

JAERI-Research

97-055



JT-60プラズマ位置形状実時間可視化システムの開発

1997年8月

栗原研一・川俣陽一・秋葉賢一*・安達宏典・木村豊秋

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。
入手の問合わせは、日本原子力研究所研究情報部研究情報課（〒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）で複写による実費領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 Research Information Division, Department of Intellectual Resources, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken, 319-11, Japan.

© Japan Atomic Energy Research Institute, 1997

編集兼発行 日本原子力研究所
印 刷 いばらき印刷(株)

JT-60プラズマ位置形状実時間可視化システムの開発

日本原子力研究所那珂研究所核融合装置試験部

栗原 研一・川俣 陽一・秋葉 賢一*

安達 宏典・木村 豊秋

(1997年7月15日受理)

プラズマの楕円形や三角形度は、エネルギー閉じ込め性能の決定因子の一つであるなど、その断面位置形状の重要性が近年認識されてきた。一方その全体像の実時間同定は、計算時間の制約から不可能とされていた。障害の原因である特殊関数や逆行列等の計算を実時間処理から除くために、特殊なテーブルを大容量メモリ上に展開しておくというアルゴリズム上の工夫に加え、最新の電子機器を用いて装置を構成した。この結果大幅な時間短縮に成功し、断面形状を毎秒10コマ（約100ms/1画面）の速度で実時間動画として可視化した。同時に着火直後のリミタ配位からダイバータ配位に移行する一連の様子など、これまで得られなかった映像情報を実験運転者に初めて実時間で提供した。本報告では、JT-60で実稼働中のシステムの開発結果と実時間制御への開発構想について報告する。

Development of the Real-time Plasma Shape Visualization System in JT-60

Kenichi KURIHARA, Youichi KAWAMATA, Kenichi AKIBA*, Hironori ADACHI
and Toyoaki KIMURA

Department of Fusion Facilities
Naka Fusion Research Establishment
Japan Atomic Energy Research Institute
Naka-machi, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received July 15, 1997)

Since plasma ellipticity and triangularity seem to partially determine energy confinement performance, the importances of plasma shape have been recognized in recent years. On the other hand, reproduction of the plasma full shape in real-time has been considered impossible due to the limitation of computing capability in an obtainable device. To solve this problem, computation of special functions and matrix inversion, that are obstacles for speed improvement in the calculation, should be removed from the real-time procedures. A method using particular coefficient vectors in tabular form was developed and the table is stored in a large scale memory of the fast computer, where the vectors are corresponding to the in-vessel flux calculation points on the poloidal cross-section. This measure in software was taken together with the new installation of advanced electronics devices. As a result, we succeeded to reduce the computation time extremely, and changes of the full JT-60 plasma shape is reproduced every 100 ms in real-time. This system visualizes time evolution of plasma shape clearly and in detail, from the beginning to the end of pulse discharge. This report describes the development of the system in both hardware and software, and also gives the prospect of this system in application to plasma real-time feedback control.

Keywords: JT-60, Plasma Position and Shape, Outermost Magnetic Surface, Plasma Control,
Real-time Visualization

*Mito Software Engineering Co.

目 次

1. はじめに	1
2. 同定アルゴリズムの基本構成	2
2.1 電磁気計測検出器	2
2.2 磁束関数の表現形式	3
2.3 磁束高速計算用大容量テーブル	5
2.4 同定及び可視化手順	6
3. システム構成	8
3.1 ハードウェア構成	8
3.2 機能と動作	10
3.3 ソフトウェア構成	11
4. システムの性能評価	13
5. 超高速化と実時間制御応用への課題	15
5.1 開発展望 — 並列処理計算機の選定と計算時間短縮効果見積り	15
5.2 システム構成	17
5.3 初期結果	19
6. まとめ	20
謝 辞	20
参考文献	21
付録：周辺磁場揺動の可聴化観測システム	22

Contents

1. Introduction	1
2. Basic Procedures to Identify Plasma Shape	2
2.1 Electromagnetic Sensors Utilized for the Shape Reproduction	2
2.2 Formulation of Flux Function Calculations	3
2.3 Structure of the Coefficient Vectors in Tabular Form	5
2.4 Identification and Visualization Algorithm	6
3. System Configuration	8
3.1 Hardware Specification	8
3.2 Functions and Performance Required for the System	10
3.3 Software Configuration	11
4. Evaluation of the Developed System	13
5. Key Issues in the Application to Real-time Feedback Control	15
5.1 Prospect of the Development	15
5.2 System Hardware Configuration	17
5.3 Initial Results from the Parallel Computing System for Real-time Shape Reproduction	19
6. Concluding Remarks	20
Acknowledgments	20
References	21
Appendix: Observation of "Sound" Corresponding to Magnetic Field Fluctuations in a Plasma	22

1. はじめに

大規模なトカマク型核融合装置を用いた実験が日本、米国、欧州で本格的に開始されてから10年以上が経過した。JT-60及び欧州のJETでは瞬間的に臨界プラズマ条件を達成するまでにプラズマ性能が向上した。複雑な内部構造を持ち、このため多様な挙動を示すプラズマは、一方で僅か十数種類の制御可能な外部操作量によって生成維持されている。プラズマに影響を与える物理量の一部に不可観測、不可制御な因子が存在するとしても、主要な性能は外部操作の帰結であるという実験結果の解釈が一般的である。このプラズマ性能へ大きな影響を与える重要な可制御因子の一つが、プラズマ断面の位置形状であることは、以下に掲げるJT-60を始めとするトカマク型核融合装置を用いた実験結果から認識されてきている。即ち、

- ・プラズマの断面形状（楕円度、三角形度）は、エネルギー閉じ込め性能を決定する重要因子の一つである。

- ・プラズマ表面と第一壁やRFアンテナとの距離、ダイバータ板上の磁力線の位置は、粒子の出入り、不純物混入、加熱・電流駆動効率と密接に関係する。
- ・真空容器内に設置された第一壁やダイバータ板等のプラズマ対向機器の保全のためには、プラズマ断面形状の詳細情報が必要である。

一方、従来技術には、以下の解決すべき課題が存在していた。即ち、

- ①プラズマ断面形状は外部に置かれたセンサーの信号から原理的に同定出来るのか、出来るとしたらどのようなセンサーが必要なのか、といった疑問に答える一般的方法論が無い。
- ②従来の幾何学的プラズマ中心位置といったようなマクロ情報だけでは、形状変化や振動は把握出来ない上、可視カメラ映像では、正確な断面像は捉えられない。

この第1番目の課題については、トカマク・プラズマの位置形状制御に必要なセンサーの種類と数に対する指針を与えられる方法論が示され[1]、国際熱核融合実験炉ITER (International Thermonuclear Experimental Reactor)の工学設計活動にも使用されている。それらの方法をプラズマの性能向上や解析評価のために役立てていくことが、第2番目の課題の答えにもなる訳である。その具体的かつ達成可能な目標として、プラズマ位置形状の断面全体像を実時間で動画可視化することを想起した。勿論、さらなる高速化を実現して、実時間制御或は将来の核融合炉計装への応用と発展させていくことが長期的な課題となる。その意味でもプラズマ断面位置形状の全体像を実時間で動画可視化することは、最終目標へ向かった開発の一つの段階と位置付けられる。

このような基本的な位置付けの中で開発を行ったJT-60プラズマ位置形状実時間可視化システムについて、まず同定アルゴリズムの基本構成を述べる（2章）。そこでは、電磁気計測検出器の信号を用いた場合には、想定されるどの方法を用いても磁束関数は共通の形式で記述出来ること、さらにその形式を高速に計算する方法について提案する。次に、その方法をJT-60に於いて実現する場合に関して、システムのハードウェア及びソフトウェアについての構成（3章）、及び実験した結果のシステムの性能評価（4章）について詳述する。さらに次の段階への考察として、超高速化の構想と実時間制御への展望の現状を報告し（5章）、最後にまとめを行う。なお付録で、位置形状情報を補うためにプラズマ内部の変化が周辺磁場揺動になることを利用した、周辺磁場揺動の可聴化観測システムを紹介する。

2. 同定アルゴリズムの基本構成

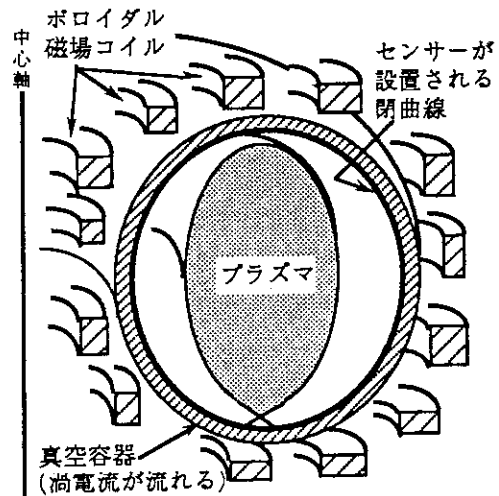
これまでのトカマク実験では、プラズマの位置形状は、その幾何学中心の水平位置や垂直位置といったマクロ量を、外部に置かれた単純で信頼性の高い電磁気計測検出器から得られる磁場や磁束の値を用いて算出し、制御に使用してきた。しかし、高性能のプラズマを生成するには、プラズマ位置形状のマクロ量だけの制御では不十分であり、その断面全体の位置形状の制御が重要であることが、実験の進展と共に認識されてきた。

その位置形状同定問題は、準定常電流場におけるMaxwell方程式

$$\text{rot } \mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{j} \quad (\mathbf{j}: \text{プラズマ電流密度或いはコイル電流密度, } \mathbf{B}: \text{磁束密度}) \quad (2.1)$$

を数値的に解くことであり、その方法はこれまで数種類提案されている[1, 2]。特にトカマクでは、軸対称(ドーナツのどの断面においても物理量は等しい)という性質を近似的に保有していることから、その断面領域の各点において定義されたスカラー関数「磁束関数」の分布を求める問題に帰着出来る。数理解析的な表現では、楕円型2階偏微分方程式の境界値問題の数値解法に分類される。求めた磁束関数分布を等高線で描くと、ある条件(後述)に適合した1つの閉じた等高線がプラズマの形状となる。これは、①プラズマを構成している荷電粒子が磁力線に巻き付いて旋回運動をしているという物理的描像が成り立つプラズマを前提にしており、通常のトカマク放電では殆どの時間でこの描像通りとなっていること、②磁力線は等磁束関数面(=磁気面)に横たわっていること、の2点が成立しているからである。

このプラズマ断面の位置形状全体像(最も外側の閉じた磁気面の形であることから最外殻磁気面形状とも呼ぶ)は、プラズマ外部の磁場計測器等によって厳密に同定可能であることが知られている[1]。これまでのトカマク装置では、可同定条件を十分に満たすために必要な場所にセンサーを設置していない場合や、物理量が互いに従属している異種センサーが設置されている場合等が多く見られる。特に、センサーの数は、計測器や信号処理系の設置に関する物理的或は経済的な制約から限られた数となっている。このため、設計時に既に設置されたセンサーを全て使用することにより、同定演算を安定させ、延いては誤差を小さくする効果が期待される。ここでは、プラズマやセンサーのトポロジーも含め、第2.1図に示すような体系を考えることにする。なお、本報告では、この図に示すとおりポロイダル系の解析であるので、一貫して軸対称系として取り扱うことにする。従って、プラズマは2次元断面を考えることになる。



