

JAERI - M
90-100

計算結果の可視化

1990年7月

鶴岡 卓哉^{*}・石黒美佐子

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

JAERI-M 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、お申しこしください。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。

JAERI-M reports are 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.

計算結果の可視化

日本原子力研究所東海研究所計算センター

鶴岡 卓哉*・石黒 美佐子

(1990年6月1日受理)

計算結果の可視化は、物理現象をより良く理解するために不可欠な手段となってきた。原研においても、計算結果のアニメーション化の試行を昭和63年度末より開始した。平成元年度までの試行では、U字管内の熱流動挙動、レーザー同位体分離過程において電子ビームに加熱された溶融金属片内の熱流動挙動、及び高温ガス炉炉心におけるキセノン振動の3例に対して計算結果のアニメーション化を実施した。各アニメーション画面は、それぞれ数分の映像としてビデオに収められている。

画像作成には、3次元カラー・グラフィックス・システム用ソフトウェア FACOM CGMS を用いて、M-780、又は VP により画像計算を行った。

本報告書では、アニメーション化のために用いた種々の可視化手法について説明する。

Visualization of Computed Results

Takuya TSURUOKA^{*} and Misako ISHIGURO

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

(Received June 1, 1990)

Visualization of computed results has become an indispensable means to get better understanding of physical phenomena. In this circumstances, a trial of visualization has started at JAERI in 1989. The examples, tried so far, are animations of three kinds of physical phenomena: heat flow behavior in a curved pipe, transient behavior of molten metals heated by electron beam in laser isotope separation process, and Xenon-induced oscillation behavior in the core of the high temperature gas-cooled test reactor. Each animated graph is recorded on a video tape of several minutes.

Three-dimensional color graphics software FACOM CGMS, which runs on FACOM VP or M-780 systems, has been used for this purpose. This report describes the visualization methods used for these graphic applications.

Keywords: Visualization, Animation, FACOM CGMS, Graphics System, Frame, Computer Graphics, Heat Flow, Atomic Vapor Laser Method, Xenon-induced Oscillation

* Nuclear Energy Data Center

目 次

1. はじめに	1
2. グラフィックス・システムの概要	2
2.1 CGMS の概要	2
2.1.1 CGMS のソフトウェア体系	2
2.1.2 CGMS のシステム構成	6
2.2 ハードウェア・システム	6
2.2.1 ホスト計算機	6
2.2.2 画像処理装置	6
2.2.3 VTR 装置	6
2.2.4 フィルム・レコーダ	6
2.2.5 WDS	7
3. シミュレーション計算の概要	12
3.1 U字管内の熱流動	12
3.2 原子炉レーザー同位体分離過程における金属片溶融	12
3.3 高温ガス炉炉心におけるキセノン振動	13
4. アニメーション	18
4.1 アニメーションの作成手順	18
4.2 静止画の作成方法	18
4.3 台本	19
4.3.1 物理量の表現方法	19
4.3.2 物体の表現方法	21
4.3.3 時間割表	26
5. 使用計算時間	47
6. おわりに	48
謝 辞	49
参考文献	49

Contents

1. Introduction	1
2. Outline of graphics system	2
2.1 Outline of CGMS	2
2.1.1 Software system of CGMS	2
2.1.2 Configuration of CGMS	6
2.2 Hardware system	6
2.2.1 Host computer	6
2.2.2 Graphic processing system	6
2.2.3 Video tape recorder	6
2.2.4 Film recorder	6
2.2.5 Word and data processing system	7
3. Outline of simulation	12
3.1 Heat flow behavior in a curved pipe	12
3.2 Transient behavior of molten metals heated by electron beams in the atomic vapor laser isotope separation process	12
3.3 Xenon-induced oscillation behavior in the core of high temperature gas-cooled test reactor	13
4. Animation	18
4.1 Animation drawing process	18
4.2 Frame generation method	18
4.3 Scenario	19
4.3.1 Representation for physical quantities	19
4.3.2 Representation for objects or surfaces	21
4.3.3 Time table	26
5. Required computing time	47
6. Conclusion	48
Acknowledgements	49
References	49

1. はじめに

原子力コード利用の高度化の一環として、原子力分野における計算結果をカラー・グラフィックス・システムを用いてアニメーションで表示することを試みた。

日本原子力研究所（以下 原研）では、スーパーコンピュータなどを利用した様々な解析がなされ、計算機の高性能化と伴ってその出力結果も膨大なものとなって来ている。これらの数値データは目で見て理解できる範囲を越えており、3次元画像、動画などで可視化することによって人間により分かり易く理解できるようにすることが原研においても必須となってきている。一方、近年の可視化技術の動向を見れば、比較的安価なハードウェアの出現、3次元画像処理ソフトの標準化など実用化面での著しい進歩が見られる。

原研では、計算結果は日本語ライン・プリンターなどを使って線画で表現することが大勢を占め、同種の研究所に比べて計算結果の映像化（Visualization）への対応が遅れていることが指摘されている。計算センターでは、この状況に鑑み、1989年始めから現状で利用出来るグラフィックス環境のもとに計算結果の映像化の試みを行ってきた。原子力分野で代表的なテーマを選び、富士通(株)情報処理システム・ラボラトリ（以下 シスラボ）の3次元映像化装置を使用して計算結果のアニメーション化を実施した。これによって、映像化技術の蓄積を図ると共に、原子力分野の計算に対する3次元映像化のあり方を検討し、将来において原研での“Visualization”への取り組みの足掛かりを得ることを目的とした。

このため、富士通(株)のソフトウェアである CGMS⁽¹⁾ (Computer Graphics and Movie System) が試験的に原研に導入された。コンピュータ・グラフィックス・システムとしては、通常はグラフィックス専用ワーク・ステーションが使用されることが多いが、CGMS は VP-100 や M-780 上でも実行出来るので、原研でのソフトウェア開発が可能である。しかし、ハードウェアについては、現在、原研には作成した画像を画面で表示する装置がないので、シスラボの機械を使用して、アニメーションを作成した。

アニメーションとは、形の若干異なった画を連続的にしかも高速で表示することにより、動いている様に見える画のことを言い、アニメーション化は以下に示す3つの例について行った。すなわち、原子炉配管をモデル化した U字管内の熱流動挙動、原子炉レーザー同位体分離過程において電子ビームに照射された溶融金属片内の熱流動挙動、及び高温ガス炉炉心の動特性の一端であるキセノンによる出力密度の振動である。これらは何れも直接人間の目で観察することが出来ない現象であり、数値計算結果をアニメーションで表現することが、より深い現象の理解に役立つものである。

本報告では、まず2章でグラフィックス・システムの概要を、3章でシミュレーション計算の概要を、4章でアニメーションの作成方法及び3例題に対する物理量の可視化手法を、5章ではアニメーション作成に使用した計算時間を述べ、最後にこれらの成果と知見、及び今後の計画について述べる。

2. グラフィックス・システムの概要

本アニメーション作成に用いたグラフィックス・システムは、ソフトウェアではCGMS、ハードウェアでは富士通画像情報システム（Fujitsu Integrated Visual Simulation System 以下FIVIS）を核とする画像機器群によって構成されている。

本章では、ソフトウェアとハードウェアの概要について述べる。

2.1 CGMS の概要

CGMSは、数値計算の出力結果を可視化することを目的としたグラフィックス・ソフトウェアであり、主に科学技術計算を指向している。CGMSで画像表示される幾何形状は、「B-Reps」(Boundary Representation) 方式⁽²⁾のモデリングが施され、ソリッド・モデルとして表現される。隠線・隠面処理には、スキャン・ライン型Z-バッファ・アルゴリズム⁽³⁾が用られている。また、画像計算はアルゴリズム上、総てスカラ処理で行われる。

機能の特徴としては、まず第1に対話型処理によって結果を得ることが出来る。第2に1～3次元データをそのまま取り扱うことが出来る。第3に出力画像としては線で構成される画（以下線画）と陰影処理を施した面塗り画（以下 面画）の何かを選択出来る。第4に出力装置が日本語ライン・プリンターから始まって3次元画像出力装置FIVIS迄多様である。第5にVTRの制御によって、アニメーションを作成を行うことが出来る。そして、最後にホスト計算機の拡張記憶領域を使用することによって巨大データを取り扱うことが出来る。

以下では、CGMSのソフトウェア体系とシステム構成について述べる。

2.1.1 CGMS のソフトウェア体系

CGMSには、TSS環境下で動作する会話型CGMSとアプリケーション・プログラムの一部としてバッチ・ジョブ中で動作するバッチ型CGMSがあり、利用目的に応じた使い方が出来る。

Fig. 2.1にCGMSのソフトウェア体系を示す。

会話型CGMSでは、対話的に処理を進めることによって、迅速に結果入手することを目的としている。そのため、FORTRANに準拠した命令セットが用意されており、入出力、代入、繰り返し、条件判定、及び配列や変数の宣言を行うことが出来る。これらの処理を行うのがカーネル・コマンドである。また、カーネル・コマンドによる処理によって数値計算結果を使い易く加工した後、グラフィックス・コマンドによって画像を構築してゆく。グラフィックス・コマンドの詳細については以下に述べる。

バッチ型CGMSでは、アプリケーション・プログラム内における定型処理を目的としている。そのため、会話型CGMSのグラフィックス・コマンドと同様の処理を行うバッチ処理用のサブルーチン・ライブラリがある。

グラフィックス・コマンド

Fig. 2.1 に示される様に、グラフィックス・コマンドは、処理の機能によって 14 個のカテゴリに分けることが出来る。

ここでは、グラフィックス・コマンドの処理内容を CGMS のマニュアル⁽¹⁾に基づいてカテゴリ別に概説する。

(1) ビューイング

ビューアイングとは、出力装置上に表示される対象形状、又は図形・イメージの見え方を決めることがある。

2 次元のグラフィックスの場合のビューアイングを決めるのはウインドウとビューポートの設定だけである。しかし、3 次元グラフィックスの場合のビューアイング・パラメータを決めるのは一般的には煩雑とされている。その理由を示す。3 次元物体は物理的な意味を持つ空間から、X, Y, Z の各方向を 0 ~ 1 の値に規格化された世界座標系と呼ばれる空間に一旦写像される。そして、世界座標系を視平面と呼ばれる 2 次元平面上に投影した時の像が、出力装置に表示される。

本アニメーションでは、3 次元グラフィックスのビューアイングに簡単な平行投影、又は透視投影によるビューアイングを用いた。Fig. 2.2 に平行投影によるビューアイング、Fig. 2.3 に透視投影によるビューアイング設定を示す。

(2) プリミティブと属性

CGMS の図形プリミティブには線、2 次元物体、3 次元物体、曲面、マーカー、文字等のプリミティブ以外に物理量に関係した軸、矢印、曲面、2 次元及び 3 次元の物理量プリミティブが用意されている。

属性はプリミティブの寸法、色、物理量などであり、属性値はそれが属性コマンドで変更されるまでは現在の値 (Current Attribute) を保持する。

(3) セグメント

図形プリミティブは、意味のある形状として一つにまとめてセグメントとして定義する。その際プリミティブ属性もセグメント内に含ませることが出来る。セグメント間では階層構造を持つことが出来る。また、セグメントにはセグメント・モデリング変換を施すことが出来、そのセグメントに含まれる総てのプリミティブに同一の幾何学的変換を行うことが出来る。

(4) ワークボックス変換

CGMS では図形プリミティブの一つとして物理量プリミティブ（数値シミュレーションの結果のデータ）を取り扱うが、これらの世界座標系への単位変換を行う。ワークボックス変換は軸作画、文字作画を容易にする。

(5) モデリング変換

モデリング変換とは図形プリミティブに移動、回転、拡大、縮小などの幾何学的変換を行う。

プリミティブ単位に作用するプリミティブ・モデリング変換（ローカル・モデリング変換）と、セグメント単位に作用するセグメント・モデリング変換（グローバル・モデリング変換）の二つがある。セグメント・モデリング変換はセグメントの階層構造に対応した変換を行う。

(6) 表示制御

以下の様な表示制御を行うコマンドがある。

① グラフィック装置のオープン, クローズ

装置毎に用意されているデバイス・ドライバを起動し、各装置固有の処理を行う。

② 隠線・隠面処理の制御

視点位置から見える各図形プリミティブ同士の位置関係を計算し、見えなくなる部分の表示をしない様にする。取り扱っている画像が線画の場合は隠線処理、面画の場合は隠面処理となる。

③ アンチ・エイリアシング

画面による出力が可能な装置では、線や面にギザギザが生じることがある。これは画像の色を各画素単位に計算していることに依るものである。CGMS では、擬似的に画素上の解像度を上げて画像の平滑化を行うことが出来る。

④ 断面処理制御

3次元物理量プリミティブ表示に対しては、任意の平面によって形状を取り去ることが出来る。この時、断面上の物理量に従って等高線や色の表示を行うことも出来る。

⑤ 等高線

2次元及び3次元の物理量プリミティブでは、空間上に定義されている物理量によって等高線を表示出来る。この時、等高線にはスプライン補間をかけることが出来る。また面画による表示では、連続的又は階段状の色の変化で表すことが出来る。

⑥ 等値面処理

3次元物理量プリミティブに対してあるスカラ物理量の値を持つ面を生成する。生成した等値面の半透明表示も可能である。

⑦ 半透明表示

透過係数を指定することによって、2次元物体、3次元物体、曲面、等値面などのプリミティブを半透明に表示出来る。

⑧ 光源

人が物体の凹凸を識別出来るのは、物体に当たって反射して来る光の強弱を網膜で感知しているからである。3次元プリミティブの凹凸をリアルに表現するために、点光源と平行光線の2種類の光源を設定出来る。その他、環境光と呼ばれるプリミティブの周りを一様に散乱する光の設定も出来る。

⑨ デプス・キューリング

ディスプレイ画面の奥行方向に対して輝度値を線形的に変化させることが出来る。これによって、奥行方向に暗くすることで遠近感を強調することが出来る。

(7) シェーディング

2次元物体、3次元物体、曲面、物理量等の基本的に多角形から構成されているプリミティブには、陰影処理を施すことが出来る。物体に当たった光線の反射には、入射角度に関わらずに等方的に反射する拡散反射と、入射角度に従属して特定の方向に反射する鏡面反射がある。また、反射せずに透過する場合もある。CGMSでは、上記の反射率、及び透過率をパラメータの0～1で指定することにより、3種類の現象を合成して形状の陰影を表現する。

(8) 補 間

3次のBスプライン、最小2乗近似、平滑化等を行う。

(9) アニメーション

アニメーション、つまり静止面のVTR上への駒撮り録画機能がある。これにより、時系列の数値データをグラフィックス処理した後、アニメーションにすることができる。或いはまた静止画をハードコピーとしてVTRへ保存出来る。

本コマンド群には、作成した静止面をRGB(Red•Green•Blue)の画像データとして、ディスク上のファイルに登録する機能もある。このファイルをピクセル・ファイルと呼ぶ。

(10) セグメント・ファイル

セグメント・ファイル管理プログラムを起動して、各セグメントを区分データセットのメンバとして保存する機能である。この時プリミティブの属性も同時に保存される。以後このメンバはCGMSの図形プリミティブとして使用することができる。

(11) メタ・ファイル

メタ・ファイル管理プログラムを起動して、画像データを出力装置に依存しない正規化座標系の形でファイルに保存する機能である。作成したメタ・ファイルは種々の装置に出力可能である。

(12) データ変換

ランダム・データの格子データへの変換、物理量の色への変換等を行うコマンドが用意されている。

(13) ユーティリティ

カーソル入力、カラー・パレット出力、カラー値入力、座標変換、問い合わせ、HELP等のユーティリティ機能がある。

(14) グラフィック用システム・マクロ

マクロとは、まとまった処理を行うための会話型CGMSの複数のコマンドの集りである。システム・マクロとは、通常ユーザーが作成する「ユーザー・マクロ」とは別に、CGMS

自身が保有するマクロである。このシステムマクロには CGMS の標準のコマンドでは実現出来なかった機能が実現されている。

例えば、等間隔の場合の等高値の設定が非常に簡単に出来るシステム・マクロがある。

2.1.2 CGMS のシステム構成

Fig. 2.4 a に会話型 CGMS の、Fig. 2.4 b にバッチ型 CGMS の使用ファイルを含めたシステム構成を示す。

2.2 ハードウェア・システム

以下ではグラフィックス・システムのハードウェア体系を Fig. 2.5 a, b に示すと共に各装置の役割について概説する。

2.2.1 ホスト計算機

CGMS では、FACOM OSIV/F4 MSP が載る M シリーズ、又は VP シリーズをホスト計算機として画像処理を行う。本アニメーション作成では、M-780、及び VP-200 E を用いている。M-780 は原研に導入されている汎用大型計算機であり、VP-200 E はシスラボにあるベクトル計算機である。但し、VP-200 E での画像作成はスカラ処理で行われた。

2.2.2 画像処理装置

本装置は FIVIS と呼ばれ、ディスプレイ制御装置 (F6520M)、画像機器接続機構 (F6518M)、及びディスプレイ装置 (F6513C) で構成されている。

ディスプレイ制御装置は、ホスト計算機と 3 MB/sec. の転送速度を持つ BMC (Block Multiplexer Channel) を介して接続され、画像情報の転送と制御を行う。

画像機器接続機構は、光ケーブルでディスプレイ制御装置と連結されており、フレームメモリを経由して接続する VTR に対して制御命令の変換と転送を行う。

ディスプレイ装置は、画像機器接続機構と同様にディスプレイ制御装置と光ケーブルで接続されている。CRT (Cathode Ray Tube) サイズは 20 インチで、 1280×1024 の画素数を持つ。このため、RGB 各 8 ビット × 画素数の画像メモリを持ち、1600 万色の同時発色が可能である。その他に、附属のタブレットを用いた 2、4、8 倍のズーム機能、及び画面上の任意座標から画像表示を行う機能としてローム機能がある。

2.2.3 VTR 装置

ソニー社製の 1 インチ幅のテープを記録媒体としたオープン・リール式の VTR (BVH-2500) で、1 秒間に 30 駒までの静止画を単体で録画出来る。録画時の解像度は、 640×480 画素である。

