

JAERI-Conf  
96-002



第9回「原子力におけるソフトウェア開発」研究会報告集  
1995年11月9-10日，東海研究所，東海村

1996年2月

原子力コード研究委員会・炉物理研究委員会

日本原子力研究所  
Japan Atomic Energy Research Institute

本レポートは、日本原子力研究所が不定期に公刊している研究報告書です。

入手の問合せは、日本原子力研究所技術情報部情報資料課（〒319-11 茨城県那珂郡東海村）あて、お申し越しください。なお、このほかに財団法人原子力弘済会資料センター（〒319-11 茨城県那珂郡東海村日本原子力研究所内）で複写による実費頒布をおこなっております。

This report is issued irregularly.

Inquiries about availability of the reports should be addressed to Information Division, Department of Technical Information, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokaimura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-11, Japan.

© Japan Atomic Energy Research Institute, 1996

編集兼発行 日本原子力研究所

印 刷 株原子力資料サービス

第9回『原子力におけるソフトウェア開発』研究会報告集

1995年11月9日-10日，東海研究所，東海村

日本原子力研究所東海研究所

原子力コード研究委員会・炉物理研究委員会

(1996年1月22日受理)

本報告書は、平成7年11月9日、10日に、日本原子力研究所東海研究所において開催された第9回『原子力におけるソフトウェア開発』研究会での発表論文を収録したものである。研究会は、原子力コード研究委員会と炉物理研究委員会の共催によって行われた。シミュレーションや実験による各種現象の理解、あるいはプラントの設計や運転支援に有効な“ビジュアリゼーション技術”が今回のテーマであり、「シミュレーションと可視化技術」及び「画像処理と計測」に関する発表が行われた。

---

東海研究所：〒319-11 茨城県那珂郡東海村白方白根2-4

プログラム実行委員会：

原子力コード研究委員会 渡辺 正，久米 悅雄，近藤 昌也，蛭田 国男（以上原研）

岡本 孝司（東大），西田 浩二（日立），鈴木 忠和（RIST）

炉物理研究委員会

山根 剛，吉田 啓之，小柳 大作（以上原研）

築城 諒（東芝），佐藤 理（三菱総研）

Proceedings of the 9th Topical Meeting on Nuclear Code Development  
November 9 - 10, 1995, JAERI, Tokai, Japan

Nuclear Codes Committee and Research Committee on Reactor Physics

Tokai Research Establishment  
Japan Atomic Energy Research Institute  
Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received January 22, 1996)

This report is the proceedings of the 9th Topical Meeting on Nuclear Code Development held at Tokai Research Establishment, Japan Atomic Energy Research Institute (JAERI), on November 9 and 10, 1995. The meeting was organized in cooperation with the Nuclear Codes Committee and the Research Committee on Reactor Physics. The main subject of the meeting was "visualization technique", which was useful for understanding various phenomena in simulations and experiments or for supporting plant design and operation, and the papers on "Simulation and Visualization Technique" and "Image Processing and Measurement" were presented.

Keywords: Software, Reactor Physics, Nuclear Code, Simulation, Visualization, Image Processing, Measurement

## 目 次

1. 開会の辞 .....	1
	浅井 清（原子力コード研究委員会委員長）
2. サイエンティフィック・ビジュアリゼーションへの富士通の取り組み .....	2
	山本 誠（富士通）
3. 計算科学研究における可視化技術の応用 .....	16
	渡辺 正（日本原子力研究所）
4. ミクロからマクロまでの熱物質移動シミュレーション .....	32
	功刀 資彰（日本原子力研究所）
5. 放射性物質の大気拡散に関する研究での可視化技術の応用例 .....	55
	山澤 弘実（日本原子力研究所）
6. 中性子ラジオグラフィによる熱流動現象の可視化と画像処理による計測 .....	68
	竹中 信幸（神戸大学）
7. 可視化画像の画像処理について .....	77
	岡本 孝司（東京大学）
8. ROSA-V/LSTF グラフィック表示システム .....	95
	近藤 昌也（日本原子力研究所）
9. プラント建設工程計画のビジュアリゼーション .....	107
	横田 育、小林 康弘、荒木 憲司、好永 俊昭（日立製作所）
10. 知能ロボットシミュレーションのための可視化システム .....	118
	樋口 健二、大谷 孝之、久米 悅雄（日本原子力研究所）
11. 閉会の辞 .....	155
	土橋敬一郎（炉物理研究委員会委員長代理）
付録 出席者名簿 .....	156

## Contents

1. Opening Address .....	1
Kiyoshi Asai (Chairman of Nuclear Codes Committee)	
2. Fujitsu's Approach to Scientific Visualization .....	2
Makoto Yamamoto (Fujitsu Ltd.)	
3. Application of Visualization Technique in Computational Science .....	16
Tadashi Watanabe (JAERI)	
4. Numerical Simulation of Thermofluid Flow and Mass Transport for Microscopic and Macroscopic Phenomena .....	32
Tomoaki Kunugi (JAERI)	
5. Application of Visualization Techniques to the Research on Atmospheric Dispersion of Radionuclides .....	55
Hiromi Yamazawa (JAERI)	
6. Visualization and Measurement by Image Processing of Thermal Hydraulic Phenomena by Neutron Radiography .....	68
Nobuyuki Takenaka (Kobe Univ.)	
7. Quantitative Flow Visualization .....	77
Koji Okamoto (Univ. Tokyo)	
8. Graphic Display System for ROSA-V Large Scale Test Facility .....	95
Masaya Kondo (JAERI)	
9. Visualization for Plant Construction Scheduling .....	107
Takeshi Yokota, Yasuhiro Kobayashi, Kenji Araki, Toshiaki Yoshinaga (Hitachi, Ltd.)	
10. Visualization System for Intelligent Robot Simulation .....	118
Kenji Higuchi, Takayuki Otani, Etsuo Kume (JAERI)	
11. Closing Address .....	155
Keiichiro Tsuchihashi (Research Committee on Reactor Physics)	
Appendix List of Participants .....	156

## 1. 開会の辞

原子力コード研究委員会

委員長 浅井 清

原子力におけるソフトウェア開発研究会の開催に当たり、ひとこと挨拶をさせて頂きます。今回は、原子力コード研究委員会が担当となっておりますので、開会の挨拶は私が、閉会の挨拶は土橋炉物理研究委員会委員長代理が致します。

皆様、遠いところをこの研究会に出席のためにお出いで頂き誠に有り難う御座います。また、この研究会の開催のために尽力頂いた幹事の方々にお礼を申し上げたいと思います。

今回のテーマとして幹事の方々が選ばれたのは、可視化・画像化ですが、これは時宜を得たテーマであると言えます。最近のようにコンピュータが高速になってきますと、大量の計算結果をプリントアウトされた数字で見ることは難しくなります。その点、画像化された結果は直感的に判りやすく、また、他の人に説明するのも便利ですし、なによりも解析している現象の洞察に大きな力となります。

さて、この研究会も今年で9年目、来年は10年目となります。この9年間を振り返って見ますと、世界的には、冷戦構造の崩壊、先進国での原子力研究開発のスローダウン、アジア地域の急速な経済成長などがあります。国内的には、あらゆる面での規制緩和の動き、A T R実証炉の建設中止、ますます困難になるパブリックアクセスの問題などがあります。私個人の感想を申せば、これらの急激な変化すべてが日本の原子力にとってネガティブに作用するであろうと感じています。従って、10年前にこの研究会を発足させた時と現在の状況はかなり変わっていると見るのが妥当と思われます。

そこで、この研究会としても現在の状況を考慮しつつ、諸先輩や私たちが育て、維持してきた原子力技術を守り、更に発展させるためにどうすればよいかという視点で研究会の理念の再構築を図るべきときと言えましょう。その方法について妙案を持っているわけではありません。ここに御出席の皆様、また、関係者の皆様のお知恵を拝借して考えてゆければと思います。本日は御出席頂き大変有り難う御座います。

簡単ですが、私の挨拶とさせて頂きます。

## 2. サイエンティフィック・ビジュアリゼーションへの富士通の取り組み

山本 誠（富士通・科学システム統括部）

サイエンティフィック・ビジュアリゼーションの技術は、スーパコンピュータとグラフィックス・ワークステーションの性能、機能の著しい向上と共に発展して来た。スーパコンピュータで実行した数値シミュレーションの結果を、ワークステーション側で画像にして表示する分散環境での可視化システムが主流となっているが、その機能分散における種々の形態を中心に論じる。そしてその中で、当社が取り組んできた可視化システムについて、紹介する。特に、リアルタイム可視化に対する一つの解決方法として、インタラクティブな表示データ削減や変更と、シミュレーションソフトウェアとのインターフェースを提案し、開発中のソフト VisLinkについて紹介する。また、グラフィックス・アクセラレータ AGシリーズにおけるリアルタイムCGソフトウェア「彩飛」によるVR（バーチャル・リアリティ）への取り組みについても、紹介する。

## Fujitsu's Approach to Scientific Visualization

Makoto Yamamoto (Fujitsu Ltd.)

Scientific Visualization techniques are developed with the remarkable progress of performance and functions in supercomputers and graphics workstations. The popular visualization system is the distributed configuration, in which the results of numerical simulation computed in supercomputers are transmitted through network into workstations and converted to the images for display.

In this paper, the various cases of functional distribution in the configuration are mainly discussed. And then visualization systems or softwares in Fujitsu in the past and present are introduced. Especially for one of the solutions for real-time visualization, we propose interactive data reduction and tracking, with the interface to the simulation softwares. As this example, 'VisLink', which is the software being developed now, is introduced. Our trial to Virtual Reality with the high-level graphics accelerator AG and the real-time CG software 'Sight (彩飛)' is also introduced.

Keywords ( Scientific Visualization, Real-time Visualization, Graphics Workstation, Solver, Network, real-time computer graphics, Virtual Reality )

## 1. サイエンティフィック・ビジュアリゼーションの位置づけ

サイエンティフィック・ビジュアリゼーションは、物理現象を視覚で理解する為の表現技術、あるいは、数値シミュレーション結果や観測データ／実験データを图形化して画像表示する一連の処理であり、GWS（グラフィックス・ワークステーション）等のプラットフォームの上での画像表示という面で、CG（コンピュータ・グラフィックス）の一分野であると言うことが出来る。しかしながら、同じ様なGWSの上におけるアプリケーションではあっても、図-1に示す様に、CAD/CAM/CAEの分野や、VR（バーチャル・リアリティ）等のリアルタイムCGの分野、映像制作さらにはゲーム等の分野におけるCGとは、その性格が異なる。

最近では、シミュレーション結果を設計に反映する様なSBD（シミュレーション・ベースド・デザイン）とか、可視化をインタラクティブに立体表示で見たり、リアルタイムにシミュレーション計算を実行しながら条件等を変更する等のVRの世界との関連や、映像制作へのシミュレーション結果の取り込み等、サイエンティフィック・ビジュアリゼーションとの関わりも深くなつた。

ここでは、サイエンティフィック・ビジュアリゼーションの中でも、特に、数値シミュレーション結果の可視化を中心とするが、VRへの当社の取り組みの例も紹介する。

## 2. 当社における取り組み

### 2.1 ソフトウェア製品の概略

当社は、可視化ソフトウェアに関しては、2次元計算結果のグラフ化としてのアプリケーションパッケージGRAPHMANを、汎用ホスト(MSP)用に開発し、オープン化の動向に対応して、UXP/M(Mシリーズ、VP、VPX)やSolalits(Sファミリ)へと展開してきた。これはVX用のOSであるUXP/Vへも展開の予定である。

また、3次元計算結果の映像化の要求に対応して、プレゼンテーション映像制作アプリケーションパッケージCGMSを開発し、MSP、UXP/M、UXP/V(予定)に対応している。

一方、流体解析／構造解析等の数値シミュレーション結果や観測／実験データの可視化の為の汎用パッケージとして、米国AVS社開発のAVS(Application Visualization system)が世界的な業界デファクトの位置づけとして、広く利用される様になって来た。これに対応して、当社からもSファミリを中心としたWS版のAVSを販売すると同時に、当社スーパコンピュータVP、VPXシリーズ上にもAVSを移植(UXP/M版)し、最近の利用形態である分散可視化へのソリューションを提供している。UXP/Vへの展開も、予定している。

さらに、これをベースにして、次の可視化利用形態として注目されているリアルタイム可視化に対応すべく、VisLink(仮称)というAVS連携ソフトを開発中である。

また、VRの分野においても、SUN(Sファミリ)ワークステーションへの当社開発の高速なグラフィックスアクセラレータAGシリーズにあわせ、その上で動作するリアルタイムCGシミュレーションソフトウェア「彩飛」を開発し、VRへの方向へも取り組んでいる。

### 2.2 GRAPHMANの機能

GRAPHMANは、折線グラフ、等高線図、鳥瞰図、ベクトル図等を、簡単に图形化して、Postscript対応のプリンタに出力するなど、その容易さを特長としているソフトウェアである。特に、2次元データの可視化に優れている。

図-2に、GRAPHMANの出力図例を示す。

### 2.3 AV S の機能

AV Sは、以下の様な特長をもった、幅広い適用分野をもった汎用可視化パッケージであり、世界的なデファクト標準としてのツールとして使用されており、Sファミリ、SGI (Silicon Graphics Inc.) 、HP (Hewlett-Packard) をはじめとするGWSや、当社スーパーコンピュータのVP、VPPシリーズやCray等のマルチプラットフォームをサポートしている。

- ・画像データ( Image Data )、3次元スカラーデータ( Volume Data )、幾何データ( Geometry Data )、構造格子データ( Field Data )、非構造データ( UCD )等のデータタイプをサポートしており、幅広い分野の可視化を実現している。
- ・マウスを用いて必要な可視化モジュールを組み合わせるビジュアルプログラミング機能を持ちユーザ独自の可視化アプリケーションを容易に構築することができる。
- ・異なるデータを統一的な扱えるグラフィック環境を提供し、処理結果の合成が可能である。

図-3は、AV Sの画面例である。

### 3. 分散可視化

数値計算結果の可視化システムでは、一般的に、数値計算は非常に計算機CPUパワーを必要とするので、スーパコンピュータをはじめとする高速な計算サーバで実行し、AV Sの様な可視化機能については、グラフィックス描画機能の優れたGWS（グラフィックス・ワークステーション）を使用することが有効である。また、映像として見る表示装置は、シミュレーションを実施する研究者等の利用者の手元にあることが望まれるので、スーパコンピュータとGWSを、ネットワークで接続した利用形態が、理想的である。これを、分散可視化と呼んでいる。

数値計算（ソルバと呼ばれるソフトの実行）から、映像にするまでは、次の様な機能の流れとなる。

- (1)数値計算（結果は、物理量等の数値データ）
- (2)形状化（数値データから、等值線や等值面等の抽出を行い、表示する形状を作りだす。通常は、多角形等による立体表現となる幾何学データとなる。）
- (3)画像化（形状データから、視点等からの見えかたを計算しながら、隠面処理や陰影等の処理を行い、2次元の表示映像にする。）

分散可視化においては、これらの機能を、スーパコンピュータで実行するか、GWSで実行するかという機能分散によって、図-4に示す様な3つの形態が存在する。

通常の形態は、上段①のファイル転送の方式である。この方式は、数値計算をスーパコンピュータ等の高速計算サーバで実行し、その結果である数値データをGWSに転送し、それをGWSのグラフィックスアクセラレータ等を利用して高速に描画するが、数値解析データ量が多い場合には、ファイル転送のネットワークがボトルネックとなる。

データ量の削減策として、高速計算サーバ上で、可視化の一部である形状化までを行い、表示する形状データのみをGWSに転送してGWS上で画像化を実施するのが、中段②の方式である。これにより、転送量は削減される。

また、計算機技術の進歩により、高速計算サーバの著しい性能向上が実現されると、形状化だけでなく、画像化まで計算サーバで実行する方式も可能となってくる。これが、下段③の方式であり、計算サーバ側の負荷と、画像データを転送するネットワーク上の負荷が問題ではあるが、映像を表示する表示装置は、Xウィンドウ環境で可視化映像を表示することが出来、高価なグラフィックスワークステーションは不要となる。また、ネットワークにおいても、転送量が解析結

果等に依存されずに、常に一定となる利点もある。特に、今後、ATM等、高速なネットワークが可能となる環境において、その利用形態が注目される所である。

当社のAVSは、UXP/M(VP、VPP)版(リモートモジュール)のレベルアップ(平成7年9月)から、従来の上段①、中段②の利用形態だけでなく、画像化機能も含んだ下段③の形態も可能となり、3つの利用形態全てをサポートしている。

これらの利用形態をどう使い分けるかは、その利用目的やデータ量、ネットワーク環境等を考慮して、最適な方法を選択することになるが、AVSのリモートモジュールは、ビジュアルプログラミングにおける各モジュールに対してどちらのプラットフォームで実行するかを指定する機能により、これを実現する。

図-5に、その利用形態の例を示す。

ネットワークから見ると、HIPPI(ピーク性能800Mbps)、ATM(同156Mbps)、FDDI(同100Mbps)、Ethernet(同10Mbps)で、実効性能は約20~30%であることを考慮すると、画像化まで計算サーバで実行して画像データをネットワークで転送するのは、秒30コマの動画まで考えると約800Mbpsとなり、HIPPIを使用するにしても現実的ではない。一般的には、1タイムステップの計算所要時間と出力データ量、VTRコマ撮りかモニタリングか等の利用目的、可視化するデータの内容(形状化によるデータ転送量)等を考慮して、使い分けることが必要となる。

#### 4. リアルタイム可視化

可視化システムを、その数値シミュレーションの利用面から見ると、図-6に示す様なサイクルを持っている。即ち、計算場等の3次元モデリングやメッシュ分割を行うプリ・プロセッシングと、ソルバによる数値計算と、今まで議論してきた可視化部分のポスト・プロセッシングとの3段階の処理、およびそのフィードバックループである。画面で数値計算結果の可視化された映像を見ながら、観察する領域を変更したり、環境条件や計算条件を変更したりする「トラッキング」と、さらに、メッシュ分割やモデリングにまで反映させる「ステアリング」と呼ばれる様なサイクルである。この為には、数値計算結果をためてファイル転送して後でジックリ観察するのではなく、計算した時点で、可視化結果を表示する様な「リアルタイム可視化」が必須となる。

可視化の意義は、数値シミュレーション結果からその新しい現象を見い出したり検証したりすることであり、その為には、多次元の物理量の大量なデータの中から、注目すべき点あるいは領域、現象等を見つけることが、重要な問題となる。その意味でも、「リアルタイム可視化」の中で、インタラクティブに可視化の視点や領域、可視化方法や色等々、変更することが必要となって来る。

この数値計算と独立したインタラクティブなリアルタイム可視化というツールとして、当社が現在開発しているのが、VisLinkである。

VisLinkは、図-7に示す様に、次の3つのコンポーネントから成っている。

- VisLIB : 数値計算結果データを可視化機能部分に渡す為のサブルーチンライブラリ
- Reducer : VisLIBから受け取ったデータを、VisGUIの指示に応じて加工し、転送するプログラム
- VisGUI : VisLinkのユーザインターフェースであり、転送して欲しいデータの時間的空間的範囲を動的に指示できるクライアントプログラム

数値計算プログラムは、VisLIBをCALLして数値計算を続行しているだけで良く、ユーザは、インタラクティブにVisGUIにより表示する箇所を画像を見ながら変更することができる。数値データ量が多くて転送に時間がかかったり、表示に時間がかかり表示できない等の状況に応じて、時間的空間的なサンプリングによるデータ削減も可能である。これにより、例えば、始めは粗く全体を表示していて、注目すべき領域を特定し、徐々に領域をせばめながら、詳細の表示に変更するとか、等値面の値を詳細にしていく等のことが、数値計算プログラムに何の影響もせずに可能となる訳である。ネットワークの状況に応じて、転送データの削減のしかたを変更する等のネットワーク・オプティマイズも可能である。

VisLIBは、数値計算プログラムとのインターフェースとしてのサブルーチン・コール形式のライブラリであるが、数値計算結果のファイルインターフェースも可能である。

この3つのコンポーネントは、スーパーコンピュータ等の計算サーバ側でもGWS側でも動作することが可能であり、AVSと同様に、種々の分散形態も可能である。即ち、数値計算プログラムと可視化ツール（AVS）との間のリアルタイム可視化用のツールということができる。

図-8に、その利用イメージを示す。

## 6. 可視化におけるシステム構成

可視化におけるシステム構成は、以上述べて来た様な種々の利用形態が可能であるが、まとめると、以下の様な高速計算サーバを中心とした4種類の形態があり、利用目的に応じた構成をとることが望ましいと考えられる。

### (1)高機能GWSの高速接続

大型計算センターの用に、多ユーザが色々な目的で使用する場合に、高機能なGWSを、HIPP等の高速なネットワークで接続して、最高の性能やビデオ／画像機器等の特殊周辺機器の利用を実現する場合

### (2)分散環境GWS

通常の研究室等での利用形態であり、手元にGWSを設置して、ネットワークで計算サーバに接続し、分散可視化を実現する場合

### (3)簡易WSでの利用

不特定多数の利用者や低価格なWSでの可視化用に、高速計算サーバでの可視化を実現する場合

### (4)GWS単体利用

特に、計算サーバを使用せずに、GWS単体で数値計算から可視化まで実行する場合

図-9に、その概要を示す。

## 7. VRへの試み

最後に、可視化とは少し目的が異なるが、関連分野の技術として、VRに対する当社の取り組みに対して述べる。

シミュレーションの計算速度の向上により、リアルタイムにシミュレーションが計算可能になってくると、その計算結果をリアルタイムに可視化するだけでなく、リアルタイムにその条件やアクションを実行したくなる。良い例が、ライトシミュレータであり、ロボットシミュレーションである。こうなってくると、VRと可視化との境界はなくなってくる。

図-10にその概念図を示す。可視化におけるプリ・プロセッシングでは、インタラクティブ

な H I (ヒューマン・インターフェース) として、遠隔制御やデータ・グローブ等が使用されて、VR の入力部を構成することになる。また、ソルバでの計算は、現在では、干渉とかキネマティクス(運動計算)程度しかリアルタイム計算が可能でないが、計算性能の向上に従ってリアルタイム計算へと近づいて行くと思われる。ポスト・プロセッシングの部分は、VR 分野でのウォータースルーとか立体視等が実現されており、GWS 等の性能向上により、リアルタイム可視化の実現は近い。今後は、VR として、視覚だけでなく、音声／音響等の聴覚、グローブでの物をつかむ感覚をフィードバックする触覚が、課題として残されている。さらに、嗅覚、味覚等のいわゆる五感へと、そしてさらには、心理、感情、感性といった芸術的範囲へと、VR の奥は深い。

この様な分野においては、当社は、S ファミリに接続する高速グラフィックスアクセラレータ AG シリーズ、およびその上で動作するリアルタイム CG シミュレーションソフトウェア「彩飛(さいと)」を開発した。

AG は、PHIGS/PEX に向けたハードウェア構造を持ち、高速なレンダリング機能およびレイトランキング等を含む高機能グラフィックス・アクセラレータであり、S ファミリ(SUN) WS に接続される。「彩飛」は、その上で動作する 3 次元シミュレーションの為のアプリケーションソフトウェアであり、ウォータースルーやオブジェクトピッキングや移動等のエディタ機能、アニメーション機能等を持っており、立体視等も可能な VR の基本的な基盤となる。

その実施例として、バーチャル・スタジオの例を、図-11 に示す。

バーチャル・スタジオは、放送局等のスタジオにおいて、大道具、小道具等を製作することなく、それらの CG で製作した映像を、人物等の実写の映像と合成して、あたかもセットの中に出演者がいる様な映像を創りだすものである。

図-11 は、日本テレビの「所さんの目がテン」等の番組で試行したシステム構成図であり、パン(横振り)、チルト(縦振り)、ズーム(写角)、ハイト(高さ)等のカメラの位置情報を CG 制作側に入力し、そのカメラの位置や方向、ズーム等の種々の情報から 3 次元形状で作成された大道具、小道具類のカメラから見た時の映像をリアルタイムに計算し、それを実写映像と合成する。従来の単純なクロマキー合成との大きな違いは、カメラの動きに連動した 3 次元映像をリアルタイムに作り、出演者のリアクションまでも可能にした点、および背景だけでなく、前景をも実現することにより、出演者のまわりを物が回る様な映像も可能にした点にある。これは、当然のことながら、生放送に用いられた。

## 8. 可視化の新しい方向と今後の課題

可視化における課題と今後の方向としてまず挙げられるのは、マルチメディア環境の利用である。即ち、パソコンのグラフィックス・アクセラレータ・ボードも出現している現在、GWS の世界からパソコンの世界へと、環境が広がりつつあり、利用者も利用目的も広がって来ていることである。

その意味から、次の 2 点が今後の課題であろう。

- パソコンでの可視化
- 音等を含めた多次元表現技術(可聴化)

また、MPEG 等を含めた画像圧縮技術や VOD (Video on Demand) 技術を利用した可視化データの蓄積と、オン・デマンド機能等も、可視化ソフトと連携した形での利用として、今後の方針が注目される。

最近では、インターネットの普及により、WWW (World Wide Web) サーバによる情報公開がさかんに行われているが、可視化分野においても、研究成果発表等において、利用される方向にあると思われる。その意味から、WWWブラウザからのMPEG2等の動画の利用やVRML (Virtual Reality Modeling Language) が注目を集めている。

VRMLは、インターネット上で3次元CGデータを扱う標準として提唱され、インターネット上で標準化の検討がなされ、急速に広まって来た3次元CG記述言語である。従来の3次元データは、形状データ自体標準化がなされておらず、光源、色等の属性等は付加されていないのが実情であった。VRMLは、これらを含んだ3次元CGデータの記述標準となると同時に、WWWとのインターフェースを含んでおり、MosaicやNetscape Navigator等のWWWブラウザから起動されて、3次元CGデータを表示することができる。さらに、このデータは、画像や動画と異なって3次元形状があるので、ビューア側でインタラクティブに視点の変更や操作等が可能となるばかりでなく、データ量も少ないという利点があり、今後の利用が期待されている技術である。

図-12に、この様な新しい形態でWWWで公開する利用形態の一例として、AVSによって可視化した結果をVRMLで情報公開する場合を図示する。

また、図-13に当社で試作したVRMLビューアの例を示す。VRMLは、現在、V1.0の仕様が決まった段階であり、当社の試作ビューアでは、その動画的な機能を付加して、可視化結果の利用を試みたものである。

今後共、VRMLの様な新しい可視化への試みや、ViSLinkの開発を含め、可視化分野におけるユーザニーズを満たすべく、努力を続けて行きたい。

#### 〔参考文献〕

- (1)宮地英生「可視化ツールAVSの最近の動向」可視化情報 Vol.15 No.57 pp.21-25
- (2)Eric Clayton「Scientific Visualization at ANSTO」FISUM4, 1995/9
- (3)「インターネット上にVR空間を構築するVRML」日経CG No.110(1995/11) pp.97-116
- (4)藤原徹、菅野嘉則「バーチャルスタジオの実験」第31回民放技術報告会予稿集 pp.78-79
- (5)廣瀬和壽、小松智、藤原徹、菅野嘉則「CGによるバーチャルスタジオの試行」第10回 NICOGRAH 論文集1994, pp.155-161
- (6)小松智「リアルタイム3次元CGミュレーションソフトウェア：彩飛(サイト)」Fujitsu, Vol.45, No.5, pp.403-405

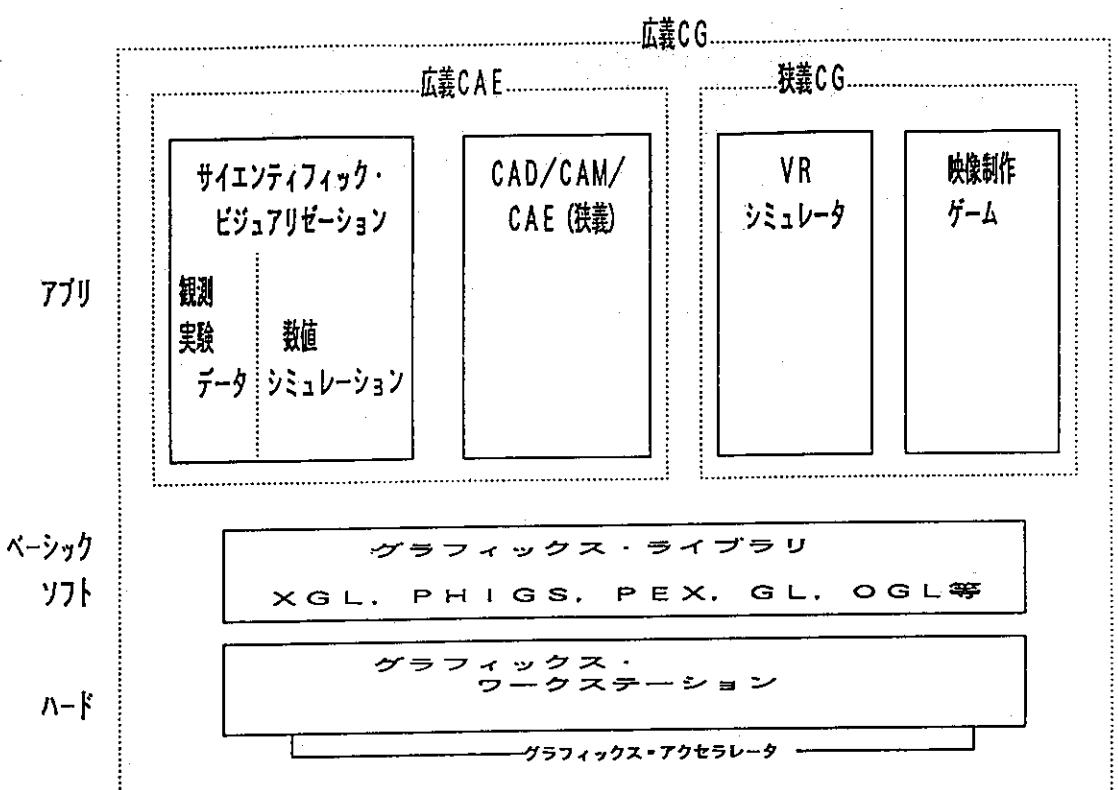


Fig. 1 Scientific Visualization and Computer Graphics

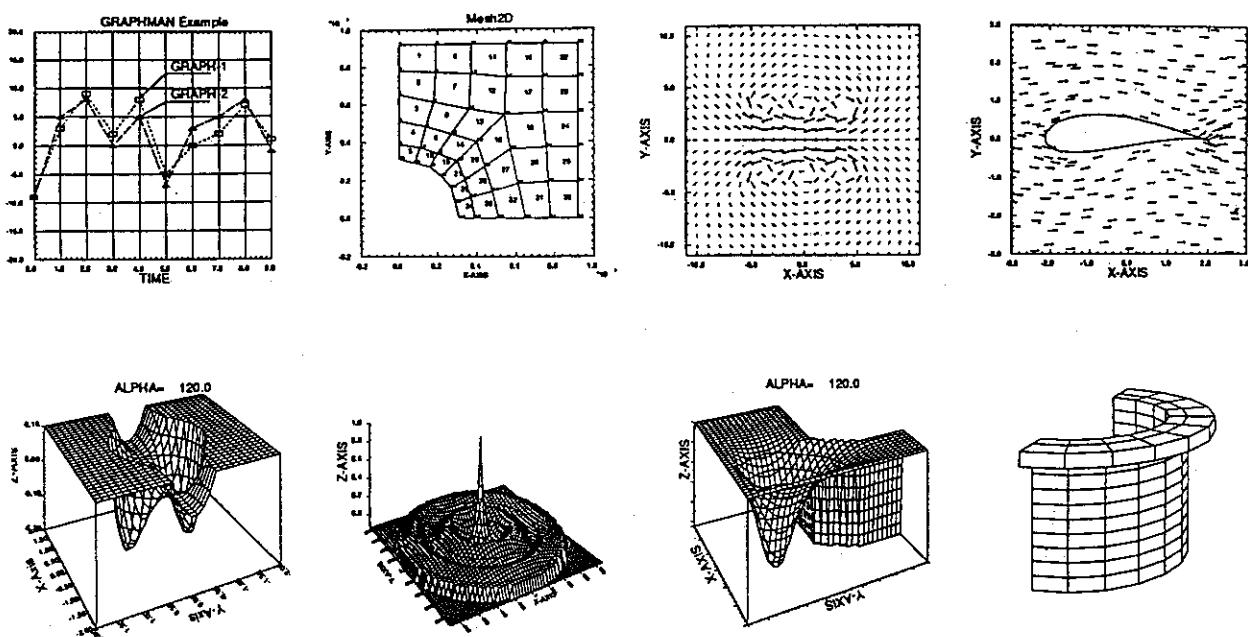


Fig. 2 Examples of GRAPHMAN output

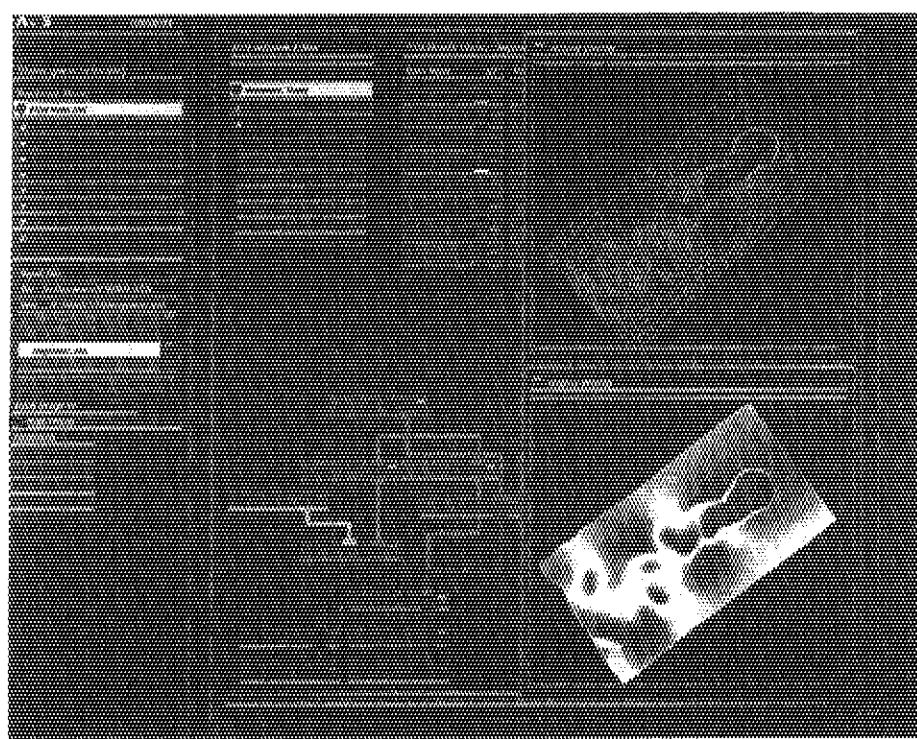


Fig. 3 Example of AVS visualization

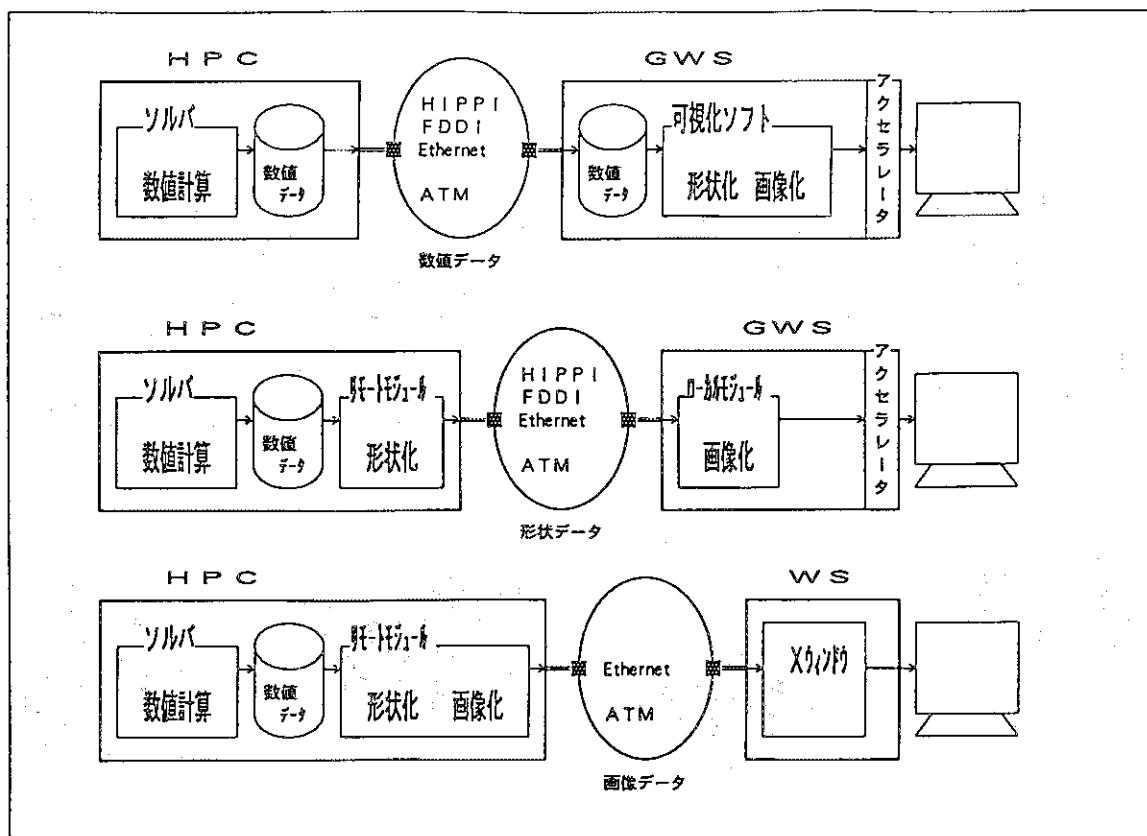


Fig. 4 3 types of Distributed Visualization

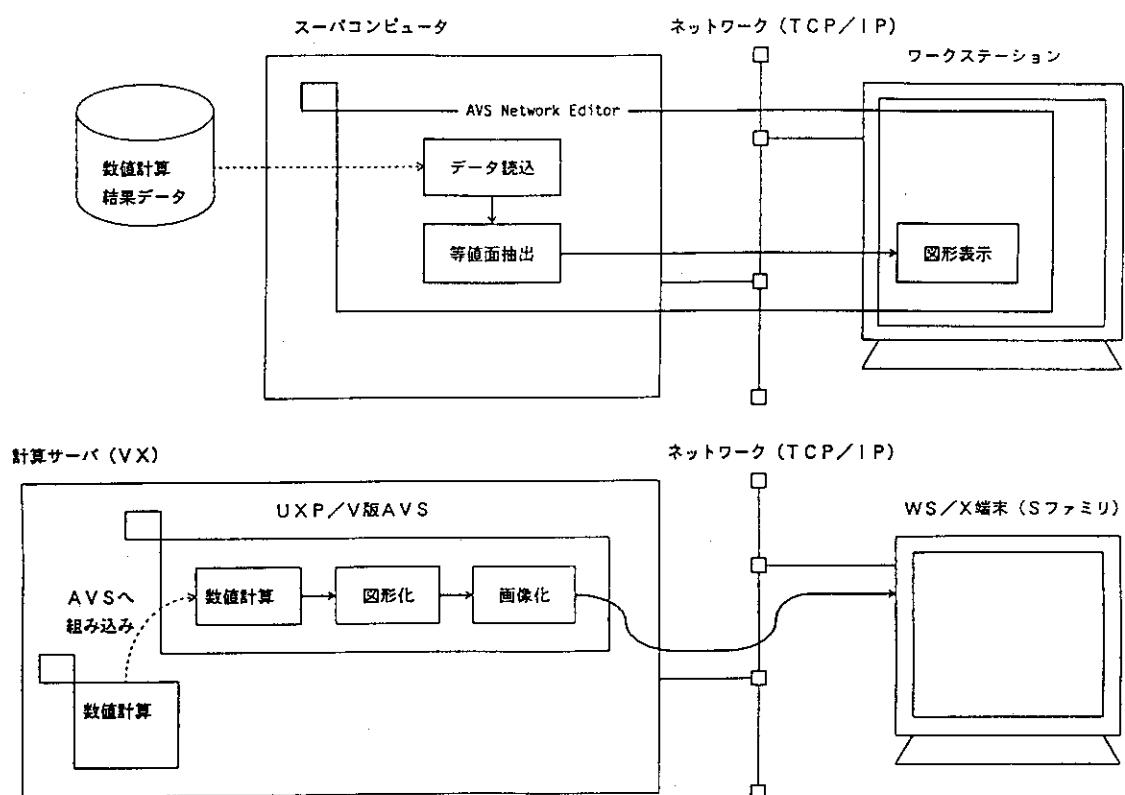


Fig. 5 Examples of Distributed Visualization

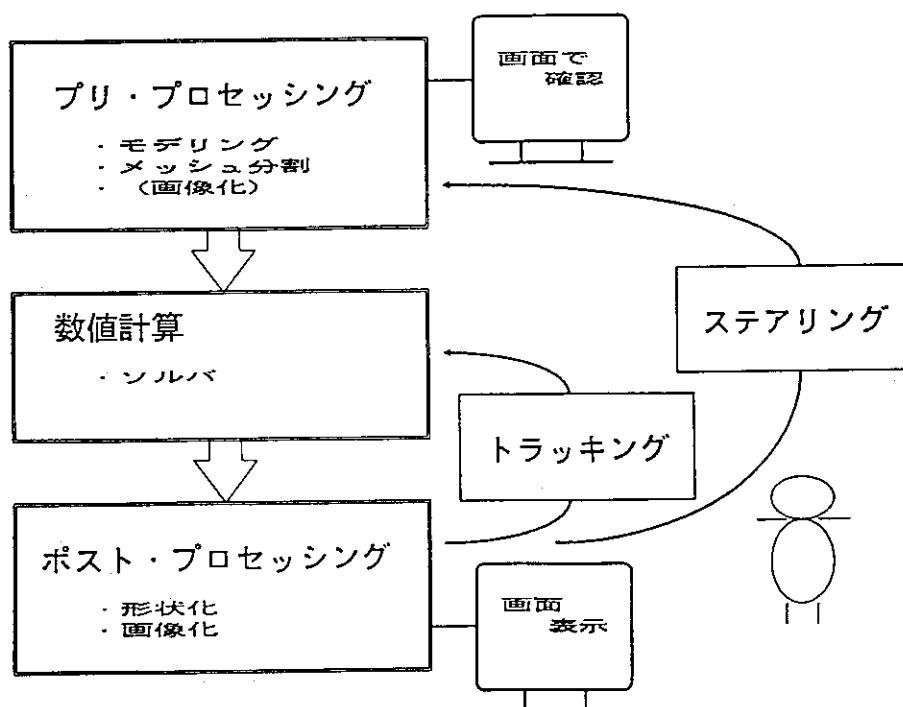


Fig. 6 Cycle of Visualization

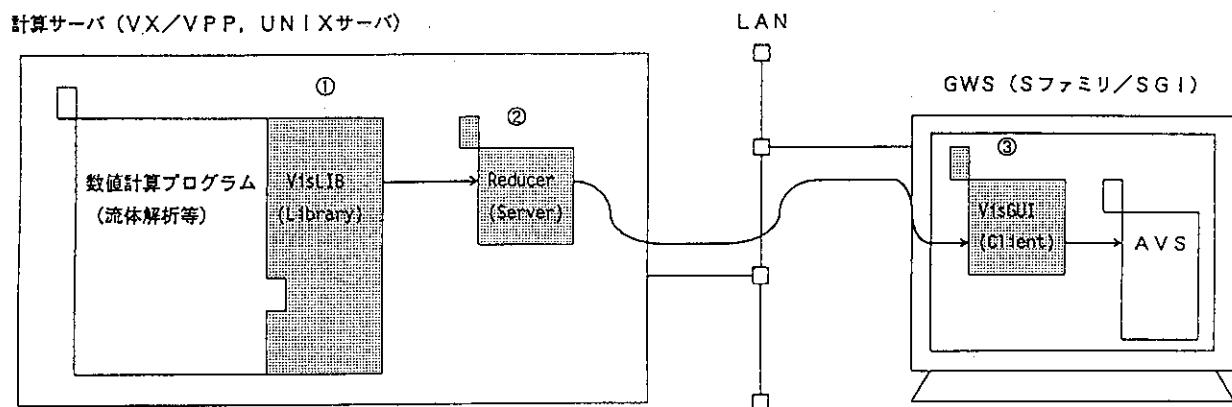


Fig. 7 Components of VisLink

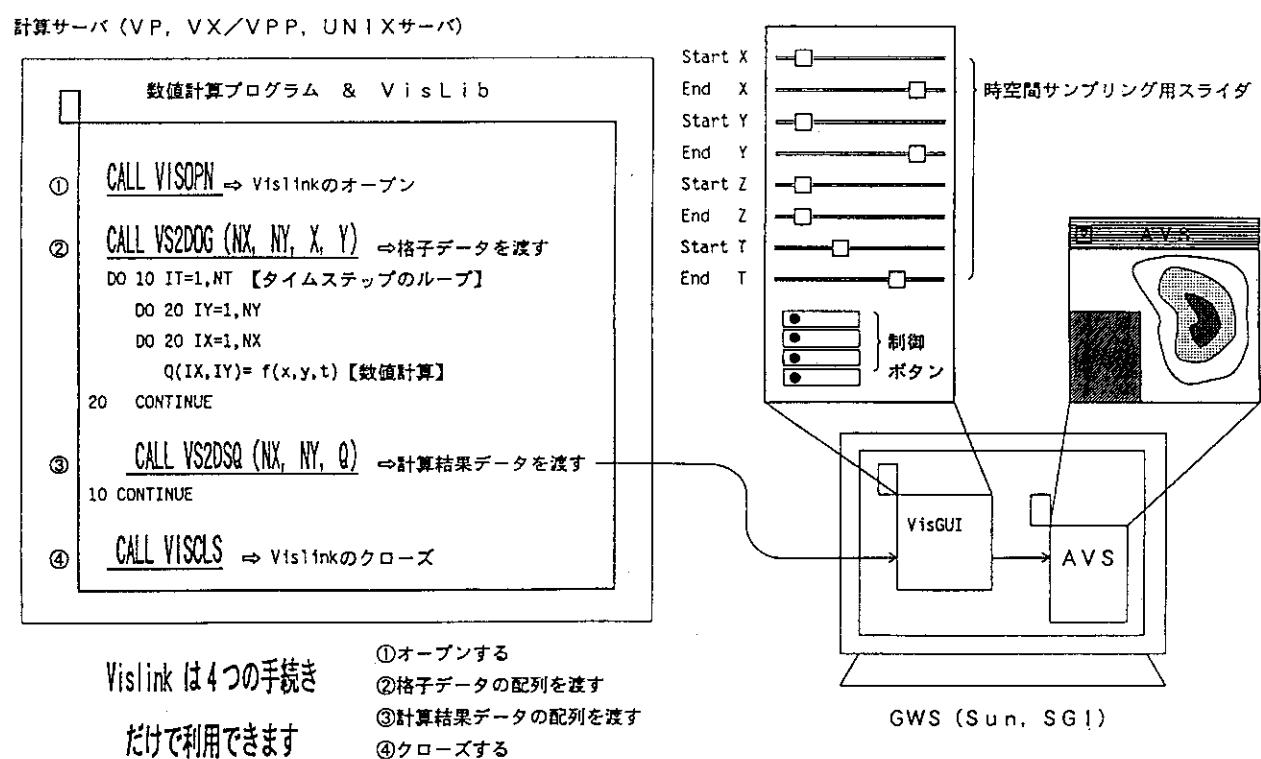


Fig. 8 Comcept of VisLink Operation

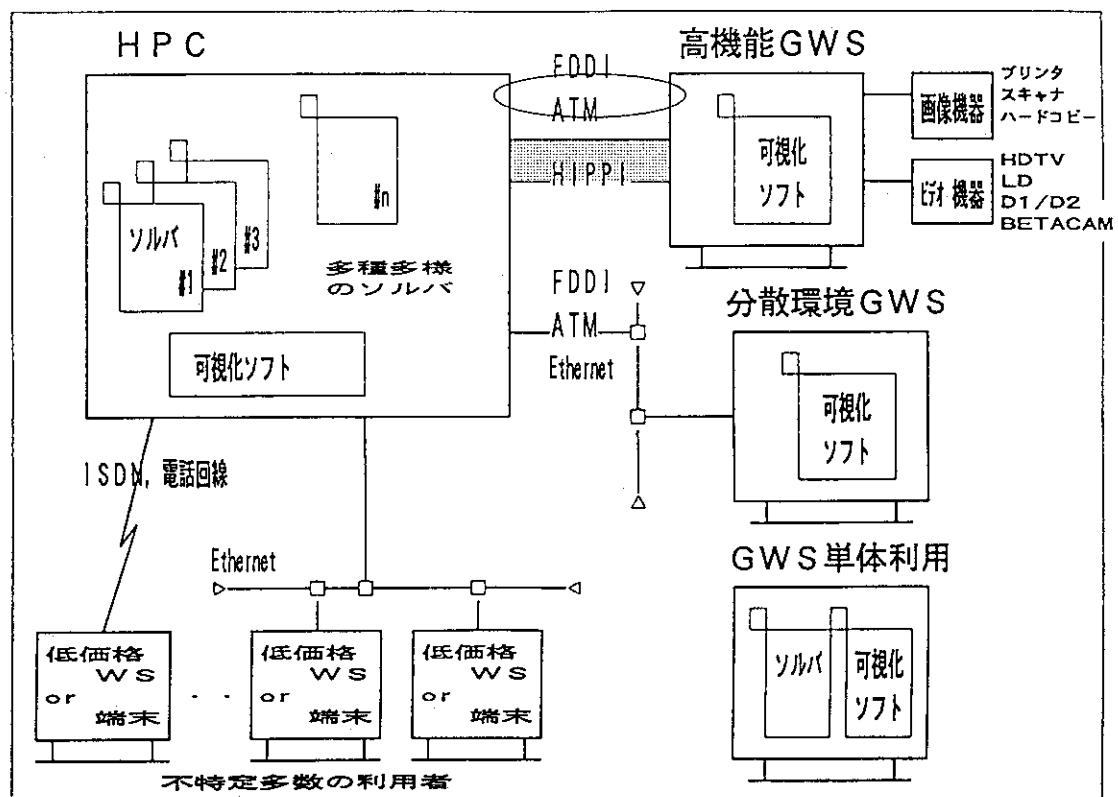


Fig. 9 System Configuration Pattern in Visualization

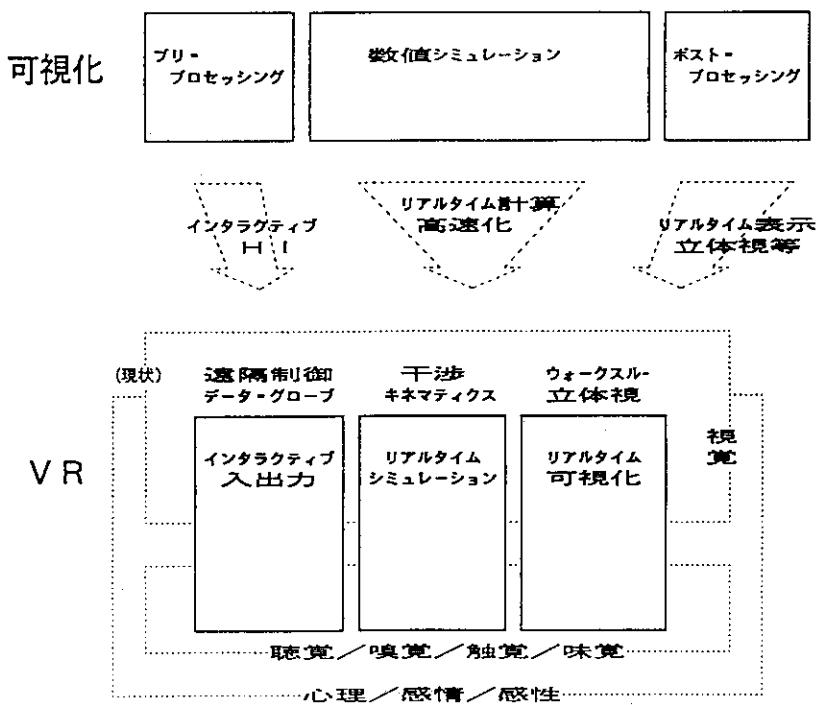


Fig. 10 Virtual Reality and Scientific Visualization

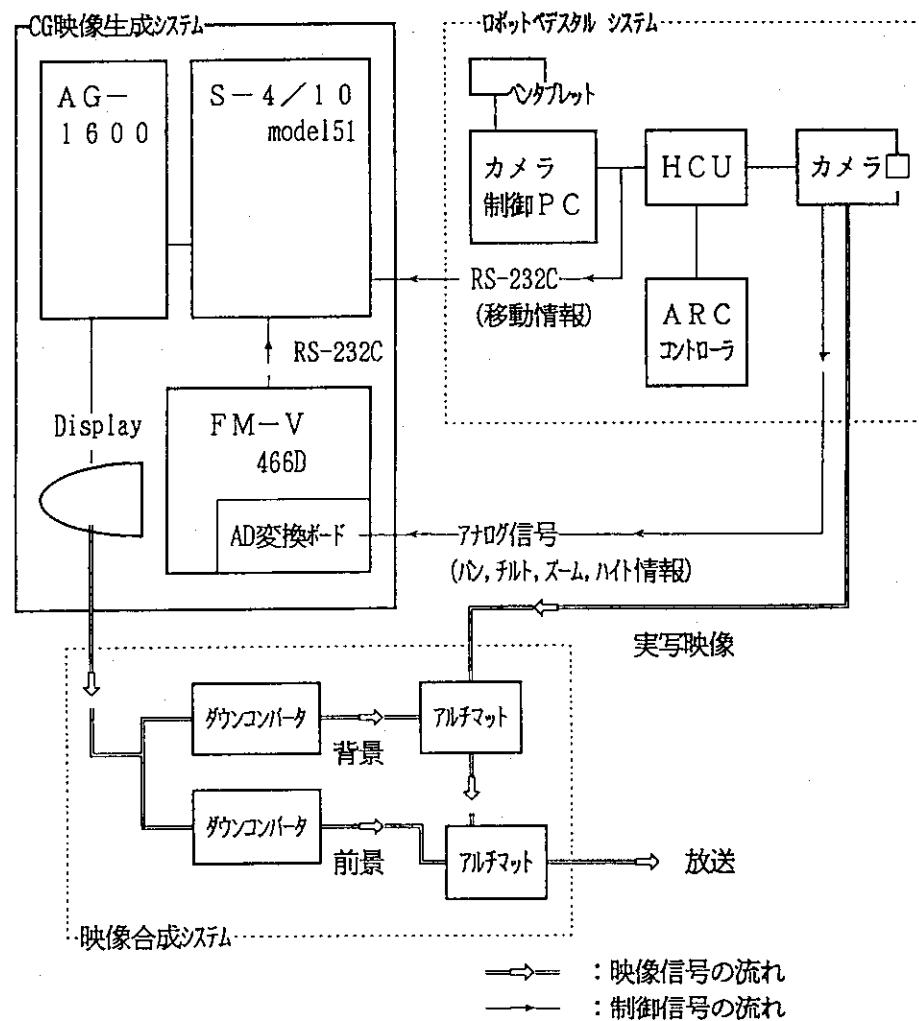


Fig. 11 Example of Virtual Studio System

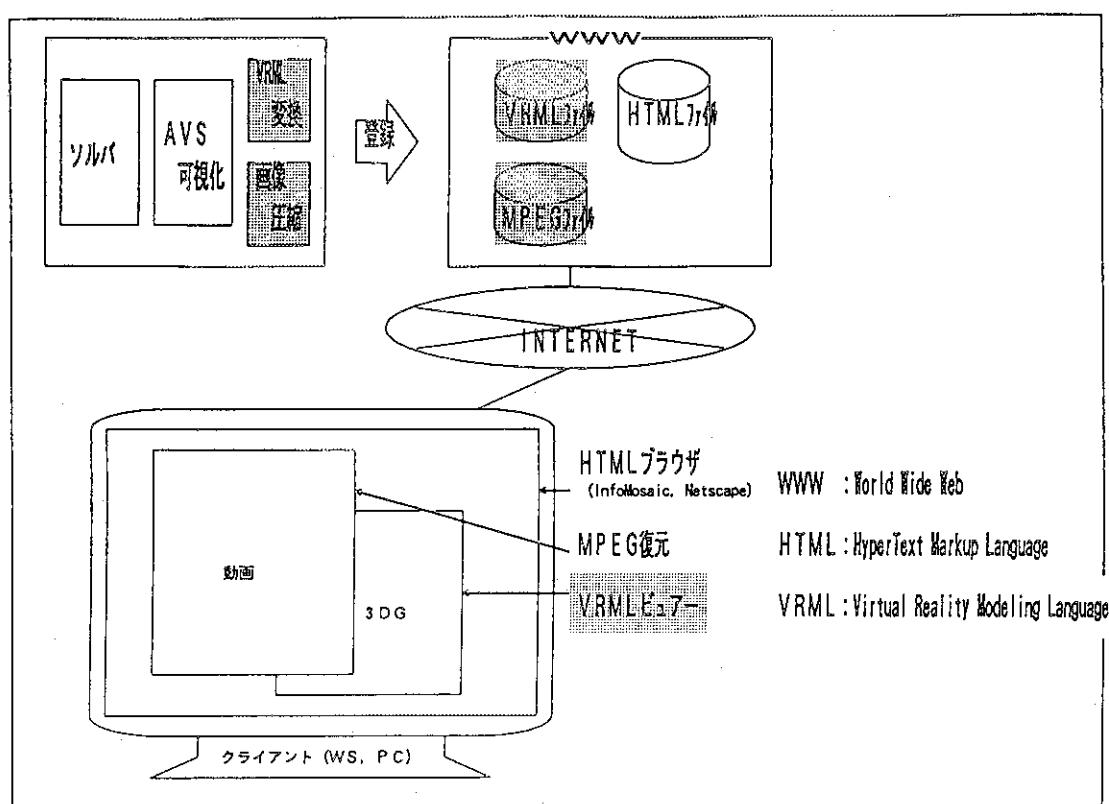


Fig. 1 2 Internet (WWW) for Visualization

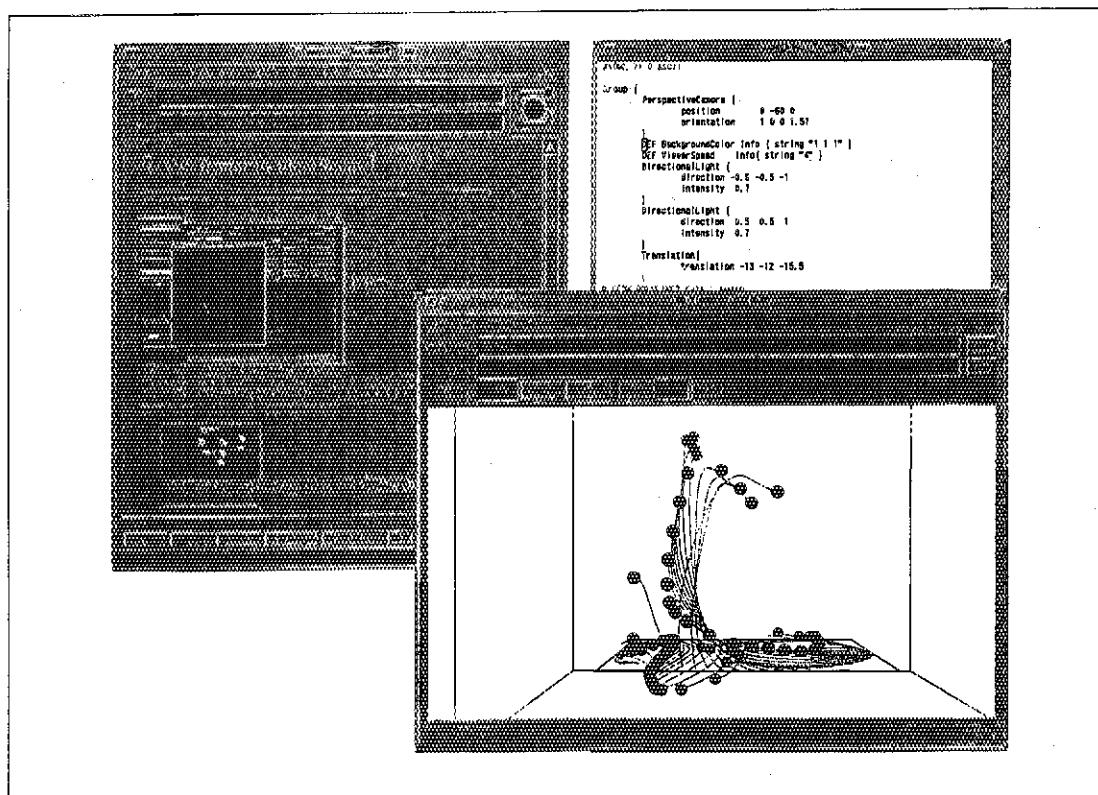


Fig. 1 3 Example of VRML Viewer (Fujitsu)

### 3. 計算科学研究における可視化技術の応用

渡辺 正 (原研)

原研・計算科学技術推進センターでは、原子力分野で見られる伝熱、流動、電磁現象、あるいは材料の物性変化などの複雑な現象を、基本的なモデル及び方程式を用いた計算機シミュレーションを通して解明する研究を進めている。ここでは、研究領域を、目的及び手法により、粒子系シミュレーション、連続系シミュレーション及び大規模数値シミュレーション技術の3つに分けて研究を進めている。大規模数値シミュレーション技術の研究では、可視化技術の応用に関する研究開発を行なっており、画像処理環境の整備作業の一つとして画像処理サーバ用ワークステーション上でシミュレーション結果を連続的に描画し、それを自動的にビデオ録画する動画像処理システムの開発を行なった。本報告では、計算科学研究の粒子系シミュレーションにおける使用例をもとに動画像処理システムを解説する。

### Application of Visualization Technique in Computational Science

Tadashi Watanabe (JAERI)

At the center for promotion of computational science and engineering in JAERI, complex phenomena in nuclear application fields such as heat conduction and fluid dynamics are studied through computer simulations based on first-principle models and equations. This research project is divided into three parts according to objectives and methodologies: continuum-system simulation, particle-system simulation, and large scale numerical simulation technique. Application of visualisation technique is studied for the large scale numerical simulation technique. In the course of establishing a distributed processing environment, an animation processing system has been developed, in which simulation results are consecutively visualized on a server workstation for image processing and automatically recorded on a video tape. In this report, the animation processing system is described using examples in the particle-system simulation.

