

## 総論\*

## 元岡 達\*\*

## 1. 超大型機とは

“超高性能で高価な計算機であり、その時代における最先端の技術を網羅した計算機である”。といった意味で、超大型機に対するばく然とした概念は一般にあるけれども、つきつめてゆくと、超大型機について各人の描いているイメージにはかなりの差があるようである。超大型機として開発された計算機が実用されるころには、大型機の範疇に数えられることもあって現在実用されている超大型機と、開発中の超大型機との間にかかなりの差があり、議論がくい違う原因の一つになる。また試作程度のもので含めるか、少なくとも10台近く売れることを考えた商業機に限るかによっても話が違ってくる。

ここでは、現在ならびに近い将来、超大型機で用いられると予想される基本的な技術や考え方について述べてみたい。当初超大型機を対象に開発された技術であっても、その有用性が実証されると大型機以下の機種に対してもその技術が適用されるのが普通であって、このことが、超大型機が各方面で注目され、研究されるゆえんであろう。

ユーザの立場からの新しい超大型機に対する要求は、まず第一に現存の計算機では事実上計算不可能のような超大型の計算を実行してくれる超高性能計算機が欲しいということであろう。高次元の偏微分方程式や大規模なマトリックス計算になると現存の計算機では数十時間以上の計算時間が必要となり、計算機の信頼度からみて、事実上不可能であったり、気象予報のように時間がかかりすぎるとは無意味となるような問題が山積している。第二の理由としては計算料の問題がある。これまでの計算機発展の歴史をふりかえると、性能が $N$ 倍になっても価格は $\sqrt{N}$ 倍にしかならないという二乗則が成り立ってきた。すなわち計算機を大

型化すればするほど、同一の計算に対する計算費用は低下するという経験則があり、これが今後も維持されるであろうという期待である。

システムの超大型化の傾向も、超大型機の発展を予想させる重要な要素と考えることができる。各種の情報処理システムでは処理と並んで、あるいはそれ以上にファイルの管理とその共用が重要になってきた。情報処理システムにおけるファイルの重要性に対する認識がたかまり、価格的にもファイルの占める割合がますます増大する傾向にあって、次第にファイル中心にシステムが構成されるようになってきている。わが国においても銀行のオンライン・システムや鉄道、航空機会社の予約システムをはじめ、多くの事例にみられるように、ファイルの集中管理にともなってシステムの大型化の傾向は今後も急速に発達するものと考えられる。そこで使用される処理装置は1台に限らず、複数機台使用してよいわけであるが、ソフトウェアの作りやすさ、効率の点からいって比較的小数の大型機によるのが得策といえる。システムの大型化にともなって今後ますます高性能大型機に対する需要は増加するものということができよう。

大容量ファイルや多数の入出力機器、入出力端末を持つことは超大型システムの条件と考えることができるが、超大型機といった場合には大容量の主記憶と高速・高性能の処理装置がその主要な対象と考えられる。その時代に使用できる最も高速な論理素子を多数用いて構成された複雑な論理構成の処理装置と、高速・大容量の主記憶を中心とした記憶システムとが結合されて、発揮される超大型機の性能を頭に描きながら、それを構成する基本素子、論理構成法、記憶と処理装置間の結合法といった問題について現状と将来の発展の方向を中心に、以下に論じてみよう。

## 2. 論理素子

現在計算機などに使用できる最も高速の集積回路は電流モード論理 (CML) と呼ばれる方式の回路で、ゲート1段当りの遅れが1ns前後のものである。同期

\* Recent Trends of Very High Speed Large Scale Computers, by Tohru Moto-Oka (Faculty of Engineering, University of Tokyo)

\*\* 東京大学工学部

方式の回路のクロックはフリップ・フロップ間にはいるゲートの段数を 10 段程度に押さえるのが普通であるから 10 ns の間隔が限界である。この程度の速度になると集積回路間を接続する線路の長さによる遅れ（光速は 1 ns が 30 cm に相当するが、誘電率のため、これより伝送速度は落ちるのが普通）や他線路からの誘導と線端や分岐点での反射による雑音の問題がゲートでの遅れと同程度に深刻な問題になってきている。集積回路の高密度化、すなわち LSI 化は、高速化のためにも有効な手段といえるが、従来新しい論理素子の出現に期待されていたような、一けた以上の高速化は期待できない。これに代わる新しい論理素子として光の利用が考えられているが、光電変換を利用するものでは、電流の関与する部分の速度に飛躍的な改善は望めず、純粋に光による論理でも、小型化が実現されねば高速化は望めない。ただし、伝送線路の反射や、線路間の誘導に強いこと、並列論理の実現が容易と考えられることから、パターン処理など周辺機器の分野を初めとする特殊な分野ではその将来性が楽しめる。