2.2.4 フィルム・レコーダ

ディスプレイ上に表示された画像のハードコピーを撮ることを目的としたアビオニクス社製の

装置 (CIR-320) である。附属のカメラ・バッグを交換することで、35 mm フィルム、又はポラロイド写真を選択出来る。

2.2.5 WDS (Word and Data Processing System)

ディスプレイ装置 F6658、及び F6683 は WDS と呼ばれ、日本語文書処理と画像処理機能を併せ持った TSS 端末である。ホスト計算機とは CCP (Communication Control Processor) を介して接続される。

F6658 と F6683 で出力可能な画像は線画のみである。

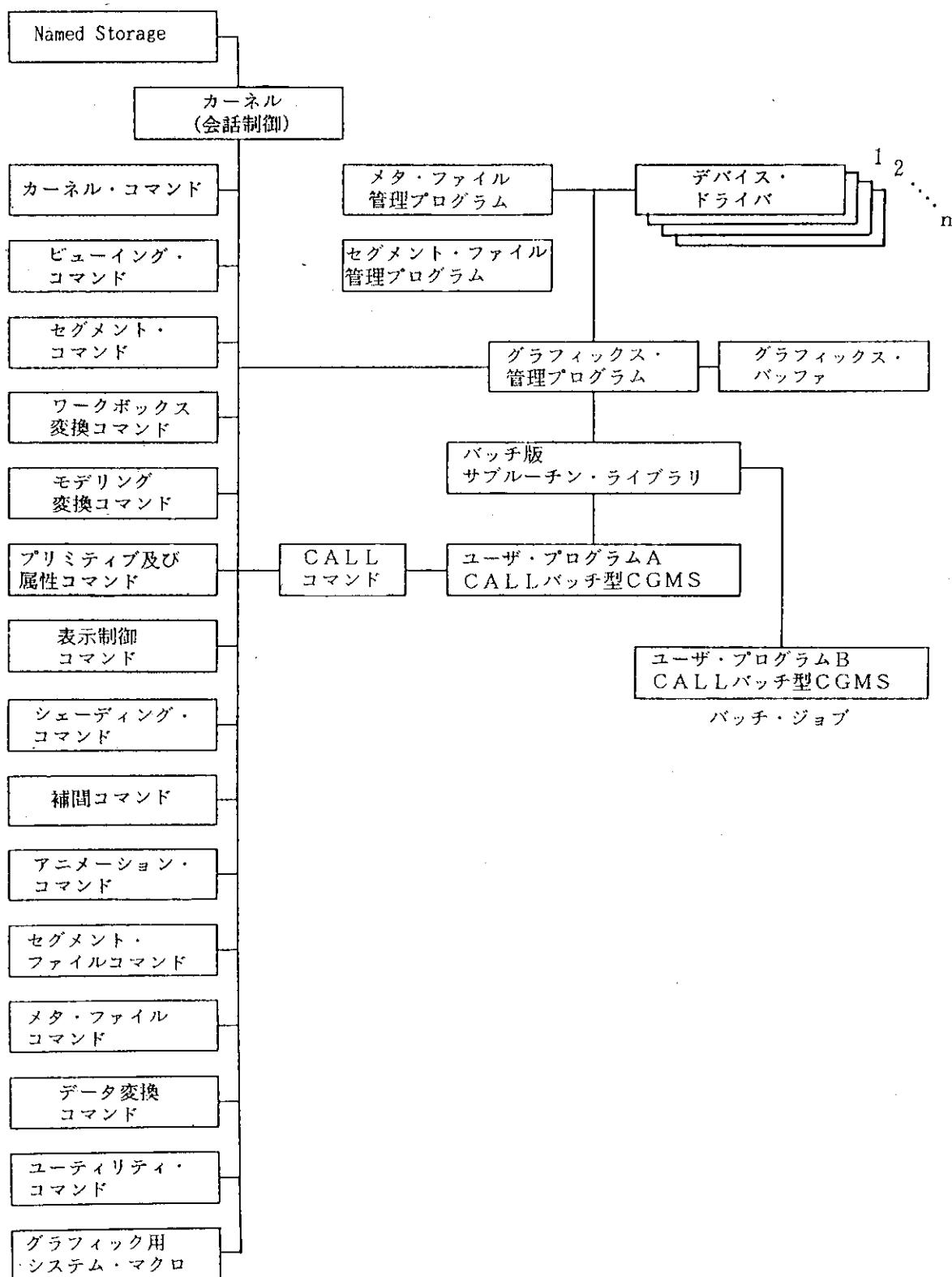


Fig. 2.1 Software system of CGMS

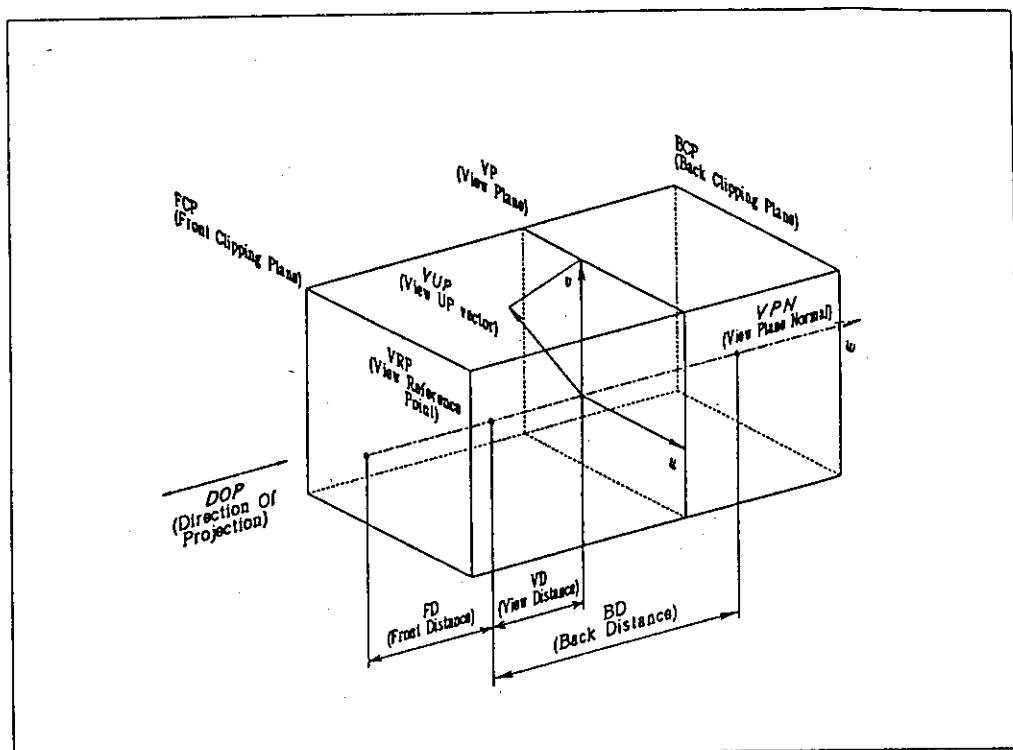


Fig. 2.2 Viewing set up by parallel projection

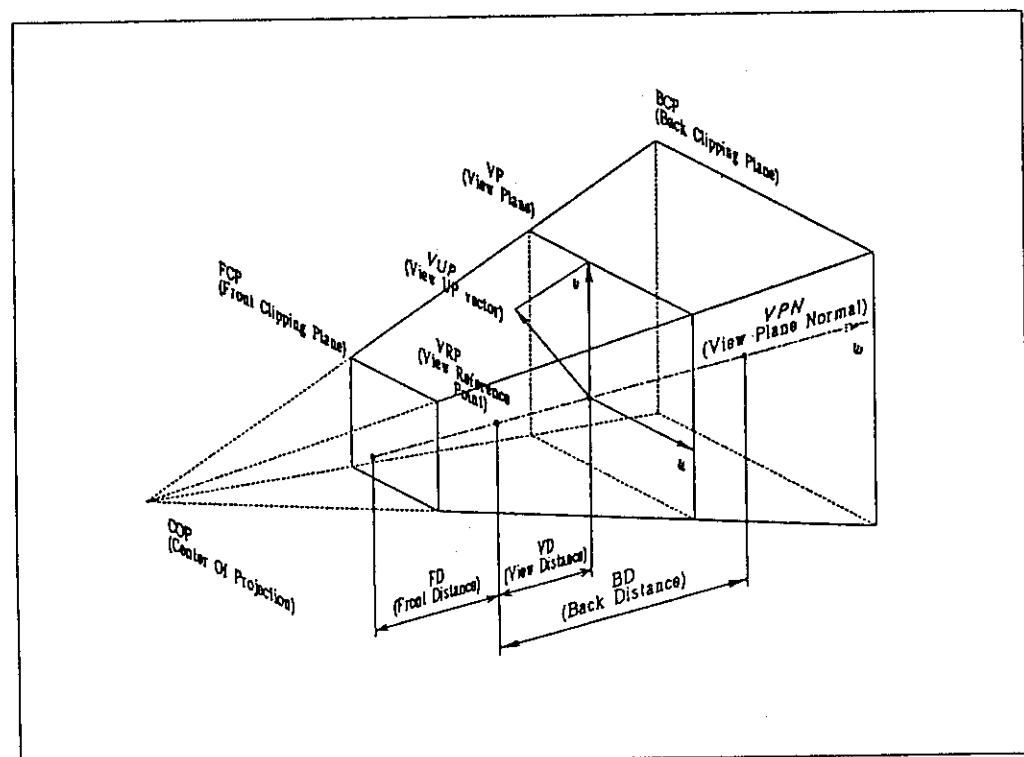


Fig. 2.3 Viewing set up by perspective projection

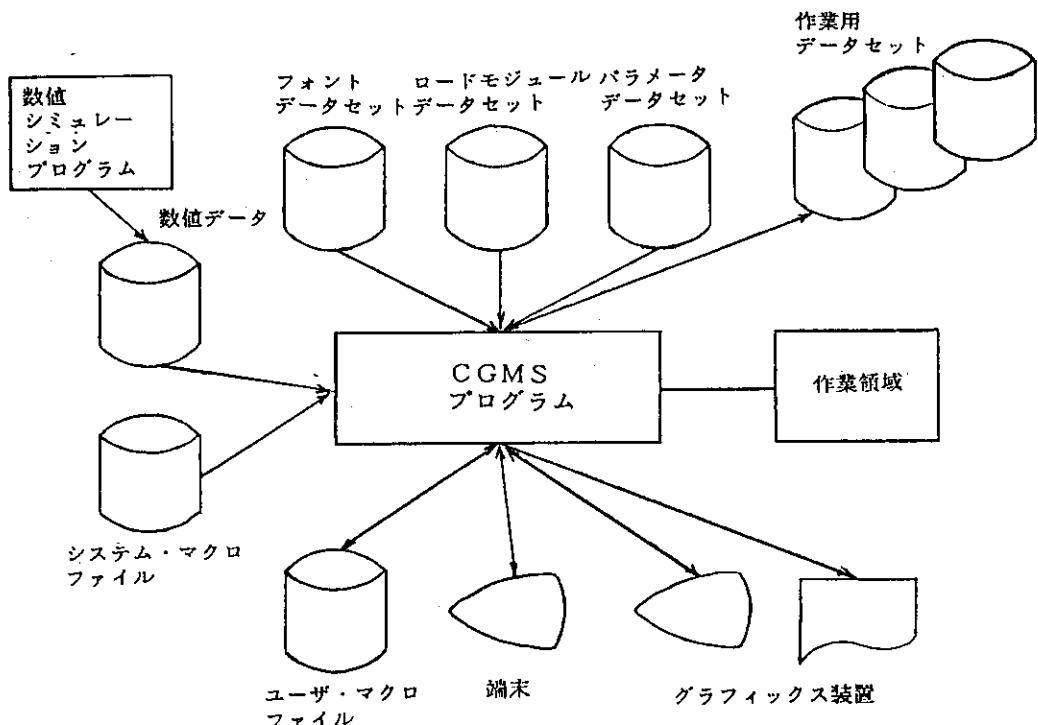


Fig. 2.4a Configuration of interactive CGMS

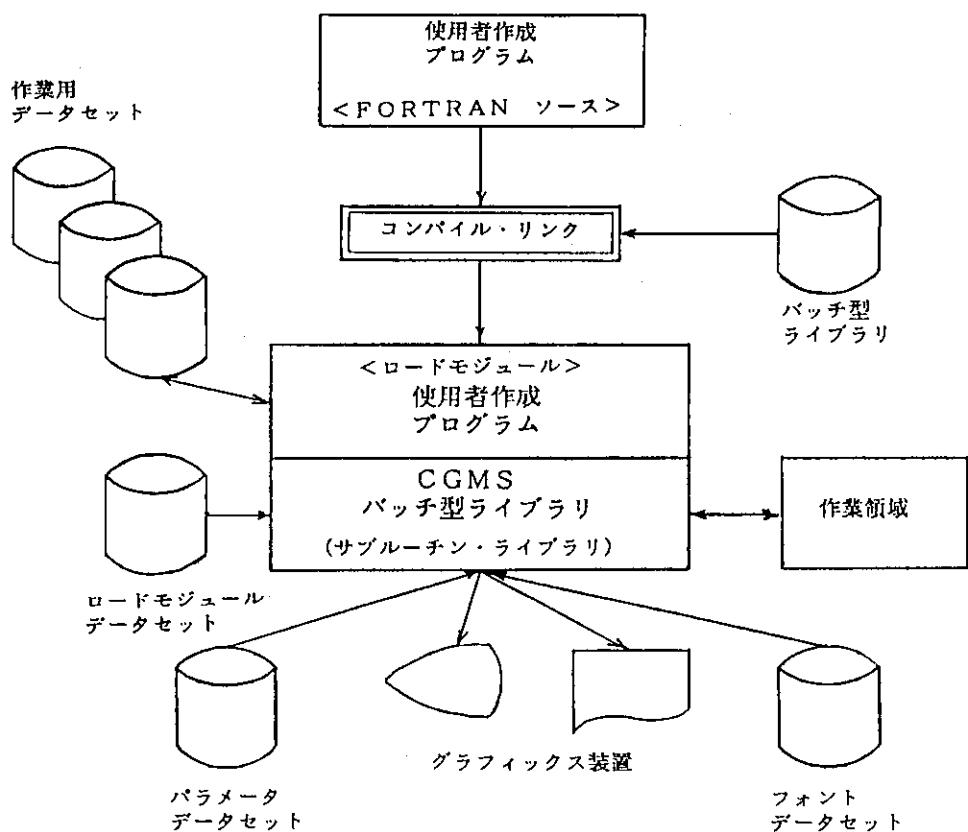


Fig. 2.4b Configuration of batch CGMS

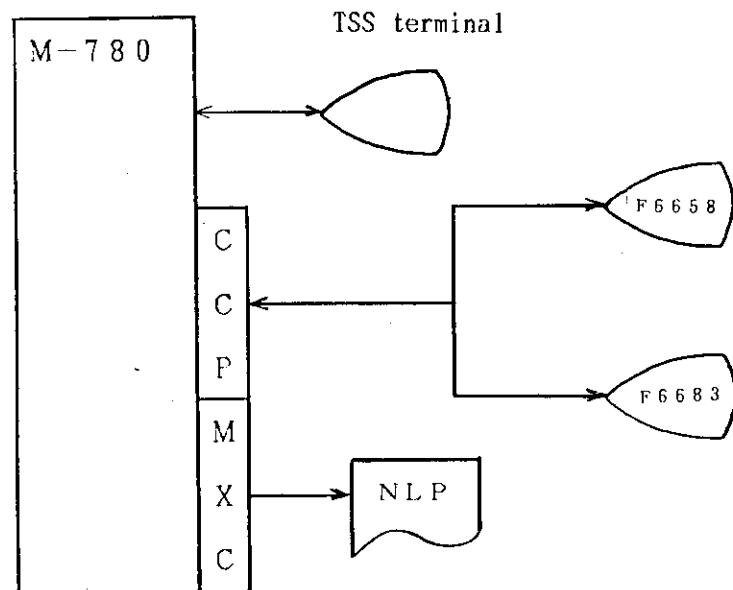


Fig. 2.5a Graphics hardware at JAERI

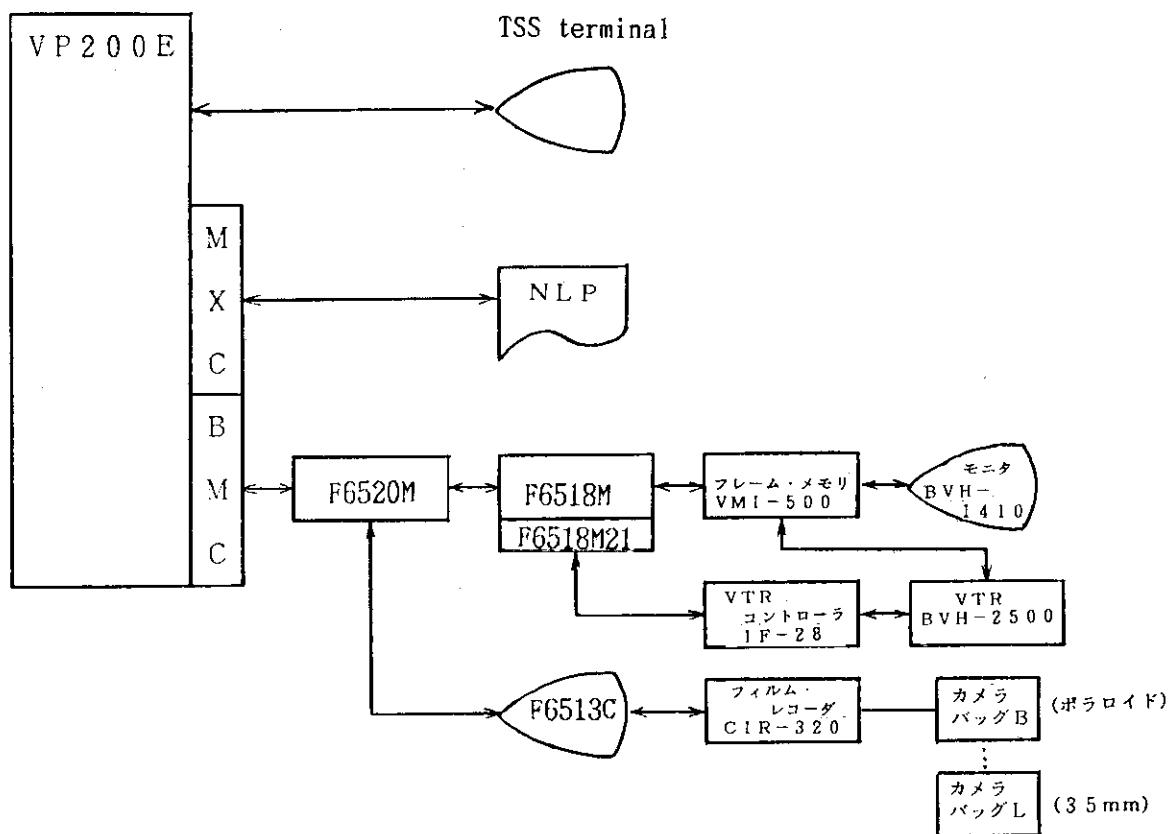


Fig. 2.5b Graphics hardware at Fujitsu System Laboratory

3. シミュレーション計算の概要

アニメーション化した3問題について、物理現象、基礎方程式、数値解法（格子分割）、計算時間、及び得られている物理量の説明を行う。このうち、計算コード、使用計算機、及び映像化に必要な計算時間については、Table 3.1 にまとめておく。なお、シミュレーション計算（解析）は各例題を担当する研究者によってなされ、その計算結果をもとにアニメーション（動画）作成を行った。