Keyword(Simulation, Visualization, Animation, Video)

## 1 はじめに

原研・計算科学技術推進センター・数値実験技術開発グループでは、原子力分野で見られる様々な伝熱・流動・電磁現象、あるいは材料の物性変化などの複雑な現象を、基本的なモデル及び方程式を用いた計算機シミュレーションを通して解明する研究を進めている。

ここでは、対象とする物性や熱流動などの研究領域を、目的及び手法により、粒子系シミュレーション、連続系シミュレーション、及び大規模数値シミュレーション技術の3つにわけて研究を進めている。

粒子系シミュレーションでは、原子・分子レベルのミクロなモデルからマクロな法則の導出を目指し、分子動力学法やモンテカルロ法などの粒子法によるシミュレーションにより、実験や理論ではとらえることのできない格子熱伝導における不可逆性の起源やレイリー・ペナール対流の遷移機構の解明を行なっている。これに対し、連続系シミュレーションでは、実験相関式などをなるべく用いない原理的な方程式を用いてシミュレーションを行なうことにより、乱流、高温超伝導体、液体ヘリウムなどに見られる渦現象の解明を進めている。また、大規模数値シミュレーション技術の研究では、シミュレーションに不可欠な可視化技術の利用に関して開発・研究を行なっている。

近年の計算機の進展のおかげで、より詳細かつ大規模なシミュレーションが行なわれるようになってきたが、大規模シミュレーションでは、理想的な条件下であらゆる変数の数値データが得られる反面、その膨大なデータをどう処理し、また蓄えておくかが問題となっている。例えば、等方性乱流の3次元計算では、一つのタイムステップで、渦度の3方向成分が計算ノードの点数だけ（最低限）得られるが、 $256^3$ のノードを用いた計算では、これは、200MBに達する。並列計算機を用いることにより、計算に使用できる変数の量、すなわちメモリーのサイズはどんどん増えているが、計算結果から何かを判断・理解するための、効率的なデータ処理技術、あるいは大規模数値計算支援技術の開発・研究はますます重要なものとなっている。

シミュレーションにもとづく研究において、データ処理技術として最も重要と考えられるものの一つは可視化技術であろう。ネットワーク技術の高度化とワークステーションやパーソナルコンピュータの高性能化により、シミュレーション結果の可視化は、高度の作画機能を持つワークステーション上において可視化ツールやユーティリティを用いて行なうということが普及してきた。計算科学技術推進センターでは、画像処理やファイル編集などをワークステーションなどの小型の計算機へ移行させ、作業の効率化を図る分散処理環境の整備を進めており、シミュレーション結果のデータ処理や可視化のため、画像処理サーバ、カラープリンタサーバ、ファイルサーバなどの整備を行なっている。可視化の結果は、ワークステーションの画面で直接見たり、あるいは論文等への使用のためにプリントするばかりでなく、過渡現象を表す時系列データの動的な理解や効果的なプレゼンテーションのためにも利用される。このため、時系列データの連続的表示とその記録のための動画像処理技術も欠くことのできないものである。

本報告では、大規模数値シミュレーション技術の開発・研究のうち、画像処理環境の整備として画像処理サーバ用ワークステーション上でシミュレーション結果を連続的

に描画し、それを自動的にビデオ録画する動画像処理システムの開発について記述する。また、最近導入したファイルサーバ用計算機とデジタルビデオを用いた動画像処理システムについても、粒子系シミュレーションにおける使用例をもとに解説する。

## 2 動画像処理システム

原研の大型計算機システムの概略を Fig. 1 に示す。スーパーコンピュータとしては、富士通のベクトル並列機 VPP500 (42 プロセッサ, 1.6GFlops × 42, 256MB × 42), インテルのスカラー並列機 Paragon (256 プロセッサ, 75MFlops × 256, 32MB × 256), さらに、モンテカルロ計算のためのパイプラインを備えた高速モンテカルロ装置 MONTE4 (4 プロセッサ, 1.6GFlops × 4, 512MB) が使用可能である。汎用機としては、富士通の M780 が 3 システム用意されており、これらの大型計算機システムは端末機からネットワークを介してアクセス可能となっている。スーパーコンピュータで計算した結果は、長期間ディスクにとどめておくことが困難なため、通常、ネットワークに接続された研究室のワークステーションや、ファイルサーバへ転送し、後処理、保存することになる。

数値実験技術開発グループの可視化／動画像処理システムもネットワークへ接続されているが、Fig. 2 に示すように 2 種類のシステムが利用可能である。Fig. 2 の上の図に示されるシステムでは、可視化用ワークステーションとしてヒューレットパッカードの HP9000/730 を使用している。可視化された画像はフォトロン製フレームスキャンコンバータにより映像用 RGB 信号から標準の TV 信号に変換し、ビクター製 VTR に動画像（アニメーション）として記録する [1]。フレームスキャンコンバータでは、信号の変換と共に、ワークステーションの可視化画面のうち録画したい部分の選択や、拡大縮小などの調整も行なう。ワークステーション上では可視化用のソフトウェアとして AVS を使用し [2]、同時にビデオ制御（サーバ）プログラム、可視化制御（クライアント）プログラムを実行することによって、連続的な描画をアニメーションとして VTR に録画する。この時、ワークステーションの画面上には、シミュレーション結果描画用のウィンドウ、AVS 制御用のウィンドウ、ビデオ制御用のウィンドウの 3 つが表示される。フレームスキャンコンバータで録画画面の調整を行なうため、ワークステーション上で可視化した画面と VTR に録画された画面は必ずしも同一ではない。VTR には、モニター装置が接続されているが、モニター画面上には、フレームスキャンコンバータを通して実際にビデオに録画されている画面が表示される。このシステムのワークステーション（実際には NFS により数台のワークステーションが接続されているが）のディスク容量はそれほど大きいものではないので、ファイルの保存についてはテープ装置のような外部記憶装置を利用する必要がある。また、サーバプログラム、クライアントプログラムを個別に作成する必要があるため、本システムの利用には、ある程度の経験が必要となる。

Fig. 2 の下の図に示されるもう一つのシステムでは、計算結果を大容量ファイルサーバに転送し、そこで、ファイルを保存すると共に可視化処理、ビデオ作成を行なう。ファイルサーバ用計算機としては Convex C3440 が導入されている。このシ

システムでは、AVSの中からビデオ制御が行なえるようになっており、サーバプログラム、クライアントプログラムを作成する必要はない。ファイルサーバーでは数GBのディスク領域が使用可能であり、カートリッジテープへのファイル退避機能を利用するにより、かなり大規模なデータの処理を行なうことができる。ただし、可視化機能そのものについてはそれほど高性能なものではないため、現在画像処理専用ワークステーションをファイルサーバーに接続することを予定している。センターマシンとしてのスーパーコンピュータをネットワークを介して使用する形態では、通常、計算が終了してから結果を転送し、画像処理を行なうということになるが、大容量ファイルサーバーと画像処理専用計算機により、この処理の流れをなるべく短縮し、スーパーコンピュータからの計算結果（途中経過）の転送、保存、表示、アニメーション作成を計算と可能な限り同時に行なえるシステムとしていく予定である。パーソナルコンピュータでは、小さなプログラムを走らせながら絵を描かせ、いつでもストップをかけ、パラメータを変えてはまた走らせる、ということをよく行なうが、スーパーコンピュータのシステムをなるべくとり回しの良いシステムにしていくことは、計算機資源の有効利用の観点からも重要なてんであろう。

### 3 可視化例

#### 3.1 レイリー・ベナール系のシミュレーション

代表的な非平衡熱流体系の一つに、上面が低温で底面が高温に保たれた流体の系 - レイリー・ベナール (RB) 系 - がある。ここでは、上下の温度差がある臨界値よりも小さいと、系内に流れは発達せず熱伝導状態が実現されるが、大きいと巨視的な対流渦が発生し、対流熱伝達状態が実現される。この熱伝導から対流へ移行する遷移過程は、RB 不安定性として知られている。

RB 系における十分発達した対流状態については、実験的にも数値的に多くの研究がなされている。これらは、巨視的な流動現象としての対流渦を対象としているが、最近では、分子動力学 (MD) 法や直接シミュレーションモンテカルロ (DSMC) 法と呼ばれる計算手法を用いて、流体を構成する原子・分子の運動を直接調べる研究も行なわれている。これは、分子運動のレベルから調べることにより、巨視的な流動現象や不安定現象の微視的な構造や発生機構が解明できる可能性があるためである。以下では、DSMC 法による計算を紹介する。

DSMC 法は、希薄気体の流れを分子運動のレベルから計算するための手法として Bird によって体系づけられた数値解法である [3]。この方法では、計算領域にある気体の原子・分子を実際の数よりも少ない代表粒子であらわし、それらの挙動を追跡する。

DSMC 法は、ボルツマン方程式

$$\frac{\partial(nf)}{\partial t} + \mathbf{c} \cdot \frac{\partial(nf)}{\partial \mathbf{x}} + \mathbf{F} \cdot \frac{\partial(nf)}{\partial \mathbf{c}} = n^2 \int \int [f(\mathbf{c}')f(\zeta') - f(\mathbf{c})f(\zeta)](\zeta - \mathbf{c})\sigma d\Omega d\zeta \quad (1)$$

の速度分布関数  $f$  を  $f$  から抽出したサンプルの集合を用いて計算する確率解法である。式(1)で  $n$  は粒子の数密度、 $\mathbf{c}$  および  $\zeta$  は速度、 $\mathbf{F}$  は外力、' は衝突後の速度を

表し、 $\sigma d\Omega$  は衝突の微分断面積である。式(1)は離散化すると

$$(nf)^{t+\Delta t} = (1 - \Delta t D)(1 - \Delta t G)(1 + \Delta t J)(nf)^t \quad (2)$$

と書くことができる。 $D$ ,  $G$ ,  $J$  はそれぞれ、移動、外力、衝突を表す演算子である。

あるタイムステップで  $(nf)$ 、すなわち粒子の位置と速度がすべて解っているとすると、まず、式(2)の右辺に従って、粒子の衝突による粒子間の運動量変化を計算する。ここでは、計算領域を衝突セルと呼ばれる領域に分割して、その中で衝突を起こす粒子のペアをモンテカルロ法によって確率的に抽出し、それぞれの粒子について、衝突による速度変化を計算する。

次に、各粒子の速度に対して外力による影響を考慮し、最後に、得られた速度に応じて粒子を移動させ、新しい位置におく。その際、計算領域の境界を粒子が横切る場合には、反射、吸収などの相互作用を考慮する。この結果、式(2)左辺の 1 ステップ進んだ時間段階での  $(nf)$  が求まることになる。

流れ場の温度や速度といった量は、個々の粒子の速度をサンプリングすることによって求める。サンプリングは、衝突セルをいくつかまとめたサンプリングセルと呼ばれる領域内の粒子について、時間平均、あるいは統計平均をとることによって行なう。DSMC 法は陽的解法であるため、衝突セルやタイムステップの大きさは、粒子の平均自由行程や平均自由時間よりも、小さくする必要があるが、セル分割の概略を Fig. 3 に示す。

以下では、まず、幅 11.3mm、高さ 5.6mm の 2 次元矩形領域におけるシミュレーション例を示す。初期温度は 80K、初期圧力は 20Pa である。計算では、空気の平均分子を想定した剛体球分子を 32 万個用いた。平均自由行程と領域の高さの比で定義されるクヌーセン数は、およそ 0.016 で、ほぼ連続流体とみなすことができる条件である。

この領域を  $40 \times 20$  のサンプリングセルに分割し、一つのサンプリングセルを  $5 \times 5$  の衝突セルに分割した。計算では、時間ゼロで底面の温度をある所定の温度に、瞬時に上昇させた。境界条件は、上下面では拡散反射条件とし、反射粒子の速度成分はすべて壁面温度に対する Maxwell 分布から抽出した。左右面では、鏡面反射条件とし、境界面に垂直な速度成分は符号を変え、平行な速度成分は変化しないものとした。

上下面の温度差に基づいて定義されるレイリー数と呼ばれる無次元数が 2703 のときの速度場・温度場の定常状態での様子を Fig. 4 に示す。可視化画面ではカラー表示であり、速度ベクトルは黒矢印、温度は冷たい方が青、熱い方が赤で示されているが、Fig. 4 では、白黒表示に変更してある。流体の保存方程式の線形安定性解析からは、系内で擾乱が成長を開始する臨界値としてレイリー数 1708 が得られるが、Fig. 4 の条件はこの臨界値を超えているため、対流渦が発達している。また、白黒表示ではあるが、明るい部分が下向きに凸となっていることから、系内の温度分布を知ることができる。

レイリー数が臨界値以下の場合を Fig. 5 に示す。ここでは、熱伝導状態が実現され、大きな流れが発達していないこと、温度分布が、上下の面に並行になっていることなどが解る。分子運動のレベルの計算結果が、連続体として扱いながら得られた臨界値に従うことがこれらの図から解る。臨界値に関してのより詳細な検討は文献 [4, 5, 6] を参照されたい。

Fig. 4, Fig. 5 に示したのは、動画像のある一駒であるが、アニメーションとしてみると、温度や速度などは常に変動している。DSMC 法は統計的手法を用い、サンプリングにより巨視的な状態量を求めていたために、定常状態であっても必ずこのような変動を含んでいる。この、状態量の変動（揺らぎ）は、分子運動に起因するものであり、不安定性や遷移問題では重要な役割を果たす。この揺らぎを表示した例を Fig. 6 に示す。これは、Fig. 5 に示される熱伝導状態において、水平方向の平均温度からの温度のずれを示したもので、カラー表示では、平均温度より高温の部分を赤、低温の部分を青で表示し、ホットスポット、コールドスポットが、どのように系内に分布しているかを見ている。Fig. 6 では、左側面にホットスポットを示す明るい部分が集中して見えるが、温度差を増加させていくと、ホットスポット部分に上昇流が現れ、Fig. 4 に示されるような大きな対流渦へと発達していくのが解る。熱伝導状態から対流へ移行する際の、揺らぎの変化については、定常状態における時間平均値からのずれ

$$\delta T(x, y) = T(x, y) - \langle T(x, y) \rangle \quad (3)$$

を考え、この変動量に関して空間相関関数を

$$\langle \delta T(y) \delta T(y') \rangle = \frac{1}{L_x} \int_0^{L_x} \langle \delta T(x, y) \delta T(x, y') \rangle dx \quad (4)$$

として定義することにより、詳細な検討が行なわれている [5, 7]。変動の影響が及ぶ範囲を相対的に示す尺度として、相関関数の特性距離を求めるとき、レイリー数が小さい熱伝導状態では特性距離は小さいのに対し、臨界レイリー数付近で対流の性質が現れると増加し、さらにレイリー数が大きくなると再び減少することが確認されており、遷移過程では、より遠くの粒子同士が影響を及ぼしあっている、ということが示されている。

このように計算科学研究では、可視化技術の応用として、流れ場の状態量そのものばかりではなく、変動量などを動画像化することによって系の状態変化の理解が容易になる場合も多い。加工した量を可視化することにより様々な解析の糸口を得ることが可能となるが、計算結果をどのように加工しどのように表示するか、さらにそこから何を定量化するかという点については、可視化技術を利用する側の課題となる。

ここまでアスペクト比が約 2 のケースについての流れ場の可視化について示してきたが、アスペクト比 10 のケースを Fig. 7 に示す。このケースでは、下面の温度は 500K であり、レイリー数は 5341 と臨界値よりはるかに大きいため 5 組の渦が形成される。速度ベクトルと温度場の色の変化から渦のようすは解るが、表示画面とシミュレーション領域のアスペクト比を等しくしてあるため、あまり見やすく表示されてはいない。そこで、シミュレーション領域の縦方向を拡大して表示したのが Fig. 8 である。Fig. 8 では温度場の色変化から 5 組の渦（5 組の上昇流と下降流）が判断できるが、速度ベクトルがまばらになってしまっている。この例では、領域と同時に速度ベクトルのスケールも拡大しないと、速度場から渦の生成を判断するのは困難である。

Fig. 9, Fig. 10 に 3 次元計算の可視化例を示す。いずれも、高さ 1 に対して幅 2, 奥行き 2 のアスペクト比の領域での計算である。下面温度は 500K である。上下面は、2 次元計算と同じように温度境界であるが、横方向は Fig. 9 では、一つの方向に

周期境界 (cyclic) , もう一つの方向に鏡面反射 (slip) 条件, Fig. 10 では, 両方向とも鏡面反射条件である. Fig. 9 では, 周期境界の方向の断面の温度分布と速度ベクトルを手前の面と奥の面について示し, さらに, 領域内での等温度面を 3 つ (下から, 450K, 330K, 180K の面) 示してある. 断面内の流れ場, 温度場は, Fig. 4 に示したものと定性的に同じである. 周期境界方向へは大きなロール状の対流渦が形成されていることが等温度面から解るが, 中央部分で温度の低下が少ないとから, ロール渦には多少の節目があると考えられる. Fig. 10 では断面内温度分布を 3 つ示してあるが, 手前の面で下向きの渦, 奥の面で上向きの渦ができているのが解る. 速度ベクトルは示していないが, 境界条件により様々な流れ場が形成されることがわかる. この系では流れ場と温度場の形成が重要となるが, Fig. 9 のような 3 次元の可視化を行なっても, ひとつの方角からだけ見ていたり, 固定した等温度面だけを見ても全体の温度場を把握するのは困難である. また, 渦や逆流などが混在する複雑な流れ場の全体をいちどに速度ベクトルや流線で表示するのは困難であるため, 断面内の速度ベクトルを断面を動かしながら連続表示したり, 始点を連続的に変えながら流線を表示するなどの動的な可視化表示が重要な技術となる. 3 次元の過渡現象の効率的かつ正確な理解のために, 可視化技術と同時にその利用技術の開発が不可欠である.

### 3.2 物体回りのながれ

一様な流れ場のなかに物体があると, 物体後方の流れが乱れ, 条件によってカルマン渦と呼ばれる大きな渦が発生することが知られている. カルマン渦の性質については実験的にも理論的にも多くの研究がなされており, 数値計算も多く行なわれている. 数値実験グループでは, セルラオートマタ法の様々な流れへの応用を検討しており, その一つとして物体回りの流れを計算している. セルラオートマタ法は, 連続体である流体の微小要素 (流体粒子) を計算領域内の格子上で動かし, 格子の粒子情報をサンプリングすることによって巨視的な流れ場を求める手法であり, 粒子法の一つである [8]. ただし, ここで扱う粒子は, 原子・分子そのものではなく, まだその運動は格子上に制限される.

セルラオートマタ法による物体回りの流れの計算の概念を Fig. 11 に示す. 流れ場は三角格子により覆われており, 格子点上に流体粒子があるとする. 流体粒子は, 格子点から出ている 6 方向の三角格子に沿って移動し, 格子点上で 2 つ以上の粒子が出会えば衝突し, ある規則にそって移動の方向を変えるものとする. 移動は, 計算の 1 タイムステップで格子一辺の長さだけとするが, 格子点上に静止する粒子も考慮される [8]. 速度や密度の流れ場の諸量は, 格子点がいくつか集まつたサンプリングセルと呼ばれる小区画で, 格子情報を平均化することにより得られる. この過程は Fig. 3 に示される DSMC 法と同様なものである. このため, 変動の少ない流れ場を得るために, サンプリングセル内に多くの粒子を置き長時間にわたつたサンプリングを行なう必要がある.

計算例を Fig. 12 及び 13 に示す. この例では, 正方形の 2 次元領域を  $1024 \times 1025$  の格子点にわけ,  $64 \times 64$  のサンプリングセルにおいて流速と密度を計算している. す

なわち、一つのサンプリングセルは、 $16 \times 16$  の格子点を含むことになる。物体回りの境界条件は、滑べりなしとし、壁表面に衝突した粒子は、入射方向に反射するものとする。領域上下は周期境界とする。計算では、まず、流れ場に粒子がない真空状態において、左側境界より、適当な時間及び空間の間隔で流れ場が均一になるように粒子を注入する。右側境界では、自由流出条件とする。ある程度時間が経過し、定常的な流れ場が得られたら、粒子の注入を止め、左右の境界を周期境界とする。これにより、流れ場の平均密度が設定できる。上下左右が周期境界条件となるため、物体群を通過する流れとなり、均一な流れの中におかれた単一の物体回りの流れではないが、計算初期の乱れが成長しやすく図に示されるようなカルマン渦が容易に得られる。

Fig. 12 では、 $64 \times 64$  のサンプリングセルの結果を一つおきに間引きして表示している。物体の後ろ側に大きな渦が発生しており、そこが周囲に比べて低密度となっているのが解る。大きな渦の発生や密度変化を理解するにはこの表示で充分と思われるが、物体周辺の密度場がぼやけている、物体裏側の渦がとらえられていない。 $64 \times 64$  のサンプリングセルをそのまま表示すると Fig. 13 が得られる。渦などの流れ場はより詳細に表示されるものの、ベクトル図はかなり混みあっておりあまり見やすくはないと思われる。表示に必要な時間も Fig. 12 と比べるとかなり増加する。

この例のように、計算が詳細になると、全体表示には間引いたデータを用い、ある領域を詳細に検討するためには、その領域での全ての計算結果を利用するなど、可視化の目的を明確にする必要が生じる。表示の見やすさに加え、一般的にグラフィックス用計算機で扱えるデータ量は、スーパーコンピュータで行なう計算のデータ量より少なく、表示に必要な時間も考慮して可視化の形式を設定する必要がある。

#### 4 おわりに

本報告では、原研・計算科学技術推進センター・数値実験技術開発グループで進めている計算科学研究での可視化技術の応用について、計算結果の可視化例をもとに解説した。計算科学研究で行なわれる可視化処理は、計算を行なっている個人やグループが計算結果を効率良く理解し、新たな計算やデータ処理をすみやかに行なうために利用される。このため、可視化技術に関しては、ビジュアリゼーション技法の研究ばかりではなく、ファイル操作やデータ処理を含め、利用技術の開発・研究が重要となる。例えば、3次元過渡変化の計算結果などは、膨大なデータであり保存が困難、かつデータ処理に必要な時間や画像データも増えるため、計算結果の転送と処理、画像データの作成と転送、保存、などを効率良く行なうためのネットワークやそれぞのハードウェアの使用状況を考慮した上ででのデータ処理技術の開発が重要となる。また、スーパーコンピュータのシステムは、パーソナルコンピュータのように扱いが容易ではないため、計算の途中経過を表示させ、いち早く計算の実行にフィードバックさせるためには、高速なネットワークや画像処理専用機ばかりではなく、ファイル操作などの技術が必要となる。さらに、ハードウェアばかりでなく、可視化用ソフトウェアや、動画像処理技術の進展が著しく、短期間のうちに高性能の機器やソフトが安価に発売されるため、利用する側の技術レベルを常に高めておく必要がある。スーパーコンピュータにより詳細かつ

大規模な計算が可能となり、計算結果が膨大になると、全ての結果を詳細に検討することは到底不可能である。何をどのように表示すると何を理解することができるか、は常に可視化の課題であるが、さらに、大規模数値シミュレーション技術の開発・整備を通して、例えば可視化表示により新しい現象を発見することも可能となってくると思われる。

## 参考文献

- [1] 加藤克海, 渡辺正, 町田昌彦, 蕪木英雄, 動画像処理システムの開発, JAERI-Tech 95-014 (1995年).
- [2] 加藤克海, 渡辺正, 蕪木英雄, 可視化ツールAVSの導入整備, JAERI-memo 07-058 (1995年).
- [3] G. A. Bird, Molecular Gas Dynamics and the Direct Simulation of Gas Flows, Clarendon, Oxford (1994).
- [4] T. Watanabe, H. Kaburaki, M. Yokokawa, Phys. Rev. E **49**, 4060(1994).
- [5] 渡辺正, 蕴木英雄, 町田昌彦, 横川三津夫, Thermal Sci. Eng., **2**, 17(1994).
- [6] T. Watanabe, H. Kaburaki, M. Yokokawa, Phys. Rev. E **51**, 3786(1995).
- [7] T. Watanabe, H. Kaburaki, M. Machida, M. Yokokawa, Phys. Rev. E **52**, 1601(1995).
- [8] G. D. Doolen, ed., Lattice gas methods for partial differential equations, Addison-Wesley (1990).

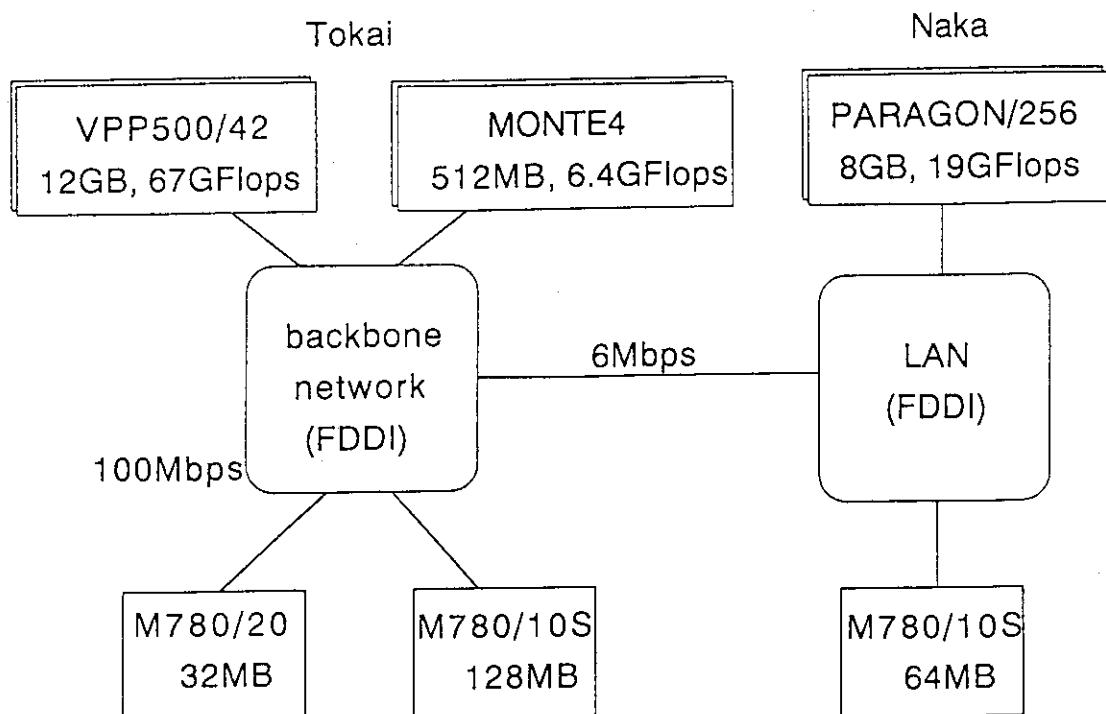


Fig. 1 Computer system in JAERI

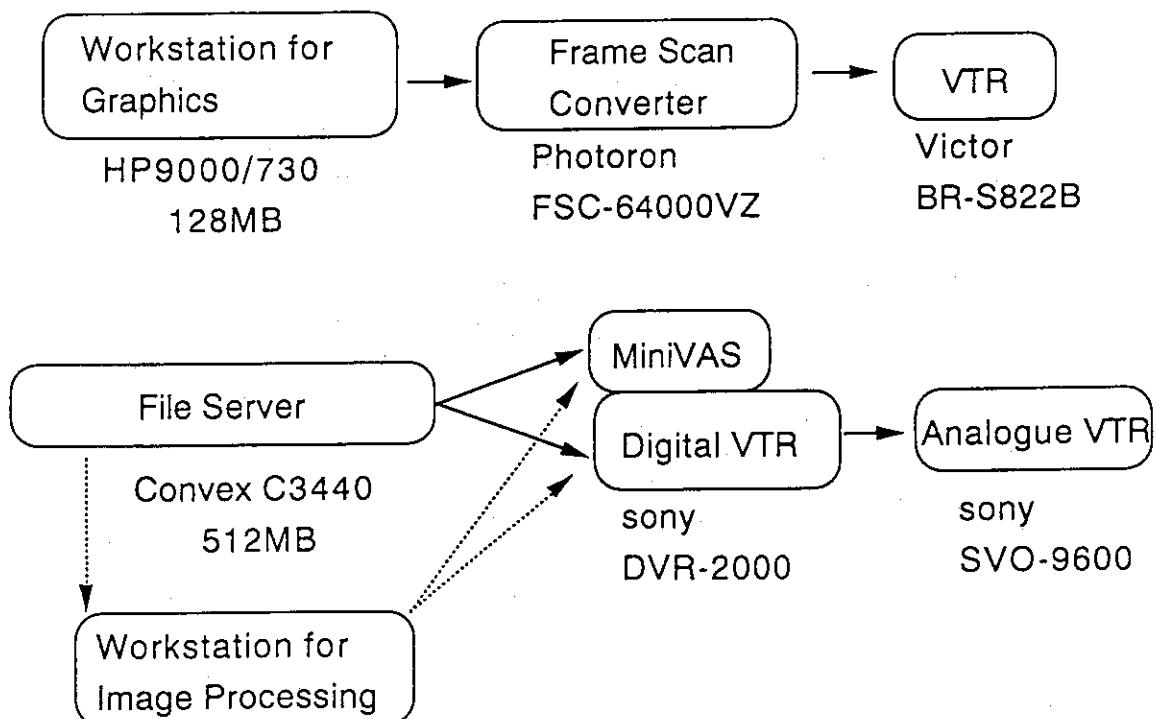


Fig. 2 Animation processing system

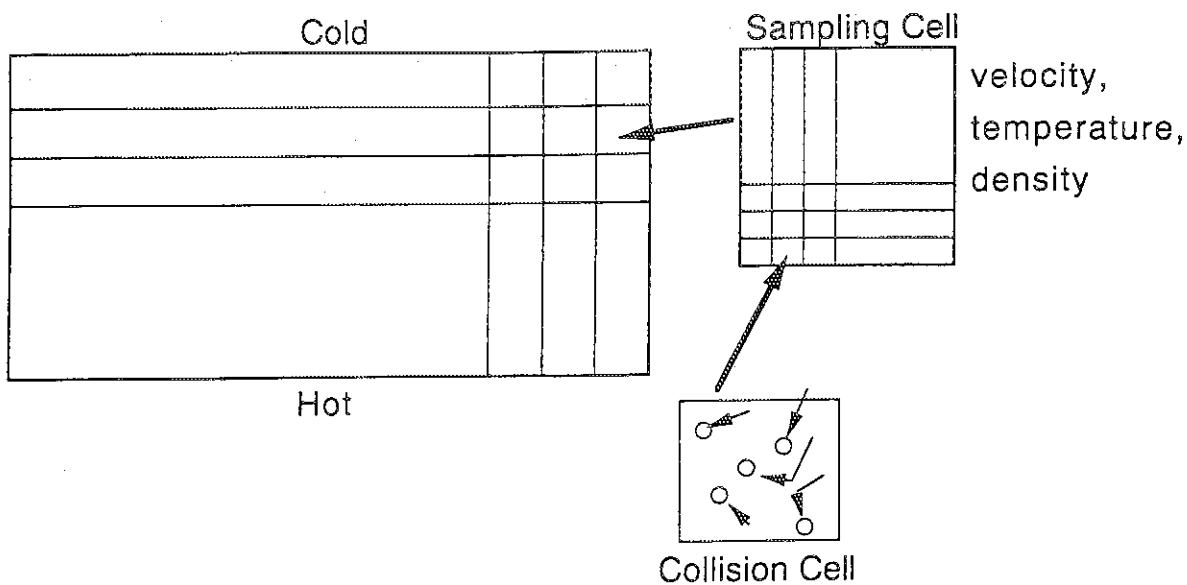


Fig. 3 Sampling and collision cells for DSMC calculations

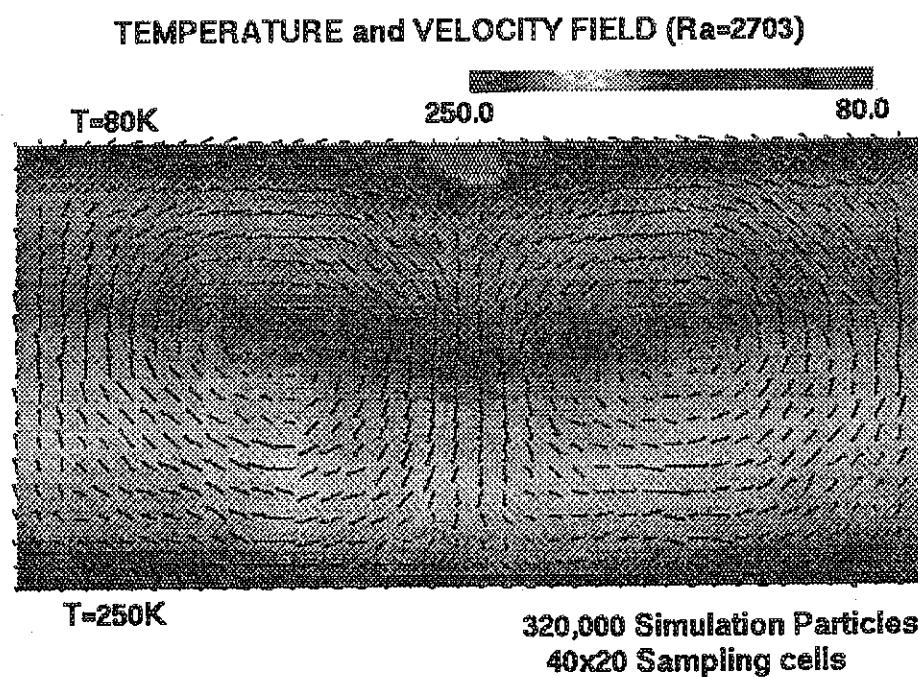


Fig. 4 Steady convection rolls

**TEMPERATURE and VELOCITY FIELD (Ra=943)**

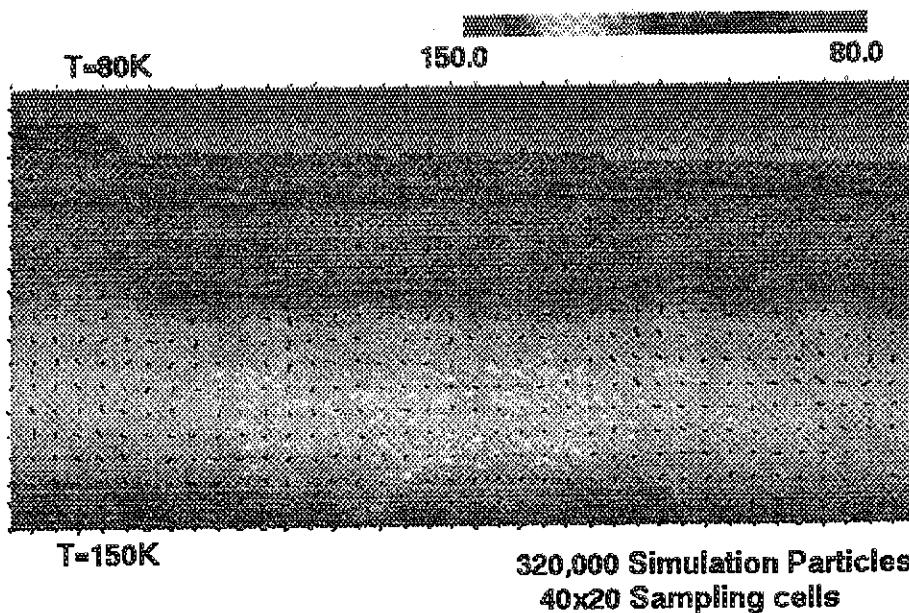


Fig. 5 Heat conduction state

**TEMPERATURE FLUCTUATION (Ra=943)**

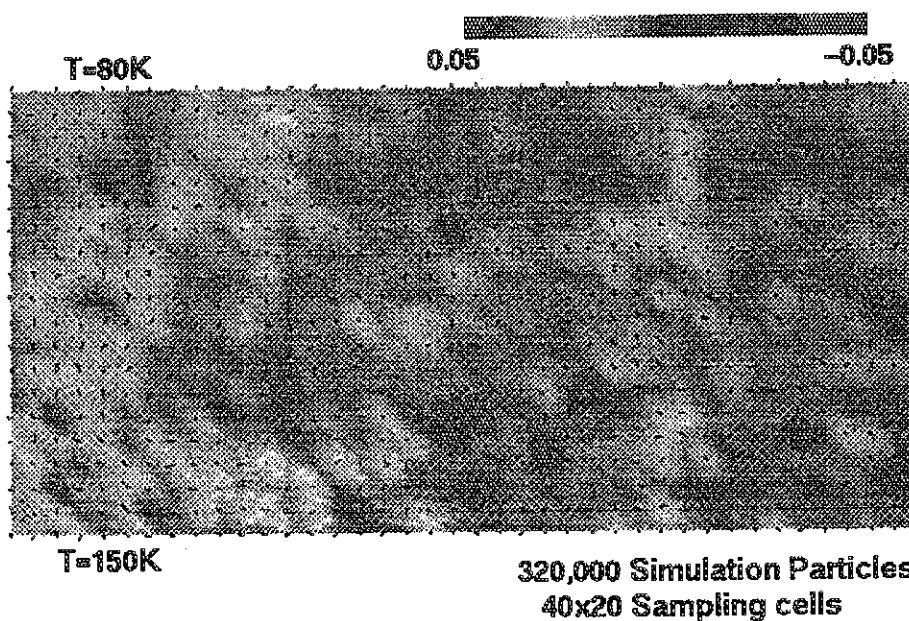


Fig. 6 Temperature fluctuation in heat conduction state

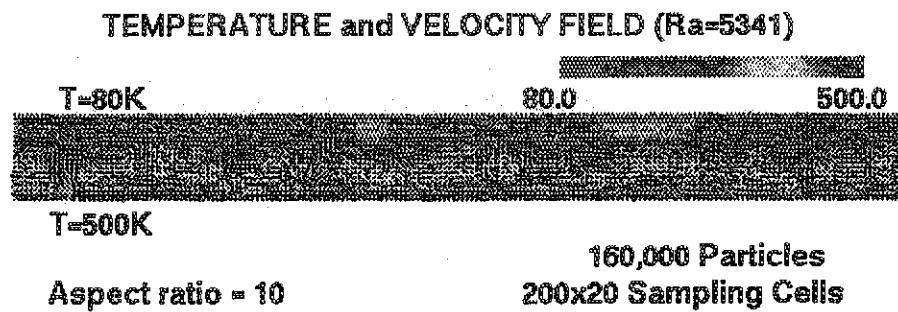


Fig. 7 Convection rolls (aspect ratio = 10)

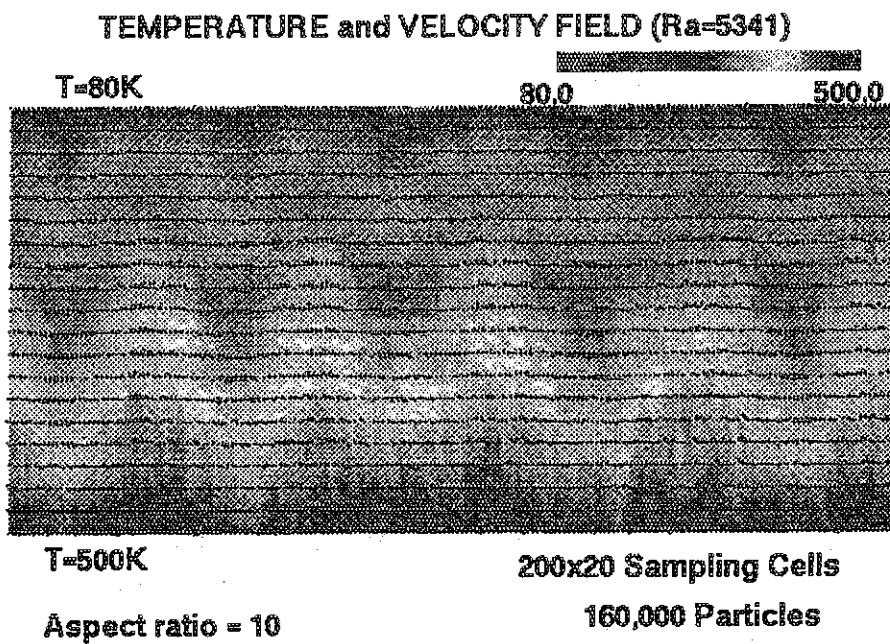


Fig. 8 Convection rolls (aspect ratio = 10, vertical size x 5)

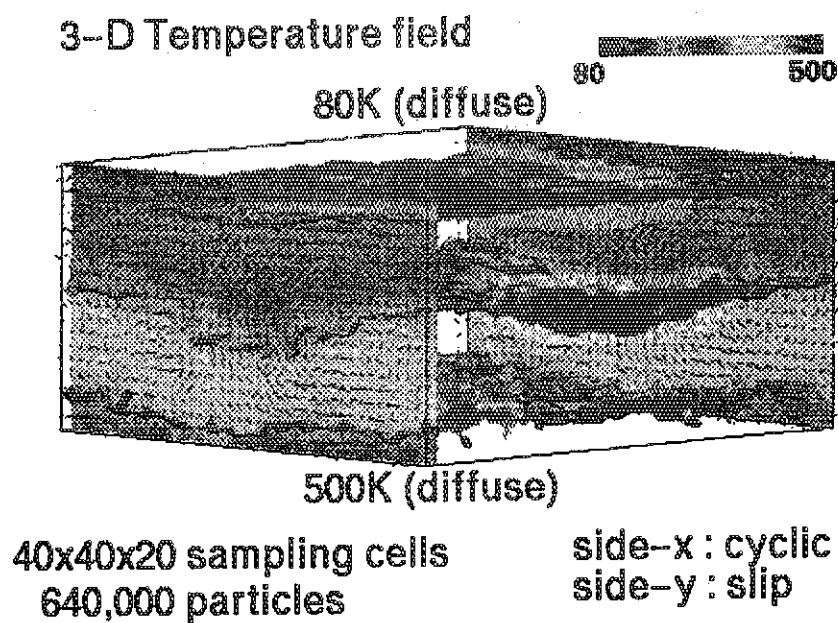


Fig. 9 3-D Temperature field  
(cyclic for x and slip for y directions)

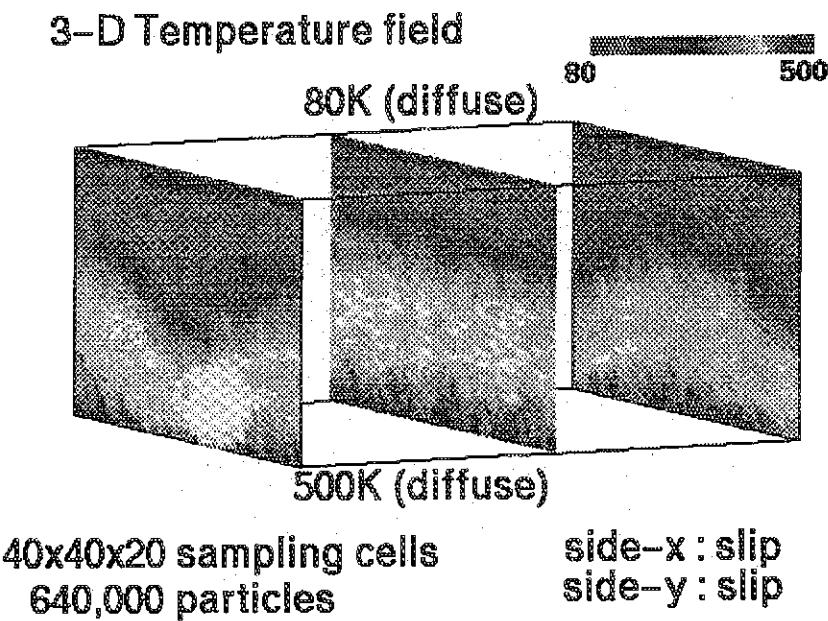


Fig. 10 3-D Temperature field  
(slip for x and y directions)

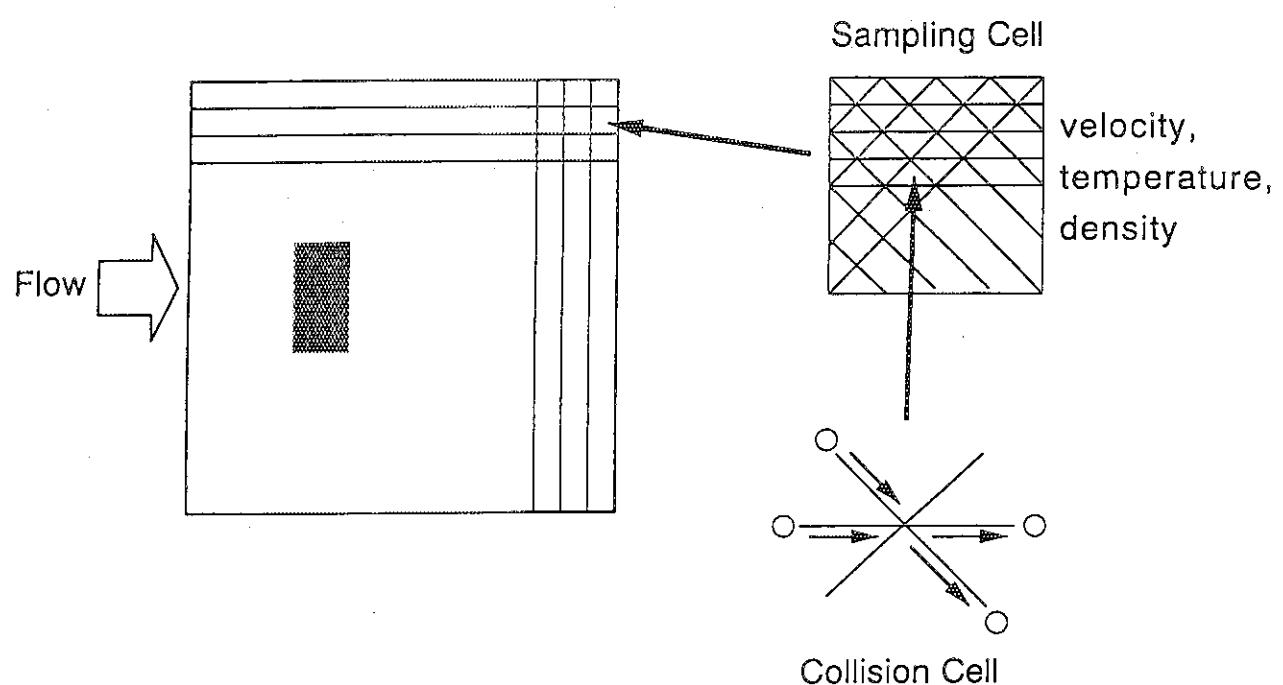


Fig. 11 Sampling and collision cells for cellular automata calculations

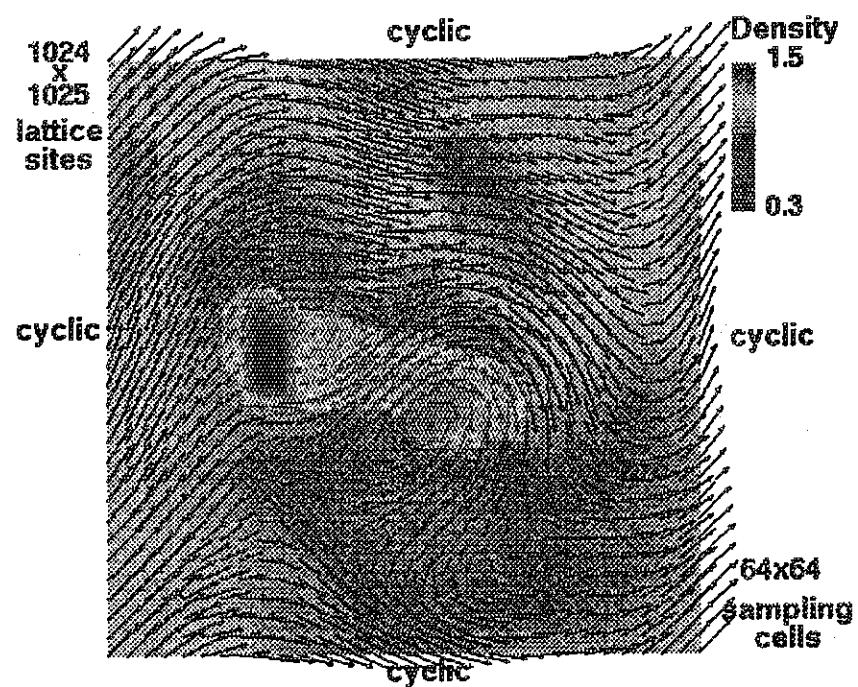


Fig. 12 Flow around an obstacle (rough visualization)

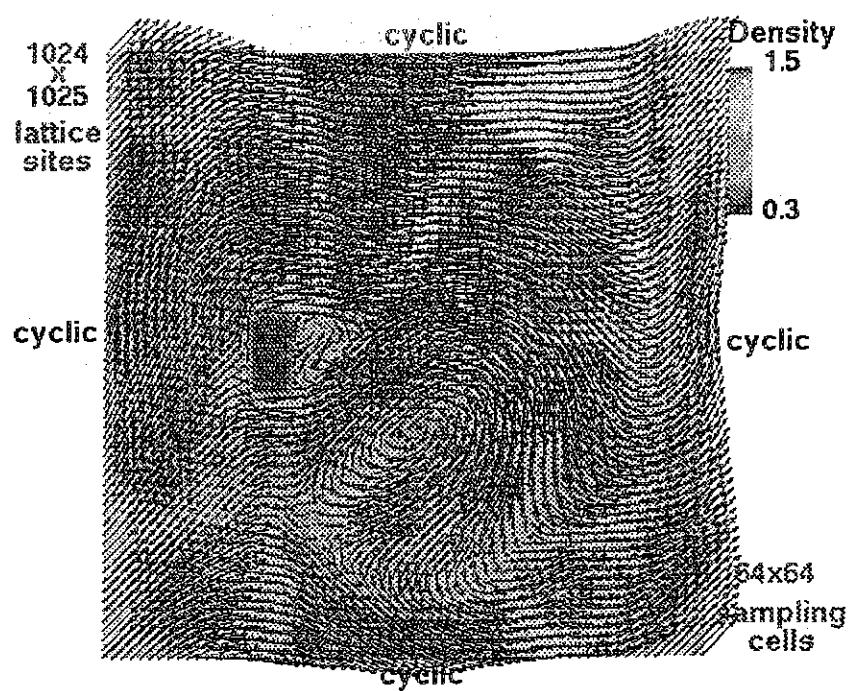


Fig. 13 Flow around an obstacle (fine visualization)

## 4. ミクロからマクロまでの熱物質移動シミュレーション

功刀 資彰 (原研)

核融合炉や高温ガス炉における熱工学課題はその時空間スケール、エネルギーレベルにおいて極めて広範囲に及んでいる。本発表では、可視化技術の援用でシミュレーション結果の理解が大きく進んだ例として、(1) ミクロな熱工学課題としてレーザー光による金属原子層の溶融・蒸発挙動シミュレーション（光モンテカルロ・分子動力学法）、(2) ミクロ・マクロが複合した熱工学課題として核融合炉ディスラプション時の磁場下の逃走電子シミュレーション（EGS4、モンテカルロ法）、(3) マクロな熱工学課題として曲がり円管内2次流れ解析及び等温水平正方形流路内の複合対流シミュレーション（Navier-Stokes式、Control-volume差分法）について紹介する。

### Numerical Simulation of Thermofluid flow and Mass Transport for Microscopic and Macroscopic Phenomena

Tomoaki Kunugi (JAERI)

Thermal engineering problems in nuclear fusion reactor and high temperature gas cooled reactor include very wide time- and spatial-scales and their broad energy levels.

In this presentation, we will show some examples of the scientific visualization results applied to the numerical simulation of thermofluid flow and mass transport for microscopic and macroscopic phenomena as follows: (1) as for microscopic thermal engineering problem, numerical simulation of melting and evaporation behavior of molybdenum layer irradiated with a laser beam (Hybrid method; Monte Carlo method + molecular dynamics), (2) as for micro/macro combined problem, effects of runaway electrons on the plasma-facing components by using EGS4 under the strong magnetic fields(Monte Carlo method), (3) as for macroscopic problem, computational secondary flow behavior in a curved circular tube will be compared with the experimental result, a new type of reversal flow in an isothermal horizontal square channel was found by means of numerical simulation (control-volume finite difference method).

