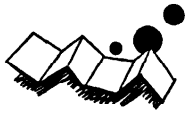


解説

プラズマ科学における情報処理†



阿部 芳彦^{††} 金田 康正^{††} 寺嶋 由之介^{††}
津田 健三^{††} 渡辺 令子^{††}

1. はじめに

プラズマ科学の研究の重点は、現在は核融合にあるので、プラズマ・核融合研究の分野における情報処理の一端を、共同利用研究所である名古屋大学プラズマ研究所を例にとって紹介する。まず、プラズマと核融合との関係を簡単に説明しておこう。たとえば、重水素・三重水素 (DT) 反応でエネルギー利得を得るには、DT の混合ガスを温度 3,000 万度以上、粒子密度 n と保持時間 t の積 $nt > 10^{14} \text{cm}^{-3} \text{sec}$ の条件 (ローソン条件と呼ばれる) をみたす状態にしなければならない。このような高温はプラズマ状態である。現在までの核融合研究の目標はこの炉心プラズマの実現に置かれてきたが、その達成にはプラズマ科学の総合的努力が問われている。核融合炉の方式は高温プラズマを磁気容器内に閉じ込める方式と、レーザーや荷電粒子ビームを照射して爆縮を行う方式とが試みられている。

現在もっとも研究が進んでいるのはトカマクと呼ばれる環状磁場系装置で、ローソン条件をみたすプラズマを実現すべく大型装置が建設中である*。しかし、トカマク装置も実用的核融合炉として最適なものは必ずしも保証されず、また高温プラズマの性質も完全に理解されたとは言えず、核融合研究の局面はなお複雑である。名古屋大学プラズマ研究所においては、1,000 万度領域の高温プラズマについて実験し、トカマクの改良や新方式核融合炉の開発を目指す研究が行われてきた。そしてこれらの成果の上に、核融合反応を起こしつつあるプラズマの実験計画が着手されよう

としている。このようなプラズマ・核融合研究の流れの中にあって、実験装置は大型となって相当な設計計算を必要とし、関連する専門分野の急速な拡大に対処するため文献情報検索システムが必要となるなど、大型電子計算機に対する要求が増大の一途をたどっている。これらの需要状況を以下のような構成で報告する。

2 章では文献情報検索の話について、3 章ではプラズマ研究に必要な原子・分子過程データと図形処理について、4 章ではプラズマ現象シミュレーションについて、5 章では実験データ処理について述べる。各章の執筆は 2, 3 章を金田・渡辺、4 章を阿部、5 章を津田が分担した。残りの部分の文責は寺嶋にある。

2. 文献情報検索の話

2.1 文献検索

プラズマ・核融合研究者に限らず、一般に研究者にとって、国内外で発表されている論文、雑誌、技術報告などの文献情報は、各自の研究を進めていく上の重要な情報源となっている。プラズマ研究所に付属している文献センターでは、22 年の年月 (1958 年設立) をかけて、およそ 10,600 冊のプラズマ核融合関係の文献が集められてきた。このことから容易に推察できるように、情報収集およびその整理には多大の時間を消費することが多い。したがって、文献の抄録ばかりを収録した、いわゆる抄録誌*と呼ばれる雑誌が発行されているのは、何ら不思議なことではない。

計算機利用技術が発達してきている現在、抄録誌に記載されている内容を人間が検索するかわりに、計算機に行わせようとするのは、自然な成りゆきであっ

† Information Processing and Numerical Computation in Plasma Science by Yoshihiko ABE, Yasumasa KANADA, Yoshinosuke TERASHIMA, Kenzo TSUDA and Reiko WATANABE (Computer Center, Institute of Plasma Physics, Nagoya University).

†† 名古屋大学プラズマ研究所電子計算機センター

* 現在建設中の代表的大型トカマク装置は欧州連合 JET、米国 TFTR、ソ連 T-15、日本 JT-60 で 1980 年代前半に完成予定である。

* 物理における physics Abstracts 誌、工学における Electrical & Electronics Abstracts 誌、計算機における Computer & Control Abstracts 誌、化学における Chemical Abstracts 誌等が有名である。Physics Abstracts 誌と Electrical & Electronics Abstracts 誌は、今から 80 年以上前の 1898 年に発刊された Science Abstracts 誌が、1903 年に 2 つに分割されてきたものである。

た。さらに計算機で検索を行うことにより、人間が行うとしばしば犯す見落とし、見間違いがなくなり正確にしかも複雑な条件のもとでの検索を高速に行うことが可能になった*。たとえば、プラズマ研究所では、「INSPEC データを主データベースとした文献検索サービス」を開始したことにより**、

