献

[1]宮地：「可視化ツールを部品化したビジュアライゼーションソフトAVS」 COMPUTER SIMULATION VOL2-1,1992.2

[2]クボタコンピュータ：「3次元データのリアルタイム・ビジュアライゼーションツール AVS」 PIXEL 1992.3月号 pp.141-144

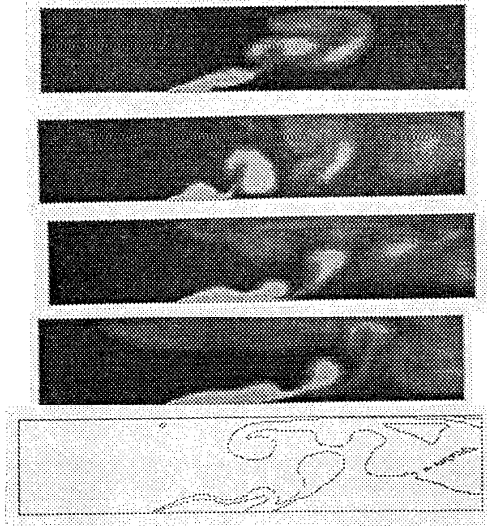


図.2 加熱平板上の流れ

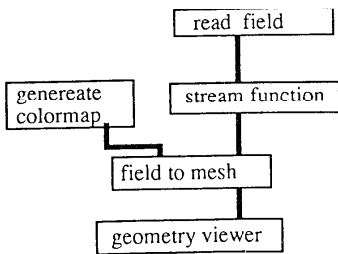
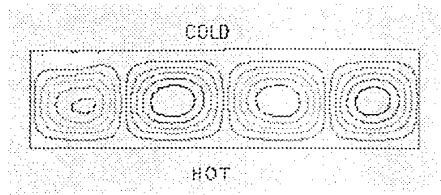


図.5 等流れ関数値線表示ネットワークと表示

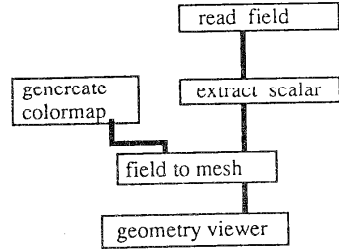


図.3 ネットワーク作成例

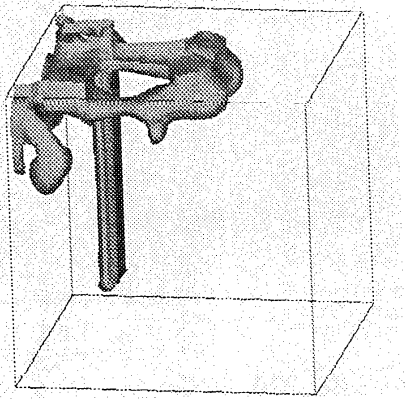


図.4 3次元室内空調計算の等温度面表示

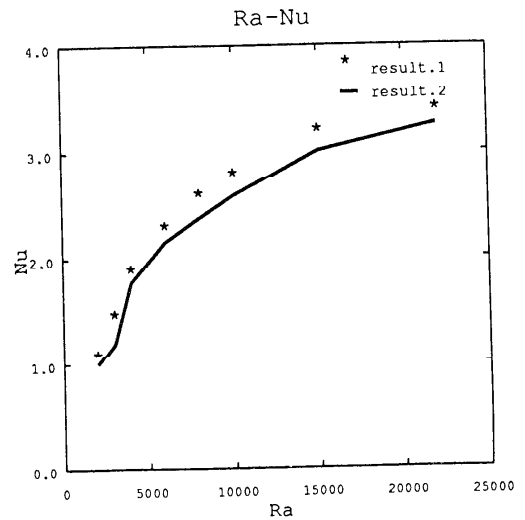


図.6 グラフビューアによる表示

熱流体解析可視化評価システム 「FIELDVIEW」

コベルコシステム株式会社

エンジニアリングシステム事業部 藤川泰彦

1. はじめに

近年ではサイエンティフィック・ビジュアライゼーション・ソフトといった言葉も定着し、コンピュータ、特にエンジニアリングワークステーションの発達により、その利用に拍車がかかっている。現状では、こういったサイエンティフィック・ビジュアライゼーション・ソフトエアの利用者の60%近くが自分達のグラフィック・ソフトの半分以上を自分で書き、利用者の残り40%は3分の2以上を書いているという報告が出ている(1)。本稿で紹介する可視化評価プログラムFIELDVIEWは熱流体解析をはじめ研究開発における研究者のこういった問題を解決し本来の研究の質と効率を高めることを目的として、米国UTRC(United Technologies Research Center)とIntelligent Light社で共同開発されたビジュアライゼーションプログラムである。航空宇宙、自動車、化学、建築分野で実績を誇る。

2. 適用分野

FIELDVIEWは熱流体解析をはじめ多くのスカラ、ベクトル場の実験解析結果データに対し以下の課題をもつビジュアライゼーション分野に効果的なツールである。

- 1) 現象解明 従来の評価方法では見えない現象を可視化し現象を理解する。
- 2) 使い易さ グラフィックのためのプログラムの作業はまったく無くする。
コマンドを使わない会話式の簡単な操作。大規模データ対応。
- 3) 高精度 高い精度による内部計算(ストリームラインの積分計算など)。
- 4) 結果の保持 プレゼンテーション、リスタート、アニメーションへの対応。

3. 稼働環境とソルバーインターフェイス

FIELDVIEWはSGI(シリコングラフィック)の全モデル、IBM RS6000、HP700シリーズ、SUN上で稼働する。グラフィックは、GL、STARBASE、Xに対応し、FIELDVIEW自身もMOTIFウィンドウマネージャの環境の元で稼働する。これにより画面表示と操作方法はすべての対応機種において同一である。グラフィックや内部処理においてプログラムのチューニングされており良好なレスポンスを得ることができる。システム構成を図1に示す。ユーザーは、図1の処理フローは意識せずに任意の時に任意の処理を並行して実行することができる(面のスウィープと視点変換、内部計算の同時実行など)。入力データはCFD(数値流体解)分野で実績が高いPLOT3D(米国NASAエイムズ研究所開発による流体解析のための可視化ソフト)形式に準拠する。また、Function Fileと呼ばれるFIELDVIEW独自ファイルを利用することでユーザーはソルバーから出力される物理量をすべて読み込むことができる。対応可能な格子データは通常のシングルグリッド、領域分割データ、I-Blank(流体、非流体領域属性)データ、複数の解析結果データなどである。またFluent, STREAM, SCRYU, Flow3D, Phoenixと市販ソルバーのためのインターフェイスも用意している。

4. オペレーション方法

FIELDVIEWは熱流体解析データの可視化評価のために必要な高度なグラフィック機能を標準で備えており、ユーザーにとってプログラムの作業はまったく必要としない。

ユーザーはソルバーからの出力データを読み込むと、ただちに目的の可視化のための操作が行なえる。FIELDVIEWの操作は直接熱流体工学で使われるワードで行なわれ、コマンドを覚える必要は無い。操作はMOTIFによって書かれた操作パネルのカーソルバーやスイッチをマウスによりコントロールすることにより行なう。操作パネルは必要に応じて入れ替えながら使用する。また、具体的な数値入力が必要な時はキーボードからの入力も可能である。

グラフィック出力のための操作を始める前にまず可視化のための評価対象としたい物理量（圧力、温度など）をスカラ、ベクトル、アイソサーフェス（3次元等値面）、スレッシュホールドといった4種類のData Register属性ごとに独立して割り当て宣言する。その後、以下に示す各操作パネルを利用して目的のグラフィック出力を得るための操作を行なう。

Computational Surface 操作パネル

I,J,K面の定義をカーソルバーのスライドにより行なう。スカラ、ベクトル、オブジェクト表示/メッシュ、シェーディングコンタ、ラインコンタ/透明表示/多面表示/グラフ出力/デジタル値抽出/スレッシュホールド（規定値による表示制限）/面の自動スイープ/評価領域の抽出 など。

Iso-Surface 操作パネル

3次元等値面や任意断面カットなどの定義を行なう。状態量の異なる複数のIso-Surface定義/スライサーによる任意断面カット/幾何形状（ r 、 θ 、球など）による断面カット/ベクトルのマッピング/独立したスカラによるカラーマッピング/透明表示/定義値の変化によるアニメーション/スレッシュホールドによる表示制限 など。

Stream Line 操作パネル

パーティクルの開放点を定義しパーティクルパスを計算表示する。2次オーダーレンゲクッタ法による高精度積分計算/積分精度コントロール/上流、下流方向の計算/スカラマッピング/多様なストリームライン表示/アニメーション/グリッド位置に依存しない開放点定義/開放点のエディット機能/オイルフローパターン計算/領域分割やCメッシュなどの境界面を越えるストリームライン計算

Title 操作パネル

文字、スカラカラーレベルなどのレポート用注釈編集パネル。各種フォントの選択/カラーバー、カラーラベル/矢印/テキストサイズなどの変更/位置修正など。視点変換や、カラーコントロールについてもマウスと操作パネルによりインターラクティブに操作する。

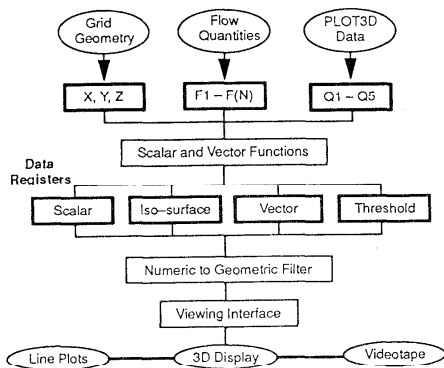


図 1 FIELDVIEWシステム構成

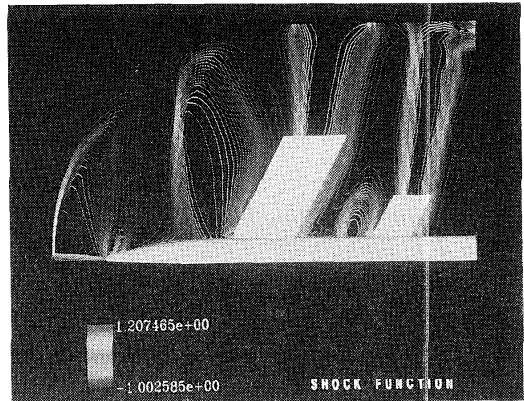


図 2 Shock Functionによる衝撃波分布

5. 機能の特徴

FIELDVIEWの特徴を以下に示す。

5.1 内部計算機能と拡張性を持つ

FIELDVIEWでは、NASAエイムズ研究所による最新の流体解析評価技術に基づき、ソルバー出力以外の物理量を内部計算することが可能である。この内部計算機能により圧力、温度、渦度、衝撃関数、エンタルピなど約数十種類の評価関数の計算が行なえ、これまでとは違った観点で現象評価を行なえる。このうち例えば図2に示すようにShock Functionにより衝撃波の位置を鮮明に直接観察することができる(2)。また渦観察に有効なHelicityなども計算できる(3)。こういった内部計算は、HELDVIEWのオペレーション中いつでも実行可能で可視化対象の物理量を変更できる。気体定数の変化や相対速度、反応流の計算といったユーザー独自のデータや組み込み関数により機能拡張をすることも可能である。

5.2 簡単で使い易い

FIELDVIEWではグラフィックのためのプログラムの作業は不要なことは先に述べた通りである。すなわち、ソルバーからのデータを読み込めばすぐに目的のグラフィックイメージを得るための操作が可能である。すべての操作パネルは感覚的に非常に使い易いように設計されている。また、パッケージ化されチューニングされたプログラムであるため大規模なデータに対しても良好なレスポンスを得る。領域分割数の多いデータについても、評価対象領域のみを自在に抽出したり、流れ場全体の任意断面カットや境界を越えるストリームライン積分計算とそれらの画面上でのスウィープやアニメーションが可能である。また、いかなる状態でもセーブ復起可能なりスタート機能も非常に便利であり、研究の効率を飛躍的に高める事ができる。

5.3 結果の比較ができる

計算条件やモデル（格子数）の違うデータや異なる物理量（圧力と密度など）による横並べ比較行なうことは現象の理解に有効である(4)。FIELDVIEWは複数の異なる（もしくは同じ）データを同時に読み込み、表示コントロールすることができ、現象理解や方案の差異を見いだすのに重宝である。

5.4 グラフ化、デジタル値の取り出し

FIELDVIEWは指定された面におけるスカラ値のグラフ化機能を持つ。事前にData Registerに割り当てた関数を対象のスカラ値としてみなす。グラフの横軸はI,J,Kでも全体座標系のX,Y,Z軸でも指定可能である。表示されたグラフはマウスの移動（定義点の移動）に伴いリアルタイムに変化しピークポイントの発見などに便利である。また画面上の点を指定してその点のスカラ量、座標値といったデジタル値を読み出すことが可能で具体的な設計に効果を発揮する。

5.5 リスタートと豊富なプレゼンテーション機能

FIELDVIEWでは研究開発の効率を上げることを目的としてVTR装置による記録作業はできるだけ行わず、グラフィック画面上でアニメーションをも観察できるリスタート機能を持つ。この機能を利用することでいかなる複雑なオペレーション状態でもその操作と表示状態（アニメーションも含め）をデータ名で登録でき、いつでも再スタートができる。計算条件の異なる計算結果に対しても、この状態名だけを指定するだけで最終目的のグラフィックショットを得られることができる。アニメーションのシナリオはFIELDVIEWにおけるScriptランゲージと呼ぶシナリオ作成用の言語を使い簡単に編集できる。ビデオコントローラはMINI-VASを標準サポートしており、コマ取りのためのパラメータのみを指定するだけでよい。他のコントローラも対応可能でNVS2000用のインターフェースもオプションとして用意している。EPSFフォーマットに対応しているためカラーPost Scriptプリンターから美しいグラフィック出力を得ることもできる。

6. おわりに

具体的な製品開発や研究においては数値解析以外にも物理実験などのように重要な要素がある。またCFD分野での非構造格子型のデータの普及も始まっている。そういった背景でFIELDVIEWが熱流体解析のためのビジュアルゼーションツールとして多くのニーズに常に対し、工学的視野に立った高いレベルで応えるための継続した機能拡張が課題である。

文 献

- 1) Greg.Freiherr&Gray Pfitzer:The New Breed. Computer Graphic World, January 1991
- 2) 藤井孝蔵・田村善昭：「高速流体の数値シミュレーションと可視化」,流れの可視化 学会誌, 第11巻41、1991年
- 3) Y.Levy & D.Degani:"Graphical Visualization of Vortical Flow by Means of Helicity", AIAA Vol.28, No.8, Aug.1990,pp.1347-1352
- 4) 藤井孝蔵・田村善昭：「流体解析におけるサイエンティフィック・ビジュアルゼーション」,PIXEL, 89/12月号