*Keywords:* Hybrid method, Monte Carlo Method, Molecular dynamics, Control-volume method

## 1. ミクロレベルの熱物質シミュレーション

### 「分子動力学法を用いたモリブデン金属層の溶融・蒸発シミュレーション」

#### 1. 1 緒言

核融合炉内プラズマ対向壁表面の溶融・蒸発等の過渡的挙動は、炉心プラズマへの不純物混入量や構造材寿命の評価に重大な影響を及ぼす。特に炉心プラズマが瞬時に崩壊するプラズマディスラプションが発生すると対向壁表面は短時間に極めて高い熱負荷を受け、相変化を起こし損耗する。これは機器寿命を決定する要因となるため、現在電子ビーム、レーザービーム等の強力加熱源を用いたディスラプション模擬実験や相変化を考慮した非定常熱伝導解析等の数値解析による損耗量の評価が行われているが、両者の結果は必ずしも一致していない。この理由としては溶融層の対流・移動の効果が考慮されていない事や蒸発時における原子のクラスター化により蒸発潜熱の変化する事等が挙げられている。特に後者の現象は本質的に連続体モデルでは捉える事のできないため、よりミクロスケールにおける現象の理解が必要である。本研究は強加熱を受ける対向機器表面の原子・分子の挙動を捉える事を目的とした。また、計算負荷の少ない平均界面モデルを用いて材料の損耗過程及び蒸発する原子により形成される蒸気雲のレーザー遮蔽効果に関して検討した。

#### 1. 2 解析方法

本研究ではプラズマ対向機器候補材の1つであるモリブデン金属板を対象として、蒸気層から固体層にわたる光の伝播をモンテカルロ法を用いてモデル化し、レーザービームによる強加熱を受ける原子層内の原子挙動を分子動力学法を用いて解析した。系を構成する原子の位置 $r_i$ と速度 $v_i$ の時間発展はNewton方程式(1)を解くことにより求められる<sup>[1-2]</sup>。

$$m \frac{d^2 r_i(t)}{dt^2} = F_i(t) = - \sum_{j \neq i} \frac{\partial \phi(r_{ij})}{\partial r_{ij}}, \quad v_i(t) = \frac{dr_i(t)}{dt} \quad (1)$$

原子間相互作用ポテンシャルとしてモースポテンシャル<sup>[3]</sup>を用いた。

#### 1. 2. 1 計算体系と境界条件

本研究ではFig. 1の計算体系に示す様にモリブデン原子層(6912個)に対するz軸方向のレーザー照射を想定した。レーザー照射前の原子状態は全方向周期条件下で熱平衡状態(1000K)を達成した後、z方向の境界条件を、上面を開放条件、下面を鏡像境界と熱浴層(1000K)に変更し、更に5000タイムステップ計算を行った後の状態を用いた。

#### 1. 2. 2 レーザー照射による加熱

レーザー照射による原子層へのエネルギー輸送過程を原子により吸収・散乱される $N_e (= 6000)$ 個の仮想的な質量を持たないエネルギー担体を用いてモデル化した。1タイムステップ内に系に照射されるエネルギーを各エネルギー担体に等分配し、各担体は原子に吸収されるとそのエネルギーを原子へ等方的に分配するものとする。計算領域上面に一様に分布させたエネルギー担体をz軸負方向に入射させ、モンテカルロ法により原子表面での吸収散乱を追跡する。原子の吸収率を $\varepsilon = 0.2$ 、原子による散乱を等方的と仮定する。一様乱数 $R_\eta$ を用いると、 $R_\eta \leq \varepsilon$ の時原子に吸収され、 $R_\eta > \varepsilon$ の時散乱される、と表され、散乱角( $h, q$ )は、

$$\eta = \cos^{-1}(1 - 2R_\eta) \quad (2), \quad \theta = 2\pi R_q \quad (3)$$

で求められる。以上の追跡計算を全エネルギー担体に対して、原子に吸収されるか、入射面まで散乱されるか、原子層を透過するまで行うが、計算時間短縮のため、原子運動計算

の5タイムステップ毎に行う。この時、次のエネルギー担体追跡を行うまで、原子は各タイムステップにおいて前回の追跡計算時と同数のエネルギー担体を吸収するものとした。

### 1. 2. 3 平均界面の決め方

レーザー照射による原子層の損耗量評価や、気液相/固体相界面近傍の原子運動を捉えるため、界面移動を評価する必要がある。加熱を開始すると原子層表面から原子が溶融・蒸発して上方へ飛出す。これによる平均界面の後退すなわち固体層の平均損耗深さ $d$ を次式により定義する。

$$\delta = (N_v \cdot V_a) / S_{xy} \quad (4)$$

ここで、 $N_v$ 、 $V_a$ 、 $S_{xy}$ は界面より上方へ飛び出した溶融・蒸発原子数、原子1個当たりの仮想体積、基本セルの $xy$ 断面積をそれぞれ表わす。前時刻における平均界面位置から $d$ を差引いた界面位置を現時刻における平均界面位置と定義する。この界面計算は界面を挟む厚さ5原子直径( $s$ )の領域内の原子のうち半数が融点となった時点で行う。なお、平均界面の初期位置は照射前の原子層最上部の原子中心z座標の平均値に0.5s加えた値を用いる。

### 1. 3 結果と考察

レーザー照射計算は照射エネルギー強度と照射時間の異なる条件(A)  $I_0=10^{13} [\text{W/m}^2]$ 、75[ps]と条件(B)  $I_0=5 \times 10^{12} [\text{W/m}^2]$ 、150[ps]の2条件で行った。各図の時刻は照射開始を0sとする。同一照射エネルギー量で照射時間が異なる場合の溶融・蒸発過程の比較を行うためにFig. 2に条件(A)75psと条件(B)150psにおける原子配置を示す。両条件とも真空域へ飛出する原子群と溶融・蒸発層との界面が明瞭にみられるが、その位置は条件(A)の方が後退している。一方、原子配置が大きく乱れ、溶融・蒸発が生じていると考えられる領域は条件(B)の方が原子層内部まで広がっている。この違いの原因は以下の様に説明される。条件(A)の場合、原子層表層における蒸発が盛んに発生するため、入熱量の一部は蒸発潜熱に奪われる。また、発生した気液相原子によるエネルギー担体の散乱・吸収の結果、固体層へ伝わる熱量が減少し、条件(B)と比較して、原子配置が乱れている領域が原子層内部へ広がらなかつたと考えられる。

Fig. 3に平均界面位置の原子直径 $s$ で無次元化した値と界面温度の条件(A)における時間変化を示す。界面温度は界面以下2.5sの領域に含まれる原子の平均温度とした。照射開始とともに界面温度は上昇し、溶融・蒸発原子が発生して界面が後退する様子が分かる。その後界面温度は振動しているもののモリブデンの融点(2890K)を示している。本研究では巨視的に界面を決定しているため、界面位置は不連続な変化を示しているが、これは平均的な界面の後退には溶融・蒸発するのに必要な熱量を界面領域の固体相原子が吸収する時間が必要であることを示しており、この時間は徐々に長くなっている。

Fig. 4に1タイムステップ当りの系への照射エネルギー量( $I_{irr}$ )に対する平均界面以下の固体相原子による吸収量( $I_{abs,s}$ )と系全体による吸収量( $I_{abs,w}$ )の条件(A)における時間変化を示す。Fig. 3、4からわかる様に原子層が溶融・蒸発をおこし、気液相原子が増加するとともに、系全体の吸収量は増加し、その後一定値を示す。この吸収量増加の原因是加熱により原子層表面近傍の原子運動が活発になり、原子配置が照射前と比較して不規則になるため、入射位置まで散乱されるエネルギー担体数が減少することによるものと考えられる。一方、平均界面以下の原子の吸収量は増減を繰り返しながら減少する。これは入射エネルギー担体が界面以下の原子に到達するまでに気液相原子に吸収散乱されるため、固体相原子が吸収する数が減少すると考えられる。このため、界面近傍の原子が吸収する熱量はエネルギー担体により与えられるものより、気液相原子の振動・回転運動による熱伝導で与えられるものが支配的になりFig. 3に示される様に界面移動に要する時間が長くなつたと考えられる。

#### 1. 4 結言

分子動力学法及びモンテカルロ法を用いたレーザー照射を受けるモリブデン原子層の溶融・蒸発シミュレーションを行い、以下の結論を得た。

- 1) 照射条件の違いによる溶融・蒸発過程の違いをミクロスケールで観察することができた。
- 2) 平均界面の経時的同定、及びモリブデン層の融点を再現した。
- 3) 固体層から蒸発した原子により形成される蒸気雲の遮蔽効果を示した。

#### 参考文献

- (1) 上田, コンピュータシミュレーション, (1990), 朝倉.
- (2) 神林, 分子動力学シミュレーションコードISISの開発, JAERI-M 92-080 (1992)
- (3) 黒田, 結晶・表面の基礎物性, (1993), 71, 日刊工業新聞社.

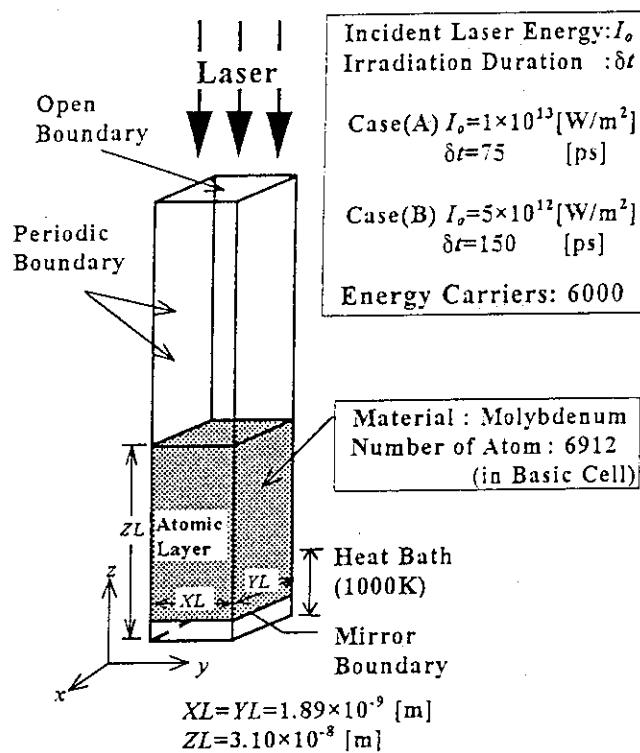


Fig. 1 Simulation region and boundary condition

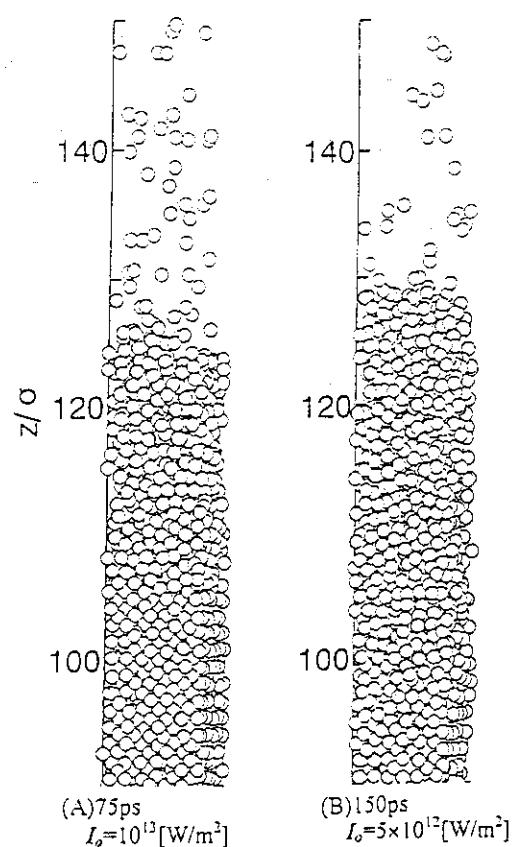


Fig. 2 Change on Atomic Layer due to difference of irradiation period in same incident energy

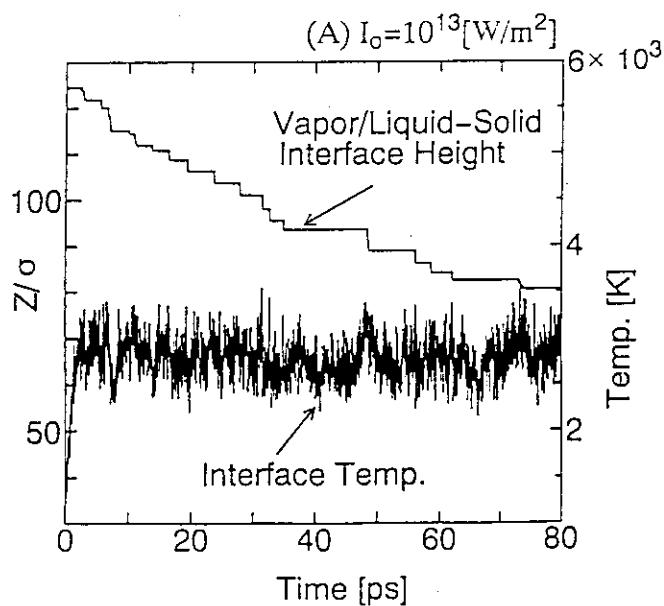


Fig. 3 Transient profiles of mean height and temperature of gas/liquid-solid interface

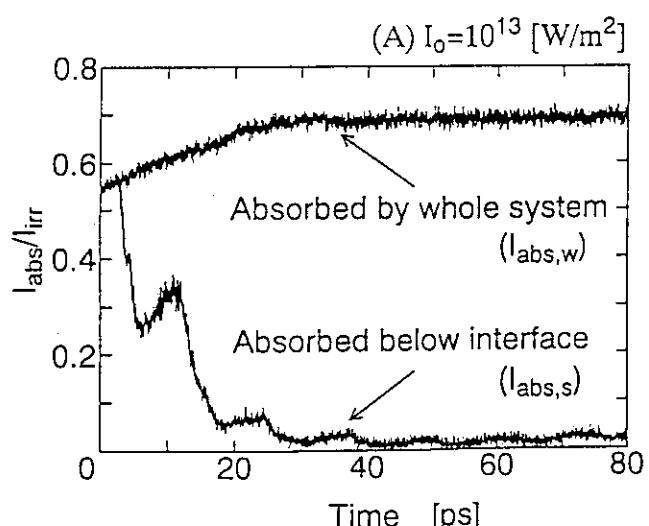


Fig. 4 Transient profiles of laser energy absorbed by whole system and by solid-phase atoms

## 2. 中間スケールの熱物質移動シミュレーション 「トカマク型核融合炉における逃走電子の影響」

### 2. 1. 1 はじめに

トカマク型核融合炉の磁場に閉じ込められたプラズマ中の荷電粒子は、2つの力によつて駆動されている。その一つは、電場による加速力であり、他方は荷電粒子間での衝突による摩擦（減速）力である。仮に、加速力が摩擦力に打ち勝った場合には、トロイダル方向の電場によって電子群が高エネルギー状態へ加速され、実質的に摩擦力の低減化をもたらし、やがて電子群がプラズマ領域外へ飛び出す事態となる。このような、高エネルギー電子群を逃走電子（Runaway Electrons）と呼び、トカマク型核融合炉ではプラズマディスラプションの際に発生する。与えられたプラズマ閉じ込め容器の定ループ電圧に対する電子の持つ最大エネルギーは、シンクロトロン放射または加速時間の何れかで決まる。

現実のトカマク装置においても数多くの逃走電子によるとみられる損傷あるいは痕跡が観察されており、その最も大きなものが第一壁の局所損傷として報告されている。また、逃走電子が第一壁へ衝突した際の最も定量的情報は、制動放射（Bremsstrahlung）による $(\gamma,n)$ 反応で生成される中性子発生量の測定から得られている。これら逃走電子を捕捉するための測定は、中性子の直接測定や、第一壁材料の放射化生成物の検査により行うことができる。後者は、多くの放射化生成物が30MeV以上の電子エネルギーを必要とするしきい値反応で生成されているため、衝突した逃走電子の空間分布が放射化生成物の第一壁内での分布から決定できることを利用している。この他の逃走電子の捕捉方法として、原研のJT60やECのJETで観察されたような逃走電子と第一壁との相互作用の際に発生する強X線放射を測定する方法がある。

次期のトカマク装置、たとえばITER（International Thermonuclear Experimental Reactor）のEDA（Engineering Design Activity）設計に基づく核融合実験炉については、どの程度の頻度で逃走電子が発生するかは全く不明であり、プラズマ運転制御や第一壁設計に依存している。JETにおける実験では、ベリリウム被覆した第一壁でダイバータ配位のプラズマ運転を行った場合は、第一壁に炭素材料を用いてリミター配位の運転を行った場合に比べて逃走電子の発生頻度が著しく減少したと報告されている。ITER-CDA（Conceptual Design Activity）の概念設計では、最も可能性の高いパラメータ域として、逃走電子エネルギーは300MeV程度、表面熱負荷は30MJ/m<sup>2</sup>、逃走電子と第一壁の相互作用の時間スケールは1msのオーダーであるとされている。

プラズマ対向機器への逃走電子による熱負荷は、逃走電子が厚い被覆層を貫通して冷却管を加熱するため、ディスラップション時の高熱流束による表面熱負荷と大きく異なっている。この逃走電子による冷却管加熱によって管壁内部に急峻な温度勾配がついて冷却管の溶融や構造材の損傷が生じ<sup>10)</sup>、真空容器内に冷却材が侵入する事故事象の引き金となり得る可能性がある。このような核融合炉の安全性を検討する上でも逃走電子の第一壁に及ぼす影響を定量的に評価することは重要である。

### 2. 2 逃走電子によるエネルギー沈着解析コード

高速電子による膨大な2次粒子生成やその履歴が確率論的法則に従うため、プラズマ対向機器へ小さい入射角度（1°～5°）で照射される高速電子によるエネルギー沈着を解析的に取り扱うことは困難であると思われる。このような事象のシミュレーションは、微小時間ステップ内で確率則の分布関数によるエネルギー損失、多重散乱や2次粒子生成を計算しながら粒子追跡を行う解析コードを用いることによって初めて可能となる。粒子が全エネルギーを損失する場合、このコードは新しい粒子等を再生成することが可能な全2次粒子を追跡する。このようなコードには高エネルギー物理の歐州中央センターであるCERNが開発したGEANT<sup>11)</sup>や米国のスタンフォード線型加速器研究センターで開発されたEGS

コードシステム<sup>2)</sup>など高エネルギー物理分野で広く使用実績のあるコードや米国のサンディア国立研究所で核融合研究用に開発されたPTAコードパッケージ<sup>3)</sup>等がある。ここでは、EGSの最新バージョンであるEGS4に核融合炉環境である磁場効果を取り扱う機能を追加し、以下のようなプラズマ対向機器モデルでのエネルギー沈着シミュレーションを実施した。

Fig. 1 に示す50mmのモリブデン層の上に10mmの炭素アーマー層を持つ単純ダイバータモデルに対して、逃走電子の入射エネルギー10MeV～300MeV、入射角度0.5°～25°の条件でGEANT3とEGS4を比較した。両者の差を評価するため以下の相対差Dを導入する。

$$D = \frac{E_{\text{GEANT}} - E_{\text{EGS}}}{E_{\text{GEANT}}}, \quad \Delta D = \sqrt{\langle D^2 \rangle - \langle D \rangle^2} \quad (1)$$

ここで、Eはエネルギー沈着量である。以下の表に全計算から得られたDとΔDの平均値を示す。両者は20%以内で一致した。

Table 1 Difference between the peak deposited energies obtained by the GEANT3 and EGS4 for a simple divertor model consisted of 10 mm graphite armor tile and 50 mm molybdenum layer

Items	D [%]	ΔD [%]
Peak deposited energy in molybdenum layer	15.6	6.4
Peak deposited energy in graphite armor tile	-4.1	14.7
Ratio of the deposited energy in molybdenum layer	-7.3	5.3
Ratio of the deposited energy in graphite armor tile	-9.0	9.5

また、磁場の影響については、Fig. 2 に示すように逃走電子の運動エネルギーが100MeV以上では電子の運動エネルギーと入射角度に依存しないことが明らかとなった。

## 2. 3 プラズマ対向機器におけるエネルギー沈着

逃走電子損傷に対抗できるような種々の形状のプラズマ対向機器設計が研究されている。トカマクにおける逃走電子の発生は、プラズマ対向機器表面におおよそ平行な強磁場の影響を強く受けており、主に以下の2つの磁場効果が考えられる。

1. 反射した荷電粒子は物質中へ再入射する。
2. 荷電粒子は物質内部で磁力線の周りをジャイロ運動する。

第1番目の効果は逃走電子によるプラズマ対向機器内部へのエネルギー沈着量を増大させ、第2番目の効果は電子の浸透深さを減少させる。

ここでは、磁場効果を考慮できるように改良したEGS4を用い、Fig. 3 に示す3種類の炭素・銅構造のダイバータについて逃走電子によるエネルギー沈着解析を行った。タイプAはITER-CDA(International Thermonuclear Experimental Reactor-Conceptual Design Activity)の物理フェーズで提案されたもので、CFC(炭素繊維複合材料)構造体中に銅の冷却管がロウ付けされたモノブロック型ダイバータと呼ばれている。タイプBは銅の冷却管構造体にCFCのアーマーをロウ付けしたダイバータ、タイプCはCFCと銅構造体との接合面に銅の冷却管をロウ付けしたダイバータ概念である。全てのタイプに対して冷却管上部のCFCアーマーの厚みを10mmとしている。入射エネルギーは300MeVとし、逃走電子入射角1°を想定した計算を行った。

## 2. 4 結果及び検討

エネルギー沈着の様子をFig. 4 に示す。機器構造によって沈着が空間的に不均一となっていることが分かる。Fig. 5 はエネルギー沈着量の深さ方向の分布を示したものである。解析結果から、銅やCFC内のピーク沈着エネルギーは金属構造物の形状にほとんど依存しないが、炭素アーマーの厚さは金属構造物のピークエネルギーに影響を及ぼすことが分かった。また、高熱流束実験結果との突き合わせから、10mmの炭素アーマー付き冷却管配置がポロイダル方向である場合、全てのダイバータ構造設計に対して損傷しきい値は約

45MJ/m<sup>2</sup>程度と予測され、ITER-CDA設計値(30MJ/m<sup>2</sup>)には安全裕度が無いことが分かった。

#### 参考文献

- [1] R. Brun, F. Bruyant, M. Maire, A. C. McPherson and P. Zanarini, GEANT3, CERN Data Handling Division, 1987.
- [2] W. R. Nelson, H. Hirayama and D. W. O. Rogers, 'The EGS4 Code System,' SLAC-265, 1985.
- [3] K. A. Niemer, C. D. Croessmann, J. G. Gilligan et al., 'Computational and Experimental Modeling of Runaway Electron Damage,' Sandia National Lab., SAND89-2304, 1990.

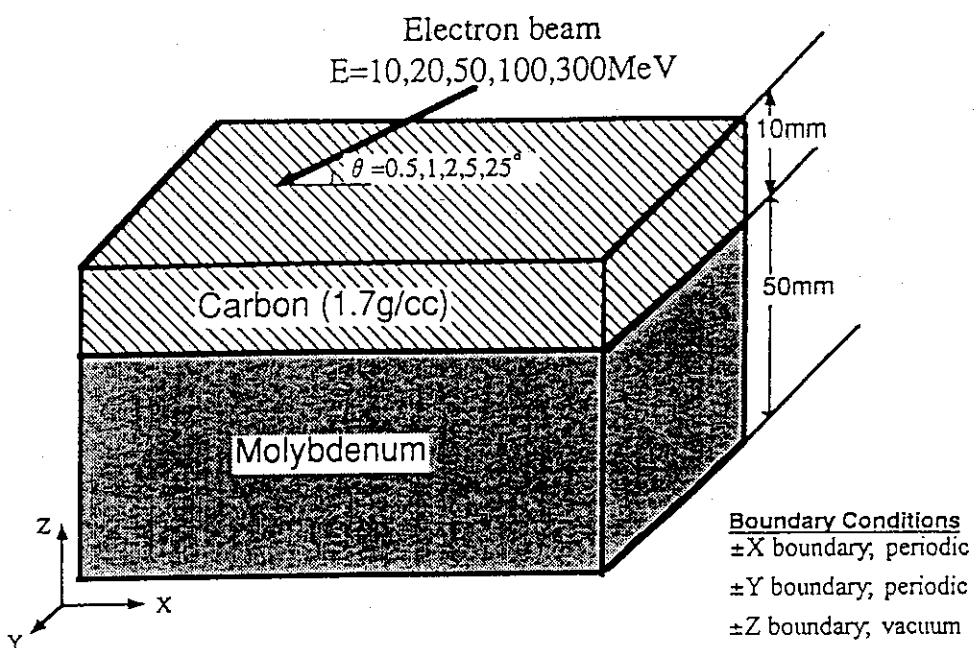


Fig. 1 A simple divertor model (10 mm CFC tile and 50 mm molybdenum layer)

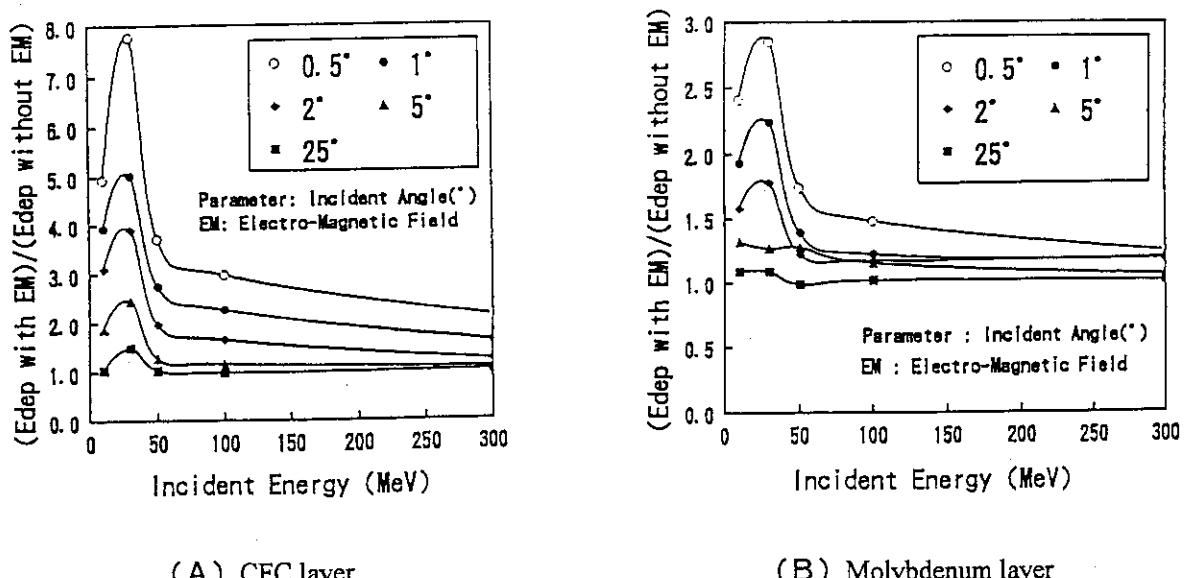


Fig. 2 Effect of incident electron energy on the energy deposition in the materials

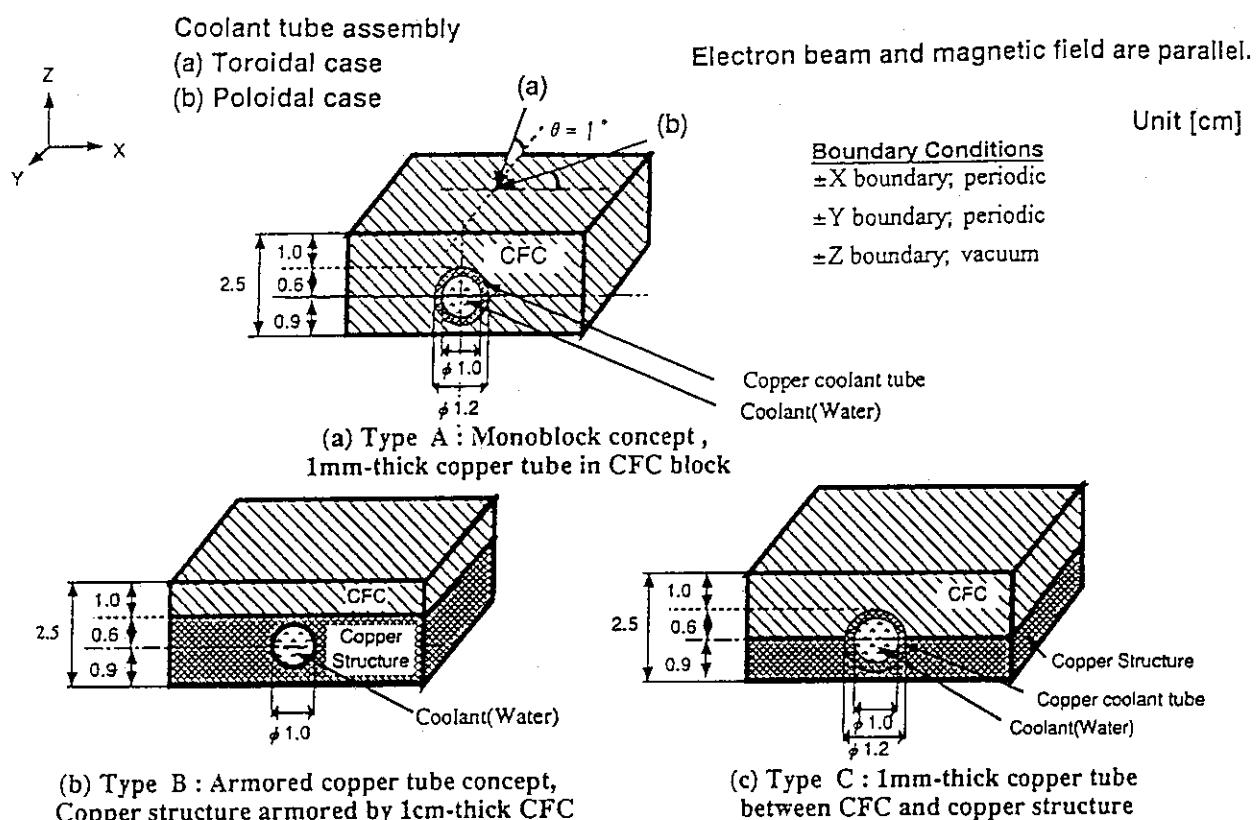


Fig. 3 Three types of ITER-CDA divertor configurations and Claculation conditions

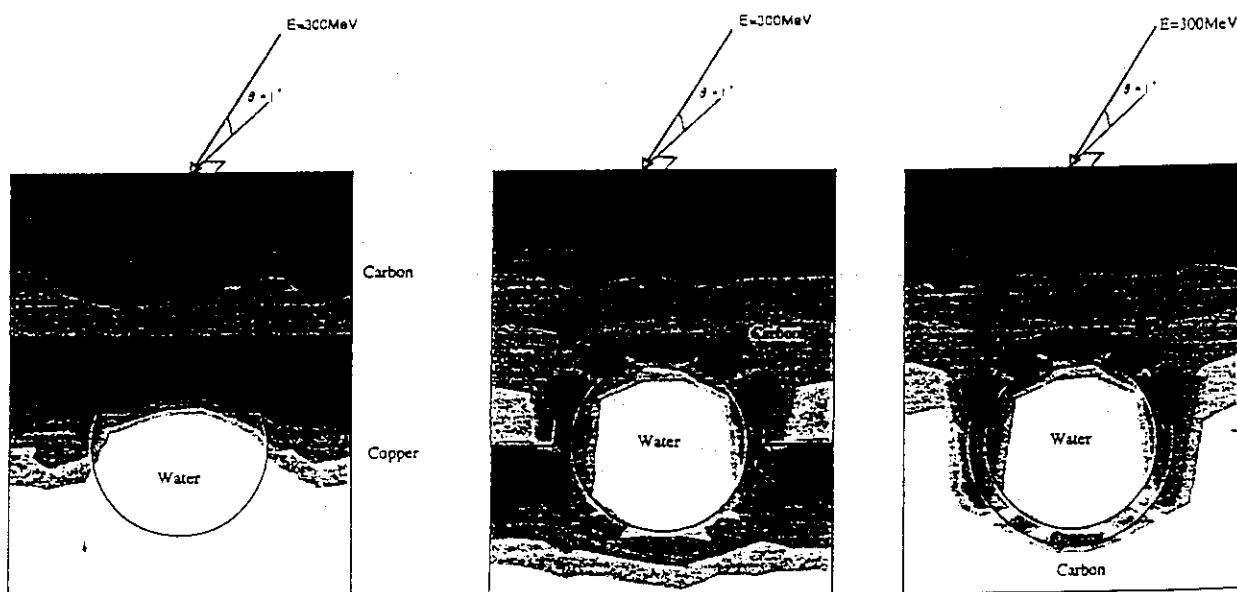


Fig. 4 Example of the deposited energy contours

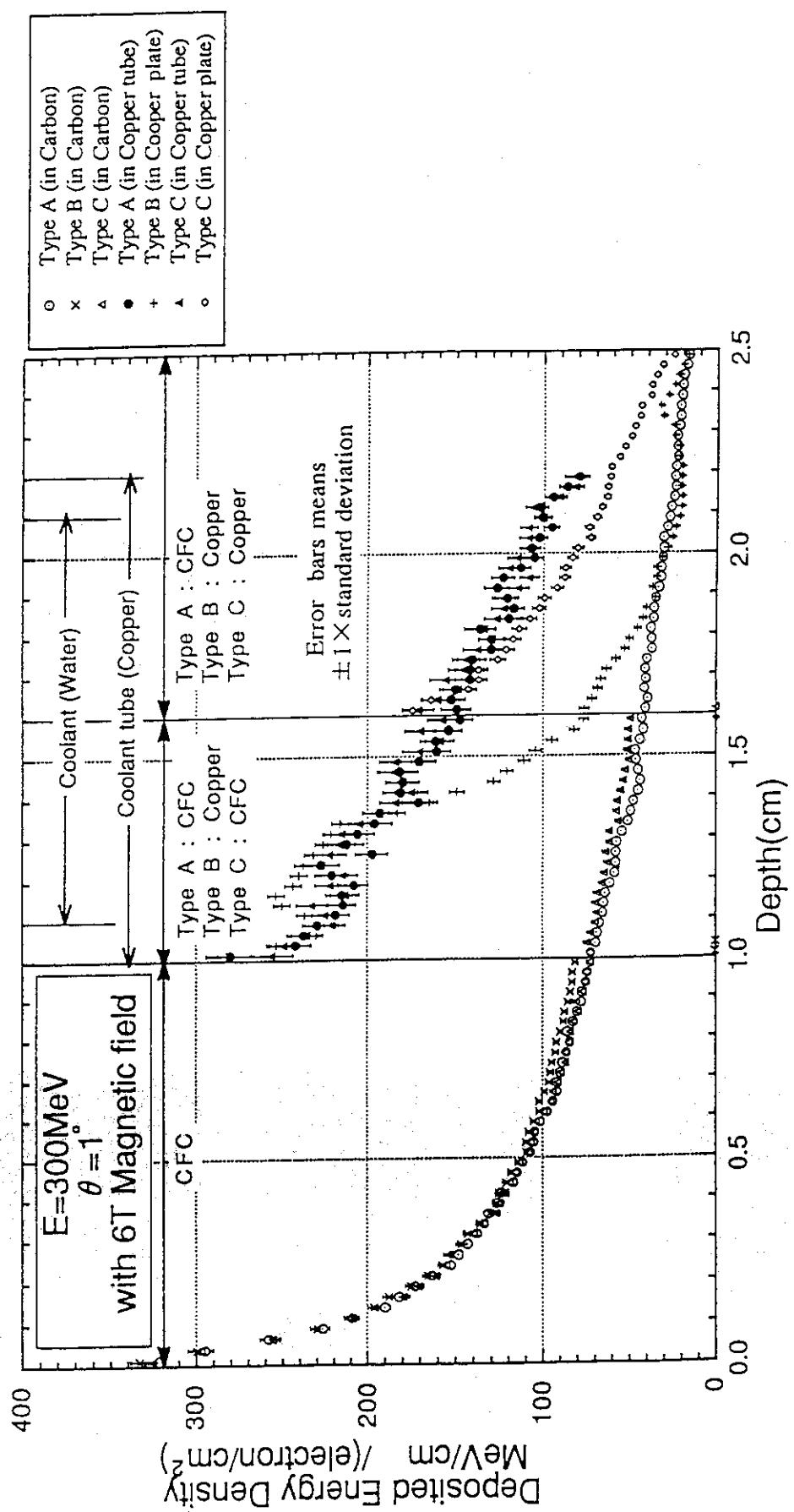


Fig. 5 Axial distribution of the deposited energy in the plasma facing comonents

### 3. マクロレベルの熱流動シミュレーション

#### 3. 1 両端に直管を接続した 180° 曲がり円管内層流の数値解析

##### 3. 1. 1 はじめに

原子炉は中間熱交換器と複雑に屈曲した一次系配管で結ばれており、中間熱交換器への水ストリーム等熱設計上の問題点が指摘されている。曲がり円管内の熱流動挙動は座標系や方程式系の取り扱いが複雑なため、多くの研究においては発達した流れ場に関する実験・解析が主流であった。しかし、最近のコンピュータの発達に伴い、曲がり円管内の流れのような複雑な場のシミュレーションが可能となってきた。

本報告は、曲がり円管内流れの解析で通常使われている流れ方向の放物型近似を行わず、境界適合座標系を用いた三次元橢円型 Navier-Stokes 方程式を直接数値積分する手法で解析した結果をまとめたものである。非圧縮性粘性流れを計算対象として、管曲がり角度  $\Omega = 180^\circ$  で曲率半径比  $R_c/a = 9$  を取り扱った。流れはレイノルズ数  $Re=1000$  の層流で、管への流入速度分布は 2 種類（ポアズイユ流、一様流）を設定した。直管入口での速度分布の影響を曲がり円管入口助走区間にについて既往の文献値と比較し、入口助走区間での流動特性を検討した。

##### 3. 1. 2 数値解析法

非定常三次元非圧縮性流体に対する Navier-Stokes 式は境界適合座標系で以下のように記述できる。

$$q' + E^{\varepsilon} + F^{\eta} + G^{\zeta} = S \quad \dots \dots \dots \quad (1)$$

上式の各項は紙面の都合により省略するが、 $q$  は時間項、 $E \sim G$  は（対流項、圧力項、粘性項をまとめた項）、 $S$  はソース項を表している。また、各変数は全て同一の計算格子点上で定義している。

本研究では、曲がり管の入口上流側および出口下流側にそれぞれ  $10d$  の直管部分を取り付け、この直管の入口部に一様流およびポアズイユ流の速度分布を設定した。壁面には滑り無し条件を与え、管路出口では自由流出条件（主流方向の各流速の勾配が 0）を与えた。また、圧力については管路出口で 0、壁面上では法線方向の圧力勾配を 0 に設定した。対流項には、三次の風上差分スキームである QUICK を適用しているが他の項の空間微分については中心差分を施している。圧力のポアソン方程式を MICCG 法で解き、ポアソン方程式の残差が計算打ち切り条件  $\varepsilon = 10^{-6}$  を満足するまで反復計算を行った。得られた圧力場を使って時間発展させながら速度場を補正した。速度場についてはさらに SOR 法も併用した。Fig. 1 は本計算で対象とした  $180^\circ$  曲がり円管（上流・下流にそれぞれ  $10 d$  の直管を接続している）の円管断面および管対称面における格子分割 (53, 21, 21) を表している。

##### 3. 1. 3 数値解析結果および検討

Fig. 2 は流れの可視化実験の結果<sup>1)</sup>と管路入口にポアズイユ流を設定した場合の本計算結果を  $\Omega = 90^\circ$  の断面で比較したものである。両者の二次流れパターンは非常に良い一致を示し、その最大値も平均流の 23% と実験値(約 20%)にほぼ一致した。Fig. 3 は曲がり管内の速度分布を管対称 ( $\xi, \eta$ ) 面内およびこれに直交する ( $\xi, \zeta$ ) 面内で示したものである。図中の○印は水素気泡法で測定した実験<sup>1)</sup>、実線は管路入口にポアズイユ流を設定した場合の本解析結果である。図の右肩の  $U$  は平均流速の大きさを表している。両者はほぼ完全に一致しており、本解析の妥当性を示している。また、Fig. 4 は管路入口における流速分布が異なる場合の流れ ( $\xi$ ) 方向への管内速度分布の変化を示したものである。図中の実線がポアズイユ流、破線が一様流の結果である。 $\Omega = 22.5^\circ$  における両者の分布形状を

比較すると、特に ( $\xi$ ,  $\eta$ ) 面内の速度分布について、一様流の結果はポアズイユ流の場合に比べて速度分布の変形が小さくなっている。これは、管路入口で設定した一様流分布が  $10d$  の助走区間では発達できず、一様分布のまま曲がり管部分に進入するためである。すなわち、ポアズイユ流に作用する  $\eta$  方向への遠心力は、未発達のまま流入する一様流のポテンシャル・コアに作用する遠心力よりも大きく、結果として速度分布の変形が大きくなるためと考えられる。 $\Omega = 90^\circ$  より下流では両者の速度分布はほぼ一致しており、曲がり管出口で入口速度分布形状の違いによる影響は認められなかった。

Fig. 5 は管軸方向の圧力分布を示したものである（図中の破線間は曲管部分）。中央の実線はポアズイユ流の場合の上下壁面、上側の実線は外側壁面、下側の実線は内側壁面での無次元圧力値を示している。破線は一様流での同様な結果を示している。また、図中に直管の圧力勾配の理論式 ( $64/Re$ ) も示した。直管部では、一様流は急激な圧力降下を示しているが、助走区間が短いためポアズイユ流のような理論式との一致が得られていない。曲がり管部分では、両者共に曲がり管入口の上流側で既に内外壁間に圧力差を生じ、出口に到達する以前に圧力差が減少し始める様子が分かる。このような結果は放物型の方程式を用いた解析では得られず、橢円型の効果であると考えられる。内外壁面間の圧力差は、外壁側のピーク部分を除いて両者は一致しており、ピーク部分での最大圧力差が二次流れの driving force として大きく作用することを考えると、ポアズイユ流の場合の圧力差の方が大きく、前述の遠心力の大きさの相違を示していると考えられる。

### 3. 1. 4 結 論

出入口に直管を取付けた  $180^\circ$  曲がり円管内流れを境界適合座標系で記述した非定常三次元橢円型 Navier-Stokes 方程式を用いて解析した結果、解析結果は既往の実験値とほぼ完全に一致し、本計算の妥当性が確認された。

### 参考文献

- (1) 秋山ほか、機論B, 50-449, 286 (1984)

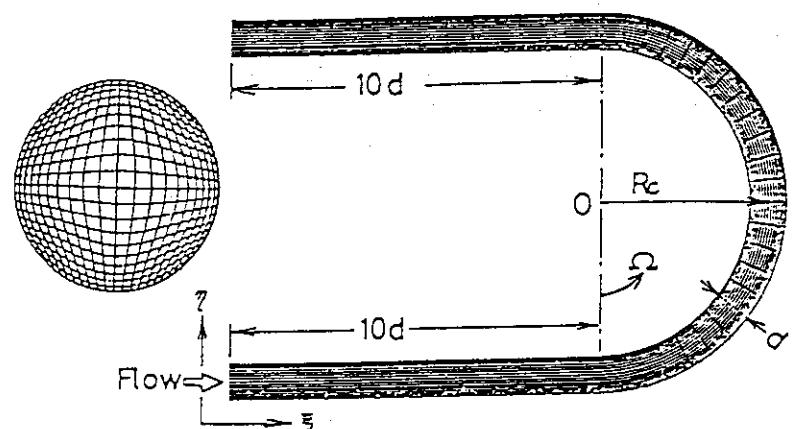
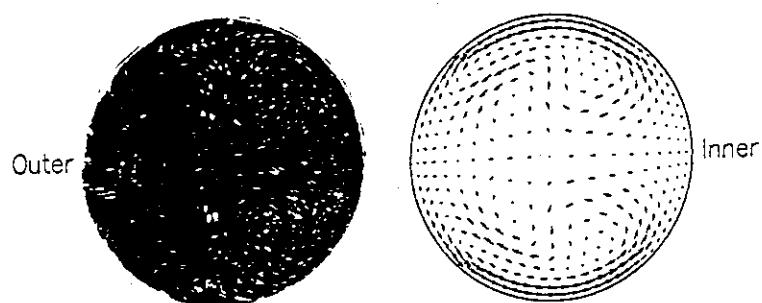


Fig. 1 Coordinate system



$\Omega=90^\circ$ ,  $Re=1000$ ,  $R_c/a=9$

Fig. 2 Comparison bewteen the flow visulization experiment and the present analysis ( $\Omega=90^\circ$ )

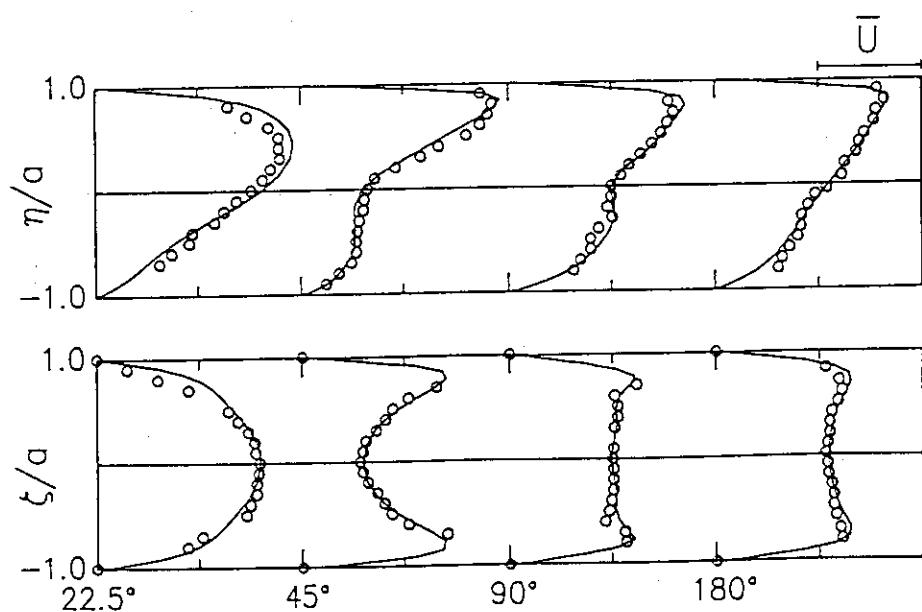


Fig. 3 Comparison of velocity distribution between the experiment and the present analysis

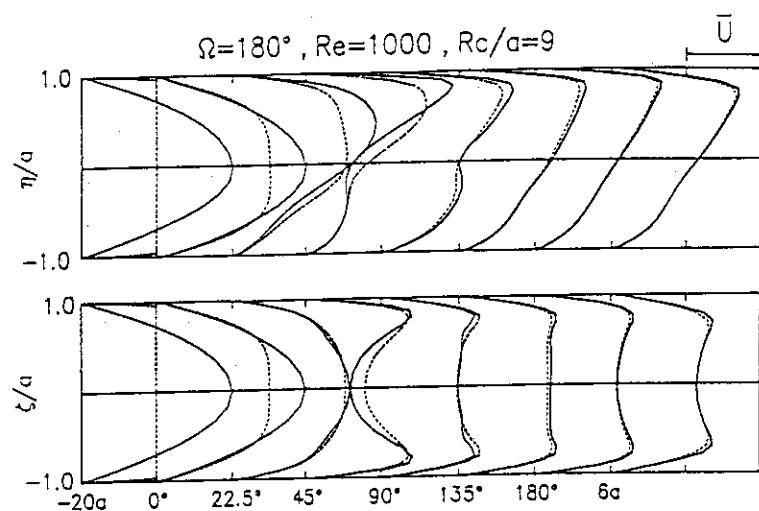


Fig. 4 Effect of the inlet velocity profile

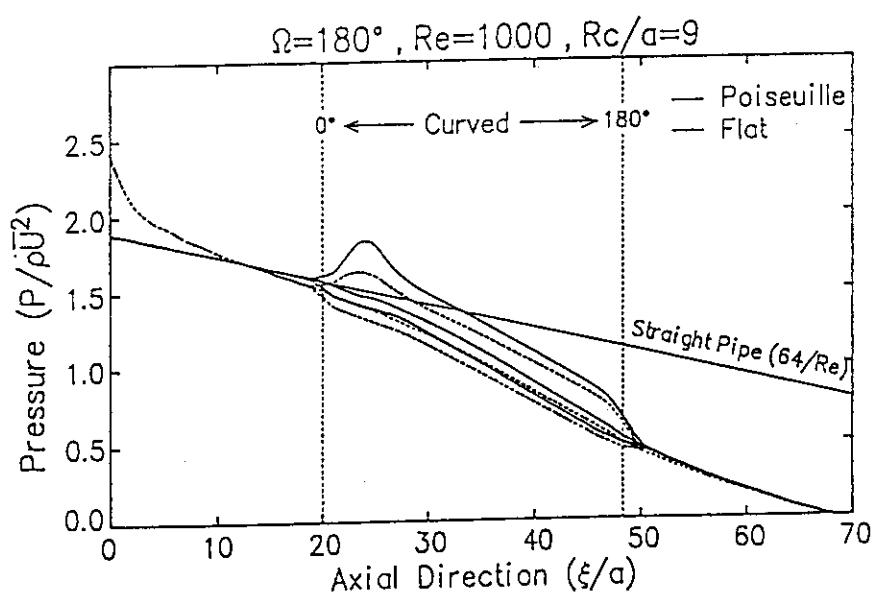


Fig. 5 Axial distribution of the pressure

### 3. 2 等温水平管内共存対流数値シミュレーション

#### 3. 2. 1 はじめに

近年の微細加工技術の進展に伴い、微細構造を持つ精密機器及び機械装置等が生産・利用されるようになってきている。原子力分野においても、核融合炉の高熱流束負荷機器の除熱設計の一例としてマイクロフィン等の微細加工を有する伝熱面の利用が提案されている<sup>1)</sup>。これら微細構造を有する機器の伝熱設計を行う場合、その代表寸法が小さいため、従来の乱流熱伝達の利用が困難となり、比較的低いレイノルズ数域での強制対流に自然対流を重畠させた、複合対流熱伝達による伝熱制御が重要となる。

複合対流場の研究は、従来から数多く広範に行われている<sup>2)</sup>が、水平管内複合対流の助走区間における熱流動特性に関する研究の多くは、流れ方向の拡散を無視したり、主流方向に一方向性（流れ方向に圧力勾配が一定）を仮定した放物形方程式に基づいている<sup>3-5)</sup>。自然対流の影響が小さい場合には、このような近似が妥当であることは多くの研究成果が示しているところである。しかし、自然対流の影響が増大するに従って浮力により管内に大きな2次流れが形成され、これによって温度助走区間における速度分布と熱伝達が大きな影響を受けることが菱田ら<sup>6)</sup>によって明らかにされている。したがって、自然対流の影響が大きく現れる伝熱条件では、2次流れの3次元性を詳細に検討することが重要となり、その数値解析においては基本的に3次元橢円形の基礎方程式を用いる必要がある。

管内複合対流は壁面境界条件に応じて一般に以下の2種類(等温条件と等熱流束条件)に大別できる。

(1) 等熱流束壁条件は、境膜温度差を一定とする条件であるため、自然対流の影響は管路全域に及び、管路の下流域において発達した熱流動場が形成される。

(2) 等温壁条件の場合、下流では流体も含めて全領域で等温となるため、自然対流による2次流れの影響は温度助走区間に限られる。但し、部分的に壁温が異なる場合には等熱流束壁条件と同様に下流域で発達した熱流動場が形成される<sup>7-9)</sup>。

このため、従来の多くの研究は発達した熱流動場が存在する全壁等熱流束壁条件や主流方向に等熱流束壁（断面内は等温壁）条件について詳細に行っている<sup>3-4,10-18)</sup>。しかし、蒸発器、凝縮器や熱交換器の設計等、等温壁条件は工業的には重要であるにもかかわらず、上述のように2次流れ影響領域が局所的に現れるため、詳細な研究はあまり行われていない。

等温壁を有する比較的短い流路の温度助走区間の熱流動特性に関する研究は、Yousefら<sup>19,20)</sup>の実験的研究、Ouら<sup>5)</sup>の放物形方程式を用いた自然対流効果を伴うGreatz問題の数値解析や菱田ら<sup>6,21)</sup>の等温水平円管内空気流に関する3次元橢円形解析が行われているが、この種の流れの支配パラメータである $Gr/Re^2$ は比較的小さな範囲に限られている。

王ら<sup>22)</sup>はこの流れに対するプラントル数の影響を検討するため、等温水平円管内液体金属流に対する3次元解析を実施し、助走区間内での逆流発生限界及びその際の熱流動特性を明らかにした。

著者ら<sup>23,24)</sup>は等温水平正方形管内の空気流に対し、 $Gr/Re^2$ の比較的大きな加熱（流体-壁間の温度差が大きい）パラメータ域における大規模な3次元橢円形解析を行い、加熱開始点近傍の流路上壁に逆流域（はく離泡）の発生を見出し、これによる流路閉塞効果及び上流側に取付けた断熱助走流路の加熱端より上流側への逆流域の遷移（はく離泡の拡大）を報告している。ここでは、著者らによる既報<sup>23,24)</sup>の等温水平正方形管内の空気流に関する大規模な3次元数値解析結果に基づき、2次流れ及びはく離泡の伝熱促進効果と流路閉塞（圧損増大）効果に着目して、等温水平正方形管の総合的な伝熱性能を検討する。

#### 3. 2. 2 数値解析

Fig. 1に解析体系を示す。解析対象の正方形流路の流路幅Lを代表長さとし、流路長さを38Lとした。重力は負のY軸向きである。入口断面平均速度 $U_0$ を代表速度、加熱壁温度 $T_w$ を代

表温度とし、次の無次元量を使用して無次元基礎式を得た。

$$\begin{aligned} U &= \frac{u}{U_o}, \quad V = \frac{v}{U_o}, \quad W = \frac{w}{U_o}, \quad X = \frac{x}{D}, \quad Y = \frac{y}{D}, \quad Z = \frac{z}{D} \\ \Theta &= \frac{T - T_c}{T_h - T_c}, \quad \tau = \frac{t U_o}{D}, \quad P = \frac{p - p_o}{\rho U_o^2}, \quad Re = \frac{U_o D}{\nu} \\ Nu &= \frac{h D}{\lambda} = \left( \frac{\partial T}{\partial n} \right) \frac{D}{\Delta T}, \quad Pr = \frac{\nu}{a}, \quad Gr = \frac{D^3 g \beta (T_h - T_c)}{\nu^2} \end{aligned}$$

ここで、 $a$ は温度拡散率、 $g$ は重力加速度、 $h$ は熱伝達率、 $p$ は圧力、 $T_0$ は流路入口温度、 $T_b$ は混合平均温度、 $t$ は時間、 $\beta$ は体膨張率、 $\lambda$ は熱伝導率、 $\nu$ は動粘性係数、 $\rho$ は密度である。

以下に連続の式、運動の式及びエネルギー式を示す。

$$\frac{\partial U_i}{\partial X_i} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial U_i}{\partial \tau} + \frac{\partial U_i U_j}{\partial X_j} = - \frac{\partial P}{\partial X_i} + \frac{1}{Re} \frac{\partial^2 U_i}{\partial X_i \partial X_j} - K_i \quad (2)$$

$$\frac{\partial \Theta}{\partial \tau} + \frac{\partial U_i \Theta}{\partial X_i} = \frac{1}{Re \cdot Pr} \frac{\partial^2 \Theta}{\partial X_i \partial X_j} \quad (3)$$

ここで、 $K_2 = (Gr / Re^2)(\Theta - \Theta_o)$ 、 $K_1 = K_3 = 0$ 、添字(i, j)はEinsteinの総和規約に従うものとする。作動流体は非圧縮性ニュートン流体とし、浮力項の密度以外の物性値は一定としてBoussinesq近似を用い、熱放射は無視した。

境界条件としては、流路入口に発達した層流速度分布<sup>25)</sup>を与え、入口の流体無次元温度は $\Theta_0=0.5$ とした。全壁面の無次元温度は $\Theta_w=1$ とした。また、本計算では、出口部ではX方向の速度勾配を零、及びX方向の温度の2階微分を零とした。初期条件としては、無次元時間が $\tau=0$ の時全領域に発達した速度分布を与え、温度を $\Theta=0.5$ とした。

計算手法としては、良く知られたスタッガード格子コントロールボリュウム法に基づく通常のSIMPLE法<sup>26)</sup>を使用した。対流項の差分近似には、3次精度の風上差分(QUICK)を用いた。格子数は、 $380(X) \times 20(Y) \times 20(Z)=152000$ 個とし、X方向にはY,Z方向の2倍の格子間隔を用いた。計算は、 $Re=100$ と $Pr=0.72$ (即ち、ペクレ数 $Pe=RePr=72$ )の条件で、 $Gr/Re^2=0, 1, 5, 10, 20, 30, 50$ の7条件について行った。

基礎方程式が非定常方程式であるため、計算は時間発展で行った。前報<sup>23)</sup>で述べたように、無次元時間 $\tau=21 \sim 22.5$ 程度で準定常解が得られていること、及び、下流域でのスセルト数がGreatz解と一致していることを確認している。

### 3. 3. 3 数値計算結果

#### (1) 流動状態

本流れ場は十分下流では発達した層流速度分布に回復するはずであるから、局所壁面せん断応力 $\tau_w$ を次式で定義すると、

$$\tau_w = - \frac{2}{Re} \left( \frac{\partial U}{\partial X_n} \right)_w$$

下流域での流動抵抗は、正方形管内ポアズィユ流に対する $\tau_w$ に一致しなければならない。ここで、上式中の $X_n$ は壁面の法線(n)方向座標、( )<sub>w</sub>は壁面基準の値であることを示す。

Fig. 2は上壁、下壁及び側壁上の局所壁面せん断応力 $\tau_w$ 分布の一例( $Gr/Re^2=30$ の場合)を示したものである。正方形管内ポアズィユ流に対する管摩擦係数 $f_{square}$ は円管内ポアズィユ流に対する管摩擦係数 $f_{circular}$ との比kとして理論的に次式で与えられている<sup>(27)</sup>。

$$k = \frac{f_{square}}{f_{circular}} = \frac{f_{square}}{\left(\frac{64}{Re}\right)} = 0.8887$$

以上の関係式を用いると、発達域では理論値の $\tau_w Re=14.219$ に対して、解析値は $\tau_w Re=14.125$ を示した。両者は約1%以内の誤差で一致しており、本解析が発達域まで高精度に行われていることが分かる。

壁面せん断応力 $\tau_w$ 分布は各壁面上で異なっているが、下壁及び側壁で大きく、上壁で小さい値を示しており、これは菱田ら<sup>6)</sup>と同様に2次流れより軸方向の流れ（主流）が押し下げられて、下壁側で速度勾配が大きく、上壁側では反対に小さくなるためである。また、せん断応力分布は自然対流の影響が大きく現れているところで下壁及び側壁では極大値、上壁では極小値を持つ。これら極値の流れ方向（X方向）位置は、上壁、側壁、下壁の順に現れる。X=30以上では、自然対流の影響はほとんど消滅し、 $\tau_w Re$ は上述のようにポアズイユ流の値に収束している。

浮力の増加に伴う3次元的な流動機構の変化について検討するため、Fig. 3に入口からの流跡線の例を $Gr/Re^2=5, 20, 30, 50$ について示す。 $Gr/Re^2=5$ について観ると、流入した流体は側壁で加熱されて上昇する様子が分かる。この流れは2つの側壁に沿って対称に生じ、上壁面で衝突して淀み域を形成した後、上壁中央部で下降する2次流れとなっている。また、YZ断面に垂直な方向から観察すると、X方向に軸を持つ1対のスパイラル流れを形成している<sup>23)</sup>。 $Gr/Re^2$ の増加に伴って、YZ断面内の2次流れがさらに強くなり、流路上壁の淀み域に「高温溜り」を形成する。すなわち、高温の淀み域全体が主流に対する一種の「流動抵抗」となる。このため、主流は管路入口付近で、一旦(-Y)方向に下降し、下面を冷却した（主流は加熱される）後、側壁を冷却しながら（主流はここでも加熱される）上昇し、高温流体となって上壁に到達することになる。 $Gr/Re^2=20$ 以上では、この傾向が顕著となり、流路上壁の高温の淀み域へ高温流体が益々流入し、淀み域が肥大化して主流に対する大きな抵抗となる。この際、高温の淀み域の流体は主流との境界面近傍で主流に同伴して流れ、上壁近傍の流体はnon-slip条件と連続条件から主流に逆流して流れる。すなわち、高温の淀み域は「はく離泡」となる。これが、本複合対流に生ずる逆流域（はく離泡）の発生機構である。 $Gr/Re^2=50$ では、逆流域の占める領域が拡大し、主流の流路が大きく狭められ、いわゆる「流路閉塞」が顕著となる様子が分かる。この現象は、局所的な熱伝達や管圧力損失へ大きく影響すると考えられ、次節で検討する。なお、この現象が流路入口での速度境界条件に依存しないことは、前報<sup>23)</sup>で10Lの非加熱助走路を加熱管入口に接続した場合の解析結果から確かめている。