1. 水素原子とイオンとの荷電交換に関する最近の論文を第一著者の名前順に並べ変えて、一覧表を作る。

2. S. Hayakawa の 1978 年出版の原子分子関係の論文の一覧表を作る。

3. Hamada Coordinate を使用した論文があるかどうか調べたい。

4. トカマク関係の論文で、非円形断面のベータ値(プラズマ圧力と磁気圧の比)の上限値について論じたものを調べたい。

5. ガス・ブランケット(中性ガスによるプラズマ熱遮蔽)についての論文の一覧表を作りたい。

といったプラズマ物理・核融合研究で問題となる種々の要求を短時間のうちに満たすことができるようになった。

文献検索サービスを開始するに当って、特に注意を払っているのは、利用者の大部分がプラズマ科学の研究者であり、計算機利用の素人(しかも1回しか使わないという人もいる)という点、および検索結果の中にノイズが含まれていたとしても決して検索の見のがしがあってはならぬ、という2点である。そのために我々は、キーワード、またはキーフレーズによる検索ではなく、単語による検索を重視した。たとえば、前述の例5における「ガス・ブランケットに関する論文の調査」においては、キーワードとしてガス・ブランケットが選ばれているかどうかを素人の利用者が前もって知っておくのは不可能に近い。もしガス・ブランケットが運良くキーワードになっていれば、素人の利用者でも問題なく検索できるが、キーワードの性質上1つのキーワードによる検索だけではかなりのノイズを含む可能性がある。かといって必要とする情報を欠

かすことなく、いくつかのキーワードを使ってしぼり込みを素人の利用者に行わせるのは困難である。もしガス・ブランケット(gas blanket)がキーワードになっていなければ、それこそ素人の利用者にとっては、お手上げになってしまう。そこで我々は、「ある特定の分野の論文の中で、標題、抄録、キーワードの中に、その分野に共通な単語(たとえば、gas および blanket)を使わぬはずがない。」と考え、キーワードによる検索でなく、単語レベルによる検索を前面に押し出した検索サービスを行っている。実際の利用者の声を聞いてみると、「何の戸惑いもなく利用できている。」という返事が返ってきており、我々の考え方に間違いがなかったことが証明された。検索の能率化を考えるならば、検索の専門家を用意するのが望ましいが、人手の問題もあり、検索の能率化は今後の課題である。

2.2 情報検索

ところでデータベースの利用について考えてみると、2つあるように思われる。1つは、あるトピックについてそれに関係する論文が、誰によって書かれ、いつどの論文誌に発表されたかをデータベースから探し出すもので、一般的には、論文検索と呼ばれているものがそれに当る。もう1つは、「ソリトン物理の研究動向」というように、ある研究課題に関する研究動向の定量的、定性的把握のためにある分野の論文数、それに携わる研究者数、著者数、活動研究者数(論文を発表する研究者数)、論文被引用頻度数などについての統計量をデータベースから算出することである。これを我々は、情報検索と呼んでいる。情報検索を行うことで得られる統計量は、核融合研究活動の分析に利用できる。しかも計算機によって、読み取り可能なデータが、10年以上にわたって入手できる現在、計算機で情報検索を行うことは、自然なことであり、またプラズマ研究にとって有効な手段になりつつある。

核融合炉の実現を目指して、プラズマ核融合炉の研究は、世界主要各国で20年以上も続けられてきた。核融合の条件を満たすプラズマの実現を目指した大型装置が各国で建設され1980年代の前半に完成予定である*。しかしながら、実用炉として最適な核融合炉開発の見通しを立てるためには、今後なお多くの困難な問題に遭遇することが予想されている。このような情勢のもとで、世界におけるプラズマ核融合の研究の発展経過とその成果を概括し、その研究を計量的に分析し、現在の研究段階を明らかにすることが必要にな

* ただし、計算機に与えるコマンドが正しく、また計算機が記憶している文献情報が正確であり、検索プログラムにあやまりがないとして、これらに関しては文献1)を参照されたい。

** 1980年8月現在、1969年から1980年7月に至るまでのデータの中からプラズマおよび原子分子に関する記録を抜き出したものがデータベース化され、サービスに供されている。全レコード件は、プラズマ約5万件、原子分子約14万件である。また55年度中に、USGRA(U. S. Government Reports Announcements)もデータベース化される予定である。

* 前ページ左段脚注*に同じ。

ってきた。

研究活動の動向を定量的に把握する一つの試みとして、「研究投資量」（研究費，研究設備，研究者人口等）「研究活動量」（発表論文数，著者数，活動研究者数すなわち論文を発表する研究者数，学会開催数等）および「研究成果量」（達成実験値，特許数，論文被引用頻度数等）の3つの基本的な計量指数を用いて，研究活動の発展状況や将来の動向を予測することが行われている。いずれにしても，我々の分析は，ビジネス活動の分析方法を，類推的に「研究」の研究に適用して構成した，「研究」の研究の計量体系に基礎をおいている。これら三計量指数を用いてプラズマ核融合の研究を計量的に分析を行うに当っては，プラズマ科学の4つの特徴，「研究の長期性」，「研究の国際性」，「研究課題の多岐性」，および「巨額の研究費を必要とすること」が考慮された。次に示すものは，各特徴に着目して現在行っている，あるいは行おうとしている分析の内容である。