汎用流体可視化ツール DATA VISUALIZER

住商エレクトロニクス(株) 電子システム事業部 木本 則靖

1.はじめに

米国 Wavefront 社は1984年設立以来、CG分野でのソフトウェアを専門に開発販売して来ました。エンターテイメント分野からインダストリアル分野までサポートする各種ソフトウェアを、Visualizer Series として販売しています。Visualizer Series には形状モデリング、アニメーション、レンダリング、ペイント、ビデオ編集等々あります。これらの know-how を元に3D解析データの可視化ツールとして開発されたものが Data Visualizer です。本稿では Data Visualizer の機能説明と流体解析分野での利用例を御紹介します。

2.概要

Data Visualizer は導入されたその時から、最高級のビジュアライゼーションが出来るよう設計されたパッケージソフトです。マルチプラットフォーム、フローティングライセンスに対応し、ユーザ環境に合わせて使用することが出来ます。たとえば、ネットワークで接続されているワークステーション (IRIS,SUN,HP,IBM,DEC,NEWS等)の上で同時に指定されたファイル数での使用が可能です。

メニューは Motif like なスタイルを採用し Function の見通しをよくする為2階層以内のポップアップメニューとしています。オペレーションは、マウス、キーボード、バッチファイルの3モードをサポート自分にあったスタイルを選べます。メインメニューを図1に示します。



(図1.メインメニュー)

ツールとして particle systems, cutting planes, iso surfaces, volume render を用意、それぞれを必要なだけミックスして使用出来ます。データタイプは規則グリッド、不規則グリッド、非構造グリッド、マルチブロックグリッドをサポート構造解析から流体解析までよく使用されるグリッド全てに対応出来ます。

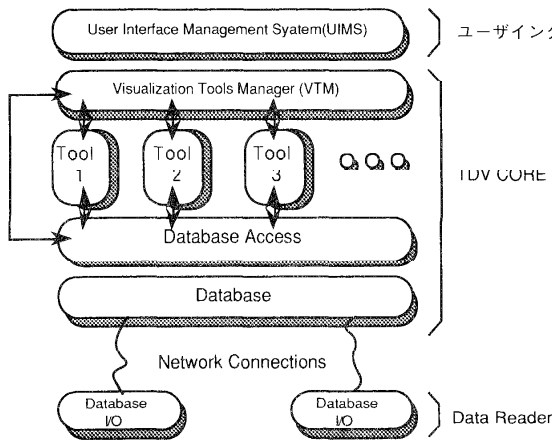
アニメーションは2ポイントを指定して自動的に中割りを行なうキーフレームアニメーション機能により容易に作成出来ます。画面上でリアルタイムに再生するか、ディスクへファイルとしてセーブし編集処理をしてコマ撮りをするか、目的にあわせて使用します。最近ではデータ量が増大しているため、リアルタイム再生よりはコマ撮りを行なうことが多くなっています。コマ撮りをする場合には、

ビデオ編集機能もサポートしているので外部に依頼することなくビデオを完成することが出来ます。データが時間とともに変化するような時系列データのアニメーションも、データタイプを指定するだけで出来ます。時系列データ間の中割りも出来るのでスムーズな動きを作成出来ます。

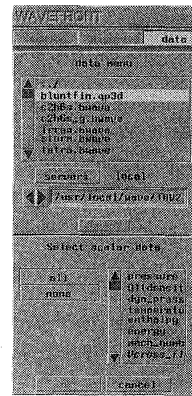
ハードコピーを必要とする場合は、ディスクへセーブするフォーマットをポストスクリプトファイルにすれば容易にプリントアウトすることが出来ます。プリンターも各種サポートしているのでOHP,スライド,フルカラープリントなどでの資料作りが出来ます。このように Data Visualizer は3D解析データの可視化からプレゼンツールの作成までサポートしています。

3.データの読み込み

Data Visualizer ではデータ読み込み部分(Data Reader)をソース公開しているので、ユーザー独自のフォーマットを追加することが出来ます。現在標準でサポートしているフォーマットは Plot3d,wave,avs があり参考にすることが出来ます。次期バージョンでは、Fidap,Phoenix,Fluent,IDEAS 等のフォーマットが追加される予定。図2.に Data visualizer の Architecture を示します。



(図2 .Architecture)



(図3 .plot3d reader メニュー)

Data Visualizer はUIMS,CORE,Data Reader の3つのブロックに分けられます。この中の Data Reader の部分を公開しています。Data Reader はネットワークをサポートしており、解析プログラムが稼働しているコンピュータ上に移植することによりネットワーク経由ダイレクトに Data Visualizer のメモリーに読み込むことが出来ます。この時に各種パラメータの設定や関数の指定をするためのメニュー作成用ライブラリーも用意されており、独自の Data Reader を作成することにより Data Visualizer のメニューからオプション入力出来るようになります。図3は plot3d フォーマットのデータを読み込むメニューです。scalar data から関数をピックアップすると、読み込み時にその scalar を計算することが出来ます。このメニュー及び関数計算部分は全てユーザー側で変更追加できるようになっています。

作成出来るメニュータイプは5種類あります。

- Pick many menu : 複数のオプションをセレクトするメニュー
- Pick one menu : 一つのオプションをセレクトするメニュー
- OK/cancel menu : 確認メニュー
- ASCII menu : 文字列を入力するメニュー
- Multi menu : 複数行の文字列を入力するメニュー

この機能は現在ライブラリー提供ですが、次期バージョンでは、グラフィックメニューから作成出来る様になります。

4. ツールの種類

ツールには解析データに対してセットデータの状態を視覚化するための解析ツールとそれに対して説明を加える注釈ツールがあります。

解析ツール

- probe : 指定した位置からベクターを追跡してライン、リボン表示する。
- cut plane : ボリュームデータを自由に平面でカットして、断面での等高線表示、カラーシェーディング表示をする。
- isosurface : 特定のスカラー値やレンジを指定し、等値面、等値ボリュームを表示する。表面に他のスカラー値によりカラーリング、ベクター表示する。
- particle : 微粒子を飛ばすことでベクターの流れを観察する。
- geometry : 解析データに影響を与えるような形状データを表示する。CAD データからの取り込みが可能
- points : カラーリングされたポイントを表示

注釈ツール

- ruler : 定規を表示したり、2Dのグラフを作成する
- label : 3Dフォントを表示する

この他にもカメラ、ライト等細かな設定ができます。これらのツールはインタラクティブにマウスで設定され、複数を同時に使用出来ます。

5. アニメーション作成編集

アニメーション作成はスタートとエンドの位置を指定しその間を何フレームで補間するかを入力するだけです。画面上でそのままビデオに録画する場合は表示スピードに依存しますが、コマ撮りの場合はビデオレート(30フレーム/秒)を考慮してフレーム数をさめる必要があります。

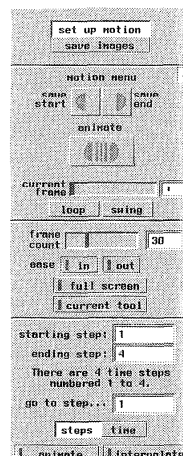
時系列データの場合はデータファイルの拡張子にタイム番号を付けておけば、自動的にデータを入れ替えてアニメーションを作成します。このときデータが1秒と10秒のデータしかなくても間をリニア補間して2秒から9秒のデータを自動作成しスムーズなアニメーションにすることが出来ます。

save image を指定するとディスクへセーブします。

イメージフォーマットは8種類サポートしています。

- qtl : Quantel デジタルビデオフォーマット
- ria : Wavefront ランレンクスエンコードフォーマットA
- rib : Wavefront ランレンクスエンコードフォーマットB
- tga : Taraga フォーマット
- vst : Vista フォーマット
- epsg : グレースケール ポストスクリプトフォーマット
- epsr : RGB ポストスクリプトフォーマット
- epscl : CMYK ポストスクリプトフォーマット

ポストスクリプトフォーマットは資料を作成する時に便利です。



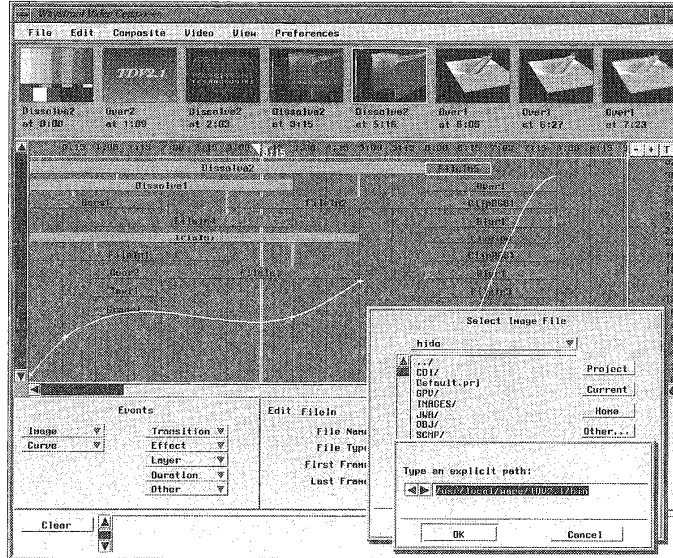
(図4.アニメーションメニュー)

ビデオコンポーザについて

ビデオコンポーザはワークステーション上で、イメージ合成、レコーディング、プレーバック、特種効果処理をサポートするものです。グラフィックメニューによりイメージを表示しながらタイムスケジュールを作成します。タイトルの挿入やレイヤ 処理、ディゾルブ処理など今までビデオ編集の専門家に任せてきた処理が容易に出来ます。プレゼン用ビデオを作成する為には必ず必要となるツールです。メニューを図5に示します。

イメージリスト

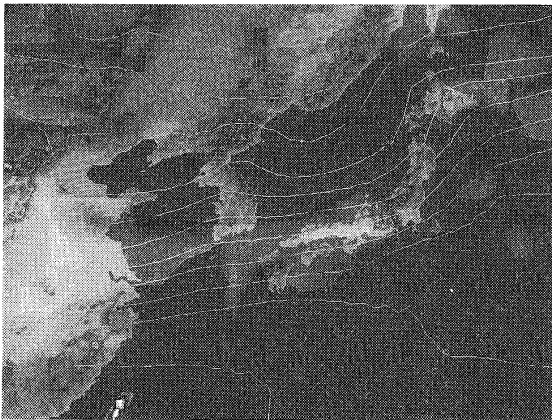
タイムスケジュール



(図5ビデオコンポージャーメニュー)

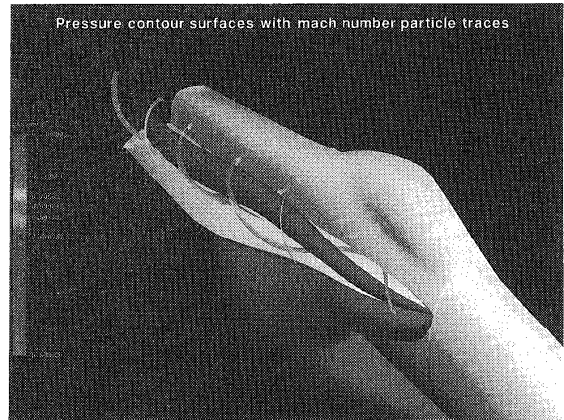
6.表示サンプル

気象データ



日本上空の相対湿度を Isosurface で
地表温度を等高線で可視化

戦闘機気流



f18 戦闘機の翼上の圧力を Isosurface で
Mach number を Particle traces で可視化

7.おわりに

Data Visualizer はユーザインターフェイスを最も重要なファクターと考え開発されました。オペレーションが簡単でたくさんのツールを効率よくアクセスしコントロールする機能を備えています。通常2時間程度のトレーニングで使用でき、技術者は本来の可視化作業に専念することが出来ます。言葉で使い易さを説明するのは難しいことです、ぜひ御体験いただきたいと思います。

<故棚澤泰先生を偲んで>

棚澤泰先生の御逝去を悼む

小林清志（豊田工業大学）

第4代会長棚澤泰先生はかねて病気療養中のところ、平成4年7月27日、心不全のため、御逝去されました。満86才の生涯でありましたが、謹んで哀悼の意を表します。

思えば、私が始めて先生にお目に掛かりましたのは、戦争たけなわの今から丁度50年前、大学に入学して先生のご講義を受けた時でした。先生は当時の飛び級で進学されたこともあり、この時36才、その一年前に教授になられたばかりで、少壮教授と言うよりは青年教授でありました。

卒業後直ちに先生の研究室に入れて頂きましたが、当時はすでに戦局は急を告げており、先生は海軍航空技術廠から重大な研究の応援を頼まれていた時であります。海軍が密かに開発研究を進めておりました、今で言うジェットエンジンに関するものであります。その推進力の基になる燃焼室の問題でありました。高速気流中に吹き込んだ燃料がどうしても燃えなかったのが、先生の手にかかって見事に成功し、絶大な信用を得たことは勿論ですが、その結果として、初めてのジェット機「橘花」が完成、終戦直前でしたが、試験飛行に成功しました。その時のことをそつと目を輝かせてお話下さったのも、昨日のように記憶に蘇って参ります。未熟ながら我々もお手伝いさせて頂いたことは、後々のために大きな教訓を頂いたと思っています。

先生は決して派手な宣伝は好まれず、地道に研究の本道を歩まれた方であります。初期におきましては、伝熱に関する問題のご研究が主でありました。伝熱の図式解法に関する研究も有名であります。圧巻は周期的熱伝導問題を理論的に解析し、温度差による水分の移動を巧みに防いで、湿った物質の熱拡散率測定に成功したことでありました。この論文は日本機械学会「故井口教授及び故ウェスト教授記念論文賞」の受賞論文に選ばれています。

その後、気化器の研究から、その基礎となる液体微粒化の研究へと進まれました。液体微粒化という言葉も先生が始めて使われた言葉ではなかったかと思っています。この分野で先生が掘り起こされた問題は広く、深く、そして実用と密接に結びついており、後の鉱物繊維製造法の研究、燃焼に関する研究等も、液体微粒化の研究から派生したものと解釈出来ます。鉱物繊維製造法の研究は大変独特な興味深いものでありましたが、燃焼に関する研究でも多くの成果を挙げております。中でも「内部蒸発燃焼器の研究」は昭和37年日本機械学会賞を受賞致しております。