第2.1図 トカマク装置のトポロジー

2.1 電磁気計測検出器

ここでは電磁気計測検出器から得られる物理量として4種類を使用出来るものとする。

(a) 磁気プローブを用いた局所磁場(磁束密度)計測

(b) 一周ループやサドルループを用いた磁束/磁束差計測

(c) ログスキーコイルを用いたプラズマ電流計測

(d) 電源電流を計測することによるポロイダル磁場コイル電流

これらは、これまでの実験において極めて高い信頼性を有している計測装置であり、また耐中性子線性に優れていることから、将来の核融合炉においても炉計装として十分使用可能な計測装置と見做せる。

これらの計測量の位置形状同定問題における物理的意味は次のとおりである。まず、磁場や磁束計測は、それぞれ直接その設置点での所定の方向の局所磁場 B や磁束 ϕ (中心軸と直交する円盤面の内側の磁束)を計測するものである。ポロイダル断面各点での磁束(関数)値を r - z 平面各点に対応した「高さ」と定義すれば、ポロイダル磁場コイルやプラズマ等の電流源は「山」或いは「谷」を構成する。また、この時プラズマ形状は、最外殻磁気面の条件を具備している閉じた等高線となる。ある点での磁束関数値 ϕ の勾配(z 及び r 微分)と r 方向、 z 方向の磁束密度 B とは、以下に示す関係がある。

$$\mathbf{B} = \frac{1}{r} \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \text{grad} \phi \quad (2.2)$$

また、プラズマを囲む閉曲線で磁束密度ベクトルを周回線積分した結果が、プラズマ電流 I_p に比例する量である。

$$\mu_0 I_p = \oint_{\partial \Omega_p} \mathbf{B} \cdot d\mathbf{s} \quad (2.3)$$

最後のポロイダル磁場コイルは、プラズマ電流と共に磁束、磁束密度の供給源であり、位置形状決定要因ということになる。プラズマ電流分布や現状では不可観測に近い渦電流分布は、通常未知の下で位置形状同定を行うので、コイル電流が既知であることが解の安定性を増す効果となって現われる。渦電流分布は通常不可観測量として取り扱うが、その導通経路の予想がつく場合には、その場所に電流値を未知とした線電流源を置いておき、この未知量も含めてセンサー信号から求めることも可能である。

2.2 磁束関数の表現形式

真空容器の内部でプラズマ表面までの磁束関数分布を求めることが同定の中心である。この注目している領域だけを考えれば真空場と見做せる。しかし、センサーは第2.1図のようにプラズマを囲むように配置され、またポロイダル磁場コイルは、さらにその外側に配置されているのが通常である。このため、センサーから得られる境界条件は、真空場だけでなく当然プラズマを含む領域全体の境界ということになり、そのプラズマ領域をどのような形で考慮するかが各位置形状同定方法のポイントとなる。

厳密解に基礎を置く「境界積分方程式法[1]」は、JT-60に設置されたセンサーの種類とその数の制約から適用が難しく、そのため解の形式としては厳密解に基礎を置く固有関数展開法或はさらに理論的裏付けは乏しいが実用性に優れたフィラメント電流近似法[3]が適用出来る。前者の方法でトカマク体系に最も適合しやすいルジャンドル・フーリエ固有関数展開法[2]は、円環座標系における軸対称電流場の真空部分を表現する固有関数を用いた有限級数展開近似である。この方法の場合、使用可能な固有関数の数に制限を受けることから近似解として解くことになるが、固有関数の少ない場合には同定結果の展開中心位置に対する感度が極めて高くなる傾向がある。このため展開中心位置の異なる固有関数を事前に用意することが必要

である。一方後者のフィラメント電流近似法は、同定結果のフィラメント設置位置に対する感度が低い。そのため真空容器中央付近に6本1組のフィラメント電流を位置固定で使用しても、プラズマ着火時や極端な位置での放電を除けば、最外殻磁気面に近い閉曲線が安定に計算出来る。

後で述べるようにアルゴリズムの高速化のために、特殊関数等の計算を事前に行っておき、大容量メモリに格納しておくことが必要になる。この両者の比較では、そのメモリ容量が、固有関数展開中心位置またはフィラメント電流位置の種類の数に比例することになるため、種類の数に制限が加わる。この点で有利なフィラメント電流近似法を最初の実時間可視化のための計算法として採用した。なお、磁束関数計算のための表現形式は、上記のどの方法であっても同一となることが示されるので[4]、実時間計算方法としては、同定方法に依存しない汎用性の高い方法ということが出来る。

フィラメント電流近似法を例に採ると、磁束関数値(Wb)の表現は次式となる。

$$\phi(x) = \frac{\mu_0}{2} \left[\sum_{i=1}^{N_f} G(x, y_i) \cdot I_i^{fil} + \sum_{j=1}^{N_c} \left\{ \sum_{k=1}^{M(j)} G(x, z_k) \right\} \cdot I_j^{coil} \right] \quad (2.4)$$

$$G(x, y) \equiv G(r_x, z_x, r_y, z_y) \equiv \frac{4}{k} \sqrt{r_x \cdot r_y} \left\{ \left(1 - \frac{k^2}{2} \right) \cdot K(k) - E(k) \right\}$$

K, E : 第1種、第2種完全楕円積分、 $k^2 \equiv 4 \cdot r_x \cdot r_y / \{(r_x + r_y)^2 + (z_x - z_y)^2\}$

x: 観測点 (r_x, z_x) 、 y_i : フィラメント設置点、 z_k : jコイルkターン設置点、

I_i^{fil} : フィラメント電流値(A)、 I_j^{coil} : コイル電流値(A)、

Nf: フィラメント電流本数、Nc: コイル種類数、M(j): jコイルのターン数

左辺の磁束関数及びその磁束関数の微分値として(2.2)式で計算される磁束密度を、真空容器内壁に設置された電磁気計測検出器の計測値に置き換え、異なる位置に置かれたセンサーの個数分(2.4)式を作る。勿論未知パラメータである変数の個数以上の数のセンサーが存在することを前提とする。それらのベクトル方程式を最小2乗法として解き、未知パラメータ I_i^{fil} を計算する。その結果を再度(2.4)式の右辺の未知パラメータ部分に代入することにより、次に示す形式の式が得られる。

$$\phi(r, z) = \sum_i a_i(r, z, h) \cdot \phi_i + \sum_j b_j(r, z, h) \cdot B_j + \sum_k c_k(r, z, h) \cdot I_k + d(r, z, h) \cdot I_p \quad (2.5)$$

(r, z): 観測点、 ϕ_i : 磁束ループ信号(Wb)、 B_j : 磁束密度信号(Wb/m²)、

I_k : ポロイダル磁場コイル電流値(A)、 I_p : プラズマ電流値(A)、

a_i, b_j, c_k, d : 観測点とベクトルhで決まる係数、

このベクトルhは、方法によって変わるパラメータであり、フィラメント電流近似法の場合には、フィラメント電流設置位置である。因みに、ルジャンドル・フーリエ固有関数展開法の場合、hは展開中心位置、境界積分方程式法の場合には仮想閉曲面の位置形状となる。

この式は、任意点での磁束関数値を計測値の線形結合で計算する式である。線形結合係数 a_i, b_j, c_k, d の値は、通常の計算順序から見ると第1種、第2種の完全楕円積分及逆行列の計算を行って求めることになるが、計測量とは無関係で、観測点及びパラメータhの関数となる。従って、この線形結合係数は、実験に先だって計算することは可能である。しかし、観測点の関数である点やフィラメント設置位置を変える場合に具体的に計算をどうするのが、同定演算を実時間で出来るかどうかの鍵となる。この対策について次に述べることにする。

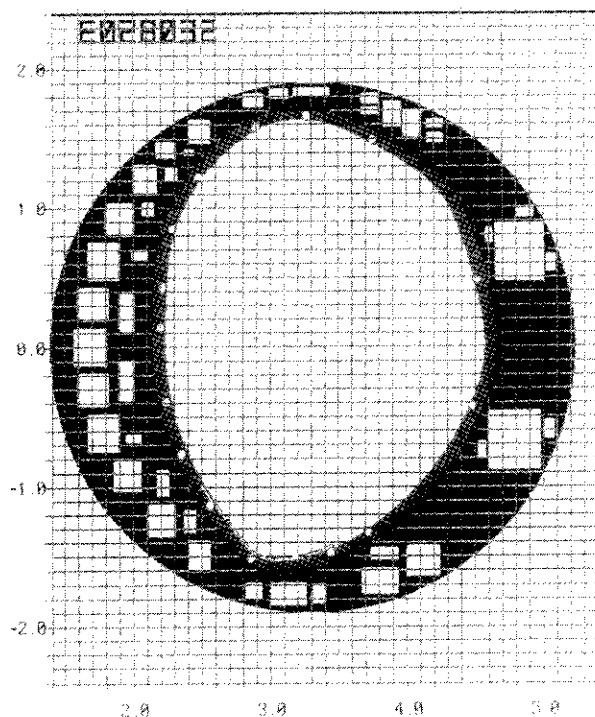
2.3 磁束高速計算用大容量テーブル

前述の方法を実時間で計算する際、共通した最大の問題は、特殊関数や逆行列の計算を多数用いた処理である線形結合係数計算をどのように高速化するかである。それらの計算プログラムには多くの分岐文を含むため、計算機内部のパイプライン処理が生かせず時間がかかる上、計算時間が確定しない、という問題点がある。計算機技術の進歩で計算速度は著しく速くなったとは言え、このような計算をそのまま単純に実時間で実行し動画可視化出来るほどにはまだ到達していない。何らかの工夫を行うことが必要となる。

前述の(2.5)式を見ると、計算の中心はベクトルの内積計算であるので、計算機が最も得意とする演算の一つである。そこで、センサーからの信号に掛かる線形結合係数を予め計算しておけば高速計算も可能となる。この線形結合係数は、方法が確定した後はプラズマ断面を見込む2次元空間上の位置だけの関数である。この2次元空間上の計算領域に対応させて大容量メモリー上に展開しておく高速演算法「テーブル参照法」により、大幅な計算時間の短縮を実現し、後で述べるように実時間で動画可視化することが可能となる。

JT-60の場合のテーブルの構成は、第2.2図に示す10cmの格子をさらに10分割した1cm刻みの格子の241(横) x 341(縦)の各交点に対応させて、係数ベクトルが格納されている。1cm以下の精度は、必要に応じて内挿計算を実行して求める。データ容量は例えば、プラズマ電流、ポロイダル磁場コイル5本、磁束ループ15本を使用する場合、一種類の h に対して約6.9 MByteも必要となる。様々なプラズマに対応しようとした場合、この単位で容量増加を図らねばならず、刻み幅を粗くする等の対策が講じられる必要がある。