## (2) 伝熱特性

Fig. 4に流路の下壁、上壁における局所ヌセルト数分布の鳥瞰図を $Gr/Re^2=0 \sim 20$ について示す。Fig. 4の(a)は下壁、(b)は上壁での分布を示している。 $Gr/Re^2=1$ において、入口からの主流が2次流れによって下壁寄りに偏流するため、全体的な熱伝達率は下壁で大きく、上壁で小さくなっている。 $Gr/Re^2$ の増加に伴って、局所ヌセルト数分布の極大値は増加しながら流路入口方向に漸近していく<sup>23)</sup>。 $Gr/Re^2=20$ においては、はく離泡の発生による流路閉塞のために主流が強く偏流される。Fig. 5に示すように $Gr/Re^2$ の増加に伴って2次流れが増加し、この2次流れが主流方向に軸を持つ1対の対称なスパイラル流れであるため、流路中央部での下降流は一旦下壁に衝突後、側壁へ向かって加速され、再度側壁へ衝突する流れを生じる。このため、下壁上で流れが加速される部分でヌセルト数の極大点が現れている（2次流れは対称なので2つのピークを生じる）。上壁においては、淀み域で流れが停滞すること及びこの領域に流入する2次流れがより高温となっているため、下壁とは対照的に $Gr/Re^2$ の増加に伴ってヌセルト数は減少し、強制対流のみの場合( $Gr/Re^2=0$ )と比較しても低い値を示した。また、上壁のヌセルト数分布の極小値は $Gr/Re^2$ の増加に伴って、

路入口方向へ漸近しながら、熱伝達が低下していく様子が分かる。

### (3) 伝熱性能

Fig. 6 は流路入口から $X=20L$ までの断面平均圧力の差（圧力損失） $\Delta P$ と、同区間における流路全断面の平均ヌセルト数 $Nu_m$ を $Gr/Re^2$ をパラメーターとして示したものである。平均ヌセルト数は、ほぼ線形的に増加していくのに対して、圧損の増加割合は次第に非線形的な増加を示している。圧損の増加割合に対する熱伝達増加割合の比率が伝熱性能を定量する一つの指標と考えられる。そこで、本伝熱管の伝熱性能を検討するため、Fig. 7 に熱伝達増加率を縦軸、圧損増加率を横軸として解析結果を示した（但し、各軸はそれぞれ、強制対流時( $Gr/Re^2=0$ )の平均熱伝達率( $Nu_m|_{g=0}=3.1756$ )と圧損( $\Delta P|_{g=0}=5.5970$ で規格化している）。図中の点線は、圧損増加率に対して熱伝達増加率が等しい場合を示しており、この線より上側にある場合は低圧損高熱伝達、下側が高圧損低熱伝達の特性がそれぞれ得られることを示している。図から明らかなように、本解析体系及び解析条件の全範囲( $Gr/Re^2$ が1～50)で、圧損増加に対する熱伝達増加の比率が高い状態が生じていることが分かる。

したがって、自然対流による2次流れは流れ方向の圧損増加に対してはそれほど寄与せず、強い3次元性を有する2次流れによる温度混合の促進が本複合対流の伝熱性能を決定していると考えられる。

また、 $Gr/Re^2=1 \sim 10$ では熱伝達効率は上昇するが、その後、その勾配は徐々に減少し、Fig. 6 における圧力損失増加の影響が現れている。さらに、 $Gr/Re^2=20$ 以上の範囲では、熱伝達効率の増加が鈍る傾向を示している。これは、逆流が発生する加熱条件及びFig. 6 の圧損の非線形的な増加と対応しており、はく離泡の発生・拡大による「流路閉塞」のために圧損の急激な上昇が生じ、結果として $Gr/Re^2$ の増加に伴って効率の鈍化が生じていることが分かった。以上のことから、 $Gr/Re^2$ が10～20の範囲内に低圧損高熱伝達特性を示す最適条件が存在することが分かった。

### 3. 2. 4 結言

等温水平正方形流路における複合対流熱伝達について大規模な3次元構造数値計算を行い、 $Gr/Re^2=20$ 以上の範囲において流路上壁に生ずる浮力駆動型逆流域（はく離泡）の発生機構を解明した。また、2次流れの3次元構造と熱伝達との相互関係について検討し、自然対流による伝熱性能の向上、逆流発生（流路閉塞による圧損増加）に起因する伝熱性能の鈍化傾向を明らかにするとともに、 $Gr/Re^2=10 \sim 20$ の範囲に最も低圧損高熱伝達特性を示す最適条件のあることを明らかにした。

### 参考文献

- (1)Izenson, G. M. and Valenzuela, J. A., Normal Flow Heat Exchanger for Divertor Panel Cooling, Fusion Technology, Vol. 21 (1992) 1828.
- (2)Gebhart, B., Jaluria, Y., Mahajan, R.L. and Sammakia, B., Bouyancy-Induced Flows and Transport, Hemisphere (1988) 467.
- (3)Newell, P. H. Jr. and Beregels, A. E., Analysis of Combined Free and Forced Convection for Fully Developed Laminar Flow in Horizontal Tubes, Journal of Heat Transfer, Feb. (1970) 83.
- (4)Chou, F. C. and Hwang, G. J., Vorticity-Velocity Method for the Greatz Problem and the Effect of Natural Convection in a Horizontal Rectangular Channel with uniform Wall Heat Flux, Journal of Heat Transfer, Vol. 109 (1987) 704.
- (5)Ou, J.-W. and Cheng, K. C., Natural Convection Effects on Greatz Problem in Horizontal Isothermal Tubes, Int. J. Heat and Mass Transfer, Vol. 20 (1977) 953
- (6)Hishida, M., Nagano, Y. and Montesclaros, M. S., Combined Forced and Free Convection in the Entrance Region of an Isothermally Heated Horizontal Pipe, J. of Heat Transfer, Vol.104 (1982) 153.
- (7)Incropera, F. P. and Schutt, J. A., Numerical Simulation of Laminar Mixed Convection in the

- Entrance Region of Horizontal Rectangular Ducts, Numer. Heat Transfer, Vol. 8 (1985) 707.
- (8) Incropera, F. P., Knox, A. L. and Maughan, J. R., Mixed-Convection Flow and Heat Transfer in the Entry Region of a Horizontal Rectangular Duct, Journal of Heat Transfer, Vol. 109 (1987) 434.
- (9) Nyce, T. A., Ouazzani, J., Durand-Daubin, A. and Rosenberger, F., Mixed Convection in a Horizontal Rectangular Channel--Experimental and Numerical Velocity Distributions, Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 35, No. 6 (1992) 1481.
- (10) Sankar, S. R., Mees, P. A. J. and Nandakumar, K., Development of Three-Dimensional, Streamwise-Periodic Flows in Mixed-Convection Heat Transfer, J. Fluid Mech., Vol. 255 (1993) 683.
- (11) Chou, F. C. and Hwang, G. J., Numerical Analysis of the Greatz Problem with Natural Convection in a Uniformly Heated Horizontal Tube, Int. J. Heat and Mass Transfer, Vol. 31, No. 6 (1988) 1299.
- (12) Chou, F. C. and Hwang, G. J., Buoyancy Effects on Laminar Forced Convection in Thermal Entrance Region of Horizontal Rectangular Channels, Journal of Heat Transfer, Vol. 112 (1990) 250.
- (13) Law, H.-S., Masliyah, J. H. and Nandakumar, K., Effect of Nonuniform Heating on Laminar Mixed Convection in Ducts, Journal of Heat Transfer, Vol. 109 (1987) 131.
- (14) Abou-Ellaïl, M. M. M. and Morcos, S. M., Buoyancy Effects in the Entrance Region of Horizontal Rectangular Channels, Journal of Heat Transfer, Vol. 105 (1983) 924.
- (15) Briley, W. R., Numerical Method for Predicting Three-Dimensional Steady Viscous Flow in Ducts, J. Compt. Phys., Vol. 14 (1974) 8.
- (16) Michelsen, M. L. and Villadsen, J., The Greatz Problem with Axial Heat Conduction, Int. J. Heat and Mass Transfer, Vol. 17 (1974) 1391.
- (17) 石垣 博、望月宗和, 浮力が作用する管内層流熱伝達の基本特性（加熱水平管と平行回転管）、第29回日本伝熱シンポジウム講演論文集、G153 (1992) 351.
- (18) 石垣 博、望月宗和, 浮力が作用する管内層流の流れと熱伝達の発達特性、第30回日本伝熱シンポジウム講演論文集、B212 (1993) 496.
- (19) Yousef, W. W. and Tarasuk, J. D., An Interferometric Study of Combined Free and Forced Convection in a Horizontal Isothermal Tube, Journal of Heat Transfer, Vol. 103 (1981) 249.
- (20) Yousef, W. W. and Tarasuk, J. D., Free Convection Effects on Laminar Forced Convective Heat Transfer in a Horizontal Isothermal Tube, Journal of Heat Transfer, Vol. 104 (1982) 145.
- (21) 菊田幹雄、長野靖尚、Montesclaros, M.S., 水平伝熱円管内の層流助走区間流れに及ぼす自然対流の影響（第1報、壁温一定の場合）、機論B、48-431 (1982) 1321.
- (22) 王 煤、辻 俊博、長野靖尚、液体金属の水平円管内自然・強制複合対流の数値解析、機論B、58-555 (1992) 3382.
- (23) 功刀資彰、一宮浩市、坂元美定、等温加熱下の複合対流熱伝達に関する数値解析、機論B、60-572 (1994) 1393.
- (24) Kunugi, T., Ichimiya, K. and Sakamoto, Y., Effects of Three-Dimensional Flow Separation due to Non-uniform Heating on Laminar Mixed Convection in a Square Channel, Proceedings of 10th Int. Heat Transfer Conf. at Brighton UK, NM17 (1994) to be appeared.
- (25) Shah, R.K., London, A.L., Laminar Flow Forced Convection in Ducts, Advances in Heat Transfer, (1978), 197.
- (26) Patankar, S.V., Numerical Heat Transfer and Fluid Flow (1980), Hemisphere Publishing Corporation.
- (27) 日本機械学会、技術資料「管路・ダクトの流体抵抗」 (1979) 39

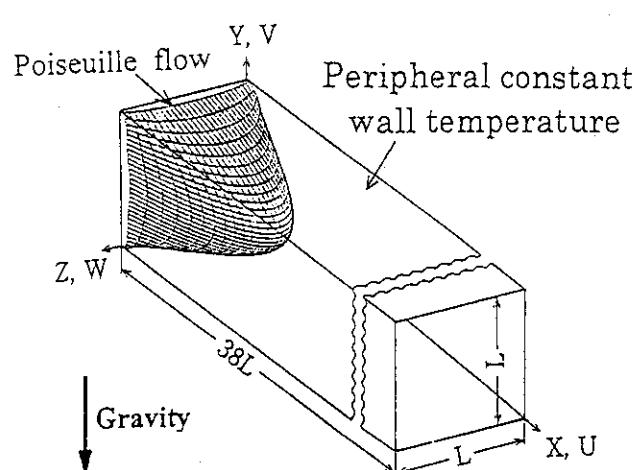


Fig.1 Coordinate system

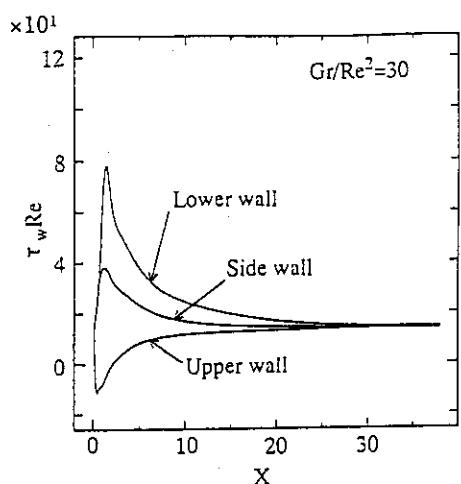


Fig.2 Local shear stress on the wall

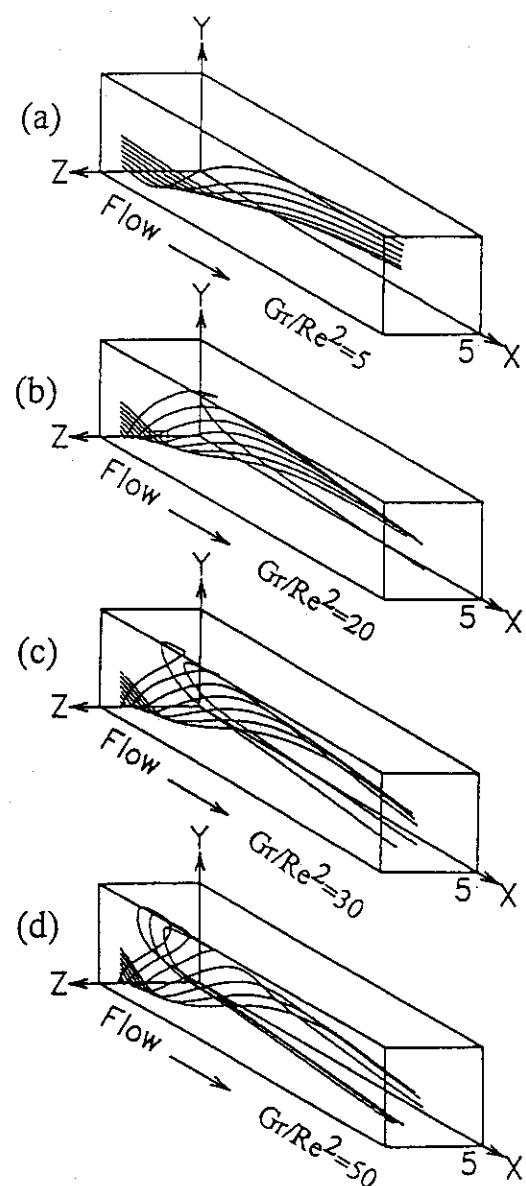


Fig.3 Streaklines

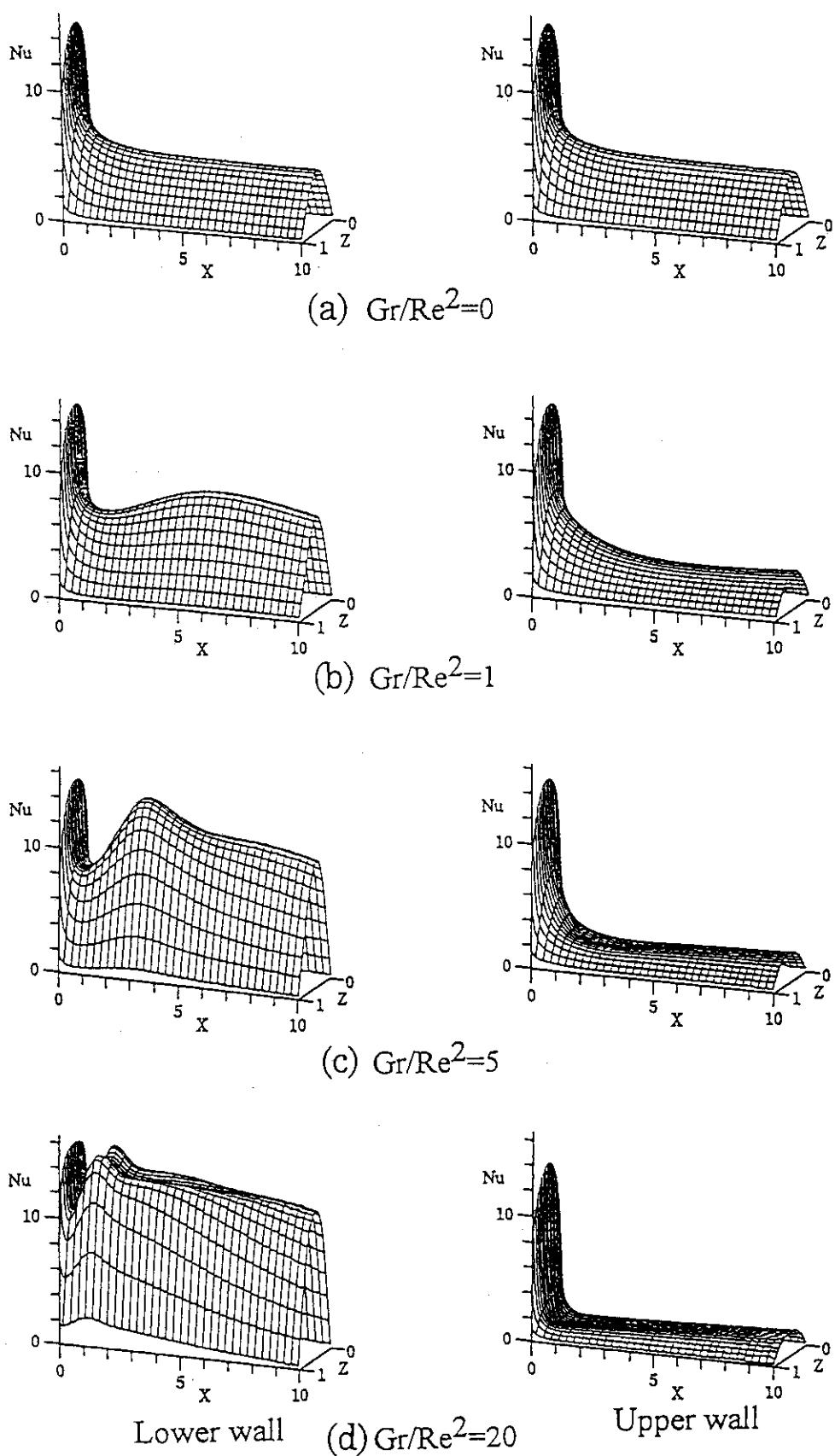


Fig.4 Local Nusselt number

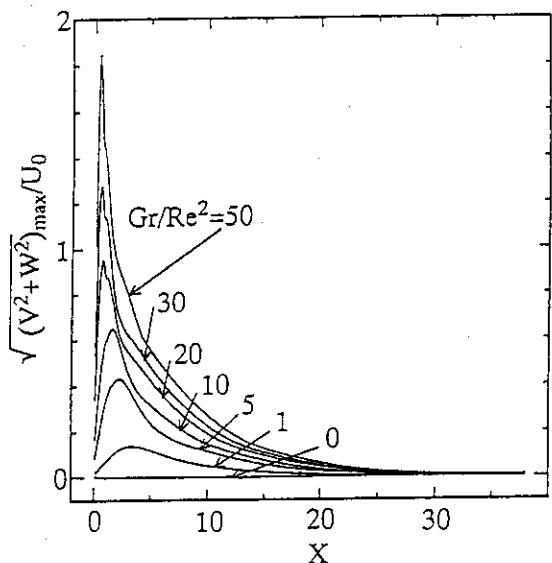


Fig.5 Intensity of the secondary flow

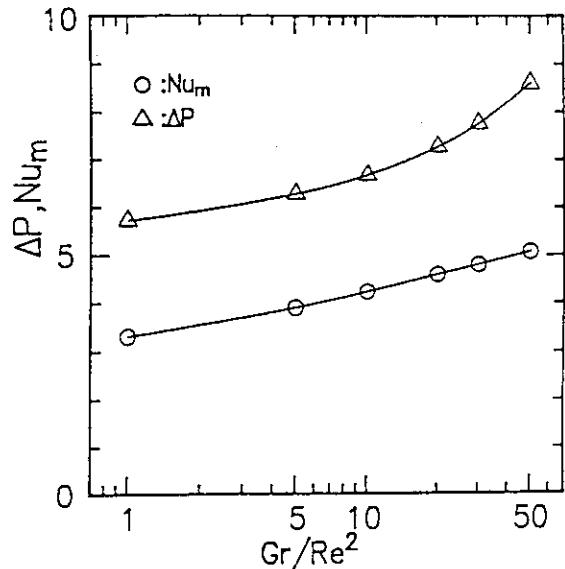


Fig.6 Mean Nusselt number  
and pressure loss

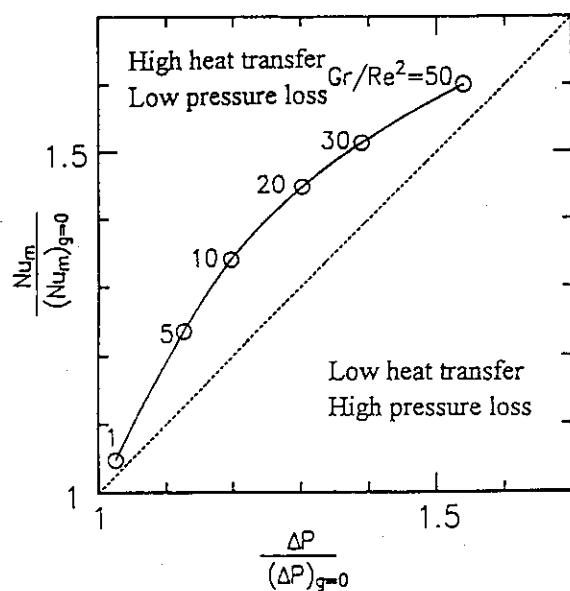


Fig.7 Thermal performance

## 5. 放射性物質の大気拡散に関する研究での可視化技術の応用例

山澤弘実（原研・環安部）

放射性物質の大気拡散に関する原研での研究は、基礎となる大気拡散シミュレーションモデルの開発と、それを応用した SPEEDI 等の緊急時システム開発の両面で行われている。前者では、大気拡散に関する種々の大気現象とその中の拡散といった複雑な現象を計算結果から解釈するのに、いくつかの可視化技術の適用を試みてきた。それらの中で、ボリュームレンダリングによる動画は、現象を直観的に把握するのに非常に有効な手法である。今後、必要とする計算資源と労力の低減化と結果の定量的表現の改善により、モデル開発者が容易に使える強力なツールになると考えられる。一方、緊急時システムでの計算結果の可視化では、必要とされる情報を過不足なく定量的に表示することが要求されるため前者とは異なる側面を持つが、近年の EWS 等の表示能力の向上により、システム開発当初に比べて情報把握が格段に容易になった。

## Application of Visualization Techniques to the Research on Atmospheric Dispersion of Radionuclides

Hiromi Yamazawa (JAERI)

The research activities in JAERI on the atmospheric dispersion of radionuclides have been focusing on both the development of numerical atmospheric dispersion models and their application to the emergency response systems such as SPEEDI. In the former, a few visualization techniques have been used by way of trial to help modellers to interpret the calculation results of complicated phenomena in the atmosphere. Among them, a computer animation with the volume rendering technique has the advantage of excellent expressiveness. It is expected that, if its performance with regard to computer cost and quantitative expressiveness is improved, the technique would become an easy and useful tool even for a modeller. The latter, on the other hand, has different aspects that the graphical outputs from the emergency systems should present information just enough for decision makers. The recent advancement in EWS's performance has promoted the easier interpretation of output information.

Key words (Visualization, Atmospheric dispersion, Emergency response system, Graphical output)

## 1. はじめに

放射性物質の大気拡散を数値モデルにより評価する際には、通常大きく分けて二つの観点からなされる。一つは、平常時を対象とした連続的な放出に対する長期的影響の評価であり、もう一つは、事故時を想定した比較的短時間の放出の影響評価である。前者の評価には、濃度分布が風下軸を中心としたガウス分布形の濃度分布で表されると仮定した簡単なモデル（ガウスブルームモデル）が用いられることが多い。これが可能なのは、各瞬間の濃度分布はかなり複雑であっても、それを重ね合わせた長期の濃度分布は比較的簡単なガウス分布の重ね合わせでかなり良く表現できるためである。一方、後者では個々の事象を精度良く再現しなければならないため、前者と比べより精緻なモデルが必要とされる。

原研における大気拡散数値モデルの開発は、後者の観点からのものであり、米国スリーマイル島の TMI-2 原子炉事故を契機に開始された。その成果として、1985 年に緊急時環境線量情報予測システム（SPEEDI: System for Prediction of Environmental Emergency Dose Information）が完成した。このシステムは、緊急時における放射能の濃度及び線量分布を現地の気象観測データをもとに近実時間で評価することにより、対策立案を支援する目的を持つ。そのため、計算された放射能の流れを当時の技術を用いて可視化し、計算結果の迅速な理解を助ける工夫がなされている。その後このシステムは、国の事業として（財）原子力安全技術センター（以下、原安センター）により運用されており、その間に図形出力等に改良が加えられてきた。

SPEEDI の完成を受け、1986 年からは SPEEDI の広域高層化・高精度化研究として以下の三項目の研究が開始された。

- (1)世界版 SPEEDI (WSPEEDI) の開発
- (2)SPEEDI の軽量化と図形出力の改良
- (3)大気力学モデル PHYSIC の開発

最初の項目はチェルノブイル原子炉事故を契機にして開始され、数千 km から半球規模の放射能拡散を迅速に評価するシステム WSPEEDI を完成した。同システムによるチェルノブイル事故時の放射能の大気拡散再現計算では、試みとして動画技術を用いた出力を行った。二番目の項目では、従来の SPEEDI はスーパーコンピューターを用いて全国の原子力サイトをカバーする中央集中型であったのに対して、EWS を用いて単システムで単サイトをカバーする現地設置型緊急時システムの開発を目指したもので、SPEEDI の軽量化版といえる EXPRESS を開発した。このシステムでは、EWS の表示能力を生かした図形出力が用いられている。三番目の項目では、大気拡散に影響する大気物理過程の支配方程式を解く大気力学モデル PHYSIC を開発した。この中では、複雑地形の周囲での拡散現象を動画で表す試みがなされた。

この報告では、上記のモデル・システムの内容を概観し、それぞれに用いられている可視化例を紹介する。また、緊急時システムにおける可視化について考察する。

## 2. モデル

本報告で紹介するモデル・システムは、SPEEDI<sup>(1)</sup>、WSPEEDI<sup>(2)</sup>、及びEXPRESS<sup>(3)</sup>の緊急時システムとそのモデル群、及び大気力学モデルPHYSIC<sup>(4)</sup>である。それぞれのモデル・システムの詳細はそれぞれの文献に記されているので、ここでは簡単な記述に留める。また、三つの緊急時システムのモデルは、適用範囲、入力データ、数値計算法、開発後の改良段階等の違いにより異なる部分も多いが、ここでは共通する大枠の部分のみを取り上げる。従って、ここで述べる内容は必ずしも現在運用されているモデルまたは公開されているモデルと一致しない部分があることを付記する。

### 2. 1 SPEEDI、WSPEEDI 及び EXPRESS

各緊急時システムの概要をTable 1に示す。いずれも原子炉事故時に近実時間で運用され、事故施設から放出される放射能の空気中濃度、沈着量及び線量（空気吸収線量率、外部被曝線量、吸入による内部被曝線量）を評価する。SPEEDI及びEXPRESSは施設周辺の水平25km四方、鉛直1kmを対象範囲とし、6時間程度のタイムスパンの評価を行う。WSPEEDIの対象領域は水平数千km四方、鉛直10kmであり、数日程度の間の放射能の移流拡散を追跡する。各システムは、数値モデルの他に地形、サイト、核種等に関するデータベース、計算実行のためのマシンインターフェース、図形出力機能、気象データ収集機能が組み込まれており緊急時における迅速な運用を可能にしている。

各システムの数値モデルは気流モデルと大気拡散・線量モデルに分けられる。SPEEDIでは線量モデルが独立していたが、現在 WSPEEDI と同様の大気拡散モデルと結合したモデルに改良中である。モデルの入出力データの概要をFig.1に示す。EXPRESSはSPEEDIと同様であるため図には含めていない。格子は、水平方向では等間隔であり、鉛直方向には下ほど密な不等間隔である。格子点数は水平50×50、鉛直20程度を用いる場合が多い。

#### (1) 気流モデル

気流モデルは、観測データまたは気象庁数値予報モデルの出力である格子点気象情報(GPVデータ: Grid Point Value Data)を入力とし、風速3成分( $u, v, w$ )の3次元分布を出力する。この計算は、1)入力データのうち水平風速成分( $u_{inp}, v_{inp}$ )をモデル格子点に空間内挿することによる初期内挿風速分布の計算、2)風速3成分( $u, v, w$ )が次式で表される質量保存則を満たすようにするための変分法を用いた初期内挿風速分布の修正計算の2段階で行われる。

$$\frac{\partial p}{\partial t} + \frac{m^2}{h} \left\{ \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{\rho h u}{m} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{\rho h v}{m} \right) \right\} + \frac{\partial p w_*}{\partial z_*} = 0 \quad (1)$$

Table 1 Outline of emergency response systems and atmospheric dispersion models.

システム	機能概要	モデル構成	計算機及び支援機能	その他
SPEEDI 緊急時環境線量情報 予測システム	放射能異常放出時の被曝 線量分布等を実時間で予 測する国内全原子力サイ トを対象とした中央設置 型システム。	質量保存則風速場モデル 粒子型拡散モデル セル線量モデル	大型計算機、地図、サイ トペース、メニュー操作方式 (気象データ収集機能) (予測結果配信機能)	現在国の緊急時システムと して原子力安全技術センターにより運用されている。
EXPRESS 小型軽量化版SPEEDI	单一サイトを対象とした SPEEDIと同等の機能を持 つ現地設置型システム。	質量保存則風速場モデル カーネル型拡散・線量モデ ル	ワークステーション、 地図、サイト情報及び物理 定数データベース、 メニュー操作方式	基本開発を終了し、現在国内 外のいくつかの機関で試験 的に運用されている。
WSPEEDI 世界版SPEEDI	国外原子力事故の日本へ の影響を実時間で予測す るシステム。半球規模まで の長距離拡散の評価。	質量保存則風速場モデル 粒子型拡散モデル サブマージョン線量モデ ル	大型計算機、地図及び物理 定数データベース、メニュ ール操作方式 (気象データ収集機能)	基本開発を終了。チャルノブ イル事故の解析に利用され た。国外の同種システムとの 比較研究実施中。
PHYSIC 大気力学モデル	局地気象を大気力学方程 式に基づき予測(予報) し、拡散を評価するモデ ル。短期気象予報、サイト 気象・拡散特性解析。	大気力学モデル 乱流モデル 粒子型拡散モデル	大型計算機(スーパーコン ピューター)	基本開発を終了。モデルの検 証研究、SPEEDIの予報機能と しての活用に関する研究、そ の他の大気拡散の基礎研究 に利用されている。

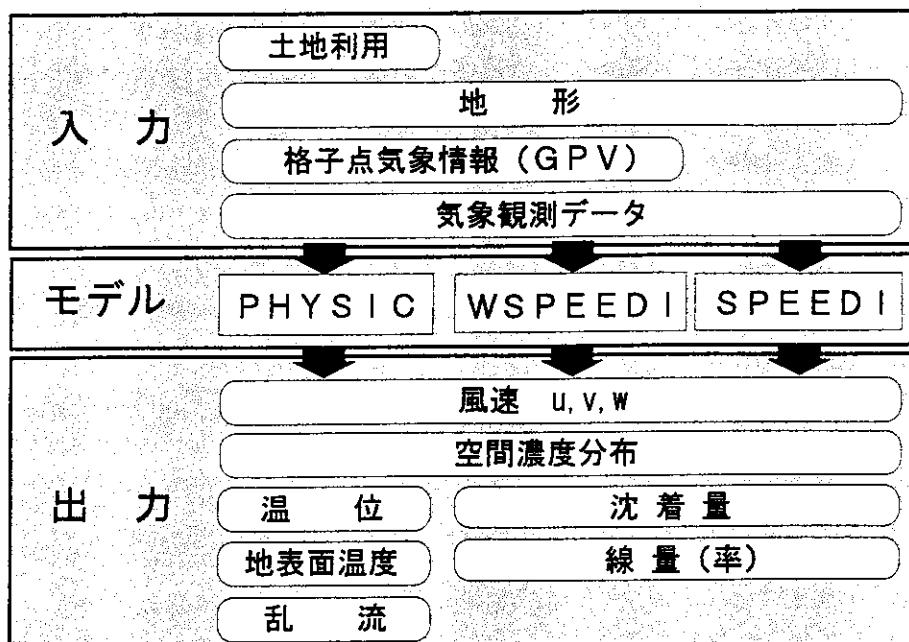


Fig.1 Input and output data of models.

ここで、 $m$  は地図投影による水平方向の長さの歪みを補正する係数、 $\rho$  は空気の密度である。鉛直座標には、地形を考慮した地形準拠  $z_*$  座標系が用いられており、デカルト座標系の  $z$ 、地形の標高  $z_g$ 、モデル上端高度  $z_t$  を用いて  $z_* = (z - z_g) / h$ ,  $h = (z_t - z_g) / z_t$  により表される。

$w_*$  は地形準拠  $z_*$  座標系での鉛直風速である。比較的狭い領域を対象とする SPEEDI、及び EXPRESS では、式(1)で  $m=1$  とし、 $\rho$  の時間・空間変化を無視した方程式が用いられている。初期内挿では  $w=0$  とした鉛直風は、第二段階の計算により地形、大気の温度成層及び総観規模気象場に対応した適切な値が得られる<sup>(5)</sup>。

## (2) 大気拡散・線量モデル

拡散モデルでは、放射能の移流・拡散を風速分布及び乱れの大きさに従って移動する多数の粒子によって表す。一つの時間ステップ  $\delta t$  間の粒子の移動は次の式で表される。

$$x_i^{(t+\delta t)} = x_i^{(t)} + m(u_i \delta t + \delta x_i) \quad (2)$$

ここで、添え字  $i$  は座標  $x$ 、 $y$ 、 $z_*$  に対応する。右辺括弧内の第 2 項は、乱流による拡散を表すランダムな移動で、大気の温度成層、その鉛直構造、移流時間等を考慮したモデルが用いられている<sup>(1)(2)</sup>。

濃度分布は、濃度評価セル内に存在する粒子の個数をある時間範囲で積算することによりその間の平均濃度として計算される。その際、粒子数が小さいセルでの統計誤差を小さくするため、粒子が一定の体積を持つと仮定して粒子の存在するセルのみでなく隣接セルへの寄与も考慮する。特に、EXPRESS では EWS を用いているために計算時間の制約があることか

ら、粒子の体積の概念を拡張した kernel density estimator 法<sup>(6)</sup>を用いている。また、拡散計算では乾性沈着及び湿性沈着が考慮され、地表面への沈着量が計算される。乾性沈着は、地表に近い粒子が持つ放射能の一部を沈着速度に応じて地表面に与えることにより表される。湿性沈着は降水強度の関数として計算され、降水のある水平格子上の粒子すべてから地表面に沈着すると仮定されている。

線量計算は、空气中濃度及び地表面沈着量から換算係数を用いて計算される。空気吸収線量率及び外部被曝線量の計算では、空气中放射能及び沈着放射能の両方の寄与が考慮されている。吸入による内部被曝線量は、地上空气中濃度から計算される。

## 2. 2 PHYSIC

大気力学モデル PHYSIC の概要と入出力データをそれぞれ Table 1 及び Fig.1 に示す。このモデルは、気象観測データまたは気象庁数値予報モデルの出力である GPV データをもとに作成される初期条件及び境界条件を用いて対象地域内での気象現象の予報が可能であるため、SPEEDI の予報機能を果たすモデルとして現在同システムへの結合が進められている。また、原子力施設が立地する海岸地形及び複雑地形での気流や拡散の特性の解析にも用いられてきた。

モデルが対象とするのはメソスケールと呼ばれる時間・空間スケールで、水平方向には数十 km から数百 km 程度、鉛直方向には数 km から 10km 程度、時間的には数時間から 1 日程度のスケールの大気現象である。このモデルも、風速場を計算する気流モデルと濃度分布を計算する拡散モデルに分けることができる。拡散計算モデルは、気流モデルで得られる乱流情報をそのまま拡散計算に用いることが可能なため前述のモデル群に比べてより精緻な拡散計算が可能である他は類似のモデルであるため、ここでは説明を省略する。

前述の緊急時システムの気流モデルは診断型のモデルであるのに対して、この気流モデルは予報型のモデルである。基礎となる方程式系は、一般にブシネスク近似、静水圧近似を用いたプリミティブ方程式系と呼ばれるもので、乱流量については大気境界層内の乱流に適合した2次オーダーの乱流クロージャーモデルを用いている。大気の属性として、風速(水平2成分:  $u, v$ )、温位  $\theta$ 、乱流運動エネルギー  $e (= u'^2 + v'^2 + w'^2)$ 、及び乱流長さスケールと乱流運動エネルギーの積  $e\lambda$  が考慮されている。属性を表す物理量を  $\phi$  で表すと、支配方程式は次の3次元移流拡散方程式で表される。

$$\frac{\partial h\phi}{\partial t} = -\frac{\partial hu\phi}{\partial x} - \frac{\partial hv\phi}{\partial y} - \frac{\partial hw_*\phi}{\partial z_*} + \frac{\partial}{\partial x} hK_x \frac{\partial \phi}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} hK_y \frac{\partial \phi}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial z_*} hK_z \frac{\partial \phi}{\partial z_*} + hF \quad (3)$$

この方程式は前述の地形準拠  $z_*$  座標系を用いて記述されている。ここで、 $F$  は運動方程式では圧力勾配及びコリオリ力、乱流運動エネルギー方程式ではシアーによる生成、浮力に

による生成、粘性消散等の外力を表す。鉛直風速は式(1)と同様の連続の式を積分することによって、圧力は単に静水圧の式を積分することによって求める。局地循環のエネルギー源となる地表面の温度は、地表面熱収支式及び地中熱伝導方程式を用いて予報的に計算する。

### 3. 可視化

#### 3. 1 緊急時システムでの可視化の条件

SPEEDI 等の緊急時システムの使命は、原子炉事故時において現在及び数時間先の放射能の濃度分布及びそれからの被曝線量を予測し、その結果を対策立案・実施者に的確に伝えることにある。緊急時においては情報が錯綜することが考えられ、また人間が一度に把握できる情報量が限られていることを考慮すると、計算結果の可視化は情報の効率的な把握のために不可欠の要素である一方、科学計算の可視化とは異なる側面も併せ持つ。すなわち、1)情報を過不足なく表示すること、2)情報を定量的に表現すること、3)情報を固定化すること、4)複雑な操作を必要とせず迅速に行えること、5)視認が容易であることが要求される。特に、表示情報の精選と手順の簡素化が強く要求される。

#### 3. 2 緊急時システムでの可視化の具体例と考察

開発当初(1980 年代前半)の SPEEDI の図形出力の項目を Table 2 に、その例を Fig.2 に示す。線描画から面描画に改良されたことを除き、この内容は現在まではほとんど変更されていない。これらの図形出力機能は、当時のハードウェアの制約により上記 5)の条件を十分に満足しているとは言えない。カラー表示ではあるが等値線、海岸線、道路等が全て線により表現されているため、視認性でやや劣るものであった。その点で、原安センターで改良された SPEEDI (以下、運用 SPEEDI) の図形表示や WSPEEDI、EXPRESS 等の図形表示は、面描画を用いてかなり改善されている。

上記 1)の観点で見た場合、道路が国道までしか表示されない点、集落の分布が把握できない点、学校、公民館等の防災対策で活用される公共施設の位置が把握できない点等、表示情報量が必ずしも十分とはいえない。しかし、これらを計算結果と同一画面で表示しようとした場合、逆に情報の飽和を招き、1)及び 5)の条件に反することになる。運用 SPEEDI や EXPRESS では、これらの情報は計算結果の下絵として選択的に画面に表示できるようになっている。この方法は操作者の負担を増すものであるが、現在取り得る最良のものであると考えられる。一方、地方自治体等の防災対策立案・実施の主体には、これらの情報は防災関係の資料として図化して備えられている。従って、緊急時システムが同種の情報を持つ場合、情報の同一性を保つための保守や、実際に運用される時にどの程度緊急時システムの情報に依存するかの等の運用面の観点から今後検討を加える必要があると考えられる。

Table 2 List of graphical output from SPEEDI in development stage in 1980s.

Wind	observed wind wind field by arrows (in arbitrary horizontal or vertical cross section)
Concentration	concentration isopleth (same as the above) $\times$ (air conc. or deposition) $\times$ (nuclides) temporal variation (at arbitrary point) $\times$ (nuclides) particle distribution (in arbitrary horizontal or vertical cross section)
Radiation dose	dose isopleth (at ground surface) $\times$ (air dose rate, external $\gamma$ , thyroid dose, internal dose)
Underlain map	coast lines, administrative border, terrain isopleth, rail road, national road, longitudinal and latitudinal lines, place-name

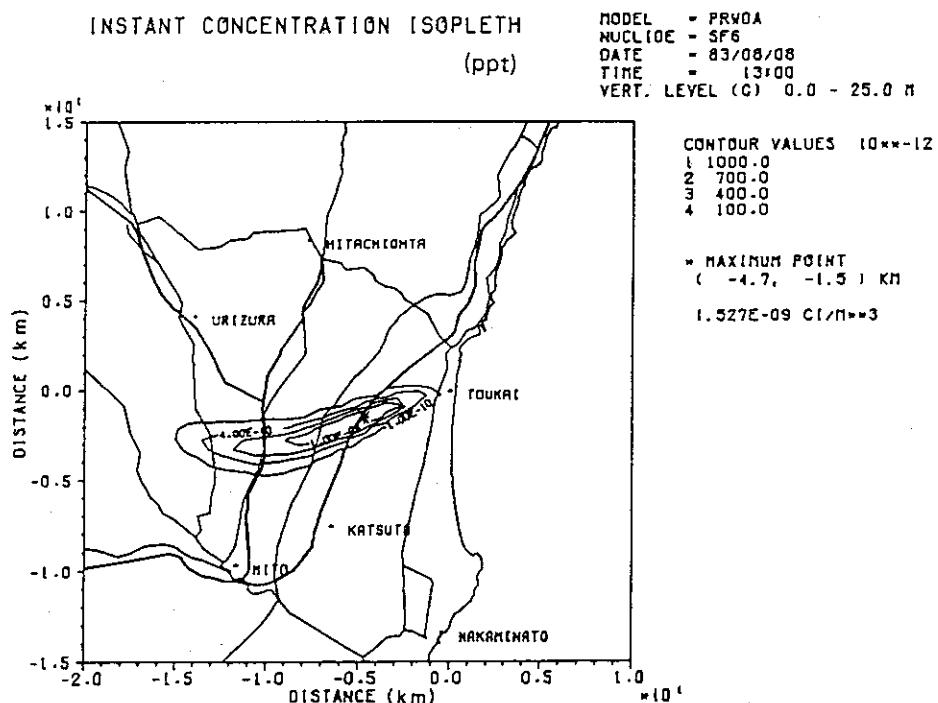


Fig.2 An example of graphical output from SPEEDI under development stage in 1980s.

Table 2 に示した出力項目には粒子分布図、鉛直断面図等の緊急時に必要でないものも含まれている。これはモデル改良や研究目的の計算に対応するためであり、その目的に対しては計算結果を多面的に表示できる利点がある。原安センターによる運用経験によると、防災訓練等の緊急時を模擬した予測計算では、用いられる出力図形の種類は少数に限られており、緊急時システムとして多数の図形出力種類を持つことは 1) 及び 4) の観点から必ずしも利点とはなり得ない。そのため、事前に緊急時に出力する図形種類を精選し、緊急時にはそれ以外出力しないようなシステム運用とその考え方方に立ったシステム設計が必要である。これは単

に可視化の問題点ではないが、現時点では改良の余地が残されていると思われる。

条件 2)の定量的表現に関しては、運用 SPEEDI 等で用いられている等値線図、WSPEEDI で用いられている透過性の面塗りによる等値線と同様の描画とも、値が確定している点では問題はないと考えられる。SPEEDI にはその初期のバージョンから対策指標線量地域表示と呼ばれる出力図形がある。これは、指針等に定められた対策を実施する際の指標となる線量を超える範囲をセンター図と同様に表示するもので、条件 1)及び 2)を端的に実現しており、その有用性は高い。しかし、この機能は緊急時において放出核種とそれぞれの放出量が既知であることを前提としており、そのためには事故時の放出量の測定（推定）方法の確立、モニタリングと予測計算の総合化等の関連開発が肝要である。

条件 3)の出力の固定化は、緊急時においては地域的に離れた複数の人間が同一の情報に基づいて判断・行動する必要性から、図形出力は最終的に印刷物として出力されなければならないことを意味する。国内原子力施設を対象とした運用 SPEEDI では、原安センターを中心に、科学技術庁及び原子力施設が立地する各地方自治体の間で通信回線が整備され、いずれの地点でも端末への図形出力が可能となっている。しかし、それより先での情報伝達は従来の手段に頼らなければならず、色相による計算結果の多彩な表現はコピーやファックスで伝達できない欠点を有する。この点は緊急時システムにおける可視化の特殊性で、ディスプレイ装置上での色相や明度の違いを多用した視認性の高い表現の他に、モノトーンの硬い画質になってしまっても情報量が欠落しない出力方法を備えておく必要がある。動画は後述するように複雑な現象把握には極めて有効な可視化法であるが、上と同じ理由により、またデータ量が膨大になることから、現時点のデータ通信の現状を考慮すると緊急時システムにおいては有効な方法とはいえない。

### 3. 3 現象把握のための可視化

SPEEDI で対象とするような放出源から水平方向に 10km のオーダーの範囲での大気拡散は、主に乱流混合の大きな大気境界層（または混合層）の範囲内の現象である。大気境界層の地表からの厚さは気象条件によって異なるが、日中は概ね数百 m から 1km 程度であり、夜間はさらに層厚は小さい。切尔ノブイル級の水平距離数千 km の長距離拡散の場合にも大気境界層は重要な働きをするが、そのほか積雲対流や総観規模での鉛直運動等の対流圏内の自由大気（境界層より上の大気）中の現象の考慮も必要となる。いずれの場合も現象のアスペクト比は 1/100 程度か、大きくとも 1/10 程度である。薄平たい現象であっても鉛直方向の場の変化は大きく、現象は 3 次元的に把握する必要がある。また、煙が広がる時間スケールで実際の大気現象で定常性が仮定できるのは極めて希であるため、現象の把握には時間変化も考慮する必要がある。

大気拡散現象を解析するためには、まず風速場の可視化が必要である。そのための方法として、SPEEDI や PHYSIC では Fig.3 に示すようなベクトル図を多用している。この例は、筑波山周辺で行われた大気拡散実験時の風速場を PHYSIC で再現したものである<sup>(6)</sup>。この実験で

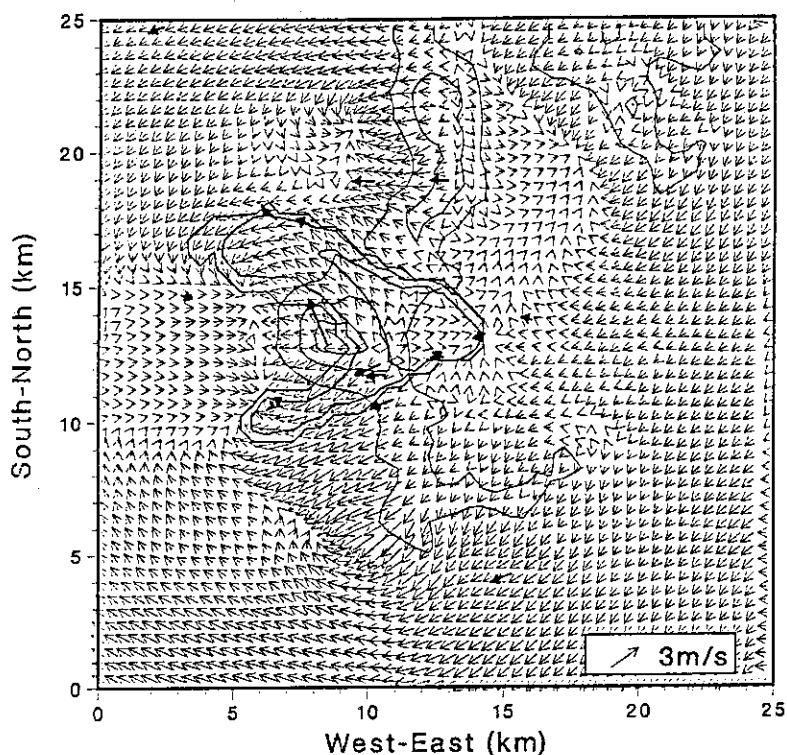


Fig.3 Surface wind distribution around Mt. Tsukuba during a tracer experiment (simulation by PHYSIC).

は、放出点がある筑波山の風上側でよどみ域が生じ、その中で放出されたトレーサガスの多くはそのよどみ域に留まり、比較的高い高度に達した一部のトレーサガスが山の鞍部を主峰を囲むように分岐して風下へ流されて行く状況であった。この様な複雑な状況でベクトル量の空間分布を3次元的に把握するのは難しいことであるが、多くの場合「適切な」いくつかの断面でこの様なベクトル図を描くことにより大まかな流れ場の把握は可能である。適切な断面の選択と流れ場の解釈にはそれなりの知識と経験（試行錯誤）が必要かもしれないが、研究目的の場合には大きな障害ではないであろう。

この実験解析の例では流跡線図を用いた解析も行った。Fig.4にその例を示す。図は南北方向に配置した複数の地点から放出されたマーカー粒子の軌跡を表している。放出高度は、左の図は地上40m、右の図は地上120mである。初期位置の微妙な違いにより流跡線が全く違っていることが分かる。図には示していないが、流跡線の高度と数高度のベクトル図を比較することにより、Fig.5の模式図に示すような大気拡散に関与した風速場の全体像を把握することができた。この例では、山の風上側での温度成層と風速によって決定される乗り越えられる地形障壁の高さが山の風上側での気流の高度によって異なるため、複雑な風速場になり、トレーサーガスが鉛直拡散及び鉛直輸送によって達した高度によってその後の流れる方向が異なっている。

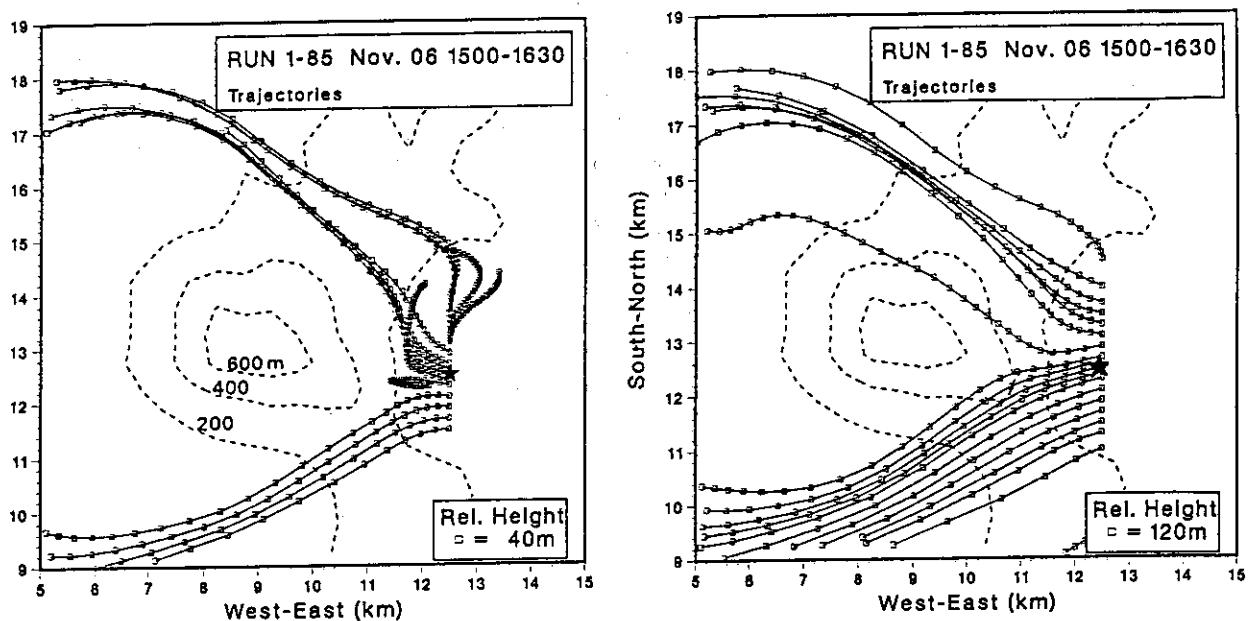


Fig.4 Trajectories of marker particles release around the tracer-release point of a field experiment.

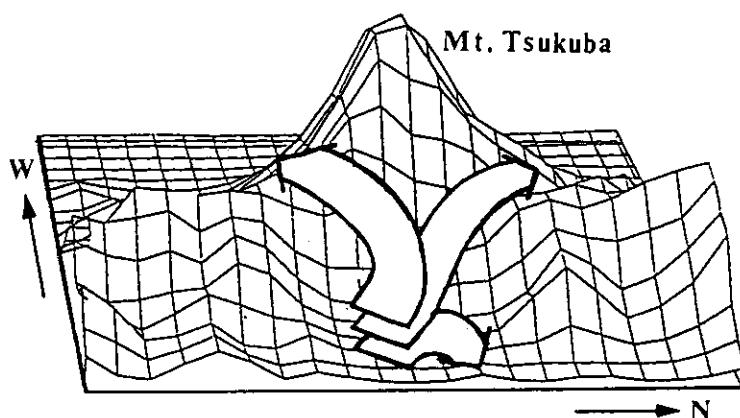


Fig.5 Schematic diagram of air flow around Mt. Tsukuba.

### 3. 4 動画の利用

筑波山周辺の拡散実験のPHYSICを用いた数値解析及び Chernobyl 起因放射性雲のヨーロッパ域での拡散・沈着の解析では、試みとして動画による可視化を行った。この試みは、緊急時システムにおいて動画の利用可能性と、研究目的の解析ツールとしての有用性を探ることにあった。

結論を先に述べると、視認性の高さにおいては優るもの、前述のとおり 3. 1 節の 1)か

ら 4)の条件に反することと多くの計算資源を必要として迅速性に欠けることにより、試行を行った時点（1992 年）では緊急時システムでの利用可能性は低いと判断された。一方、研究目的のツールとしては、表現力が豊かで表示できる情報量が多いこと、動的に現象を把握できること等の長所を有し、非常にポテンシャルの高い手法と判断された。ただし、効果的な表現のためにはある程度のノウハウと試行錯誤が必要であり、そのため結果として出力操作に多くの労力が必要となる点が短所として指摘された。そのため、モデル開発者が気軽に使えるツールの段階には至っていないと判断された。これらの短所は計算機本体及びソフトウェアを含めた付随技術の進展とともに年々克服されてきているようであり、今後特殊な技術を必要としない本来のツールになることが期待される。

以下に動画の概要を示す。

#### PHYSIC による筑波山周辺拡散実験のシミュレーション

内容の概要	:	点源から放出される多数の粒子の移動を CG で表現
計算対象範囲	:	筑波山を含む水平 25km 四方、鉛直 2.6km
粒子数	:	5400 個
計算対象時間	:	150 分
動画の長さ	:	20 秒
フレーム数	:	300
CG 表現	:	地形のカラーシェーディング表現 鉛直方向を 10 倍に拡大 視点のズーミング、回転、移動 粒子の色の高度に応じた変化（紫=低、白=高）

#### WSPEEDI による放射性雲のヨーロッパ域での移動

内容の概要	:	空気中放射能濃度を透過性の雲の形で表現
計算対象範囲	:	ヨーロッパ全域を含む 4600km 四方、鉛直 6km
計算対象時間	:	約 15 日間
動画の長さ	:	約 40 秒
フレーム数	:	347
CG 表現	:	地形のシェーディング表現 鉛直方向を 100 倍に拡大 グレー階調による海陸表現 色相による濃度表現を加えたボリュームレンダリング

#### WSPEEDI による放射能のヨーロッパ域での拡散と地表面沈着

内容の概要	:	放射能の移動を粒子で表現、沈着濃度を色変化で表現
計算対象範囲	:	ヨーロッパ全域を含む 4600km 四方、鉛直 6km

粒子数	:	10200 個
計算対象時間	:	約 15 日間
動画の長さ	:	約 40 秒
フレーム数	:	347
CG 表現	:	2 次元表現 沈着濃度のカラーコンターによる表現 (低濃度 : 青 < 緑 < 茶 : 高濃度)

#### 4. まとめ

放射性物質の大気拡散に関する研究で開発された、モデルシステム群を概観し、それらに用いられている可視化法の紹介と使用目的に応じた各手法の得失を議論した。

SPEEDI 等の緊急時システムでは、計算結果の可視化に用いる手法にはシステムの目的に応じた種々の条件が課せられる。特に、表示情報の精選と手順の簡素化が強く要求される。開発初期から現在までの間、表示する図形種類は地図情報を下絵とするコンター図を中心ではなくど変化していない。しかし、計算機技術の進展により多彩な表現方法が用いられるようになり、視認性が格段に向上した。

大気拡散に関する現象把握のための可視化では、ベクトル図や流跡線図も有用であるが、動画を用いた立体的かつ動的な表現は複雑な現象の全体像を把握するのに特に優れている。チェルノブイル起因放射能のヨーロッパ域での拡散・沈着の解析や複雑地形上での拡散特性の解析に動画による可視化技術を適用し、その有用性が確認された。しかし、動画出力のために多くの計算資源と労力が必要であるため、簡易なツールあるいは緊急時システム使用し得るものとは現段階では言い難い。

#### 参考文献

- (1) Imai, K. et al.: JAERI 1297, (1985).
- (2) Chino, M. et al.: JAERI 1334, (1995).
- (3) Chino, M.: JAERI-M 92-082, (1992).
- (4) 山澤弘実: JAERI-M 92-102, (1992).
- (5) Ishikawa, H.: J. Appl. Meteor., 33, No. 6, 733-743, (1994).
- (6) 山澤弘実: 日本気象学会機関誌「天気」, 39, No. 10, 605-613, (1992).

## 6. 中性子ラジオグラフィによる熱流動現象の 可視化と画像処理による計測

竹中 信幸 (神大・工)

中性子ラジオグラフィを熱流動現象の可視化に適用し、可視化画像を画像処理することにより計測を行った。中性子線の減衰は、水や有機液体のような通常の液体に対して高いが大半の金属に対しては低いため、中性子ラジオグラフィによって金属壁を通して液体の挙動を可視化することが可能である。熱流動現象を研究するために重要なボイド率や流れベクトル場の測定が可視化で得られた画像を画像処理することにより行える。本研究ではJRR-3M熱中性子ラジオグラフィシステムにより種々の二相流と液体金属流れを可視化した。画像処理により、他の方法では測定が困難な多次元ボイド率分布と液体金属の流れベクトル場が測定でき、中性子ラジオグラフィは熱流動現象の研究のために有効に利用できることが示された。

## Visualization and Measurement by Image Processing of Thermal Hydraulic Phenomena by Neutron Radiography

Nobuyuki Takenaka (Kobe Univ.)

Neutron Radiography was applied to visualization of thermal hydraulic phenomena and measurement was carried out by image processing the visualized images. Since attenuation of thermal neutron rays is high in ordinary liquids like water and organic fluid while it is low in most of metals, liquid flow behaviors can be visualized through a metallic wall by neutron radiography. Measurement of void fraction and flow vector field which is important to study thermal hydraulic phenomena can be carried out by image processing the images obtained by the visualization. Various two-phase and liquid metal flows were visualized by a JRR-3M thermal neutron radiography system in the present study. Multi-dimensional void fraction distributions in two-phase flows and flow vector fields in liquid metals, which are difficult to measure by the other methods, were successfully measured by image processing. It was shown that neutron radiography was efficiently applicable to study thermal hydraulic phenomena..