3.1 U字管内の熱流動⁽⁴⁾

原子炉と中間熱交換器は複雑に屈曲した一次配管で結ばれている。与えられたデータは、この屈曲した円筒状の配管内の熱流動挙動について、境界適合座標系を用いた3次元Navier-Stokes方程式を直接数値積分する手法によって解析されたものである。非圧縮性粘性流れを計算対象として、Fig. 3.1に示す様な、管曲り角度 $\Omega = 180^\circ$ で曲率半径比 $R_c/a = 9$ の体系を取り扱っている。非定常3次元非圧縮性流体に対するNavier-Stokes方程式は境界適合座標系で以下のように記述出来、速度、圧力、温度が同一格子点上で定義されている。

$$T_i + E_{\alpha} + F_{\alpha} + G_r = Q \quad \dots \dots \dots \quad (3.1)$$

式 (3.1)において、 T は時間項、 E は対流項、 F は圧力項、 G は粘性項、 Q はソース項を、 (ξ, η, ζ) は境界適合座標系の円管の流れ方向と円管の断面方向の各成分を表している。

曲り管の入口（上流）側及び出口（下流）側には、それぞれ $10d$ の直管部分が取り付けられており、この直管の入口部にポワズイユ流の速度分布が設定されている。壁面には滑り無し条件が与えられ、管路出口では自由流出条件が与えられている。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が 0 に設定されている。

Fig. 3.1 は、この計算で用いた円管断面 (η , ξ) の格子体系である。 $\Omega = 180^\circ$ での格子点は、流れ方向に ξ の成分を加えた $(\xi, \eta, \zeta) = (53, 21, 21)$ である。

計算には、3次元熱流体解析コードSCRYU⁽⁵⁾が使用され、FACOM VP-100のベクトル計算で5～6時間程度の計算時間が必要とされた。

上記の計算の結果として、定常状態にある各格子点上の速度、圧力、温度、及びマーカー粒子の流跡線データが得られている。

3.2 原子法レーザー同位体分離過程における金属片溶融⁽⁶⁾

実験装置の蒸気発生部では、るっぽ内の金属を電子ビーム加熱し、高温の原子蒸気流を生成する様になっている。高い蒸気率を得るために、金属表面に温度の大きい勾配をつけねばならぬ

い。この時、溶融した金属の表面の温度変化によって表面張力が変化し、この勾配によってマランゴニ対流と呼ばれる流れが誘起される。このため、表面張力の低下、すなわち蒸気率の低下を招く。

上記の現象のうち、熱拡散については、エネルギー方程式；

$$\frac{\partial T}{\partial T} + u \cdot \nabla T = \kappa \nabla^2 T \quad \dots \dots \dots \quad (3.2)$$

T : 温度 (K)

t : 時間 (s)

\mathbf{U} : 速度ベクトル [$\mathbf{U} = (u, v)$] (m/s)

κ : 热扩散系数 (m^2/s)

が、溶解相における対流については、非定常の Navier-Stokes 方程式；

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} + u \cdot \nabla u &= -\frac{1}{\rho} \nabla P + \nu \nabla^2 u - \beta \Delta T g \\ \nabla \cdot u &= 0 \end{aligned} \right\} \quad \dots \dots \dots \quad (3.3)$$

P : 飽和蒸氣压 (Pa)

ρ : 密度 (kg/m^3)

ν : 動摩擦係数 (m^2/s)

β : 热膨胀系数 (1/deg)

\mathbf{g} : 重力ベクトル (m/s)

が成立する。

解法の手順としては、式 (3.2), 及び (3.3) の対流項を風上差分、拡散項を中心差分によって離散化し、時間積分には前進オイラー法を用いて時間発展させている。

対象形状は、幅 3 cm、深さ 1 cm の矩形形状の右半分を 75×50 の直角格子に分割した 2 次元モデルである。この計算モデルを Fig. 3.2 に示す。

計算には、このデータの提供を受けた研究者が作成したコードが使用され、FACOM VP-100 のベクトル計算で約 30 分程度の計算時間が必要とされた。計算結果としては、 102 MW/m^2 の電子ビーム照射後の 0.05 秒から 0.2 秒までの現象に対して、0.005 秒毎に各格子点上の温度と速度が得られている。

3.3 高温ガス炉炉心におけるキセノン振動

軽水炉、及び他の原子炉と同様に高温ガス炉においても、燃料の燃焼と共に、核分裂生成物の一核種としてキセノンが発生する。

キセノンには、中性子を吸収する働きがあるため、核分裂反応が進む程その発生量が増え、逆

に反応度を下げてしまう。一旦、反応度の下がった炉心では、キセノンの発生量も抑えられるために、中性子束が上がり、また反応度も上昇する。

定常状態の炉心において、上端部の1個のブロック中のキセノンを強制的に取り除いて微小な出力（power density）変化を与えると、その変化量の増幅を伴なって、炉心の上下方向に上記の様な出力変化の振動現象が発生する。

この計算では、3次元多群中性子拡散コード・CITATION-VP^⑦を用いて、炉心の出力密度分布が決定され、各燃料ブロックにおける中性子の振舞いが模擬されている。

以下に示すのは、計算の基本となる中性子拡散方程式；

$$\frac{1}{v} \frac{\partial \Phi}{\partial t} - \nabla \cdot D(r, E) \nabla \Phi(r, E, t) + \sum_{T(r, E)} \Phi(r, E, t) = \int_0^\infty dE' \sum_{S(E' \rightarrow E)} \Phi(r, E', t) + S(r, E, t) \quad (3.4)$$

Φ : 中性子束 (個/ $s \cdot cm^2$) D : 拡散定数 (cm)

E : エネルギー (eV) S : 中性子源 (個/ s)

r : 位置ベクトル (cm)

t : 時間 (s)

と、上式 (3.4) を離散化した差分式；

$$\phi_{i,j,k}^{(m)} = a + b \phi_{i-1,j,k}^{(m)} + c \phi_{i,j-1,k}^{(m)} + d \phi_{i,j,k-1}^{(m)} + e \phi_{i+1,j,k}^{(m-1)} + f \phi_{i,j+1,k}^{(m-1)} + g \phi_{i,j,k+1}^{(m-1)} \quad (3.5)$$

$a \sim g$: 位置 (i, j, k) に依存した定数

m : 反復回数

である。

計算には、式 (3.5) を Odd-Even 法によってベクトル化した 3 次元中性子拡散コード CITATION-VP が使用され、FACOM VP-100 のベクトル計算で約1時間程度の計算時間が必要とされた。

対象となった形状は、直径 16.2 m、高さ 16.2 m の円筒状炉心を、径方向、角度方向、高さ方向に $11 \times 10 \times 7$ のブロックに分割した 3 次元モデルである。この計算モデルを Fig. 3.3 に示す。計算結果として得られているのは、原子炉を平均出力 5,000 MW/h で稼働した場合の各ブロックの出力密度であり、乱れが投入された時刻を 0 時間とすると、202 時間後までに 1 時間間隔で得られている。

Table 3.1 Calculation time of each simulation

項目	U字管	金属片	高温ガス炉炉心
計算コード	S C R Y U	USER-ORIGINAL	C I T A T I O N
使用計算機	V P - 1 0 0		
計算時間	5 ~ 6 (H)	0. 5 (H)	1. 0 (H)

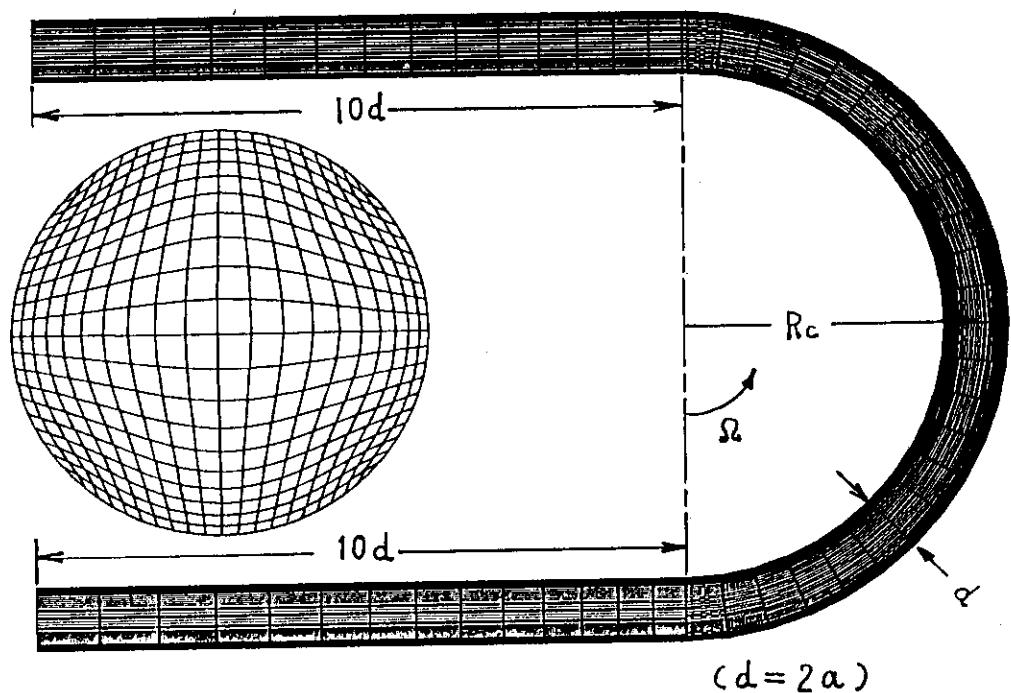
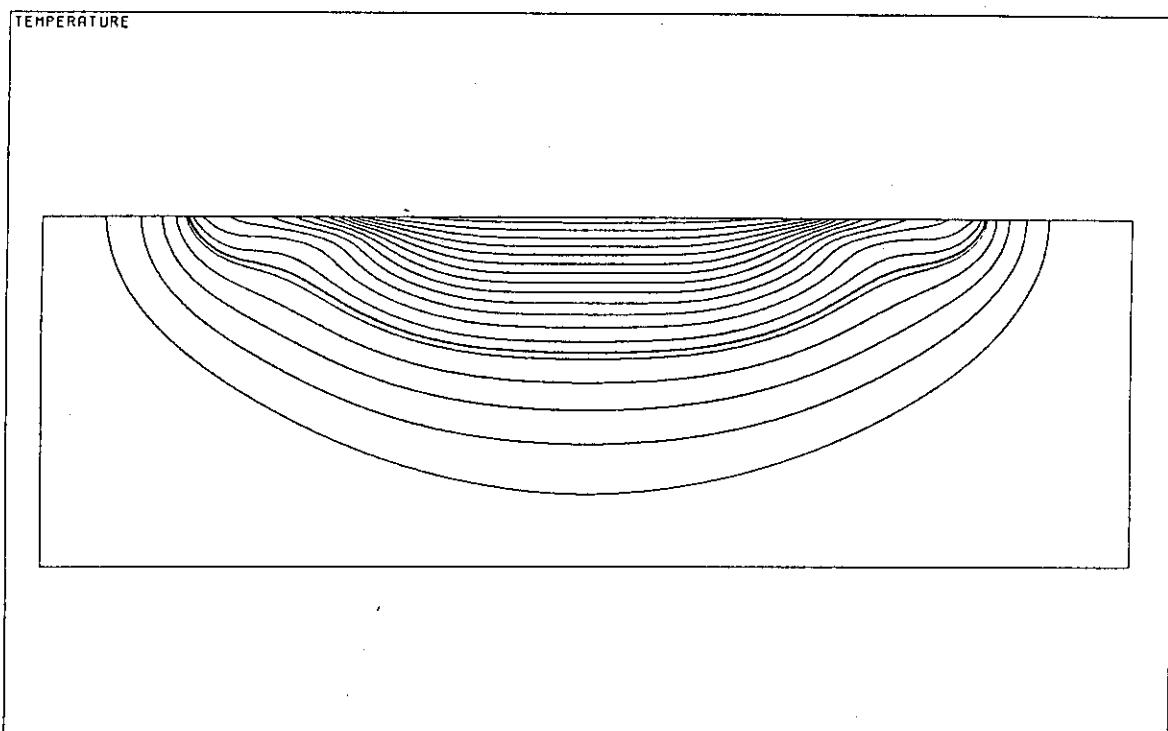


Fig. 3.1 Calculation model of a curved pipe

ALUMINUM (102MH) (UPWIND ADAMS) (BOUSINESQ) (DT 0.01MS)
MESH SIZE : 201 x 80
ELAPSED TIME : 0.200010 TIME STEP : 0.000010



ALUMINUM (102MH) (UPWIND ADAMS) (BOUSINESQ) (DT 0.01MS)
MESH SIZE : 201 x 80
ELAPSED TIME : 0.200010 TIME STEP : 0.000010