先生はライフワークとして、液体微粒化の研究に全力を投入されました。1978年同じ道を進む国内外の研究者が相計って、第1回液体微粒化国際会議を東京で開催する運びになりました。

第1回を東京で開くことにつきましては、先生のご業績が大きな力となっておりますことは申すまでもありません。ここで国際学術論文賞としての「棚澤賞」の誕生の経緯について述べておく必要があります。

第1回東京会議が終わって暫くしてから、英国、インペリアル・カレッジのアイゼンクラーム博士から、私は一通の手紙を受け取りました。その内容は、この国際会議に学術論文賞を設けるべきである。そしてその名前は、この分野でパイオニアの偉大な功績を挙げたプロフェッサー棚澤の名前をつけた賞が最もふさわしい。と言うものでした。喜びと驚きと一緒になった気持ちで、私は国内の主だった研究者にその話の相談をしておりましたが、そのうちに第2回の液体微粒化国際会議が、米国、ウィスコンシンのマディソンで開催されました折り、アイゼンクラーム博士から、同じ趣旨のことがはっきりと提案されました。それを受けた形で国内では実現に向けての組織作りが行われ、私を含めた数名の門下生に実行が委託されました。実現のめどがたちましたので、1985年の第3回ロンドン大会で、アイゼンクラーム博士の提案を受け、次回の会議から棚澤賞を設ける旨、日本代表の高島洋一教授より提案され了承されました。

1988年、第4回液体微粒化国際会議が、仙台で開催されました折り、始めて第1回棚澤賞の受賞式が行われ、先生ご自身の手から受賞者に渡されました。この時の光景は私にとりましても、生涯忘れられないもので、ほうふつとして、眼前に浮かんで参ります。

先生ご自身の手から、第2回も第3回も渡して頂いたのですが、この時が最初にして最後になってしまいました。また先を見通した見識の高い提案をされたアイゼンクラーム博士もこの時既に故人となっており、誠に残念なことでありました。しかし、この賞は回を重ねる毎に評価が高まり、液体微粒化の分野では、最も権威ある学術賞として、永く続くものと考えられます。

先生は、東北大学工学部長、豊田中央研究所名誉所長を始めとして、各種学会、教育界等で要職につき大きな貢献と輝かしい足跡とを残されました。これらのご業績及び学術上のご業績のことは申すに及びませんが、永い間先生に接して参りました者の一人として、先生の間人としての考え方、生き方、お人柄につきまして、心から尊敬致しておりました。本当に大きな人を失ったことを残念に思います。ここに謹んでご冥福を祈ります。

棚澤 泰先生の御逝去を悼む

永井伸樹 東北大工

元日本伝熱研究会会長、東北大学名誉教授 棚澤 泰先生は、平成4年7月27日に名古屋市相生山病院において心不全のため逝去されました。わが国における伝熱工学、燃焼工学、液体微粒化、繊維製造の研究分野において、多くの独創的、先駆的な業績を残された先生は、享年85歳の大往生でありました。ここに慎んで哀悼の意を表します。

先生は、昭和4年東京帝国大学工学部機械工学科をご卒業後、東北帝国大学工学部機械工学科に講師として勤務され、伝熱学の創始者のお一人であられた抜山四郎先生のもとで指導を受けられ、伝熱と液体微粒化の研究を始められました。昭和7年助教授に昇任されてからは、「電気槽実験による伝熱問題の解明」、「湿れる物質の熱常数測定法」、「伝熱式の図式解法」、「フィンに関する計算図表」など、その後の伝熱工学の飛躍的な発展に役立つ有名な成果を挙げられました。

また当時わが国においてほとんど未開拓の分野であった液体微粒化に着目され、他に先駆けて系統的に研究を始められましたが、これが先生のライフワークとなりました。初期のご研究として手掛けられた「微小液滴の大きさの測定法」は、簡便な液滴測定法として現在も重用され、また「空気による液体微粒化」の一連の研究は微粒化研究の内容と研究手順を示すとともに、提唱された噴霧性能の実験式は半世紀を経た今も世界的に利用されています。そしてこのご研究をもとに執筆、連載された「気化器の研究」（機械及電気、昭15）はエンジン技術者の必読の書となりました。

昭和15年、先生は創設された航空学科に移られ、昭和16年教授に昇任されて学科の基礎堅めと教育研究に没頭されました。「回転円盤による微粒化」、「渦巻式微粒化」、「振動微粒化」、「衝突微粒化」、「滴状微粒化」など、当時考えられるすべての微粒化法について現象や特性を解明され、また国産初のジェットエンジンを搭載した「橘花」の開発に精力的にあられたのもこの頃でありました。

しかし、わが国の敗戦とともに多くの有為な人材を輩出してきた航空学科は廃止され、工業力学科さらに精密工学科へと学科変遷をやむなくされましたが、その間先生は、指導的な立場で教育研究体制の確立に尽力されながらも、一日たりとも研究を欠かすことがなく、「高圧高速液流の微粒化」、「渦巻噴射弁の微粒化」、「ディーゼル噴射弁の微粒化」などのほか、「回転円盤による液体の繊維化」にもご研究を広げ、また、「ガスタービンにおける高負荷燃焼」、「高温気中の液粒と噴霧の蒸発および燃焼率」、「高温面に接触する液粒の蒸発と燃焼」

などのように、豊かな発想と独創的な実験手法を用いて萌芽的研究を数多く手掛けられました。そして、ご著書「ガスタービン」(養賢堂, 昭29)、「ディーゼル機関I」(熱機関体系6, 山海堂, 昭31)は、これまでの体験と研究に基づいて書かれたユニークで基礎的な名著として高い評価を博しました。

先生は、昭和36年から東北大学評議員、昭和40年には工学部長となられて、大学および工学部の管理運営にあたられ、特に本学の総合移転計画の立案と実施の大事業に誠心誠意取り組まれて、工学部発展の基礎堅めに貢献されましたが、この間も寸暇を割いて白衣姿で研究室に入られ、液体微粒の標準的な粒径測定法として「沈降塔による粒度分布測定法」を確立され、また「液体噴霧粒群の大きさの表し方」(機械の研究, 昭38)、「スプレーテクノロジーその体系化について」(機械学会誌, 昭38)を執筆されて、液体微粒化の集大成と今後の研究の研究の方向を示唆されました。さらに、「内部蒸発燃焼器」、「うず巻燃焼器」などの実験によって、不安定振動燃焼機構を解明し、新しい高負荷燃焼方式を提案されたほか、カーヒータやわが国初の自動車用ガスタービンの開発にも意欲を燃やされました。

41年間の長きにわたり日夜研究に没頭され、多くの功績を残された先生は、昭和45年3月東北大学を停年ご退官になりました。ご退官後は、株式会社豊田中央研究所の名誉所長に就任され、所長の重責を果たされながらも、自ら自動車の排気浄化、電子燃料噴射などの研究開発を手掛けられ、自動車技術の発展に寄与する幾多の成果を挙げられましたが、研究中的お姿は大学在任中と全く変わらなかったと伺っております。昭和52年代表取締役を退かれた後、常勤監査役、顧問を歴任され、平成元年に同社を退任されました。

先生はご研究のかたわら、当学会の前身である日本伝熱研究会の会長をはじめ、多くの学会の役員を歴任され、わが国の学術の向上に貢献されました。また、液体微粒化に関する先駆的、体系的な研究成果は世界各国から高く評価され、国際会議では権威ある「棚澤賞」が設けられました。昭和52年11月、先生は永年のご功績に対し勲二等旭日重光章を授与され、ご逝去にあたり従三位が叙位されました。

昭和53年、先生は永年の研究生活を通して思索してこられた哲学を、「工学と技術の本質」(養賢堂, 昭53)にまとめられ、“心の遺言”として残されました。研究の奥深さ、厳しさ、楽しさを身を持って示され、晩年に至るまで真摯に学究して止まなかった敬慕する先生の溢れるばかりの情熱がこの名著から強烈に伝わってきます。

ここに、ご生前の先生のご活躍とお人柄を偲びつつ、心からご冥福をお祈り申し上げます。

出合いということは、本当に不思議なものと思う。もし、私が棚沢先生にお会いしていなかったら、また、先生の門下生になって居なかったら、今日の私を考えることはできない。

大学、4年生の卒業研究に先生の研究室に入らせて頂き、そして大学院5年間、そしてその後、先生の元を離れてからも、しばしば先生にお目にかかってお教を乞う機会があった。そして今も、先生の著書、論文はいつも私の座右にあり、これからもずっとお教を乞うことになるだろう。

私にとって、棚沢先生は3つの大きなことをして頂いた。最初、非常に良く教育をして頂いた。次には、私の生きる道、私の研究の方向を示して頂いた。そして現在は、不遜にもなんとかして、先生を追い抜いてみたいという、ファイトを沸かせ、常に私のそばにおられる。

私が4年生の4月、卒業研究として、回転円盤による微粒化の研究のテーマを頂き、いただいた研究の方向の説明を聞いた後、なにも微粒化についての基礎知識もない私は、なにか参考になる文献はないでしょうかとたずねると、「君のやる実験が重要で、文献などはないのだ」と最初のお叱りを受けた。

私が大学院の学生時代は、先生は毎日研究室においでになり、午後はだいたいそこでお過ごしになられた。実験をされないときは、研究室の入り口の鳥小屋の様なせまい部屋で、データの整理をされていたが、ほとんど毎日、午後びしりと、助手、技官の方とご自分の実験をなされるのが常であった。今から思うと、良くあんなに時間をさいて実験をなさったものと思う。しかし、常ずね、研究は自ら進んで手を汚さなければ、新しい現象に出会うこともなく、観察力も思考力も向上しない。といわれており、それを我々に実践して見せて頂いていた。

また、先生は「研究の手法は教わるものでなく、ぬすみとるようにせねばならない」とも言われた。私は先生が実験をなさっているところを、よく見させて頂いた。先生は西洋紙を二つ折りにした、ノートをご自分で作られ、それに丹念に火炎の様子など書き込まれ、またデータはご自分で読み、書き込まれて居るのが常で、何でも人任せにせず、自分からやられていた。自分の実験がすむと、夕方6時か、7時頃になって、我々の実験の所にやってこられて、一日の実験の報告をお聞きになり、方針を述べられた。私など、最初の頃は、「丸いメーターのついた、針の動くテスター」というものがあるので、それで測りなさい」とか、「この黒いタンクにフィルムをこのように入れて」と実験の初歩から懇切丁寧に教わったという記憶がある。

研究には時間がかかるものだ。ともいわれ、一つの結果を出すのに、あれもやり、これも検討して、長く待っていただいたこともある。修士課程の初めの頃は、一つのことを解決する

のにどのように、次のステップを踏んだら良いのかわからず、一日をぼっけとして過ごし、夕方先生がおいでになった時、何も報告することがなく、困った時もあった。その様なとき、「次の日の実験は、夜、家にかえって良く考えなさい」ともいわれ、まさに先生は我々にそれを、示して見せて頂いた。研究時の心構えは「考えることと、努力と、時間」の三つだと。そのように熱心に我々を教育して頂いたが、我々の方はその頃、まだ無頓着で、私は先生の意に反することを度々し、在学中三回も先生から「そんなことでは、破門にするぞ」といわれその度に謝ったものだ。

東北大学は仙台という、当時は東京からかなり離れた所にあり、いまほど東京での会議もなく、先生は本当に研究に時間を費やされ、多くの偉大な成果を出された。我々にとってはこのことは非常に幸いであった。また、先生のご活躍の時代は今ほど世界各国と交流も少なく、微粒化および噴霧燃焼では多くの成果をだされたが、その割には、世界の学者の評価が低すぎると思う。例えば、粒度分布の式にしても、先生が出された一般式から少しはずれた、狭い範囲の式を書いている外国の学者もあり、これは先生の成果が正確に伝わっていない証拠だと思う。これをもすこし正しく伝え、先生のでられた研究を今後世界に紹介することも、我々弟子たちの役目ではないかと考えている。

先生が液体微粒化学、噴霧燃焼工学等に残された大きな業績と、教育者、研究者として世に示された偉業に深く敬意を表すとともに先生のみたまの安かれと、お祈りいたします。

「百年の計」の教え

荒木信幸（静岡大・工）

東北大学工学部の青葉山キャンパスを訪れた人で、その環境の良さをほめたたえない人はいない。しかし、私が大学院の学生および助手として在籍した昭和40年前後まで遡ってかえりみたとき、このようなすばらしい青葉山になることを予想した人は何人いたであろうか。

当時は、繁華街の近くにあってきわめて便利な片平丁地区から、開拓部落であった青葉山へ移転するかしないかの大論争（開拓農民を巻き込んだ紛争と言ってよい）があったし、移転決定後は、青葉城を通る狭く曲がりくねった急な坂を登って重量機械を運搬した。

このような時にあって、棚沢泰先生は、評議員として、また、昭和40年からは工学部長として、積極的に移転計画を立案し実施に移されたが、事業の困難さのゆえに「百年の災い」となるとして根強い抵抗にあって苦勞された。事実、農学部のように移転を断念した学部も出た。

棚沢先生は、「百年の幸」という題の小冊子を発行し、一般学生、職員に対しても情報を流し説得された。その文章の最後の部分を紹介する。

「考えれば考えるほど、これらの災の源が走馬燈のように何回も何回も頭に浮かぶが、我々に、はっきりしていることは、「百年の災とせず、百年の幸としなければならない」ということである。

移転には災の源もあるが、幸の源もある。（途中略）

いま私は青葉山移転が幸であるか、災であるかと問われても答えることはできない。

たしかに移転時の過渡期に、教育上、研究上、または事務上、多大の、ぎせいが払われることは確かである。

しかし東北大学の青葉山への一番乗りを行う我々は常に優れた人間性、優れた妥協性、優れた計画性、優れた積極性、優れた創造性を磨きつつあるのである。

百年の災になるか、百年の幸となるか。

東北大学の工学部に関係ある人々 すべてが その鍵を握っている。」

移転が始まった時から数えて百年の四分の一の25年が経過した今、移転が「幸」であったことは明白である。つまり、棚沢先生の優れた洞察力と卓越したリーダーシップが証明されたといつてよい。

大学改革の嵐が吹きあれている昨今、その舵取りをしなければならない立場にあって、私は、折にふれて棚沢先生の百年の計の教えをかみしめながら思い出している。目先のことにとらわれず、せめて10年後に評価される改革を……と。