「研究の長期性」……年度別論文数に基づいた，「プラズマ核融合研究」のライフサイクルの存在性。研究成果量（プラズマ実験装置において達成されたプラズマ粒子密度 $n(m^{-3})$ ，閉じ込め時間 $\tau(S)$ およびプラズマ温度 $T(KeV)$ の3つの量の相乗積，すなわち臨界プラズマ着火指数 $n\tau T$ ）と研究活動量（研究の蓄積を測る量としての，1958年以降*，その年次までの発表論文の総数，すなわち，累積論文数）との相関関係（「研究努力曲線」と呼ぶのが適切であろう。）を用いた臨界プラズマの実現する年の予測。

「研究の国際性」……国別論文数と各国の発電量との相関関係。

「研究課題の多岐性」……プラズマ科学における15の研究分野についての論文数の分布スペクトルの分析による研究動向の把握。

「巨額の研究費を必要とすること」……「研究投資効率」の算出および他分野における投資効率との比較。研究費などの「研究投資量」と「研究活動量」との間の相関関係。

今後の研究課題としては，1)「研究成果量」の計量化についての検討，2)「研究努力曲線」の精密化，3)「研究」の研究のための計量体系の確立に必要な情報検

* 1958年に，第2回原子力平和利用会議が開催された。またこの年に初めて，「plasma physics」という言葉が「physics Abstracts」の Subject index として導入された。これ以前にもプラズマ物理学に関する論文は100篇程度発表されていたと予想されるが，それらを厳密に調べることは，大変困難であり，研究目的からしてこれらは省略してもよいと考えられる。

索手法の整備等を挙げることができる¹⁾⁻⁶⁾。

3. 原子および分子に関する散乱断面積 データ収集とオンライン図形処理

プラズマ研究所で組織している作業グループは，数年にわたり，原子および分子の散乱断面積に関するデータの収集ならびに出版を行ってきた⁷⁾⁻⁹⁾。これらのデータ収集においては，数値データを計算機可読な形への変換が重要な問題点となるが，現在これらの数値データのデータベース化が進められている。そして数値データの検索の後，グラフ表示端末に散乱断面積データをグラフ化して表示し，会話的にグラフを処理する一連の実験システムが動作中であり，このシステムは実際の研究の場で便利に利用されている。

現在のところ，この数値データベースには，原子および分子の励起およびイオン化に関する散乱断面積データが約470件蓄積されている。なお収集済みの約4,000件の数値データのデータベース化の作業が行われている。データベース化されたデータには，1) プロセス（イオン化あるいは励起），2) 方法（実験あるいは理論），3) 実験方法あるいは理論計算の方法，4) 原子名，5) 原子番号，6) 電子の数，7) 始状態，8) 終状態，9) X軸に関する数値データ（eV単位でのエネルギー），10) Y軸に関する数値データ（ cm^2 単位での散乱断面積），11) 文献データ，12) コメントの各情報が含まれている。X軸およびY軸に関するデータは，検索および表示を簡単化するために，標準化されている。また，原論文中におけるX軸Y軸の単位の情報も含まれており，表示プログラムの改良により，原データの形式でのグラフ出力が可能になるよう考慮されている。各データ要素は，3桁の数から成るタグナンバでユニークに指定される。各タグナンバは2つの部分から成っており，最初の一文字は，大ざっぱな分類を示し，あとの2つは詳細な分類を示している。

原子分子に関するデータを取り扱う場合の問題点はたとえば $Mg, +3s^2S_{1/2} \rightarrow 3p^2P_{1/2}, 3/2, X(E/\Delta E)$ といった上付き下付き文字，特殊文字が出てくることである。原子分子散乱断面積データのデータ形式については，IAEA*で標準化の動きがあり，その動向をにらみながら，標準化された場合，それに交換できるような形式をとっている。したがって，標準化が成され

* International Atomic Energy Agency (国際原子力機関) の略。

ば、それに合うような形式に変換する変換プログラムを作成し、変換を行った後の数値データを外に出すことになる。我々のシステムでは、上付き下付き文字については、 \wedge 、 \backslash 、 $\`$ の3つの記号を用いて、

$$\text{Mg}^{\wedge+}, 3s^{2}\backslash S^{1/2} \rightarrow 3p^{2}\backslash P^{1/2}, 3/2^{\`}$$