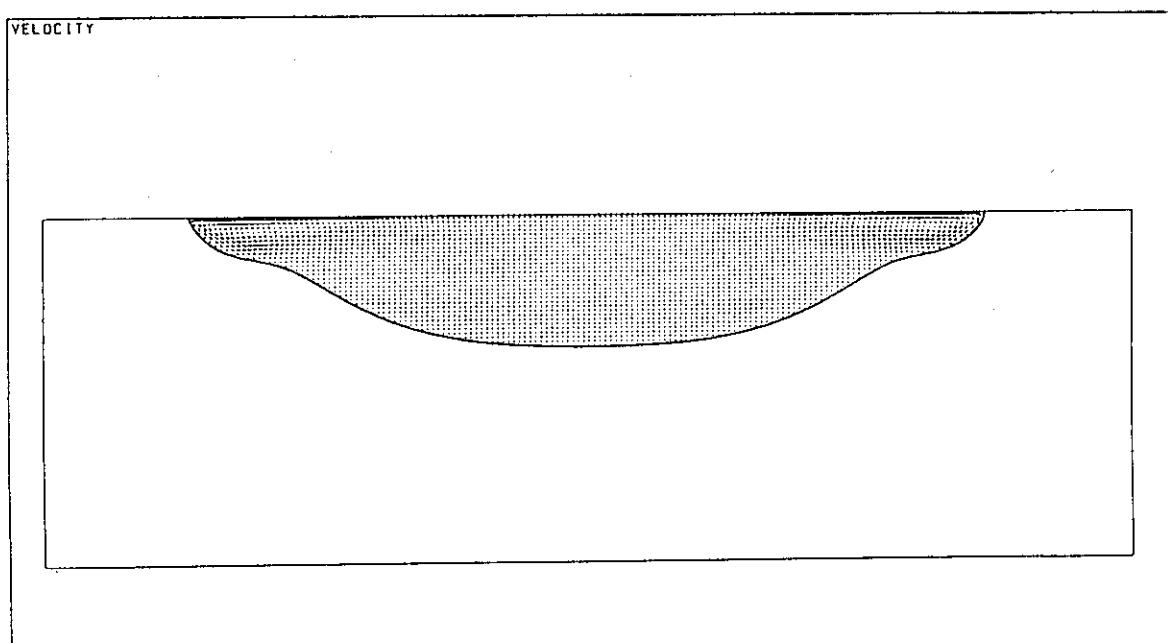


Fig. 3.2 Calculation model of molten metals

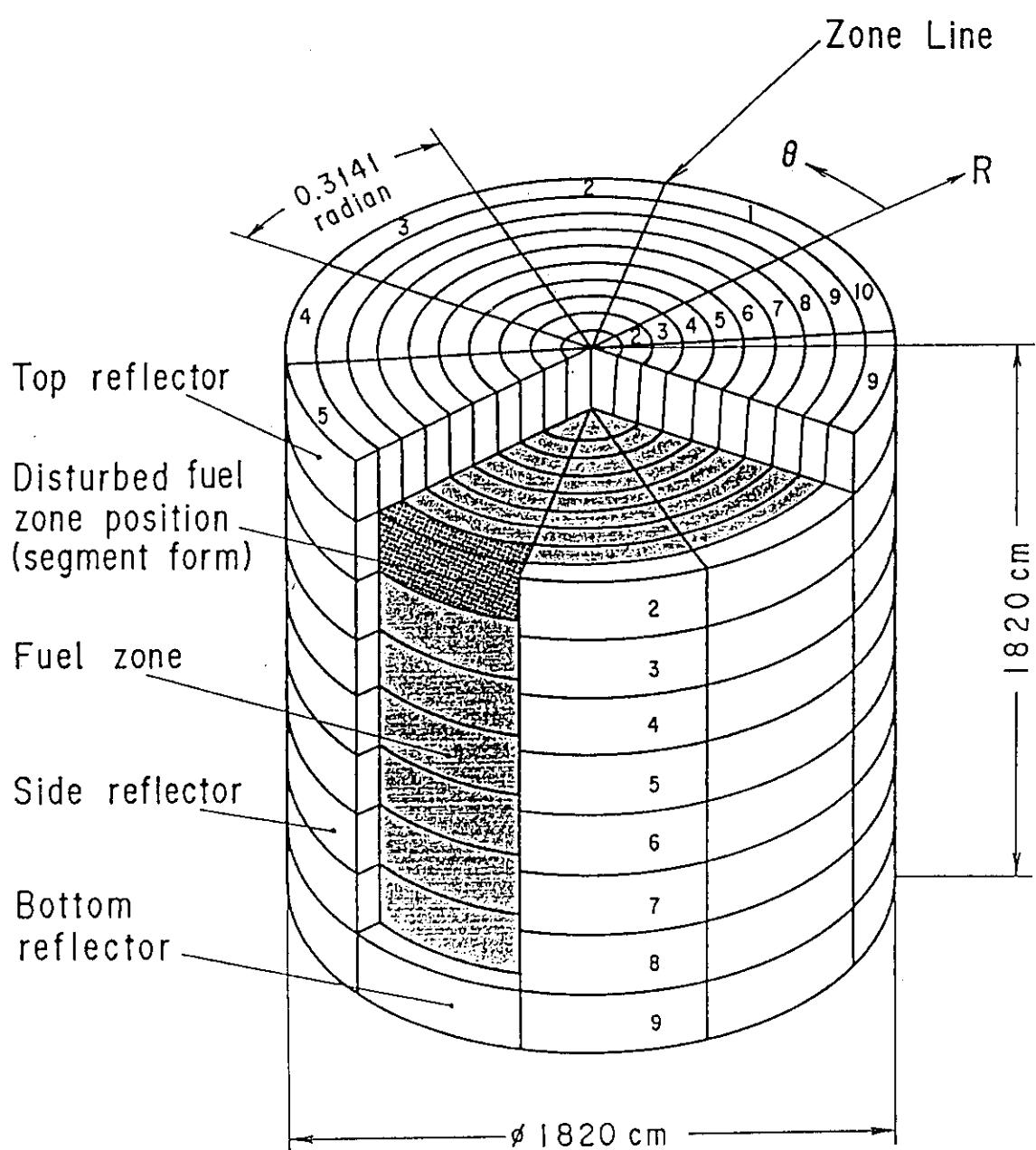


Fig. 3.3 Calculation model of graphite moderated reactor core

4. アニメーション

アニメーションの作成手順、物理量の表現方法、及び各アニメーションの台本について説明する。

4.1 アニメーションの作成手順

CGMS を含めた多くのアニメーション作成システムでは、画が動いて見える程高速に画の作成、表示を行うことは出来ない。⁽⁸⁾

そこで、予め多数枚の静止画を作成しておいて、1枚ずつ VTR に録画した後、テープを再生することで動画として表現する。

以下では、CGMS に限らず一般的なアニメーション作成の手順を示す。Fig. 4.1 に示すのは、アニメーションが完成するまでの流れである。

まず、シミュレーション計算の基となる物理現象と結果として得られている値について把握、検討する。次に、物理量の表示方法や画の動かし方を決めるために台本を作成し、アニメーション作成に費やす各種処理時間の見積もりを立てる。

ここで、台本通りに静止画の作成と録画を行っても、画の見え方が当初考えていたものと異なることがあるので、計算時間の短い線画による画像作成を行い画の見え方を確認しておく。Fig. 4.1 の矢印 A は、この手順を示している。また、動画の動き方についても同様のことが言える。そこで、前もって駒落としのアニメーションの作成を行い概要を確認しておく。Fig. 4.1 の矢印 B は、この手順を示している。

一見、無駄な手間を掛けている様にも考えられるが、アニメーションの作成では、例えば1分程度の映像時間のものを作るとして、再生時間1秒当たり15駒の静止画を録画し、静止画1枚の作成に要する計算時間が20秒とすれば、計算時間だけでも約5時間必要とする。また、録画に要する時間についても無視出来ない。

そのため、誤った静止画を大量に作成したり、動きが不自然なアニメーションを作成して、上記の計算機資源量を無駄にしてしまうことは極力避けるように工夫をすべきである。

最後に、完成したアニメーションは一般に市販されている VTR にダビングしておく。これは、アニメーション製作に用いるオープン・リール式 VTR は高機能ではあるが、非常に高価な機器であると同時に、他機種との互換性がない場合が多く、収録したテープの再生が限定された場所でしか行えないからである。

4.2 静止画の作成方法

静止画の作成には、会話型 CGMS の各コマンドから成るマクロ・コマンドを用いた。その理由は、まず第一に希望する画像を得るまでには何度も試行する必要があり、この段階では会話的

な処理が向いていたことが挙げられる。そして第二に、マクロ・コマンドのバッチ処理にかかる計算時間と、同一の画像を作成するバッチ型 CGMS を用いたプログラムの計算時間では、殆ど差がなかったことが挙げられる。

会話型 CGMS の入力機能では、形状モデルの各格子座標や計算結果の物理量等のデータをシステムに取り込むことが出来るが、シミュレーションの計算結果は、必ずしもそのまま入力出来る様な形式で出力されている訳ではない。また、得られた物理量を直接表現するのではなく、別なものに置き換えて間接的に表現する場合もある。そのためにはデータの加工・編集を行う必要がある。

しかし、これらの処理は画像作成に前に 1 度行えば良く、マクロ・コマンド内での実行は使用領域や計算時間の上で非効率であるので、別個に作成した FORTRAN プログラムで行った。

マクロ・コマンドは、アニメーションを構成するシーン別に作成した。完成したマクロ・コマンドでは、出力装置にピクセル・ファイルを指定しており、静止画の作成をまとめて行うことが出来る。ピクセル・ファイルの画素数は、VTR 装置に対応させるために横×縦を 640×480 とした。ピクセル・ファイルの属性値を Table 4.1 に示す。

以上の処理の流れを Fig. 4.2 に示す。

4.3 台本

予め台本で決定しておく事項としては、まず表示の対象となる物理量の表現方法、次に 3 次元物体、2 次元平面の表現方法、最後に各シーンの時間割である。以下では、前述の事項の詳細についてアニメーション別に説明する。

4.3.1 物理量の表現方法

数値計算の結果として得られている物理量は、圧力、温度、出力密度、速度ベクトル、及びマーク粒子の位置座標である。これらの物理量では、全く同一の表現方法を用いる場合もあるが、問題によっては細かな設定を変えて、より明確な表現を行うための工夫をしている。

(1) 原子炉配管を模擬した U 字管の熱流動の場合

ここで表現する物理量は、圧力、温度、速度ベクトル、及びマーク粒子の流跡を示す座標値である。このうち圧力と温度については、同様の物理量なので表現も同一に行った。

まず、圧力と温度については値と色を対応付けて表現した。このため、CGMS の HLS (Hue・Lightness・Saturation) カラー・モデルを用いた。このモデルでは、Fig. 4.3 に示す様に色の成分を色相、明度、彩度によって分類し、色相変化を直感的に分り易く捉えることが出来る。物理量の最大値を赤色、最小値を青色となる様に指定しておけば、その中間の値については、CGMS 内部の色を求める関数で自動的に計算されて表示される。色相は連続的に変化する様に指定した。

次に、速度ベクトルについては 2 次元と 3 次元の矢印によって表現する。これは流れの対流現象を 2 次元で、全体の流れを 3 次元で表すためである。

最後に、マーカー粒子の流跡線については、質量・体積のない流体粒子を小球に置き換えて表現する。動きについては Fig. 4.4 a, b を例に述べる。Fig. 4.4 a のグラフは、U 字管の入口から出口に向かって移動するマーカー粒子の時間と位置の関係を示している。このグラフの示す通りに、各時刻におけるマーカー粒子の静止画を一枚ずつ作成したのでは、枚数が多くなる他に粒子の軌跡が分り難いアニメーションとなってしまう。そこで、Fig. 4.4 b に示す様に P₀ から P_e までを適当な間隔で分割し（このアニメーションでは 15 時刻毎），各時刻における粒子を同時に配置する。そして、総ての粒子が次の分割点にあたる時刻の位置に到達するまで移動させる。この操作から得られる一連の静止画を繰り返し表示すると、あたかも新しい粒子が次々と入口部分で発生した後、出口に向かって進んでいく様に見える。⁽⁹⁾ この時の粒子の動きは、ネオンサインによる広告を思い浮かべると分り易い。この方法による静止画の作成枚数は、前述の分割に用いた時刻数だけあれば済む。提供されたデータでは、254 個のマーカー粒子について最大 2,000 時刻での位置が、X, Y, Z 方向の 3 次元座標値として得られており、このうち 5 個の粒子について、互いに色分けして表示する。

(2) 原子炉レーザー同位体分離過程における金属片溶隔の場合

ここで表現する物理量は、時間変化する温度と速度である。温度については U 字管の時と同様に、値と色を対応付けて表現した。色相変化は連続である。但し、金属の固体相と溶融相の区別を分り易くするために、融点で色相が大きく変化する様に指定してある。

速度については、まず色相変化を段階状にして、固体相と溶融相を各々 1 色で表現し、その後、溶融相に飛ばしたマーカー粒子の位置座標より線分を作り、この線分を動かすことによって流れの速さを表現した。粒子でなく線分を用いたのは、流れの軌跡をより明確に表現するためである。

線分の作り方と動かし方については、Fig. 4.5 を用いて説明する。ここで予め注意しておきたいことは、線分を移動させている時間と速度場が変化していく時間には関係がないということである。つまり、各時刻の速度場が独立した定常状態にあるものとして線分移動を行っているのである。従って、厳密な意味で速度分布の変化を表しているとは言えない。しかし、速度場を出力する時間間隔と共に各時刻の線分移動を表示する時間を短くしていくことによって、現実の動きに近付いていくはずである。

アニメーションでは、5 個の粒子から作成した線分を表示するが、ここでは 1 個のマーカー粒子について注目する。まず、マーカー粒子の座標値を 1,000 個単位に分け、各先頭から 496 番目までを 5 個毎に線で結んでゆく。ここまでが Step 1 である。この操作によって、一つ一つの線分を等しい時間間隔に区切る。また、粒子の座標をとばして結ぶのは計算時間を節約するためである。そして、次に Step 1 で作成した線分群を 66 個先の時刻の位置に進めたのが Step 2 であり、以下 Step 15 まで同様に進めてゆく。静止画は各 Step について作成した。座標の分け方や線分を結ぶ間隔は、サンプル・アニメーションの結果を基に決定した。また、Step 数を 15 にしたには、静止画作成に要する計算時間を考慮したことによる。

Step 1 から Step 15 までの静止画を繰り返し VTR に録画した後にテープを再生すると、各線分は溶融相内の流れに沿って動いている様に見える。

(3) 高温ガス炉炉心におけるキセノン振動の場合

ここで表現する物理量は、時間変化する出力密度である。表現方法は、U字管、金属片の場合と同様に値と色を対応付けた表現である。しかし、キセノン振動で重要なのは炉心内部の中性子束の出力密度を表示することである。このため、1次平面による炉心の垂直方向の分割を行い、その断面が前面となる様なビューアイントを設定することによって対処した。

4.3.2 物体の表現方法

アニメーション化した3題のうち、U字管と高温ガス炉炉心は3次元モデルであり、金属片は2次元モデルである。3次元モデルの場合、使用するプリミティブやビューアイントの設定が2次元モデルと異なる以外に、光源の設定やシェーディングを施して画質の向上を図っている。また、視点の位置や視線の向きを連続的に動かして、違った角度から形状を見た時の画像作成を行うことも3次元モデルのアニメーションの特徴である。この視点の位置と視線の向きについて、時刻毎に決定することをカメラ・ワークと呼ぶ。

以下では、まず各アニメーションのシーン構成を述べ、各シーン別に使用プリミティブ、光源とシェーディングの有無、ビューアイント、及び視点移動・視方向変化の際のカメラ・ワークを中心、形状の表現方法について説明する。ここで示している各シーンのシェーディングやビューアイントの設定値は、定量的に決められるものではなく、試行錯誤の結果として得られた数値である。特に、各機器間の解像度の差によって起きるダビング時の画質の劣化を考慮して、[※] 画はなるべく大きく映し出される様に設定してある。

(1) U字管内の熱流挙動のアニメーション（8分14秒）

シミュレーションの計算結果は既に定常状態に達した時のものである。従って、後述するマーカー粒子の流跡線以外のシーンは、カメラ・ワーク（視点の移動）による動画化である。このアニメーションは、以下に示す10個のシーンで構成されている。すなわち、形状の概観、U字管表面の圧力分布、U字管断面の圧力分布、U字管切り取り面の圧力分布、U字管表面の温度分布、U字管切り取り面の温度分布、速度ベクトル、マーカー粒子の流跡線、及びタイトルである。

このうち、圧力分布と温度分布については、同様なカメラ・ワークを用いてるため、一緒に説明する。

① 形状の概観（32秒）

U字管を周りから見渡すシーンである。

形状の作成には、曲面プリミティブの内、一般多角形（ポリゴン）を取り扱うコマンドを用いた。処理の内容は、U字管表面の格子点から微小な四角形を定義し、各四角形の面の集合体として形状を構築している。

光源には平行光線を用いた。その理由は、U字管の様に細長い形状に対して点光源で照らすと、光が強く当たる部分と光が弱く当たる部分の差が顕著となり、形状の輪郭がぼやけてしまうからである。光線はX軸と平行で、XY平面に対して45°の角度で下向きの方向

とした。

シェーディングは、拡散反射率 0.5 に対して、鏡面反射率を 0.9 の高率で管の丸みを分り易くしている他、透過率の 0.1 を加えることで、U 字管内部が空洞であることを強調している。

ビューアイントには、形状の特徴を強調するために簡易透視投影による表現を用いた。透視投影は遠近法の概念を導入した投影法で、物体、又は平面に対して近くのものが大きく、遠いものが小さく見える様な変換がかけられる。

カメラ・ワークについては、Fig. 4.6 に示す様な視点移動と視線方向変化を行った。実線は視点の通る軌道 寒線の矢印は視点の進む方向、破線の矢印は視線の向きである。以下では、視点の動かし方について述べる。まず点 A と点 B を結ぶ半径 37 (単位は無次元) の円弧の上を、1 回の移動距離を等間隔にとって 3 秒で移動させた。次に、 $X = 3$, $Z = 0$ の直線を軸として時計方向に 45° 傾けた直径 40、短径 28 の橈円の周上を、Y 方向の成分を等間隔にとって 18 秒で一周させている。そして、最後に点 B から点 A に向けてやはり円弧の上を等間隔に 3 秒で移動させた。Fig. 4.7 に、時間と共に変化してゆく U 字管の見え方を示す。

尚、点 A では動き始める前に 5 秒、戻ってきた時に 3 秒の静止時間を設定した。

② U 字管表面の圧力・温度分布 (各 38 秒)

U 字管表面の圧力分布と温度分布について、形状の周りから見渡すシーンである。視点の動きを分り易くするため、XYZ の各軸の方向を示した。

形状の作成には、物理量プリミティブの内、一般多面体 (ソリッド) を取り扱うコマンドを用いた。処理の内容は、U 字管表面だけでなく内部の格子点も用いて微小な四角柱を定義し、各四角柱の集合体として U 字管を構築している。

光源には平行光線を用いた。光線の方向と向きは、① と同様である。また、光が直接当たる部分と当たらない部分との明るさの差を緩和するために環境光を設定した。何故なら、U 字管表面に付けられた色が光線の反射具合に依って本来の色と違ってしまうことのない様に、光を一様に照らす必要があるからである。

シェーディングは、前述の理由により鏡面反射率は 0.5、拡散反射率は 0.6 に設定して、U 字管の表面に反射光のコントラストが浮き出ない様にした。透過率は与えていない。

ビューアイントは、① と同様に簡易透視投影による表現である。

カメラ・ワークについては、視点の通る軌道並びに視点の各位置における視線の向きを、① と全く同一にしている。しかし、シーンの始めと終り以外に視点が Fig. 4.6 の点 B を通る際に、住き帰りに 3 秒ずつ静止時間を設定した。これは、U 字管の入口と出口部分の物理量に注目するためである。Fig. 4.8 に時間と共に変化してゆく U 字管の見え方を示す。

③ U 字管断面の圧力・温度分布 (各 40 秒)

U 字管を定義する境界適合座標系 (ξ, η, ζ) において、 ζ を定めた時の (η, ζ) は、円管断面を構成する。このシーンでは、Fig. 4.9 に示す代表的な 5 カ所の断面において圧

力分布と温度分布を示し、流れが対流している様子を表現した。断面の位置を分り易くするための工夫としては、上方から見た U 字管の全景と一緒に示すと共に、断面の部分を点滅させている。

形状の作成には、物理量プリミティブの内、2次元一般座標と一般多面体を取り扱う2種類のコマンドを用いた。前者は U 字管の断面を、後者は U 字管の本体を構築している。

光源は全景表示部にのみ平行光線を設定した。光線の方向と向きは①と同様である。

シェーディングは②と同様に設定した。

ビューアイントについて、断面表示部では2次元、全景表示部では簡易透視投影による表現を用いた。線画による例を Fig. 4.10 に示す。

このシーンでは、前述の様に局所的な物理量を見せるのが目的であるので、視点の移動は行っていない。映像時間は1断面につき8秒とした。

④ U字管の切り取り面の圧力・温度分布（各59秒）

U字管内部において、位置の違いによって連続的に変化してゆく圧力と温度を周りから概観するシーンである。このため、形状の上側 $1/4$ の部分を取り除いた。このシーンでも、視点の動きを分り易くするため、X, Y, Z の各軸の方向を示した。

形状の作成には、②と同様に一般多面体プリミティブを用いた。但し、定義の容易さを考慮して、U字管の内側半分に相当する部分と下側 $1/4$ に相当する部分とを別々に構築した。

光源、及びシェーディングの設定方法については、②と同様である。

カメラ・ワークについては、Fig. 4.11 に示す様な視点移動と視線方向変化を行った。視点は、まず A 点と点 B を結ぶ半径 43 (単位は無次元) の円弧の上を、1 回の移動距離を等間隔にとって 3 秒で移動させた。点 B では、3 秒間の静止時間をおいた後、次の 3 秒間で形状の拡大を行った。これは、U字管の細部を見易くするためである。形状の拡大後についても 3 秒間の静止時間を設定した。以下、点 B・C 間を 3 秒、点 C・D 間を 6 秒、点 D・E 間を 9 秒、点 E・F 間を 6 秒、及び点 F・B 間を 3 秒で移動させた後、点 A に 3 秒で戻した。点 F・B・C 間と点 D・E 間では、半径 30.3 の円弧上の、また点 C・D 間と点 E・F 間では、両方の点を結ぶ直線上の移動である。各点間での視点の移動回数は映像時間数に比例しており、各々 1 回の移動距離は等間隔である。