棚沢先生の教えは、この青葉山移転の例からもわかるように、しばらくしてからその真意をさとらせるものが多い。先生は私によく「常識」を身につけるように言われた。「そんなことがわからないようでは幼稚園生です」とも言われた。その常識とは、学問上あるいは技術上の知識を表面的にとらえながら、意味するところは人間としての人格そのものであったことが、教官として学生を教える立場になって少し分かるようになってきた。先生の「コモンセンス」と題する詩の一部を紹介する。

人、そのゴリラの親族たるを自覚し、
その本能の豚に似たるを客観し、
静かに 宇宙に生存する、最も優れた生物たるの悲しみを持て。
優れたものにもあらず。
しかも、なお、劣れるものにあらず。
ただ、静かに その「コモンセンス」を洗練し、
その啓示に したがって考え、
その啓示を持って行動せよ。

先生は、どんなに忙がしくとも時間があれば実験室に顔を出された。白衣を着て、腕を組みながら じっと1時間も2時間も燃焼器の炎を観察された。その習慣は、学部長になっても、定年間近になっても変わることがなかった。そのお姿が私の目に焼き付き、大きな教えになっている。

棚沢先生には、このように学問のみならず、まさしく人生哲学の数々を教えていただきました。

先生に心から有難うございますと御礼を申し上げ、安らかにお休み下さることお祈りします。

<国際学会報告>

The 2nd Minsk International Heat and Mass Transfer Forum (第2回 ミンスク国際熱および物質移動会議)

小竹 進 (東工大)

2nd Minsk International Heat and Mass Transfer Forum が1992年5月18日から5月22日までベラルーシ(Belarus)のミンスク(Minsk)で開催された。会場は Luikov Heat and Mass Transfer Institute に近いベラルーシ科学アカデミーであった。ミンスクは第2次世界大戦のときドイツ軍によって完全に破壊され、その後きれいに区画整理されて復興した人口200万の美しい街である。季節はさわやかな初夏であり、白いチェリの街路地が印象的であった。

この熱および物質移動の国際会議は、International Heat Transfer Conference (第9回は1990年 Israel で開催) に対応した旧ソ連圏の国際伝熱会議として出発したものと解釈できるものであり、その研究発表件数・参加者数などもほぼ同程度の規模のものである。Dr. M. A. Styrikovich を委員長とする International Scientific Committee (日本委員は越後亮三(東工大)) により運営される組織になっているが、Luikov Heat and Mass Transfer Institute 所長の Dr. O. G. Martynenko を委員長とする組織委員会が実質的な会議の企画実行をしている。

第1回(1998年)もMinskで行なわれ、越後亮三先生が出席されている。越後先生から「研究テーマや研究者層の広さは予想以上に大きく一度出席されてみたら」と薦められていたことと、Dr. Martynenko から招待状をいただいたこともあって、興味はあったが、旧ソ連邦の解体ということでどうなるかわからなかったので出席は断念していた。2、3月まえに急に、日本学術会議の国際会議代表派遣ということで出席することになり、初夏のミンスクを楽しむことになった。

研究発表は毎日特別講演2件と一般講演が行なわれ、一般講演は10のセッションが10室において毎日並行して行なわれた。研究発表件数はポスターを含めて約800件であり、参加者は約1000名とのことであった。日本からも越後先生など数件の研究発表があったが、ほとんどが旧ソ連圏の研究発表であった。使用言語はロシア語・英語となっているが、特別講演を除いて同時通訳はない。幸い優秀な美人の通訳に恵まれたので言葉はあまり問題にならなかったが、図表などは変数や無次元数などの記号表現がおおきく違いその理解がおくれることと、10ヶ所の会場が広く散らばっていてしかも建物が大きいため興味ある研究発表を同時に効率良くきくことはできなかったが問題であった。芹沢昭示先生(京都大)は言葉に強く通訳無しで私よりも熱心に勉強されていました。

研究発表は、対流熱伝達、輻射複合熱物質伝達、化学反応、二相流、分散系、レオロジー、多孔物質、乾燥過程、動力機器、化学機器における熱物質移動などであり、セッ

ションはつぎのように分れていた。

Convective heat and mass transfer

Radiative and combined heat transfer

Heat and mass transfer in chemically reactive systems

Heat and mass transfer in two-phase systems

Heat and mass transfer in dispersed systems

Heat and mass transfer in rheological systems

Heat and mass transfer in capillary-porous bodies

Heat and mass transfer in drying processes

Computerized experiment in heat/mass transfer and heat conduction problems

Heat and mass transfer in power plants

Heat and mass transfer in chemical-engineering plants

このうち乾燥関係はKiev(Ukraine)で翌週(5月25-29日)に行なわれた。これらの内容は14冊の前刷集に収められているがほとんどロシア語である。

International Heat Transfer Conferenceの内容に近いものも多かったが、化学反応、レオロジー、多孔質あるいは分散系物質における熱物質移動、レーザやプラズマなど高エネルギー状態での熱物質移動などに関するものも多く印象的であった。その主なものをあげると、ヘテロ化学反応の熱物質伝達、多孔質燃焼の熱物質移動、微粉炭燃焼の化学反応、電気伝導粒子の融解運動、非定常ポリマー化時の熱流動、輻射を伴うレオロジー、電磁レオロジーの熱物質伝達、レーザ照射固体の熱物質移動、レーザ光による選択蒸発、融液からの結晶成長、熱プラズマ分散相の熱伝達、高速気流および衝撃波の熱物質伝達、ロケット推進の熱物質伝達などである。

研究発表とは別に、この会議のもっとも大きな印象は、多くの研究者が今後の研究をどうするかということについて大きな不安と危機感をもっていたことであった。この会議では、以上のように熱および物質移動の比較的基礎的な研究の発表も多かったが、今後は経済事情でこうした基礎的な研究者はほとんど解雇され、科学技術の基礎的な研究をいままでのように維持することはほとんど不可能であるということである。とくに、こうした基礎研究の若い研究者をどう維持できるかが大きな問題で、日本などにこうした分野での共同研究や委託研究を積極的にお願ひしたいということであった。経済基盤が確立するまで、そう長い間でないにしても、多くの優れた研究設備や頭脳が政治経済的な環境のために消滅抹殺されるということは大変な問題である。ここでは、経済大国と国際協力を自負する我が日本の積極性が大きく問われているのではないだろうか。そのような大きな組織的な問題にいかなくても、個人レベルでこうした若い優秀な研究者を自分の研究グループに受け入れ共に研究することは双方にとって大きなプラスとなると思われる。そのような機会がありましたら是非一考をお願ひしたいと思います。

<地方研究グループ活動報告>

中四国研究グループ第4回伝熱セミナー・松山

――生産加工における諸問題および流動・伝熱における<ぬれ>の問題――

日時： 平成4年8月28日(金)～29日(土)

場所： 三浦リラトレセンター(三浦工業研修センター)

参加人員： 63名(大学・公的機関15名、企業23名、学生25名)

セミナー(1) 生産加工における諸問題

1-1 セル式重合プロセスの温度制御について

小林伸行(住友化学工業加圧研究所) 松浦秀昭(同愛媛研究所)

1-2 水管加工への誘導加熱法の適用について

田中 収(三浦研究所技術本部)

1-3 DISK成形における基板冷却の問題点

清水 聡(帝人化成松山研究所)

1-4 紙の乾燥と最新の抄紙機ドライヤ

久野広明、星要之介、鈴木節夫、大平和仁(三菱重工業三原製作所)

1-5 宇宙用クライオスタット(IRTS)の熱設計

京谷誠(住友重機械工業東予製作所)

セミナー(2) 流動・伝熱における<ぬれ>の問題

2-1 濡れ壁式熱交換器の放散塔への応用例について

坂本徳雄(住友ケミカルエンジニアリング新居浜事業所)

2-2 吸収冷凍機における濡れ壁式吸収器・再生器の熱・物質移動特性

松田 晃(愛媛大学)

2-3 ぬれと沸騰

水上紘一(愛媛大学)

2-4 ぬれと流動

加藤健司(大阪市立大学)

<講演概要>

1-1 マクリル酸エステルを触媒で重合反応させアクリル樹脂を製造する坩式(キャスト)重合加圧において、この重合室内での温度制御はその製品の品質、価値を決める上で重要なポイントである事を述べると共に、商業プラントではスケールアップのため実験室での熱媒温度データに基づき温度パターンの予測が困難なため、計算機シミュレーションを導入して最適温度パターンを決定可能にした旨報告がされた。

1-2 小型貫流ボイラーの水管群は上部と下部の缶寄せ部で本体缶体と連結される。連結部の水管の絞り後の応力除去に従来のバーナー加熱法から誘導加熱法へ切替えることによる技術的諸問題についての検討報告がされた。一様な温度分布への最適な加熱周波数、放射損失、渦電流の浸透深さなどの影響の見積りに半径方向1次元熱伝導問題による手法が用いられていたが定量的に不十分な結果に見受けられた。

1-3 銅カセット製のCD(コンパクトディスク)用DISK成形における冷却工程時間の短縮による基板冷

却の問題点を材料メーカーの立場から洗い直した結果、冷却不良による基板の変形、収縮むら、離型不良、ピットの転写不良等が生じるため、より早く均一に冷却できる、金型冷却方式の出現が望まれるなど報告された。

1-4 全エネルギー消費の7%を占める紙・パルプ紙、とりわけ抄紙機ドライヤには多くのエネルギーが消費されている。最新の抄紙機ドライヤの効率化を中心に乾燥現象のメカニズムからモデル解析まで丁寧に解説された。さらにドライヤリターを交互に真空ロールとしたマルチドライ法の開発により高速化におけるしわ、断紙、端部の過乾燥、幅方向の収縮・品質の均一化などが解決されたことが報告された。

1-5 H II ロケットにより打ち上げられる軌道冷却赤外線望遠鏡いわゆる宇宙用クライオスタット (IRTS) の熱設計では、寒剤である He II タンクへの熱侵入をいかに最小にするかが重要で、特に冷却温度 1.8K で 1 ヶ月以上維持するためのあらゆる場合を想定して設計され、その熱評価試験の結果が披露された。打ち上げ時の振動エネルギーにより何度ほど上昇するかなど試験結果から見込まれていることも報告された。

2-1 濡れ壁式熱交換器の放散塔への応用例について、実機の設計を基に報告された。物質移動係数に対する、ガス、液流量の影響が検討され液流量の影響が大きいこと、さらに伝熱係数は既存の式で十分なこと、均一液膜の形成 (伝熱面の濡れ) が不可欠で、そのための液の伝熱管への導入、エントレイメントの防止などに工夫がされていることなど報告された。

2-2 吸収式冷凍機の必要性から始まりその原理などをわかりやすく話された。さらに臭化リチウムを用いた吸収冷凍機における濡れ壁式吸収器・再生器内、熱および物質移動に及ぼす壁面の濡れの影響の見積りのため流下液膜の実験と理論計算による結果が示され、この方式が壁面を濡らしにくく理論どりの性能を得るためには流量操作に十分な注意が必要であることが報告された。

2-3 ぬれの定義から始まり、ぬれに関する常識、ぬれの尺度である接触角に関する基礎事項、さらにぬれが生じる条件 (Young-Dupre の式) 等の解説があり、一般的常識はこの条件の一部限定でしかないこと等がのべられた。さらに接触角測定に関する今までの結果の紹介、ぬれと沸騰との関係など報告された。

2-4 固液間のぬれ挙動で接触角の履歴現象、流れに及ぼすぬれ性の影響などに関して明らかにするため、見かけの接触角の考えから Young-Dupre の修正式を提案し、これを用いてぬれ特性が影響を与える流動現象 (ドライパッチ、ティポット効果、容器壁近傍の粒子の運動など) が説明できることが報告された。

中四国でのセミナーが始まって今回で早 4 回目となる。それぞれ当該地 (持回り校) の工夫と特徴をだそうとの若手中心の準備委員の苦勞が想像されるだけにたのしく、また有意義なものとなりつつある。今回は特に企業からの参加者が多く、実務的な話を数多く聴くことができその点、学生諸君にもためになったのではと思う。最後に愛媛大学準備委員長青山善行先生はじめ準備委員、講師の皆様、清らかな場所を提供頂きました三浦工業に感謝申し上げます。

(中国四国地方連絡幹事 加藤泰生)

<お知らせ>

新会誌の発行について

会長 藤江 邦男

学術論文を掲載した本会の新しい雑誌の発行に関して審議する委員会の設置を、本年5月29日開催の第31期第1回理事会において提案しましたところ、同日付で「新会誌発行検討委員会」が下記の委員構成により設置されました。

伊藤 猛宏 (九大)	井上 晃 (東工大)
小竹 進 (東大)	中別府 修 (東工大)
長坂 雄次 (慶大)	西尾 茂文 (東大)
土方 邦夫 (東工大)	平沢 茂樹 (日立)
藤田 秀臣 (名大)	(50音順)

同委員会は土方邦夫委員を委員長として精力的な検討を行い、本年9月12日開催の第31期第2回理事会に対して答申しました。同理事会は同答申の一部を修正の上、下記概要(本号掲載の投稿案内に収録なれていない事項のみ)の通り承認しましたので、お知らせします。

「新会誌発行検討委員会」委員のご努力に感謝するとともに、会員各位におかれましては、この事業の趣旨によりしくご賛同いただき、これが健全な成長をいたすよう格別のご援助をお願いいたします。

記

1. (発行形態) 学会誌「伝熱研究」との合併形式で、“Thermal Science and Engineering”の名称で刊行する。

2. (査読・編集) エディター方式とする。任期3年のチーフエディターと、チーフエディターが毎年4人指名する任期3年のエディターで編集にあたる。チーフエディターは会長が理事会に提案し、理事会がこれを承認する形式で選定する。

"Thermal Science and Engineering"

への学術論文の投稿のお願い

この度、日本伝熱学会の論文集として"Thermal Science and Engineering"を創刊し、当分の間、伝熱研究と合本の形で発行することになりました。つきましては、下記の投稿規定を御一読の上、皆様の研究成果をぜひご投稿ください。