Keywords ( Neutron Radiography, Visualization, Measurement, Thermal Hydraulics, Image Processing, Two-Phase Flow, Liquid Metal, Void Fraction, Flow Vector Field )

## 中性子ラジオグラフィによる熱流動現象の 可視化と画像処理による計測

竹中 信幸 (神大・工)

### 1、緒言

熱流動現象は機械、原子力、化学の工学分野において重要であり、各種流体の流体力学を基本として熱や物質の輸送現象が研究されている。流れが一つの相からなる単相流についてはすでに多くの研究があり、さらに混相流と呼ばれる多くの相を含んだ流体の熱流動現象が研究されている。

混相流とは気体、液体、固体の各相が混ざった流れのことであり、工学分野のみならず地球物理、海洋、気象、災害のような自然科学の分野においても重要である。各相の流れは多くの場合乱流である。複数の相が存在することによってその流れは極めて複雑なものになり、さまざまな流動形態を持ち得る。このような混相流の熱流動の研究を行うにはまずその流動様式を明らかにすることが必要であり、流れの可視化が重要となる。また各相の速度が異なるため流動時の各相の体積割合を決定することが重要であり、特に気相の体積割合は気相を空隙とみなしてボイド率と呼ばれている。

機械、原子力、化学工学においては、配管や容器内の混相流の熱流動現象が重要である。管や容器はたいてい金属製であり、流体が液体金属の場合もある。このような混相流を可視光で観察できる体系で模擬できる場合には、その可視化は容易である。しかし高温高圧の系、相変化や化学変化を伴う系、流体が液体金属であるような場合には可視光による観察は困難であり、可視化と計測の手段として新たな方法が必要となる。

種々のラジオグラフィが可視化手法として用いられてきているが、実時間の観察ができることにより混相流のような流体に対する応用が可能となってきた。X線や $\gamma$ 線による流れの可視化も従来行われているが、中性子線が多くの金属をよく透過し、水や特定の元素に不透明であるという性質を利用すれば従来の方法では困難であった可視化と計測が中性子ラジオグラフィで行えることが期待される。

このような観点から我々は以下のような熱流動現象に対して中性子ラジオグラフィによる可視化と計測法の検討を行っている。

- 1、液体金属流れの可視化 1), 2), 6)
- 2、気液二相流のボイド率計測 3), 4), 7)
- 3、混相流機器の可視化と診断 5), 8)

本報告ではこれらの研究の最近の成果として、鉛ビスマス合金の流れの可視化と気液二相流の多次元ボイド率分布の計測について報告する。中性子ラジオグラフィシステムとしては現在世界最高性能システムの一つとされる日本原子力研究所 JRR-3M 熱中性子システムを利用した。

## 2、液体金属流れの可視化

### 2・1、実験装置および方法

流れの可視化を行うには種々の方法があるが、ここではトレーサ法を用いる。トレーサ法では流体によく濡れ、密度が流体と同程度の粒子に流体に浮遊させることにより流れを可視化する手法である。

液体金属としては鉛ビスマス合金を用いる。この合金は融点約 125°C、比重約 10.5 であり、核破碎炉の液体ターゲットや高速増殖炉の中間熱交換器の熱媒体としての使用が検討されている。トレーサは上記の条件を満たし、中性子に不透明なカドミウムを含んだ金カドミウム金属間化合物の粒子を用いた。

図1に実験装置図を示す。容器は幅 160 mm 高さ 400 mm 厚さ 25 mm のアルミニウム製矩型容器で、約 1 μm のトレーサ粒子を混入した鉛ビスマス融液が下部のタンクから試験容器に圧力差で注入され、そのときの流れを可視化する。この鉛ビスマス合金の厚さは動画像でトレーサの動きを識別できる限界に近く、中性子の減衰率は約 1/e 程度である。またこの程度の大きさ容器を通常の方法で画像処理すると一画素は約 1 mm 程度となり、減衰率、トレーサ寸法ともに可視化の限界に近い条件となっている。

### 2・2、可視化結果

図2に原画と原画を 256 フレームの積分画像でわり算した結果を示す。動画ではトレーサの動きを観察できるが静止画ではトレーサを識別することは困難である。積分を行うことにより動いているトレーサは消え、わり算による背景消去によってトレーサのみの画像がえられる。しかしトレーサは一画素程度の大きさであるためノイズとの識別は困難である。このようにして得たノイズを含んだトレーサのみの画像で 1/30 秒間隔の二枚の画像の空間相関を取ってパターンマッチングにより速度のベクトル場を得ることができる。背景消去した二枚の画像の輝度分布を  $f_1(x,y), f_2(x,y)$  とすれば、相関関数  $\Psi(u,v)$  は

$$\Psi(u,v) = \iint f_1(x-u, y-v) f_2(x, y) dx dy \quad (1)$$

で定義され、相関係数が最大となるところが最もトレーサのパターンが似ており、その時のベクトル  $(u,v)$  がトレーサの移動量を示し、その点での速度ベクトルがえられる。図3に相関関数の一例を示す。このような操作を各点で行い、相関関数の最大点を求めれば2次元のベクトル場が得られる。

図4に得られたベクトル場を示す。空間相関を取ることでノイズを除去することが可能であり、妥当なベクトル場が得られた。このように減衰率が 1/e 程度以下の厚さの流体に一画素程度以上の寸法のトレーサを用いれば、速度ベクトル場が得られることが分かった。

## 3、気液二相流の多次元ボイド率分布

気液二相流のボイド率計測の対象としてロッドバンドル内の気液二相流の計測を行う。このような二相流は水冷却原子炉の安全性の観点から重要であり、X線、

9),10)、ガンマ線<sup>11)</sup>を使った実機レベルでのボイド率計測が行われている。スペーサ近傍での二相流の挙動は特に重要であり、中性子ラジオグラフィを用いれば、金属部分の多いスペーサ内部での二相流の可視化やボイド率計測が行えることが期待される。

### 3・1、ボイド率の計測法

ラジオグラフィによる二相流の画面の輝度分布は気体による減衰を無視すれば次式で表される。

$$S(x, y, t) = G(x, y) \exp\{-\rho_w \mu_{mw} t_w(x, y) - (1 - \alpha(x, y, t)) \rho_l \mu_{ml} t_l(x, y)\} + O(x, y) \quad (2)$$

ここで  $G(x, y)$ ,  $O(x, y)$  はゲインとオフセットであって、中性子ビームと撮像系の非均一性により、空間的な分布は持つ。原子炉は一定出力で運転されているのでビームの中性子束は時間的には一定であり、撮像系も充分に暖気されており、ゲインとオフセットは時間的に一定と考える。 $\rho$ ,  $\mu_m$ ,  $t$  は各々、密度、質量減衰係数、厚みを示しており、添え字の  $w, l$  は壁と液体を示している。

二相流を流さない容器のみの画像では、

$$S_1(x, y) = G(x, y) \exp\{-\rho_w \mu_{mw} t_w(x, y)\} + O(x, y) \quad (3)$$

容器のみの画像と中性子を照射しないオフセットの画像  $O(x, y)$  をあらかじめ測定しておいて二相流の撮影を行う。

二相流の画像から容器のみの画像を背景消去して中性子ビーム方向の水のみによる減衰率の2次元分布は、式(2)と式(3)より

$$\{1 - \alpha(x, y, t)\} \rho_l \mu_{ml} t_l(x, y) = \ln\{S(x, y, t) - O(x, y)\} - \ln\{S_1(x, y) - O(x, y)\} \quad (4)$$

が得られる。

動画像は画像処理器により 256 枚 (約 8.5 秒) 時間積分した画像を記録し、デジタイザーにより、512x384 の画像ファイルを作成する。この処理で 1 画素は実際の長さにすると約 0.23 mm に相当する。スペーサ中央から上流、下流に 20 画素刻みの 18 カ所で、5 走査線分を切り出し、垂直方向の 5 画素、水平方向に 2 画素の平均を行う。平均を行ったのはノイズの低減をはかるためと、CT 再構成の計算に用いたパソコンのメモリー容量に合わせる必要があったためである。平均を行うことによって、CT 用の 1 つのスライスは二相流部で約 100 点程度となる。式(3)によって水での減衰量を計算し、同じ垂直方向位置での各スライスを 50 回転分集め、各垂直方向位置毎に CT 再構成を行えば、3 次元のボイド率分布が得られる。

### 3・2、実験装置および方法

図 5 に実験装置図を、図 6 にはスペーサの詳細を示す。模擬燃料棒は外径 10 mm、肉厚 2 mm、長さ 1000 mm のアルミ管であり、16 本を二つのステンレス鋼製丸セル型スペーサで固定して肉厚 2 mm のアルミ製ダクト内に設置する。ダクトの四隅は半径 10

mm の曲率を持たせてある。水は外径 10 mm の多孔質パイプを介して模擬燃料棒表面に供給され、空気と混合して二相流を形成する。スペーサは図 2 に示すような形状であり、厚さ 0.5 mm のステンレス鋼板で製作されている。実験装置全体はパルスモーターによって回転することができ、CT 再構成を行うためには 3.6 度刻みで 50 回転させた。

中性子の照射は下流側スペーサ付近で行った。スペーサ部では中性子は合計ステンレス鋼 5 mm とアルミ 20 mm を透過して、内部の二相流を可視化することになる。撮影はスペーサをほぼ画面中央においてして上下約 100 mm の長さの流路について行った。

実験条件は、 $j_L = 0.0186 \text{ m/s}$ 、 $j_G = 15.7 \text{ m/s}$  である。

### 3・3、計測結果

図 7 は水を流さないスペーサ部の容器のみの CT 再構成例を示す。アルミの減衰が小さいためステンレス鋼製のスペーサの断面が再構成されている。図 6 のスペーサの断面図と比較するとノイズはのっているもののサポート部も再構成されており、スペーサの肉厚である 0.5 mm 程度の分解能があることがわかる。

図 8 にバンドル内の 3 次元ボイド率分布の CT 再構成例を示す。図中の Z はスペーサ中央からの画素数を示しており、実際の距離はこれに 0.23 mm 掛けたものになる。

スペーサ上流の Z=-180 (スペーサ中央より約 41.4 mm 上流) より Z=-80 (18.4 mm 上流) まで水は模擬燃料棒と容器内壁を流れ、流路の四隅に集まる傾向がみられる。式 (3) をもとに容器を背景消去した水のみによる減衰量により再構成を行っているので水の分布のみが示されており、図に示される 16 個の円と四隅にアールのついた容器の断面形状は模擬燃料棒と容器ではなくその周りに存在する水を示している。

Z=-60 (スペーサ中央より約 13.8 mm 上流) から Z=60 (13.8 mm 下流) まではスペーサ部 ( $\pm 15 \text{ mm}$ ) を示しており、四隅の模擬燃料棒付近に水が集まっていることがわかるが四隅以外では模擬燃料棒近傍の水の存在は明らかでなく、液膜が薄くなつて分解能以下になっていることが推定される。これはスペーサのないところでは比較的厚い液膜となって模擬燃料棒表面を流れていた水がスペーサ内部で拡散されて液滴が発生したものと推定される。

Z=80 (スペーサ中央より約 18.4 mm 下流) より下流では模擬燃料棒近傍の水による円がバンドル外側から次第にはっきりとしていく様子が示され、スペーサ部の搅乱により生じた液滴が模擬燃料部に再付着していくことが推定される。しかしこの範囲内ではスペーサ上流と比較するとより四隅に水が集まつた状態であり、ボイド率はスペーサ上流部に比べ低くなっていることがわかる。

### 4、結論

中性子ラジオグラフィの特性を生かし、他の方法では困難であった、液体金属流れの 2 次元速度ベクトル場の計測とロッドバンドル内気液二相流の CT 法による 3 次元ボイド率計測を行い、中性子ラジオグラフィによる熱流動現象の可視化と画像処理による計測の有用性を示した。

謝辞 本講演は、日本原子力研究所東海研究所研究炉部研究炉技術開発室との共同研究をもとにしたものであり、共同研究者の鶴野晃氏、松林政仁氏に感謝します。

## 文献

- (1) Takenaka et al., Nondestr.Test.Eval.,1994, Vol.11, pp.107-113.
- (2) Takenaka et al., Fusion Engineering and Design 27, 1995, 607-613.
- (3) Takenaka et al., Flow Meas. & Instrum. Vol.1, 1990, pp.149-156.
- (4) 竹中ら、第32回日本伝熱シンポジウム Vol.3, F353, 1995.
- (5) 藤井ら、日本機械学会関西支部第253回講演会 1994.
- (6),(7),(8) 竹中ら、日本原子力学会 1995年春の講演会、F20,F21,F22.
- (9) Morooka et al., Nucl. Engrg. Des., 114, pp.91, 1989.
- (10) Inoue et al. Proc. ASME/JSME Nucl. Engng. Conf. Vol.1, pp.39, 1993.
- (11) Hori et al., Proc. ASME/JSME Nucl. Engng. Conf. Vol.1, pp.69, 1993.

## 図

- 図1 液体金属流れの可視化実験装置図
- 図2 原画像とわり算により得れたトレーサの画像
- 図3 空間相関関数の例
- 図4 液体金属の流動ベクトル場
- 図5 ロッドバンドル内気液二相流実験装置図
- 図6 スペーサの詳細図
- 図7 スペーサ部のCT再構成図
- 図8 CT法によるロッドバンドル内気液二相流の3次元ボイド率分布

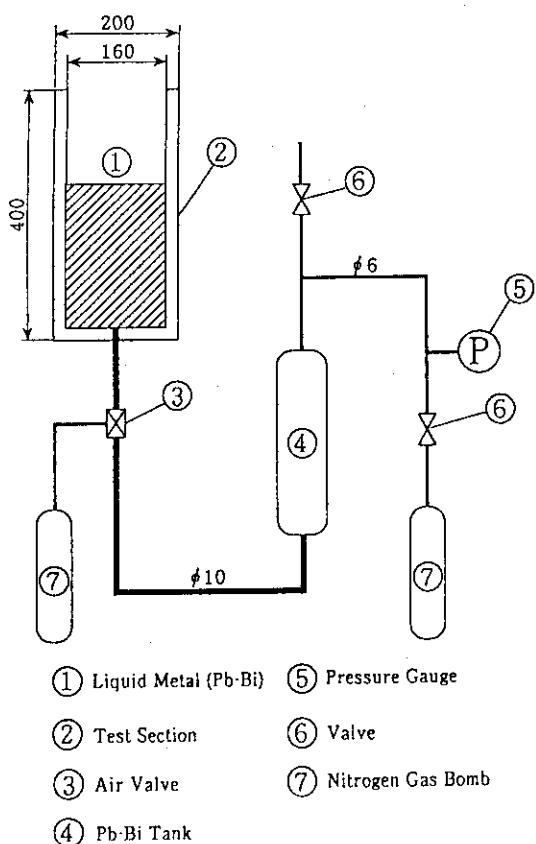


図1 液体金属流れの可視化実験装置図

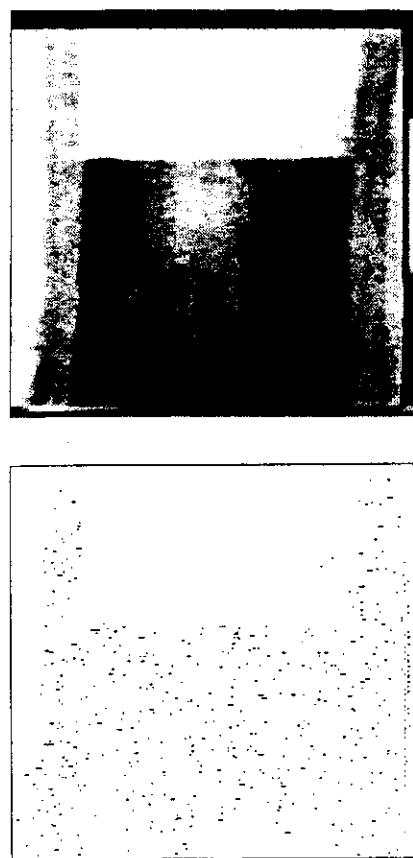


図2 原画像と  
わり算により得れたトレーサの画像

基準 — 336 mm/sec

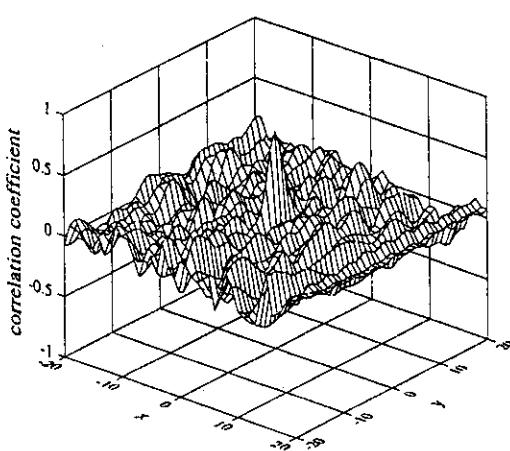


図3 空間相関関数の例

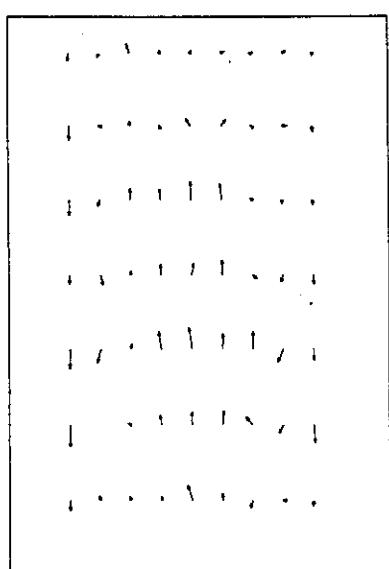
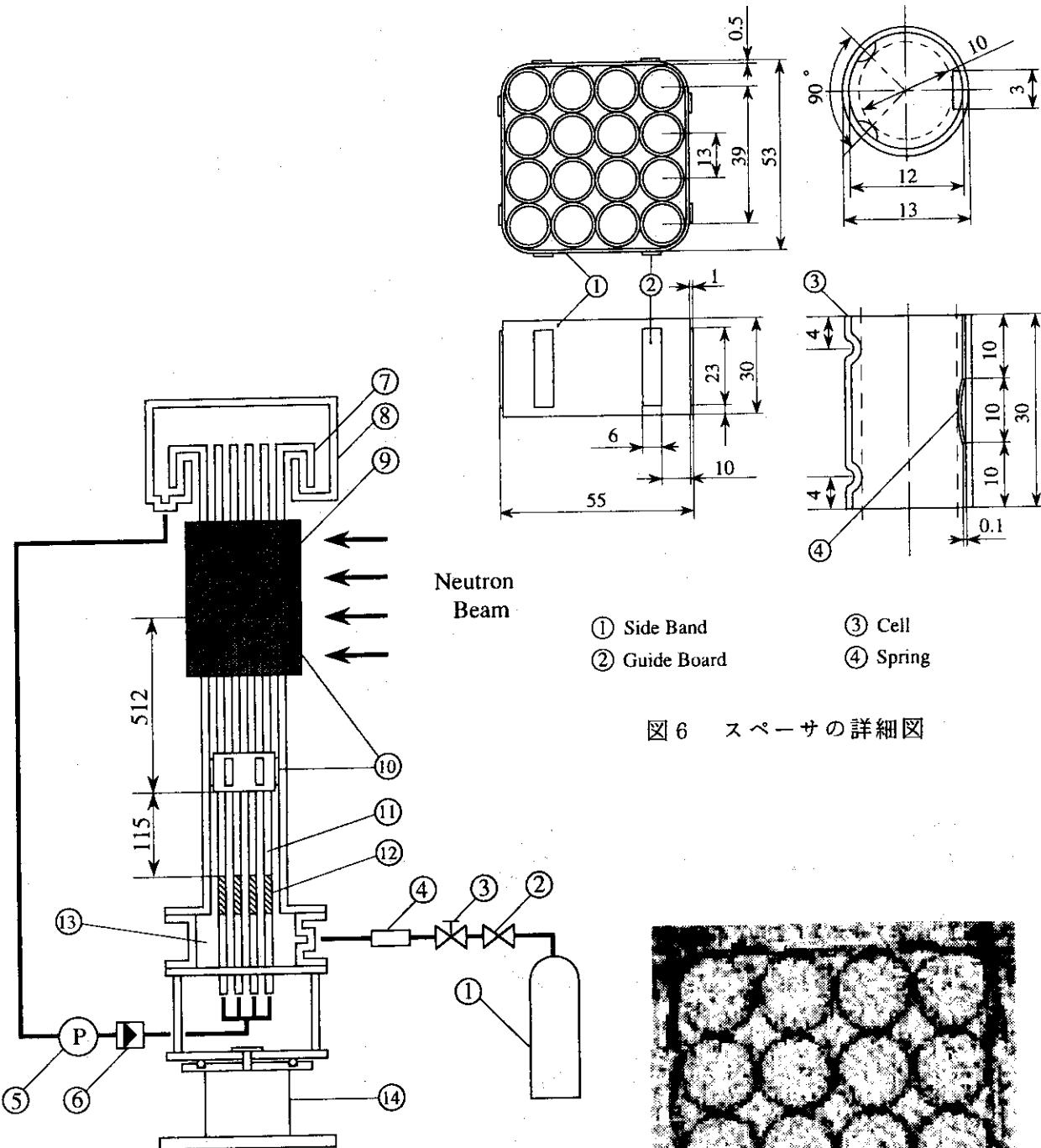


図4 液体金属の流動ベクトル場



- |                      |                       |
|----------------------|-----------------------|
| ① Air Compressure    | ⑧ Separating Chamber  |
| ② Regulator          | ⑨ Test Section        |
| ③ Valve              | ⑩ Spacers             |
| ④ Orifice Flow Meter | ⑪ Simulated Fuel Rods |
| ⑤ Magnet Pump        | ⑫ Porous Pipes        |
| ⑥ Digital Flow Meter | ⑬ Mixing Chamber      |
| ⑦ Labyrinth Seal     | ⑭ Turn Table          |

図5 ロッドバンドル内気液二相流実験装置図

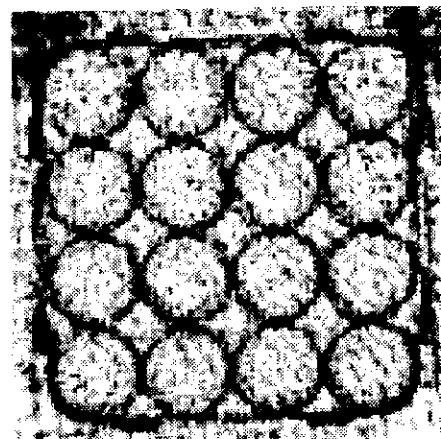


図7 スペーサ部のCT再構成図

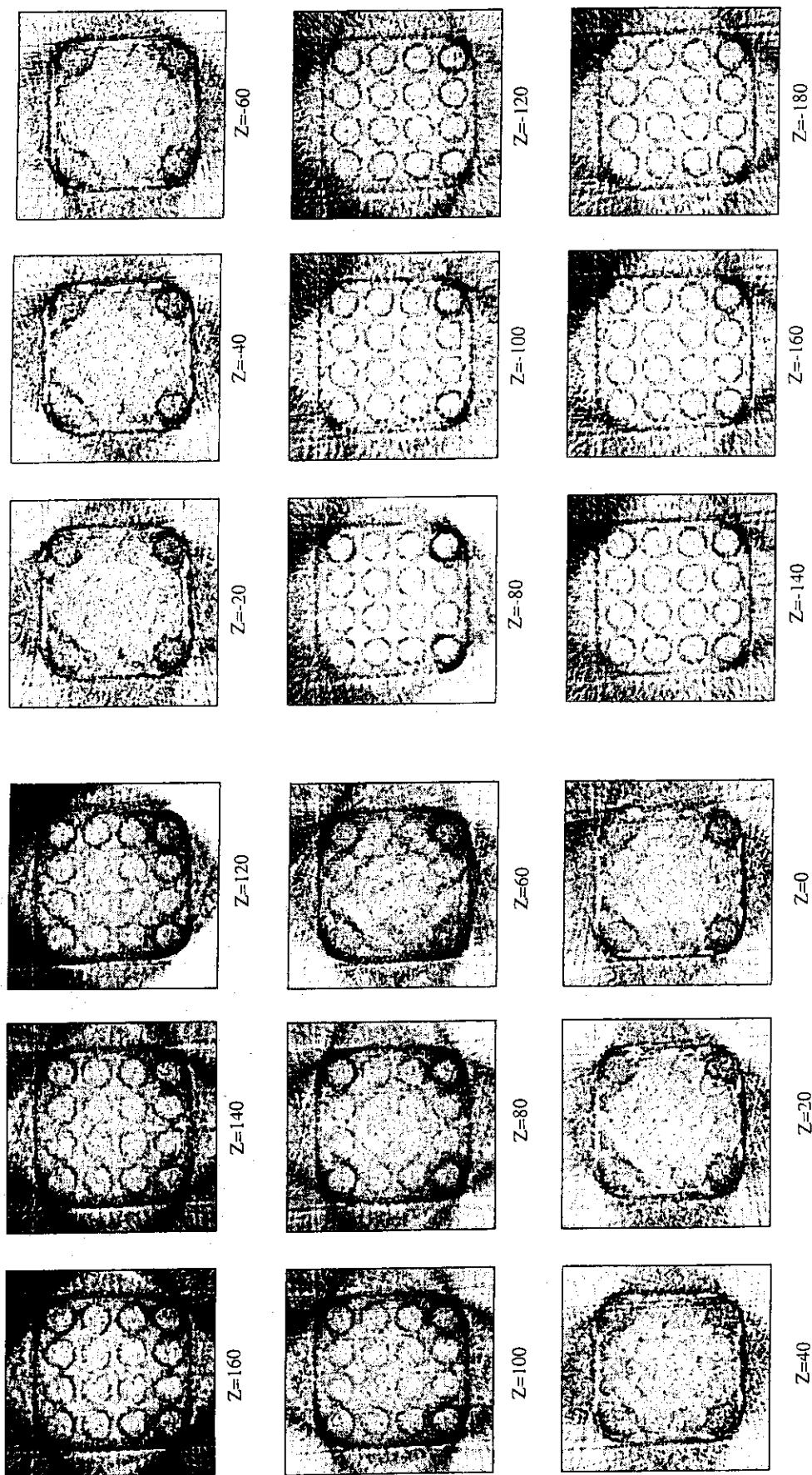


図 8 CT 法によるロッドバンドル内気液二相流の 3 次元ボイド率分布

## 7. 可視化画像の画像処理について

岡本 孝司 (東大・工)

流れの可視化画像から、流速、温度、密度などの物理量を定量化する事が多く実施されるようになって来ている。これらの手法においては、一般に3次元の状態量を、2次元の画像データとし、それを画像解析する事によって物理量の定量化を行っている。

本講演では、これらの可視化画像処理技術の内、3次元流速分布計測として「粒子画像流速測定法」を、3次元密度分布計測として「干渉縞画像からのコンピュータトモグラフィ(CT)」の2件に関して、最近の話題を紹介する。粒子画像流速測定法は、流れに混入した微小粒子の軌跡を追跡する事で流速を計測する。このためにはステレオ画像、もしくは連続画像中での同一粒子の同定が必要となる。この同定手法に関してパターンマッチングを用いる手法を紹介する。また干渉縞画像からのCTについては、従来からのフーリエ変換を用いる手法ではなく、遺伝的アルゴリズム(GA)を用いる手法に関して紹介する。

## Quantitative Flow Visualization

Koji Okamoto (Univ. Tokyo)

Quantity of the physical property, e.g., velocity, density and temperature, can be reconstructed from the visualized image of flow. In these studies, the three-dimensional distributions are calculated from the two-dimensional images with using the image processing techniques.

In this presentation, the recent progress on the Particle Image Velocimetry (PIV) and the Computer Tomography from the interferogram images (CT) will be discussed. In the PIV, the same particle should be identified in the consequent images. The new tracking algorithm with the pattern matching technique was developed. In the CT, the density distributions were reconstructed from a few projection images, with using the Genetic Algorithm (GA).

**Key words:** Quantitative Flow Visualization, Particle Image Velocimetry, Pattern Matching, Computer Tomography, Genetic Algorithm, Image Processing

## 1 諸言

可視化の定義は「見えないものを見る」ということである。これには、照射光やレーザ等を用いて、対象との相互作用を起こし、この相互作用の結果を計測する事により内部の物理量を可視化しようとするもの、計測や解析による多次元情報を人間に理解できるかたちで可視化しようとするもの、などがある。特に可視化を応用した物理量計測では、多次元情報を同時に得られるという大きなメリットが注目されている。従来の計測手法は点計測で、得られる情報量は大変に少なかったのに対し、可視化画像処理を行う計測手法が開発され、同時に大量の情報が得られる様になって来た。これらは、コンピュータ技術の進展により、大量の画像情報を容易に扱うことが出来るようになったと言うことが大きな理由の一つである。

これらの流れの可視化画像から、定量化される物理量としては、流速、温度、密度、圧力、剪断力などさまざまなものがある [1, 2]。これらの定量化手法はいずれも、可視化画像をデジタル化し、このデジタル化された画像データをコンピュータで処理することにより、必要な物理量を取り出している。画像データは、もともと 2 次元の量であり、2 次元情報を得るのには非常に簡単である。これらのことから、現在実用化されている画像計測手法はほとんどが 2 次元物理量分布を計測するものである。

ところで、実際の流れは、空間 3 次元である。近年、3 次元物理量分布を 2 次元の画像データから得ようとする試みが多くなされて来ている。しかしながら、上述のように、もともと 2 次元の情報から 3 次元の情報を得ようすることは原理的に出来ない。そこで、多方向から撮影した 2 次元画像を組合せることによって情報を増やし、3 次元情報を再構築することが行われる。

3 次元情報の再構築として、良く知られているものが、医療分野で用いられる CT スキャナ(断層撮影装置)である。これは、360 度の多方向の情報を大量に計測し、計算によって 3 次元空間分布を再構築する。多方向の情報を計測するため、計測に時間がかかるが、撮影の間、人間はほとんど動かないことを前提にしている。しかしながら、一般に流れは過渡現象であり、どんどん変化してしまう。流れの可視化で同時に計測できる画像は、せいぜい 数方向に過ぎない。すなわち、CT スキャナなどに比べて、遙かに少ない情報量しか得ることが出来ないのが現状である。この様に、流れの 3 次元可視化においては、少ない情報量のデータから、効率良く、かつ高精度で 3 次元情報を復元することが必要となって来る。

現在、可視化画像処理の分野においておもに研究されているものは、3 次元物理量分布を計測する手法である。本稿では、これらの 3 次元可視化画像処理技術の内、3 次元流速分布計測として「粒子画像流速測定法」[3] を、3 次元密度分布計測として「干渉縞画像からのコンピュータトモグラフィ(CT)」[7] の 2 件に関して、最近の話題を紹介する。

## 2 バネモデル粒子追跡法(3次元流速分布計測手法)[3]

### 2.1 はじめに

粒子画像流速測定法(PIV)では、粒子追跡アルゴリズムとして相関法が良く用いられている。相関法は、2つの画像間の相互相関係数を求め、その大きさによって2次元移動量を算出するものである。2つの画像をそれぞれ、 $f_{(x,y)}$ 、 $g_{(x',y')}$ とおくと、相互相関係数( $R_{(p,q)}$ )は、以下の式で与えられる。

$$R_{(p,q)} = \frac{\int (f_{(x,y)} - \bar{f})(g_{(x+p,y+q)} - \bar{g})dV}{\sqrt{\int (f - \bar{f})^2 dV} \sqrt{\int (g - \bar{g})^2 dV}} \quad (1)$$

ここで、 $\bar{f}$ は $f$ の平均値である。相互相関係数( $R_{(p,q)}$ )が、最も大きくなる $(p,q)$ を探査すれば、流速は、 $(u,v) = (p/\Delta t, q/\Delta t)$ として与えられる。ここに示すように、2画像の関係が、 $g_{(x,y)} = f_{(x-p,y-q)}$ であらわされる時、相互相関係数は最大値1となる。このことからも、相関を算出する2画像間の時間差で、粒子パターンが並行移動を行なう場合に、精度良く流速を算出することができる。

しかしながら、実際の流れ場は渦、剪断などにより、回転などの大きな変形を伴っている。2画像間の時間差が極微小の場合には、回転などによる並行移動からのずれは少ないので相関法の仮定は正しい。しかし、流速勾配が大きい箇所や、画像間の時間差が回転速度に比較して大きい場合には、並行移動からのずれが大きくなり、正しい対応づけが困難となる。さらに、実際の画像には、ノイズや照明手法などによって画像上に出現したり消滅したりする粒子も存在する。これらの影響によって、正しい対応づけが困難となる。

また、3次元流速を算出する場合に、3次元相互相関の計算時間は指数的に増大する。よって、相互相関以外の粒子追跡手法を用いる必要がある。

本研究においては、回転や剪断の影響が大きい場合にも粒子クラスタのパターンマッチングを行なうことによって、正しい対応づけを行なう手法を提案する。さらに、本手法を3次元に応用した場合に関しても検討を実施する。

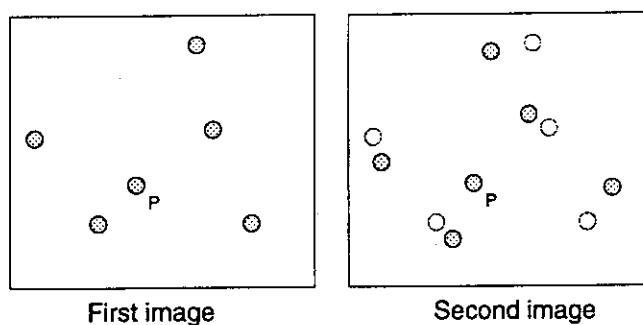


Figure 1: Schematic of particle displacement in two images

## 2.2 バネモデル法

変形を考慮したパターンマッチング手法は、様々な手法が考案されている[4]。ここでは、画像中の粒子数個で構成される粒子クラスタに注目し、この粒子クラスタのパターンマッチングを行なうことを考える。

図2に連続した画像データの例を示す。剪断及び回転によって粒子クラスタのパターンが変形している。この条件においては、粒子同志の重なりが少ないため、相関法では正しい対応を算出するのは困難である。

本モデルでは、この粒子クラスタを構成する粒子同志を、仮想的なバネで接続する(図2)。第1画像に於いては、バネは基底状態にあり、バネ全体の荷重はゼロとする。第2画像では、剪断、回転などにより粒子パターンが変形する。この変形に伴い、それぞれのバネに荷重が掛かる。この荷重は以下の式で表される。

$$E_i = k_i |\vec{s}_i' - \vec{s}_i| \quad (2)$$

ここで  $\vec{s}_i, \vec{s}_i'$  は第1,2画像中のバネベクトルである。また  $k$  はバネ定数であり、本研究においては、 $k_i = 1/|\vec{s}_i|$ とした。これは、クラスタ中の粒子間距離が遠いものの影響を小さくし、近い粒子同志の影響を大きくする事に対応している。この時、粒子クラスタ内のバネに掛かる荷重の平均値は、

$$E = \frac{1}{N} \sum_i^N \frac{|\vec{s}_i' - \vec{s}_i|}{|\vec{s}_i|} \quad (3)$$

と与えられる。

粒子パターンが並行移動をした場合を考えると、この平均荷重は0となる。回転や剪断によって、粒子パターンが変形した場合には、平均荷重は正の値をとるが、その大きさはあまり大きくなない。これに対して、粒子パターンの対応づけが誤っている場合には、バネの変形が大きくなり、平均荷重は大きくなると考えられる。

すなわち、第1画像中のある粒子クラスタに注目し、第2画像中でそのクラスタの移動候補を検索する。正しい対応づけであれば、バネの平均荷重は小さくなるので、最も平均荷重が小さくなる候補クラスタが正しい対応づけと考えられる。

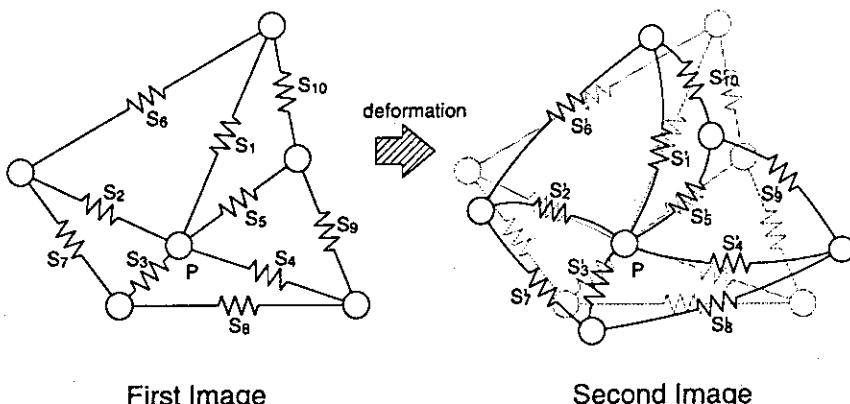


Figure 2: Spring model

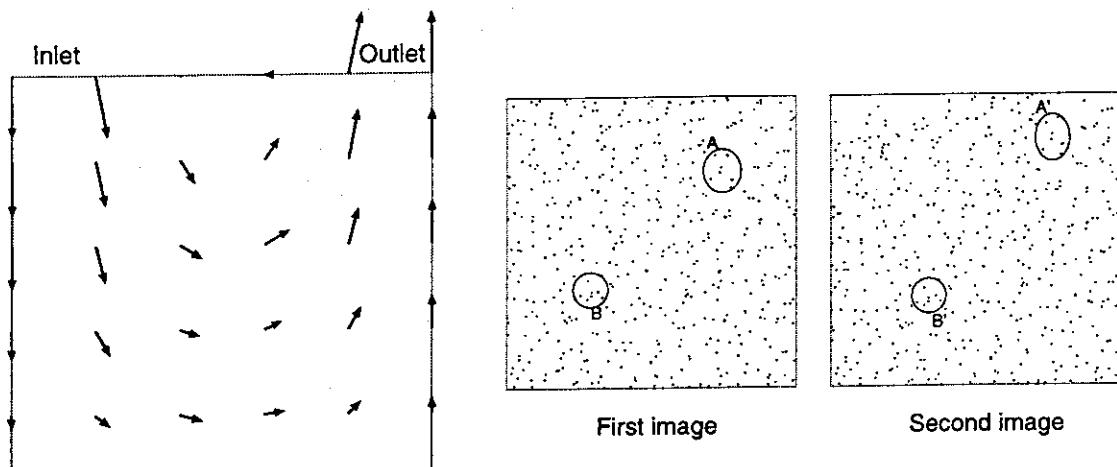


Figure 3: Reference two-dimensional flow

Figure 4: Example of the synthetic images

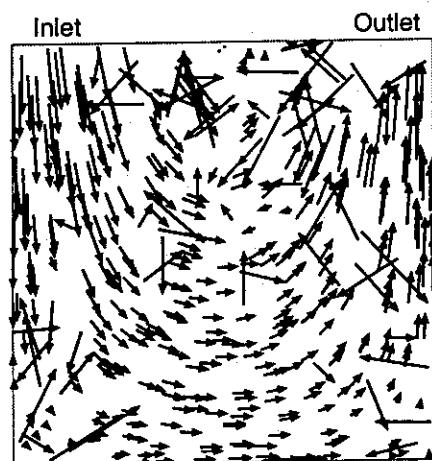


Figure 5: Two-dimensional velocity distributions reconstructed by Cross correlation [5]

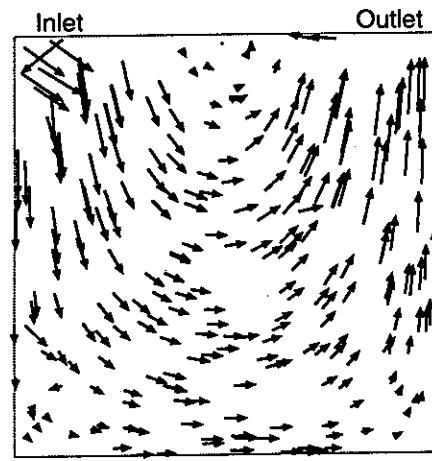


Figure 6: Two-dimensional velocity distributions reconstructed by Spring model

なお、実際の流れ場においては、照明などの問題によって、第1画像で存在した粒子が第2画像では記録されなかったり、その逆に第2画像で粒子が突然出現することがありうる。本手法ではこのような場合を、バネの消去、新設と考える。バネの消去新設にはそれぞれ、 $E_i = 0.3$  の付加荷重が掛かると考える。第2画像において、対応するバネがない場合、および、新しいバネが必要になる場合には、これらの付加荷重を考慮し、平均荷重を算出する。この付加荷重は、対応づけ算出の際に一種のペナルティとして働く。

また、本手法は粒子の位置情報のみを用いてバネ荷重を計算するので、3次元空間に対しても同様に適用することができる。

Table 1: Results of reconstructed vectors

Dimension of flow field	2D		2D with A&D <sup>#3</sup>		3D	
Technique	CC <sup>#1</sup>	SM <sup>#2</sup>	CC <sup>#1</sup>	SM <sup>#2</sup>	CC <sup>#1</sup>	SM <sup>#2</sup>
Correct Vectors [A]	309	417	91	376	260	387
Erroneous Vectors [B]	89	40	188	38	89	59
Particle to be tracked [C]	482		442		484	
Yield [A/C]	64%	87%	21%	85%	54%	80%
Error ratio [B/(A+B)]	23%	9%	68%	9%	26%	13%

#1: Cross Correlation technique [5, 6]

#2: Spring Model technique

#3: Appearing and Disappearing particles

## 2.3 検証

### 2.3.1 2次元流れ

バネモデル法の有効性を確認するため、コンピュータ上で仮想粒子を発生させ、その追跡実験を行なった。図3に示す2次元矩形体系内の流れをFEMコードによって解いて対象流れ場を形成した。この流れ場中に500個の仮想粒子を注入し移動を計算した。大きな循環が存在し、大きな剪断を伴う箇所も存在している。図4に、粒子群の例を示す。全領域を400×400ピクセルの解像度とし、この条件における平均粒子移動距離は約27ピクセルであった。図中領域Bは回転による影響が小さく、相関法でも追跡可能であるが、領域Aは剪断が大きく、従来の手法では困難と予想される。バネモデル法と相関法を用いた解析結果の例を図5,6に示す。図に示すように、相関法に比べてバネモデル法の方が正しい対応づけを行っている。表1に結果をまとめて示すが、相関法に比べて、より正確な対応づけが出来ている。

対象とする2枚の画像時間差を、いろいろ変えて実験を行った。図7に粒子の平均移動距離と、正しい対応づけを行う事が出来た割合を示す。これによれば、2画像間の平均粒子移動距離が30ピクセル程度までは比較的精度良く追跡が出来ているが、それ以上となると精度が急激に悪化している事がわかる。なお、同図に相関法の結果も示すが、相関法では高々10ピクセル程度の移動距離までの追跡が可能である事がわかる。

画像中の粒子出現、消滅の影響を調べるために、図4のデータ中から20個の粒子を消去し、その影響を調べた。結果をそれぞれ図8,9および表1に示す。ここに示すように、相関法では粒子の出現、消滅に非常に敏感であるのに対し、バネモデルでは適切に処理され、誤対応が少なくなっている事がわかる。

### 2.3.2 3次元流れ

3次元の場合の検証結果を示す。流れ場としては、3次元立方体内の流れをFEMコードによって解析して求めた。図10に解析コードにより求めた流れ場を示す。この流れ

場に 500 個の仮想粒子をランダムに注入し、3 次元位置を記録した。図に示すように、入口部分では高速の流れが存在するのに対し、上部は低速である。2 時刻の粒子位置情報を元に、相関法、バネモデル法の 2 種類の手法で粒子追跡を試みた。図 11 に 3 次元相関法 [6] による結果を示すが、高速領域(変形の大きい領域)の追跡が全くできていない。図 12 にバネモデル法による結果を示すが、高速、低速領域とともに、良い精度で流れ場を再現できている。図 1 に結果をまとめて示す。なお、誤対応ベクトル

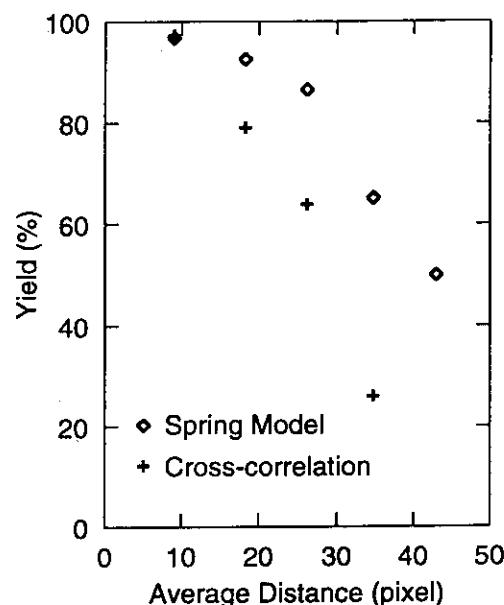


Figure 7: Yield

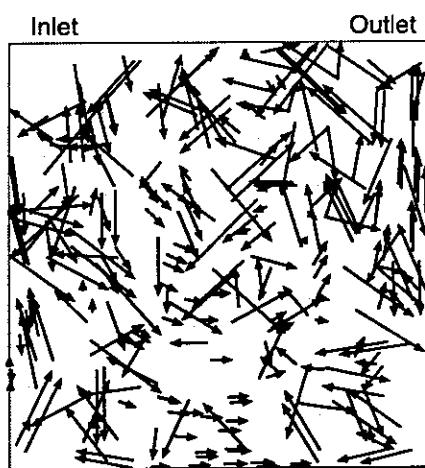


Figure 8: Velocity distributions with appear and disappear particles reconstructed by Cross correlation [5]

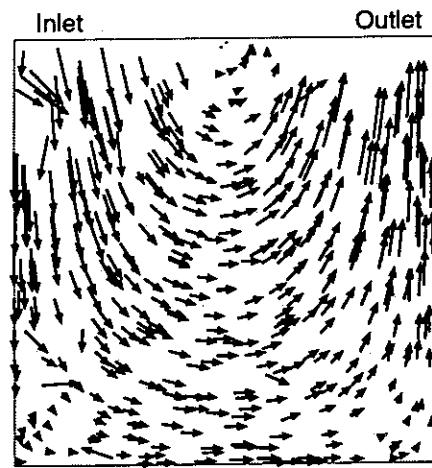


Figure 9: Velocity distributions with appear and disappear particles reconstructed by Spring model

がいくつか存在するので、改良が必要である。

## 2.4 まとめ

粒子クラスタのパターンマッチングを元にした粒子対応づけの手法を提案した。この手法は、剪断、回転などの影響が比較的大きい場合並びに、3次元流速測定にも適用可能である。数値実験によって、本手法の有効性を確認した。

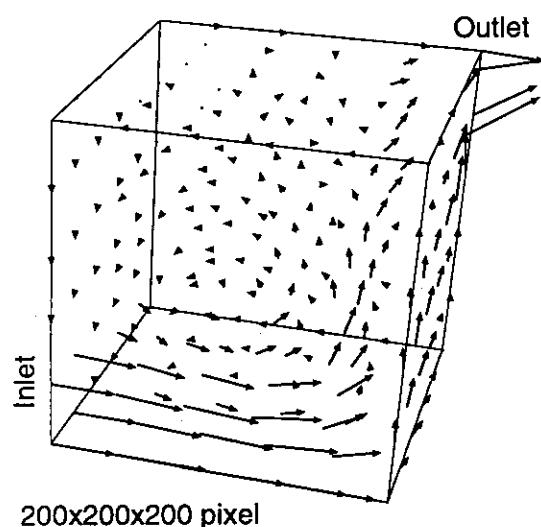


Figure 10: Reference three-dimensional flow

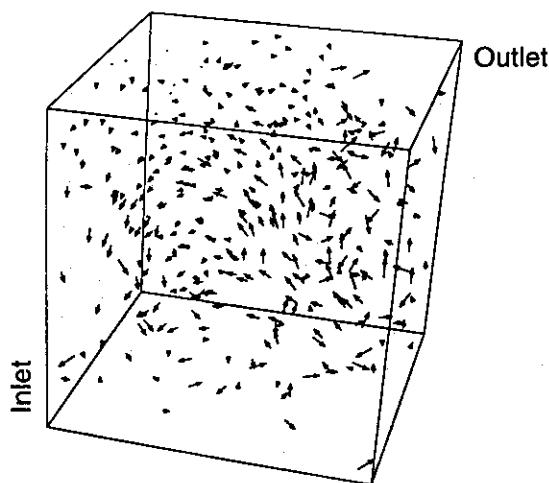


Figure 11: Three-dimensional velocity distributions reconstructed by Cross correlation [5]

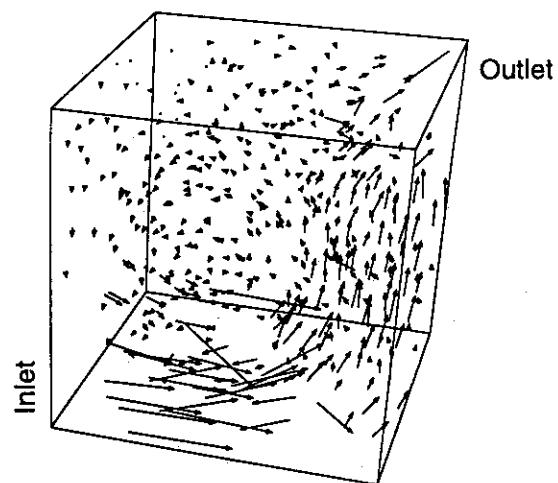


Figure 12: Three-dimensional velocity distributions reconstructed by Spring model

### 3 遺伝アルゴリズムを応用した干渉画像解析（3次元流速分布計測手法）[7]

#### 3.1 はじめに

過渡的な3次元空間密度分布は、マッハツエンダー干渉計から得られる干渉画像によって測定できる。屈折率の異なる流体中を光が進む時、その流体の量に応じて光路差が生ずる。この光路差が干渉縞として記録される。マッハツエンダー干渉計を用い、干渉画像をトモグラフィの手法により解析する事によって、3次元密度分布を計測する。

干渉画像中の縞の移動量から密度分布を再構築するためには、トモグラフィー技術が用いられる。

**トモグラフィー** 図13に示すように、密度分布は  $g(x, y)$  で示される。 $g$  は二次元であるが、層状に積み上げることにより三次元に拡張できる。干渉画像中では、干渉縞は密度分布を光路にそって積分した値に比例して移動する。

$$p(R, \theta) = k \int \int_{-\infty}^{\infty} g(x, y) \delta(x \cos \theta + y \sin \theta - R) dx dy, \quad (4)$$

但し、 $p(R, \theta)$  は干渉画像中の縞移動量（以下、これをプロジェクションデータと呼ぶ）、 $k$  は定数、 $\delta$  はデルタ関数である。トモグラフィーの目的は、投影データ  $p(R, \theta)$  から密度分布  $g(x, y)$  を再構築することである。

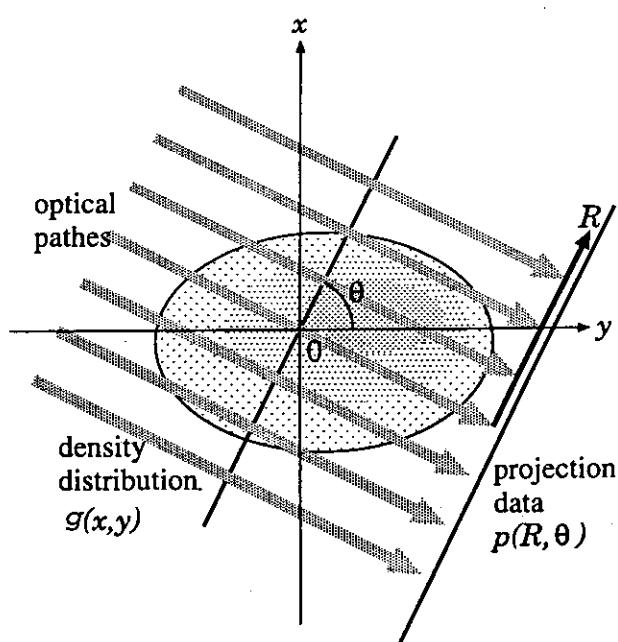


Figure 13: Configuration for optical tomography

この再構築を行なうために、幾何的再構築法（ART）、フーリエ変換を利用する方法など様々な手法が開発されている[9]。ARTは、投影データのアレイ  $p_k$  から密度分布のマトリックス  $g_{ij}$  を算出する単純な繰り返し手法である。ART法は単純であるが、精度はあまり良くない。フーリエ変換を利用する手法は、フーリエ空間を利用することによって収束計算を行なうことなしに密度分布再構築を行なう手法である。高精度の結果が得られるが、フーリエ空間をうめるために、多くの干渉画像を必要とする。

密度分布は三次元であるのに対して、干渉画像は二次元である。従来の手法では、数多くの干渉画像を使うことによりこの情報量の不足を補償していた。そのため、密度分布の測定値の精度を向上させるためには、数多くの角度から取得した干渉画像が必要となる。少数の干渉画像から高精度の結果を算出できる手法はない。一般に気体流は非定常であるため、一回の実験で多くの画像を取得するのは困難である。そのため従来のトモグラフィー手法では、密度差流の密度分布を高精度で測定することはできない。

本研究では、少数の干渉画像を用いた場合の精度を向上させるため、新しいトモグラフィー手法を提案する。本手法においては、情報量の不足は流れ場の情報で補うものとする。

### 3.2 手法

少数の二次元干渉画像から三次元密度分布を構築しようとする場合、従来のトモグラフィー手法では、情報量の不足を補うことができない。本手法においては、この情報量の不足は流れ場の情報で補うこととした。本研究では、以下の2つの仮定を導入した。

- (a) 流れは拡散過程支配であると仮定する。つまり、その他の効果（対流の影響、等）は無視し得るものと仮定する。
- (b) 密度分布は、素密度分布の和で表されるものとする。

以上の仮定によって、トモグラフィーは素密度分布の組合せの最適化問題に帰着する。最適化手法として遺伝アルゴリズム（GA）[10, 11]を導入した。

#### 3.2.1 密度分布表現

図14に示すように、仮定(B)より、密度分布  $g(x, y)$  は素密度分布  $g_i^*(x, y)$  の和で表現される。

$$g^*(x, y) = \sum_i g_i^*(x, y) \quad (5)$$

但し、 $g^*(x, y)$  は算出された密度分布である。

式(4)より、素密度分布  $g_i^*(x, y)$  から、投影データ  $p^*(R, \theta)$  が計算できる。

$$p^*(R, \theta_j) = k \int \int_{-\infty}^{\infty} \sum_i g_i^*(x, y) \delta(x \cos \theta + y \sin \theta - R) dx dy \quad (6)$$

算出された投影データ  $p^*(R, \theta_j)$  が測定値  $p(R, \theta_j)$  に等しければ、想定した密度分布  $g^*(x, y)$  が正しい値であるとみなす。これにより、素密度分布の組合せの最適化によって、密度分布を再構築することができる。

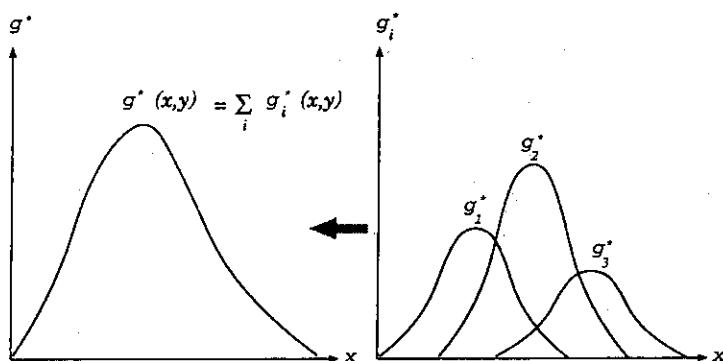


Figure 14: Concept of the assumed density distribution

### 3.2.2 素密度分布

仮定(a)より、素密度分布  $g_i^*(x, y)$  は、拡散過程を表す関数  $f(r, t)$  から算出できる。拡散の計算は軸対象条件下で行なった。

$$\frac{df(r, t)}{dt} = D\nabla^2 f(r, t) + S(r), \quad (7)$$

初期条件及び境界条件を以下に示す。

$$f(r, 0) = \begin{cases} 1 & (r \leq r_{\text{source}}) \\ 0 & (\text{otherwise}) \end{cases}, \quad (8)$$

$$f(\infty, t) = 0, \quad (9)$$

但し、 $r_{\text{source}}$  はソース半径を表す。D は拡散係数である。ソースターム  $S(r)$  は以下のように表される。

$$S(r) = \begin{cases} \text{constant} & (r \leq r_{\text{source}}) \\ 0 & (\text{otherwise}) \end{cases} \quad (10)$$

関数  $f(r, t)$  は式(7)を解くことにより算出される。関数  $f(r, t)$  の概型を図 15に示す。

本研究において、素密度分布  $g_i^*(x, y)$  は、ソース位置  $(x_i, y_i)$  と関数  $f(r, t)$  を用いて、以下のように表される。

$$g_i^*(x, y) = \alpha_i f(\sqrt{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2}, t_i), \quad (11)$$

但し、 $\alpha_i$  は大きさを表す因子、 $t_i$  は時間で、図 15に示すように、勾配の陥しさを表す因子であるとみなす。 $\alpha_i$  と  $t_i$  とを決定することにより、素密度分布  $g_i^*(x, y)$  を計算することができる。

二次元の密度分布場を素密度分布で埋め尽くすために、図 16に示すようにソース位置の配置は6角形状なものとした。

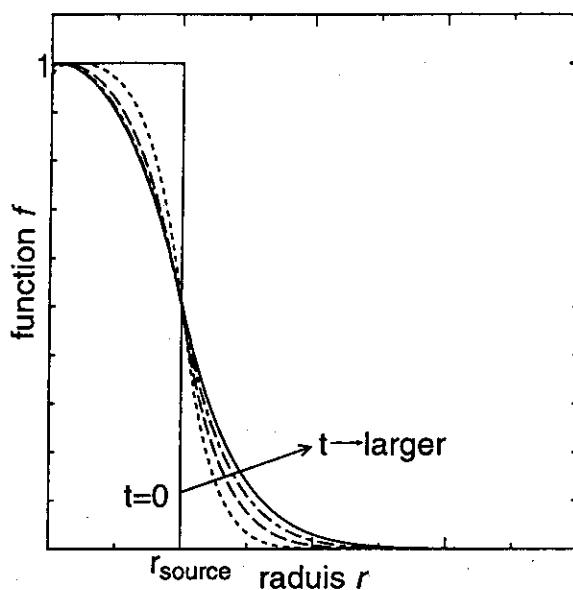


Figure 15: The functions of diffusion process

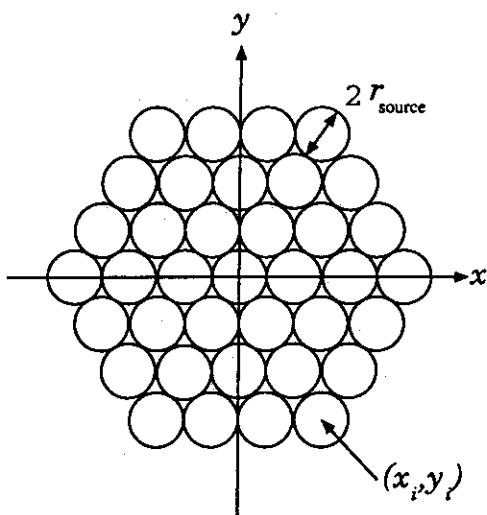


Figure 16: The source locations

### 3.2.3 GA による最適化

GA を用いて、素密度分布の組合せを最適化する。[10, 11]。GA は自然界の生存競争や生物の進化の模擬した探索手続きである。GA を用いて最適化問題を解くためには、その問題に必要なパラメータの集合を有限な長さの染色体にコード化する必要がある。