⑤ 速度ベクトル（40秒）

③と同じ断面上の速度ベクトルを、2次元と3次元のビューアイントで示すシーンである。③同様、断面の位置を分り易くするために、上方から見た U字管の全景と一緒に示すと共に、断面の部分を点滅させている。また、ここでも視点の位置を分り易くするために、X, Y, Z の各軸の方向を示している。

形状の作成法について述べる。まず一般多角形を取り扱うコマンドを用いて断面を構築した。次に速度ベクトルについては、2次元表示部分では2次元の矢印プリミティブで、3次元表示部分では3次元の矢印プリミティブで模擬した。最後に U字管の全景表示部分では、

①と同様に一般多角形を取り扱うコマンドを用いて U 字管全体を構築した。

速度ベクトルの 3 次元表示部分と U 字管の全景表示部分では、光源として平行光線と環境光を設定して、ベクトルの向きや大きさ及び管全体の凹凸を表現した。光線の方向と向きは、①と同様である。

シェーディングについて以下に示す。3 次元表示部分では、速度ベクトルの成分の内、流れ方向の成分が対流方向の成分が対して極めて大きいため、矢印が長くなつた。そのため、拡散反射率を 0.2 に抑え、鏡面反射率を 0.85 の高率に設定して 3 次元矢印の輪郭を強調した。全景表示部分の設定も同様である。

ビューアイントは、2 次元表示部分ではベクトルを断面の法線方向から断面上に投影し、3 次元表示部分では簡易平行投影を、U 字管の全景表示部分では簡易透視投影を用いた。平行投影では、視点と物体との距離に関係なく物体全体に均一な変換がかけられる。このシーンの様に U 字管を部分的に注目している場合には、遠近法による表現は返って本来の形状が分り難くなることがある。さらに、3 次元表示部分については、各断面の視点位置計算の煩雑さを解消するため、各断面上のベクトルが断面 1 に乗る様に回転、移動変換を行つてゐる。従つて、視点・視参照点の位置は一度だけ定義すれば済む。線画による例を Fig. 4.12 に示す。

このシーンでは、視点の移動は行つていない。映像時間は、1 断面につき 8 秒とした。

⑥ マーカー粒子の流跡線 (46 秒)

質量、大きさを持たないマーカー粒子に代えて、有限の大きさを持つ球によって、その動きを表現するシーンである。表示する粒子の個数は、U 字管の表面近くを軌道として通らない粒子から 5 個選んだ。これは、粒子を模擬した球を表面からはみ出さない様にするためである。また、粒子の個数を制限したのは、U 字管を含む表示される総ての粒子間の隠線処理にかかる計算時間が大きいためである。

形状の作成には、①と同様の方法で U 字管を形成した後、球プリミティブで粒子を配置した。

光源には平行光線を設定した。光線の方向と向きは、①と同様である。

シェーディングについては、U 字管表面の拡散反射率を 0.2、鏡面反射率を 0.55 として、局部的な光の反射を抑えると共に、透過率を 0.3 として内部の球が見える様にした。また、球の拡散反射率を 0.3、鏡面反射率 0.8 とすることによって球の見易さを向上させている。

ビューアイントは 2 通りで、一方は Fig. 4.13 に示す視点 A の位置から見た場合で、Fig. 4.14 に示す様に粒子の流れの全容を表し、他方は Fig. 4.13 に示す視点 B の位置から見た場合で、Fig. 4.15 に示す様に U 字管曲部の流れを表している。

映像は、まず静止時間を 5 秒おいてから始められ、15 秒間粒子を動かす。最後にまた、3 秒間の静止時間をおいている。2 つのビューアイントとも同様である。

⑦ タイトル (1 分 42 秒)

アニメーションの冒頭では、アニメーションの表題、シミュレーション計算の内容や基礎

方程式を、また中盤では、各シーンの表題を、最後では、END マークや製作・協力者リストを文字により静止画面で映す。Fig. 4.16 に全タイトルを示す。

(2) 金属片内の熱流動挙動のアニメーション（3分37秒）

このアニメーションは、金属片の溶融相の温度と速度の物理量を映す2シーンと、タイトルを映す1シーンの計3シーンで構成されている。前述の2シーンには、それぞれ中心下部に経過時間を示し、時間と共に物理量が変化する映像となる様にした。

ここでは、対象とする形状が2次元モデルのため、光源の設定、及びシェーディングは行っていない。また、ビューアイントについても固定である。

① 温度分布（1分2秒）

シミュレーション計算では、物理現象の対称性を利用して右半分の矩形領域のみを計算モデルとしていたが、このシーンでは、提供された形状データから左半分の領域も作成し、金属片全体が映される。

形状の作成には、物理量プリミティブの内、2次元一般座標を取り扱うコマンドを用いた。本シーンのビューアイントを、Fig. 4.17 に線画で示す。

シミュレーション時間の内、計算結果が出力されている回数は全部で31回であり、出力毎に1枚の静止画を作成して2秒ずつ映した。これは、速度分布の映像時間と同一にするためである。

② 速度分布（1分2秒）

温度分布表示シーンと異なり、溶融相内の流れを表す線分の動きが分り易い様に、金属片の右半分の領域だけを拡大して映している。

形状の作成方法は①と同様である。

本シーンのビューアイントを、Fig. 4.18 に線画で示す。

静止画の作成は、4.3.1(2) に示した手順に従って、計算結果の出力毎に15枚ずつ行っており、Step 1 から Step 15 までの各静止画を、4回繰り返し録画して、計2秒ずつ映している。

③ タイトル（1分33秒）

アニメーションの冒頭では、アニメーションの表題、シミュレーション計算の内容や基礎方程式、及び計算法を、また中盤では、各シーンの表題を、最後では、END マークを文字により静止画面で映す。Fig. 4.19 に全タイトルを示す。

(3) 高温ガス炉炉心のキセノン振動のアニメーション（4分23秒）

このアニメーションは、炉心の出力密度分布とタイトルを映す2つのシーンで構成されている。出力密度分布表示シーンは、時間の経過と共に物理量が変化する映像であり、視点の移動は行っていない。また、出力密度変化が炉心の上下方向に起きることが分っているので、炉心の中心を通る平面によって垂直に分割した断面を概観している。

① 出力密度分布（3分26秒）

形状の作成には、物理量プリミティブの内、一般多面体を取り扱うコマンドを用いた。処理の内容は、管表面だけでなく管内部の格子点も用いて微小な四角柱を定義し、各四角柱の集合体として擬似的な円筒状炉心を構築する。

光源には平行光線を用いた。本シーンの場合も、炉心表面が色付けされて表示されるため、炉心に対して光を一様に照らす必要性がある。また、光が直接当る部分と当たらない部分との明るさを緩和するために、環境光を設定した。光線はY軸と平行で、YZ平面に対して45°の角度で下向きの方向とした。

シェーディングは、拡散反射率を0.6、鏡面反射率を0.6に設定し、色が鮮明に見える様にした。

ビューアイントについて、簡易平行投影による表示である。これは、炉心形状の直径と高さが等しいため、遠近法による表現を必要としないからである。本シーンの一部をFig. 4.20に示す。

映像は、乱れが投入された時刻0から202時間後まで、1時間毎の結果を1秒ずつ映してゆき、最後に4秒間の静止時間を設定している。

② タイトル（57秒）

アニメーションの冒頭では、アニメーションの表題、炉心モデルの概要、シュミレーション計算の手順、及び出力密度分布表示シーンの表題を、最後では、ENDマークを文字により静止画面で映す。Fig. 4.21に全タイトルを示す。

4.3.3 時間割表

4.3.2で述べた各アニメーションの映像時間について、シーン別に表にしてまとめた。Table 4.2にはU字管内の熱流動挙動アニメーション、Table 4.3には金属片内の熱流動挙動アニメーション、Table 4.4には高温ガス炉炉心のキセノン振動アニメーションの時間割を示す。

Table 4.1 Attributes of pixel file

ファイル属性	レコード・サイズ	ブロック・サイズ	ファイル編成
F B	640	6400	P S

Table 4.2 Time table of the animation of curved pipe

No	シ ー ン 名	映像時間(秒)
1	タイトル1 「表題」	8
2	タイトル2 「シミュレーション計算の概要」	24
3	タイトル3 「形状の概観」	6
4	形状の概観	32
5	タイトル4 「圧力分布 一表面一」	6
6	U字管表面の圧力分布	38
7	タイトル5 「圧力分布 一断面一」	6
8	U字管断面の圧力分布	40
9	タイトル6 「圧力分布 一切取面一」	6
10	U字管切り取り断面の圧力分布	59
11	タイトル7 「温度分布 一表面一」	6
12	U字管表面の温度分布	38
13	タイトル8 「温度分布 一断面一」	6
14	U字管断面の温度分布	40
15	タイトル9 「温度分布 一切取面一」	6
16	U字管切り取り断面の温度分布	59
17	タイトル10 「速度ベクトル」	6
18	速度ベクトル	40
19	タイトル11 「マーカー粒子の流跡線」	6
20	マーカー粒子の流跡線	46
21	タイトル12 「ENDマーク」	6
22	タイトル13 「製作・協力者リスト」	10
合 計 時 間		8分14秒

Table 4.3 Time table of the animation of molten metals

N o	シ ー ン 名	映像時間(秒)
1	タイトル1 「表題」	1 0
2	タイトル2 「基礎方程式 (1)」	3 0
3	タイトル3 「基礎方程式 (2)」	2 0
4	タイトル4 「数値計算法」	1 5
5	タイトル5 「温度分布」	6
6	温度分布	6 2
7	タイトル6 「速度分布」	6
8	速度分布	6 2
9	タイトル7 「E N Dマーク」	6
合 計 時 間		3分37秒

Table 4.4 Time table of the animation of Xenon-induced oscillation

N o	シ ー ン 名	映像時間(秒)
1	タイトル1 「表題」	1 0
2	タイトル2 「炉心モデル」	2 0
3	タイトル3 「数値計算の手順」	1 5
4	タイトル4 「出力密度分布」	6
5	出力密度分布	2 0 6
6	タイトル5 「E N Dマーク」	6
合 計 時 間		4分23秒