のように表す。ここで \wedge および \backslash はそれぞれの上付き、下付きを意味し、 $\`$ は上付き、下付きの終りを意味する。また特殊文字 Δ , δ , π , Ω , w , \pm , \AA 等については、エスケープ文字を使ってそれぞれ

$$\sim GD, \sim Gd, \sim Gp, \sim GW, \sim Gw, \sim St, \\ \sim SA$$

のように表す。いずれの場合も、印刷可能な文字を使ってすべて表すことを原則にしている。

数値データおよびそれに付随する文献データの入力には、TSS ターミナルを用いて会話的に行う。データ入力プログラムは、オペレータに次に入れるべきデータを指示し、あるいは必要ならば、入力したデータの修正を行わせる。入力時におけるエラー (X 軸 Y 軸のデータの個数の違い、最大値最小値の違い等) は入力時にチェックが行われ、エラーの場合は正常データが入力されるまで入力を促し続ける。データ入力が完了した時点で、最終的なデータの内容がリストアップされ、人間による最終的なチェックが行われた後、ファイルにしまわれる。二重三重のチェックを行っていることにより、入力時のエラーは、ほとんど起こらない。また、プログラム指導型で入力を行わせるので、素人でも特別の訓練を行うことなく、かなりのスピードでデータを入力できる。

データベース化されたデータは、あらゆる項目で検索できるが、主に 1) プロセス名 (イオン化あるいは励起)、2) 実験か理論、3) 原子名、4) イオン化状態、5) 始状態、6) 終状態、で検索されることが多い。

検索の後、グラフ表示された図形は、いろいろな処理を受けることができる。すなわち、イ) 縦軸横軸の軸変換 (Linear または Log \rightarrow)、ロ) X 軸 Y 軸の単位変換 (X 軸に関しては、eV, Rydberg, 原子単位 (a_0), $X = E/\Delta E$ (ΔE : 遷移エネルギー)、利用者の指定、の 5 つの選択、Y 軸に関しては、 cm^2 , πa_0^2 , collision strength, 利用者の指定、の 4 つの選択が可能)、ハ) データ表示範囲の変更 (X 軸 Y 軸それぞれの最大最小の指定による)、ニ) 理論曲線との重ね合わせ (理論曲線の計算を行うプログラムは、前もって利用者が作成しておく)、ホ) コピー。

検索されたデータはグラフ表示端末のみならず、カ

ルコンプロッタあるいはバーサテック静電プロッタ等のハードコピー装置にコピーがとれる。また数値データはグラフ表示のみならず、表の形で得られ、グラフ表示端末以外で検索を行っている場合でも、数値データが容易に入手できるようになっている。またその表は、FORTRAN プログラムで容易に読み取れるよう考慮されているので、表をファイルに出力した後、FORTRAN プログラムで、データの処理を行うことは簡単である。

現在のところ、データベース中のデータは、論文から抜き出したままの生データであり、評価を受けたデータではない。原子分子物理になじみのないプラズマ科学の研究者にとって必要なのは、生データではなく、整理され評価されたデータである。したがってデータの評価は大事なことである。今後この検索表示システムに離散データのカーブフィッティング機能を追加するなどの拡張を行い、専門家によるデータ評価を開始する予定である。

今後このシステムを原子分子の散乱断面積データのみならず、電荷移動衝突、分光学的データ、sputtering yield 等のデータのデータベース化および検索表示にも使えるよう拡張し、利用者サービスを開始する予定である。現在このシステムは作業グループで試験的に用いられ、散乱断面積の経験式と実験値との比較を行い、より実際に即した式の導出作業が行われているが、利用者サービスを開始することにより、全国のプラズマ科学の研究者のみならず、原子分子科学の研究者の役に立つ道具になるはずである¹⁰⁾。

4. シミュレーション・コード

4.1 装置設計のための計算コード

高温プラズマの磁場閉じこめ方式は着実に進歩してきたが、装置規模は増大し、立案建設に要する年月も数年と長くなる一方である。それで大型計算機により設計計算を遂行し設計期間の短縮を図ることが切望されている。

磁場閉じこめ装置は複雑な電磁的構成物であり、閉じこめるプラズマの諸現象をいかに推測するか常に問題をかかえている。プラズマに電磁流体モデルを採用して装置の基本設計を行い、放電回路の時定数などの決定に必要なプラズマ輸送現象の知識は過去の経験則を外挿し、プラズマ加熱方式の検討などにはシミュレーションを遂行するというのが通常的设计手順である。

トラス装置に対して計算方式が確立しコード化された例を挙げると、イ)プラズマ平衡と磁場配位、ロ)プラズマ電流の不安定性と電磁応力、ハ)フィードバック制御、ニ)放電条件と外部回路系、ホ)プラズマ中の混入不純物輸送現象、ヘ)高周波加熱試行計算、ト)高速中性ビーム入射加熱のモンテカルロ計算、チ)核融合反応生成物に対するシールド計算……などがある。

装置設計に続いて各種計測のための計算や実験結果を推測するシミュレーションが要求される。後者にはプラズマ異常輸送現象の解明などの未解決な課題が含まれる。これらの研究に有力な方法がとぎに述べるプラズマ・シミュレーションである。