単純な GA では全体の処理は、選択、交差、突然変移、の 3 つの手続きから成る。

本研究では、密度分布  $g^*(x, y)$  が個体に対応している。染色体は密度分布  $g^*(x, y)$  を表現するのに必要なパラメーター全てを含んでいる。密度分布  $g^*(x, y)$  は、素密度分布の組合せで表現される。式 (5), (11) より密度分布  $g^*(x, y)$  は以下のように表される。

$$g^*(x, y) = \sum_i \alpha_i f(\sqrt{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2}, t_i) \quad (12)$$

よって、素密度分布の因子のを集めたもの、つまり  $(\alpha_1, t_1, \alpha_2, t_2, \dots, \alpha_n, t_n)$  を染色体とした。

GA を用いた最適化は以下のように実行される。最適化の初期に、いくつかの個体がランダムに生成される。選択手続きにおいてはまず、個体の良さを表現する値である適応値  $F$  を、測定された投影データとの偏差として定義する。

$$F = \sum_j \int_{-\infty}^{\infty} |p(R, \theta_j) - p^*(R, \theta_j)|^2 dR \quad (13)$$

適応値  $F$  が小さな値をとるような個体は、良い個体であるとみなし、適応値  $F$  が大きな値をとるような個体は、悪い個体であるとみなす。各世代において、相対的に良い個体は次世代にも引き続いて生き残り、相対的に悪い個体は抹消される。

交差においてはまず、いくつかの個体を選びだし、ペアを作る。ペアは各々、2 つの子を生成する。子の染色体は親の染色体を組み合わせて作る。本研究においては、ソース位置が 2 次元的なので、2 次元交差を導入した。両親の染色体は 2 次元的に 2 つの部分に分割される。子の染色体は、片方の親の 1 つの部分と、別の親のもう片方の部分から生成される。例えば、密度分布場  $(x, y)$  が直線  $l : ax + by + c = 0$  によって 2 つの領域、領域 A :  $ax + by + c > 0$ 、領域 B :  $ax + by + c \leq 0$  に分けられるものとする。親  $I_1$  は、ソース位置がそれぞれ領域 A と領域 B であるような、素密度分布の集合  $I_{1A}$  と  $I_{1B}$  とに分けられる。親  $I_2$  も同様に、 $I_{2A}$  と  $I_{2B}$  とに分けられる。子はそれぞれ、一つは  $I_{1A}$  と  $I_{2B}$  からもう一つは  $I_{2A}$  と  $I_{1B}$  から生成される。

突然変移においては、いくつかの個体がランダムに突然変移する。

各世代毎に、選択、交差、突然変移という 3 つの手続きが繰り返され、最終的に最適化された密度分布が output される。この最適化された密度分布をもって、再構築された密度分布であるとみなす。

### 3.3 検証

本手法の検証を行なうため、シミュレートされた投影データから、2 次元的な密度分布を再構築した。

#### 3.3.1 8 方向からの投影データによる検証

拡散方程式から参照密度分布を算出する。参照密度分布を、図 17(a) にセンター図で示す。参照密度分布から、0, 22.5, 45, 67.5, 90, 112.5, 135, 157.5 度といった 8 方向からの投影データを算出する。

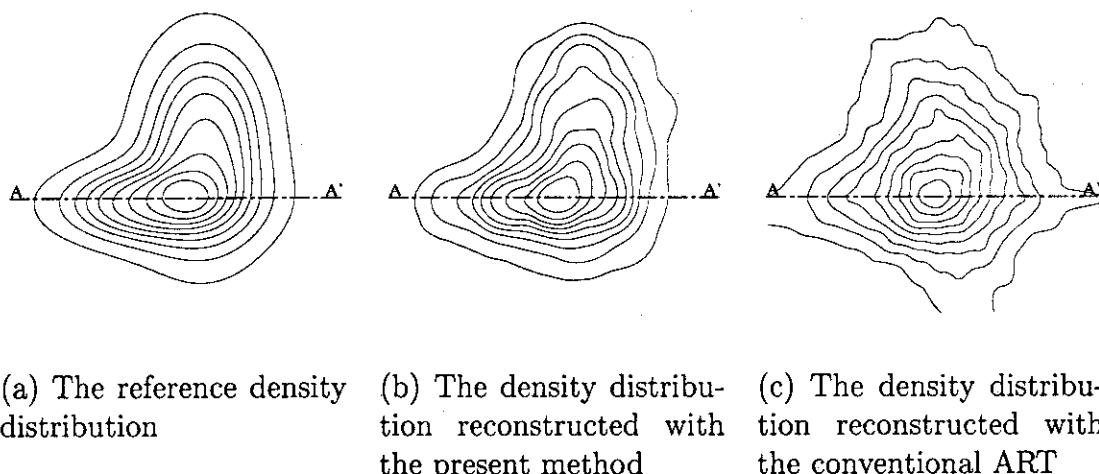


Figure 17: The contour plot of the density distributions

本手法と従来の ART 法とを用いて、この投影データから密度分布を再構築する。本手法と ART 法とを用いて再構築された密度分布を各々、図 17(b) と (c) に示す。図 17(c) に示す ART 法によって再構築された密度分布では、細部や急勾配が鈍化している。図 17(b) に示す本手法によって再構築された密度分布では、再構築が良好に行なわれている。直線 A-A' 上の各密度分布を図 18 に示す。本手法によって再構築された密度分布は、ART 法によって再構築されたものよりも参照密度分布に近いものとなっている。

各手法によって再構築された密度分布の精度を定量的に評価するため、誤差  $E$  を次のように定義する。

$$E = \frac{\iint_{-\infty}^{\infty} |g_{\text{ref}}(x, y) - g^*(x, y)| dx dy}{\iint_{-\infty}^{\infty} g_{\text{ref}}(x, y) dx dy} \quad (14)$$

但し、 $g_{\text{ref}}(x, y)$  は参照密度分布とする。表 2 に各手法を用いた場合の誤差を示す。これより、本手法によってトモグラフィーの精度が改善されていることが分かる。

### 3.3.2 適応度推移

図 19 に適応度の推移（各世代の最良の個体の適応度）を示す。GA による最適化は 1000 世代で行なわれた。適応度の下がり方は徐々に鈍化していき、400 世代付近以降は停滞している。この停滞は、最適化の精度限界を表している。

### 3.3.3 ランダムサーチ法との比較

GA による素密度分布の組合せの最適化能力を調べるために、最適化処理をランダムサーチ法に置き代えて計算を試みた。

本手法の最適化処理においては、ランダムサーチ法は以下のように実行される。最適化の初期において、いくつかの密度分布がランダムに生成される。各密度分布は、

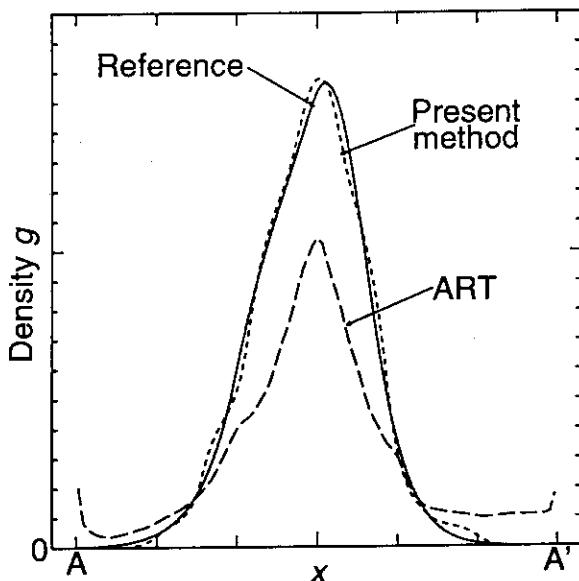


Figure 18: The density distributions along the line A-A'

測定された投影データにどれだけあっているかを評価される。よりあっていない密度分布は消去される。すでにある密度分布をランダムに修正することにより、新しい密度分布をいくつか生成する。以上の処理を繰り返すことにより、最適化された密度分布が得られる。ランダムサーチ法による最適化処理は、GA から交差手続きを取り去ったものとよく似ている。

表 2 に示すように、ランダムサーチ法による誤差は 0.19 であった。GA はランダムサーチ法よりも有効であった。

### 3.3.4 素密度分布数

本手法を用いて、より高精度の結果を得るためにには、GA 関連のパラメーターを適切に定めることが重要である。

素密度分布の数  $n_{\text{elem}}$  は、もっとも重要なパラメータの一つである。表 3 に、 $n_{\text{elem}}$  を何通りかに変えた時のそれぞれの誤差を示す。37 の素密度分布を用いて最適化を行なった場合が、最も有効であった。誤差と  $n_{\text{elem}}$  との関係は、情報量の補償の相違によるものと考えられる。情報量の不足は、素密度分布を用いることにより、流れ場の情報から補償される。 $n_{\text{elem}}$  が多過ぎた場合、素密度分布の大きさが小さくなり過ぎ、流れ場の情報を供給できなくなる。反対に、素密度分布があまりに少数の場合、密度分布を完全に表すことができなくなる。

### 3.3.5 3 方向の投影データによる検証

より少数の方向からの投影データからの再構築の精度を調べるため、0, 60, 120 度という 3 方向からの投影データから密度分布を再構築した。本手法と従来の ART 法を

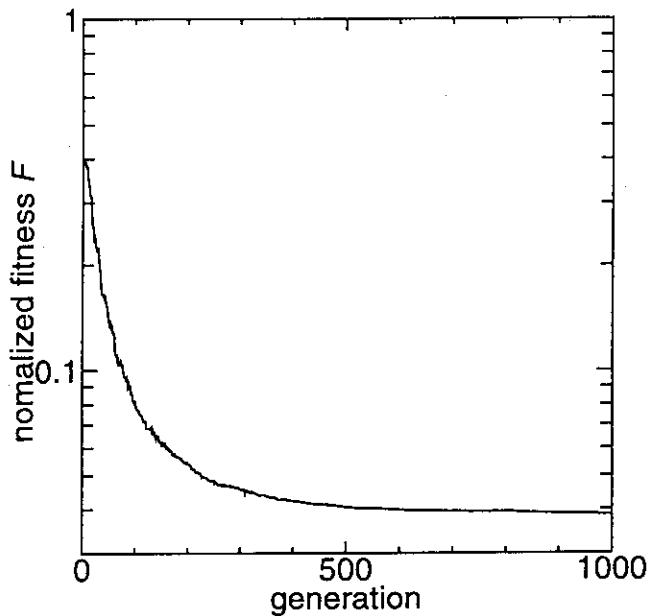


Figure 19: The transition of the fitness value of the best individual

Table 2: The errors of the reconstructions with eight angles

method	error $E$
present method	0.11
ART	0.65
random search	0.19

用いて再構築された密度分布を各々図 20(a) と (b) に示す。直線 A-A' 上の密度分布を 図 20(c) に示す。本手法を用いた場合、密度分布は良好に再構築されている。表 4 に各手法による誤差を示す。これによると、本手法では、少数の方向からの投影データを用いた場合でも、精度良く再構築がなされていることが分かる。しかしながら、3 方向からの投影データによる再構築の誤差は、8 方向の場合よりも大きな値となっている。3 方向の場合の精度をより向上させるためには、手法の改善が必要である。

### 3.4 まとめ

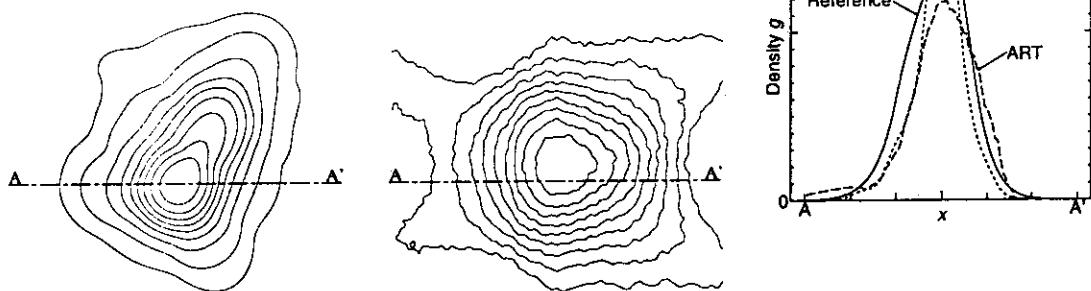
新しいトモグラフィー手法を提案した。本手法においては、密度分布は素密度分布の和として表される。素密度分布の組合せの最適化手法として、遺伝アルゴリズムを用いた。少数の干渉画像から、本手法を用いて高精度の密度分布を再構築した。

Table 3: The relationship between the number of the elementary density distributions and the errors

$n_{\text{elem}}$	error $E$
7	0.34
19	0.13
37	0.11
61	0.19
91	0.21

Table 4: The errors of the reconstructions with three angles

method	error $E$
present method	0.29
ART	0.59



(a) The density distribution reconstructed with the present method

(b) The density distribution reconstructed with the conventional ART

(c) The density distributions along the line A-A'

Figure 20: The density distributions reconstructed with three angles

## 4 結言

本稿では、可視化画像処理による3次元流速分布計測手法、ならびに3次元密度分布計測手法に対する、最近の新しい手法に関して紹介を行った。コンピュータの進歩に伴い、ますます高密度、高精度な計測手法が開発されていくと期待されている。

## 参考文献

- [1] 高木幹雄、小林敏雄、「流れの可視化と画像処理」計測と制御、Vol.21, No.10, (1982) pp.967-975.
- [2] 小林敏雄、佐賀徹雄、「流れをとらえる—可視化と画像処理技術」画像ラボ、Vol.2, No.4-7, (1991)
- [3] Okamoto, K., Hassan Y.A. and Schmidl, W.D., "New Tracking Algorithm for Particle Image Velocimetry," *Experiment in Fluids*, Vol.19, No.5, (1995) pp.342.
- [4] Tang, Y. Y. and Suen, C. Y., "New Algorithms for Fixed and Elastic Geometric Transformation Models," *IEEE, Trans. Image Processing*, 3-4, (1994), 355.
- [5] Hassan Y. A., Blanchat, T. K., Seeley Jr., C. H. and Canaan, R. E., "Simultaneous velocity measurements of both components of a two-phase flow using particle image velocimetry," *Int. J. Multiphase Flow*, 18-3, (1992), 371.
- [6] Hassan Y. A., Seeley Jr., C. H., Henderson J. H. and Schmidl W. D., "Particle Image Velocimetry in 3D," *Proc. Int. Conf. on New Trends in Nuclear System Thermohydraulics*, (1994), 39-48.
- [7] Tsuru, D., Okamoto, K., Madarame, H. and Fumizawa, M., "Measurement of Density Distribution Using Optical Tomography with Genetic Algorithm," *FLUCOME '94*, (1994) pp.971-976.
- [8] W. Merzkirch : Flow Visualization (2nd Ed). Academic Press, London (1987) pp. 193-198.
- [9] L. Hessellink : Handbook of Flow Visualization, (1989) pp.307-329.
- [10] J.H.Holland : adaptation in natural and artificial systems, 1975.
- [11] D.E.Goldberg : Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning, 1989.

## 8. ROSA-V/LSTF グラフィック表示システム

近藤 昌也 (原研・熱水力)

冷却材喪失事故 (LOCA) は原子炉の想定事故の一つで、配管の破損などにより原子炉内の冷却水が大量に流出する事態である。原研では ROSA-V/LSTF 装置を用いて非常用炉心冷却系 (ECCS) が故障した場合を含め、LOCA 時の現象を実機圧力・実時間で模擬した実験を行っている。装置には 2400 点に及ぶ計測系が設置されているが、装置内の現象は原子炉を模擬した各機器間の流動が複雑に絡み合ったものとなるため、データの解読には経験と多大な時間を要する。そこで、実験中に装置内の冷却水分布及び流動を実時間でグラフィック表示するためのシステムを作成した。本システムにより実験実施中に現象の推移を的確に把握することが可能になり、運転操作のための判断や実験結果の解釈、国際協力における意志疎通などに大いに役立っている。

## Graphic Display System for ROSA-V Large Scale Test Facility

Masaya Kondo (JAERI)

A loss-of-coolant accident (LOCA) is a postulated accident in a light water reactor (LWR) in which the reactor coolant is lost through a pipe break. Experimental simulation of LOCA situations has been conducted using the ROSA-V Large Scale Test Facility (LSTF). This facility is equipped with detailed measurements, over 2400 channels in total, of thermal-hydraulic variables. Because the simulated phenomena involved complicated thermal-hydraulic interactions among many components, the interpretation of data has been requiring considerable time of experienced engineers. A graphic display system was therefore built recently to visualize the water distribution, temperature distribution, flow, etc. in the facility real time with the aid of a workstation. The graphic images can be produced also from recorded data. This system has greatly helped engineers make timely decisions during experiments, understand complicated transient phenomena, and communicate with foreign partners.

Keywords (LOCA, LWR, ROSA-V Large Scale Test Facility, Graphic Display System, Thermal Hydraulic Data, Reactor Safety)

## ROSA-V/LSTF グラフィック表示システム

近藤 昌也 (原研・熱水力安全)

## 1. はじめに

日本原子力研究所（原研）では、加圧水型軽水炉（PWR）における冷却材喪失事故（LOCA）をはじめとする各種事故時の熱水力現象に関する実験を ROSA-V/LSTF 装置<sup>(1)</sup>を用いて行っている。

原子炉において、万一配管の破断が生じたり、弁が開いたままになったりする事故が生じると、原子炉は自動停止する。しかし、その後も崩壊熱により炉心は発熱し続けるため、炉心の損傷を防ぐためには適切な冷却を維持することが必要である。そのためには炉心全体が水ないし水／蒸気の混合物（二相流）で覆われていることが最低限必要とされ、軽水炉には事故時に冷却水を補給し、炉心の冷却を維持するための非常用炉心冷却系（ECCS）が設けられている。現在 LSTF では（大変発生しにくい状況ではあるが）ECCS 等に重大な故障が生じ、炉心損傷を防ぐためには運転員による緊急操作（アクシデントマネージメント）が必要となるような事態を模擬する実験を行っている。これは、このような対策の整備に関する関心が高まっていることを背景としている。

このように重大な事故が発生すると原子炉 1 次系内の冷却水の量は時間と共に減少し、その結果水位が低下する。そして、1 次系の上方は減圧による沸騰ないしは炉心での加熱による沸騰で生じた蒸気によって満たされるようになる。しかし、事故の条件（例えば、配管破断の発生位置）によっては冷却水の一部が 1 次系の上方に滞留したままで炉心の冷却に有効に寄与しない状態に至ったり、運転員の操作によって 1 次系内の冷却水の分布が大きく変化することもある。従って、これらの現象を模擬した実験においては、原子炉 1 次系に相当する部分における冷却水の残存量だけでなく、その分布や温度分布等が大きな関心の対象となる。しかしながら、実験は実機と同一の圧力、温度条件（最高 17 MPa、620 K）において行われるため、装置内全体の状態を直接観察することは不可能であり、圧力、差圧、温度、密度等の測定値によってこれらを知ることになる。こうしたことから LSTF には 2400 点以上の測定点が設けられているが、実験中にそのすべてを参照することは不可能なため、ごく限られた数の測定値から装置の状態を判断し、実験上の種々の判断を行う必要があった。さらに、実験後の解析においても、これら多数の測定値から時々刻々変化する現象を理解するためには経験と時間を要した。

そこで、多数の測定値から水位等を算出し、計算結果をグラフィック表示などのわかりやすい形態で実時間表示するシステムを作成した。本システムは LSTF 実験時における実験担当者の LSTF の状態把握に関わる労力を軽減することを目的とし、LSTF 全体の状態の実時間での把握に必要な表示、測定値の経時変化の把握に必要な表示、測定位置と測定値の把握に必要な表示を行う。また、実験状況を実験後の必要なときに再現できるよう、実験中に測定値を収録し、それに基づいて再生表示する機能を有するものとした。

## 2. 実験装置及びシステム構成

ROSA-V/LSTF (Rig of Safety Assessment-V / Large Scale Test Facility) の体積は、Westinghouse 社型 110 万 kW 級加圧水型原子炉 (PWR) の 48 分の 1 となるよう、また、各機器の高さや配置は自然循環状態における冷却材流量を正しく模擬できるようほぼ同一の寸法で設計されている。ただし、蒸気発生器を含む

1次系循環ループは実機が4ループあるのに対して2ループである。炉心は1008本の電気加熱式模擬燃料棒で構成されており、最高熱出力は10MWである。LSTFの運転圧力及び炉心出口温度は実炉と同一であり、定常状態の模擬時においてそれぞれ15.7MPa、598Kである。

LSTFには熱電対（流体温度測定用約810点、壁温測定用約500点、温度差測定用約230点）、触針式水位計（約200点）、差圧計（約170点）、流量計（約100点）、圧力計（約60点）を中心におよそ2400点にのぼる測定器が設置されている。既設の収録系では、これらの測定値はYEWCOM-7000及びFACOM-S3300に一旦収録後、大型計算機（FACOM M780）に転送されて処理される。

ROSA-V/LSTFグラフィック表示システムは、ワークステーション、A/D変換器、熱電対用アンプから成るハードウェアと、ワークステーション上で動作するソフトウェアから構成される。このうち、ワークステーションはその働きから、サーバー(I)<sup>②</sup>、(II)及びクライアントの3種類に大別される。

ハードウェアの接続図及びデータの流れをFig.2.1に示す。本システムでは、LSTFの2400点あまりの測定点のうち、実験時に把握する必要性の高い800点をA/D変換器（システムデザインサービス（株）製）を介してサーバー(I)のワークステーション（IBM Power Station RS/6000 model 560）に取り込む。このワークステーションでは、A/D変換器を制御して測定値を取り込むと共に、その電圧値から物理量への変換、バルブ制御信号の発信（D/A変換器の制御）、サーバー(II)への測定値の転送、測定値の収録及び画面表示を行う。サーバー(I)に取り込まれた測定値はサーバー(II)のワークステーション（IBM Power Station RS/6000 model 560）へと転送され、さらに他のクライアントのワークステーション（IBM, Sun, HP等）へと再転送される。これら測定値の転送によって生じる時間遅れはほとんどないため、全てのワークステーションにおいて最新の測定値に基づいた表示を行うことが可能である。サーバー(II)はサーバー(I)から転送された測定値をクライアントのワークステーションに再転送することに加え、クライアントと同様に測定値の収録及び画面表示を行う。なお、ワークステーション間の測定値の転送は全てNFS（Network File System）を用いて、サンプリング1回分の測定値（約4KByte）を共有することによって行う。

本システムの構成にあたっては、特定のワークステーションに負荷が集中しないこと、既存のワークステーションをクライアントとして活用することの2点を特に考慮した。このため、Xターミナル等は採用せず、個々のワークステーションにおいて、それぞれ機種に依存しないプログラムを走らすものとした。よって、X-windowをサポートした環境であり、かつ、イーサネットを経由してネットワークに接続されているワークステーションならば、比較的簡単な設定（コンパイル及びX-windowのカラー定義等が必要）だけでクライアントとして使用することができるが、これによってサーバー等の他のワークステーションに新たな負荷がかかることはない。この結果、グラフィックを多用した重いアプリケーションであるにも関わらず、多くのワークステーションを、その機種に関わらずクライアントとして使用可能である。

### 3. 表示内容と機能

#### 3.1 表示機能

ROSA-V/LSTFグラフィック表示システムの表示機能について、その最も代表的な3つの表示機能の概要及び導入の背景を以下に記す。

##### 3.1.1 冷却水分布表示機能

冷却材喪失事故の模擬実験時に冷却水の残存量、分布及びサブクール度を的確に把握することは、

模擬炉心の冷却を確保する運転操作を進める上で極めて重要である。しかしながら、1) LSTF は多くの機器から成った複雑な形状をしており、全体の状況を把握するには多数の測定値を参照する必要があること、2) 差圧計（タンク、垂直配管等の水位の測定に使用）及びガンマ線密度計（水平配管の水位の測定に使用）から水位を算出するには、その状態における水／蒸気の密度（圧力、温度によって変化する）及び測定区間の長さを把握しておく必要があること、3) サブクール度を算出するには飽和温度（圧力によって変化する）を把握しておく必要があること等の理由により、実験中に冷却水の分布及びそのサブクール度を把握するために必要とされる労力は少なくない。

そこで、主要な測定器の測定値から水位及びサブクール度を計算し、それらを実時間でグラフィック表示する機能を作成した (Fig. 3.1)。本機能では、LSTF 全体の冷却水の状態を視覚的に把握するという観点から、水位並びに温度の具体的な値の表示は行わない。その代わり、LSTF の概念図を冷却水の占める割合に従って青系統の色で塗りつぶすことにより、LSTF 内部の冷却水残存量及び分布を表示する。また、塗りつぶしに用いる青色の濃淡を変えることにより、冷却水のサブクール度を同時に示す（色が濃いほどサブクール度が大きい、8 階調）。さらに、実験中にモニターする必要の高い物理量である 1 次系（加圧器）圧力、2 次系圧力及び破断からの経過時間を同一画面中に表示する。

ただし、本機能には以下のようないくつかの制約がある。まず、表示される水位は差圧測定値、ないしは鉛直方向のガンマ線の減衰率から算出した水位であるため、すべてコラプスト水位（冷却水中の気泡の体積をゼロとした水位）である。これは冷却水の残存量を把握するには便利であるが、炉心周りなどの冷却水が気泡を含む可能性がある部分については、混合水面が気泡体積分だけ持ち上がっていることを認識しておく必要がある。また、水平配管であるホットレグとコールドレグとは同じ高さに位置するが、本機能では表示の都合上ホットレグを上側に、コールドレグを下側に表示することとした。さらに、機器の大きさ並びに高さ関係には注意を払ったが、蒸気発生器、水平配管（直径）等、著しく他の機器と大きさが異なるものに関しては視認性を優先させた大きさとした。

### 3.1.2 経時変化表示機能

測定値の経時変化は、現在の状況がどのように推移しつつあるのかを把握する点で重要である。例えば、非常用炉心冷却系 (ECCS) はその種類によって注入開始する圧力が異なるため、1 次系圧力の経時変化は ECCS の作動タイミング等を予測する上で役立つ。また、冠水状態にある炉心の燃料棒表面温度は飽和温度を示すが、その温度が飽和温度から急上昇することで、炉心の露出を確認することができる。このように経時変化に着目することで明確に把握できる現象は少なくないが、経時変化を記録／表示する代表的な装置であるペンレコーダーでは、時間及び物理量の表示範囲（表示スケール）を記録後に任意に変えることは不可能であり、必ずしも最適な表示スケールで表示するわけではない。加えて、ペンレコーダーに記録できるチャンネル数はあまり多くないため、予定外に監視する必要のある測定値が生じた場合などに柔軟に対応できるとは限らない。

そこで、ワークステーションに多数の測定値を取り込み、その中から任意の測定値の経時変化を任意の表示スケールで表示する機能を作成した (Fig. 3.2)。本機能では最大で 8 種類の測定値（ただし、縦軸の表示上の都合から、物理量は 2 種類までに制限）の履歴を同一ウィンドウに表示することが可能であり、それぞれの測定値は色によって区別される。また、多数の測定値の経時変化を関連するグループ毎に表示できるよう、このような経時変化のウィンドウを最大 8 つまで有することができる。それぞれのウィンドウは完全に独立して機能すると共に、ディスプレーの物理的な表示面積が許す限り、その各々及び冷却水分布表示機能とも同時に表示することが可能である。

表示スケールに関しては、標準的な値がデフォルトで設定されているが、記録中及び記録後に任意に設定することも可能である。設定方法としては 1) 表示範囲の上限値と下限値を具体的にキーボードから入力する方法、2) 現在の表示範囲を決まった量だけ拡大、縮小、シフトする方法の 2 通りを用意した。

1) に関しては Macintosh 等のソフトウェアで広く使われている方法、すなわち、変更したい表示スケールの軸をマウスにて指定し、入力ウィンドウを呼び出すという操作方法を探った (Fig. 3.2)。2) に関しては、表示範囲を現在の 2 倍及び 1/2 倍の範囲への変更、表示範囲の 1/4 だけ表示範囲を前後にシフトすることが 1 つのマウス操作ができるようにした。例えば、最初の表示範囲が 0 - 3600 s の場合、「2 倍」を選択すると表示範囲は -1800 - 5400 s (表示範囲の中心である 1800 s が保持される) となり、「1/4 ずらす」を選択するならば表示範囲は -900 - 2700 s あるいは 900 - 4500 s となる (3600 s の 1/4 である 900 s だけシフトする)。物理量が 2 種類ある場合の縦軸に関してはそれぞれ独立して指定可能であるが、横軸、すなわち時間軸に関しては物理量の種類に関わらず全てが連動する。また、実時間表示中に時刻が本機能の表示範囲外に至った場合 (例えば 0 - 3600 s の表示範囲で、3600 秒より大きな時刻に至った場合)、自動的に表示範囲がシフトし、常に最新のデータトレンドを表示するようにした。

本機能を用いるにあたり最初に 800 点にものぼる測定器の中から経時変化を表示する測定器を選択しなければならないという問題がある。この問題に対し、本機能では LSTF を構成する各機器毎にそこに設置されている測定器のリストを作成し、測定器の選択の母集団を小さくすることを図った。この測定器リストは冷却水分布表示機能の表示画面上で関心のある部位をマウスで指定することにより呼び出す。例えば、加圧器圧力の傾向に关心があるならば、冷却水分布表示機能の表示画面上で加圧器をマウスにて選ぶと、加圧器に設置されている測定器の一覧がアルファベット順にソートされて表示される (Fig. 3.3)。表示される測定器の数は最大でも数十程度となり、測定位置に関する簡潔な情報及びその時点での測定値が付随して表示されるため、選択にかかる労力が大幅に軽減された。

### 3.1.3 測定値表示機能

冷却水分布表示機能は LSTF 全体の様子を巨視的に捉える機能であるが、状況によっては局所的な分布に着目したい場合や具体的な測定値を知りたい場合がある。このような場合、測定値を直接モニターすることが望ましいが、測定点 (測定範囲) の位置関係を調べる必要があるなど、時間を要することが多い。

そこで、任意の箇所の測定値をその測定点と共に得ることを目的として測定値表示機能を作成した。本機能では、加圧器、圧力容器、蒸気発生器等の主要機器毎にその概念図を用意し、その機器に設置してある測定器の測定点と測定値を図示する (Fig. 3.4)。表示される測定値は冷却水分布表示機能と同様に実時間で更新される。また、蒸気発生器、圧力容器など測定器の数が多数にのぼる機器においては、熱電対、差圧計といった測定器の種類別にそれぞれ表示画面を用意し、切り替えて表示することにより視認性の向上を図った。なお、本機能も経時変化表示機能と同様、冷却水分布表示機能の表示画面上で関心のある機器をマウスで指定することによって呼び出す。

## 3.2 収録／再生機能

ROSA-V/LSTF グラフィック表示システムによる LSTF の状態の表示は、実験時のみならず、実験後に実験を概観する場合にも有用である。そのため、本システムでは、実験時に測定値をワークステーションのハードディスク内に収録し、実験後の必要な時に再生することによりディスプレー上に実験時の様子を再現できるようにした。測定値の収録周期は画面表示の更新の周期より遅く設定可能とし、収録ファイルが不必要に大きくならないように工夫した。また、任意の時間内に実験の全てを表示できるよう再生時には収

録データの読み飛ばしにより、数時間以上にも及ぶ実験を短時間で表示可能とした（標準速～99倍速で再生可能）。

#### 4. まとめ

ROSA-V/LSTF グラフィック表示システムを作成した結果、次のような効果がみられた。

##### 冷却水分布表示機能

これまで多くの測定値を参照しながら計算しなければ把握できなかった LSTF 全体の冷却水の状態が視覚的に認識できるようになった。それゆえ、過渡変化が急な場合においても実験中に装置内の冷却水の挙動を常に把握することが可能となった。加えて、実験参加者が LSTF の状態について共通の認識を持つ助けとなった。

##### 経時変化表示機能

測定値の変動が予想よりも微小であったり、予想を超えた大きさであったとしても、その傾向が最も明瞭にあらわれる表示範囲に変更することができるため現象の把握に役立った。とりわけ、時間軸を自由に変更できることから、瞬間に生じた現象の確認、長時間の緩やかな変動の確認等に有効であった。また、多くの測定器から任意の測定器を選び出すことから、実験中にモニターする予定のなかつた測定値の傾向に関心が生じた場合などにも柔軟に対応できた。

##### 測定値表示機能

例えば加圧器下部の温度をモニターするといった必要に対し、測定器の識別番号を全く意識することなく測定位置と測定値をモニターすることができるようになった。また、その機器に取り付けられている測定器の測定値全部を同時に表示するため、温度分布等の局所的な分布のモニターに有用であった。とりわけ、炉心補給水タンク (CMT) 及び燃料取替用水タンク (IRWST) の温度成層現象の把握に役立った。

#### 5. おわりに

本ソフトウェアは、アイ・ティ・ジェイ（株）の笠原氏、野口氏並びに（株）日本総合研究所の國枝氏、佐藤氏によってプログラムされた。また、デバック及び表示データの検証に協力されたアイ・ティ・ジェイ（株）の島根氏、原研安全試験技術室の大崎氏、小川氏、錦沢氏、住友重機械工業（株）の斎藤氏に感謝します。

#### 参考文献

- 1、The ROSA-IV Group, ROSA-IV Large Scale Test Facility (LSTF) System Description for Second Simulated Fuel Assembly, JAERI-M 90-176, Oct. 1990.
- 2、近藤ら, ROSA-V/LSTF グラフィック表示システム, JAERI-M 93-221, Nov. 1993.

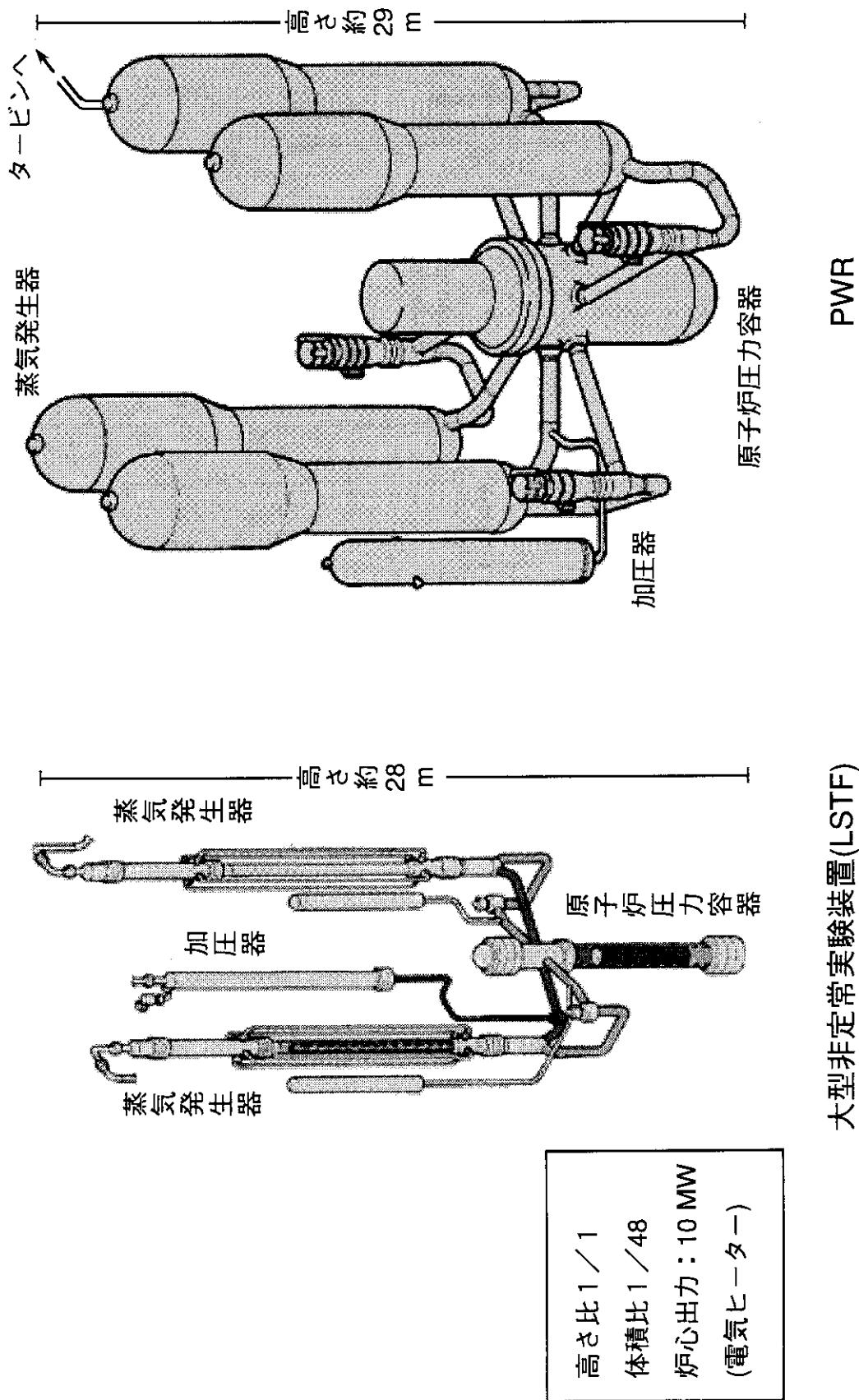


Fig. 1.1 LSTF 概念図

大型非定常実験装置(LSTF)

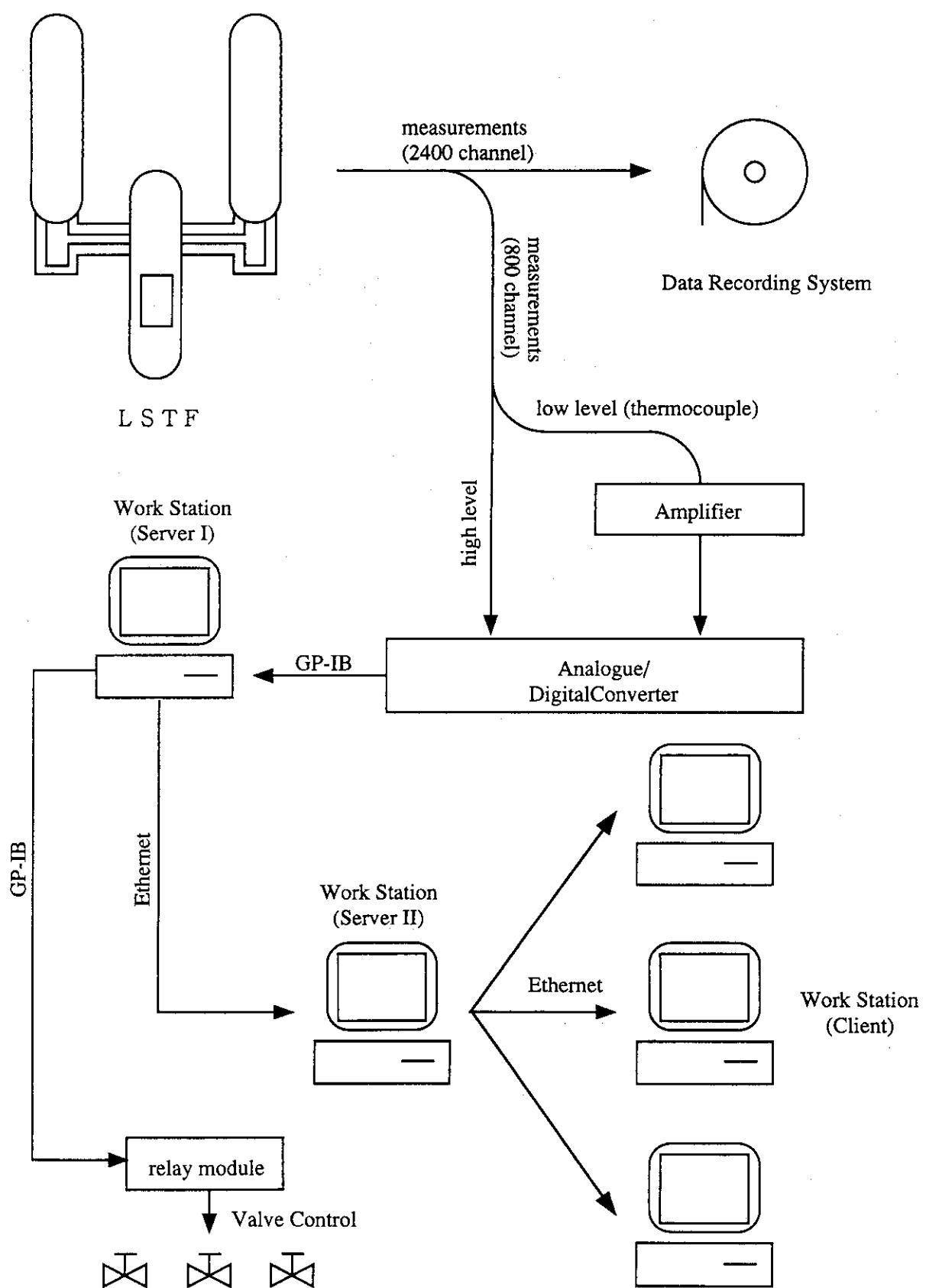


Fig. 2.1 ハードウェア接続図

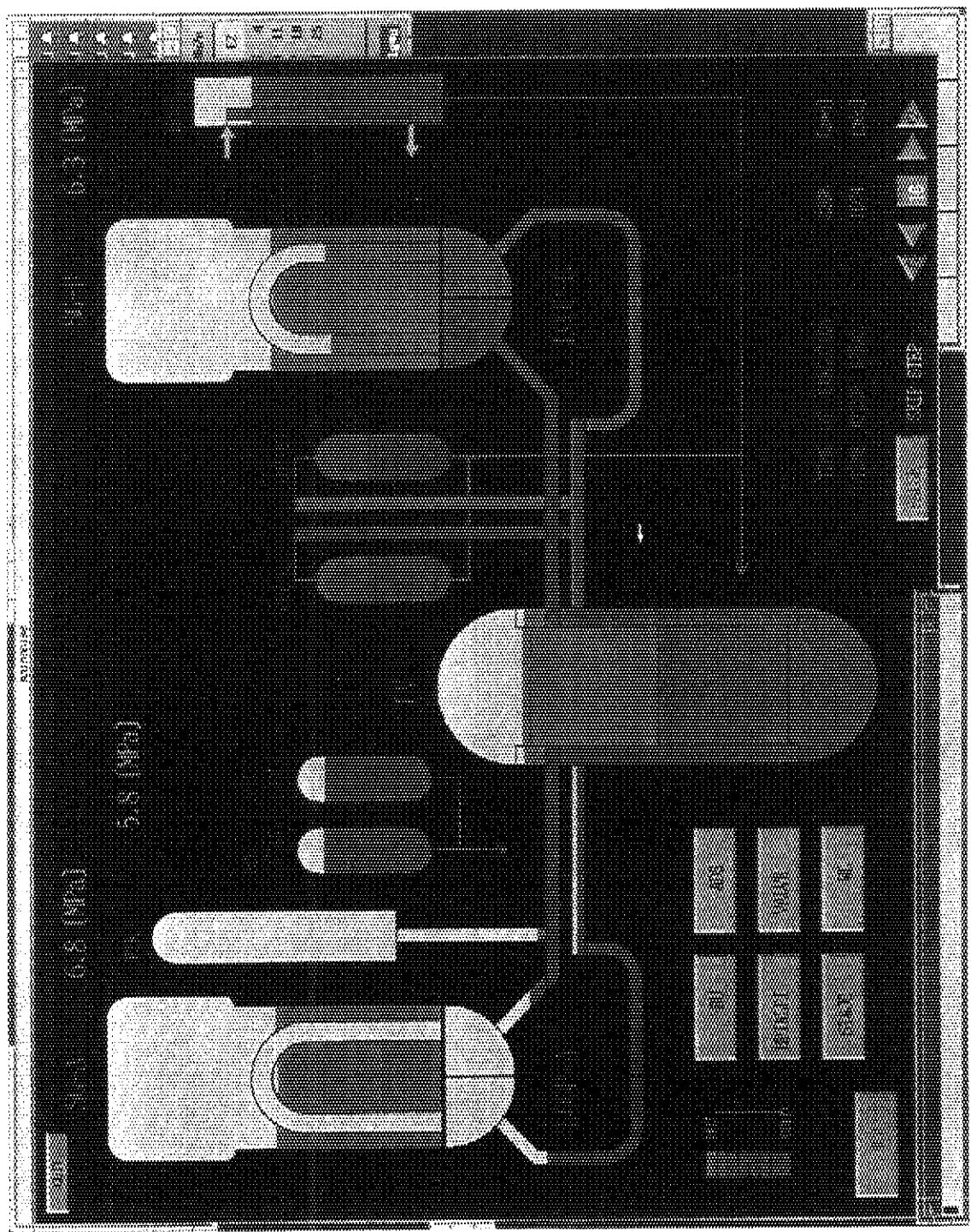


Fig. 3.1 冷却水分布表示機能の表示例

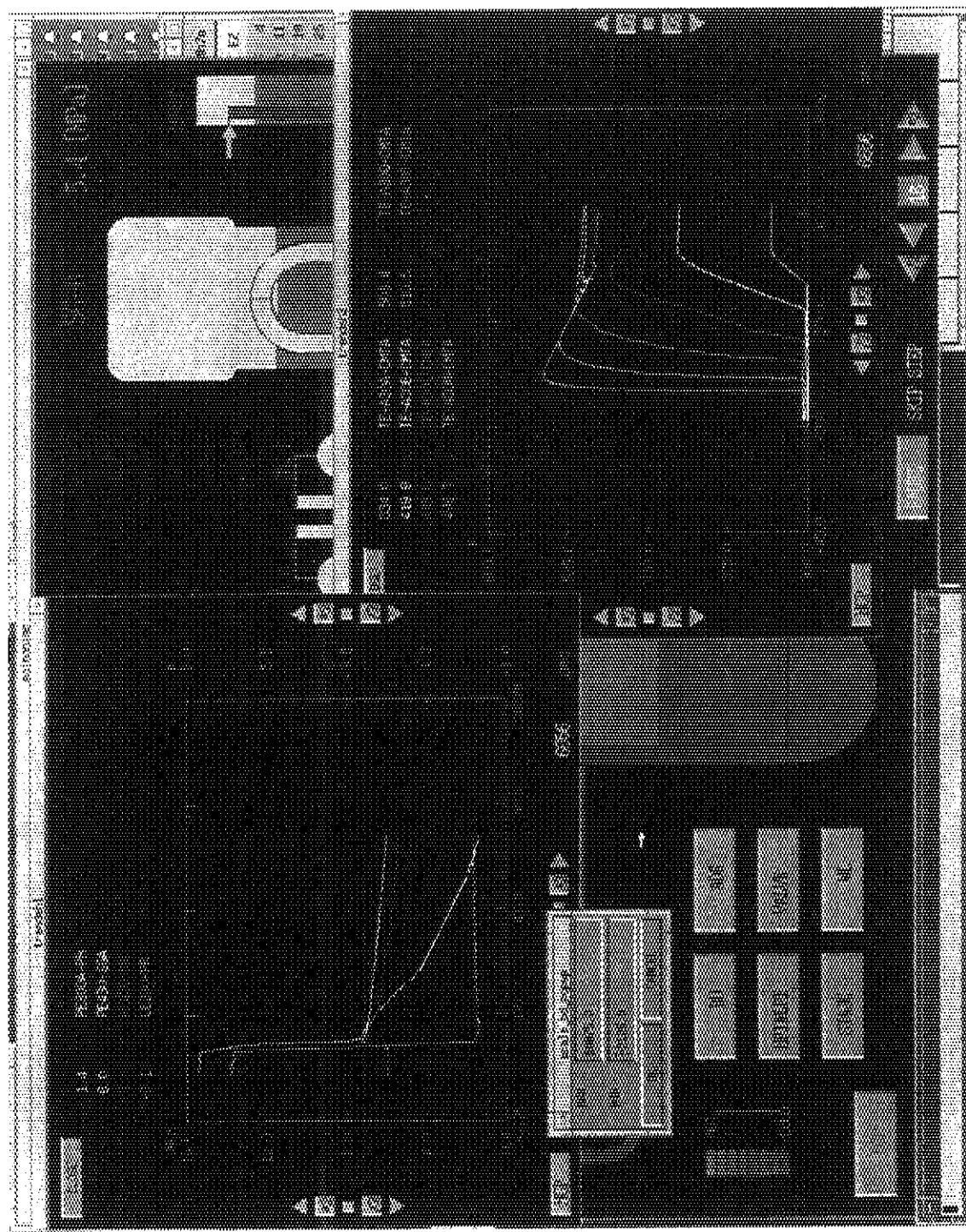


Fig. 3.2 経時変化表示機能の表示例

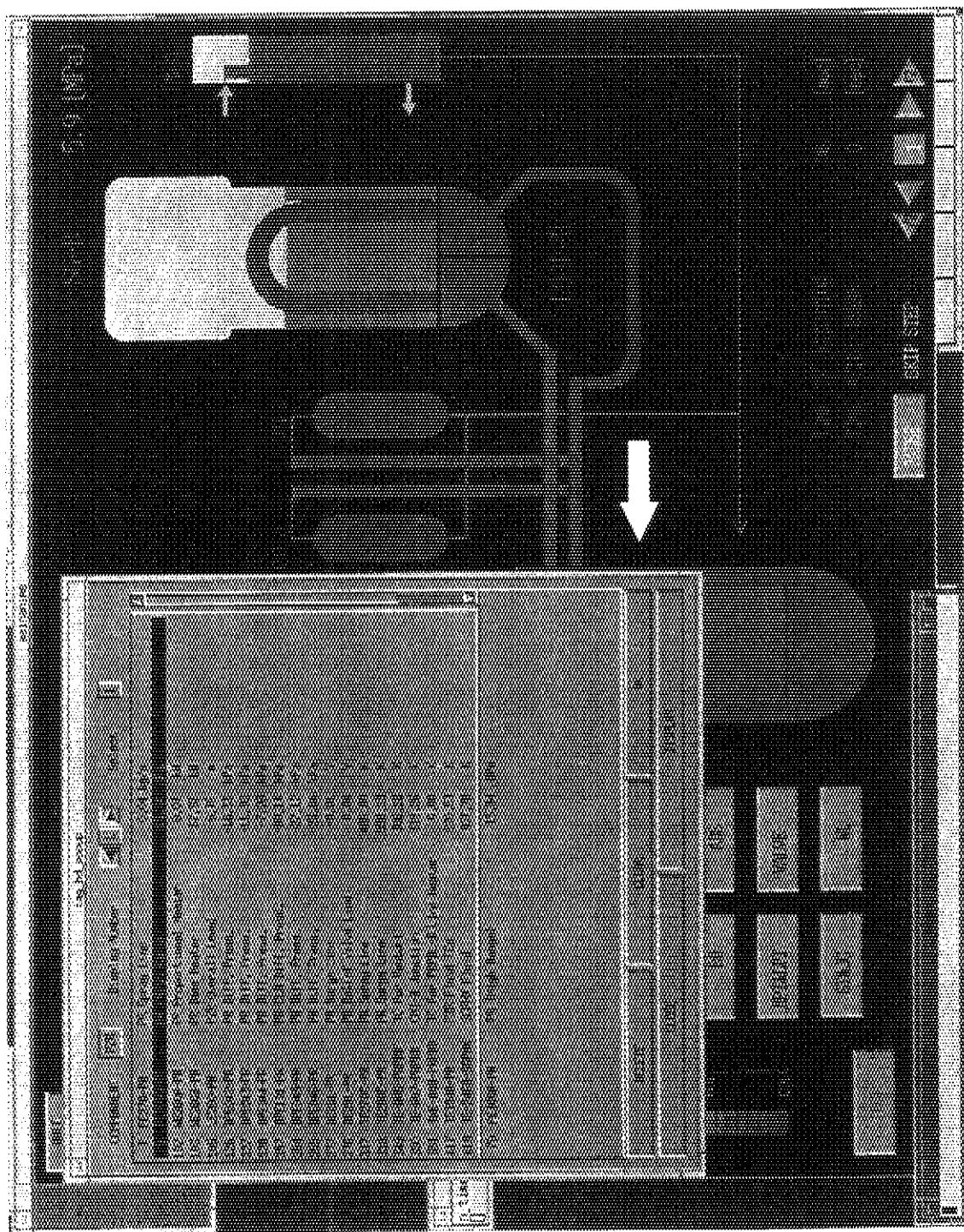


Fig. 3.3 経時変化表示機能における測定器選択画面の表示例

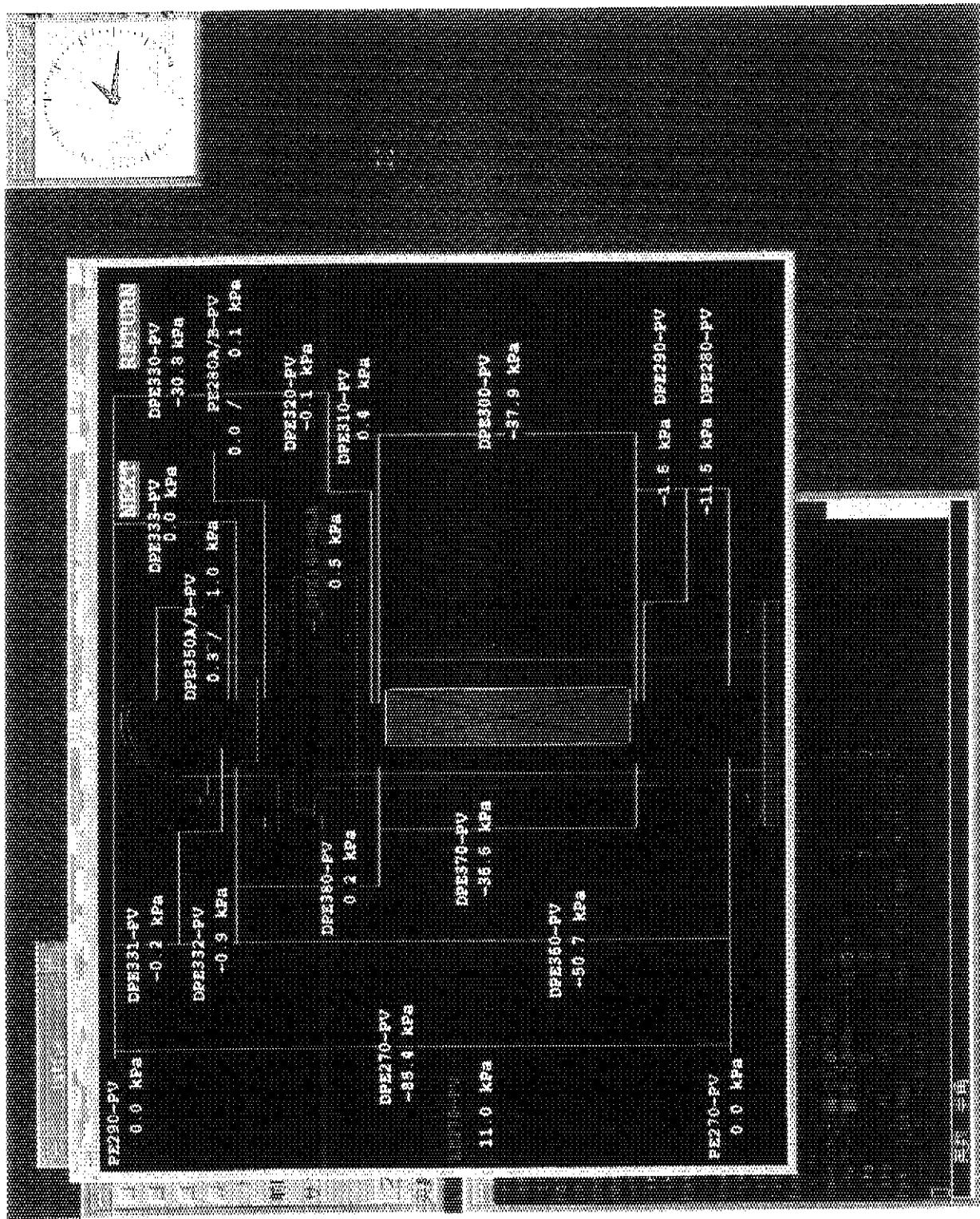


Fig. 3.4 測定値表示機能の表示例

## 9. プラント建設工程計画のビジュアリゼーション

横田 肇、小林康弘、荒木憲司、好永俊昭  
(株) 日立製作所

プラント建設計画の高精度化、高効率化を図るためプラント建設工程評価システムを開発した。本システムは、建設計画の単位区画を対象として、機器や配管等の据付作業毎に作業空間を設定し、その空間の混雑の度合等に基づいて作業のし易さを定量的に評価することを特徴とする。この作業のし易さの指標を基に、(1) VR的手法を用いて、据付部品、作業空間、作業員の状況を建設シミュレーションによりビジュアル化する機能、(2) 遺伝的アルゴリズムを用いて、総合的に見て区画内で最も作業がし易くなるように詳細作業順序を最適化する機能、等を実現している。

## Visualization for Plant Construction Scheduling

Takeshi Yokota, Yasuhiro Kobayashi, Kenji Araki and Toshiaki Yoshinaga  
Hitachi,Ltd.

We have developed a schedule review support system in order to improve the accuracy and efficiency of plant construction schedule. Construction unit schedules are evaluated on the basis of a numerical index for difficulty of installation process of hardware elements such as mechanical components and pipe segments by using spatial congestion rate of working space defined for each process. The following two functions are implemented using the difficulty index , and play critical roles in this system. (1) Visualization of schedule is done through construction simulation which shows the situation of hardware elements, working spaces and workers, by means of VR devices. (2) Refinement of schedule is done through the optimization of the detailed process ordering to minimize the overall difficulty index with the use of the genetic algorithm.