また、この図から明らかなように、計算格子は真空容器内部プラズマ存在領域を含む長方形の領域で設定されている。このため、テーブル中の真空容器外部領域は使用されることのない無駄領域になる。しかし、長方形の領域にすることで計算の高速化が図れる。例えば座標 (r, z) (cm)の点に対応した係数ベクトルをテーブルから取得しようとした時、その記憶場所の先頭アドレスは、係数ベクトル要素数を N_h として $N_h * \{(r-219) + 241 * (z+171)\}$ で与えられる。若干の記憶容量の無駄はあるが、このような分岐文無しの単純なアドレス計算でテーブル参照が高速に実行出来る効果は、実時間処理では極めて重要である。これも大容量のメモリーが比較的容易に構築出来る最新の技術を取り入れた結果と言えよう。



第2.2図 テーブル参照法におけるJT-60用の計算格子
(図は10cm刻みの線を示しているが、実際は1cm刻みでテーブルが作成されている。R方向2.2mから4.6mまで、Z方向±1.7mの範囲を保持。)

2.4 同定及び可視化手順

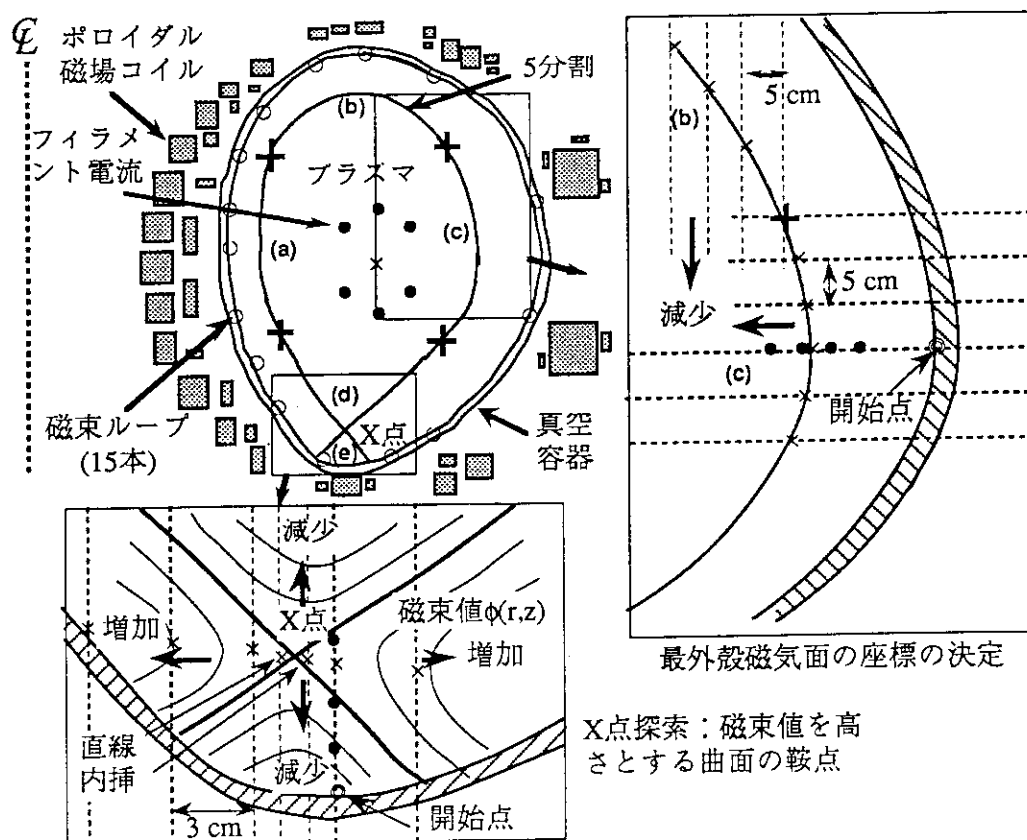
ここでは、プラズマ形状を求める一般的処理手順を示した後、特に実時間処理のために開発した手法について述べる。これまで行われてきたプラズマ形状の同定手順は一般的に次のとおりと考えられる。

- ① 電磁気計測信号やコイル電流値等を入力し、プラズマがダイバータ配位になっている可能性のある時（即ちダイバータコイルが励磁されている場合）は、まずX点位置を求める。磁束関数を高さとする $r-z\phi$ の3次元空間では、X点を鞍点として求め、その位置の磁束関数値（高さ）を計算し保持する。
- ② 真空容器第一壁の閉曲線上に密に計算点を予め設定しておき、そこでの磁束関数値を計算し保持する。
- ③ 先に求めたX点位置での磁束関数値と、第一壁上に万遍無く配置された計算点での磁束関数値を合わせた全体の集合で比較し、プラズマ電流部分を谷側（負側）の磁束に定義した場合、磁束関数値の最小値がプラズマ最外殻磁気面上での磁束関数値となる。
- ④ 従って、この磁束関数値を持つ等高線を描けばそれが、プラズマ最外殻磁気面形状となる。

次に上で示した手順を計算するためには、より具体的な方法が必要となる。ここでは、X点の求め方及び等高線の閉曲線座標の求め方を示す。

【X点の求め方】

- ① 第2.3図の下に示すように、ある探索開始点を基準に3 cm刻みで4本の縦方向探索のためのコードを設定する。



X点探索：磁束値を高さとする曲面の鞍点

第2.3図 最外殻磁気面の探索

- ②磁束関数値の正負を図に示す様に定義した場合、X点位置は、プラズマ側とダイバータコイル側を「谷」、トカマク中心側と外側を「山」とする「尾根(稜線)」の最小点である。そこでまずコード上の極大点を探索し、求めた4点の極大点の中から、「尾根」の最小点を挟む極大点を2点選ぶ。もし最初に選んだ4本のコード上の極大値が、単調増加・減少の場合には、さらに新たなコードを追加して最小点を挟み込む2点を選ぶ。
- ③2点の内部をさらに2本のコードで3分割して、同様の探索を行い、最小点を挟み込む2点を選ぶ。この2点及び隣接点1点を用いて、2次曲線の内挿計算を実行して最小点の位置としてX点を求め、その磁束値を保持する。

X点が存在し計算出来たととしても、X点を通る磁気面がプラズマ最外殻磁気面とは限らない。その磁気面がリミター等の構造物に接触している場合、その磁気面が含むさらに内側の磁気面でプラズマが規定されている場合もある。従って、真空容器第一壁の接触の可能性のある点で磁束関数値を計算し、それらとX点の磁束関数値を比較し、最小値がプラズマ最外殻磁気面の磁束関数値になる。次にこの値を持つ「等高線」の座標、即ちプラズマの最外殻磁気面の形状を計算する。

【等高線の閉曲線座標の求め方】

- ①第2.3図の右側に示したように、同定した磁束関数分布を真空容器内領域に限って見ればプラズマ内部に向かって谷となる単純な形である。フィラメント等の特異点から離れたプラズマ領域から、真空容器壁に至るまでの部分は、単調に磁束関数が増加する領域である。従って、位置が確定している真空容器壁からプラズマに向かって磁束関数値が所定の値になる点を、水平または鉛直の直線に沿って探索して行く。
- ②探索区分は第2.3図に示すように5領域に分割した。この分割は探索の方向の別で分けてある。例えば、図中(a)及び(c)の等高線探索は、図の水平方向の直線に沿って行われる。一方の(b)及び(d)の場合は、図の鉛直方向の直線に沿って行われる。探索経路直線同士の間隔は、5 cmである。第1点目の探索は、まず4 cm幅で所定の磁束関数値を過ぎるまで進み、次に1幅前に戻って2 cm幅で進み、さらに1 cm幅で探索する。第2点目以降は、直前の回で求めた点を初期値として探索を開始する。
- ③特に(d)と(e)の2領域の等高線の探索は、他の3領域とは異なる。探索経路直線に対してこの部分のセバトトリクス線は2価関数になっているからである。従って、(d)の領域は、プラズマ側から、(e)の領域はダイバータコイル側からそれぞれ探索し、X点のZ座標値を越えない条件の元で最も近い最外殻磁気面(セバトトリクス線)を確実に探索する。
- ④計算全てにおいて、最終的には1 cm刻みのテーブル値を内挿して値を求めるようにした。
- ⑤探索領域(a), (b), (c), (d)で求めた最外殻磁気面上の点の座標を、順序に従って並べ、約200点の配列を構成する。この部分は閉曲線でなければならないので、最初と最後の座標を同一にしておくことが必要となる。(e)領域は単独で配列を構成する。X点は端点(尖点)となるので(d)領域及び(e)領域の探索点のしかるべき部分に1点挿入追加する。

以上から、総計で約1000回を少し越える数の点における磁束関数値を計算して、座標の配列が計算される。プラズマの最外殻磁気面となる閉曲線及びダイバータ部のセバトトリクス線は、これら配列の座標点を通る折れ線を描くことにより求められる。

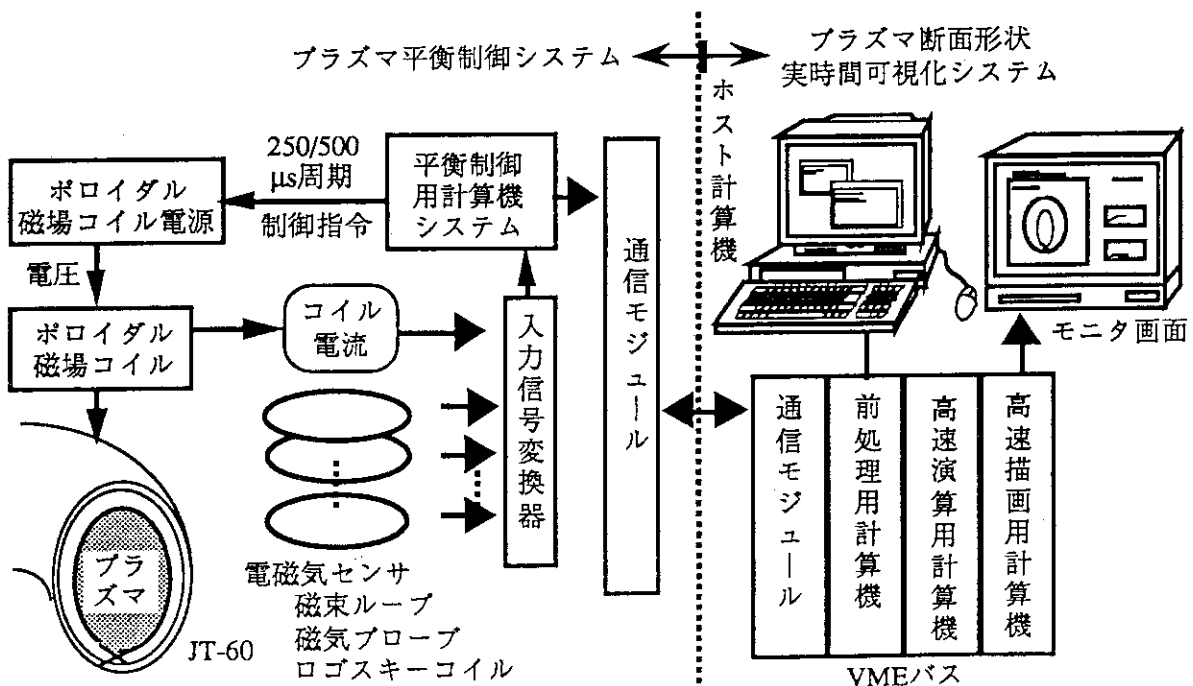
3. システム構成

前節で述べた同定方法は、まず大型計算機上でプログラム(Fortran言語)アルゴリズムの健全性を確認した。その後、ハードウェアの製作を行い、JT-60装置との信号取り合いを行った。並行して、Fortran言語を実時間処理計算機で使用出来るC言語へ変換し、入出力処理、描画処理を作成して試験運用から実稼働段階へと移行した。