4.2 シミュレーション・コード

プラズマのシミュレーション・コードにはプラズマのモデルによって

- ・ 粒子コード
- ・ Fokker-Planck コード
- ・ Monte-Carlo コード
- ・ 流体コード

がある。プラズマ研究所の電子計算機センターにおいて、現在実行されている、または予定されている代表的なコードの実行時間(FACOM M-200 による)、所要メモリについて述べる*。

4.2.1 粒子コード

計算機の中に仮想的なプラズマを作り出し、その仮想的なプラズマの運動をおいかけて系の物理的性質を調べる。まず電荷粒子の分布、速度から電荷密度の分布、電流密度の分布を求め、電荷密度分布、電流密度分布から電場、磁場を決める。粒子は電場、磁場の力を受けて移動する。解くべき場の基礎方程式により、静電コード、静磁コード、電磁コード等がある。

- ・ 静電粒子コード(3次元)の例

3次元(円筒状)のドリフト波(磁場中のプラズマ圧力勾配に起因する波動)の研究。粒子数は10万~20万個の場合、

所要メモリ容量	11 MB
実行時間	30 時間/ラン

- ・ 静磁粒子コード(2次元)の例
プラズマ中の磁場構造の不安定の研究。

所要メモリ容量	約 10 MB
実行時間	30時間/ラン

3次元に拡張すると、所要メモリ容量、実行時間共に1桁以上大きくする必要がある。

- ・ 電磁粒子コード(2次元)の例
慣性核融合におけるレーザーとプラズマの相互作用、エネルギー輸送等における基礎物理現象の解明などに用いられている。

所要メモリ容量	約 10 MB
実行時間	20時間/ラン

4.2.2 Fokker-Planck コード

Fokker-Planck 衝突項をもつ Boltzmann 方程式を解いて、プラズマの速度空間および座標空間の分布関数を得る。このコードを用いてミラー磁場閉じ込め方式における開放端粒子損失、中性粒子入射加熱、DTプラズマ中のアルファ粒子による加熱等が研究されている。

(v_x, v_y) の2次元コードの場合

所要メモリ容量	4 MB (解法に依存)
実行時間	15~30 分/ラン

(v_x, v_y, z) の3次元コードの場合、所要メモリ容量、実行時間共に1桁以上大きくなる。

4.2.3 Monte-Carlo コード

粒子の軌道の計算に、Monte-Carlo 法により、衝突による散乱の効果を取り入れる。中性粒子の入射加熱、輸送、開放端粒子損失の計算を行う。

所要メモリ容量	数 MB~10 MB
実行時間	30分~数 10 時間/ラン

数多くのパラメータ・ランが必要になる。

4.2.4 流体コード(MHD コード)

プラズマの挙動を巨視的にとらえる目的で、MHD(magneto hydro dynamics)モデルが広く利用されている。流体コードの中には

- ・ MHD 平衡の計算
- ・ 線形 MHD 安定性の解析
- ・ 非線形 MHD 現象の解析

等がある。

- ・ MHD 平衡の計算

平衡解からコイルの位置、電流値、プラズマ電流等を決定する。1つの平衡を求めるのに標準的な場合は

所要メモリ容量	数 MB
演算時間	10~60 分

- ・ 線形 MHD 安定性の解析(例 EARTO コード)
系の不安定性をエネルギー原理を用いて定式化し、大次元行列の固有値問題に帰着させる。

所要メモリ容量	6~9 MB
---------	--------

* 「核融合プラズマ・シミュレーション装置計画検討委員会研究計画検討作業会中間報告」(1979.12)を参考にした。

メッシュ数	実行時間	work file
30×30 メッシュ	3分/ラン	18 MB
60×60 メッシュ	24分/ラン	200 MB
100×100 メッシュ	2時間/ラン	760 MB

実行時間は iteration 回数に比例している。データは iteration 回数が3の場合である。work file として、 $256N(N+1)^2$ バイト (N はメッシュ数) の容量を3個必要とする1組のプラズマパラメータの特定のフーリエ成分に対して、メッシュ数を変えて最小でも5点以上計算し、メッシュ数が無限大の場合の固有値を推定する必要がある。実行時間の合計は最小で4~6時間程度を要する。1つの平衡配位に対して2, 3のフーリエ成分を計算すると演算時間で10~30時間を要する。特に磁気ディスク装置への入出力が多く、経過時間が問題となる。経過時間は演算時間の約4倍程度になる。