## 1. 緒 言

プラントの設計・計画業務における高度情報化の進展、建設業を取り巻く作業環境の変化を背景として、プラント建設計画の高精度化、および建設計画作成の高効率化が求められている。そのニーズに対応して、原子力プラントを対象として建設統合 C A E システムの開発を行なっている。このシステムは、計画業務の下流側に当たる詳細工程計画の部分を取り上げており、三つの基本的なシステムから構成されている。それらは、工程計画の基本となる各作業の工数を算出する工程データ作成システム[1]、工程データを用いて最適な工程計画を作成する工程割付システム[2]、作成された工程計画を評価し、それをより高精度化するための工程評価システム[3]である。本発表では、このうちの工程評価システムに関して、プラント建設工程計画のビジュアリゼーションを中心に報告する。

プラント建設工程計画は、その規模が大きいため、まず建設計画の単位区画を基本として作成し、これらを積み上げてプラント全体の計画を作成する。ここでは、単位区画における工程評価を取り上げる。

最初に作成される工程計画は、設計データを基に、この段階で明確に与えることのできる作業期間、作業人員、作業の順序関係等に関する制約を主に考慮して作成される。そのため、工程計画が一応クローズしないと検討が難しい項目については、その結果に基づいて評価、修正し、計画を完成させることになる。そのような評価項目としては、部品の据付作業のし易さ、各据付部品の干渉の状況、搬入のし易さ等がある。これらの点から工程計画を評価し、改善点がある場合には、それを工程計画にフィードバックすることによって、より現実に即した精度の高い工程計画を作成する。そのため、最近では、建設作業の状況を把握しながら工程計画が評価できるように、コンピュータグラフィックスを用いて建設の状況をビジュアル化し、その画面を用いて上記の項目の評価に役立てる建設シミュレーションと呼ばれる手法が開発されている[4][5]。しかし、単にプラントの状況をビジュアル化しただけでは、建設計画の高精度化、建設計画作成の高効率化には、繋がりにくい。

工程計画の評価をさらに効果的に進めるためには、建設シミュレーション時の作業状況表示をより現実に近いものにすること、建設シミュレーションを実施するための手間をできるだけ少なくすること、作業状況をよりわかりやすく表示すること、ビジュアル化による主観的判断のみではなく何らかの評価基準に基づいて作業性の定量的な評価を行なうこと、等が必要である。

本研究では、建設シミュレーション時に各作業員の作業位置や職種の情報を表示する機能、工程計画の情報を用いて順序最適化により建設シミュレーション用のデータを自動的に作成する機能、人工現実感（V R）的手法を用いて、据付部品、作業空間、作業員の状況を建設シミュレーションにより立体的にビジュアル化する機能、作業空間の混雑の度合を用いた評価を行なう機能、総合的に見て区画内で最も作業がし易くなるように詳細作業

順序を最適化する機能、作業状況を確認しながら工程計画を対話的に修正する機能、等を持つ工程評価システムを開発した。

## 2. システムの基本構成

### 2. 1 詳細工程計画

システムの基本構成を図1に示す。工程データ作成システムでは、CADデータを用いて各詳細作業単位の工数（ある作業を行なうのに必要な人数と日数の積の情報）を算出する[1]。そして、工程割付システムで上述の工数の情報と、計画担当者が対話的に入力する計画条件（各工程の開始日、終了日の制約、作業の順序関係の制約）を用いて作業人員の山積みができるだけ平準化するような詳細工程計画を作成する[2]。

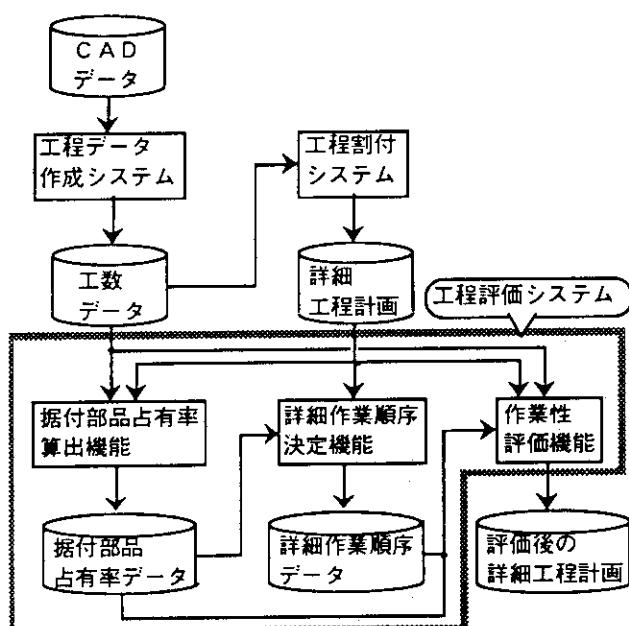


図1 システムの基本構成

### 2. 2 工程計画の評価

工程評価システムでは、上記のCADデータと詳細工程計画の情報を用いて、工程計画評価のプロセスを支援する。本システムでは、作業空間の混雑の度合で作業の難易度を評価する。作業空間は、各詳細作業単位に作業員が作業を行なうために必要な範囲として定義する。そして、混雑の度合は作業空間中に存在する据付部品の体積の、作業空間の体積に対する割合で示す。

作業空間の混雑の度合を求め工程計画の評価に利用するため、システムは、据付部品占有算出機能、詳細作業順序決定機能、作業性評価機能を備えている。まず、据付部品占有算出機能で各作業空間毎にその作業空間中に存在する据付部品の種類と、その占有部

分の体積を導出する。そして、詳細作業順序決定機能で上記の据付部品占有率を評価基準として、建設シミュレーションのための詳細作業順序を自動決定する。最後に、作業性評価機能で作業状況の可視化による建設シミュレーション、据付部品占有率を用いた作業の難易度の自動評価、作業状況の変化を確認しながらの工程計画の対話修正、等を行なう。

以下、上述の工程評価システムの各機能について説明する。

### 3. 工程評価システムの機能

#### 3. 1 据付部品占有率算出機能

##### (1) 作業空間

建設作業の作業空間を定義する主要因としては、作業の種類と作業の対象となる据付部品の種類が挙げられる。本機能では、CADデータと詳細工程計画の情報を用いて各詳細作業単位に作業の種類と作業対象となる据付部品の種類に応じて表1のように作業空間を仮定した。

表1 作業空間定義方法

部品、作業の種類	作業空間定義方法
機器据付	$x_k = x_b \times 1.7$ $y_k = y_b \times 1.7$ $z_k = h + z_b \times 0.85$
配管据付	$x_k = x_b + r_s \times 2$ $y_k = y_b + r_s \times 2$ $z_k = h + z_b / 2 + r_s / 2$ $r_s = 0.5 \quad (r < 0.5)$ $r_s = r \quad (r \geq 0.5)$
配管溶接	$x_k = r_s \times 2$ $y_k = r_s \times 2$ $z_k = r_s \times 2$ $r_s = 0.5 \quad (r < 0.5)$ $r_s = r \quad (r \geq 0.5)$

□: 作業空間 ■: 部品 単位はm

##### (2) 据付部品占有率

本システムでは各詳細作業を実施する時期に、その作業空間の中に各据付部品がどの程

度存在しているか、つまり、作業空間がどの程度混雑しているかによって作業の難易度を評価する。そのため、図2の例に示すような、作業空間の体積に対する、作業空間中の据付部品の体積の比率（据付部品占有率と定義）をCADデータを用いることにより算出する。

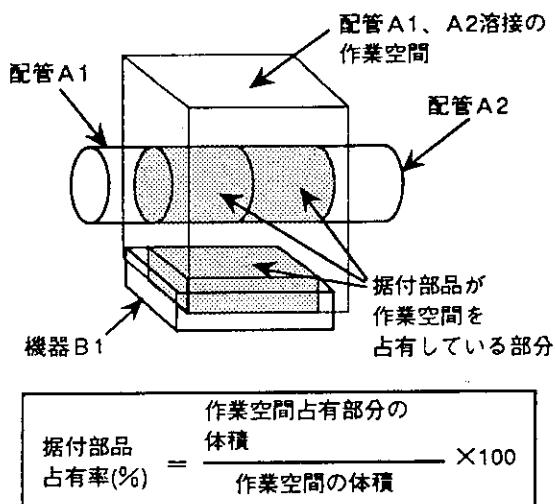


図2 据付部品占有率

算出されたデータには各作業単位にその作業空間中に存在する部品の名称と占有体積が記録される。そして、詳細作業順序のデータを用いることにより任意の時点で据付済みの部品を特定し、各作業空間中に存在する部品のうち据付済みの部品のみの占有体積の和を取ることにより、任意の時点での据付部品占有率を算出する。

### 3. 2 詳細作業順序決定機能

工程評価の前段にある工程割付の段階では、一まとめの作業からなる工程を対象としているが、工程評価の過程では、個々の作業を対象とした評価が重要となる。そのため、作業の難易度を定量化し、作業性の面から合理的な作業順序を決定する。作業性の尺度としては、作業間の干渉の度合を示す指標を用意し、それを最小とするような作業順序を決めることになる。

問題の難しさを決める要因として、制約条件の有無や、変数の規模を挙げることができる。この問題は、順序に関する制約条件を含み、作業の数は1エリア当たり100のオーダーになるので、組合せの数は膨大となる。

#### (1) 作業順序決定の従来手法

現在、この詳細作業順序の決定のための機能としては、分枝限定法を用いた手法が開発済みである[3]。分枝限定法は、組み合わせ最適化問題の最も基本的な解法であり、制約条件の厳しさを利用して、探索する範囲を限定する点に特徴がある。しかし、問題の規

模が大きくなると、探索の範囲は拡がりすぎるので、さらにヒューリスティックスと称するルールを導入して、探索範囲を限定していくのが一般的である。この手法においても、探索範囲を半強制的に限定して、準最適解を求めている。

## (2) 遺伝的アルゴリズムを用いた手法

このように制約条件に注目した分枝限定法と対照的な手法として、より広い範囲を探索することを特徴とする遺伝的アルゴリズムを挙げることができる。遺伝的アルゴリズムは、単一の解ではなく多様な解の集団を扱うこと、探索にランダム性を取り入れることにより、探索範囲を広くしている。その最大の特徴は、複数の解の間でそれらを構成する部品を入れ替える操作（交差）によって、組み合わせ的に解を探索できることである。

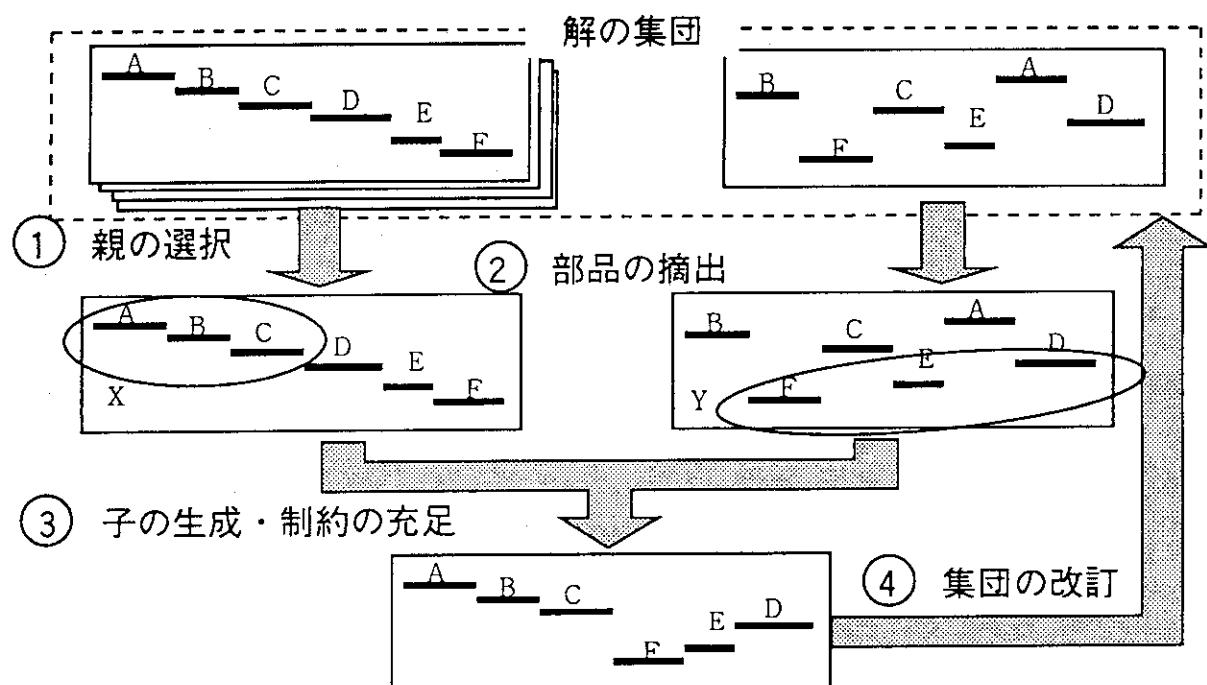


図3 遺伝的アルゴリズムを用いた作業順序最適化

遺伝的アルゴリズムを用いた作業順序最適化手法の概要を、図3に示す。図の例では、作業A～Fの順序を最適化する。ここでは、新規の解を生成する操作として、交差のみを取り上げている。この場合の交差ルールは、解の集団に含まれる二つの作業順序X、Yをランダムに選択し、それらを親として一点交差と称する方法で部品を摘出し、子となる別の作業順序を生成している。作業順序のあるところまでの部品を、親Xから継承する。どこまで取るかは、ランダムに決める。図では、(A B C)が、これに相当する。作業順序の残りの部品は、親Yから継承する。残りの作業は、D、E、Fであり、親Yでの(F E D)が、これに相当する。したがって、子の解として、二つの親とは異なる作業順序(A B C F E D)が得られる。ある世代の集団において、無視し得ない

変化が生ずる程度には、交差等の操作によって新たな解を生成しておく。このようにして得られた解は、集団に加えられる。通常、次の世代に残る解は、集団内で、解の性質に依存してランダムに選択（淘汰）され、集団が膨張することはない。このような世代交代のステップを、進化のサイクルと称している。

順序についての制約条件は、親の部品を合成した直後に制約充足処理にかけることにより、制約条件を満たす子を生成している。制約充足は、順序関係違反の作業の組について入れ替えを繰り返すことで行う。

### 3. 3 作業性評価機能

#### (1) 工程計画に応じた建設シミュレーション

詳細工程計画は工程計画表として記述される。工程計画表は各作業の開始日、終了日、工数、等を示すバーチャートの情報である。そのため、工程計画表のみから実際の部品の据付状況、他の据付部品との位置関係、等を類推するのは非常に困難である。よって、工程計画表の認識性を向上させるために、工程計画に基づき時系列的に各作業の状況を表示する建設シミュレーションを行ない、工程計画の認識性向上の支援を行なう。

作業状況表示においては従来の建設シミュレーションのように各部品の据付状況を表示するだけではなく、各作業員の作業位置や職種の情報、各作業の作業空間の状況、も表示する。この時、作業位置は作業空間の情報を用いて定義し、職種は工程計画に記述されている作業の種類の情報を用いて定義する。そして、定義された作業位置に作業員を示すマーカーを表示する。その際、マーカーの表示色は作業員の職種に応じて変える。これによって、各部品の据付状況や、各作業員の分布状況の認識性を向上させる。

また、作業空間は作業空間を表す立方体自身を線画で表示する。その際、各作業空間の据付部品占有率の値に応じて作業空間を表す線の色を変えて表示する。これによって、各作業の難易度の認識性を向上させる。

作業状況表示画面では3次元の空間情報を2次元画面上に投影して表示しているため、特に空間の奥行き方向の認識性が低くなってしまう。よって、本機能では視線方向の変更やウォータースルーをリアルタイムで行なうことにより、動態視差により3次元空間の認識性を高める。

さらに、本機能では3次元空間の認識性をさらに高めるために人工現実感技術を応用した表示として、液晶シャッター方式による両眼立体視と、超音波センサを用いた頭部の位置に応じた画面表示（ヘッドトラッキング）を行なう。これにより、あたかも実物のモデルを見回しているような感覚で作業状況の評価を行なうことができる。

#### (2) 据付部品占有率を用いた作業の難易度の自動評価

本機能では作業の難易度の認識性を向上させるためにシステムが難易度を自動的に評価し、その結果を表示する。難易度の評価には作業順序決定の評価基準である据付部品占有

率を用いる。そして、各作業の据付部品占有率の合計値によって作業の難易度を数段階に評価した結果を表示する。また、難易度が高い作業に関してはその主な原因となっている据付部品を据付部品占有率を評価基準として導出し、その部品の名称を表示する。

### (3) 評価結果を確認しながらの詳細工程計画の対話修正

本システムでは工程評価の画面上で詳細工程計画の対話的な修正ができるようにした。その際、工程計画表の修正結果を作業状況の表示にリアルタイムに反映させることによって、工程計画の修正の影響を確認しながら、感覚的に詳細工程計画の修正を行なうことが可能となる。

## 4. システムの評価

実際の原子力プラントのCADデータを基に評価用データを作成し、本システムが実データに対して正しく動作することを確認するため、システムの評価を行なった。

本システムは通常の評価を行なうためのメイン画面と人工現実感技術を応用した作業状況表示を行なうためのサブ画面の2つの画面を用いる。上記評価用データを用いた場合の、メイン画面の画面例を図4に、サブ画面の画面例を図5に示す。メイン画面では図4に示すように画面の上部に対象となる工程計画表を表示し、画面中央に工程計画に対応した作業状況を表示することにより建設シミュレーションを行なう。この工程計画表表示画面中で日付を示すバーを移動させると、それに応じて作業状況も変化する。

### 4. 1 据付部品占有率を用いた評価

据付部品占有率を用いた評価として、画面の左側に各作業単位にその作業空間に存在している据付部品の名称、据付部品のCADデータ番号、据付部品占有率の値、据付部品占有率の合計値、を表示する。この時、評価時点で据付済の部品と未据付の部品は区別して表示し、未据付の部品に関しては据付部品占有率の合計値にも含めない。さらに、各作業の難易度が高くなる原因となっている据付部品に関する表示は特定のカラー(現状は赤色)で行なう。

このような処理を行なうことにより、各作業の作業空間の現在状況の把握、混雑の原因となっている据付部品の認識、混雑を解消するために動かすべき据付部品の候補の選出、等を行なう。例えば、ある配管の据付作業の据付部品占有率が大きく、その内訳として壁による占有率が最も大きい場合には、その配管の据付位置が壁に近すぎるために作業がやりにくくなっているという解釈ができる。

### 4. 2 作業性の評価

作業状況表示画面中に作業空間を表示する際には据付部品占有率の合計値によって、作業空間を構成する線の色を数段階に分けて表示する。これにより、作業状況表示画面においても各作業の難易度の認識を行なえるようとする。

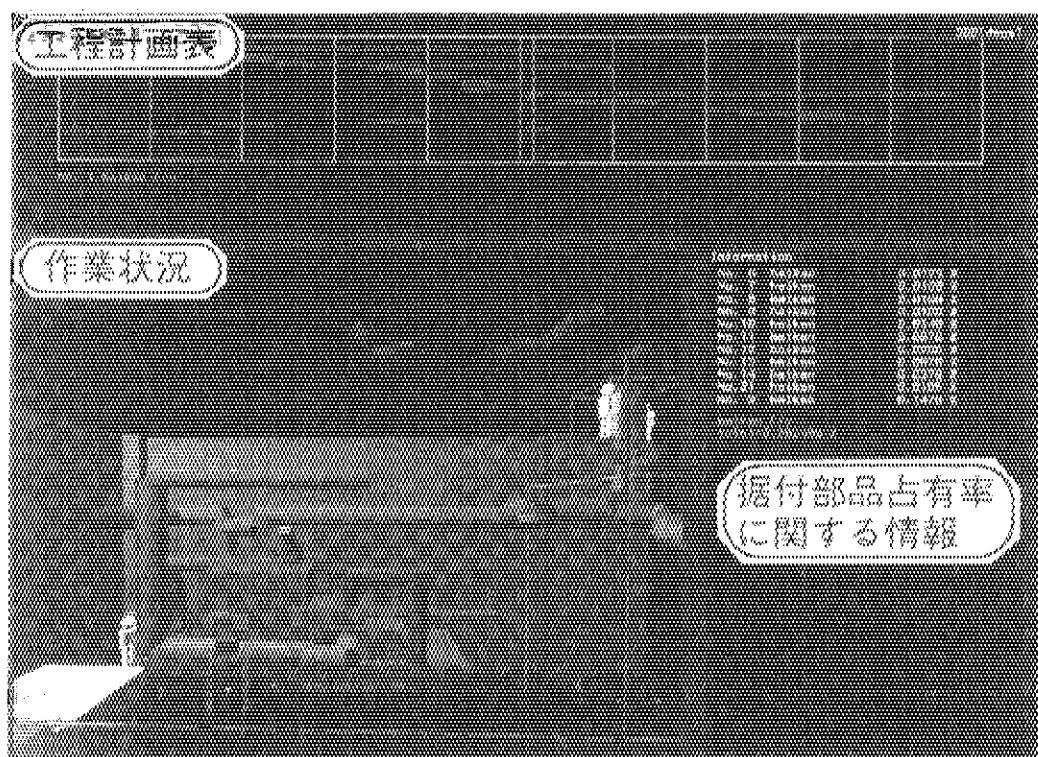


図4 工程評価システムの画面例（メイン画面）

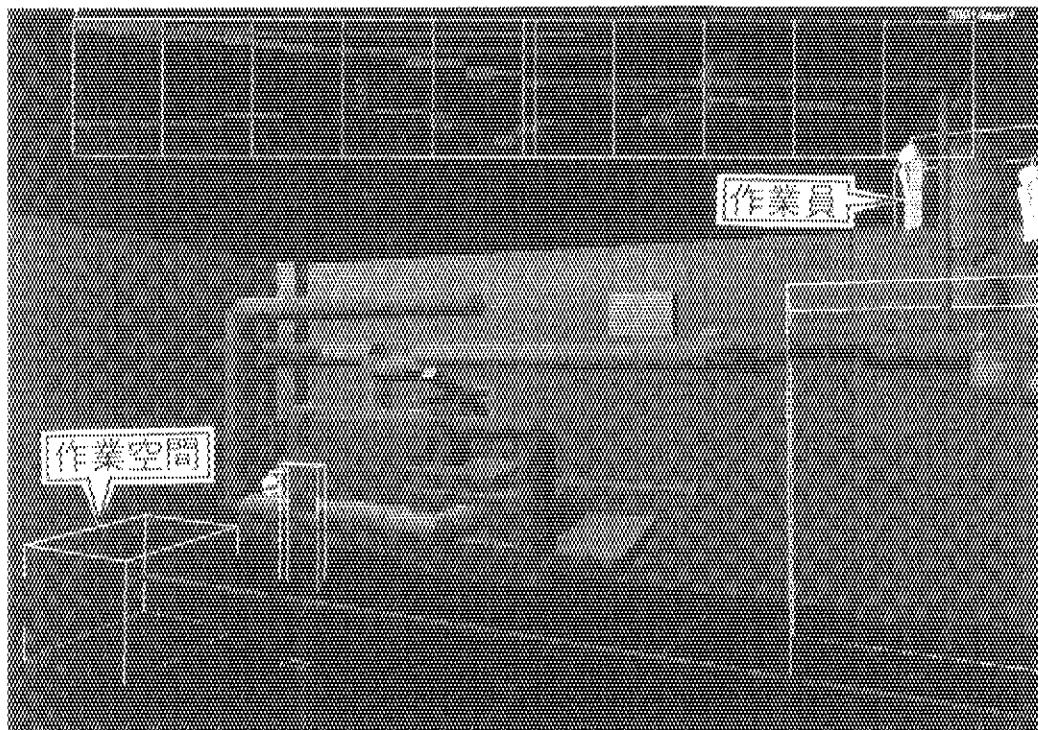


図5 工程評価システムの画面例（サブ画面）

サブ画面では図5のように人工現実感技術を応用した表示を行なう。サブ画面においても工程計画表と作業状況が同時に表示され、工程計画表中の現在日を移動することにより、それに応じた作業状況を表示する。

#### 4. 3 遺伝的アルゴリズムの効果

詳細作業順序決定機能の評価に用いた例題に、今回開発した手法を適用した。この問題では、作業119件を含むエリアを模しており、作業順序についての制約条件を満たす必要がある。

解の集団の規模を20とし、50世代の進化のサイクルを実行したところ、従来手法よりも、目的関数が5%良い解を得ることができた。同じワークステーションを使用し、ほぼ同様の計算時間であった。また、試みに、制約充足の処理を外して解を求めたが、目的関数の値に大きな開きは出なかった。これは、ある程度のレベルまで最適化できていることを示すものと考えられる。

#### 5. 結言

プラント建設設計画の高精度化、高効率化を図るためのプラント建設工程評価システムを開発した。本システムは各作業単位に作業空間を設定し、その空間の混雑の度合で作業の難易度を評価することを特徴とする。そのために、建設シミュレーション時に各作業員の作業位置や職種の情報を表示する機能、工程計画の情報を用いて順序最適化により建設シミュレーション用のデータを自動的に作成する機能、人工現実感（VR）的手法を用いて、据付部品、作業空間、作業員の状況を建設シミュレーションにより立体的にビジュアル化する機能、作業空間の混雑の度合を用いた評価を行なう機能、総合的に見て区画内で最も作業がし易くなるように詳細作業順序を最適化する機能、作業状況を確認しながら工程計画を対話的に修正する機能、を持つ。

また、実際の原子力プラントのCADデータを基に評価用データを作成し、システムの評価を行ない、本システムが実データに対して正しく動作することを確認した。

本報告の一部は情報処理学会研究報告(95-CG-75)の「プラント建設工程評価システムの開発」から転載しています。

## 参考文献

- [1]荒木、山田、高元、好永、中嶋：プラント建設設計画システムの開発（1）－プラント建設設計画システムの構成－、原子力学会1994秋の大会
- [2]高元、山田、小林、野中、大越：工程計画の資源山積みを平準化する0-1 2次計画アルゴリズム、電子情報通信学会論文誌D-2 Vol.J77-D-2 No.10 pp.2075-2082 (1994)
- [3]横田、高元、小林、大越、吉田：プラント建設設計画システムの開発（2）－工程計画評価手法の開発－、原子力学会1994秋の大会
- [4]好永、中嶋、宮原、三浦：原子力発電プラントコンストラクションCAEシステム、日立評論 Vol.72 No.10 99.27-38 (1990)
- [5]待場、川村、佐々木：原子力発電プラントのエンジニアリングにおけるコンピュータグラフィックスの応用、東芝レビュー Vol.47 No.12 pp.914-917 (1992)

## 10. 知能ロボットシミュレーションのための可視化システム

樋口 健二, 大谷 孝之, 久米 悅雄 (原研・計算科学技術推進センター)

原研・計算科学技術推進センターでは、原子力用知能ロボット及び知能化プラントの基盤技術研究として、知能ロボットのシミュレーション・システムの開発を行ってきた。このシステムでは、人間型の知能ロボットが日本語で記述された命令文を理解し、環境データを用いて自己の行動を計画し、命令を遂行する過程が論理／数値シミュレーションされる。

実用の原子力施設を対象とするこの種のシミュレーションにおいては、大規模・複雑環境をモデル化する技術、性能評価のためのシミュレーション結果の可視化技術が不可欠である。

本報告において、ソリッド・モデルを基本とするプラントのモデル化手法、環境モデルを光線追跡法により可視化する機能、ポリゴン・データを用いて実時間表示する映像化システムについて述べる。

## Visualization System for Intelligent Robot Simulation

Kenji HIGUCHI, Takayuki OTANI, Etsuo KUME (JAERI)

Simulation systems for intelligent robot has been developed at JAERI as a research and development program of underlying technologies for intelligent robots and intelligent nuclear plants. In the system, it is numerically/logically simulated that a human shaped robot reads and understands instructions written in natural language, planning and producing a required sequence of actions with environmental data.

In such a simulation for actual nuclear facilities, it is indispensable to model the large scale environment and to visualize the simulation results for performance evaluation.

We describe a modeling method with CSG(Constructive Solid Geometry), accurate visualization system by Ray Tracing method and high-speed visualization system using polyhedral model.

**Keywords:** Simulation, Visualization, Robot dynamics, Large scale environment, Constructive Solid Geometry, Monte Carlo method, Ray Tracing method

## 1. はじめに

原研・計算科学技術推進センターでは、原子力用知能ロボット及び知能化プラントの基盤技術研究として、「人間動作シミュレーション・プログラム（H A S P : Human Acts Simulation Program）[1]」と呼ばれる知能ロボットのシミュレーション・システムの開発を行ってきた。本研究の目的は、高放射線下において人間作業を代替する知能ロボット及びプラントの知能化・自動化の基盤技術の開発、さらに、人工知能関連のシステム化された基盤技術を原子力分野の研究者、技術者に提供することである。

H A S P では、Fig.1 に示すように、計算機上に設定された人間型の知能ロボットが日本語で記述された命令文を理解し、環境データを用いて自己の行動を計画し、プラント保守作業を遂行する過程が論理／数値シミュレーションされる。また、動力学的に計算されたロボット動作は、高速計算機上で 3 次元環境と共に可視化される。

H A S P を構成する要素技術のうち、論理シミュレーションに関する技術開発を行う原子力知識ベースの研究では、a) 日本語で与えられる命令文の構文・意味解析からロボットの行動を高速・自動生成する技術を開発する「命令理解・行動計画の研究」、b) ロボットの動作空間を定義し、シミュレーション結果を可視化する技術を開発する「環境設定・映像化技術の研究」、及び c) ロボットが知覚情報に基づいて行動したり、環境の異常を検出する技術を開発する「環境認識技術の研究」を行っている。

数値シミュレーションに関する技術開発を行う高速シミュレーション技術の研究では、a) 人間型ロボットの動きを動力学的に計算・評価する技術を開発し、人間型ロボットの設計基準を与えることを目的とした「ロボット動作・ハードウェアの研究」、b) ロボット軸体に対する放射線損傷度の評価手法を開発する「被曝線量計算の研究」、及び c) H A S P における論理／数値シミュレーションの高速化を目的とした「高速モンテカルロ装置（Monte-4）の開発」を行っている。

このようなシミュレーション・システムでは、原子力施設のような大規模・複雑環境をモデル化する技術、シミュレーション結果の評価のための可視化技術が不可欠である。ソリッド・モデルを基本とするプラントのモデル化手法、環境モデルを光線追跡法により可視化する機能、シミュレーション結果を実時間表示する映像化システム、視覚認識処理のための輪郭線モデルの生成手法、現在開発中の順方向光線追跡法による画像生成手法について述べる。

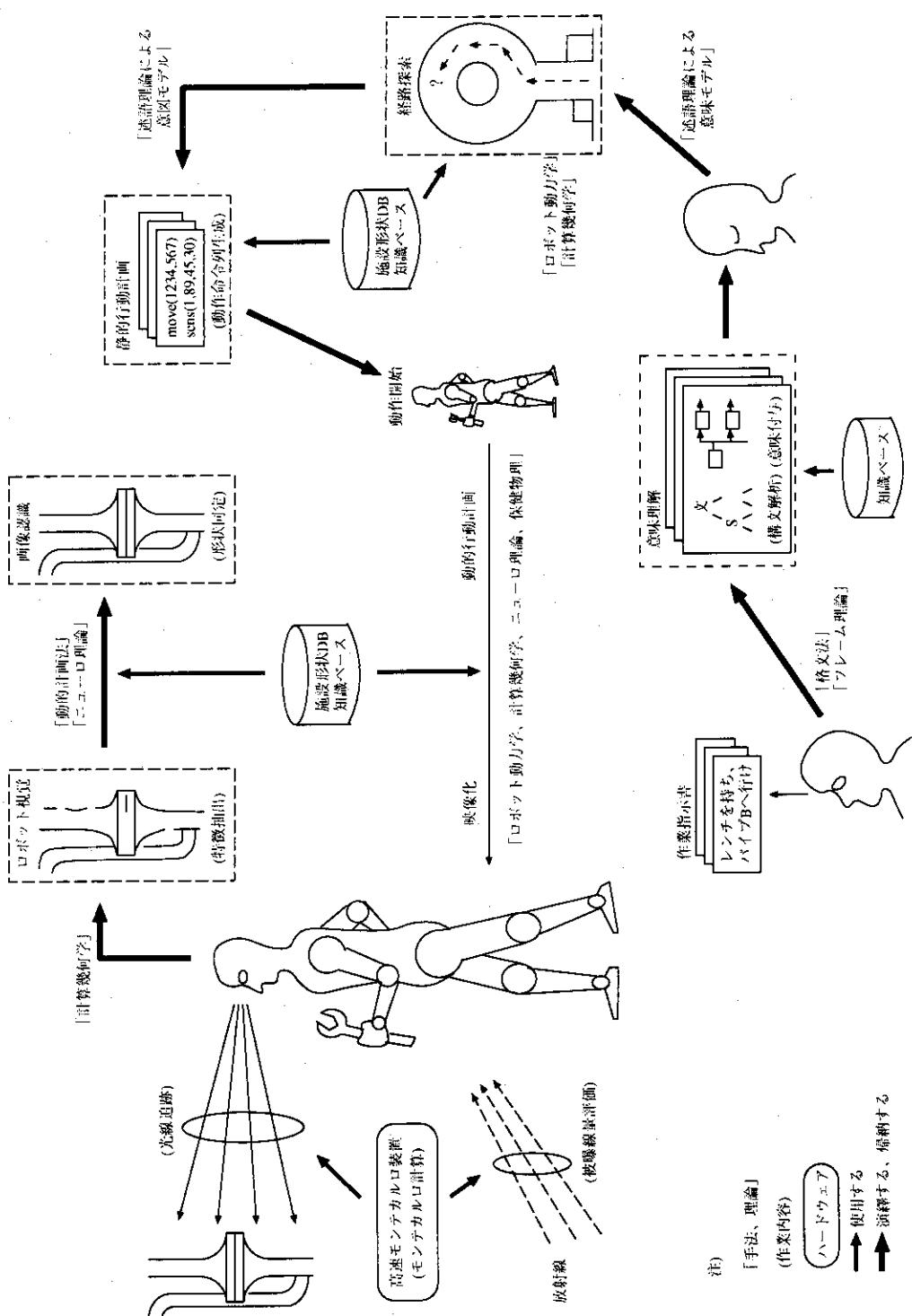


Fig. 1.1 Concept of Human Acts Simulation Program

## 2. H A S P における世界モデル

H A S Pにおいては様々な論理／数値シミュレーションが行われる。各シミュレーションにおいては、高速処理の観点から処理内容に応じた4つのモデル（Fig.2.1）を適宜使用する。即ち、H A S Pにおいてはロボットの動作環境である世界モデル（原子力施設の建屋、機器等の3次元物体）は、C S G (Constructive Solid Geometry) モデル、ボクセル・マップ、多面体モデル、簡易モデルによって記述されている。

### (1) C S G モデル

ロボット・シミュレーションにおいては、点と線からなるC A Dデータ等の形状データではなく、3次元情報が縮退していないC S G モデルをしばしば必要とする。即ち、H A S Pにおいては、a) 狹隘な空間においてロボット躯体と施設内機器との詳細な干渉チェックを行うため、b) モンテカルロ法により放射線輸送問題を解き、ロボット躯体に対する放射線損傷度を厳密に評価するため、c) 下記(2)～(4)で述べる種々の形状データを生成するための形状データとして、C S G モデルにより3次元物体を記述している。また、H A S Pにおいては、本モデルにより種々の形状データを一元的に管理している。

### (2) ボクセル・マップ

ボクセル・マップとは、2次元／3次元の格子状マップであり、各ボクセル（2次元／3次元の直方体セル）中に存在する機器I Dが登録されている。与えられた命令文からロボットの動作列を生成する命令理解システムでは、大まかな行動計画を行う際、このボクセル・マップを用いてロボットの可動空間を検索している。C S G モデルからボクセル・マップを生成する処理の詳細な内容については、付録Aに述べる。

### (3) 多面体モデル

本研究においては、3.2節に後述するように視覚認識処理のために「見えるべき画像」を光線追跡法により生成している。これは、事故時のように環境が破壊された場合の環境認識において参照するデータを生成するためには光の反射を厳密にシミュレーションする光線追跡法が適していることが理由である。しかし、光線追跡法は処理に多大の計算時間を要するという点が欠点である。シミュレーション結果を表示する処理には、画像生成用の専用ハードウェアを装備したワークステーション上で多面体モデルを可視化する手法が適している。H A S Pにおいては、この可視化処理のため多面体モデルをC S G モデルから生成している。近似の度合い、即ち、物体表現に用いられるポリゴンの枚数は可変である。付録Bに、C S G モデルから多面体モデルを生成する処理の詳細な内容を述べる。

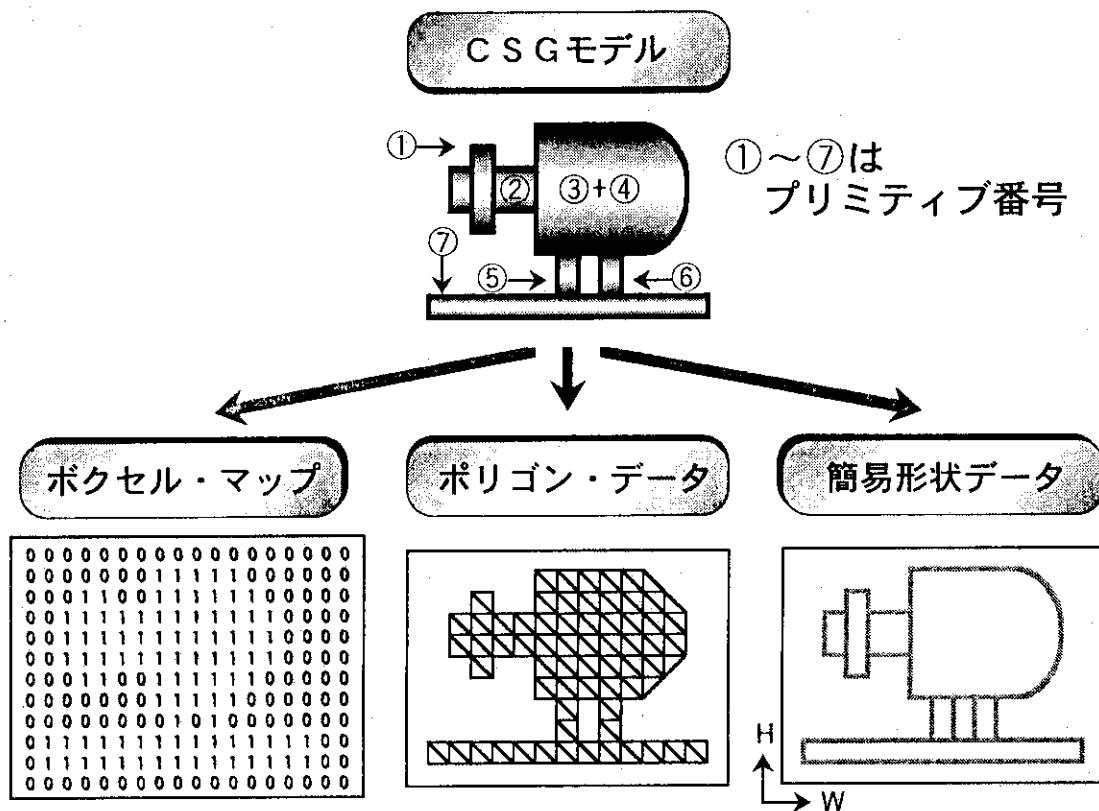


Fig. 2.1 Configuration of geometric data in HASP.

#### (4) 簡易モデル

簡易モデルとは、各機器を包含する球や円筒といった基本立体によって、その機器の形状を代表させるモデルである。本モデルは、大まかな干渉チェック、あるいは、解析が困難なロボット転体の揺れ等を考慮し、十分に安全な可動範囲を高速に決定するための干渉チェックに有用である。また、光線追跡法による画像生成において、本モデルを用いて光線の交差する物体を特定することにより、処理を高速化することが可能である。

### 3. H A S P における可視化システム

H A S P において可視化機能は、a) シミュレーション結果を可視化するため、b) 事故時等環境が破壊され、環境が原型を留めない場合の視覚認識において使用する「見えるべき画像」を生成するため、c) C C D カメラからの実画像から抽出されたエッジ情報とのマッチング・モデルを生成するために使用される。各機能実現に用いられている手法及び問題点を以下に示す。

#### 3.1 シミュレーション結果の可視化

ロボットが命令を実行する間の動きを環境と共に可視化する機能について述べる。シミュレーション結果の可視化は実時間表示が望ましい。このため、多面体モデルを画像生成のためのハードウェアを装備したワークステーション上で Z バッファにより高速表示している。使用計算機は、SUN-4/10 モデル 30 GT (主記憶 128MB、ディスク 4.4GB、スワップ 260MB、グラフィック・アクセラレータ付き) である。このシステムを用いて、約 5,000 枚のポリゴン・データによって表現された模擬環境とロボットを動画表示した。出力された画像 (Fig.3.1) は以下のとおりである。

- 画面解像度：横 1024 × 縦 1024
- RGB 解像度：各 8 ピット
- 動画：1 秒あたり 10 枚の画像をダブル・バッファを使用し、連続表示
- 描画アルゴリズム：Z バッファ
- 形状データ：ポリゴン（三角形）
- 陰影づけモデル：Gouraud または Phong

Table3.1 に模擬環境及び J R R - 3 M 施設地下一階の形状データを用いて行ったシステムの性能評価結果を示す。この表において、C S G モデルの詳細度における簡易形状とは、描画時間を短縮するため簡単な C S G モデルを用いた場合を、ポリゴン・データへの変換における簡易近似とは、同じく描画時間を短縮するため少ない枚数のポリゴンによって物体を近似した場合を示す。Table3.1 における描画時間が、画像 1 枚を生成・表示するために必要な時間である。

Table 3.1 Performance in visualization of plant geometry database using S-4/10

光源の種類	可視化対象モデル	C SG モデルの詳細度	ポリゴン・データへの変換	プリミティブ数	ポリゴン数	前処理時間(sec.)*	描画時間(sec.)**
環境光のみ	模擬環境	簡易形状	簡易近似	80	1,807	9.57	0.067
		複雑形状	簡易近似	1,075	15,551	9.53	0.560
		複雑形状	精密近似	1,075	29,471	9.84	0.695
	J R R - 3 施設	簡易形状	簡易近似	1,303	33,524	10.21	1.109
		複雑形状	精密近似	1,303	40,689	9.64	1.204
		複雑形状	簡易近似	80	1,807	8.43	0.136
環境光及び4つの点光源	模擬環境	簡易形状	簡易近似	1,075	15,551	8.44	1.404
		複雑形状	精密近似	1,075	29,471	8.41	1.907
	J R R - 3 施設	簡易形状	簡易近似	1,303	33,524	8.45	3.010
		複雑形状	精密近似	1,303	40,689	8.40	3.420

\* 画像生成ライブラリーへ供給される構造体の生成、各ポリゴンの頂点の法線ベクトル計算等の前処理時間

\*\* スクリーンへのアフィン変換、シェーディングのための輝度計算等グラフィック・アクセラレータを使用した3次元画像生成時間  
(描画させたロボットデータは、10コマ／秒の歩行データを用いた)

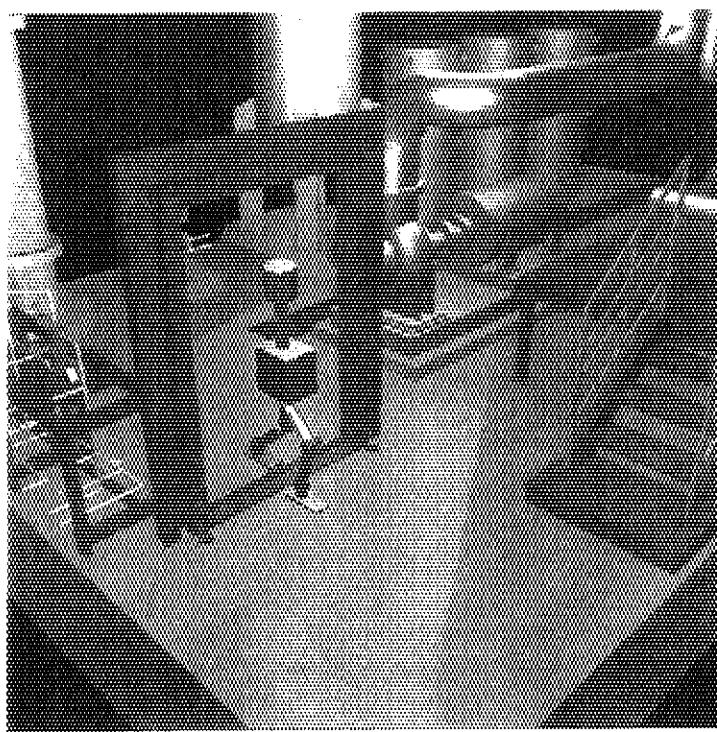


Fig. 3.1 Three dimensional image of robot simulation.

### 3.2 光線追跡法による画像生成

#### (1) 光線追跡法による画像生成の目的

前述したように、HASPでは原子力施設を定常的に巡回点検、あるいは事故時に状況を偵察する知能ロボットの基盤技術開発が目的である。知能ロボットは主に視覚情報に基づき、点検、環境認識、移動のための自己位置認識を行う。この処理は実画像から抽出されたエッジ情報、面情報等を数学モデルとマッチングし、情景中にある物体を認識後、距離情報等を使用してさらに詳細な認識を行うという手順で行われる。しかし、環境の一部あるいは大部分が崩壊し、原型を留めない可能性の高い事故時等は、環境や自己位置を認識するために十分なエッジ情報や面情報の実画像からの抽出が極めて困難な状況が予想される。この場合のアプローチとして、デッドレコニング\*等の情報から推定される大まかな自己位置から「見えるべき画像」を生成し、これを直接実画像と比較し、認識対象を特定する手法を現在検討中である。ここで述べる機能は、「見えるべき画像」を生成する機能であり、光の反射過程を厳密にシミュレーションする光線追跡法を用いる。

\* デッドレコニング：クローラ型や車輪型のロボットであれば、キャタピラや車輪の回転数から、脚ロボットであれば、アクチュエータの動きから、自分の動いた方向及び距離を算出・推定する機能。誤差が累積するために、通常、デッドレコニングによって算出された自己位置の精度は悪い。

## (2) 光線追跡法の概要

光線追跡法は、Zバッファ・アルゴリズムやスキャンライン・アルゴリズムと比較して処理プログラムが簡単で、しかも、より鮮明な3次元画像を得ることが可能である。光線追跡法の原理は、人間の目（或いはカメラ等の撮像機）に情景が映る過程を模擬することにより、画像を生成することであり、これに拠るプログラムにおいては一種のシミュレーションが行われている。つまり、ある情景が人間の目に映るということは、物体によって反射された光源（太陽光や室内光）からの光が人間の目に届くということであり、光線追跡法による画像生成プログラムにおいては、光源から出た光線を追跡し、体系中のどの物体と衝突するかを決定し、拡散／鏡面反射及び屈折現象によって方向を変えた光線をさらに追跡する、というシミュレーションを行っている（Fig.3.2）。このシミュレーションにより、体系中に置かれたスクリーン上の各画素を通過し目に到達する光線の強度を求め、各画素に対するRGB値を決定することにより、3次元画像を得る。

## (3) 光線追跡法とモンテカルロ装置

光の散乱過程を模擬している光線追跡法による画像生成プログラムの構造及び処理は、放射線輸送問題を扱うモンテカルロ・プログラムのそれらと酷似している。この理由は、両者は、複雑な幾何形状によって表現された3次元空間において、粒子（放射線）或いは光線を追跡するシミュレーション・プログラムである、という点にある。放射線輸送問題を扱うモンテカルロ・プログラムと光線追跡法による画像生成プログラムとの対応づけは、線源－光源、放射線－光線、原子核と衝突後の中性子の散乱及び吸収－物体と衝突後の光線の拡散／鏡面反射及び屈折、検出器ースクリーン上の各画素、放射線のエネルギー光の強度、となる。さらに、モンテカルロ・プログラムにおいて、より良い統計的精度を得るために粒子数（追跡する放射線の数）を増やす点も、光線追跡法において、より鮮明な画像を得るために画素数を増やすことと同じ意味を持つ。このように、両者の物理現象を表現するモデル及びそれに対応する処理プログラムは酷似している。したがって、HASPにおいて開発した粒子輸送問題を高速化するためのモンテカルロ装置 Monte-4[2]によって、光線追跡法による画像生成処理の高速化が可能である。

### 3.3 視覚認識用輪郭線モデルの生成

前述したように、環境認識においては、CCDカメラからの実画像から、エッジ情報を抽出し、環境モデルに対応する数学モデルと比較する手法を用いる。以下に視覚による環境認識のために開発した2種類の輪郭線モデルの生成手法について述べる。

#### 3.3.1 基本立体に対する輪郭線数学モデルの生成

3次元空間において視点と視方向を与えた時のCSGモデルに対する輪郭線数学モデルの生成は、複数の基本立体による集合演算を行った際の合成部分の取り扱いが難しいことから、画像処理における問題点の1つとなっている。この問題点に対するアプローチとして、CSGモデルではなく、CSGモデルに使用される各基本立体に対する輪郭線数学モデル生成機能を開

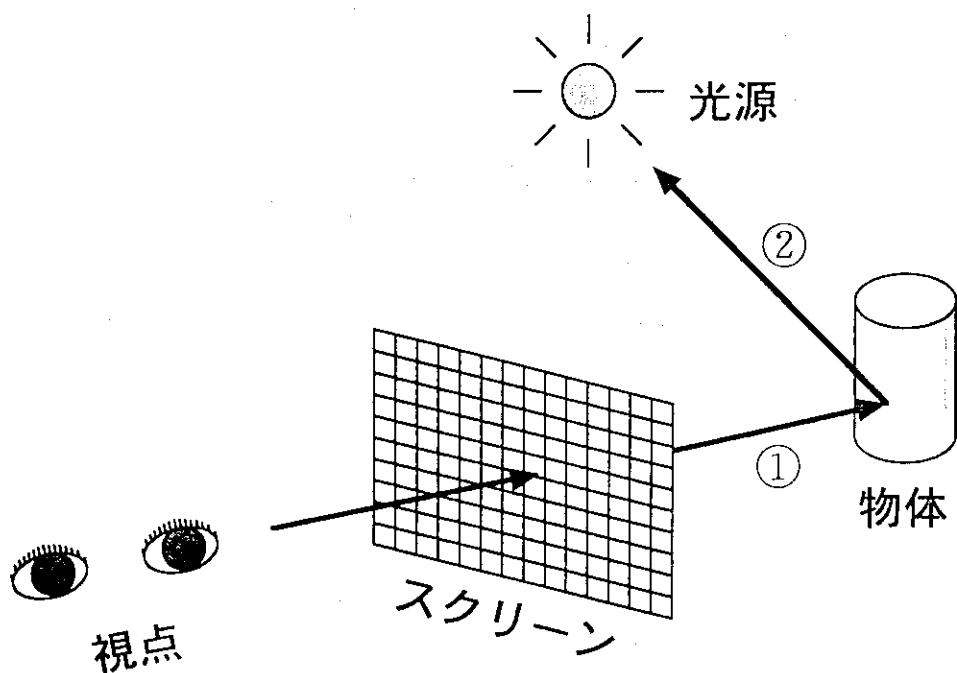


Fig. 3.2 Concept of Ray Tracing algorithm.

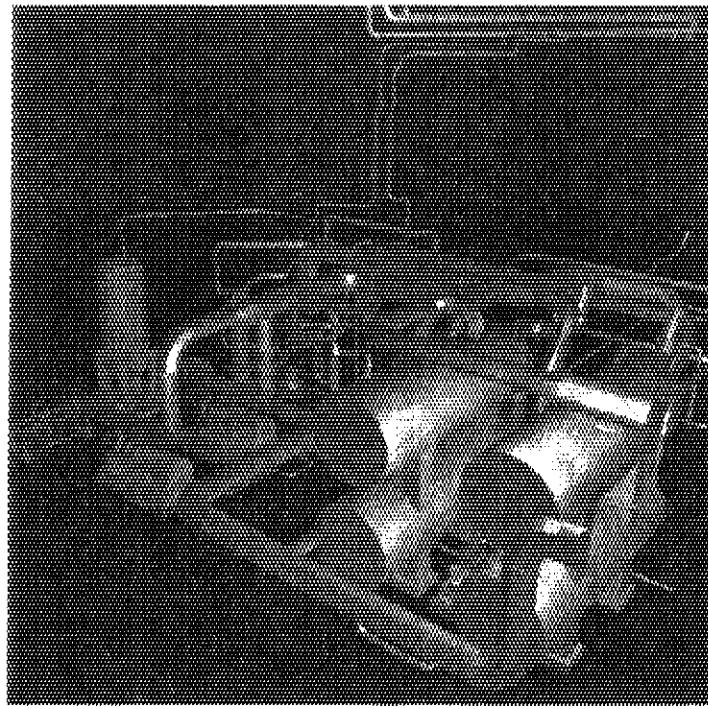


Fig. 3.3 Three dimensional image of JRR-3M.

発した。対象とした環境モデルは、JRR-3M (Fig.3.3) 及び模擬環境 (Fig.3.4) である。

#### (1) 輪郭線を記述する数学モデルの記述法

輪郭線を記述する数学モデルは、視方向ベクトルに直交する平面の一部として定義されるスクリーン上の2次のパラメータ関数とした。例えば、橜円体の輪郭を示す橜円のパラメトリック表現は次の式で表現される。

$$x = r_1 \cos \theta + a, \quad y = r_2 \sin \theta + b$$

#### (2) 各基本立体に対する輪郭線数学モデルの生成法

与えられた視点の座標を  $V = (V_x, V_y, V_z)$ , 視方向を  $E_0 = (u, v, w)$  とする。ただし,

$$u^2 + v^2 + w^2 = 1 \quad (3.1)$$

である。また、スクリーンを記述する平面を表現する方程式を

$$ux + vy + wz + d = 0 \quad (3.2)$$

とする。また、輪郭線を生成する基本立体の方程式を

$$\begin{aligned} f(x, y, z) &= A x^2 + B y^2 + C z^2 \\ &+ D xy + E yz + F zx + G x + H y + J z + K \end{aligned} \quad (3.3)$$

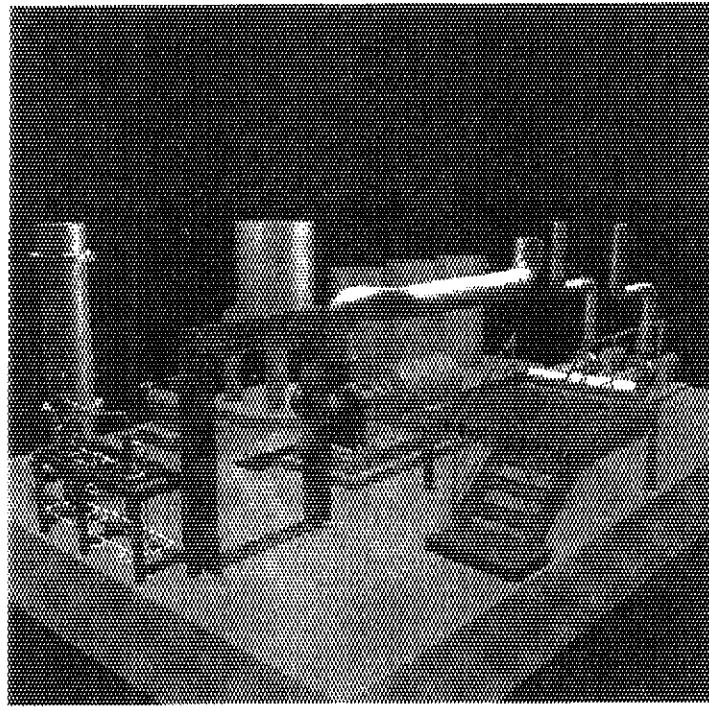


Fig. 3.4 Three dimensional image of mockup environment.

とする。即ち、基本立体の表面上の点  $(x, y, z)$  は、 $f(x, y, z) = 0$  を満たす。

i) 視点  $V$  から  $f$ への接線

いま、 $f$ 上の 1 点に対し、視点  $V$  から接線を引く。この接線の式を

$$x = l t + V_x, \quad y = m t + V_y, \quad z = n t + V_z \quad (3.4)$$

とする。ただし、

$$l^2 + m^2 + n^2 = 1 \quad (3.5)$$

である。

いま、この接線が  $f$ に接する接点の座標を  $C = (x_1, y_1, z_1)$  とする。この時の  $t$  の値を  $t_1$  とすると、式 (3.4) において、 $t = t_1$  とし、これを式 (3.3) に代入し、 $f(x_1, y_1, z_1) = 0$  と置くことにより、 $t_1$  に関する 2 次方程式を得る。この方程式は、

$$A(l t_1 + V_x)^2 + B(m t_1 + V_y)^2 + \dots = 0 \quad (3.6)$$

となる。 $C$ は、接点なので、式 (3.6) は、 $t_1$ について重根を持つ。つまり、式 (3.6) の  $t_1$  に関する判別式は 0 となる。この判別式を  $g$  とすると、 $g$  は、 $l, m, n$  に関する 2 次式であり、

$$g(l, m, n) = 0 \quad (3.7)$$

と書ける。

ii) 接線とスクリーンの交点

式(3.4)で表現される直線と式(3.2)で表現される平面の交点は、式(3.4)を式(3.2)に代入し、 $t$ に関して解くことで、求まる。この $t$ を $t_2$ とすると、 $t_2$ は、 $l, m, n$ の1次式で表現される。つまり、この1次式を $h$ とすると、

$$t_2 = h(l, m, n) \quad (3.8)$$

であり、交点の座標は、

$$x_2 = l t_2 + V_x, \quad y_2 = m t_2 + V_y, \quad z_2 = n t_2 + V_z \quad (3.9)$$

である。

### iii) スクリーン座標系

いま、スクリーンの基底ベクトルを $\vec{p}$ ,  $\vec{q}$ とする。 $\vec{p}$ を $z$ 軸に直交するように定めると、 $\vec{p}$ ,  $\vec{q}$ は次のように書ける。

$$\begin{aligned} \vec{p}' &= (v, -u, 0), & \vec{p} &= \vec{p}' / |\vec{p}'|, \\ \vec{q}' &= (uw, vw, -(u^2 + v^2)), & \vec{q} &= \vec{q}' / |\vec{q}'|, \end{aligned}$$

また、

$$\vec{o} = (0, 0, d/w)$$

とすると、スクリーン上の点 $x$ は、

$$x = \vec{o} + \alpha \vec{p} + \beta \vec{q} \quad (3.10)$$

と表現できる。

### iv) スクリーン上の輪郭線の方程式

まず、式(3.5), 式(3.7), 式(3.8), 式(3.9)を連立させて、視点 $V$ を始点とし、 $f$ に接する直線とスクリーン平面の交点を求める。この結果、この交点 $x(x_2, y_2, z_2)$ は、 $l, m$ あるいは $n$ の2次式として表現される。例えば、

$$x_2 = j_x(l) \quad (3.11)$$

$$y_2 = j_y(l) \quad (3.12)$$

$$z_2 = j_z(l) \quad (3.13)$$

と書ける。

次に、式(3.10)～(3.13)を連立させて、 $\alpha$ と $\beta$ の関係を求める。 $\alpha-\beta$ 空間における関係式が、輪郭線を記述する方程式である。本システムによって生成されたJRR-3M及び模擬環境に対する輪郭線画像を、それぞれFig.3.5及びFig.3.6に示す。また、円筒に対して上記処理を行った例を、次に示す。

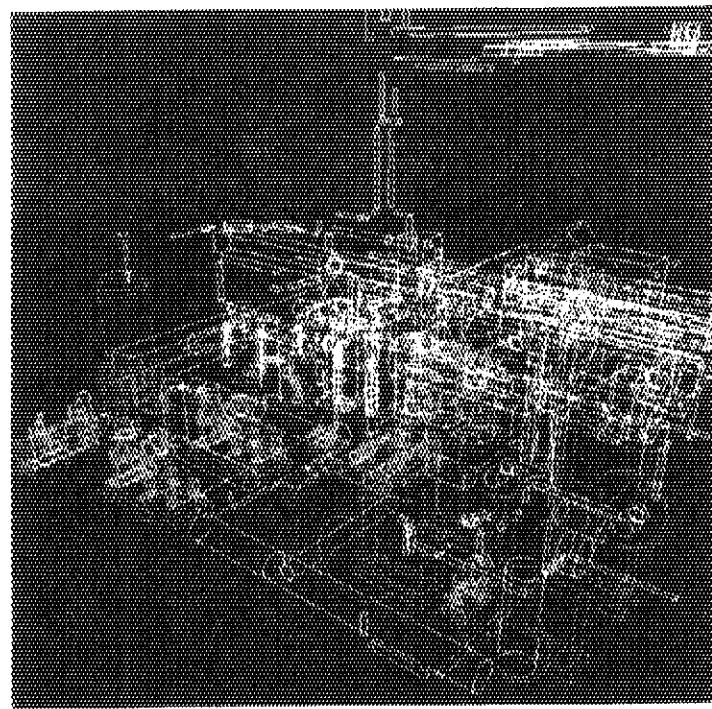


Fig. 3.5 Contour of solid primitives derived from the CSG model of JRR-3M.