試験運用期間では、速度の向上のためのプロセッサや伝送モジュールの変更、描画速度向上のためのグラフィクスプロセッサの変更、各種ソフトウェアの改造等が行われたが、本節では、最終的にJT-60のプラズマ断面を実時間で動画可視化させた実稼働時点でのシステム構成について記述する。

3.1 ハードウェア構成

プラズマ断面の実時間動画可視化は、プラズマの平衡制御に関する状態の評価・解析が、現段階での主要目的ではあるが、計算速度が少し向上すれば平衡諸量の実時間フィードバック制御にも使用可能である。これを想定し、実稼働している平衡制御システムが、フィードバック用に入力している電磁気計測器からの信号(工学値に変換済のデジタル信号)を、動画可視化システムに高速転送して使用することとした。また、ハードウェアの基本構成要素として国際規格であるVMEバス(IEEE規格P1014/D1.2)を採用し、そこに機能を持った最新の高速電子機器を選定・配置してシステムを構築することとした。電磁気計測データやタイミング信号の入力、同定計算、描画出力という一連の処理の実行等を行うシステムの構成概要を第3.1図に示す。図の左側は、平衡制御を高速に実行する部分であり、その部分と実時間可視化システムとは通信モジュールを介してデータの授受が行われる。可視化システムは、データを受信した後、同定、描画処理を実行する。



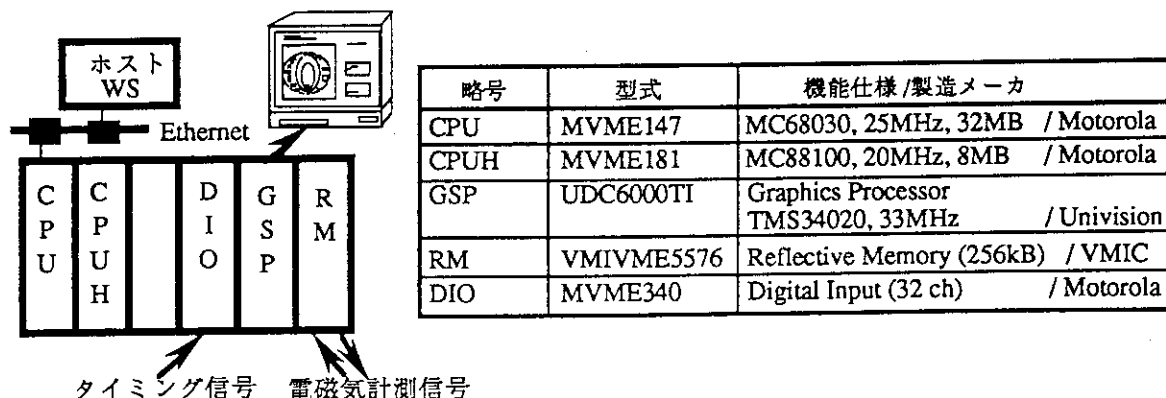
第3.1図 プラズマ断面形状実時間可視化システム全体構成

まず同定演算及び表示を行う高速演算用の計算機としてMVME181 (Motorola社製) を選定した。RISC (Reduced Instruction Set Computer) のCPUであるMC88100 (32bits, 20MHz, 8MB) を搭載したボードコンピュータである。この高速演算用計算機の命令により、プラズマ断面を描画するための高速描画用計算機 (Graphics Processor) としてUDC6000TI (Univision Technologies社製) を選定した。核となるCPU(Graphics Engine)は、グラフィクス処理用に開発されたTMS34020 (33MHz, Texas Instruments社製) であり、部分拡大機能等の他、様々なライブラリが用意されている。また、内部メモリのアドレスがVMEバスに直接展開されているので、VMEバスから直接VRAMへの書き込みが可能である。描画速度は、200,000 vectors/s、画面解像度は、1024 x 1280 x 8 bits (256色同時発色) である。最外殻磁気面は、約200本の折れ線として表現するので、最速で約1 msで描画完了となる。勿論、動画を表現するためには、前回に描いた磁気面の線を消してから新たな磁気面の線を描かなければならない。特に真空容器外に伸びるダイバータ部のセバトロリクス線の場合には、単に消すだけでは構造物の絵が次第に欠けていってしまうので、その絵を復元してから描画することが必要になる。このような映像情報の処理のために、1回の絵を描画するのに約20 msかかる。

実時間処理の準備を行う前処理計算機として、MVME147SC (Motorola社製) を選定した。CPUは、MC68030 (32bits, 25MHz, 32MB) であり、浮動小数点計算用の補助プロセッサとして、MC68882 (25MHz) を搭載している。また、ホストとしてUNIX-OSで動作するワークステーションSUN3 (CPU: MC68030、サンマイクロシステム社製) を選んでいる。

実時間で外部からデータを取り込むために、リフレクティブメモリーVMIVME5576 (VMIC社製) を採用した。高速光通信用の半導体チップ (TAXIチップ) を搭載し、内部メモリ256kB、転送速度6.2MB/s (冗長語数転送による修正動作無し時) のボードである。特徴は、他のリフレクティブメモリーと光ケーブル2本で簡単に接続出来、VMEバスに割り当てられたアドレスに個別に書き込むだけで、ユーザーが意識することなく他のモジュールに転送される点であり、いわゆる共有メモリーとして使用出来る [5]。

外部のタイミング信号を受信したり将来の外部への出力を想定して、32chデジタル入出力ボードMVME340 (Motorola社製) を使用している。



第3.2図 実時間可視化システムのハードウェア構成

以上のハードウェア構成を第3.2図に示す。この構成は、①ソフトウェア開発が実時間処理系の稼働中の如何に拘わらずホストワークステーション(WS)上で可能である、②作成後のソフトウェアの入れ替えが容易で短時間である、③一般ユーザーのWSからの利用が可能と

なる、④オンライン処理系が独立、自動化しているのでその稼働の信頼性が高い、等の特徴を持ち、ネットワーク上でのオンライン機器の開発システムの基本形態を具備している。

基本ソフトウェアに関しては、ホストワークステーションがUNIX-OSであり、それと親和性を図りつつ、高速性を図るために、前処理計算機のリアルタイムOSとして、VxWorks (Wind River Systems社製)を搭載した。前処理用計算機及びホストのワークステーションは共にイーサネットに接続され、互いに通信しながらソフトウェアの作成やVMEバスシステムの操作が遂行される。使用言語は、標準的にはC言語を採用した。高速演算用計算機MVME181用のソフトウェアは、一旦C言語で作成した後、ホストワークステーション上に載せたMC88100用クロスコンパイラ(Green Hill社製)により、機械語に変換する。MC88100の最高性能を発揮するため、MVME181にはOSを搭載せずに機械語をそのまま実行することとした。プログラムローディングは以下の手順で行われる。コンパイル後の機械語のプログラムを、ホスト計算機からネットワークを介してMVME147SCへ転送し、その後ダウンローダを起動してVMEバス経由でMVME181にローディングする。UDC6000TIに描画させるための図形ライブラリーとの結合編集もホストワークステーションで実行される。

UDC6000TIの出力は、RGB信号と同期パルスであり、高精度のRGB対応のディスプレイに直接出力することを想定している。一方多くの実験運転に係わる人に、ビデオ映像を分配することが必要となる。そこで、RGB信号をNTSC信号(通常のTV信号)にスキャンコンバータ(山下電子社製, YEM-CVS-950A)を用いて変換し、さらにUHF信号に変換して実験運転者の居室に行き渡っている映像ケーブルネットワークに載せた。この音声信号には、付録で述べる周辺磁場変動可聴化観測システムからの出力音声(2チャンネル入力)した。これによりプラズマ最外殻磁気面の動きの映像とプラズマの内部状態(ポロイダル方向回転速度)の変動とを同時に観察することを可能にした。

3.2 機能と動作

実時間で動画可視化するためのアルゴリズムは、プラズマ最外殻磁気面同定の部分について、前章にて詳細を述べた。ここではそれ以外の部分の機能と動作について記述する。

JT-60のプラズマを着火しデータを取得する手順、いわゆる放電シーケンスは、プラズマ放電の約6-7分前に開始され、プラズマ実験に必要なエネルギーを一旦発電機に蓄積する過程や各装置の健全性確認が行われた後、放電1分前から1msの精度で機器の制御やデータ収集が行われる。放電開始時期 $t=0$ でプラズマが着火され、実時間でプラズマ電流や位置形状のフィードバック制御が開始される。プラズマを着火制御した後、 $t=$ 約15sにプラズマ電流を立ち下げ消滅させ、実験放電が終了する。その後プラズマ着火中に取得したデータをデータベース化して1回の放電が完了する。実時間動画可視化システムに対しては、プラズマが着火している約15秒の間、電磁気計測データがリフレクティブ・メモリーに書き込まれる。そのデータを実時間で読み込み利用する訳である。

本可視化システムの起動は、放電1分前の時点とした。この時点を過ぎて放電番号が確定することに加え、トロイダル磁場コイルの励磁が放電前30秒であることから、それより前にバックグラウンド表示を終えカウントダウンに備えることを想定したからである。付録に述べる磁場変動の可聴化観測システムから磁場変動の「音」が発し始める段階は、放電2秒前のポロイダル磁場コイル励磁のタイミングであり、1分前に画面表示が始まることは自然な

印象である。この放電1分前の時点から、ポロイダル断面の図が表示され、 $t=0$ からプラズマの最外殻磁気面が表示される。同定時の計算が異常に行われることを防止するためにプラズマ電流が低い場合($I_p < 30 \text{ kA}$)には、同定演算を行わないようにした。また、もし途中で同定計算が異常になった場合には、前周期の磁気面を再表示することとした。リフレクティブメモリーには、1 ms周期で電磁気計測データが書き込まれるが、現時点では本システムは非同期に入力し、一回の同定・描画を終了させると、直ちに次の入力に移る。従って、周期は成り行きで決まるが、実時間性は確保出来る。

さて本システムに対する要求機能は、以上述べた実時間で形状の動画可視化機能以外に様々な機能要求が想定された。即ち、①放電終了後に再生して見ることが出来ないか。スロー再生も可能にしたい。②プラズマ電流等の主要なパラメータの時間変化が判らないか。③特定の部分を拡大して再生出来ないか。④プラズマ電流分布まで判らないか。⑤1コマ毎に細かい数値表示が出来ないか。⑥色々なワークステーションでビデオのコマ送りのような操作が出来ないか。等々。