- ・ 非線形 MHD 現象の解析

プラズマの動特性を追うことにより、各種の不安定性の機構の解明を行う。

- ・ ピンチプラズマに対する磁気流体計算コードの例

2次元プラズマ柱を理想的磁気流体とみなして非線形現象をシミュレートする場合

所要メモリ容量	5 MB 以下	
実行時間	20×12 メッシュ	20 分
	40×40 メッシュ	150 分

また3次元ピンチプラズマの場合、実行時間は5時間/ラン (15×15×15メッシュ) を要する。

- ・ 2次元爆縮コード

慣性閉じ込めの実験で最も重要な圧縮過程の解明や、ターゲットデザインの研究に用いる。空間メッシュ数 50×50 程度の場合

所要メモリ容量	5 MB
実行時間	10時間/ラン

トカマク装置の設計に際しては、プラズマの平衡配位、安定性解析は最も基本的なプロセスとして、十分綿密な検討が加えられる。しかしトカマクの場合磁場配位が軸対称になっているためプラズマの平衡、安定性解析が容易になっている。他方、軸対称でない磁場配位を持つバンビートラスやステラレータの装置も研究されているが、これらの設計は3次元問題となるので、必要となる演算時間、メモリ容量共に、トカマクの場合に比べて1~2桁大きくなるものと予想され

る。

これらのコードで必要メモリ容量が10MB程度になっているものが幾つかある。これは現在プラズマ研究所の電子計算機センターでは利用者用のメモリ空間の上限が11MBであることを考慮した結果である。現在実行されている幾つかのシミュレーションコードは、すでに利用可能なメモリ空間の大きさ、計算機の実行速度に制約されている。

4.3 アレイプロセッサの適用

シミュレーションコードの幾つかはすでに現在使用中の計算機システム (FACOM M-200) の演算速度、メモリ容量に制約されている。一解決方法としてアレイプロセッサの適用が考えられる。静電粒子コードの FACOM 230-75 APU への適用を通して、静電粒子コードのアレイプロセッサの適用について、次のようなことが分かった¹¹⁾。

FACOM 230-75 CPU で処理した場合、全体の実行時間の約66.8%を占める粒子運動を追跡する“パーテクル・プッシャー”では、個々の粒子は独立に移動できるので、アレイプロセッサによる高速化は容易であると考えられる。パーテクル・プッシャーは

```
DO 100 I=1, N
  LX=X(I)
  LY=Y(I)
  VX(I)=A(LX, LY)*C+...
```

100 continue

の形をしている。配列要素の添字がさらに配列要素になっているデータの参照が多く、これを高速に実行する必要がある。次いで、FFT (高速フーリエ変換) が全体の23.6%を占めており、FFTも高速に処理できなければならない。

電荷密度の計算では

```
DO 200 I=1, N
  LX=X(I)
  LY=Y(I)
  G(LX, LY)=G(LX, LY)+1.0
```

200 Continue

の形をしている。ループの制御変数 I の値が i について $i+1$ でも同じ添字 LX, LY になる可能性があり、パイプラインによる高速処理が難しい。しかしこの形の計算は多く出現するので、計算アルゴリズムの点からも、ハードウェアの点からも改善が必要である。

今後、より多くの応用例に対して、個々の応用例の特徴をふまえて、アレイプロセッサを適用した場合を

検討する必要があると考えている。

5. 実験データ処理

5.1 オンライン実験データ処理システム導入の背景

プラズマ研究所において、プラズマ物理・核融合研究のための各種実験装置が設置され、プラズマのふるまいを解明するための実験・研究が遂行されているが、最近では、これら実験装置は複雑な制御機構をもった大型装置に発展している。「実験データ処理」の課題は、実験装置から発生する実験・計測データを処理し、実験結果を実時間で掌握し、プラズマ実験にフィードバックすることである。一般にプラズマの実験の特長は、短時間（ m 秒程度）に生ずる放電現象の実験であり、かつその短時間に多種・多量（数十種、 $\sim 10MB$ /日）の実験データが発生することである。また実験の諸条件を設定するための実験パラメータが多いことも特長の一つである。実験は体系的に諸パラメータを変更しながら繰り返し行われる。（繰り返しの頻度は現在の装置では数分に一回である。使用電力の増大と共に待ち時間が延びる傾向にある。）実験装置の大型化・複雑化に比例し、装置の制御・運転、計測装置の制御維持、実験データの処理、実験全体の掌握等に当る多くの研究者から成る実験チームのサイズが増大し、それと共に、実験データの処理は迅速にかつ定型的に行い実験結果をいち早く、実験担当者のもとにフィードバックすることが求められ、その結果として電子計算機の能力を活用したオンライン／リアルタイム化が進展してきた。現在のプラズマ研究所大型電子計算機システムが導入された際、機種選定にあたって実験データ処理のオンライン／リアルタイム化が、具体的に所内にある主な実験装置を対象として検討された。たとえば、約 1,000 万度の高温プラズマを発生させる JI-PPT-II 装置（主半径 91 cm のトーラス型装置、磁場の強さは 3 万ガウス）の場合、実験条件は 4 分に 1 回の放電の設定であった。そして放電時間 1/30 \sim 1/50 秒の間に得られたすべての実験データを用い、プラズマ輸送現象コード（これにもいろいろと理論的問題があるがいまは入らない）によって、プラズマ現象を解明するのに必要な計算時間は M-200 級でも最低 20 分と算出された。すなわち、つぎの放電までの 4 分間に完全に処理できないということである。したがって、実験データ処理の全段階を通して一気に行うことは避け、データ処理の時間的尺度に留意してオフライ