1. 投稿論文の内容： 以下のいずれかの特徴をもつ熱科学・工学に関する論文
 - a. 独創性のあるオリジナル論文
 - b. 未発表のプログラムの主要部分を掲載した数値解析論文
 - c. 新計測法、データ処理手法を再現可能なように記載した論文
 - d. 熱科学・工学に係わる論文で他の論文集では掲載され難い特異的な論文
 - e. 生データを記載した有用な実験研究結果
 - f. 良く整理されたReview論文
 - g. その他、エディターが熱科学・工学分野の進展に寄与すると認めた論文
2. 発行言語： 日本語又は英語のどちらでもよい
3. 投稿資格： 特に制限を設けない。
4. 投稿論文の長さ： 最低2頁、最大頁は定めず、読者に充分内容が伝わるだけの頁数とするが、できるだけ簡明に記述する。
5. 著作権： 他の言語で発表済みの論文投稿も当面の間受け入れるが、その旨を論文中に明記する。また、一旦投稿された論文はそのまま掲載することを原則とする。
6. 討論： 会員は、印刷された論文ないしはその討論について、氏名を明らかにして、意見を述べることができる。
7. 投稿費： 当面の間 無料 (抜刷代は実費相当の有料)
8. 投稿形式： 将来のデータベース化に備え、フロッピーによる投稿とする(図面は原図を添付する。)、ただし、査読のために同一内容の刷り上がり相当原稿3部を添付する。
 - a. 論文はLaTexにより記述し、A4版2段組みを印刷時にB5版に縮小する。
 - b. 版組形式、論文を作成するための説明等を含むフロッピーは学会事務局が原価で投稿者に配布する。
 - d. この形式による投稿が不可能な著者に対しては、学会事務局が有料(刷り上がり1頁当たり最大3000円)で原稿を作成する。ただし、この場合も文章部分のテキストファイル(MSDOS)は著者が作成する。
9. 投稿先： 小竹 進 (チーフ エディター) Fax: 03-5800-6986
〒113 東京都文京区本郷 東京大学機械工学科
10. 発行時期: 1993年1月 (Vol.32, No.124) より

第30回日本伝熱シンポジウム研究発表募集

- ・開 催 日 平成5年5月26日(水)～5月28日(金)
- ・会 場 横浜市開港記念会館(〒231 横浜市中区本町1-6)
- ・研究発表申込締切 平成5年1月29日(金) 必着
- ・原 稿 締 切 平成5年3月15日(月) 必着
- ・研究発表申込先 〒223 横浜市港北区日吉3-14-1
慶應義塾大学理工学部機械工学科内
第30回日本伝熱シンポジウム準備委員会
TEL 045-563-1141 (内) 3120, 3130
FAX 045-563-5943
郵便振替 横浜 4-8491

・研究発表申込方法

1. 伝熱研究本号の最終ページに添付されている申込用紙(またはそのコピー)に必要事項を記入し、整理費3,000円の送金とともに申し込んで下さい。送金には必ず上記郵便振替をご利用下さい。
2. 講演発表者1名につき1題に限ります。
3. 原稿: 講演論文集はオフセット印刷。原稿執筆枚数は1,927字(41行×47字)詰原稿用紙3枚以内。原稿用紙は準備委員会より発表申込者宛送付します。
4. 発表の採否およびセッションへの振り分けは、準備委員会にご一任願います。
なお、本シンポジウムでは、従来通りの講演を集めたセッションと、ラポーター方式によるセッションの併設を予定しています。前者の場合、講演時間・討論時間はそれぞれ約10分です。後者の場合は、予め準備委員会によって選定されたラポーターが各セッションに割り振られた発表について総轄的な報告を行い、その後討論を行います。

・御注意

1. 研究発表申込後の取消は準備と運営の支障をきたしますのご遠慮下さい。
2. 論文原稿の題や著者名が申込書と相違しないよう申込書の控えをお残し下さい。

第30回日本伝熱シンポジウムセッション分類表

【大分類】

A 強制対流 B 自然対流 C 沸騰 D 凝縮 E 物質伝達・蒸発
 F 溶融・凝固 G 混相流 H ふく射 I 熱伝導 J 熱交換器
 K 熱機器 L 熱物性 M 反応・燃焼 N 分子動力学 O その他

【小分類】

- | | |
|----------------------|-----------------------------|
| (1) 層流伝熱 | (22) ミスト冷却 |
| (2) 乱流構造と伝熱 | (23) 蒸発伝熱 |
| (3) 剥離流における伝熱 | (24) 沸騰・凝縮利用機器 |
| (4) 噴流・せん断層の流動と伝熱 | (25) ヒートパイプ・熱サオフォン |
| (5) 乱流モデル・数値シミュレーション | (26) 高性能・コンパクト熱交換器 |
| (6) 密閉空間内の自然対流 | (27) 蓄熱・蓄冷 |
| (7) 物体周りの自然対流 | (28) 粒子層における伝熱
(充填層・流動層) |
| (8) 複合対流伝熱 | (29) 熱物性値 |
| (9) 対流熱伝達の促進・制御 | (30) 熱物性測定法 |
| (10) 回転場の伝熱 | (31) 燃焼における伝熱 |
| (11) 多孔質体の伝熱 | (32) ふく射物性 |
| (12) 電子機器の伝熱 | (33) ふく射伝熱 |
| (13) 生産・加工プロセスにおける伝熱 | (34) 計測技術 |
| (14) 限界・極小熱流束 | (35) 微小重力下の伝熱 |
| (15) 沸騰のメカニズムとモデル化 | (36) 生体・食品の伝熱 |
| (16) 凝縮のメカニズムとモデル化 | (37) ヒートポンプ |
| (17) 沸騰・凝縮における伝熱促進 | (38) 自然エネルギー利用 |
| (18) 二相流のモデル化と数値解析 | (39) 都市・地球環境に関する熱・物質移動 |
| (19) 二相流の可視化・計測 | (40) その他 |
| (20) 二相流の伝熱 | |
| (21) 直接接触伝熱 | |

ラポーター方式セッション（予定）

セッション	ラポーター
・乱流伝熱の素過程	：長野靖尚（名工大）、笠木伸英（東大）
・対流伝熱の数値解析	：河村 洋（東理大）、尾添紘一（九大）
・遷移沸騰のメカニズムとモデル	：庄司正弘（東大）、西尾茂文（東大）
・混合冷媒の沸騰	：藤田恭伸（九大）

注) 研究発表申込の結果によって、上記セッションの構成が変更される場合もあります

第 3 0 回日本伝熱シンポジウム研究発表申込書

和文 題目	: -----
英文 題目	: -----

著者名			
伝熱学会の 会員資格	会員外の場合は所属 学協会及び会員資格	氏 名 (講演発表者に*印)	所 属 (勤務先)
1)		和文 ----- 英文	和文 ----- 英文
2)		和文 ----- 英文	和文 ----- 英文
3)		和文 ----- 英文	和文 ----- 英文
4)		和文 ----- 英文	和文 ----- 英文
5)		和文 ----- 英文	和文 ----- 英文

注：所属(勤務先)は略記。例えば，東西大工，南北電機；Tohzai Univ., Nanboku Elec. 等

希望セッション (関係の深い順に付表中のアルファベットと番号を () 内に記入して下さい)	
I. 大分類(A-0): 1. () 2. () 3. ()	注) I-1は必ず、II-1も極力ご記入下さい。2以降は無理に記入されなくて結構です。
II. 小分類(1-40): 1. () 2. () 3. ()	
III. キーワード： (4つ以内)	

連絡先：〒 TEL () - (内線) FAX () -
住所・氏名

準備委員会記入欄	受付番号	受付日	備考
----------	------	-----	----

原稿執筆要領 送付先 住所・氏名	〒 _____ 様
------------------------	-----------

著者への返信用題目 _____

和文題目	-----
著者名 1) _____ 2) _____ 3) _____ 4) _____ 5) _____	

・本申込書はプログラム作成・用紙送付等に使用しますので、全欄を楷書でご記入下さい。

日本伝熱学会 学術賞・技術賞 公募のお知らせ

第27期より拠金（200万円、森 康夫元会長）に基づいて学術賞が設けられ、また拠金（100万円、天野工業技術研究所）に基づいて技術賞が設けられております。

つきましては、下記の募集要項に沿って、本年度の学術賞・技術賞の募集・選考をさせて頂きます。自薦、他薦を問いませんので、所定の用紙「日本伝熱学会 学術賞・技術賞 申請・推薦書」に必要事項を御記入の上、手続き下さるようお願い申し上げます。

記

1. 対象となる業績：
 - ・学術賞の対象は、原則として、最近5回の日本伝熱シンポジウムにおいて発表し、国内外で審査のある論文集に掲載された優秀な伝熱研究論文とする。
 - ・技術賞の対象は、原則として、最近3回の日本伝熱シンポジウムにおいて発表された優秀な伝熱技術とする。
 - ・学術賞・技術賞とも対象資格は、原則として本会会員に限る。
 - ・学術賞は2件程度、技術賞は1件程度とする。
2. 選考方法：
 - ・学術賞・技術賞の選考は「表彰選考委員会」が「学術賞・技術賞に関する覚書」によって行なう。
 - ・表彰選考委員会は公募の他に学術賞・技術賞候補を推薦することができる。
3. 提出書類： 所定用紙「日本伝熱学会 学術賞・技術賞 申請・推薦書」 1通
論文抜刷または技術内容参考資料 5部
日本伝熱シンポジウム講演論文集抜刷 5部
4. 提出先及び期限：〒812 福岡市東区箱崎 6-10-1 九州大学工学部動力機械工学科
伊藤 猛宏 宛
FAX: 092-641-9744
1993年 1月14日（木）必着
5. 問い合わせ先： 〒152 東京都目黒区大岡山 2-12-1 東京工業大学原子炉工学研究所内
日本伝熱学会 事務局 井上 晃
TEL: 03-3726-1111（内線 3077, 3059）
FAX: 03-3729-1875

日本伝熱学会 学術賞・技術賞
申請・推薦書

申請・推薦者氏名：_____ 印

論文題名：_____
または技術名 _____

刊行物名：_____
または技術内容 _____

(論文抜刷または技術内容参考資料5部添付)

受賞候補者 (氏名・勤務先・職名・本会会員の有無)

代表研究者：_____

共同研究者：_____

関連研究の伝熱シンポジウム発表

論文題名：_____

講演発表：第__回シンポジウム講演論文集 _____ 頁 (抜刷5部添付)

申請・推薦理由：_____

中四国研究グループ山口地方(宇部) 特別講演会及び見学会のご案内

中四国研究グループ山口地方特別講演会及び見学会を下記の要領で開催いたします。「地球環境保全を目指す最近の高温エネルギーシステムの開発」を総合テーマに、講師の方々それぞれの立場のトピックでお話し頂く予定にしています。なお懇親会を除きいずれも無料でございますので、奮って御参加くださいますようご案内申し上げます。

記

日時：平成4年11月6日(金) 12:30 開始

会場：超高温材料研究センター

〒755 宇部市大字沖宇部573-3

TEL.(0836)51-7007

交通の便：山陽新幹線小郡駅から車で25分程度、あるいはJR宇部線床波駅下車後、タクシーで5分程度です。

1. 特別講演会 「地球環境保全を目指す最近の高温エネルギーシステムの開発」・・・・・・12:30～16:10
《講演題目》
 1. 発電用小型高温ガスタービン
片山一三氏(近畿大学)
青木素直氏(三菱重工業(株)・高砂製作所)
 2. 加圧流動層ボイラー
秋山巖氏(バブコック日立(株)・呉研究所)
 3. 固体電解質燃料電池の開発
山内康弘氏(三菱重工業(株)・長崎研究所)
 4. 超高温材料
梶本弘毅氏((株)超高温材料研究センター)
2. 見学会・・・・・・16:10～17:00
(株)超高温材料研究センター
3. 懇親会・・・・・・17:15～19:00
宇部市常盤公園内 ”湖水ホールレストラン”
懇親会費4000円

◎問い合わせ先あるいは申し込み先

〒755 宇部市常盤台 山口大学工学部

機械工学科 機械エネルギー工学講座

宮本 政英

TEL.(0836)31-5100 FAX.(0836)33-4404

日本機械学会関西支部 195 回講習会

テ - マ : 燃焼診断を支援するレーザ応用計測 (実習付き)
 - 入門から最先端まで -

聴講申込締切 12月16日・開催 12月24~25日

協賛 (予定) : 自動車技術会関西支部, 日本航空宇宙学会関西支部, 日本ガスタービン学会, 日本船用機関学会, 日本燃焼学会, 日本エネルギー学会, 日本エネルギー資源学会, 日本伝熱学会, 関西造船協会, 日本流体力学会, 空気調和・衛生工学会近畿支部, 日本混相流学会, 日本可視化情報学会, ターボ機械協会, 計測自動制御学会関西支部, 化学工学会関西支部

日 時 : 平成4年12月24日(木), 25日(金) 9:00 ~17:00

会 場 : 同志社大学工学部
 京都市上京区今出川通り烏丸東入 ☎(075)251-3817
 JR京都駅より地下鉄に乗車、「今出川」下車、南出口すぐ

趣 旨 : 内燃機関、工業炉、バーナ、ガスタービンなどには厳しい排気規制が課かれ、その上省エネルギーの要求も非常に重要な問題です。この社会的要望を満足させるためには、燃焼現象を詳細に把握する診断が必要です。最近このためのレーザ応用が盛んですが、レーザ自体の利用、得られたデータの処理、その画像化などの十分な知識が極めて必要です。本講習会では、燃焼診断時のレーザ応用入門、流速、温度、濃度、噴霧、すすの計測、燃焼現象の可視化と画像処理の基礎から最先端技術まで実施例を中心に解説し、レーザおよび画像処理関係機器類のデモ展示とノウハウを取得出来るような実技指導を行います。多数の方々のご参加をお待ちしております。
 なお、講習内容についてのご質問を事前に申し受けます。

題目・内容・講師 [司会 同志社大学 教授 工学部 藤本 元]

日 時	題 目	内 容	講 師
12 月 24 日 木	9:00 ~ 10:05	燃焼診断と計測技術	良好な燃焼機器の設計、その適正運転のために必要な燃焼診断をいかに実現するか、またそのために利用可能な測定法を概説する。 大阪大学 工学部 助教授 香月 正司
	10:05 ~ 11:10	流れの計測	高時間密度LDV,高密度PTV 計測の手法と、これを支援する画像処理・グラフィック技術の複雑な流動と乱れ場への適用例を紹介する。 三菱自動車工業(株) エンジン研究部 丸ノ目課長 安東 弘光
	11:20 ~ 12:25	温度の計測	非接触かつ高い時間・空間分解能で温度の測定が可能なラマン分光法とCARS法の原理と、火炎への適用例をあげて解説する。 東京大学 工学部 教授 河野 通方
	13:35 ~ 14:40	濃度の計測	レイリー散乱法を含む種々の非接触濃度測定法、濃度場の可視化と画像解析などについて解説し、乱れ場への適用例を紹介する。 大阪府立大学 工学部 教授 角田 敏一
	14:40 ~ 15:45	噴霧とすすの計測	光減衰法による噴霧内液滴密度分布計測と火炎内すすの可視化、LIF法による噴霧内気相・液相分離などを、実施例をあげて解説する。 同志社大学 工学部 教授 藤本 元
	15:55 ~ 17:00	火炎の可視化と画像解析	火炎の高速撮影画像から流動と乱れを測定する方法、レーザシート法による乱流火炎の構造解析法などを実施例をあげて解説する。 京都大学 工学部 教授 池上 詢