現段階では、これらの要求事項のうち、最初の3点については機能を実現している。放電終了後、所定の回数だけ自動的に動画表示を繰り返すようにした。また、ワークステーションからの要求によっても通常速度の再生またはスロー再生が可能である。プラズマの主要パラメータ表示として、プラズマ水平方向幾何学中心位置、磁気軸の垂直方向位置、プラズマ電流の3つを、オシロスコープの波形のように出力する。これにより放電の途中であっても概略の経過が良く把握出来る。また、プラズマ位置形状実時間制御で使用している水平・垂直位置を重ねて表示するようにした。これにより、両者のずれが大きい場合には、どちらかが異常であることが判り、センサーや信号処理系の不具合の監視が可能である。さらに特定の部分を拡大して表示することは、プラズマのX点から伸びるセバトトリクス線が、真空容器第一壁のどの辺に当たっているかを見ることにより、セバトトリクス線に沿って流れて来る高速粒子が、熱負荷が厳しい材料や容器内配管に損傷を与えることがないかどうかを監視出来る。将来は炉内構造物監視装置としての利用も可能となる。

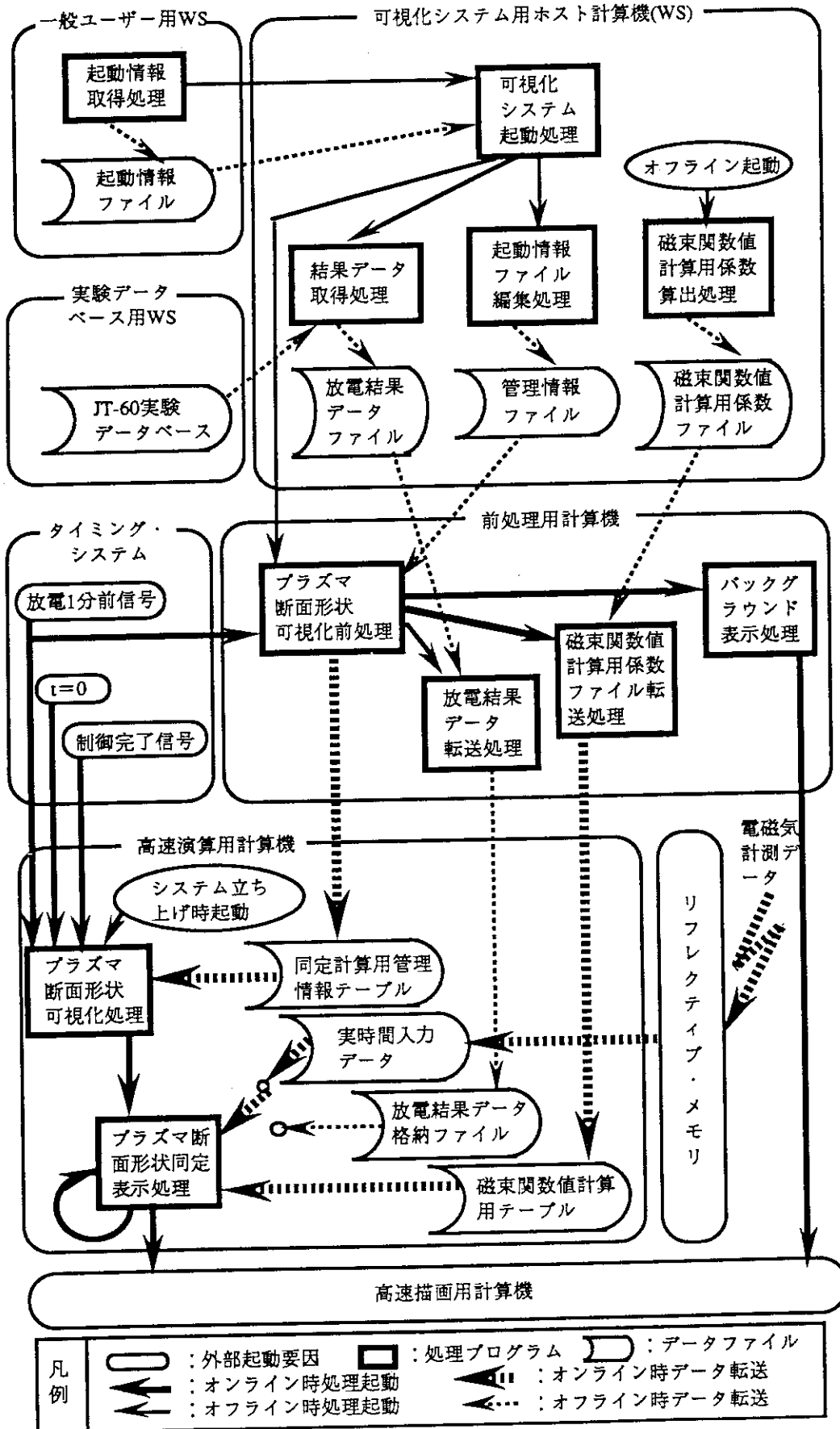
その他の要求については、④は、位置形状同定問題よりさらに未知数が増えるため、一層複雑な逆問題の課題であり現在検討を進めている。また、⑤及び⑥については、順次対応していくことになる。

3.3 ソフトウェア構成

本システムは、複数の計算機が役割を分担することで、効率良く機能を発揮している。計算機は互いに通信し、その結果として処理を起動し同時にデータファイルを受け渡すことにより、可視化処理を実現している。

まずホストワークステーションで作成し、コンパイルした実時間処理プログラムを、前処理用計算機からVMEバス経由でMVME181にローディングしておく。前処理計算機へも処理プログラムをセットしておくことが必要である。

一旦準備が完了した後の実時間可視化システム全体の処理プログラムリンケージを第3.3図に示す。磁束関数値計算用係数は、オフライン的に計算しテーブル形式に作成し、前処理計算機にネットワークを介して転送した後、VMEバス経由で高速演算用計算機に格納する。



第3.3図 実時間可視化システム 処理リンクージ図

4. システムの性能評価

前章のハードウェアを用いて実現した動画可視化システムについて、その性能評価を行う。まず、実時間動作に関しては、プラズマ断面形状を每秒10コマ（約100 ms/画面）の速度で可視化し、同時にプラズマ電流、水平位置、垂直位置の3主要パラメータを波形表示させた。その内訳は、データ入力、同定演算、最外殻磁気面座標の一連の計算に約80 ms、描画計算機を用いた磁気面の描画に約20 msかかっている。通常動画として認識するためには、每秒30コマが必要と言われているが、每秒10コマの表示でも、特に違和感の無い動画として認識出来ることが判った。

これにより、プラズマ着火直後のリミタ配位に始まり、X点を形成してダイバータ配位に移行する一連の様子に加え、プラズマが不安定になり振動する様子など、これまで得られなかった映像情報を実時間で実験運転者に提供した。

高速演算用計算機MVME181の主記憶容量は8 MBであるので、1種類のフィラメント電流位置のパターンで全放電時間をカバーしなければならない。また、計算時間、データ転送時間の制約から、使用出来る電磁気計測データは16チャンネル程度であるので、磁束ループ信号15チャンネルとプラズマ電流1チャンネルを使用することとした。当初このような制約の結果、磁気面同定の際に計算点がテーブル展開領域を逸脱してしまう等の同定演算異常により、適正に形状の同定が行われないうケースが頻繁に起こることを懸念していた。しかし、実際の放電では、立ち上げ時、立ち下げ時にそれぞれ1回ずつ磁束計算点が領域外になってしまい同定不能となっている以外は、他の時間帯では概ね良好な同定結果となっている。

同定不能になる場合や同定結果が明らかに異常である場合について、ここで少し検討しておく。これまでの稼働経験から、異常になる原因は大きく次の2点と考えられる。即ち①過大な渦電流が存在する場合、及び②フィラメント位置近くに最外殻磁気面が位置するプラズマの場合、である。プラズマ立ち上げ、立ち下げ時の異常は、この両方の要因が関係していると考えられる。

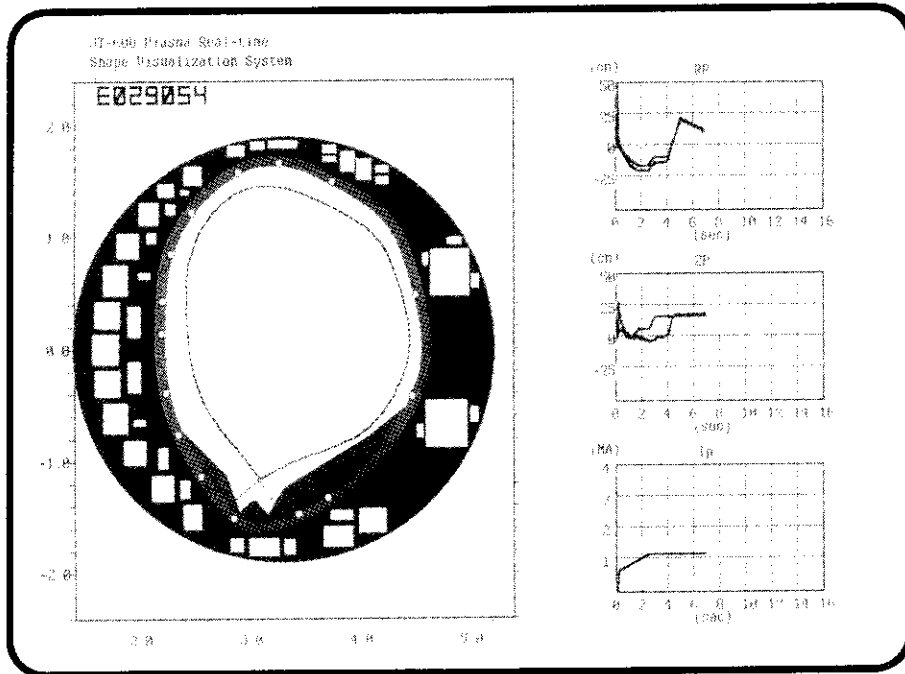
第1の現象は、プラズマ電流を速く増減させる際に発生する渦電流である。JT-60の場合、数百ミリ秒程度の時定数を持ち、最も位置形状同定精度に影響すると考えられる。一方、位置形状変化時にプラズマが移動して発生する渦電流は、通常の運転では位置形状に及ぼす影響は十分小さいので無視出来ると考えられる[6]。前者の場合、OHコイルの変化により真空容器に相当な量の渦電流を流すため、電磁気計測センサーには、プラズマ電流が作る磁場に渦電流が作る磁場影響も重畳する。しかし、同定演算では通常渦電流の存在を考慮していないため同定結果が異常になってしまう訳である。この対策には、渦電流の場も合わせて同定するなど、解の安定化のために工夫を要する。普通これは未知数を増やすことに対応し、結果として使用する電磁気計測センサーの数を増やすことが必要となる。

第2の現象は、プラズマの着火直後等に真空容器内側に接した小さなプラズマの場合などに発生する。これに対しては、フィラメント電流近似法の場合には、フィラメント設置パターンを数種類以上用意しておくことが要求される。より大容量のメモリーを搭載した電子機器を導入することで、この問題は回避出来る。