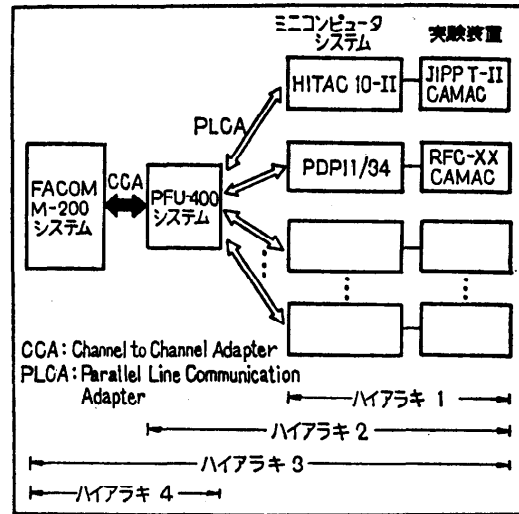


図-1 階層構造システム概念

ンとオンラインとに大別し、オンライン処理に対しても段階的に行う方針が採択されたのである。

5.2 オンライン実験データ処理システム

実験データ処理オンライン化のシステム設計に際し次の点が留意された。

- (1) 容易にかつ確実に稼働できるシステムであること。
- (2) 実験データ収集・解析処理が自動的にかつ迅速に行えること。
- (3) 大量の実験データが安全に保存できること。
- (4) 実験装置の特長がいかせること。
- (5) プラズマ実験装置固有の漏洩電界・磁界の影響をうけないこと。
- (6) 大型プロジェクト研究推進の有力な道具として働くこと等。

このような背景のもとに階層構造をもつ、オンラインシステム（図-1）が採用された。すなわち、ホスト計算機として FACOM M-200、フロント計算機として PANA FACOM U-400、フロントエンド計算機として実験装置側に設置されたミニ・コンピュータ群から成り、ホストおよびフロント計算機には実験データ蓄積用の磁気ディスク・ファイルをもつシステムである。

各階層間には高速データ転送を図るため、並列データ転送方式が採用された。また階層間のデータ授受・制御用にコミュニケータが、磁気ディスク・ファイルアクセスに関するサービス・ルーチンが開発された（図-2）。

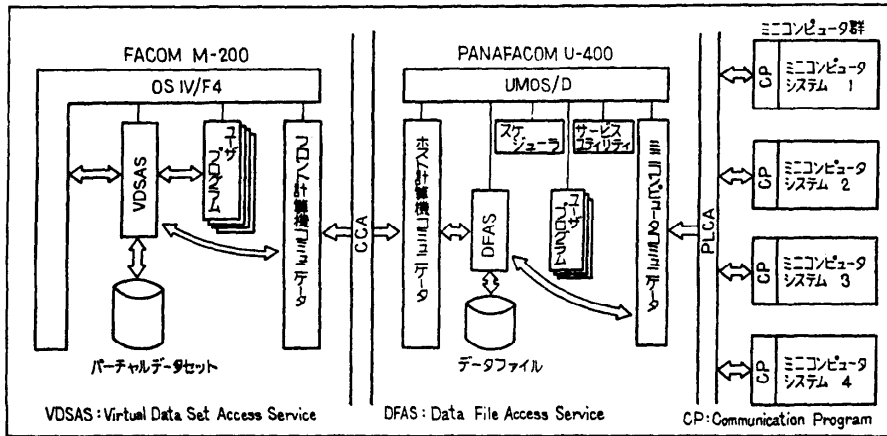


図-2 オンライン実験データ処理システムのソフトウェア構成

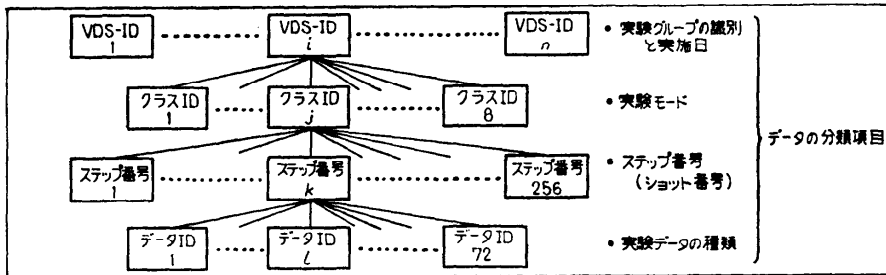


図-3 FACOM M-200 におけるデータ識別子構造

さらに実験データがホスト計算機のファイルに格納される時、自動的にデータ ID (実験グループ名、日付、実験モード、ショット番号、データの種別をキーとする識別子) が付されるよう設計された (図-3)。このデータ ID はデータ解析処理・整理・検索時のキーとして活用できる。