日 時	題 目	内 容	講 師	
12月 25日 金	—約15名 8グループで順次下記の各実習をそれぞれ 1時間ずつ行なう。—			
	9:00 ～ 12:00	(1) 高速現象の取込と処理	キャビテーション、着火をデジタル高速度ビデオで捕えパソコンによる動画の画像処理を行なう。	(株) 大沢商会
	13:00 ～ 18:00	(2) 火炎断面化学種蛍光の画像化	パルスレーザー光を火炎に照射し、火炎断面の化学種蛍光を画像化する。(含燃焼計測用レーザー展示)	スベトラ・フジックス (株)
		(3) 流れの可視化	レーザーシート光による流れ場のXZ軸、XY軸同時観測とマッハツェンダ干渉法による可視化を行う。	日本科学エンジニアリング (株)
		(4) エンジン流動のLDV計測	単筒モデル燃期内の二次元速度成分を光ファイバLDVで計測する。	日本カノマックス (株)
		(5) 発光スペクトルの測定	疑似火炎としての光源中の発光スペクトルの測定を行う。	日本分光 (株)
		(6) 特定化学種蛍光の火炎断面画像化とスペクトル測定	UVレーザーシート光を火炎に照射し、特定火炎断面像とスペクトルを短時間に測定する。	浜松ホトニクス (株)
		(7) 燃焼中の多成分連続測定	FTIR式自動車排ガス測定装置によるバーナ火炎中の多成分連続測定を行う。	(株) 堀場製作所
	(8) 画質改善と画像処理	画像入出力、画質改善、画像処理と画像圧縮を含むハイビジョンファイリングシステムの実習を行う。	(株) ピアス	

聴 講 12月16日(水)

申込締切

定 員 120名

聴 講 料

・会 員 30,000円(大学、官公庁関係15,000円、大学院生および学生員 6,000円)

会 員 外 40,000円、ただし、いずれも教材1冊代金を含む。

・教材のみご希望の方は、1冊につき会員 4,000円、会員外 6,000円を添えてお申し込み下さい(送料は不要)。

・協賛学協会員の方も本会会員と同じようにお取扱いたします。

申込方法

B6判用紙(学会誌半裁)に「関西支部第195回講習会申込み」と題記し、1)氏名・会員資格 2)勤務先・所属部課名・住所 3)通信先 4)所属学会名 5)送金内訳および送金額を記入のうえ、関西支部宛お申し込みください。

聴講料は現金書留または下記銀行口座宛ご送金ください。

住友銀行中之島支店 普通口座 110415 日本機械学会関西支部名義

事前質問:

参加者で講習内容にご質問のある方は事前に受け付けますので・勤務先(所属部課名)・氏名・連絡先住所・TEL・ご質問をご記入の上、下記申込先宛ご送付下さい。

申 込 先

日本機械学会関西支部

第9回混相流レクチャーシリーズ 「氷蓄熱システムと混相流」

氷蓄熱は、空調負荷の増大などによって生じる、昼夜間の電力需要の不均衡を平準化する手段の一つとして最近脚光を浴び、ここ数年の間に都市ビルを中心に急速に普及しつつあります。また、地域冷房への利用も強く指向されています。それに対応して、さらに大規模で効率的な種々の氷蓄熱方式の研究・開発が進められています。氷蓄熱システムでは、水と氷が混在する状態で、製氷・解氷、輸送等を取り扱うため、氷-水系の固液混相流がその重要な技術課題です。それとともに、氷の発生・成長・融解のメカニズムについての知見も必要となります。以上の観点から、今回の混相流レクチャーシリーズは氷蓄熱をテーマとして企画しました。氷蓄熱の基礎から応用まで、現在本分野の第一線で活躍中の講師の方々に、平易に解説をしていただく予定です。氷蓄熱に携わっている技術者・研究者はもちろん、本分野に関心のあるすべての方々に有用な知識と情報を提供できるものと考えています。多数の方々の参加をお待ちしています。

主催： 日本混相流学会

協賛： エアゾール研究協議会、化学工学会、可視化情報学会、資源・素材学会、スラリ輸送研究会、土木学会、日本機械学会、日本空気清浄協会、日本空調衛生工学会、日本原子力学会、日本航空宇宙学会、日本造船学会、日本伝熱学会、日本鉄鋼協会、日本船用機関学会、日本ボイラ協会、日本流体力学会、日本冷凍協会、粉体工学会、日本建築学会、エネルギー・資源学会。

日時： 平成4年12月2日(水) 12:30~17:00
12月3日(木) 10:00~17:00

演題と講師：

《12月2日(水)》

1. 「氷蓄熱の現状と課題」 (12:30~14:00)

中原 信生 (名古屋大学工学部建築学科)

空調熱源システムにおいて、氷蓄熱とPCM潜熱蓄熱の現実的適用上の限界を埋める形で、蓄熱そのものを主題として発展してきたのが氷蓄熱である。蓄熱だけでなく、その特質を熱輸送と空調プロセス上の利点を認識し展開していくところに今後の課題と期待があり、これら氷蓄熱の現状と課題について解説する。

2. 「氷のサイエンス」 (14:15~15:45)

前野 紀一 (北海道大学低温科学研究所)

氷の化学組成は単純であるが、その物理的性質は極めて多様かつ複雑である。

その主な原因は水素結合にある。本講演では、氷の結晶構造、物性、氷の発生・成長・融解のメカニズム、水との相互作用、等について解説する。

3. 「氷-水搬送による冷熱供給システム」 (16:00~17:00)

浜 岡 幸 夫 ((株)前川製作所技術研究所)

夜間の安い電力を利用して、可搬性の優れた氷(ダイナミックアイス)を高効率で製造・蓄熱し、昼間の冷房時に負荷側へ氷水を搬送して冷熱を供給するシステムの研究開発について紹介する。

《12月3日(木)》

4. 「氷蓄熱技術の基礎」 (10:00~11:30)

稲 葉 英 男 (岡山大学工学部機械工学科)

氷蓄熱技術の基礎となる実用的な各種製氷、解氷および氷-水混相の熱物質輸送について、それらの機構そして制御法を流体力学・伝熱学上の立場より概説する。さらに、機能性・応用性に富む過冷却状態を利用したスラリー状氷の生成、消滅および流動特性を例にとり、効率的氷蓄熱技術の可能性について述べる。

5. 「クラスレート蓄熱方式」 (12:30~13:20)

谷 井 忠 明 (三菱重工業(株)高砂研究所)

夜間電力の有効利用、電力負荷平準化を目的に、通産省ムーンライト計画の一環として研究開発実施中のクラスレート蓄熱空調システムパイロットプラント(蓄冷容量:400,000kcal)の運転結果について報告する。

6. 「ハーベスト式氷蓄熱システムと氷水搬送」 (13:20~14:10)

蜂 須 賀 舜 治 ((株)大林組本店設備設計第一部)

ハーベスト方式の成績係数(COP)、氷充填率(IPF)、信頼性などに関し、設計値と実績値について述べる。さらに、地域冷房プラントを対象とした氷水搬送についての基礎実験の結果、および開発要素についても述べる。

7. 「過冷却水を用いた氷蓄熱システムの開発」 (14:20~15:10)

小 此 木 時 雄 (高砂熱学工業(株)総合研究所)

氷生成に水の過冷却現象を用いた氷蓄熱システムを開発してきた。その過程で、生成した氷と水を地下スラブ下蓄熱水槽に配管で移送・蓄氷する方式を実現し、大規模蓄熱設備に対応できる氷蓄熱システムを実用化した。その実施例を中心に紹介する。

8. 「クリスタルリキッドアイス氷蓄熱システムと氷搬送」 (15:10~16:00)

楠 本 望 ((株)竹中工務店大阪本店新蓄熱推進室)

極めて微細で、しかも流動性の高い「クリスタルリキッドアイス」について、その特長・システム設計・実施例と運転データ等を氷の生成原理等の考察を交えながら解説する。また、現在研究中である地域冷房用氷蓄熱・氷搬送システムについての中間報告を行う。

9. 総合討論 (16:00~17:00)

会 場： 大阪市立大学文化交流センター (大阪駅前第3ビル16階)
〒530 大阪市北区梅田1-1-3-1700
TEL 06-344-5425

参加費： 会員(協賛学協会会員を含む) 20,000円
会員外 30,000円
学生 5,000円

申込方法： はがきまたはFAXにて「第9回混相流講習会申込み」と題記し、
(1)氏名、加盟学協会名、(2)勤務先・所属部課名、(3)連絡先、を明記し、
下記宛お申込み下さい。参加費は、下記口座にお振込み下さい。

申込先： 〒659 芦屋市公光町9-7-202 (株)学術出版印刷内
日本混相流学会 企画運営委員会
TEL 0797-38-3390 FAX 0797-38-3351

申込締切： 11月24日(火)

参加費振込先： 大和銀行天六支店 普通預金口座 5386908
「第9回混相流レクチャーシリーズ 大場謙吉」
または
郵便振替口座 大阪6-326236
「混相流学会企画運営委員会」

問合せ先： 〒558 大阪市住吉区杉本3-3-138
大阪市立大学工学部機械工学科 東恒雄
TEL 06-605-2666 FAX 06-605-2769
または、
〒564 吹田市山手町3-3-35
関西大学工学部機械システム工学科 大場謙吉
TEL 06-388-1121 Ex.5793 FAX 06-388-8785 または 330-3770

第16回 人間-熱環境系シンポジウム

大会長：文化女子大学 田村照子 期日：平成 4年11月 5日（木）～ 6日（金）2日間
 場所：文化女子大学A校舎、〒151 東京都渋谷区代々木 3-22-1、TEL 03-3299-2336（JR新宿駅南口より徒歩7分）

第1日	11月 5日（木）		準備委員会代表	後藤 滋
9:00	開会の辞		座長	梶井宏修
9:05	研究発表 1	深夜電力による蓄熱式電気床暖房設備の有効性検証のための実測調査 その1. 床暖房設備の有無による室内温熱環境の実感について	芝浦工大	南野 脩
9:20	" 2	その2. 床暖房設備の有無による室内温熱環境の快適性について	芝浦工大	斉藤昭徳
9:35	" 3	放射冷暖房の快適性評価	日立製作所	舟越砂穂
9:50	研究発表 4	床暖房温度と快適性について	近大	梶井宏修
10:05	" 5	温度・気流のゆらぎ効果について	松下冷機	藤田典子
10:20	" 6	オフィスの熱空気環境とオフィスワーカーの疲労	横浜国大 朴 錫奉 足利工大	後藤 滋
10:50	講演 1	絹の文化圏、羊毛の文化圏	文化女子大	道明三保子
13:00	大会長講演	人体と微小環境としての衣服	文化女子大	田村照子
14:20	研究発表 7	電車通勤時の衣服内気候について	共立女子短大	渡邊千穂
14:35	" 8	鉄道車両内環境の評価(1)	三菱電機	菅原作雄
14:50	" 9	乗用車室内の熱的性状と快適性に関する実験的研究-冬期走行実験	北大 持田徹	嶋倉一實
15:05	" 10	新型サーマルマネキンによる車室内温熱環境測定	いすゞ自動車	松永和彦
15:20	研究発表 11	不均一温熱環境における熱的快適性に関する被験者実験	御茶の水女子大	小関 敬子
15:35	" 12	セラミックス含有加工天然皮革の消防服としての着用評価	東農工大 久保知義 東京都皮革技術センター	成瀬 信子
15:50	文化学園服飾博物館および人工気候室見学			
17:30	懇親会			
第2日	11月 6日（金）		座長	田中正敏
9:00	研究発表 13	皮膚の乾燥に関する研究	日体大	井川正治
9:15	" 14	生理機能に及ぼす頭部冷却部位の影響	千葉大 勝浦哲夫	富岡 慶
9:30	" 15	頭部損傷者の体温調節障害とその温熱感覚	日大 石井要憲	岡田 明
9:45	研究発表 16	種々の波長の赤外線の間歇的照射に対する高齢者の体温調節反応	愛知医大	野中正之
10:00	" 17	周期的赤外線照射に対する睡眠時の発汗応答	小川徳雄 菅原潤香	大西 和利
10:15	" 18	ぬれ面積率の特性に関する基礎的考察	北大 持田 徹	嶋倉一實
10:50	講演 2	都市の温暖化（ヒートアイランド現象）	東北大	齊藤武雄
13:00	特別講演	太陽エネルギーと地球環境	神奈川大	深井邦朋
13:50	研究発表 19	サーマルマネキンを用いた温熱環境の評価(1)	三菱電機	宮崎 靖子
14:05	" 20	体感温熱環境制御用センサーの開発	京都電子加納喜代雄	尾林正信
14:20	" 21	建機キャビン内の温熱環境に関する研究 第1報	小松製作所	岡田 亮三
14:35	" 22	" 第2報	松木照幸 中西広記 FCG総合研究所	長田 泰公
15:00	パネルディスカッション	宇宙・地球・都市・建築・被服・人間を結ぶ	パネラー	神奈川大
16:30	閉会の辞			

共 催：生理人類学会（幹事学会）、日本家政学会、空気調和・衛生工学会、人類協働学会、日本伝熱学会
 日本生気象学会、計測自動制御学会、日本睡眠環境学会
 協 賛：日本産業衛生学会、日本生理学会、日本ME学会、日本サーモグラフィ学会、日本人間工学会、日本機械学会
 日本建築学会、日本労働衛生工学会、電気学会、日本冷凍協会、繊維学会、日本生物物理学会、日本火災学会
 日本栄養・食糧学会、日本医科器械学会、日本繊維製品消費科学会、日本保安用品協会、日本繊維機械学会
 日本住宅設備システム協会、日本病院設備協会、日本熱物性学会、全国ビルメンテナンス協会
 日本温熱気候物理医学会
 後 援：日本学術会議

準備委員：後藤 滋（代表）、川島美勝（事務局）、岩崎房子（事務局）、井川正治、大中忠勝、大野静枝、長田泰公
 落藤 澄、梶井宏修、勝浦哲夫、菊池安行、肝付邦憲、佐藤 忠、菅原作雄、田中正敏、棚沢一郎
 都築和代、登倉尋実、新原 裕、中島利誠、西 安信、堀 雅宏、増田順子、南野 脩、三平和雄
 持田 徹、森田久次郎、山崎和彦、横山真太郎、吉田 燦、吉田 敏一、渡辺明彦
 顧 問：北 博正、松岡裕吉、三浦豊彦、小林陽太郎、大島正光、鈴木武夫