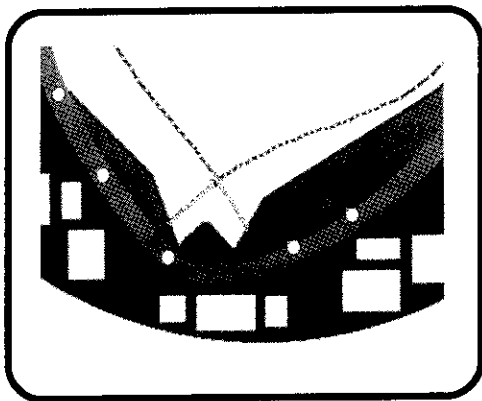
第4.1図に、通常の表示画面の例を示す。実際の表示はカラーである。また第4.2図に、真

真空容器内ダイバータ板近くの拡大画面を示す。この図は、第4.1図のVRAM状態のままで、採用したTMS34020の機能の一つである部分拡大コマンド（左上隅の座標と倍率を指定）を発行することにより作成している。第4.3図に、装置本体の全体の写真を示す。左にVMEラック、中央にホストWS、右に可視化表示画面が見える。

最後に同定精度の粗い評価を行ってみることにする。渦電流が存在しない理想的な状況を平衡解析コードを用いて作成し、ノイズが全く無い理想的な電磁気計測データを用いてフィラメント電流近似法を用いて同定した最外殻磁気面と元の平衡配位とを比較した結果、約2-3 cmの誤差が存在する。従って、センサー設置誤差や渦電流による重畳分を考慮すれば、同定誤差（標準偏差）は、この値より大きくなることが考えられる。



第4.1図 JT-60プラズマ断面形状実時間動画可視化システムの表示画面例



第4.2図 真空容器内ダイバータ板近くの部分拡大画面例



第4.3図 可視化システム装置本体

5. 超高速化と実時間制御応用への課題

JT-60で実稼働した実時間動画可視化システムを運用してきた結果、実時間制御に応用するためには、様々な位置形状のプラズマの同定が可能で、且つ同定計算の安定性を増やすことが必要であることが判った。この実現には、メモリー容量の増大と使用電磁気センサーの増加、そして大量のデータを短時間に処理出来る計算速度の著しい向上、即ち超高速化が不可欠である。本章では、この超高速化への開発方法と実時間制御に向けてどのような課題があるかについて記述する。

5.1 開發展望——並列処理計算機の選定と計算時間短縮効果見振り

本章の冒頭でも述べたように、より多くの電磁気計測信号を使用して、同定計算を実施することが計算の安定化のために必要であり、位置形状だけでなく電流分布も安定して同定するためにも使用信号数が増加する。実時間制御や将来の炉内監視装置として利用するには、毎秒10コマの速度では遅すぎる。凡そ数ms以内の周期で1回の位置形状演算が実行されなければならない。

この要求を満たすためには、通常高速に計算することしか解決策は無い。この高速計算の方法は、計算機単機の速度（クロック周波数を向上させる）を上昇させること、及び複数の計算機を並列動作させること、のどちらかである。前者の方法で行うには、計算機のハードウェア性能の進展を待つことが必要となるが、一方の後者の方法の場合には、計算機の台数を増加させるだけで性能の向上が図れるという利点を持つ。

そこで我々は後者の方法、即ち並列計算方式を進めることを選択した。如何なる場合でも1台より複数台使用した方が速いからであるし、並列計算技術を探求しておくことは今後の研究開発にとって重要であるとの認識からの選択である。ハードウェア的には、台数の増加という簡単な構成の仕方であるが、技術的困難はむしろソフトウェア側に多く存在する。並列計算を効率良く実行するには、複数計算機間のデータ通信によって、計算機が並列動作出来ない時間を最小限にすることである。これは、各計算機が他の計算機からのデータ待ち時間を極力短くするようにプログラムを配分しておくことに対応している。

さて、このようなことを可能にする計算機をまず選定することが重要である。並列動作を前提として設計されたデジタル信号処理装置DSP (Digital Signal Processor)が、本開発を想起した1992年にLSIレベルでリリースされた。Texas Instruments社が製作したそのDSPは、TMS320C40（略称C40）である。32 bit計算機であり、基本クロック周波数が40MHzの場合の計算性能等を第5.1表に示す。

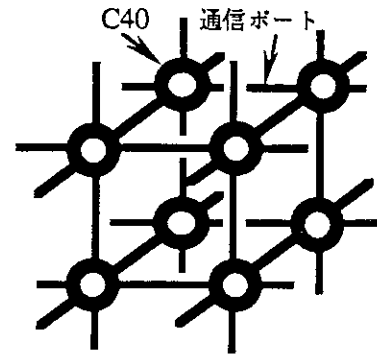
第5.1表 C40の計算性能

項目	時間 (μs)
積和	0.05
20成分ベクトルのスカラー積	1.60
2値比較	0.35
プロセッサ間のデータ転送(4Bytes)	0.85

このDSPの特徴は、並列計算の速度を決定する要因の一つである、他のDSPとの通信も並列的に行えるように、プロセッサ間通信専用のポートを1台当たり6本持っている点である。この6本の通信ポートを互いに接続することにより、第5.1図に示すように、C40を頂点、通信ポートを辺とした立方格子を構成することが出来る（図は8個の場合）。

このDSPを汎用のVMEボード上に構成することとした。これによりVMEバス規格に準拠した多くの市販のハードウェアが利用出来る。また、ソフトウェアの開発ツールとして、並列

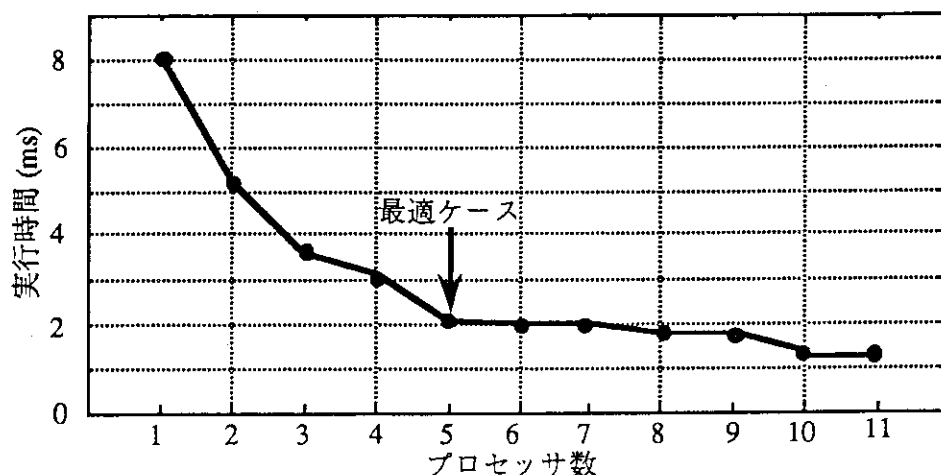
処理用の特殊なC言語コンパイラが、当時の近い将来開発提供されるとの情報があったことも、このDSPを使用することを決めた理由の一つでもある。このC言語コンパイラは、C40同士の接続関係をコンフィギュレーション・ファイルという形式で定義しておくことにより、あるC40が他のC40の出力を通信ポートを介して入力する際に、データ授受が確実に行われるように各C40の実行形式プログラムを作成する。このコンパイラにより、C40の並列計算の結果は保証されるので、残る設計者の作業は、各C40のデータ待ち時間を出来るだけ短くし、常時並列に動作するようにプログラムを最適に配分することである。



第5.1図 C40の立方格子型結合例

ここでC40を使用した場合の計算時間短縮効果についての粗い見積りを行う。見積りの仮定は、積和計算が最高速度で実行されるものとする。描画を除く計算手順を再度記述すると、データ入力、X点検索、ダイバータ/リミタ判定、最外殻磁気面座標算出の4段階である。この中で最も時間がかかっているのは、全体の9割の計算時間を費やしている最外殻磁気面座標算出である。従って、この部分を如何に短く出来るかが高速化の最大のポイントである。

最外殻磁気面座標の算出は、第2.3図に示したように全部で大きく5箇所領域に分割して計算している。上下左右とX点下の5箇所である。最外殻磁気面の各点を求める部分は、互いに全く独立であるので、完全に並列処理化可能である。従って、DSPの台数が増加すれば、計算時間は凡そ台数に反比例して短くなることが予想される。実際、この計算時間の詳細見積りを行った結果、第5.2図に見られるような並列処理プロセッサ数と実行時間の関係が得られた[7]。第5.2表に示す内訳から、予想通り並列化効果は、最外殻磁気面座標算出の部分に顕著に見られることが判る。この図表から、現時点のアルゴリズムの並列化に関して、並列化数（コストに比例）と効果の観点で最適なケースは、5台ということが判る。台数が増えるにつれて、高速化の進み具合が悪くなるのは、計算時間全体に占めるDSP間通信の割合が大きくなり、並列化で処理時間が短くなる部分と通信が増えて処理時間が長くなる部分とが拮抗し始めるからである。この点が並列処理の課題である。このシステムの場合、6台以上の並列システムを構成しても、効果は5台の場合と殆ど変わらないことが判る。



第5.2図 プロセッサ数と実行時間との関係

第5.2表 実行時間の内訳

処理名称	台数	1	2	5	10
全 体		7846.0	5145.8	2075.3	1339.3
電磁気データ入力		4.7	4.7	4.7	4.7
X点検索	計	586.0	419.4	294.0	316.7
	初期値設定	7.6	7.6	7.6	7.6
	R方向3cm単位	440.6	253.6	193.7	216.4
	R方向1cm単位	288.3	158.2	92.7	92.7
ダイバータ/リミタ判定		203.4	103.0	46.8	20.7
最外殻磁気面座標算出	計	7051.9	4618.6	1729.8	997.3
	最内外のR座標	186.6	104.0	104.0	104.0
	最外殻磁気面	6822.3	4471.7	1582.9	850.3
	座標整列	43.0	43.0	43.0	43.0

表内数値は処理時間 (μ sec)

この結果から、理想的に計算が行われるという前提ながら、5台程度のDSPを用いた並列処理の場合、約2msで最外殻磁気面の全体座標が計算出来る。勿論、実際の製作時に遭遇するであろう問題によっては、この見積り通りにはならない可能性を持ちながらも、実時間制御への応用に際し、計算時間に関する課題は凡そ解決していると考えられる。