オンライン実験データ処理システムを階層構造にすることにより、次の利点がある。

- (1) 既存のミニ・コンピュータを活用してオンライン化できる。
- (2) 複数の実験データ処理が1つのオンラインシステムで同時に行える。
- (3) 実験装置側のミニ・コンピュータの増加に対しても容易に対処できる。(フロント計算機に接続するか、フロント計算機を増設する)
- (4) フロントおよびホスト計算機へのハード/ソフトウェア資源を有効に活用できる。
- (5) 実験の形態、実験装置の特長に合った階層が自由に選択でき、運用面に柔軟性がある。

またソフトウェア面、特にユーザが作成するアプリケーションプログラムから見て次の特長がある。

- (1) アプリケーションプログラムはすべて FORTRAN 言語で作成できる。
- (2) データ転送、タスク起動・制御は各階層のコミュニケータが代行する。
- (3) 多種・多量の実験データの格納場所とその対応を意識しなくてよい。
- (4) 蓄積された実験データがプログラムの誤りにより、消滅することがない(プロテクト処理がされる)等。

5.3 今後の問題

プラズマ実験の特長として最初に述べたように、多種・多量の実験データが短時間に発生することが、実験データを処理する際の困難さの原因となっている。まず実時間データ収集の困難さ、データ処理時間と結果の表示までのレスポンス時間の短縮の困難さが挙げられる。計算機システム側からの解決策として、より高性能の計算機を複数台備えた分散処理方式が考えら

れる。その場合、各計算機間の情報伝達・制御に十二分の配慮が必要となる。またより高速なデータ通信も必要となろう。さらに蓄積した多量の実験データを、どのような形で保存し、どのような方法で検索・照合するかという問題がある。データの最終的な保存は磁気テープによっているが、近々導入される MSS (Mass Storage System) の活用も検討している。多量のデータの検索・照合の問題はデータの蓄積量に比例して、ますます厄介で困難な問題となる。小規模にデータの検索・参照を現在行っているが、統括的なソフトウェア (ハードウェアを含めた) の開発が近い将来、必要になってくると思われる。

大型プロジェクト的な実験データ処理の諸々について述べたが小規模・短期間の予備の実験のデータ処理のためには、可搬型簡易データ収集装置が望ましく、開発中である。

6. おわりに

以上の各章において今後の問題点がそれぞれ指摘されているが、このほかに当センターが抱えている問題は少なくない。その中の1つに、プラズマ・核融合研究の分野専門の計算機センターとして機能を発揮するための国内ネットワークの整備の問題がある。現在 RJEステーションが大阪大学レーザー核融合研究センターと京都大学ヘリオトロン核融合研究センターに設置され、近く広島大学核融合理論研究センターにも新設される予定である。また、米国の核融合計算センターと結ぶ話も検討中である。このようにプラズマ・核融合研究における情報処理は、研究の進展に即応して新しい課題に取り組むことが常に要請されるのである。

参考文献

- 1) 金田康正, 市川芳彦, 大江 建: INSPEC データをデータベースとした文献情報検索, 核融合研究 1979年5月号.
- 2) 市川芳彦, 大江 建, 金田康正: ソリトン物理学の研究動向について, 核融合研究 1979年1月号.
- 3) Ichikawa, Yoshi H., Ohe, Takeru and Kanada, Yasumasa: The Development of Soliton Physics: An Analysis Based on Information Retrieval IPPJ-362.
- 4) 大江 建, 金田康正, 百田 弘, 市川芳彦: プラズマ・核融合研究の世界的動向—その計量的分析—その I =, 核融合研究 1979年5月号.
- 5) 大江 建, 金田康正, 百田 弘, 市川芳彦: プラズマ・核融合研究の世界的動向—その計量的分析—その II =, 核融合研究 1979年6月号.
- 6) Ohe, Takeru, Kanada, Yasumasa, Momota, Hiromu and Ichikawa, Yoshi H.: Trends of Plasma Physics and Nuclear Fusion Research. Life Cycle and Research Effort Curve IPPJ-396.
- 7) Cross Sections for Atomic Processes. Vol. 1 (H), IPPJ-DT-48 (1975) English Version (1978).
- 8) Cross Sections for Atomic Processes. Vol. 2 (He), IPPJ-DT-50 (1976).
- 9) IPPJ-AM-1~13.
- 10) Ichikawa, Y.: Report of the 2nd Meeting of the Atomic and Molecular Data Center Network (1980).
- 11) 阿部芳彦, 上村鉄雄: プラズマ粒子コードのアプリケーションプロセッサへの適用, 核融合研究 Vol. 44 (1980) 別冊その3.

(昭和55年9月3日受付)