参加申込方法：往復ハガキに 1) 氏名 (74計) 2) 勤務先 3) 連絡先 4) 所属学会 5) 懇親会参加の有無 を記入し
 て、下記宛お申込み下さい。定員 300名で締切らせて頂きます。
 参加費：7,000 円 懇親会：平成 4年11月 5日（木）17:30～19:30（会費 7,000円 予定）

連絡先：〒151 東京都渋谷区代々木 3-22-1、文化女子大学家政学部被服衛生学研究室内
 第16回人間-熱環境系シンポジウム実行委員会
 TEL 03-3299-2336（直通） FAX 03-3370-6202（被服衛生学研究室気付とご記入下さい）

社団法人日本工学会主催

第18回 国際会議のための 準備セミナー

— 英語によるプレゼンテーションの実際 —

国際社会の中で、日本人として講演、研究発表、新規プロジェクトの説明等、英語で発表する機会が増えてきております。

このセミナーでは、外国人を前にすぐれたプレゼンテーションを行うための効果的な説得の技術と方法を講義と実際のプレゼンテーションの体験を通して習得します。

1. 対象者

- ・国際会議で発表する予定のある方
- ・英語によるプレゼンテーション能力の向上を図りたい方

2. 日 時：1992年11月15日(日) 9:00～20:00

11月16日(月) 9:00～17:00

(集合：11月14日<土>18:00現地)

3. 講 師：・社団法人日本工学会 理事

- ・(株)ヒューテック代表取締役 肥田良夫
- ・その他(国際会議参加経験者からの話題)

4. 会 場：海外職業訓練センター研修施設

千葉市美浜区ひび野1-1 電：043-276-0211

5. 交 通：JR京葉線 海浜幕張駅 徒歩5分

6. 参加費：80,000円(資料代、懇談会費等を含む)

7. 宿泊費：18,000円(2泊、食事付)

8. 定 員：18名

9. カリキュラム

- (1) 国際会議の概要 1) 参加の目的 2) 参加者の心掛け 3) 日本人に多い問題点の整理
- (2) 国際会議参加の準備 1) オーラルペーパーの書き方 2) 時間配分の心得 3) AVの用意と利用法
- (3) プレゼンテーションの実際 1) 話しかた(視線・発声・姿勢) 2) マイク・AVの使い方 3) 質疑応答の処理 4) 表現
- (4) プレゼンテーションの評価と練習法 1) 自己評価 2) 他者評価 3) 効果的練習法

10. 参加申込み方法

- (1) 参加申込みを希望される方は下記に詳細パンフレットをご請求下さい。
- (2) 申込締切は10月27日(火)日本工学会必着です。

11. パンフレット請求先：

〒107 東京都港区赤坂 9-6-41 乃木坂ビル

社団法人 日本工学会

電話：03-3475-4621・5618 FAX：03-3403-1738

SECOND ANNOUNCEMENT AND
CALL FOR PAPERS

ITEC - 93

FIRST INTERNATIONAL THERMAL
ENERGY CONGRESS

Marrakesh - MOROCCO
6-10 June 1993



Faculty of Science Semlalia
Marrakesh MOROCCO



Cadi Ayyad University
Marrakesh MOROCCO



Ecole Polytechnique
Montréal CANADA

INTERNATIONAL SPONSORSHIP

OBJECTIVES

- To provide a bridge between the north and south thermal energy technologies,
- To provide a forum and to encourage a realistic dialogue at all levels for the implementation of the R&D results,
- To accelerate the development, application and exchange of knowledge in thermal energy fields.

PROGRAM FORMAT

HEAT AND MASS TRANSFER

- .Heat transfer in multiphase flow,
- .Turbulent heat transfer,
- .Mixed convection,
- .Heat pipes,
- .Porous medium

ENERGY SYSTEMS

- .Fluidized combustion,
- .Heat pumps,
- .Desiccant systems,
- .New process.

OPTIMIZATION AND CONTROL

- .Optimum control of thermal systems,
- .Adaptive control,
- .Optimization and energy efficiency,
- .Energy storage
- .Heat exchangers / recuperators.

EXPERIMENTAL TECHNIQS

- .Laser technic in heat transfer,
- .Temperature, heat transfer, humidity measurements,
- .Optical diagnostic,
- .New measurement technics.

RENEWABLE ENERGY

- .Solar energy (including photovoltaics),
- .Biomass technology.

TECHNOLOGY OF ENERGY CONSERVATION
AND ENVIRONMENT PROTECTION

- .Technico-economic analysis of environment,
- .Heat recovery,
- .Non-CFC energy efficiency,
- .Clean processes.

HYDROGEN ECONOMY

- .Production, utilization and safety.

EXTENDED ABSTRACTS

Participants who intend to submit a paper are asked to make an Extended Abstract in English of 4 pages including figures and references, which should be ready for photoreproduction. Three copies of the abstract manuscript should be sent to one of the following regional representatives before **November 15, 1992**.

U.S.A. and Canada

Prof. E. Bilgen
Ecole Polytechnique de Montréal
Box 6079, Station "A"
Montréal Québec Canada, H3C 3A7
Tel. : (514) 3404579 - Fax : (514) 3404052

Other Regions

Prof. A. Mir
Cadi Ayyad University
Faculty of Science Semlalia
BP S15 Marrakesh Morocco
Tel. : (212.4) 434649 - Fax : (212.4) 436769

The manuscript should be typed neatly according to the Typing Instructions for Extended Abstract (and Example) enclosed with this Circular. Applicants will be informed of acceptance or nonacceptance by Feb. 15, 1993.

Please indicate with a pencil at the top right left of the Abstract first page, your preference in presentation (Poster/Oral).

As for the manuscripts, English will be used for the presentation of papers in sessions (oral or poster). Parallel sessions and poster sessions are scheduled.

Overhead projector and 35 mm slide projector will be provided. Video recorder and monitor or 16 mm movie projector will be supplied only if early requested.

IMPORTANT DATES

Extended abstract due.....Nov.15, 1992
Notice of acceptance.....Feb.15, 1993
Registration & reservation.....Mar.15, 1993
Final Program available.....Apr. 30, 1993

CONGRESS ORGANIZATION

-Venue will be held at one of the best deluxe hotels of Marrakesh.

-Congress registration fee (200\$) includes program, book of extended abstracts, coffee and tea during breaks.

-Arrangement for the accomodation can be made through the conference secretariat at special rates

-Registration and accomodation forms will be sent in time to contributors and participants.

SPONSORS

British Council
Center for Dev. of Renewable Energies
Community of the Medit. Universities*
Ecole Polytechnique de Montréal
Faculty of Sciences Semlalia
Int. Center for Theoretical Physics*
International Energy Foundation
Ministry of Energy and Mines
Ministry of National Education
Office National Marocain du Tourisme*
Office Nat. Rech. et Expl. Petroliere
Societe Cherifienne des Petroles
Third World Academy of Science*
University Cadi Ayyad
ROYAL AIR MAROC : official carrier
AFRIC ASFAR : official ground agent
* Requested

TYPING INSTRUCTIONS FOR EXTENDED ABSTRACTS (and Example) が必要な方はお
知らせ下さい。 (九大工) 伊藤 猛宏 FAX 092-641-9744

第9回せん断乱流国際会議
(要目)

- 会議名称 : Ninth Symposium on Turbulent Shear Flows
分野 : Fundamentals, Turbulence Models,
Experimental Techniques, Computation Techniques,
Heat and Mass Transfer, Chemical Reaction,
Applications
- 開催地 : 京都市
会場 : 国立京都国際会館(京都市左京区宝ヶ池)
期間 : 1993年8月15日 - 同8月18日
- 論文応募先 : Prof. F. Schmidt
Department of Mechanical Engineering
The Pennsylvania State University
University Park, PA 16802
USA
- アブストラクト : 1000 words程度
締切 : 1992年11月1日
- 連絡責任者 : 〒606-01 京都市左京区吉田本町
(資料請求先) 京都大学工学部機械工学科
鈴木健二郎

turbulent shear flows

CALL FOR PAPERS

Ninth Symposium on Turbulent Shear Flows

Kyoto, Japan
August 16-18, 1993

The Ninth Symposium on Turbulent Shear Flows aims to advance understanding of the physics of turbulent motion and capabilities for predicting momentum, heat and mass transport processes in turbulent shear flows.

Approximately 30 technical sessions are planned. Contributed papers are invited on original work in the following general areas:

- Fundamentals:** Measurements, theories and concepts that illuminate the nature of turbulence.
- Turbulence Models:** Developments in single and two-point closures; large-eddy and other numerical simulations.
- Experimental Techniques:** Improved experimental methods for single and multi-phase turbulent flows.
- Computation Techniques:** Advances in computation methods for single and multi-phase turbulent flows.
- Heat and Mass Transfer:** Developments in scalar modeling; related measurements and calculations.
- Chemical Reaction:** Developments in modeling of turbulent flames and other reacting flows; related experiments and calculations.
- Applications:** Contributions to applied turbulent flows; including those concerned with internal and external aerodynamics, climate control in buildings, automobiles, electronic-packaging, gas turbines and internal combustion engines, chemical and metallurgical processes, nuclear and wind engineering, geophysical and stratified flows, meteorology and the environment.

Abstracts

Paper selection will be based upon a review of extended abstracts of approximately 1000 words which should be double-spaced and state clearly the purpose, results and conclusions of the work with supporting figures as appropriate. Five copies of the abstract should be mailed (**ABSTRACTS SENT BY FAX WILL NOT BE ACCEPTED**) to:

Professor F. W. Schmidt
Secretary, Turbulent Shear Flows
Department of Mechanical Engineering
The Pennsylvania State University
University Park, PA 16802 USA
814-865-2072; FAX 814-863-4848

Deadlines

Final date for receipt of abstracts: November 1, 1992
Authors informed concerning acceptance: March 1, 1993.
Final date for receipt of camera-ready manuscript: May 1, 1993

9TH SYMPOSIUM PAPERS COMMITTEE

K. Suzuki, Chairman
Department of Mechanical
Engineering
Kyoto University
Kyoto 606-01, Japan
81-75-753-5250
FAX 81-75-771-7286

F. Durst
Lehrstuhl für
Strömungsmechanik
Cauerstraße 4
8520 Erlangen, Germany
49-9131-85-9501
FAX 49-9131-85-9053

N. Kasagi
Department of Mechanical
Engineering
University of Tokyo
7-3-1-Hongo, Bunkyo-ku
Tokyo 113, Japan
81-3-3812-2111
FAX 81-3-3818-0835

B. E. Launder
Department of Mechanical
Engineering
UMIST
Manchester, M60 1QD, UK
44-61-200-3701
FAX 44-61-200-3723

ADVISORY COMMITTEE:

R.J. Adrian, USA
H. Alfredsson, Sweden
R.A. Antonia, Australia
G. Bergeles, Greece
R.W. Bilger, Australia
R. Blackwelder, USA
P. Bradshaw, USA
K. Bremhorst, Australia
I.P. Castro, UK
M.K. Chung, Korea
M. Coantic, France
J. Cousteix, France

R. Friedrich, Germany
I. Gartshore, Canada
E. Gutmark, USA
H. Ha-Minh, France
K. Hanjalic, Bosnia-
Hercegovina
T.J. Hanratty, USA
J.A.C. Humphrey, USA
F. Hussain, USA
H. Kawamura, Japan
J. Kim, USA
M. Kiya, Japan

T. Kobayashi, Japan
E. Krause, Germany
M. Lesieur, France
M.A. Leschziner, UK
J.L. Lumley, USA
Y. Nagano, Japan
I. Nakamura, Japan
I. Nezu, Japan
F. Ogino, Japan
M. Peric, Germany
S.B. Pope, USA
W.C. Reynolds, USA

W. Rodi, Germany
U. Schumann, Germany
R. L. Simpson, USA
A.J. Smits, USA
M. Sokolov, Israel
M. Sommerfeld, Germany
T. Takeno, Japan
A. Taylor, UK
H. Ueda, Japan
M. Wolfshtein, Israel
J.C. Wyngaard, USA
A. Yoshizawa, Japan

LOCAL ARRANGEMENT COMMITTEE

H. Nakagawa, Chairman
Kyoto University, Kyoto 606-01, Japan

◇第3回実験伝熱・流体・熱力学国際会議（ホノルル）◇

(3rd World Conference on Experimental Heat Transfer,
Fluid Mechanics and Thermodynamics)

主 催： 実験伝熱・流体・熱力学国際会議アセンブリー
（日本代表：東北大学 相原利雄教授）

開 催 日： 1993年10月31日～11月5日

場 所： ホノルル（ハワイ） ワイキキ・シェラトンホテル

論文募集日程：アブストラクト提出はすでに締切日を過ぎておりますが、アブストラクトを提出されなかった方でも以下の日程に間に合えば結構です。論文提出を希望される方は、棚沢宛に電話あるいは FAXで
ご一報下さい。

1992年11月6日 本論文原稿提出

1993年1月15日 本論文採否通知

1993年2月26日 写真製版用最終原稿提出

対象分野： 伝熱，流体力学，熱力学および関連分野における実験的研究
（関連する理論、数値解析を含む）

本論文原稿提出先：

〒106 東京都港区六本木7-22-1

東京大学生産技術研究所

棚 沢 一 郎

Tel. (03)3402-6231 内線 2235

Fax. (03)3401-6575

編集委員交代のお知らせ

棚沢 一郎 (東大生研)

上掲2誌の日本での編集委員は、これまで東京工業大学の越後亮三教授と小生とが担当してまいりましたが、このほど越後教授が編集委員を辞任されることになり、8月1日から京都大学の鈴木健二郎教授に交代されました。したがって、今後2誌に論文を投稿される方は、鈴木教授宛あるいは小生宛に原稿をお送り下さるようお願い致します。

なお、この機会に論文投稿に関してのお願いとご注意を書かせていただきます。

- (1) 投稿に当たっては、2誌の裏表紙内側にある投稿上の注意事項をよくお読み下さい。
- (2) 投稿される論文は未発表であることが条件ですが、日本語のみで発表されたものは未発表と見なされます。もし日本語のみで発表された論文を英訳して投稿される場合には、邦文論文別刷りを同時に送っていただけると査読の参考になると思います。
- (3) 査読は2か月で済ませていただくようお願いしておりますが、査読者の都合によりこれより長くなる場合もあります。査読により照会・訂正事項が生じた場合にはさらに長びくこととなります。
- (4) 論文を投稿される場合には、英文の推敲にとくに留意下さい。英語に堪能であると自負しておられる方も多いと思いますが、それでも英語を母国語とし、かつ工学的素養を持つ人に英文のチェックをしてもらうことを強くお勧めします。
- (5) 上掲2誌は、伝熱関係の学術誌としては国際的評価のもっとも高いものです。貴重な研究の成果を邦文論文のまま放置せず、積極的に英訳して投稿されるよう希望します。

Announcement and Call for Papers

FIRST ISHMT-ASME HEAT AND MASS TRANSFER CONFERENCE (12th NATIONAL HEAT AND MASS TRANSFER CONFERENCE) Bombay, India, January 5-7, 1994

Heat and mass transfer play a very important role in all industrial processes. Hence, a proper understanding of these phenomena is very essential for optimal design of the equipment and components, and efficient operation of various process and industrial plants, ensuring economy and safety. The Indian Society for Heat and Mass Transfer (ISHMT) has been acting as a nodal agency in India in stimulating research workers engaged in various areas of heat and mass transfer and bringing them together for fruitful interaction and exchange of views. The ISHMT organized the first National Heat and Mass Transfer Conference at the Indian Institute of Technology, Madras in 1971 and subsequently the conference has been held once every two years all over the country. In all these conferences, many experts from abroad have participated, exchanged technical information and shared their expertise with Indian researchers. With the passing of two decades, the organization has matured. In order to accelerate already existing scientific cooperation between USA and Indian researchers through several cooperative research projects and minimize duplication of research efforts, it has been decided to organize the next national conference as a joint ISHMT-ASME Heat and Mass Transfer Conference as agreed by both societies. Hopefully, this joint conference will encourage broader international participation from other countries for further scientific cooperation.