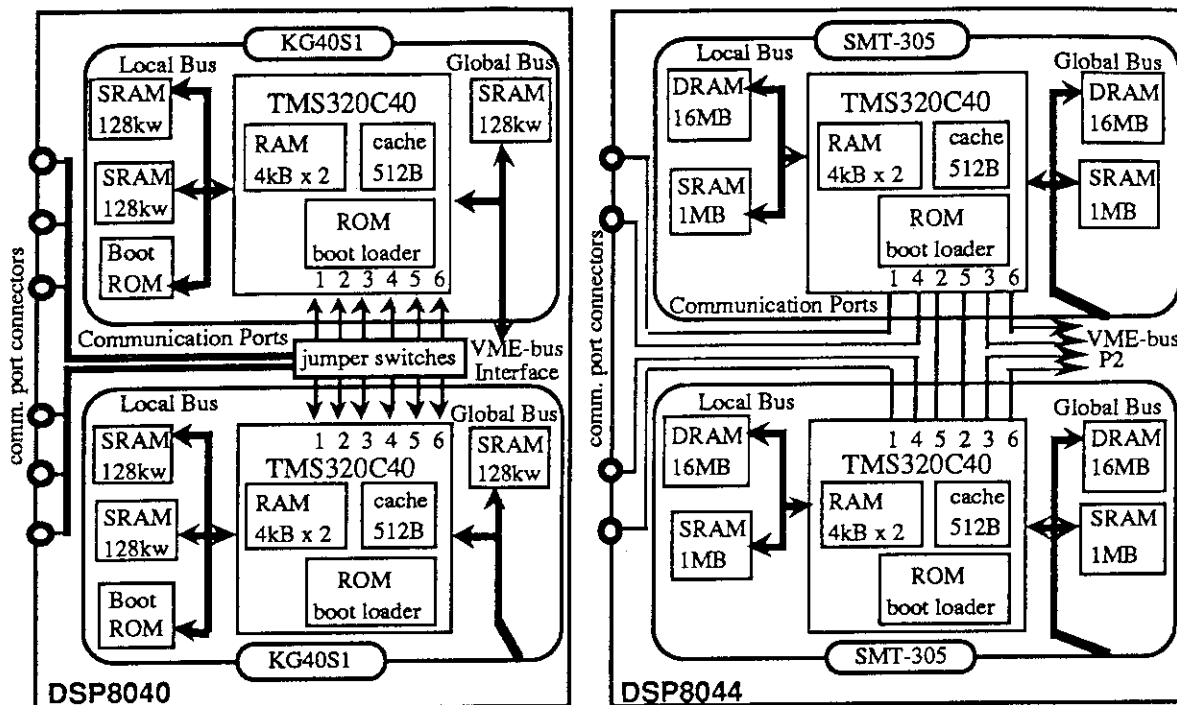
この結果、実時間制御応用時の残る問題点は、必ず適正な解が求まるか、即ち解の安定性であることが判る。この対策のためには、フィラメント法の場合には、フィラメント電流設置位置の最適化過程を含めたり、渦電流の考慮など、位置形状同定のアルゴリズム自体を改良することが必要であり、この点が今後の計算方法の課題として残ることになる。

5.2 システム構成

開発の見通しがついたので、次に計算時間の見積り通りに実行可能かどうかについて実際に装置を構築して調べてみることにした[8]。

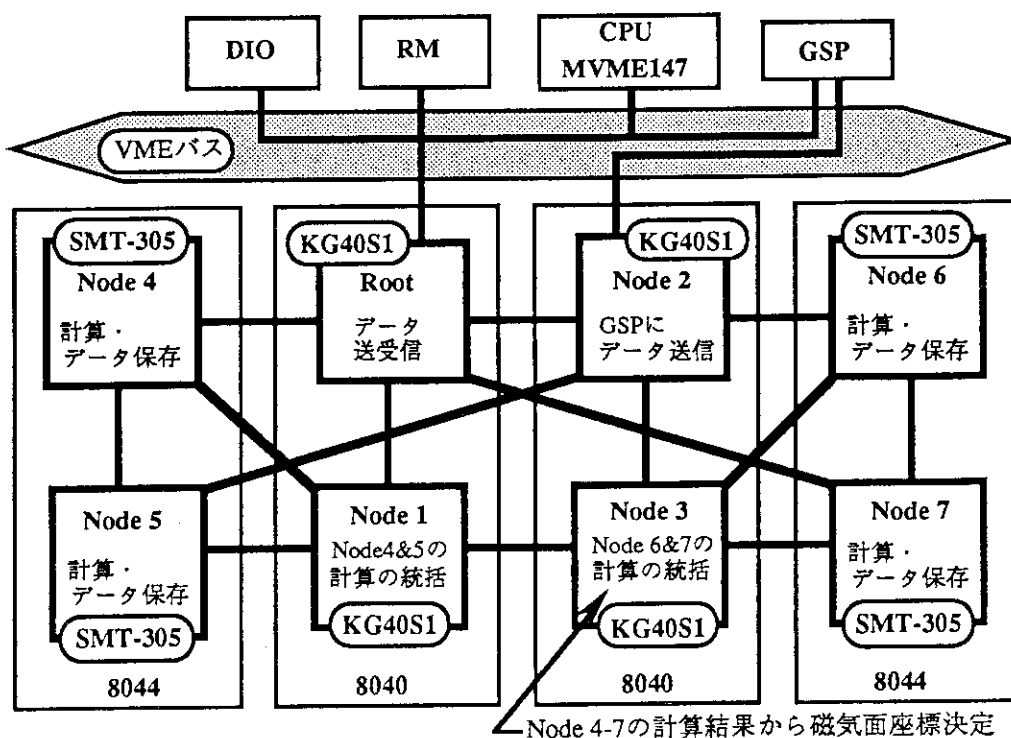
1台のC40(アーキテクチャーは参考文献[9]参照)に対して必要な周辺LSIを載せて、小モジュールの形式で供給されている。今回使用したのは、KG40S1(MIT社製、SRAM(Static Random Access Memory)実装)及びSMT-305(Sundance Multiprocessor Technology社製、DRAM(Dynamic RAM)32MB実装)である。

前述したKG40S1またはSMT-305を2個オンボード実装した2種類のVMEボードを使用してVMEバスシステムを構築した(ボードの構成を第5.3図に示す)。これらのボードの特徴は次の通りである。まず、第1のボードは、VMEバスインターフェイスを持ち、小容量の高速SRAMを実装している点である。第2のボードは、VMEバスインターフェイスを持たずバスとの間のデータ授受はないが、DSP1台当たり32MBの大容量のDRAMをオンボード実装している点である。相互通信ポートは、前者がDSP1台当たり4本(外部に3本)、後者が3本(外部に2本)出すことが可能である。前者は立方格子を重ねた様な接続に於いて、各格子点にDSPを配置することを想定し、後者は単一立方格子接続に於いて、各格子点にDSPを配置する場合を想定している。勿論、計算内容に応じて適切な構成を採用することが出来る。



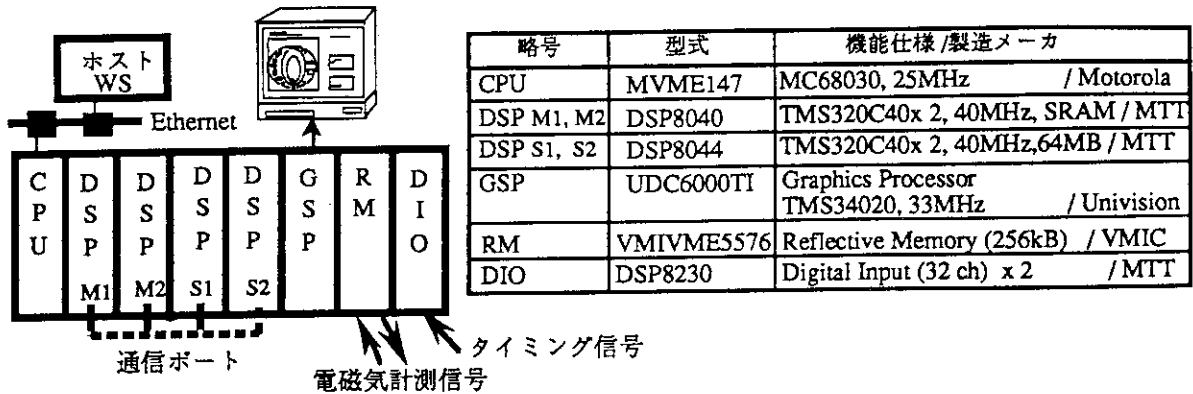
第5.3図 使用した2種類のDSPボードの構成図

これらの2種類のボードDSP8040及びDSP8044(どちらもMTT社製)をどのように接続してシステムを構成するかについては、色々な可能性が想定し得る。今回は前述の通り各々2枚ずつ使用して合計8個のDSP(並列処理の用語ではNodeと呼んでいる)に対して役割分担を与え、第5.4図に示すような接続パターンを採用した。また、VMEバスを介してデータ送受信を行うC40をRootとして一本化し、描画計算機への経路も別のC40に一本化した。



第5.4図 8台のDSPボードの接続パターンと各DSPの役割
(図上部に描かれた略号は、第5.5図を参照。)

これらを用いたVMEバスシステム全体の構成は、第5.5図に示すとおりである。DSPの部分を除けば、第3.2図に示した旧システムと同様のハードウェア構成である。



第5.5図 DSPを用いたシステム構成例

5.3 初期結果

第3章で稼働していた1 CPUのプログラムを、第5.4図に示すように8つのDSPに分配した訳であるが、磁束関数の計算は大容量テーブルを必要とするので、32MBのDRAMを実装した4つのC40が分担して実施し、それらの結果を用いてSRAMを実装したC40が統括的な計算し、さらに描画・外部入出力を分担している。

並列処理ソフトウェア作成言語としてC40用に開発されたパラレルC言語（3L社製）を用いて、ソフトウェア開発を行った。これにより各C40間のデータ授受は保証される訳である。

本システムの初期開発をほぼ終え、一連の動作が問題無く実行出来るところまで立ち上がったので、現時点での初期結果を数値的に示す。同定時間については、従来約80 msであった値が、約47 msに改善された。描画時間は、描画計算機が前と同じであるのであまり変わらず約20 msであった値に対して約13 msである。

先の見積りによれば、大容量メモリー付きの計算機が4台の場合で且つC40の最高性能が発揮された場合、同定計算時間は約3 msで完了出来る筈とされていた。その値の約16倍もの時間がかかっている理由としては、以下が考えられる。まず、第1に各C40へのプログラムの分配の最適化は図られていない点である。第2に、C40内部のパイプライン処理を有効に利用する工夫、例えば分岐文がパイプライン処理を妨げないように実行順序を変更すること、などは全く実施していない点である。特に、C言語を単純にコンパイルした場合、計算途中のデータ待避エリアがグローバルバス上のメモリーに確保されてしまうため、そのままではパイプライン処理が十分機能しない。この対策には、コンパイル後のアセンブラー段階のプログラムに手を加え、C40内部のレジスターに待避エリアを確保する等の細工を施すことが必要となる。

今後これらのソフトウェア上の改善作業を行っていくことにより、見積りに近い性能が発揮出来ると思われる。その結果として実時間制御や実時間監視装置への応用が実現するものと期待出来る。

6. ま と め

本開発の成果と意義は以下のとおりである。

- ①断面形状を実時間で同定するため、大容量テーブルを利用した高速演算手法を考案し、最新の高速度演算、高速描画プロセッサ、及びリフレクティブ・メモリーを用いて動画可視化（約100 ms/コマ）する装置を開発し、JT-60にて実稼働させ、実験時のプラズマの評価解析などに役立てた。
- ②プラズマ電流等の主要パラメータを断面表示と同時にグラフ表示し、フィードバック制御演算と可視化装置での演算とを多重表示し、センサーや信号処理系の健全性の検査機能として利用開始した。また、スロー再生、部分拡大表示の機能も追加した。
- ③ピックアップコイルを用いてプラズマ表面近くの磁場変動を測定し、そのまま可聴化して可視化画面と共に実験運転者に提供し、プラズマの内部状態変化を把握することを可能にした。
- ④超高速計算を実現した実時間制御への応用を目指して、並列処理用高速DSPを複数台使用したシステムを構築し実時間稼働の初期結果が得られた。これにより実時間制御実現への見通しが得られた。