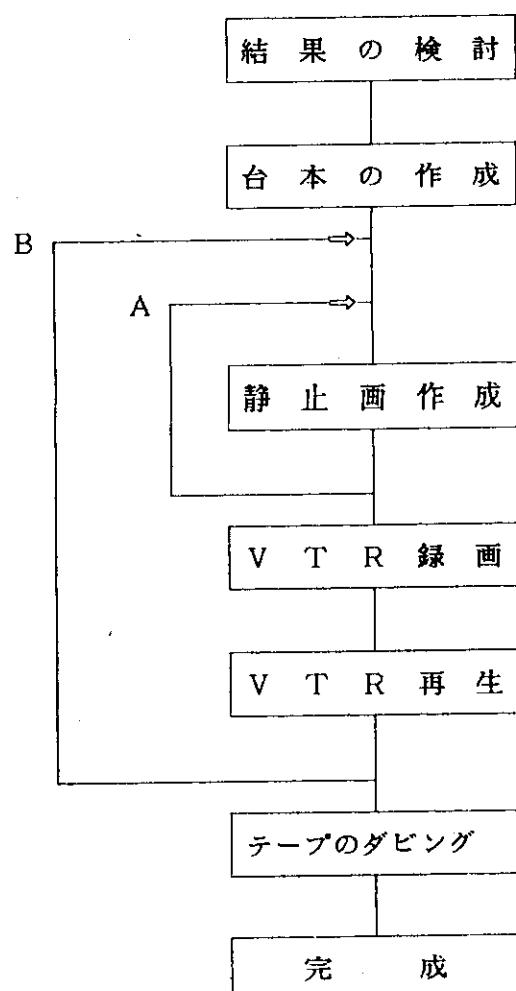


Fig. 4.1 Procedure for drawing up animated pictures

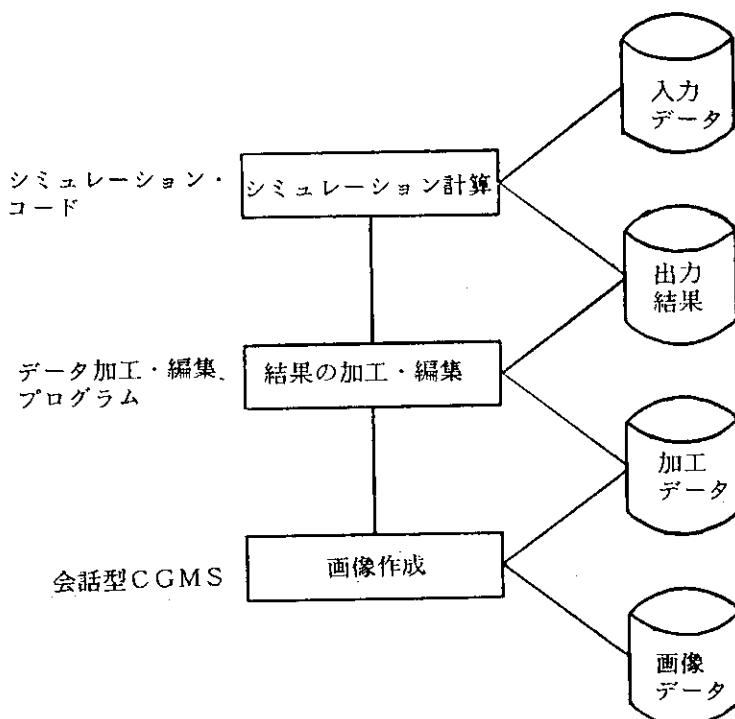


Fig. 4.2 Software configuration for simulation/animation

HLS MODEL

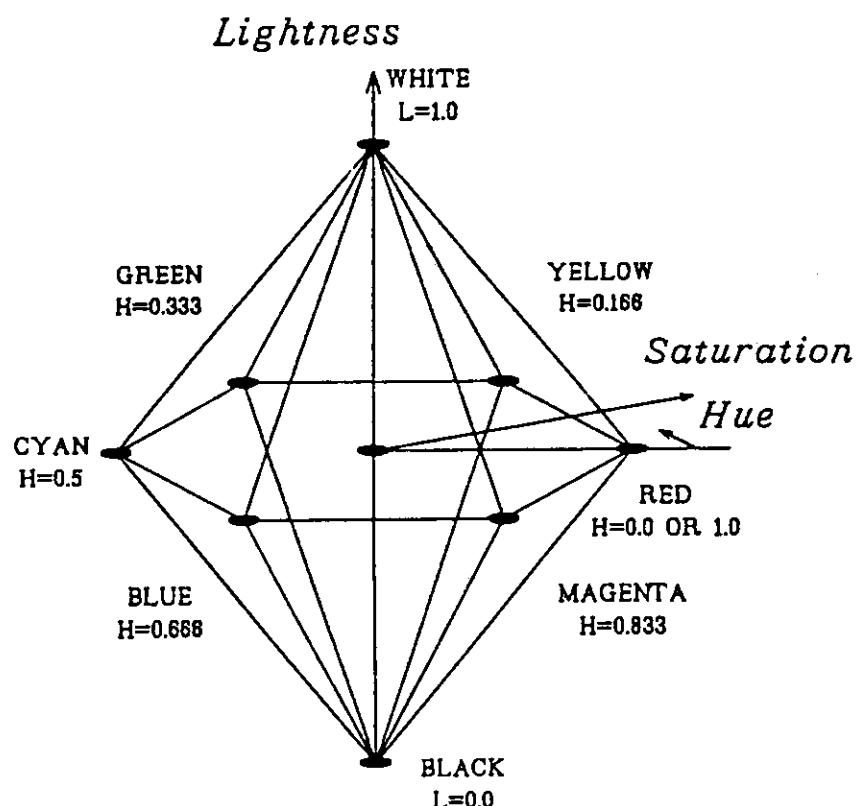


Fig. 4.3 Heu Lightness Saturation color model

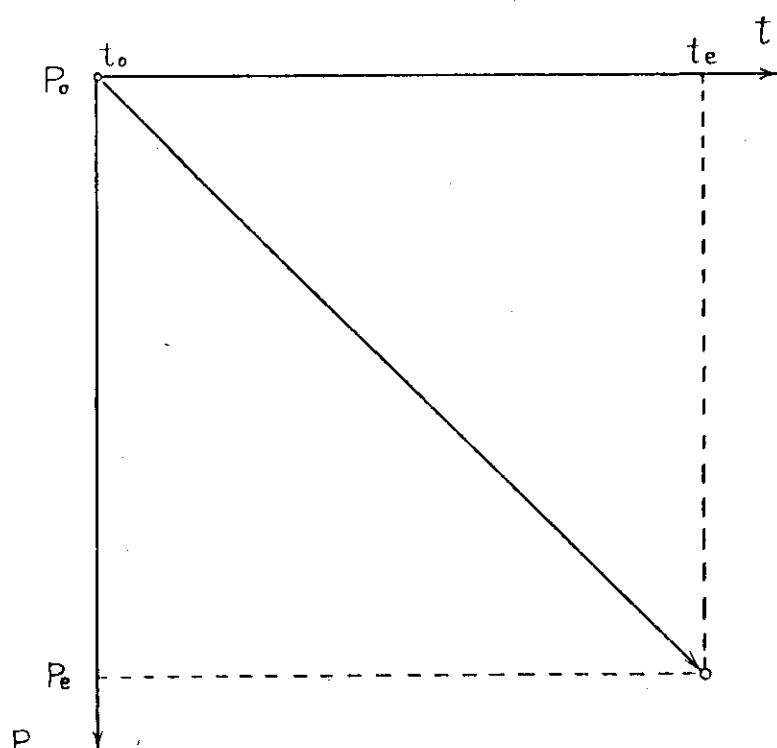


Fig. 4.4a Method for marker particle movement

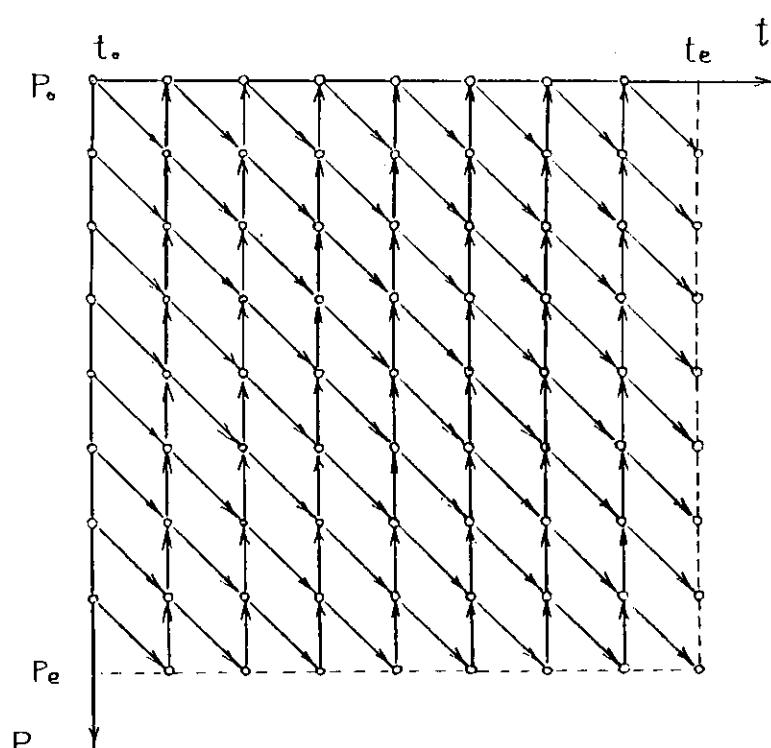


Fig. 4.4b Method for marker particle movement

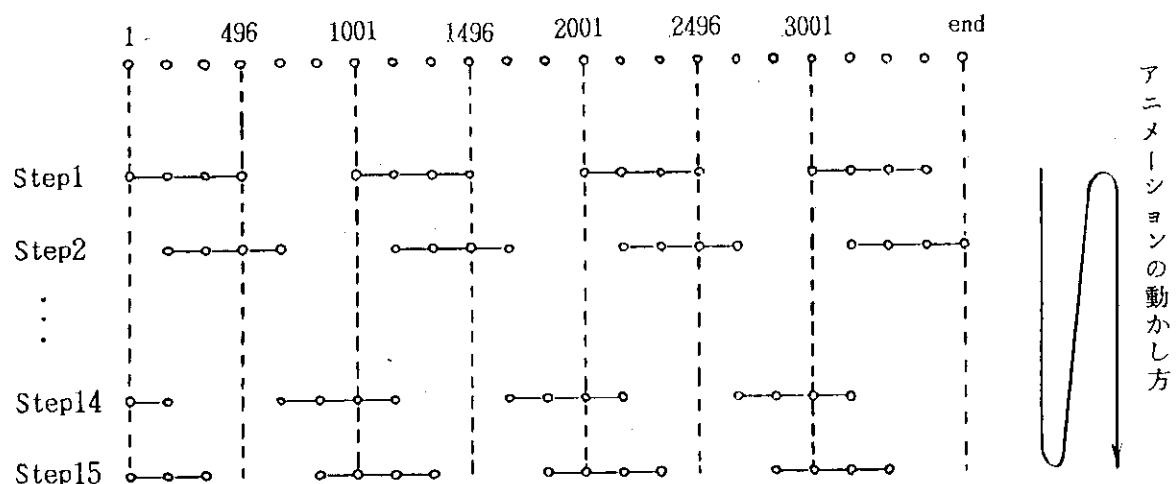


Fig. 4.5 Method for flow line movement

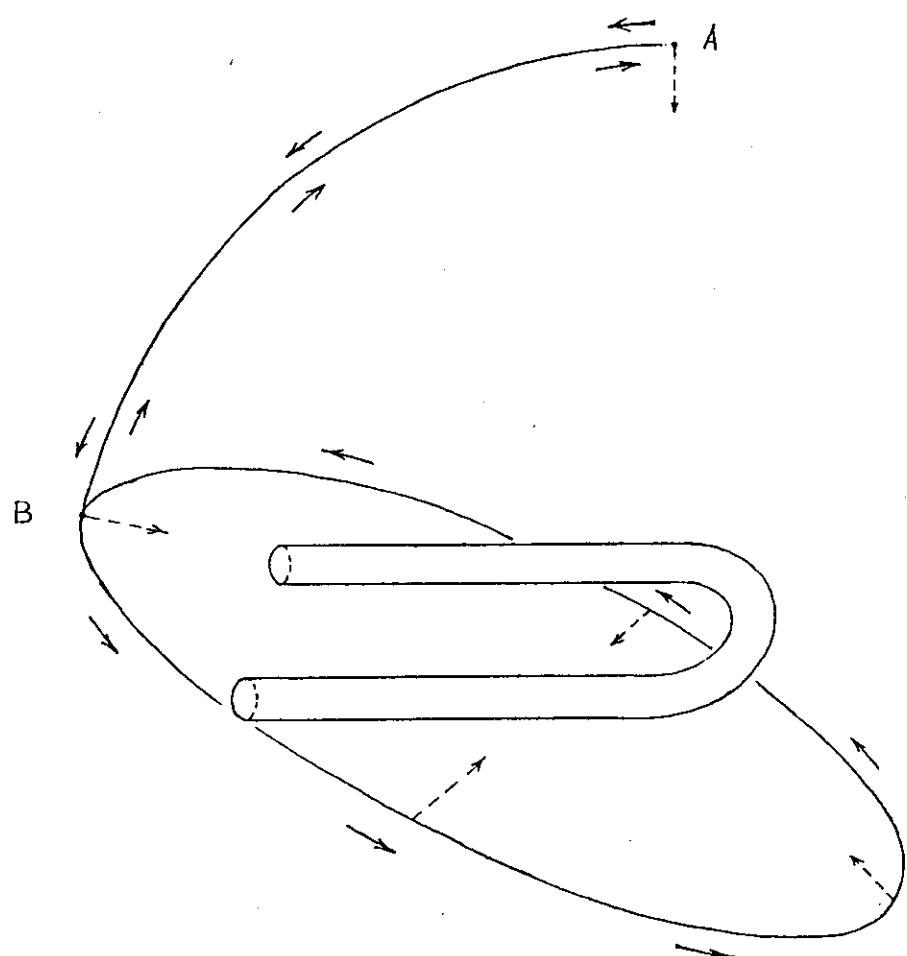


Fig. 4.6 Camera working for viewing curved pipe

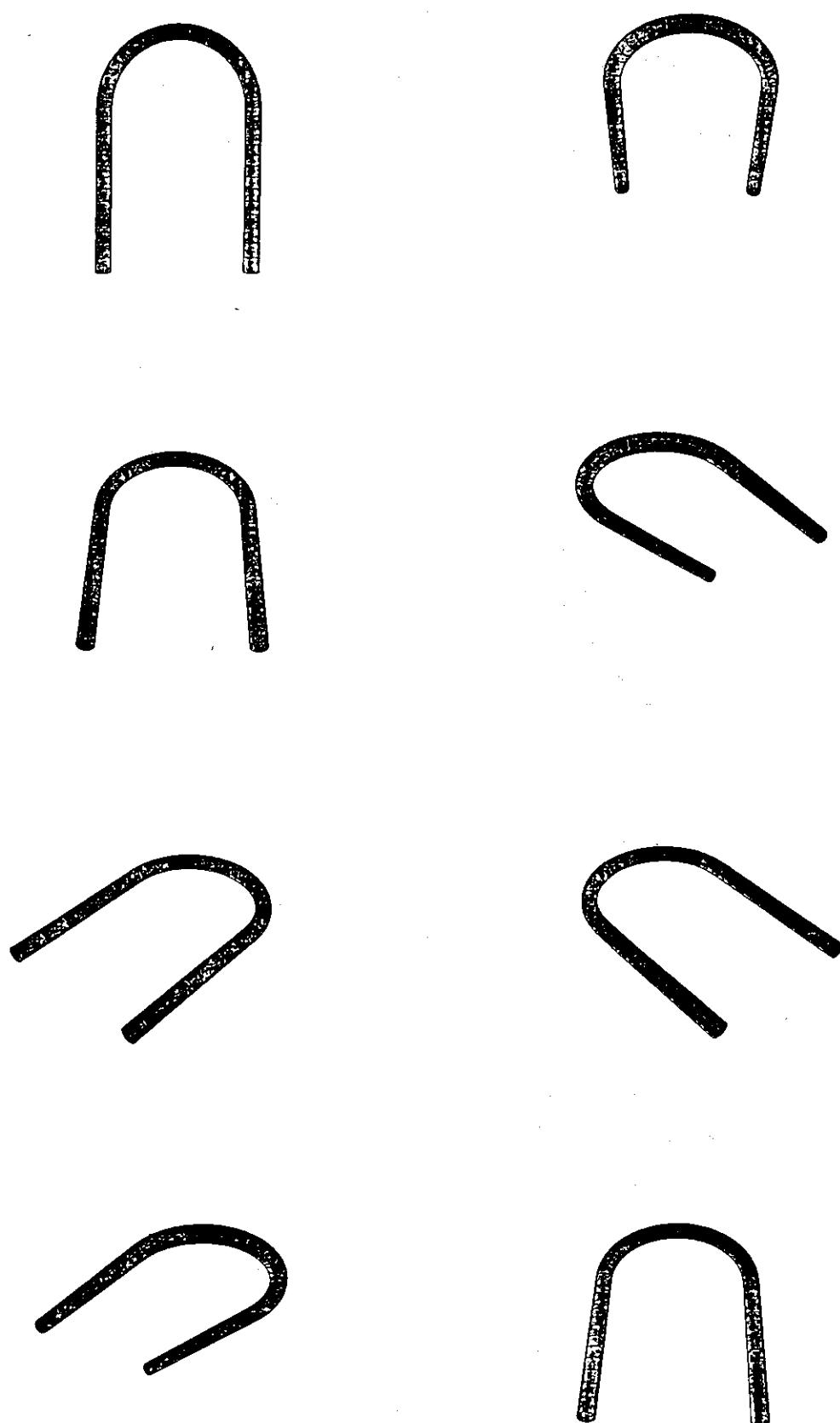


Fig. 4.7 Transition of views of the curved pipe

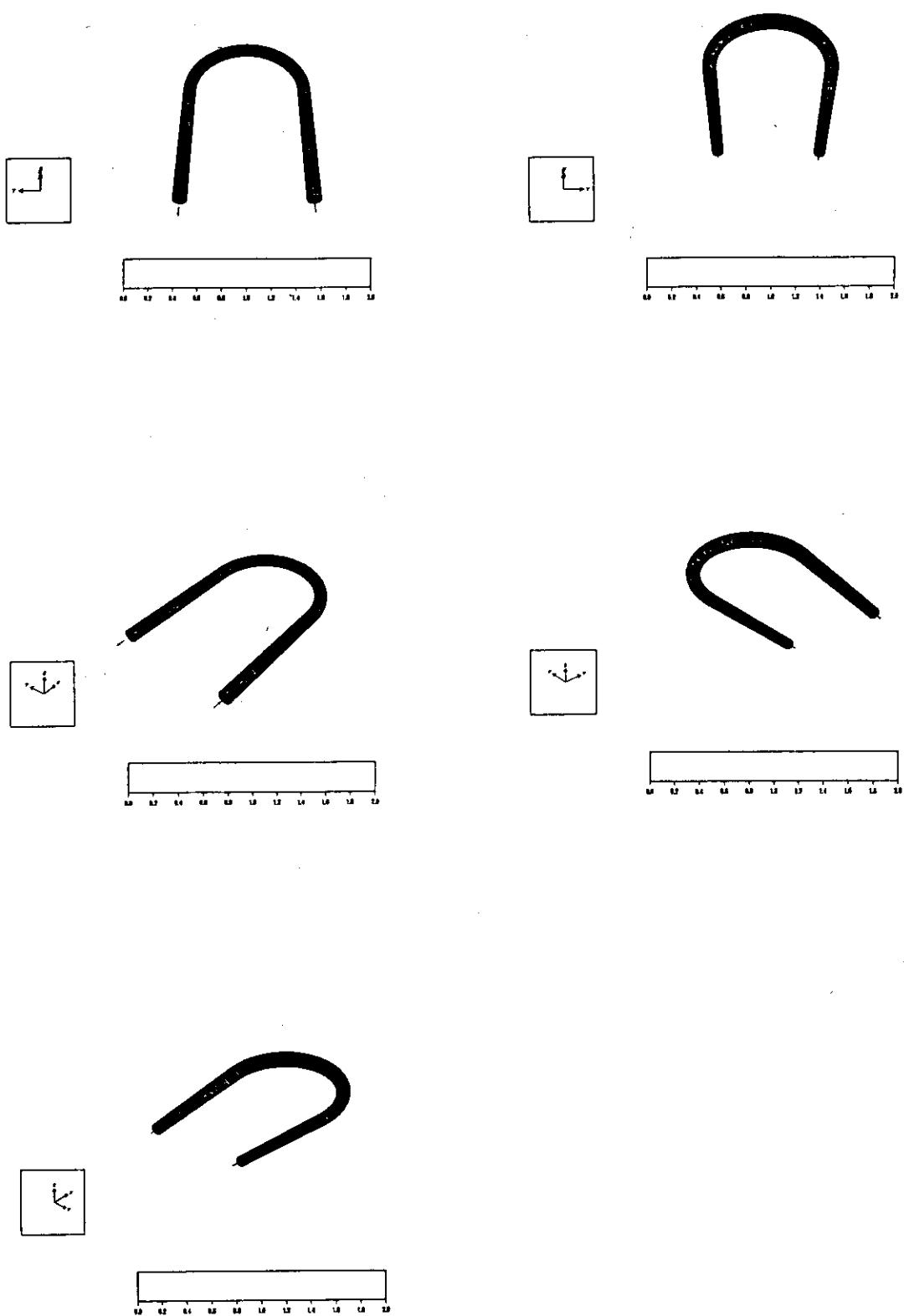


Fig. 4.8 Transition of views of the pressure and temperature distributions on the curved pipe