The aim of the conference is to bring together the researchers and practitioners from India, USA, and other countries to enable discussions and exchange of information in the relevant areas. The major thrust of the conference will be to:

- review the state-of-the-art
- presentation of new fundamental and applied research results
- identification of possible areas of cooperation between industry and research institutions both in India as well as other countries for mutual benefit.

Contributed papers are solicited in all areas of heat and mass transfer dealing with theory, analysis, experimental work, computational studies, modeling, simulation, design, applications and technology. In addition, there will be keynote addresses and a few state-of-the-art invited lectures by eminent experts, covering up-to-date research and developments in heat and mass transfer areas. There will also be mini-symposia on some specialized subjects, and panel discussions on some of the most important areas of current interest. It is also planned to devote a session for Industry/Research Worker interaction to identify research areas of immediate interest to Industry. There will also be an exhibition of heat and mass transfer equipment. Short courses on the subjects of the most important technological area will also be offered.

Deadlines

- 31 October 1992 Three copies of abstracts due
- 31 December 1992 Notification of abstract acceptance
- 31 March 1993 Full length manuscript due
- 30 June 1993 Notification of paper acceptance
- 31 August 1993 Author-prepared mats due

All papers will go through a strict peer review process. All accepted papers will be published in the hard cover conference proceedings available at the Conference. The Conference language will be English and all papers must be in English. For further information and abstract contact:

- Dr. V. Venkat Raj, Conference Co-Chairman, Reactor Safety Division, Bhabha Atomic Research Centre, Engineering Hall 7, Bombay 400 085, India. Tel: 91-22-555-0847; Fax: 91-22-556-0750.
- Dr. R.K. Shah, Conference Co-Chairman, Harrison Division, GMC, Lockport, NY 14094-1896, USA. Tel: 1-716-439-3020; Fax: 1-716-439-3648.
- Dr. V.M.K. Sastri, ISHMT Secretary, Department of Mechanical Engineering, Indian Institute of Technology, Madras 600 036, India. Tel: 91-44-235-1365, Ext. 3694; Fax: 91-44-235-0509.

hmtc:js

事務局からの連絡

1. 学会案内と入会手続きについて

【目的】

本会は、伝熱に関する学理技術の進展と知識の普及、会員相互及び国際的な交流を図ることを目的としています。

【会計年度】

会計年度は、毎年4月1日に始まり翌年3月31日までです。（但し、「伝熱研究」の巻と表紙の色は1月号から10月号までの一年間同じです）

【会員の種別と会費】

会員種別	資 格	会 費（年 額）
正会員	伝熱に関する学識経験を有する者で、本会の目的に賛同して入会した個人	8,000円
賛助会員	本会の目的に賛同し、本会の事業を援助する法人またはその事業所、あるいは個人	1口 30,000円
学生会員	高専、短大、大学の学部および大学院に在学中の学生で、本会の目的に賛同して入会した個人	4,000円
名誉会員	本会に特に功労のあった者で、総会において推薦された者	0円
推薦会員	本会の発展に寄与することが期待できる者で、当該年度の総会において推薦された者	0円

【会員の特典】

会員は本会の活動に参加でき、さらに次の特典があります。

- 1) 「伝熱研究」の郵送が受けられる。（本年度発行予定：1月号 Vol.31, No.124）
 - ・正会員、学生会員、名誉会員、推薦会員に1冊送付
 - ・賛助会員に口数分の冊数送付
- 2) 「日本伝熱シンポジウム講演論文集」の無料郵送が受けられる。
 - ・正会員、学生会員、名誉会員、推薦会員に1部送付
（但し、前年度3月25日までに前年度分までの会費を納入した会員に限る）
 - ・賛助会員に口数分の部数送付

【入会手続き】

正会員または学生会員への入会の際は、入会申込用紙にご記入の上、事務局（本郷）宛にファックスまたは郵送で送り、郵便振替にて当該年度会費をお支払い下さい。賛助会員への入会の際は、入会申込用紙にご記入の上、事務局（本郷）宛にファックスまたは郵送でお送り下さい。必要があれば本会の内容、会則、入会手続き等についてご説明します。賛助会員への申込みは何口でも可能です。

（注 意）

- ・申込用紙には氏名を明瞭に記入し、難読文字にはJISコードのご指示をお願いします。
- ・会費納入時の郵便振替用紙には、会員名（必要に応じてフリガナを付す）を必ず記入して下さい。会社名のみ記載の場合、入金の取扱いができず、会費未納のままとなります。
- ・学生会員への入会申込においては、指導教官による在学証明（署名・捺印）が必要です。

2. 会員の方々へ

【会員増加と賛助会員口数増加のお願い】

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

【会費納入について】

会費納入には本誌折込みの郵便振替用紙をご利用下さい。その他の送金方法で手数料が必要な場合には、送金額から減額します。フリガナ名の検索によって入金の手続き処理を行っておりますので会社名のみで会員名の記載がない場合には未納扱いになります。会費未納状況は、「伝熱研究」郵送ラベルの累積請求額でご確認下さい。

【変更届について】

（勤務先、住所、通信先等の変更）

勤務先、住所、通信先等に変更が生じた場合には、巻末の「変更届用紙」にて速やかに事務局へお知らせ下さい。通信先の変更届がない場合には、郵送物が会員に確実に届かず、あるいは宛名不明により以降の郵送が継続できなくなります。また、再発送が可能な場合にもその費用をご負担頂くこととなります。

（賛助会員の代表者変更）

賛助会員の場合には、必要に応じて代表者を変更できます。

（学生会員から正会員への変更）

学生会員が社会人になられた場合には、会費が変わりますので正会員（正会員）への変更届を速やかにご提出下さい。このことにつきましては、指導教官の方々からもご指導をお願いします。

（変更届提出上の注意）

会員データを変更する際の誤りを防ぐため、変更届は必ず書面にて会員目身もしくは代理と認められる方がご提出下さるようお願いいたします。

【退会届について】

退会を希望される方は、退会日付けを記した書面にて退会届（郵便振替用紙に記載可）を提出し、未納会費を納入して下さい。会員登録を抹消し、「退会処理通知」を送付します。

【会費を長期滞納されている方へ】

長期間、会費を滞納されている会員の方々は、本号宛名ラベルの会費請求額をご確認の上、至急納入をお願いします。

（平成3年度以降の会費未納の方へ）

平成4年12月末までに会費を納入されない場合、来年1月以降の「伝熱研究」の送付を停止し、来年1月の会費個別請求にても未納の場合、退会処置が理事会で協議されます。

（平成2年度以降の会費未納者の処置）

昨年10月以降の「伝熱研究」の送付を停止しております。理事会にて退会処置について協議した結果、当面個別に会費納入をお願いすることになりました。来年1月の会費個別請求にても未納の場合、退会処置が理事会で再度協議されます。

3. 事務局について

昨年10月1日から次の業務を下記の事務局で行っております。

事務局	
（業務内容）	
i) 入会届、変更届、退会届の受付	
ii) 会費納入の受付、会費徴収等	
iii) 会員、非会員からの問い合わせに対する対応、連絡等	
iv) 前回までの「伝熱シンポジウム講演論文集」の注文受付、 新入会員への「伝熱研究」発送、その他刊行物の発送	
v) その他必要な業務	
（所在地） 〒113 東京都文京区本郷5-25-18	
日本伝熱学会	
TEL, FAX: 03-5689-3401	
（土日、祝祭日を除く、午前9時～午後5時）	

（注 意）

1. 事務局への連絡、お問い合わせには、電話によらず、できるだけ郵便振替用紙の通信覧やファックス等の書面にてお願いします。
2. 第10回日本伝熱シンポジウム関連の事務（発表・参加・論文集申込み、その他問い合わせ等）は扱っておりませんので、実行委員会に直接お願いします。

〒152 東京都目黒区大岡山2 12 1 東京工業大学 原子炉工学研究所 井上 晃 TEL: 03-3726-1111 (内線3077、3050) FAX: 03-3729-1875

日本伝熱学会 正会員・学生会員入会申込み・変更届用紙

- (右の該当に○を記入) 1. 正会員・学生会員入会申込書
2. 変更届 (書面による届出のみ受け)

0	申込年月日	H		年		月		日	(注 意) ・楷書体で明瞭に記入 ・氏名にふりがなを付す ・通信文は余白に記入 ・申込み時に郵便振替にて 会費納入			
1	会員資格	正・学										
2	氏名											
3	ふりがな											
4	生年月日	M	・	T	・	S		年		月		日
5	* 勤務先 ・ 学 校	名称										
6		〒	-									
7		所在地										
8		TEL										
9		FAX	共通・専用									
10		TEL										
11	FAX	共通・専用										
12	自 宅	〒	-									
13		住所										
14		TEL										
15		TEL										
16	通信先**	勤務先・自宅										
17	学位											
18	最終出身校											
19	卒業年次	T	・	S	・	H		年				
20	専門分野											← (下記専門分野の番号)
21	学生会員の場合：指導教官名***	印										

専門分野

- 1: 自然対流 2: 強制対流 3: 熱伝導 4: 凝縮 5: 沸騰・蒸発 6: 混相流
7: 物質移動 8: 反応・燃焼 9: 放射 10: 熱物性 11: 熱交換器 12: 流動層
13: 蓄熱 14: 冷凍・空調 15: 内燃機関 16: ガスタービン 17: 蒸気機関 18: 原子力
19: 太陽熱 20: 環境 21: その他 ()

例：電子機器の冷却、生体伝熱、分子動力学等

*) 学生会員入会申込者は学校名、学部、学科、研究室名、学年 (M2, D3など) を記す。

***) 郵送物発送先として通信先を必ず記入する。

****) 学生会員入会申込者は、指導教官の署名・捺印を受ける。

日本伝熱学会 賛助会員新規入会申込み届用紙

0	申込年月日	日	年	月	日
---	-------	---	---	---	---

※ご記入に際しての注意

日本伝熱学会からの郵送物は代表者にお送りしておりますので、代表者の所属に変更がありましたら、書面にて事務局宛ご連絡下さるようお願いいたします。

1	会員資格	賛助会員
2	代表者氏名	
3	ふりがな	

4	代表者勤務先	名称(所属)	
5		〒	-
6		所在地	
7		TEL	
8		FAX	共通・専用
9	口数	口	

日本伝熱学会入会のご案内

1. 本学会の会計年度は毎年4月1日から翌年3月末日までです。
2. 賛助会員の会費は1口30,000円/年で、申し込みは何口でも結構です。申し込み口数により、次のように分けております。
A(3口)、B(2口)、C(1口)
3. 会員になりますと「伝熱研究」及び「日本伝熱シンポジウム講演論文集」等をお申し込み口数1口につき1部お送りします。
この伝熱研究は通常、年4回(4、7、10、1月号)発行しております。
但し、日本伝熱シンポジウム講演論文集につきましては、前年度の会費を年度末までに納入された会員に限り当該年度のものをお送りします。
尚、年度途中でご入会の方には残部の都合でお送りできない場合もありますので、あらかじめご承知おき下さい。
4. 本学会では、事務作業簡素化のために会費の領収書の発行は郵便振替や銀行振込の控えをあてています。簡単な書式の領収書はご用意できますが、それ以外の場合には貴社ご指定の書式をご送付下さいますようお願いいたします。

申込書送付先：〒113 東京都文京区本郷 5-25-18
日本伝熱学会事務局
TEL., FAX. 03-5689-3401

会費の払込先：

- (1) 郵便振替の場合――郵便振替口座 東京6-14749 日本伝熱学会
- (2) 銀行振込の場合――第一勧業銀行 大岡山支店 普通預金口座 145-1517941
日本伝熱学会 代表 井上 晃
- (3) 現金書留の場合――上記の事務局宛に御送金下さい。

複写をされる方に

本誌に掲載された著作物を複写したい方は、著作権者から複写権の委託を受けている次の団体から許諾を受けて下さい。

学協会著作権協議会内日本複写権センター支部

〒107 東京都港区赤坂9-6-42 704

Phone 03-3475-4621/5618

Fax 03-3403-1738

Notice about photocopying

In the U.S.A., authorization to photocopy items for internal or personal use, or the internal or personal use of specific clients, is granted by [copyright owner's name], provided that designated fees are paid directly to Copyright Clearance Center. For those organizations that have been granted a photocopy license by CCC a separate system of payment has been arranged.

Copyright Clearance Center 27 Congress St.

Salem, MA 01970

Phone (508)744-3350

Fax (508)741-2318

伝熱研究

Vol.31, No.123

1992年10月発行

発行所 日本伝熱学会

〒113 東京都文京区本郷5-25-18

日本伝熱学会

電話 03(5689)3401

Fax 03(5689)3401

振替 東京 6-14749

(非売品)