今後は、現在稼働中のシステムの最適化を押し進め、速度面での問題解消を実証し、同時に同定計算の安定化のためのアルゴリズムを開発し、手法面での問題解消を目指す。最終的には、本装置を実時間プラズマ制御に使用することにより、位置形状の制御性を向上させる予定である。

謝 辞

本開発の実施に際し、機器の設置、調整、ケーブル敷設、ソフトウェア開発の様々な場面で協力をお願いした日本原子力研究所JT-60第1試験室制御グループの諸氏に心から感謝の意を表します。また、研究開発の支援を賜った同核融合装置試験部長 船橋昭昌博士、同次長 清水正亜博士にお礼申し上げます。

6. ま と め

本開発の成果と意義は以下のとおりである。

- ①断面形状を実時間で同定するため、大容量テーブルを利用した高速演算手法を考案し、最新の高速度演算、高速描画プロセッサ、及びリフレクティブ・メモリーを用いて動画可視化（約100 ms/コマ）する装置を開発し、JT-60にて実稼働させ、実験時のプラズマの評価解析などに役立てた。
- ②プラズマ電流等の主要パラメータを断面表示と同時にグラフ表示し、フィードバック制御演算と可視化装置での演算とを多重表示し、センサーや信号処理系の健全性の検査機能として利用開始した。また、スロー再生、部分拡大表示の機能も追加した。
- ③ピックアップコイルを用いてプラズマ表面近くの磁場変動を測定し、そのまま可聴化して可視化画面と共に実験運転者に提供し、プラズマの内部状態変化を把握することを可能にした。
- ④超高速計算を実現した実時間制御への応用を目指して、並列処理用高速DSPを複数台使用したシステムを構築し実時間稼働の初期結果が得られた。これにより実時間制御実現への見通しが得られた。

今後は、現在稼働中のシステムの最適化を押し進め、速度面での問題解消を実証し、同時に同定計算の安定化のためのアルゴリズムを開発し、手法面での問題解消を目指す。最終的には、本装置を実時間プラズマ制御に使用することにより、位置形状の制御性を向上させる予定である。

謝 辞

本開発の実施に際し、機器の設置、調整、ケーブル敷設、ソフトウェア開発の様々な場面で協力をお願いした日本原子力研究所JT-60第1試験室制御グループの諸氏に心から感謝の意を表します。また、研究開発の支援を賜った同核融合装置試験部長 船橋昭昌博士、同次長 清水正亜博士にお礼申し上げます。

参考文献

- [1] Kurihara, K., "Tokamak Plasma Shape Identification on the Basis of Boundary Integral Equations," Nuclear Fusion, Vol.33, No.3, pp.399-412 (1993)
栗原研一、木村豊秋、「境界積分方程式の解法に基づくトカマク・プラズマの位置形状同定法」、JAERI-M 92-075 (1992)
- [2] Kurihara, K., "Improvement of the Tokamak Plasma Shape Identification with a Legendre-Fourier Expansion of the Vacuum Poloidal Flux Function," Fusion Technology, Vol.21, pp.334-349 (1992)
栗原研一、木村豊秋、高橋実、川俣陽一、坂田信也、赤坂博美、「真空ポロイダル磁束関数の円環座標系におけるルジャンドル・フーリエ展開を用いたトカマク・プラズマの最外殻磁気面形状同定法」、JAERI-M 90-001 (1990)
- [3] Swain, D. W., Neilson, G.H., "An efficient technique for magnetic analysis of non-circular, high-beta tokamak equilibria," Nuclear Fusion, Vol.22, p.1015 (1982)
- [4] Kurihara, K., Kimura, T., Kawamata, Y., Akiba, K., "Tokamak Plasma Shape Identification Bases on Boundary Integral Equations and the Real-time Shape Visualization System," Proceedings of the 17th Symp. on Fusion Technology (Rome, Sept. 1992), pp. 559-563 (1993)
- [5] 川俣陽一、安達宏典、栗原研一、「JT-60プラズマ実時間制御のためのリフレクティブメモリを用いた高速データ通信」、技術研究会報告1996東京分科会、pp.7-10 (文部省国立天文台・電気通信大学、1997)
- [6] Kurihara, K., "Eddy current effect study on the JT-60 plasma equilibrium control," Fusion Engineering and Design, Vol.19, pp.235-257 (1992)
- [7] Kimura, T., Kawamata, Y., Akiba, K., "DSP application to fast parallel processing in JT-60U plasma control," Proceedings of the 18th Symp. on Fusion Technology (Karlsruhe, Aug. 1994), pp. 691-694 (1995)
- [8] 安達宏典、川俣陽一、栗原研一、「高速DSPの並列処理によるJT-60プラズマ断面実時間可視化システムの高速化」、技術研究会報告1996東京分科会、pp.3-6 (文部省国立天文台・電気通信大学、1997)
- [9] "User's Guide - TMS320C4X," Texas Instruments Incorp. (1991)

付録 周辺磁場揺動の可聴化観測システム

本報告書で取り扱った実時間動画可視化システムは、プラズマの最外殻磁気面だけを表示することを目的に開発した装置である。通常の実験運転におけるプラズマ制御では、最も重要な情報の一つである。プラズマ制御上或はその特性把握上重要な量は他にも存在しており、例えばプラズマ電流分布、プラズマの回転（ポロイダル／トロイダル方向）、プラズマ圧力分布、等が重要な量と言える。これらのうちプラズマの回転周波数が、1 kHz程度から20 kHzであることから、そのまま音にして聴くことを想起した。

センサーは、プラズマ電流が作る周辺磁場を計測するために使用しているピックアップコイル（磁気プローブ）である。出力される電圧信号を光アナログ信号に変換して建家間伝送した後、オーディオアンプで増幅してスピーカー出力した。第付1図に、システム全体構成を模式的に表わした。比較的簡単な道具建てであるものの、プラズマの内部状態が極めて多様に変化する様子を感じ得る。

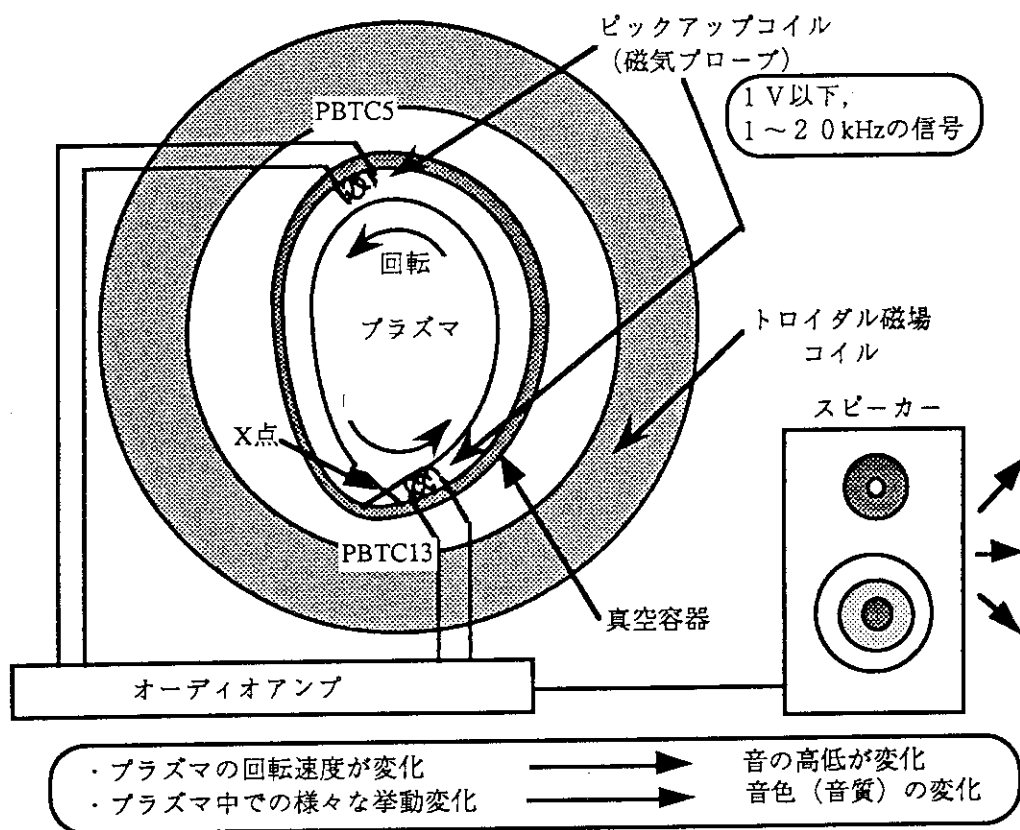
ここで、これまで実験時の「音」の観測結果概略を以下に記述する。まず、「音」が聞こえ始めるのは、プラズマ着火約30秒前のトロイダル磁場コイルの励磁開始以降である。この時、ピックアップコイルにも鎖交磁束変動が載り、電源の電圧変動が少しずつ音量の増大の形で現われる。続いてプラズマ着火の2秒前にポロイダル磁場コイルの励磁が開始される。その際にサイリスタ電源の電圧振動が磁場の振動となってセンサーに計測され、かなり大きな音量の音が発生する。その後、プラズマが着火すると、サイリスタ電源の場合より高周波側の磁場振動が発生し、高音として観測され、以降プラズマの状態変化に伴い音色が興味深い変化を呈する。そこで以下にこれまでの観測で得られた幾つかの点を紹介する。

NBI加熱時には、観測音は低音から高音に変化し、高エネルギー粒子注入によって回転速度が上昇することが判る。また、RF加熱中には、比較的低音側の音が観測出来る。さらに、不連続的な音がしばらく続いた後や高音から急に低音に変化した後にディスラプションが発生することがあったり、プラズマの内部状態の重要な変化が、相当多様な音の変化として観察出来ることが判った。

閉じ込めとの関連では、負の磁気シア放電の場合では、経験的には音の乱れが少なく、他の放電に比べ極めて高音側の音が発生している。また、OH (Ohmic Heating) 放電の場合でもプラズマ電流を高くした方が高音になる傾向が見られ、プラズマ回転の速さと閉じ込めの相関を示唆しているようで興味深い。

最外殻磁気面の実時間表示と同時に聴くことにより、リミタ放電からダイバータ放電に移行する際に、短時間ではあるが高音の発生が観測され、プラズマ回転速度の変化や磁気島等の生成・変化、MHDモードの成長等があるかもしれない、といった情報が得られる。

このように、最外殻磁気面の映像と内部状態の変化に対応した音といったプラズマに関する重要な2情報を同時に観測するシステムの意義は、実験運転者にプラズマ挙動を把握するための参考情報を提供することに加え、将来の炉心監視装置の原型に発展することも期待出来る。



第付1図 周辺磁場揺動可聴化観測システム構成図