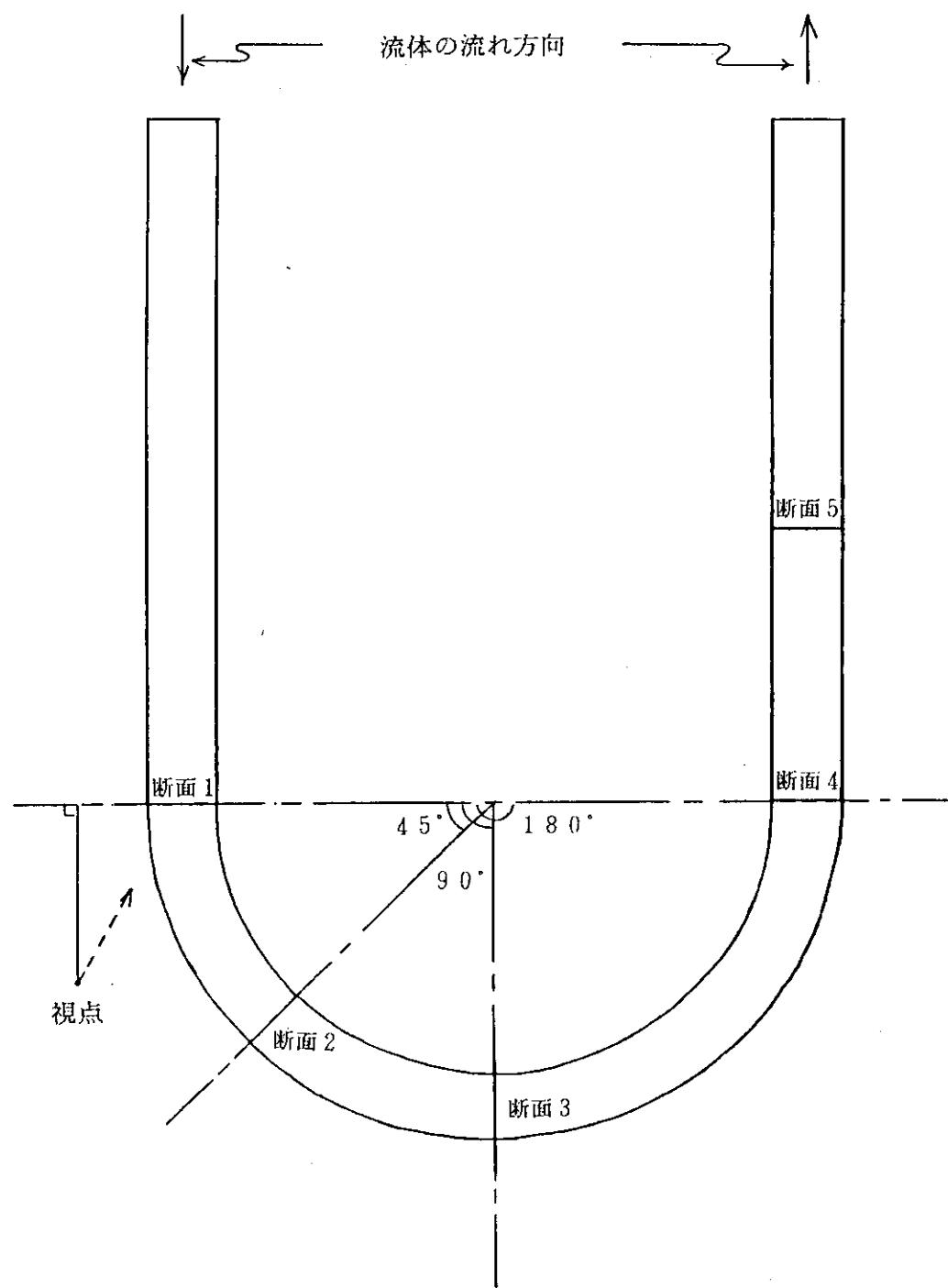


Fig. 4.9 Five viewing sections in the curved pipe

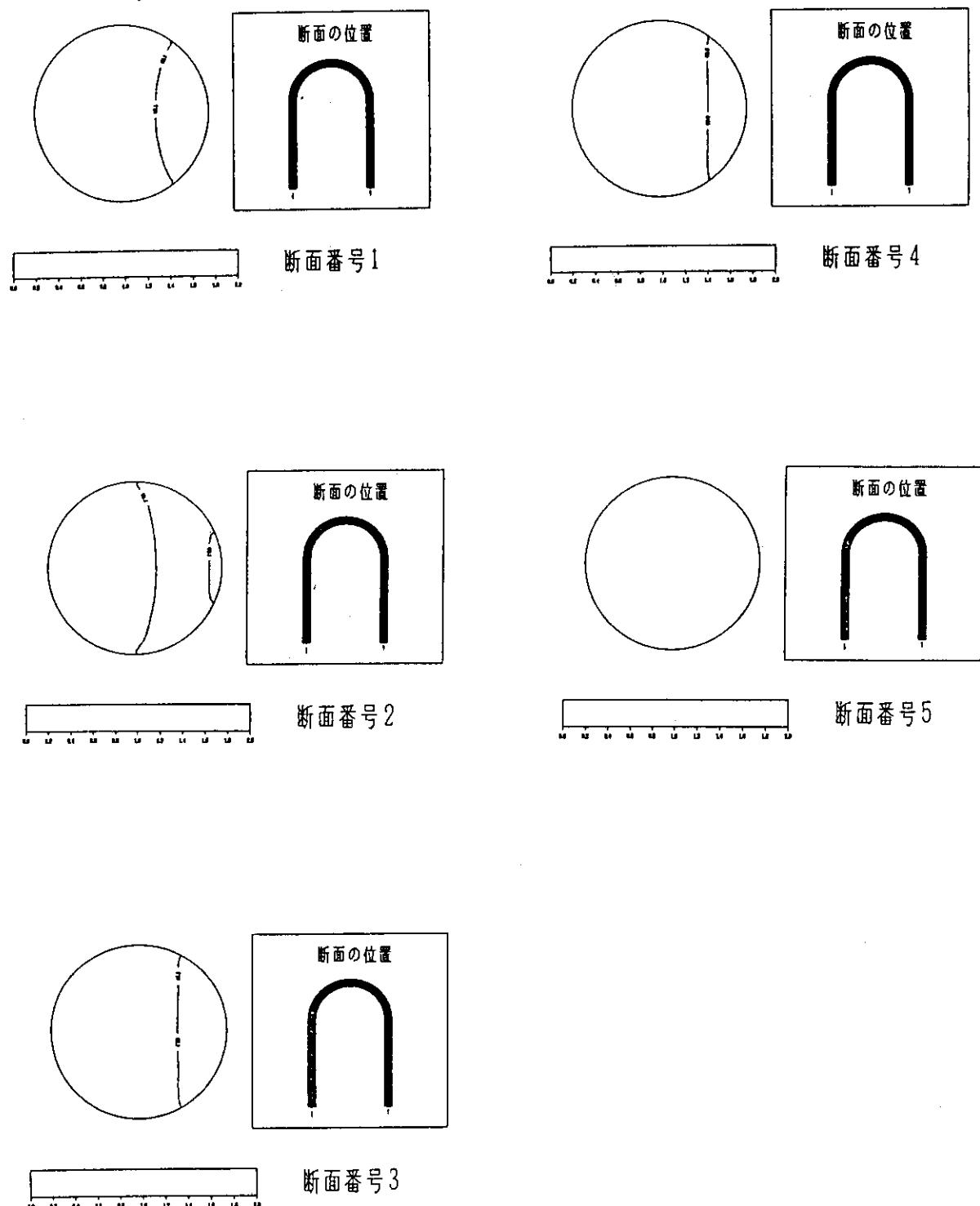


Fig. 4.10 Five circular viewing sections for displaying the pressure and temperature distributions on the curved pipe

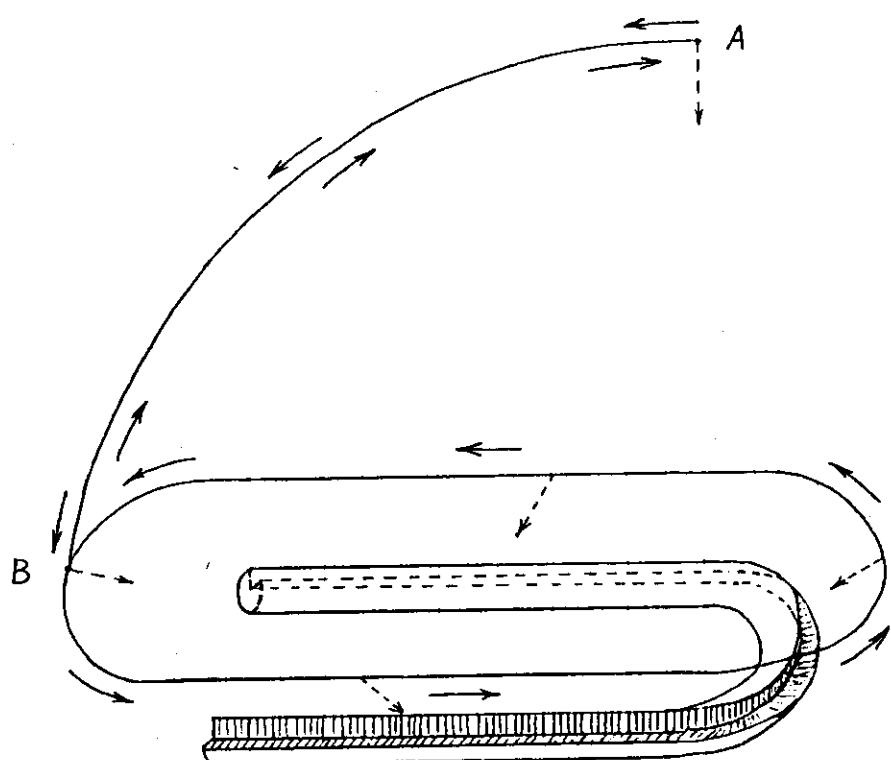


Fig. 4.11 Camera working for displaying the distributions of pressure and temperature on the curved pipe

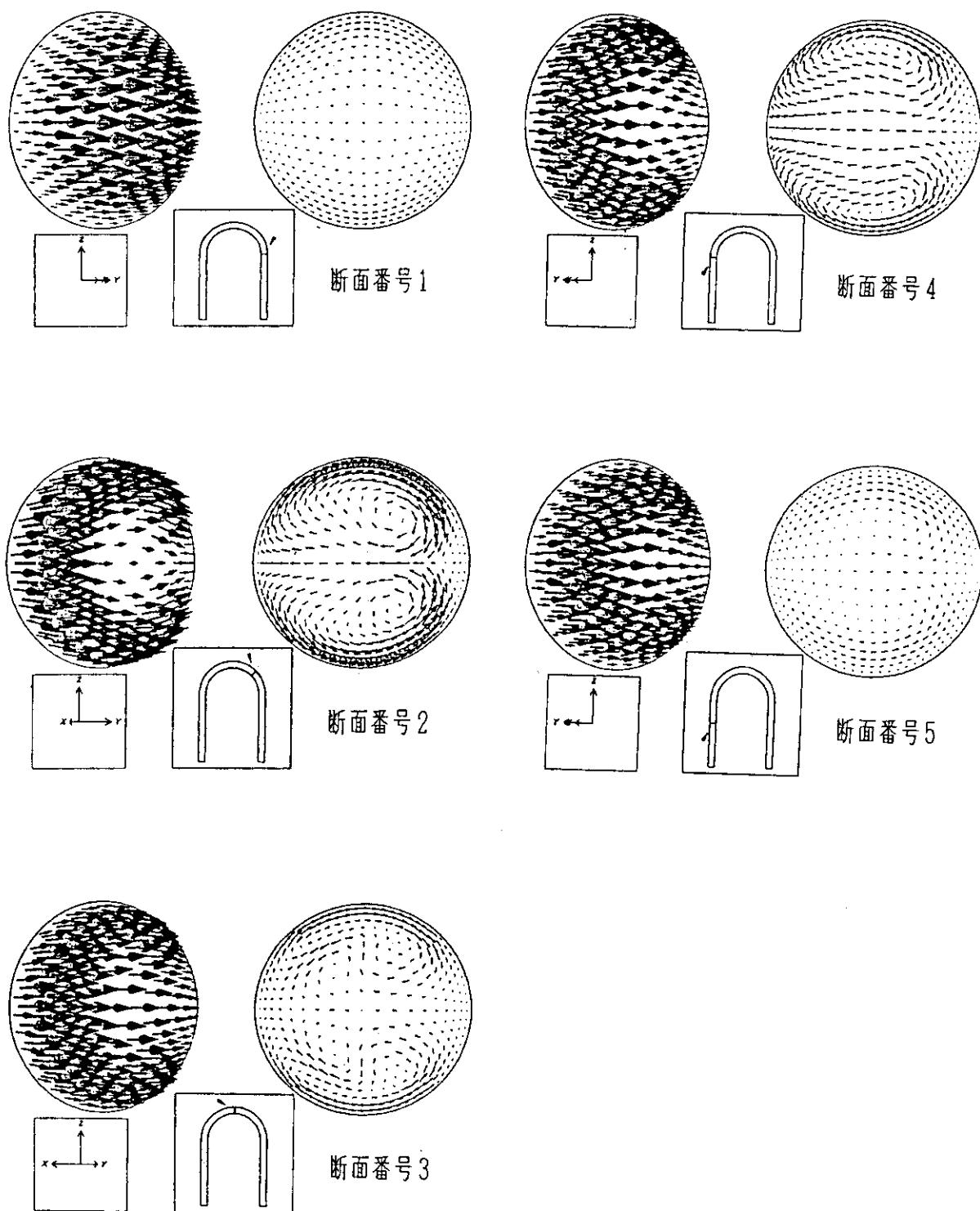


Fig. 4.12 Five views of velocity vectors on the curved pipe

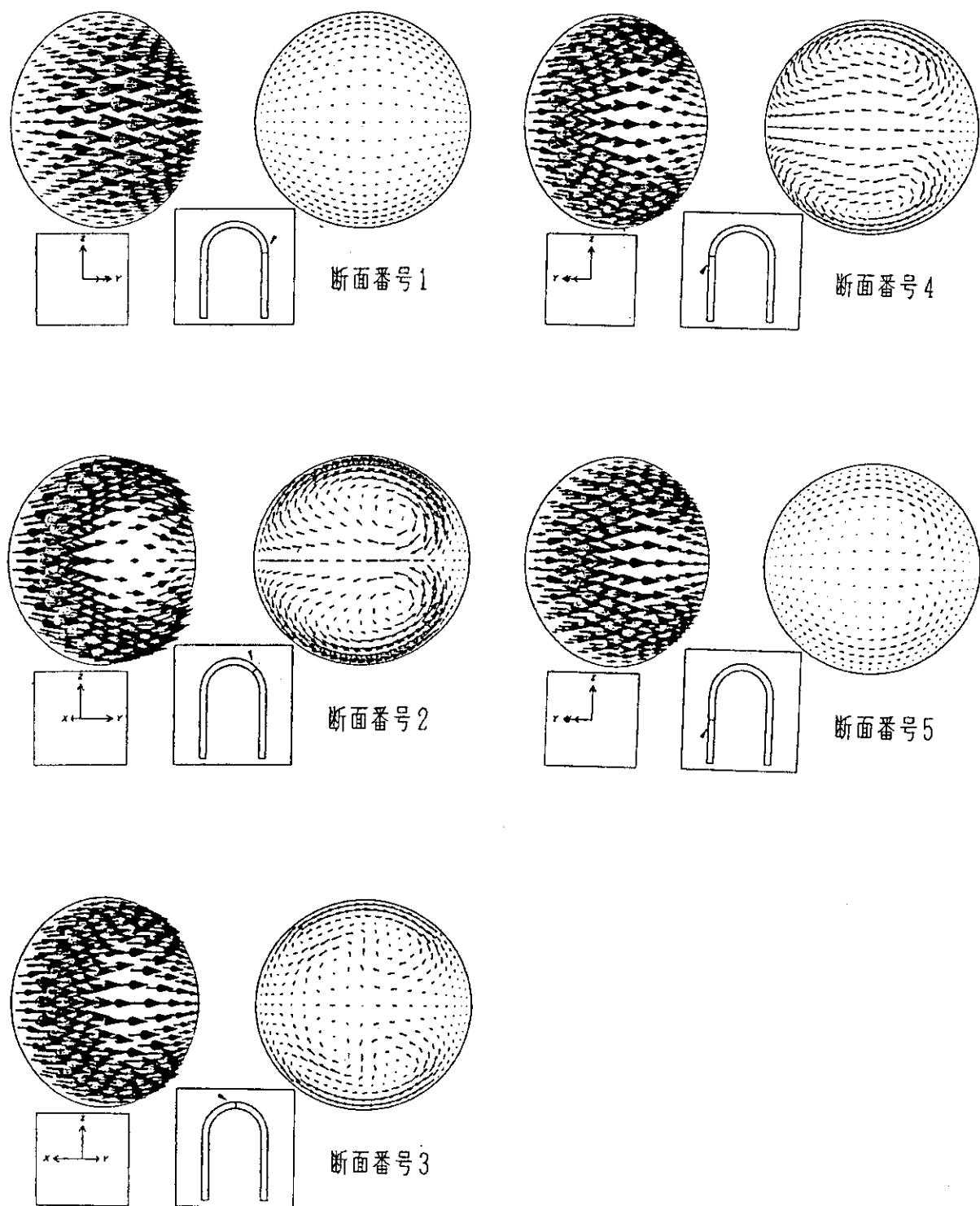


Fig. 4.12 Five views of velocity vectors on the curved pipe

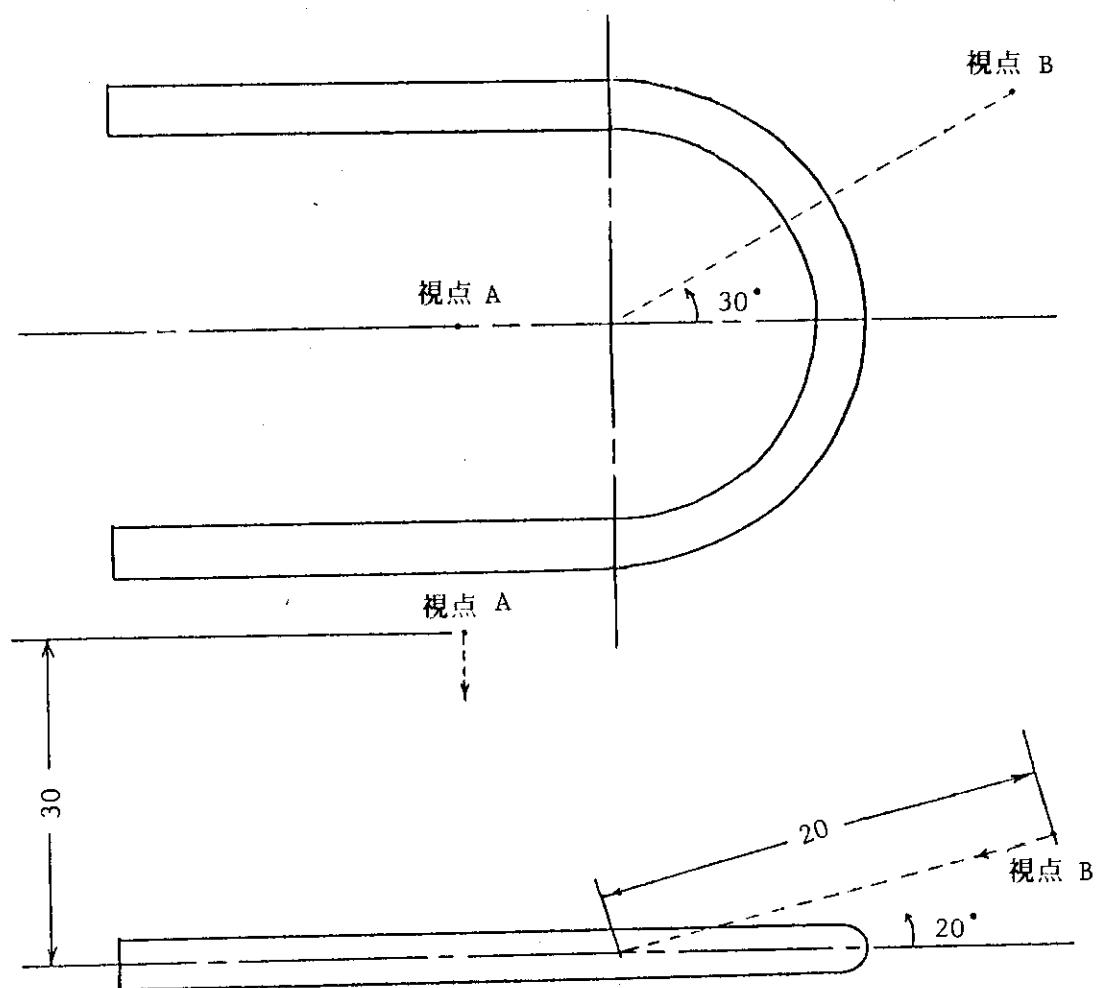


Fig. 4.13 Positions of view points and view centers for displaying marker particle flow lines