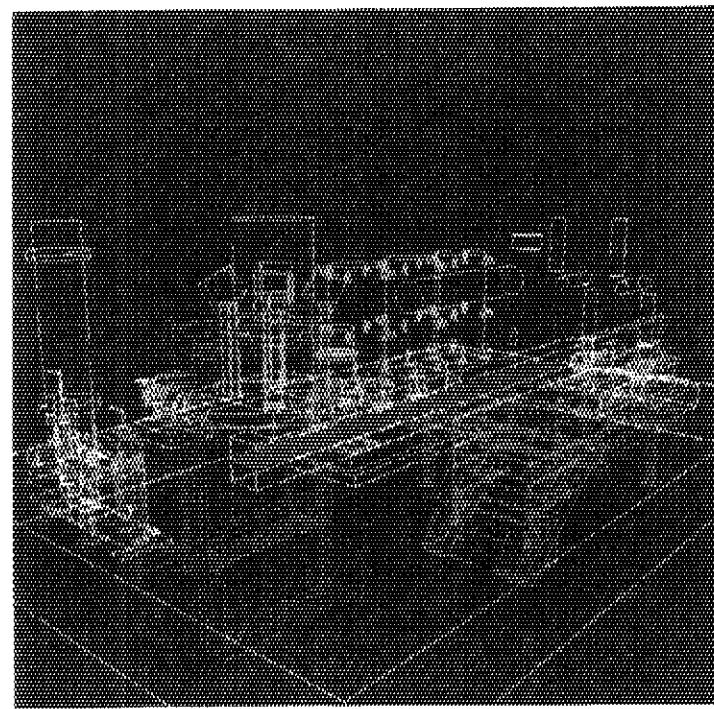


Fig. 3.6 Contour of solid primitives derived from the CSG model of mockup environment.

## (3) 円筒面に対する輪郭線モデルの生成

## i) スクリーン座標系

前節で述べたように、スクリーンの基底ベクトルを  $\vec{p}$ ,  $\vec{q}$  とすると、スクリーン上の点  $x(x, y, z)$  は、

$$x = \vec{o} + \alpha \vec{p} + \beta \vec{q} \quad (3.14)$$

と表せる。これを成分で表すと次のようになる。

$$x = p_x \alpha + q_x \beta \quad (3.15)$$

$$y = p_y \alpha + q_y \beta \quad (3.16)$$

$$z = o_z + q_z \beta \quad (3.17)$$

ここで、

$$\begin{aligned} p_x &= \frac{v}{\sqrt{v^2 + u^2}} \\ q_x &= \frac{uw}{\sqrt{u^2 w^2 + v^2 w^2 + (u^2 + v^2)^2}} \\ p_y &= \frac{-u}{\sqrt{v^2 + u^2}} \\ q_y &= \frac{vw}{\sqrt{u^2 w^2 + v^2 w^2 + (u^2 + v^2)^2}} \\ o_z &= \frac{d}{w} \\ q_z &= \frac{-(u^2 + v^2)}{\sqrt{u^2 w^2 + v^2 w^2 + (u^2 + v^2)^2}} \end{aligned}$$

である。

ii)  $\alpha - \beta$  空間における円筒の輪郭線

円筒の式、

$$\begin{aligned} (x - x_0)^2 + (y - y_0)^2 - r^2 \\ = x^2 + y^2 - 2x_0 x - 2y_0 y + x_0^2 + y_0^2 - r^2 = 0 \end{aligned} \quad (3.18)$$

において、

$$\begin{aligned} G &= -2x_0 \\ H &= -2y_0 \\ K &= x_0^2 + y_0^2 - r^2 \end{aligned}$$

とすると、円筒は式 (3.3) の形式で次のように表わせる。

$$f(x, y, z) = x^2 + y^2 + G x + H y + K \quad (3.19)$$

## a) 円筒の上下面の輪郭線

はじめに、円筒の上下面の輪郭線を求める。

視点V ( $V_x, V_y, V_z$ ) から任意の  $xy$  平面 ( $z = z_1$ ) の円筒上の点  $(x_1, y_1, z_1)$  に引いた直線の式を

$$x = (x_1 - V_x) t + V_x \quad (3.20)$$

$$y = (y_1 - V_y) t + V_y \quad (3.21)$$

$$z = (z_1 - V_z) t + V_z \quad (3.22)$$

とすると、これらから、

$$x_1 = \frac{(x - V_x)(z_1 - V_z)}{z - V_z} + V_x \quad (3.23)$$

$$y_1 = \frac{(y - V_y)(z_1 - V_z)}{z - V_z} + V_y \quad (3.24)$$

となり、この  $x_1, y_1$  を円筒式 (3.19) に代入すると、 $f(x_1, y_1, z_1) = 0$  を得る。

$$\begin{aligned} f(x_1, y_1, z_1) &= 0 \\ &= \left( \frac{(x - V_x)(z_1 - V_z)}{z - V_z} + V_x \right)^2 \\ &\quad + \left( \frac{(y - V_y)(z_1 - V_z)}{z - V_z} + V_y \right)^2 \\ &\quad + G \left( \frac{(x - V_x)(z_1 - V_z)}{z - V_z} + V_x \right) \\ &\quad + H \left( \frac{(y - V_y)(z_1 - V_z)}{z - V_z} + V_y \right) \\ &\quad + K \\ &= ((x - V_x)(z_1 - V_z) + V_x(z - V_z))^2 \\ &\quad + ((y - V_y)(z_1 - V_z) + V_y(z - V_z))^2 \\ &\quad + G (z_1 - V_z)(x - V_x)(z - V_z) \\ &\quad + G V_x(z - V_z)^2 \\ &\quad + H (z_1 - V_z)(y - V_y)(z - V_z) \\ &\quad + H V_y(z - V_z)^2 \\ &\quad + K (z - V_z)^2 \end{aligned} \quad (3.25)$$

この式 (3.25) に、前述の式 (3.15), 式 (3.16), 式 (3.17) で表されるスクリーン上の座標  $x, y, z$  を代入して  $\alpha$  と  $\beta$  の関係を求める。

$$\begin{aligned} 0 &= ((p_x \alpha + q_x \beta - V_x)(z_1 - V_z) + V_x(q_z \beta + o_z - V_z))^2 \\ &\quad + ((p_y \alpha + q_y \beta - V_y)(z_1 - V_z) + V_y(q_z \beta + o_z - V_z))^2 \\ &\quad + G (z_1 - V_z)(p_x \alpha + q_x \beta - V_x)(q_z \beta + o_z - V_z) \\ &\quad + G V_x(q_z \beta + o_z - V_z)^2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& + H(z_1 - V_z)(p_y \alpha + q_y \beta - V_y)(q_z \beta + o_z - V_z) \\
& + HV_y(q_z \beta + o_z - V_z)^2 \\
& + K(q_z \beta + o_z - V_z)^2 \\
= & (p_x(z_1 - V_z)\alpha + (q_x(z_1 - V_z) + q_z V_x)\beta - (V_x z_1 - o_z V_x))^2 \\
& + (p_y(z_1 - V_z)\alpha + (q_y(z_1 - V_z) + q_z V_y)\beta - (V_y z_1 - o_z V_y))^2 \\
& + G(z_1 - V_z)(p_x \alpha + q_x \beta - V_x)(q_z \beta + (o_z - V_z)) \\
& + GV_x(q_z \beta + (o_z - V_z))^2 \\
& + H(z_1 - V_z)(p_y \alpha + q_y \beta - V_y)(q_z \beta + (o_z - V_z)) \\
& + HV_y(q_z \beta + (o_z - V_z))^2 \\
& + K(q_z \beta + (o_z - V_z))^2 \\
= & ((p_x(z_1 - V_z))^2 + (p_y(z_1 - V_z))^2)\alpha^2 \\
& + ((q_x(z_1 - V_z) + q_z V_x)^2 + (q_y(z_1 - V_z) + q_z V_y)^2 \\
& + G(z_1 - V_z)q_x q_z \\
& + GV_x q_z^2 + H(z_1 - V_z)q_y q_z + HV_y q_z^2 + K q_z^2 \beta^2 \\
& + (2 p_x(z_1 - V_z)(q_x(z_1 - V_z) + q_z V_x) \\
& + 2 p_y(z_1 - V_z)(q_y(z_1 - V_z) + q_z V_y) \\
& + G(z_1 - V_z)p_x q_z + H(z_1 - V_z)p_y q_z)\alpha \beta \\
& + (-2 p_x(z_1 - V_z)(V_x z_1 - o_z V_x) - 2 p_y(z_1 - V_z)(V_y z_1 - o_z V_y) \\
& + G(z_1 - V_z)p_x(o_z - V_z) + H(z_1 - V_z)p_y(o_z - V_z))\alpha \\
& + (-2(q_x(z_1 - V_z) + q_z V_x)(V_x z_1 - o_z V_x) \\
& - 2(q_y(z_1 - V_z) + q_z V_y)(V_y z_1 - o_z V_y) \\
& + G(z_1 - V_z)(q_x(o_z - V_z) - q_z V_x) + 2GV_x q_z(o_z - V_z) \\
& + H(z_1 - V_z)(q_y(o_z - V_z) - q_z V_y) + 2HV_y q_z(o_z - V_z) \\
& + 2K q_z(o_z - V_z))\beta \\
& + (V_x z_1 - o_z V_x)^2 + (V_y z_1 - o_z V_y)^2 \\
& - G(z_1 - V_z)V_x(o_z - V_z) + GV_x(o_z - V_z)^2 \\
& - H(z_1 - V_z)V_y(o_z - V_z) + HV_y(o_z - V_z)^2 \\
& + K(o_z - V_z)^2
\end{aligned} \tag{3.26}$$

となり、任意の  $xy$  平面 ( $z = z_1$ ) で切られる円筒の断面は、スクリーン上で  $\alpha$  と  $\beta$  の 2 次式として表わせる。従って、 $z_1$  を円筒の上面または下面の  $z$  座標とすれば、上下面の輪郭線の式が作成できる。

### b) 円筒の側面の輪郭線

次に、円筒の側面の輪郭線を求める。a) で求めた上下面に対する 2 つの式で表わされる 2 次曲線に接する 2 本の直線の式が、円筒の側面の輪郭線の式となる。

## iii) 求めた式のパラメータ関数への変換

a) 2次曲線の中心を求める

2次曲線

$$a\alpha^2 + 2h\alpha\beta + b\beta^2 + 2g\alpha + 2f\beta + c = 0 \quad (3.27)$$

の中心の座標は、連立方程式

$$a\alpha + h\beta + g = 0 \quad (3.28)$$

$$h\alpha + b\beta + f = 0 \quad (3.29)$$

の解として、次のように与えられる。

$$\alpha_0 = \frac{-(b\alpha - f\beta)}{a\alpha + h\beta} \quad (3.30)$$

$$\beta_0 = \frac{-(h\alpha_0 + f)}{b} \quad (3.31)$$

b) 2次曲線を原点移動する

式(3.27)の方程式に、

$$\alpha = \alpha' + \alpha_0 \quad (3.32)$$

$$\beta = \beta' + \beta_0 \quad (3.33)$$

を代入すると、a)で求めた中心へ原点が移り式(3.27)は、

$$a\alpha'^2 + 2h\alpha'\beta' + b\beta'^2 + \bar{c} = 0 \quad (3.34)$$

となる。ここで、

$$\bar{c} = a\alpha_0^2 + b\beta_0^2 + 2h\alpha_0\beta_0 + 2g\alpha_0 + 2f\beta_0 + c \quad (3.35)$$

である。

c) 2次曲線を回転する

さらに、式(3.34)に対して、

$$\tan 2\theta = \frac{2h}{a - b} \quad (3.36)$$

で与えられる角θだけ軸を回転すれば、2次曲線の方程式は、

$$\bar{a}\bar{\alpha}^2 + \bar{b}\bar{\beta}^2 + \bar{c} = 0 \quad (3.37)$$

の形に直せる。ここで $\bar{a}, \bar{b}$ は、

$$t^2 - (a + b)t + ab - h^2 = 0 \quad (3.38)$$

の根で、 $h > 0$ なら大きい方が $\bar{a}$ 、 $h < 0$ なら小さい方が $\bar{a}$ である。

d) 2次曲線を媒介変数表示する

式(3.35)を媒介変数 $\phi$ を用いて表わすと、

$$\bar{\alpha} = -\sqrt{\frac{c}{a}} \cos(\phi) \quad (3.39)$$

$$\bar{\beta} = -\sqrt{\frac{c}{b}} \sin(\phi) \quad (3.40)$$

となる。ここで、 $0 \leq \phi < 2\pi$ の範囲で  $(\bar{\alpha}_i, \bar{\beta}_i), i = 1, N$ をもとめ、

$$(\alpha'_i, \beta'_i) = (\bar{\alpha}_i \cos(\theta) - \bar{\beta}_i \sin(\theta), \bar{\alpha}_i \sin(\theta) + \bar{\beta}_i \cos(\theta)) \quad (3.41)$$

さらに、

$$(\alpha_i, \beta_i) = (\alpha'_i + \alpha_0, \beta'_i + \beta_0), \quad i = 1, N \quad (3.42)$$

を計算して、スクリーン上の座標を求める。この点列を結ぶ線分を順に表示することで2次曲線を描くことができる。

### 3.3.2 多面体に対する輪郭線数学モデルの生成

輪郭線モデルの開発においては、上記述べたように、基本立体から直接輪郭線を表現する方程式を生成する機能に加え、ポリゴンの集合体（多面体）として表現される3次元物体の輪郭線を表示する機能を開発した。本機能は、上記3.3.1に記述したCSGモデル表現に用いられる基本立体の輪郭線生成と異なり、ポリゴン（本データベースにおいては、三角形）の集合体に対する輪郭線の生成である。以下に、この機能を実現するために必要な処理の概要を示す。

#### (1) 頂点リストの作成

ポリゴンは頂点と稜線によって記述できる。各物体を表現するポリゴンを構成する各頂点は、

- a) ポリゴンがその表面に位置する基本立体（変換前の基本立体）の情報（基本立体の識別子）、
- b) その頂点からの稜線と相手先の頂点の情報を持っている。

#### (2) 各頂点及び各辺のスクリーンへの投影

各ポリゴンの頂点及び辺を指定されたスクリーンへ投影する。投影法は、点投影（透視変換）とした。

#### (3) 稲線（輪郭線）の抽出

稲線（輪郭線）を抽出するために以下の処理を行う。

##### i) 内線消去（内点消去）

スクリーンへ投影した線分のうち、内線を消去する。ここで、内線とは次のとおり。即ち、スクリーンへ投影された2つのポリゴンP及びQがある辺Lを共有し、かつ、PとQの向きが同じ（与えられた視点に対し、共に正対している状態）である時、Lを内線という。

ここでは、物体を表現する多面体（三角形ポリゴンの集合体）の各辺について、以下の処理を行う。

- a) 処理対象となっている辺ABを一辺とするポリゴンが1つの場合、辺ABは稜線である。  
したがって、処理を終了する。辺ABが2つのポリゴンによって共有される場合、b)～d)の処理を行う。
- b) 辺ABを共有する2つの三角形、ABC及びABDについて、ABとACの外積及びABとADの外積、即ち、2つの三角形の法線ベクトル $\vec{a}$ 及び $\vec{b}$ を求める。
- c)  $\vec{a}$ と $\vec{b}$ の内積を求める。
- d)  $\vec{a}$ と $\vec{b}$ の内積が負である場合、上に述べた定義に従い、辺ABを内線とする。そうでない場合、辺ABを稜線とする。

### ii) 隠れ線の消去

使用した隠線消去アルゴリズム[3]は以下のとおり。

三角形ABCに関して、線分PQの観測状態を調べるため、視点Eを頂点とする三角形の各辺AB, BC, CAを通る平面で構成された無限長のピラミッドを考える(Fig.3.7)。

ピラミッド内の点で、視点Eより三角形ABCの後ろにあるものは観測できない。一方、三角形の前やピラミッドの外にある点は、この三角形に関して観測可能である。

Fig.3.7において、線分PQは、2点IとJでピラミッドと交わる。線分IJは観測できず、PIとJQは観測できる。

いま、2点P( $x_P, y_P, z_P$ ), Q( $x_Q, y_Q, z_Q$ )を通る直線を次式のベクトル方程式で表す。

$$\vec{EP} + \lambda \vec{r} \quad (3.43)$$

ここで、 $\vec{r} = (r_1, r_2, r_3) = \vec{PQ}$ ,  $r_1 = x_Q - x_P$ ,  $r_2 = y_Q - y_P$ ,  $r_3 = z_Q - z_P$ である。3点{E, A, B}を通る平面と上式で表される直線の交点に対する $\lambda$ を $\lambda_1$ とし、同様に、{E, A, C}及び{E, A, D}に対する $\lambda$ をそれぞれ $\lambda_2$ 及び $\lambda_3$ とする。

すべての*i* (*i* = 1, 3)について、 $\lambda_i \leq 0$ または $1 \leq \lambda_i$ の時、線分PQは、与えられた視点Eに関し観測可能である。また、ある*i*について、 $0 \leq \lambda_i \leq 1$ の時でも、Fig.3.8の場合、PQは観測可能となる。即ち、Fig.3.8の場合、 $0 \leq \lambda_1 \leq 1$ であるが、視点EからPQは観測可能である。このような場合を想定し、次の処理を行う。

いま、2点A, Bを通る直線を次式のベクトル方程式で表す。

$$\vec{EA} + \mu \vec{AB} \quad (3.44)$$

3点{E, P, Q}を通る平面と上式で表される直線の交点に対する $\mu$ を $\mu_1$ とし、同様に、2点A, Cを通る直線に対する $\mu$ 及び2点B, Cを通る直線に対する $\mu$ をそれぞれ $\mu_2$ 及び $\mu_3$ とする。すべての*i* (*i* = 1, 3)について、 $\mu_i \leq 0$ または $1 \leq \mu_i$ の時、線分PQは、与えられた視点Eに関し観測可能である。

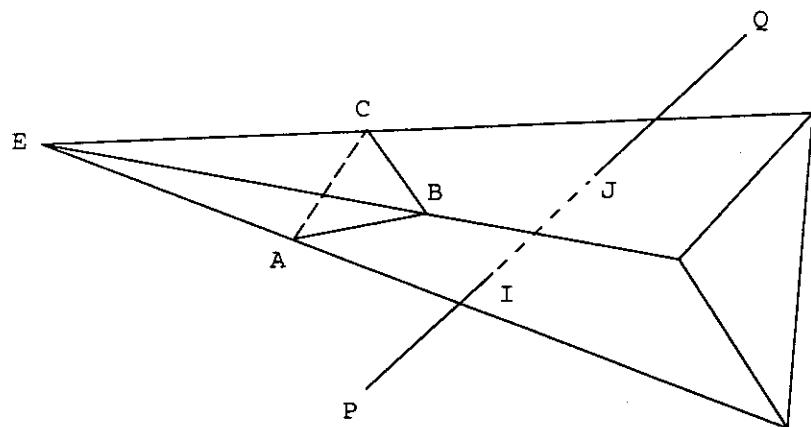


Fig. 3.7 Pyramid used in the investigation of hidden line.

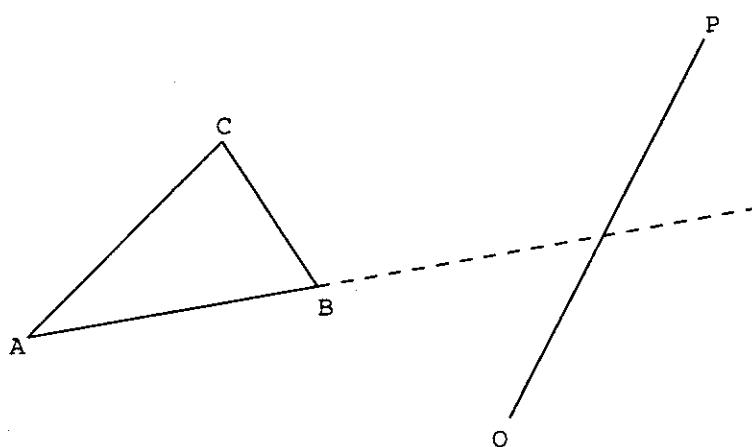


Fig. 3.8 A line segment PQ out of the pyramid.

#### (4) 処理結果の出力

処理結果をファイルへ出力する。表示されている輪郭線のスクリーン座標、世界座標系の座標、線分の色を出力する。なおスクリーン座標で0～1の間にクリッピングしたものが出力する。本システムによって生成されたJ R R - 3 M及び模擬環境に対する輪郭線画像を、それぞれ Fig.3.9及びFig.3.10に示す。

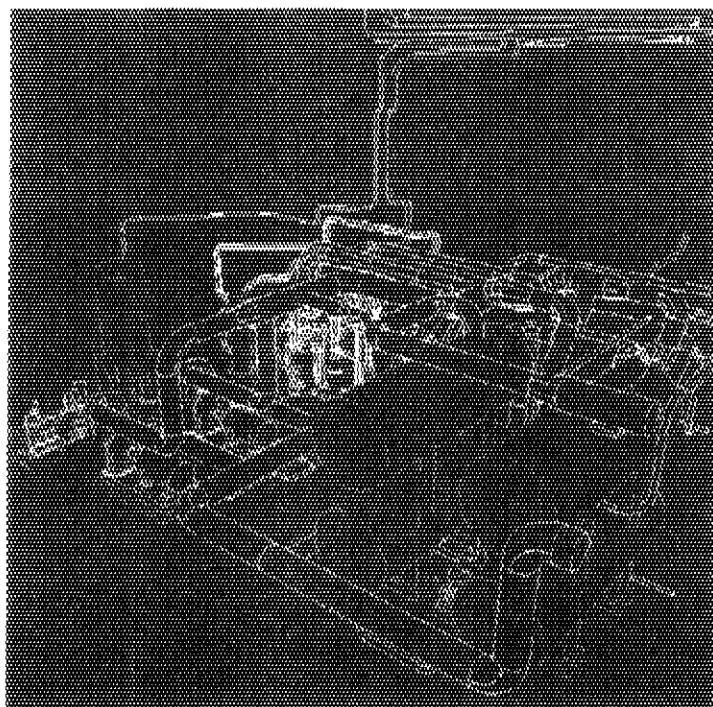


Fig. 3.9 Contour of objects in JRR-3M extracted from a set of polygon.

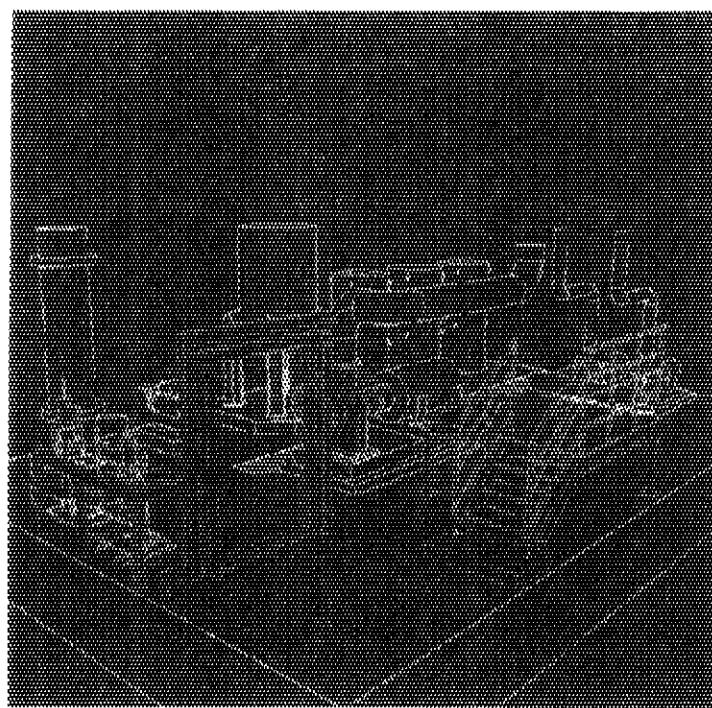


Fig. 3.10 Contour of objects in mockup environment extracted from a set of polygon.

## 4. 順方向光線追跡法による画像生成

現在開発中の順方向光線追跡法による画像生成システムについて述べる。従来の光線追跡法による画像生成においては、視点を始点としスクリーンを構成する各画素を通過する半直線、即ち、視線を追跡することで各画素に対する輝度値を計算する、いわゆる逆光線追跡法であった。しかし、この場合、1) 光源の幾何形状表現が困難である、2) 散乱反射及び鏡面反射のシミュレーションを物質と光の入射角度等によって比例配分あるいは変化させる、といった理由から生成した画像は人工的な質感を持ち、現実感に乏しいものであった。提案する手法は、光源からの光線を追跡し、光の反射をシミュレーションすることで上記問題点を解消し、自然な画像を生成するものである。シミュレーションにはモンテカルロ法を用いており、原子力分野で広く用いられている粒子輸送モンテカルロ・コードの分散低減法を利用することで計算時間の短縮を図っている。また、同じく粒子輸送モンテカルロ・コードの高速化を目的として開発された高速モンテカルロ装置により画像生成処理を高速化している。

### 4.1 順光線追跡法による画像生成プログラムの計算フロー及び計算モデル

画像生成アルゴリズムについて述べる。前述したように、光線追跡法においては、ある光源から出た光線を追跡し、スクリーンを構成する各画素を通過し目に到達する光線の強度（RG B 値の輝度値）を決定することで、画像が生成される。物体と衝突後の光線は、拡散／鏡面反射及び屈折のシミュレーションの結果に応じて新たな光線を発生する。画像生成プログラムの計算フローを Fig.4.1 に示す。また、本プログラムにおける計算モデルを以下に示す。

#### (1) 光源

光源から追跡する光線をサンプリングする。光源の幾何形状データ（強度分布を示す配光曲線）と一様乱数を用いて、光線の位置（始点）、方向をサンプリングする。サンプリング数は、領域の複雑さに応じて可変とする。また、各光線は、離散的な波長の強度分布を属性として持つ。本プログラムでは、太陽光がおおよそ 7 色に分光されることから、光源から発する光を 7 つの波長に分解し、物体表面の色彩を 7 つの波長に対する反射率としてモデル化する。本プログラムで使用する波長群と対応する色を Table4.1 に示す。

Table 4.1 Relation between color and wavelength.

色	紫	藍	青	緑	黄	橙	赤
波長	400nm	440nm	480nm	540nm	580nm	600nm	680nm
群番号	1	2	3	4	5	6	7

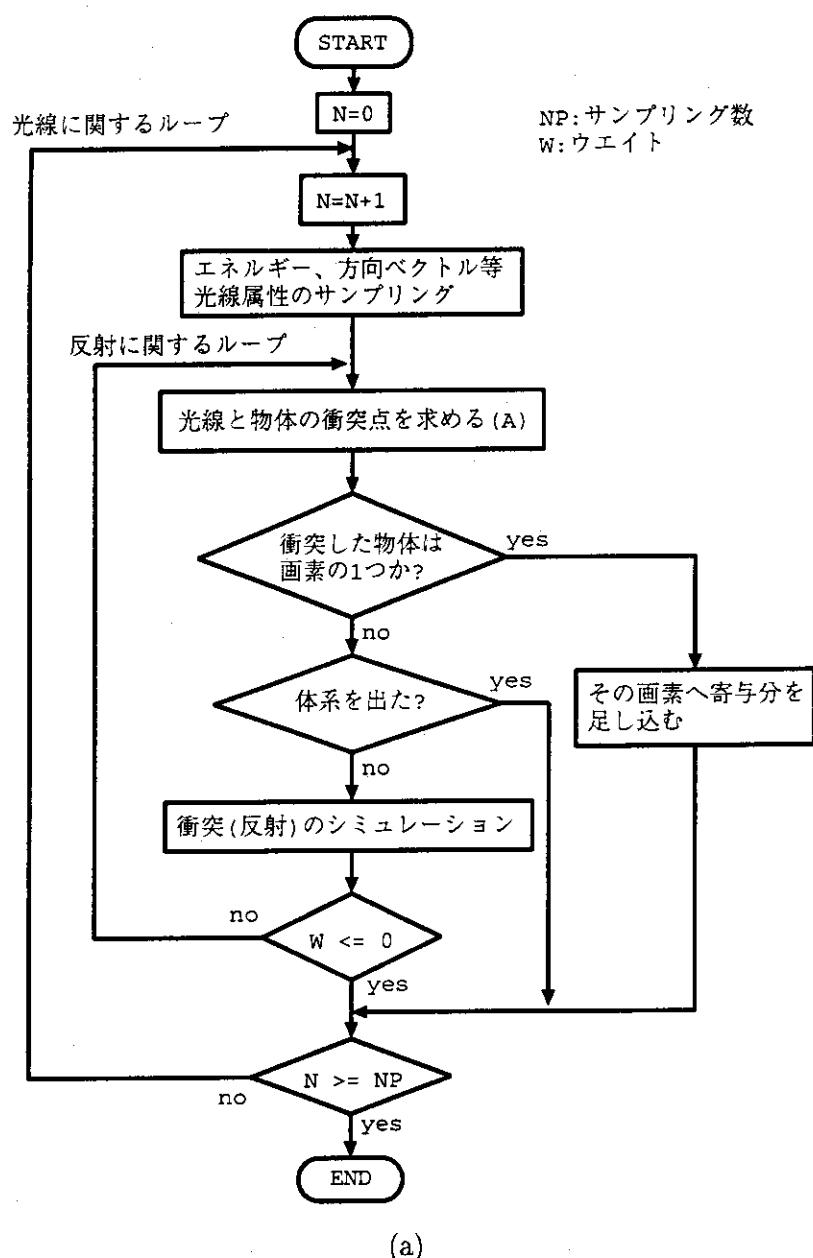


Fig. 4.1 Flow chart of Ray Tracing program by Monte Carlo method. (continue)

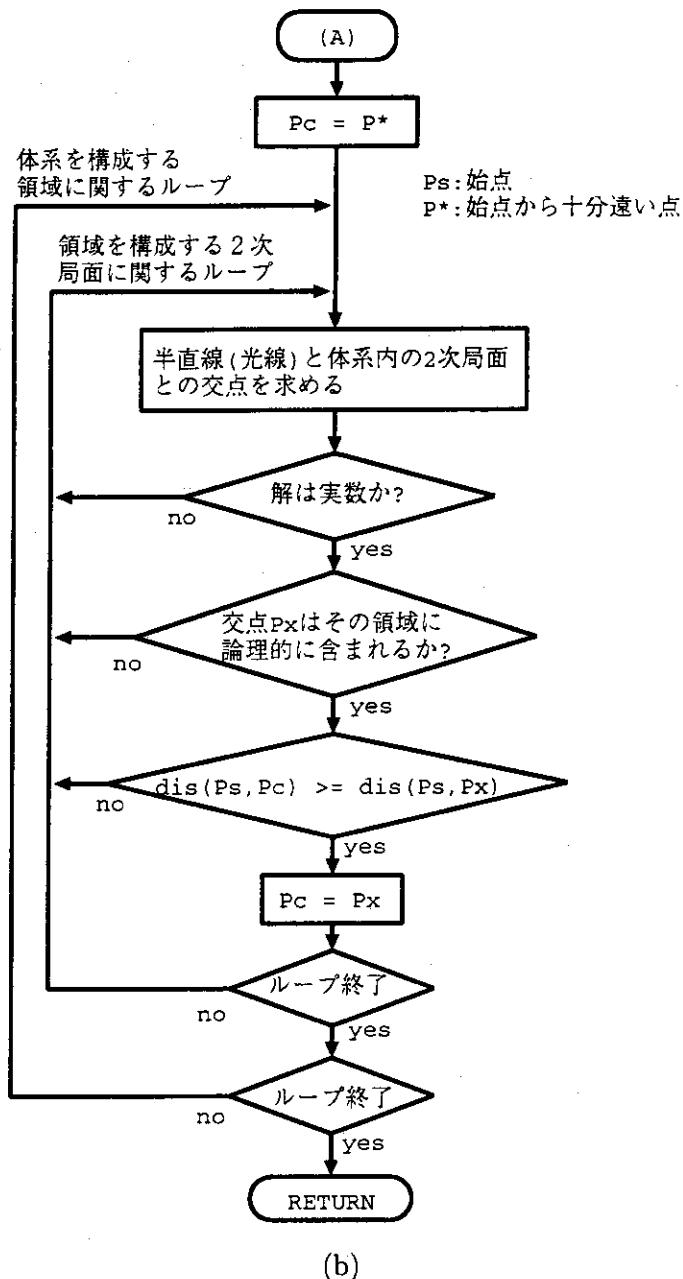


Fig.4.1 Flow chart of Ray Tracing program by Monte Carlo method. (continued)

また、本プログラムで扱う光源の幾何形状は、平行光線、線光源、点光源のみとする。平行光線とは、太陽光のような無限遠点からの光であり、この場合、体系内の光線の角度及び光のエネルギー（強度）は一定である、と考える。つまり、光のエネルギー（強度）が光源からの距離の2乗に反比例して減少する、という法則は考慮に入れない。また、線光源や点光源において配光曲線が定義されている場合の光線のサンプリングには、面の法線と光源との角度の関数として定義された光の強度を使用する。

## (2) 反射及び透過

本プログラムにおいては、光の衝突過程、即ち、拡散／鏡面反射及び透過をモンテカルロ・シミュレーションする。各光線は統計的な重要度を示すウェイト  $W$  を持つ。 $W$  の初期値は、1.0であり、衝突を起こす度に下記に示す吸収率に比例してその値は減少する（衝突における吸収率を  $\Sigma_a$  とすると、 $W = W * (1 - \Sigma_a / \Sigma_t)$ ）。ただし、ルシアン・ルーレット（粒子輸送モンテカルロ・コードで用いられている分散低減法）により生き残った光線については、その値を  $W_a$  で表現される平均値に  $W$  を設定し直す。スクリーンを構成する各画素に対する寄与分は、 $W * E$ （光線のエネルギー）によって計算される。吸収率及び反射率の関係は次の通り。

$$\Sigma_t = \Sigma_s + \Sigma_a \quad (4.1)$$

$$\Sigma_s = \Sigma_e + \Sigma_i + \Sigma_{tr} \quad (4.2)$$

ここで、

$\Sigma_a$  : 吸収率

$\Sigma_s$  : 反射率

$\Sigma_e$  : 鏡面反射率

$\Sigma_i$  : 拡散反射率

$\Sigma_{tr}$  : 透過率

である。 $\Sigma_a \sim \Sigma_{tr}$  は、表面の物質、光線のエネルギー、面の法線と光源との角度  $\theta$ 、波長の関数である。ただし、実際の計算においては、計算時間、使用する作業領域の制限等計算機資源を考慮してこれらの値の近似を行う必要がある。本プログラムで扱う衝突モデルは、次のとおり。

- a) 拡散反射
- b) 鏡面反射
- c) 透過

以下に、各衝突モデルに対するシミュレーションの概要を示す。

### i) 拡散反射による反射光成分

拡散反射においては、光があらゆる方向に均等に反射されていると考えるため、拡散反射された光線の強度変化は、視点の位置とは無関係に物体表面と入射光の角度で決定する。つまり、

光線と面の法線の間の角度で衝突後の光線の強度が決定される。これは、Lambert の余弦則と呼ばれ、これを用いて、拡散反射による強度変化を

$$E_{out} = E_{in} * R_D * \cos \theta \quad (4.3)$$

とする。ここで、 $E_{out}$ 、 $E_{in}$ は、それぞれ反射された光、入射光（光源からの光）の強度、 $R_D$ は物体表面の拡散反射率 ( $= \Sigma_i$ ) である。また、Fig.4.2 に示すように、 $\theta$ は面の法線と光源との角度である。光源として平行光線を用いた場合は、 $E_{in}$ を一定とする。通常、平行光線として無限遠点からの光つまり太陽光を想定しているためである。光源として線光源あるいは点光源を用いた場合は、光のエネルギー（強度）が光源と衝突点との距離  $r$  の 2 乗に比例して減衰するため、 $E_{in}$ に換えて、 $E_{in}/r^2$  を用いて光線の強度を計算する。

拡散反射後の光線の飛方向については、物体表面に相対する開空間に一様に分布するものとしてサンプリングする。

光線のウェイト  $W$  は、次のように変化させる。

$$W = W * \Sigma_i / \Sigma_t \quad (4.4)$$

## ii) 鏡面反射による反射光成分

鏡面反射によって物体表面において変化する光線の強度変化の計算には、Phong のモデルを用いる。Phong のモデルでは、鏡面反射による反射光の成分は、光線と入射光の面となす角度によって決まる。つまり、鏡面反射による視点に対する寄与分を

$$E_{out} = E_{in} * V(\theta) * \tan^n \phi \quad (4.5)$$

で表す。ここで、 $V(\theta)$  は物体表面の鏡面反射率 ( $= \Sigma_e$ ) である。 $E_{out}$ 、 $E_{in}$ は、それぞれ反射された光、入射光（光源からの光）の強度である。拡散反射と同様、光源として平行光線を用いる場合は、 $E_{in}$ は一定、点光源を用いた場合は、 $E_{in}$ に換えて、 $E_{in}/r^2$  を用いる。また、Fig.4.2 に示すように、 $\phi$  は視線と入射光のなす角度である。 $n$  は物体表面の滑らかさを表現する値で、 $n$  が大きくなると光沢のある面となる。一般にハイライトと呼ばれる曲面に生じる帯状の白い部分は、鏡面反射によって作られるものである。ここで、 $V(\theta)$  及び  $n$  は、物質によって決定される関数または値であり、さまざまな質感はこれらの値を変化させることにより得られる。

光線のウェイト  $W$  は、次のように変化させる。

$$W = W * \Sigma_e / \Sigma_t \quad (4.6)$$

## iii) 透過

透明な物体を表示するため、透過性の物体表面に光線が衝突するまで追跡し、その後、与えられた屈折率にしたがって方向ベクトルが変化する次の光線をさらに追跡する。方向ベクトルは、スネルの法則と呼ばれる次の式によって変化させる。

$$n_{out} * \sin \theta_{out} = n_{in} * \sin \theta_{in} \quad (4.7)$$

ここで、 $n_{out}$ 、 $n_{in}$ は、それぞれ屈折前の物体の屈折率、屈折後の物体の屈折率、である。物体表面において屈折する光線のエネルギーは、次の式によって変化する。

$$E_{out} = E_{in} * \Sigma_{tr} \quad (4.8)$$

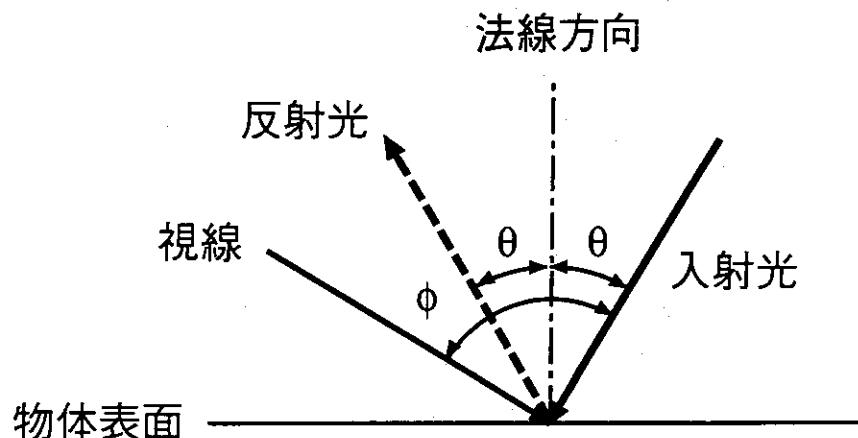


Fig. 4.2 Illustration of incident and reflection lights.

光線のウェイト  $W$  は、次のように変化させる。

$$W = W * \Sigma_{tr} / \Sigma_t \quad (4.9)$$

### (3) 追跡する光線の次数

本プログラムにおいては、追跡する光線の次数には制限を設けないものとする。即ち、追跡した光線が物体表面に衝突すると、さらに透過あるいは拡散／鏡面反射する光線を追跡する。ただし、追跡中の光線のウェイトが小さくなった場合、ルシアン・ルーレット等を行い、追跡を継続するか否かを決定するとともに、ウェイトを調整する。

## 5. おわりに

原子力用知能ロボット及び知能化プラントの基盤技術研究として実施している「人間動作シミュレーション・プログラム（H A S P : Human Acts Simulation Program）」における可視化システムについて述べた。

H A S Pにおいては、ソリッド・モデルを基本としてモデル化された原子力施設を対象に、様々な可視化機能が開発されている。光線追跡法による環境モデルの可視化、シミュレーション結果の実時間表示、視覚認識処理のための輪郭線モデルの生成、現在開発中の順方向光線追跡法による画像生成について述べた。

上記可視化処理における問題点は、大規模、複雑な環境における論理／数値シミュレーションにおける処理時間である。従来の人工知能技術は、円筒や直方体等の簡単な幾何形状で構成される環境において研究されてきたが、このような「積木の世界」で開発された技術あるいは手法を原子力施設のような複雑・大規模空間へ適用することは、使用する世界モデルの差異があまりにも大きいために極めて困難である。「積木の世界」を脱却したシステム開発を目指している本研究では、現在、ロボットの動作環境として実規模の原子力施設、J R R - 3 Mを想定し、世界モデルの構築及び可視化技術の開発を進めている。

### 参考文献

- [1] 秋元正幸 他：原子力知能化システム技術の研究（人間動作シミュレーション・プログラム：H A S P）平成5年度作業報告書，JAERI-Research 95-014(1995).
- [2] K. Higuchi et al. : Development of Monte carlo Machine for Particle Transport Problem, J. Nucl. Sci. Technol., Vol. 32 No. 10(1995).
- [3] Leendert Ammeraal : Cによるグラフィックス技法, P112~133, オーム社 (1993).

## Appendix A. ボクセル・マップ生成アルゴリズム

### (1) アルゴリズムの概要

まず、各ボクセルを構成する頂点と環境を構成するすべての3次元物体（領域）との包含関係を調べる。ボクセルを構成する8点のうち少なくとも1点がある3次元物体 $i$ に含まれれば、物体 $i$ は、そのボクセルを占有する。各ボクセルに対して、この処理を行い、ボクセル・マップを作成する。ボクセルを構成する各点が、ある物体に含まれるか否かの判定は、次の手法によって行う。

### (2) 点と3次元領域の包含関係の検出方法

基本立体の集合演算で表現される3次元領域は、各基本立体を構成する曲面に対する論理式で表現することができる。いま、判定の対象となる領域表現を  $a \cup b \cap c \cap d \cup e$  ( $a \sim e$  は、符号付き曲面番号) とする。3)において後述する関数を用いて、対象となる点と各曲面が作る半空間との関係を調べ、次のような論理式を作成する。この論理式における各要素は、各曲面に関する判定結果を示す。即ち、点が問題の半空間に含まれる時、1、それ以外の時、0である。 $0 \cup 1 \cap 1 \cap 1 \cup 0$  上記論理式に対する評価を行い、対象となる点がその領域に含まれるか否かを判定する。論理式の評価においては、交わり ( $\cap$ ) 部分の演算を合併 ( $\cup$ ) 部分の演算に優先して処理する。この処理において使用する演算は、交わり部分に対しては、論理積、合併部分に対しては、排他的論理和である。上記論理式の評価を Fig.A.1 に示す。また、円筒に対する包含関係評価の例を次に示す。

[円筒に対する包含関係評価の例] 底面の中心(0,0,0)、底面の半径10、中心軸がz軸に平行、高さ20の円筒は、以下の3つの曲面に分解される。

$$g1(x, y, z) = z - 20 \quad (A.1)$$

$$g2(x, y, z) = x^2 + y^2 - 100 \quad (A.2)$$

$$g3(x, y, z) = z \quad (A.3)$$

ここで、 $a, b, c$  をそれぞれ  $g1, g2, g3$  で表される曲面の番号とすると、3次元領域 $i$ の内部は、以下のように表現される。

$$-a \cup -b \cap c \quad (A.4)$$

ここで、上記表現に対する論理式を後述の関数を用いて作成し、その論理式を評価する。

### (3) 点と曲面との位置関係を調べる関数

#### i) 関数仕様

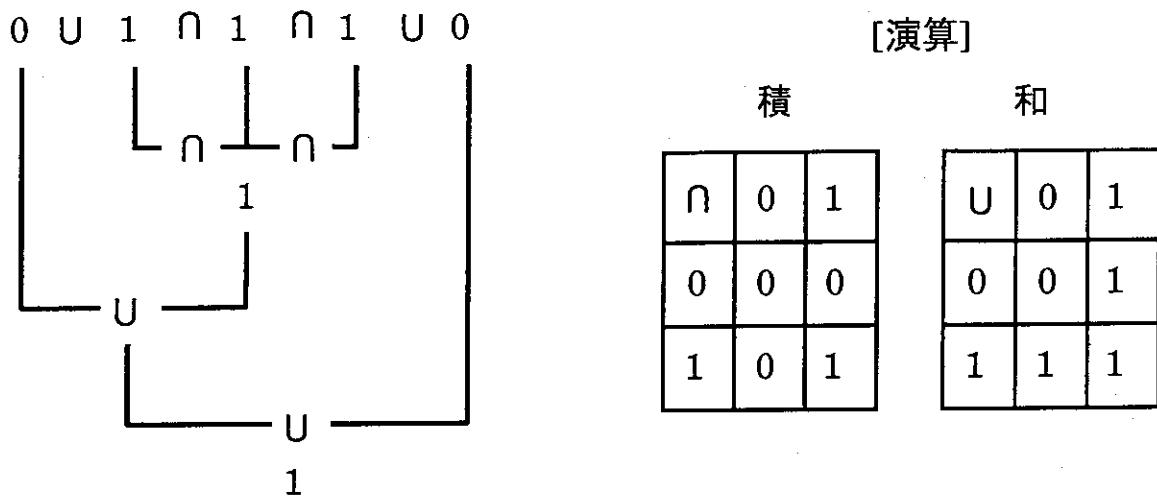


Fig. A.1 Evaluation of logical expression to investigate a relation between point and region.

機能：点  $r$  ( $r = (x, y, z)$ ) が、曲面  $i$  によって作られる半空間に含まれるか否かを判定する。  
含まれる場合、 $f = 1$ 、含まれない場合、 $f = 0$

引数： $r$  の 3 次元座標、曲面番号  $i$  (符号を含む)

#### ii) 球面に対する関数の例

対象となる点を  $r_1$ 、 $a$  を球面内部を表現する符号付き曲面番号、 $h(r)$  を半径  $R_1$ 、中心位置  $c_1$  の球面の式とする。つまり、

$$h(r) : |r - c_1| - R_1 \quad (\text{球}) \quad (\text{A.5})$$

である。曲面  $a$  によって作られる半空間と点との包含関係を調べるために、次のブール関数を考える。

$$g(r_1) = sign(a) * sign(h(r_1)) \quad (\text{A.6})$$

ここで、

$$sign(X) = 1 \quad (X \geq 0) \quad (\text{A.7})$$

$$= -1 \quad (X < 0) \quad (\text{A.8})$$

である。ここで、

$$f(r_1) = (g(r_1) + 1)/2 \quad (\text{A.9})$$

とすると、関数  $f$  は、上記 i) の機能を満足する。

## Appendix B. 多面体モデル生成アルゴリズム

以下に、施設形状データベースに CSG モデルとして登録された形状データから多面体モデルを生成する変換アルゴリズムの概要を示す。

- a) ある物体を構成する各基本立体を複数のパッチ（3次元空間における有限な2次曲面）に分解する。（例：円筒は2枚の平面パッチと1枚の2次曲面パッチに分解される。）
- b) 各パッチを近似する複数のポリゴン（三角形）を生成する。
- c) 基本立体間の論理演算を行った結果、物体表面に位置するポリゴンを決定する。各ポリゴンを構成する3つの頂点のうち少なくとも1点が、物体を構成する正の負号を持つすべての基本立体に包含されず、かつ論理式を満足する時、そのポリゴンは物体表面に位置するポリゴンであり、その他の場合、そのポリゴンは物体表面に位置するポリゴンではない。点と基本立体との包含関係の判断には、付録 A(2) の手法を用いる。
- d) あるポリゴンを構成する3つの頂点のうち、1点または2点が物体表面に位置する場合、1枚または、2枚の新たなポリゴンによる再構成を行う。

## 11. 閉会の辞

炉物理委員会

委員長代理 土橋敬一郎

共催の炉物理委員会を代表して締めくくりのご挨拶を申し上げます。まず、お忙しいところを多数参加いただき、2日間にわたり熱心に聞いていただいて有り難うございました。特に講師の方々は、専門でない参加者を考慮して分かり易くお話し頂いて感謝しています。

前回は炉物理委員会側が事務局を担当しまして、EWSの機能を駆使した新しい原子炉設計システムを主題にしてお集まりいただきました。今回は可視化技術というソフトウェア共通のトピックスの研究会を、コード委員会側が事務局を担当して開催されました。お世話いただいた計算科学推進センターの方々にお礼申し上げます。

2日間のご講演を振り返って、まとめというより、印象を述べます。まず富士通の山本さんには富士通の可視化技術への取組みばかりでなく、今後の動向をお話しいただきました。別の方の講演で、"ある技術を開発したら商品化されたものが出てしまったことがある"とのことで、今後の動向を考慮しつつ、研究開発を行う必要性を感じました。Numerical Visualizationの例として、計算科学の渡辺さんにはレイリーベルナル対流のシミュレーションの結果を画像で見せていただきました。KEKの波戸さんにはEGS4を用いた核反応の粒子の軌跡を3次元で表示していただきました。高温工学の功刀さんにはレーザーで照射された金属膜が解けて蒸発する様子や複雑な流れの様子を分かり易く見せていただきました。環安の山沢さんには筑波山周辺をモデルにした大気拡散の様子を流れ渦よどみが良くわかるよう見せていただきました。Experimental Visualizationとしては神戸大の竹中さんにNeutron Radiographyを用いて測定した液体金属の流れをベクトル線図にして見せていただきました。癌研の伊藤さんは事務局の手落ちでお話しいただけなくなってしまったことになりました。東大の岡本さんには流れを見ることから進んで定量情報の取得に至ってScientific Visualizationと呼ばれることを3次元流速分布の予測を例にお話しいただきました。原安工の近藤さんはROSA実験の全現象が実時間で把握できる可視化システムを紹介していただきました。これまでお話しいただいたいわゆるVisualizationとは内容が異なりますが、日立の横田さん小林さんには従来の配管設計を中心とするCAEと工程管理とを知的に総合した建設シミュレーションシステムを紹介していただきました。最後に計算科学の樋口さんには原子炉知能ロボットシミュレーションに関わる個々の要素技術の開発の現状を紹介いただきました。

最後に、炉物理分野ではVisualizationにそれほど努力しなかったこともあって技術的に遅れています。この研究会の成果を学びとって将来は優れたものをお紹介することができるよう努力することをお誓いして、締めくくりの挨拶とさせていただきます。

## 付録 出席者名簿

## 所外出席者（順不同）

氏名	所属
青木 保	(株) 富士電機
青山 三男	(株) 間組
新井 健司	(株) 東芝 原子力技術研究所
伊藤 啓子	(株) カナザワコンピュータサービス
上原 丘	(株) 三菱重工業 原子力応用技術部
漆原 広	(株) 日立エンジニアリング システム研究所
大竹 浩志	原子燃料工業 KK
岡 芳明	東京大学 工学部
岡本 孝司	東京大学 工学部
岡本 充啓	(株) 東電ソフトウェア 炉心管理システム部
加藤 克海	(財) 高度情報科学技術研究機構
倉橋 智彦	東京大学 工学部
源田 健寿	CRC 総合研究所
越塚 誠一	東京大学 工学部
児玉 道輝	(株) 富士通 科学システム統括部
小林 康弘	(株) 日立製作所 日立研究所
小堀 登司英	(株) 東洋電子計測
佐藤 理	(株) 三菱総合研究所
小泉 淳一	(株) カナザワコンピュータサービス
柴崎 博晶	(株) 川崎重工業 関東技術研究所 原子力基礎技術部
鈴木 厚志	HEC CE 部 反解析 gr
鈴木 克彦	(株) 日本原燃
鈴木 信太郎	(株) 富士通 外来研究員
鈴木 忠和	(財) 高度情報科学技術研究機構
鈴木 友雄	(財) 高度情報科学技術研究機構
末松 和代	航空宇宙技術研究所
竹中 信幸	神戸大学 工学部
夏目 智弘	三菱重工業
波戸 芳仁	高エネルギー物理学研究所
真木 紘一	(株) 日立製作所 日立研究所
鍋本 豊伸	(株) 石川島播磨重工業 原燃技術部
仁井田 浩二	(財) 高度情報科学技術研究機構
西田 浩二	(株) 日立製作所 電力電機開発本部
橋本 道夫	(株) 富士通 R&D システム部
長谷川 幸弘	(財) 高度情報科学技術研究機構

## 所外出席者（順不同）

氏名	所属
樋口 哲二	(株) 富士通 R&D システム部
更田 豊治郎	(財) 高度情報科学技術研究機構
町田 昌彦	(株) 富士通 外来研究員
三浦 俊正	船舶技術研究所
峰瀬 正祥	三菱電機
室伏 昭	(株) カナザワコンピュータサービス
山田 文昭	動燃 もんじゅ建設所
山本 朝男	(株) 日立エンジニアリング CE 部
山本 誠	(株) 富士通 科学システム統括部
湯地 弘幸	(株) 日立製作所 電力電機開発本部
横田 究	(株) 日立製作所
吉川 曜	(株) 日立エンジニアリング
吉田 弘幸	(財) 高度情報科学技術研究機構
渡部 隆	(株) 川崎重工業

## 所内出席者（順不同）

氏名	所属
功刀 資彥	高温工学部 热利用システム研究室
近藤 昌也	原子炉安全工学部 热水力安全研究室
中村 秀夫	原子炉安全工学部 热水力安全研究室
柴本 泰照	原子炉安全工学部 热水力安全研究室
山沢 弘実	環境安全研究部 環境物理研究室
木名瀬 栄	保健物理部 個人線量管理課
中村 清宣	保健物理部 放射線管理第3課
福谷 哲	保健物理部 放射線管理第1課
鶴野 晃	研究炉部 研究炉技術開発室
松林 政仁	研究炉部 研究炉技術開発室
津幡 靖宏	NUCEF 試験室 試験計画課
松崎 誠	技術部 エレクトロニクス課
山根 祐一	燃料サイクル安全工学部 臨界安全研究室
川俣 陽一	那珂研 JT-60 第1試験室
秋葉 賢一	那珂研 JT-60 第1試験室
新藤 隆一	大洗研 HTTR 開発部
白石 忠男	大洗研 計画課
赤津 正浩	バックエンド技術部 廃棄物処理技術試験室

## 所内出席者（順不同）

氏名	所属
土橋 敬一郎	原子炉工学部
国井 克彦	原子炉工学部 受動的安全炉研究室
吉田 啓之	原子炉工学部 受動的安全炉研究室
山根 剛	原子炉工学部 炉物理実験研究室
秋濃 藤義	原子炉工学部 炉物理実験研究室
菊地 康之	原子炉工学部 核データセンター
柴田 恵一	原子炉工学部 核データセンター
千葉 敏	原子炉工学部 核データセンター
深堀 智生	原子炉工学部 核データセンター
中川 正幸	原子炉工学部 原子炉システム研究室
森 貴正	原子炉工学部 原子炉システム研究室
藤村 統一郎	原子炉工学部 原子炉システム研究室
久語 輝彦	原子炉工学部 原子炉システム研究室
向山 武彦	原子炉工学部 高速路物理研究室
岡嶋 成晃	原子炉工学部 高速路物理研究室
竹本 吉成	FCA
鈴木 勝男	原子炉工学部 制御知能工学研究室
小手川 洋	原子炉工学部 粒子線利用研究室
西田 雄彦	原子炉工学部 消滅処理システム工学研究室
木村 守	原子炉工学部 炉工学施設管理室
佐藤 隆	原子炉工学部 炉工学施設管理室
小柳 大作	原子炉工学部 事務室
横田	原子炉工学部 事務室
根本	原子炉工学部 事務室
綿引	原子炉工学部 事務室

## 所内出席者（順不同）

氏名	所属
浅井 清	計算科学技術推進センター
秋元 正幸	計算科学技術推進センター
鷲木 英雄	計算科学技術推進センター 数値実験技術開発グループ
渡辺 正	計算科学技術推進センター 数値実験技術開発グループ
久米 悅雄	計算科学技術推進センター 並列処理支援技術開発グループ
大谷 孝之	計算科学技術推進センター 並列処理支援技術開発グループ
大田 敏郎	計算科学技術推進センター 並列処理支援技術開発グループ
松山 雄次	計算科学技術推進センター 並列処理支援技術開発グループ
大西 亮一	計算科学技術推進センター 並列処理支援技術開発グループ
武宮 博	計算科学技術推進センター 並列処理基本システム開発グループ
樋口 健二	計算科学技術推進センター 並列処理基本システム開発グループ
川崎 琢治	計算科学技術推進センター 並列処理基本システム開発グループ
本間 一朗	計算科学技術推進センター 並列処理基本システム開発グループ
岩橋 理彦	計算科学技術推進センター 並列処理計画管理室
市原 潔	計算科学技術推進センター 並列計算法開発グループ
佐藤 滋	計算科学技術推進センター 並列計算法開発グループ
田中 靖久	計算科学技術推進センター 並列計算法開発グループ
藤井 実	計算科学技術推進センター 情報システム管理課
原田 裕夫	計算科学技術推進センター 情報システム管理課
神成 政明	計算科学技術推進センター 情報システム管理課
竹森 聰司	計算科学技術推進センター 事務室
蛭田 国男	計算科学技術推進センター 事務室
木村 美也子	計算科学技術推進センター 事務室
大和田 和子	計算科学技術推進センター 事務室