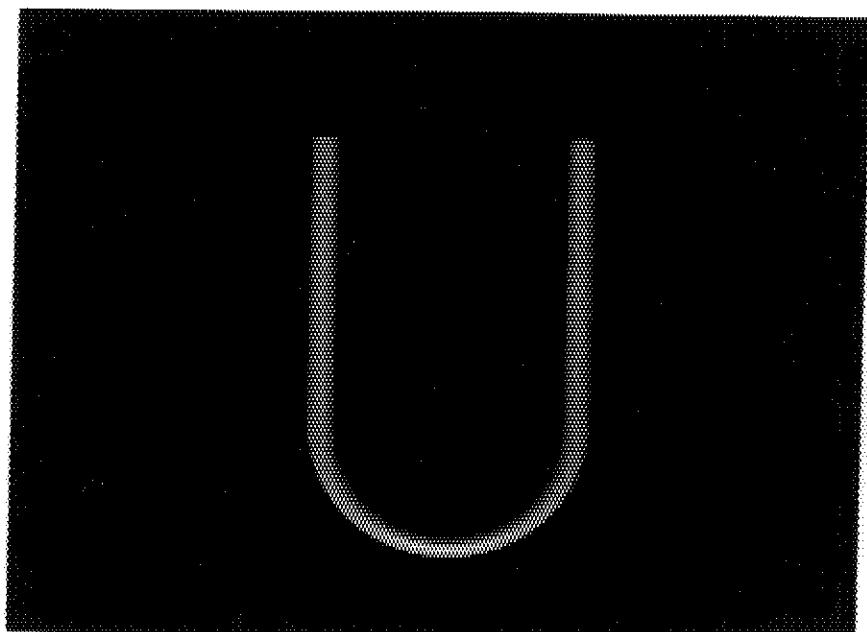


Fig. 4.14 View of marker particle flow lines from view point A

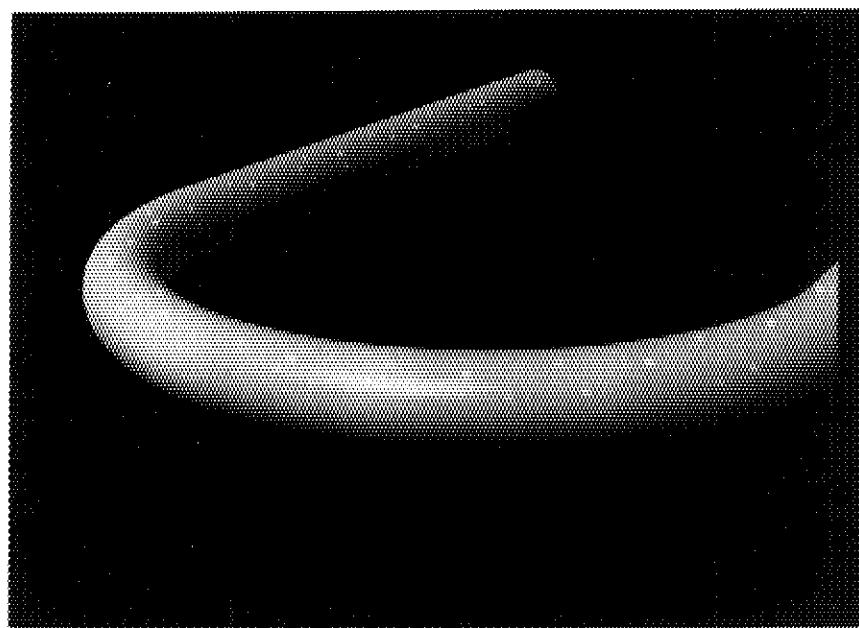


Fig. 4.15 View of marker particle flow lines from view point B

曲がり円管内の流れと温度混合

圧力分布

- 断面 -

原子炉は中間熱交換器と複雑に屈曲した一次配管で結ばれている。この曲がり円管内の熱流動挙動は、境界適合座標系を用いた三次元梢円型ナビエストークス方程式を直接数値積分する手法によって解折された。

非定常三次元非圧縮性流体に対するナビエストークス式は以下のようく記述でき、速度、圧力、温度を同一格子上で定義している。

$$T + E + F + G = Q$$

上式の各項において、 T は時間項、 $-E \sim G$ は対流項、圧力項、粘性項をまとめた項、 Q はソース項を表している。

以上の計算結果に基づき、これより圧力分布、温度分布、速度ベクトル、そしてマーカー粒子の流跡線をアニメーションで示す。

圧力分布

- 切取断面 -

形状の概観

温度分布

- 表面 -

圧力分布
- 表面 -温度分布
- 断面 -

Fig. 4.16a Title of the animation of curved pipe

温度分布
- 切取断面 -

終わり

速度ベクトル

制作

日本原子力研究所計算センター
財団法人原子力データセンター

協力

日本原子力研究所高温工学部
富士通株式会社

マークー粒子の流跡線

Fig. 4.16b Title of the animation of curved pipe

Transient Behavior of Melting Process

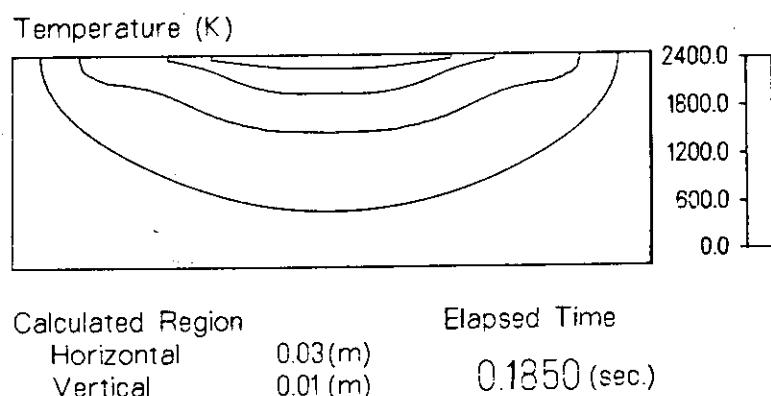
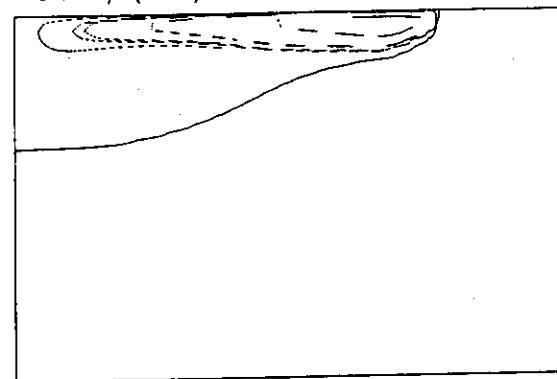


Fig. 4.17 View of temperature distribution of molten metals

Transient Behavior of Melting Process

Velocity (m/s)



Calculated Region Elapsed Time
Horizontal 0.03(m)
Vertical 0.01 (m) 0.1850 (sec.)

Fig. 4.18 Viewing of velocity distribution of molten metals

Transient Behavior
of
Molten Metals
Heated by Electron Beam

Separation Engineering Laboratory
Japan Atomic Energy Research Institute

Transient Behavior
of
Temperature

Numerical Model (2-D)

(Navier-Stokes Equation)

$$\begin{aligned}\nabla \cdot u &= 0 \\ \frac{\partial u}{\partial t} + u \cdot \nabla u &= -\frac{1}{\rho} \nabla P + \nu \nabla^2 u - \beta \Delta T g \\ u &= (u, v)\end{aligned}$$

• Stress Condition

$$\mu \frac{\partial u}{\partial y} = -S \frac{\partial T}{\partial x}$$

S : Surface Tension Coefficient

Transient Behavior
of
Molten Zone and Velocity

(Energy Equation)

$$\begin{aligned}\frac{\partial T}{\partial t} + u \cdot \nabla T &= K \nabla^2 T \\ u &= 0 \quad \text{in the solid region}\end{aligned}$$

End

Algorithm

- MAC Method
- Convection Term – Upwind Difference Method

Fig. 4.19 Title of the animation of molten metals

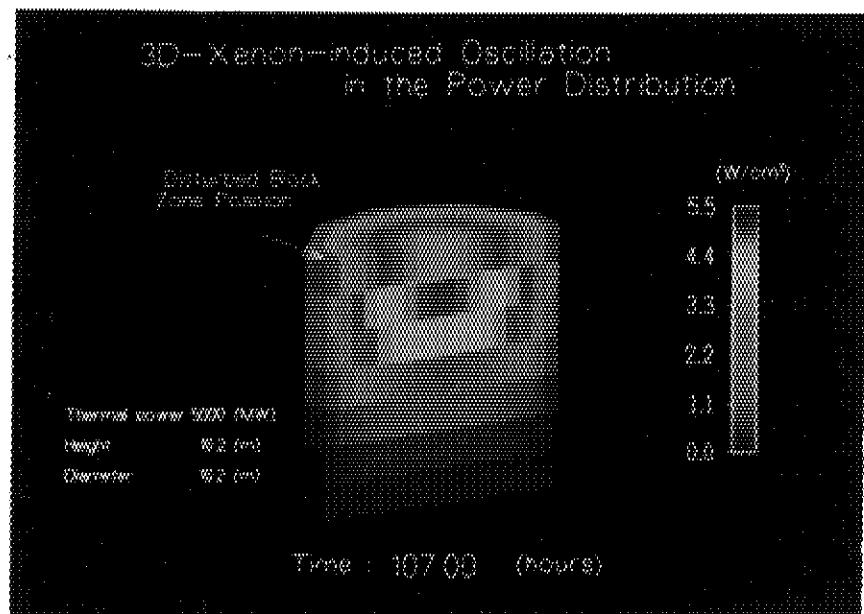


Fig. 4.20 View of reactor core model and power density distributions

Three-dimensional simulation
for xenon-induced oscillation
in the power distribution

Kiyonobu YAMASHITA, Isao MURATA,
Hiroo HARADA and Ryuichi SHINDO

Japan Atomic Energy Research Institute

Takuya TSURUOKA

Nuclear Energy Data Center

Distribution
of
Power Density

Principal parameters in the reference reactor

Thermal power	5000MW
Core	
height	16.2m
diameter	16.2m
Fuel	Low enriched uranium
loading	Homogeneous
Moderator	Graphite
Reflector thickness	
top	1.0m
side	1.0m
bottom	1.0m

FIN

Code System

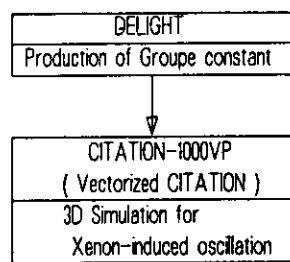


Fig. 4.21 Title of the animation of Xenon-induced oscillation

5. 使用計算時間

各アニメーション作成に使用した計算時間について述べる。

Table 5.1 には、各アニメーションの作成に使用した静止画の枚数、画像作成に費やした計算時間、各アニメーションの映像時間、及び VTR への録画に要した時間をまとめてある。

この Table を見ても分る様に、各アニメーションの作成に使用した計算時間は、静止画枚数や映像時間に関わりなくまちまちである。この理由は、対象形状の格子点数によって決まる静止画1枚当たりの計算時間や、画の動かし方によって決まる静止画の作成枚数が異なっているからである。従って、CGMS のマニュアルにも提示されている様に、アニメーションの製作期間に制限がある場合には、画質や静止画の作成枚数について考慮し、十分な見積りを立てた後に製作を始めるべきである。

また、静止画の描き方にも依るもの、現在の CGMS は他のグラフィックス・パッケージに較べて画像作成に非常に時間がかかる。VP による静止画1枚の画像作成に、U字管の熱流動解析では 23.7 秒、同位体分離過程における金属片の熱流動解析（2次元）では 100 秒、高温ガス炉のキセノン振動解析では 12.3 秒を要した。このことは、平均すれば、1 分の映像時間に対して平均 11.3 時間の画像作成時間が必要であるということになる。

CGMS の画像作成速度が遅い理由は、

- (1) 多機能に重点を置いて効率をよく考えない画像生成法を用いている。
- (2) 折角 VP で実行しながら、画像作成処理がベクトル演算で行われていない。
- (3) 最近のグラフィックス・ワーク・ステーションの様に、画像処理専用パイプラインや Z バッファの機能を装備していない。
- (4) 原研では CGMS を使い込んでいないので、丁寧な絵を描き過ぎている。

等である。

Table 5.1 Computing time for making each animation

項目	U字管	金属片	高温ガス炉炉心
使用計算機	M-780 OR VP-200E		
静止画枚数	1, 367	502	207
計算時間	9 (H) (M-780)	14 (H) (VP-200E)	0. 7 (H) (VP-200E)
映像時間	8分14秒	3分37秒	4分23秒
録画時間	17時間	11時間	4. 2 時間

6. おわりに

原子力コードの利用の高度化の一環として、数値計算結果を3次元カラー・グラフィックス・システムを用いて表示することを試みた。

アニメーション化を行ったのは、原子炉配管をモデル化したU字管内の熱流動挙動、電子ビームで加熱された溶融金属内の熱流動挙動、及び高温ガス炉炉心のキセノン振動の計算結果である。これら3例のアニメーションでは、与えられた計算結果の総てを最適な手法で可視化していることは断言出来ないが、物理現象を概ね良く再現出来た。

上記3例の映像化を経験することにより、プリミティブ物体からの形状生成、計算値の等高線表示、粒子追跡表示、ベクトル図表示などの一般に用いられている手段が有効であることが分った。また、原子力分野での映像化の課題は多く、アニメーションをユーザに示すことにより、更なる映像化への要求が生まれることもわかった。

本アニメーション化作業によって得られた可視化手法は、他の問題に対しても形状の定義方法を変えるだけで適用出来るものであり、今後のアニメーション作成に役立つと考えられる。

CGMSの問題点は、画像作成に時間がかかり過ぎることである。最近のグラフィックス・ワーク・ステーションでは、そのハードウェア・アーキテクチャを最大限に活かした簡便なグラフィックス・パッケージが提供され、それによると、実時間に近い速度での画像作成は行える様になってきている。この意味でCGMSは2桁程度、画像作成速度が低い。

数値計算結果のアニメーション化は、多大な計算機資源を要するが、見る者の視覚に訴える力の強さは他に例を見ない。原研計算センターでは、将来的にはグラフィック専用ワークステーションの導入を考えており、今後さらに計算結果の映像化に力を入れる予定である。

将来の原研における課題としては次のことが挙げられる。

- (1) 原研での映像化を推進するためのソフトウェア／ハードウェア環境整備を行う。
- (2) 画面作成を高速化する手段を得る（試用に用いたCGMSでは遅過ぎる）。
- (3) グラフィックス共通言語：PHIGSを採用し、異機種のグラフィックス装置上でソフトウェアを共用する。
- (4) 作画手段のパッケージ化を行う（既成のものの導入を検討）。
- (5) 映像化ニーズを掘り起す。

謝 辞

本アニメーション作成の全般に亘り、FIVIS と VTR の借用、及び VP を利用に便宜を図って頂きました富士通(株)科学システム部の皆様、特に、南多善課長に感謝の意を表します。また、数々の貴重な御助言を賜りました富士通(株)花の万博推進本部システム部の皆様に心より感謝致します。

U字管のアニメーション作成にあたり、数値計算結果を提供して頂ました高温工学研究室の功刀資彰氏に感謝します。金属片溶融アニメーション作成にあたり、計算コード、及びデータを提供して頂ました計算センターの横川三津夫氏に感謝します。キセノン振動アニメーション作成にあたり、数値計算結果を提供して頂ました高温工学試験研究炉設計室の山下清信氏と計算センターの原田裕夫氏に感謝します。

参 考 文 献

- (1) 富士通 ; FACOM OS IV/F4 MSP CGMS 説明書, 1978.
- (2) 鈴木 宏正 ; 日経 COMPUTER GRAPHICS, 20, p. 126 - p. 131, 1988.
- (3) 矢島 章夫, 栗原 恒弥 ; 日経 COMPUTER GRAPHICS, 15, p. 122 - p. 128, 1987.
- (4) 功刀 資彰 ; 私信
- (5) ソフトウェア クレイドル ; 一般座標系熱流体解析プログラム SCRYU 使用説明書
- (6) H. Kaburaki, M. Yokokawa, M. Seki, T. Arisawa, "Numerical Analysis of Transient Behavior of Molten Metals Heated by Electron Beam," ASME Winter Annual Meeting to be held on December 11 - 13, 1989, at San Francisco, U.S.A
- (7) 原田 裕夫, 石黒 美佐子 ; "3次元中性子拡散コード CITATION のベクトル化", 日本原子力学会誌, 27, No. 11, p. 1047 - p. 1055.
- (8) 藤崎 正英, 久米 悅雄 ; セルラアレイプロセッサ CAP による動画作成, JAERI - memo 01 - 138, 1989.
- (9) 浅沼 強 編 ; "流れの可視化ハンドブック", 浅倉書店, 1977.
- (10) 木下 健治 ; "画像処理システムの基礎と設計・製作", CQ 出版社.

謝 辞

本アニメーション作成の全般に亘り、FIVIS と VTR の借用、及び VP を利用に便宜を図って頂きました富士通(株)科学システム部の皆様、特に、南多善課長に感謝の意を表します。また、数々の貴重な御助言を賜りました富士通(株)花の万博推進本部システム部の皆様に心より感謝致します。

U字管のアニメーション作成にあたり、数値計算結果を提供して頂ました高温工学研究室の功刀資彰氏に感謝します。金属片溶融アニメーション作成にあたり、計算コード、及びデータを提供して頂ました計算センターの横川三津夫氏に感謝します。キセノン振動アニメーション作成にあたり、数値計算結果を提供して頂ました高温工学試験研究炉設計室の山下清信氏と計算センターの原田裕夫氏に感謝します。

参 考 文 献

- (1) 富士通 ; FACOM OS IV/F4 MSP CGMS 説明書, 1978.
- (2) 鈴木 宏正 ; 日経 COMPUTER GRAPHICS, 20, p. 126 - p. 131, 1988.
- (3) 矢島 章夫, 栗原 恒弥 ; 日経 COMPUTER GRAPHICS, 15, p. 122 - p. 128, 1987.
- (4) 功刀 資彰 ; 私信
- (5) ソフトウェア クレイドル ; 一般座標系熱流体解析プログラム SCRYU 使用説明書
- (6) H. Kaburaki, M. Yokokawa, M. Seki, T. Arisawa, "Numerical Analysis of Transient Behavior of Molten Metals Heated by Electron Beam," ASME Winter Annual Meeting to be held on December 11 - 13, 1989, at San Francisco, U.S.A
- (7) 原田 裕夫, 石黒 美佐子 ; "3次元中性子拡散コード CITATION のベクトル化", 日本原子力学会誌, 27, No. 11, p. 1047 - p. 1055.
- (8) 藤崎 正英, 久米 悅雄 ; セルラアレイプロセッサ CAP による動画作成, JAERI - memo 01 - 138, 1989.
- (9) 浅沼 強 編 ; "流れの可視化ハンドブック", 浅倉書店, 1977.
- (10) 木下 健治 ; "画像処理システムの基礎と設計・製作", CQ 出版社.