LSI の実用化については記憶の分野では、すでに確固たる地位をきずきつつあり、当初疑問視された yields の問題も順調に解決の方向に向かっている。超大型機に LSI を使う場合に二つの方向が考えられる。一つは計算機の論理構成を従来のものとは著しく変え、比較的少種類の機能ブロック（これが一つの LSI に対応する）の組合せによって超大型機を構成する方向である。他は少数多品種の LSI を安価に作成する技術を確立し、論理設計と LSI にする実装設計とを完全に分離しても LSI の使用を経済的に可能にする方向である。ビームリード技術などによって接続の自動化をするだけでなく、LSI の解析や検査、製造などの自動化システムが完成すれば超大型機を LSI で構成することができる。第一の方向は画期的な着想の提案があれば比較的短期で実現される方向であり、第二の方向は、他にも応用面の多い技術の確立であり、比較的長い期間を要するかもしれないが、必ず実現する方向である。

LSI の製造・検査の自動化から論理設計の自動化ないし CAD 化の方向についてもふれておく必要がある。従来のような人手による論理設計手法で一人の人がさほどの困難なく設計できる計算機の規模は 20,000 ゲート程度といわれている。また  $10^5$  ゲート程度が人手によって設計グループが設計できる限界に近いと考えられる。今日の超大型機でもこの限界に達し

ており、論理の複雑化による超大型化をさらに進めるためには、機能のモジュール化や、高級言語による設計自動化法の確立が必要になる。このような方法で細部の設計を計算機にまかせたり、共同設計に必要なファイル管理を計算機にまかせ、また誤設計の検出をシミュレーション技術などにゆだねるためには CAD 技術を論理設計の分野に全面的に取り組む必要がある。今後の超大型機の発展の速度や限界が論理設計の CAD 化に依存する要素が非常に大きいことを指摘しておきたい。

### 3. 記憶装置と記憶方式

第三世代の計算機では計算機の処理速度が記憶装置へのアクセス時間によって押さえられていることが指摘され、磁性薄膜などによる主記憶そのもの的高速化や半導体レジスタ記憶によるスクラッチパッド記憶を取り入れて処理装置と主記憶間のデータ転送量を減らすことによる高速化、処理装置と記憶間のデータ転送要求の平滑化のための先回り制御をはじめとする各種記憶制御方式による高速化などの努力が続けられてきたが、半導体記憶が磁心記憶とあまり変わらない価格で実現できる見通しが立っているいろいろな面に大きな影響を及ぼそうとしている。半導体記憶の利点は二つある。第一はその高速性であり、第二の利点は小容量の記憶でもビット当りの価格が大容量の記憶に比して高くないことである。すなわち周辺回路がほとんど必要ない利点がある。第一の利点から主記憶を半導体化することによって超大型機の速度が記憶によって制限されるという問題はほとんどなくなる。たとえ主記憶は磁心で構成するにしても Cache、バッファ記憶と呼ばれる手法によって、数千語の半導体記憶を主記憶と処理装置の間におくことによって、実質的に主記憶を高速化したのと同じ効果がおさめられることが明らかになってきた。また Cache によって主記憶のサイクル時間はあまり早くなくてもよいことになった。主記憶の容量としては超大型機では数 M バイトを必要としているので、その物理的な大きさからいっても高速化には限界があり、Cache の手法は今後標準的な手法として超大型機にはもちろん、それ以下の機種にもかなり利用されよう。

半導体記憶の第二の利点は、各部の緩衝記憶や、処理装置内に多数のレジスタ群を置くことに貢献することはもちろんであるが、記憶の分散による全く新しい構成法の超大型機が設けられる可能性も包蔵してい

る。また記憶中に論理を持ちこむことも容易になるから、多年の夢であった連想記憶などの可能性も高まり、いろいろな特色のある記憶が作られる可能性も多い。プッシュ・ダウン・スタックなども、LSI 化が容易な記憶といえよう。

大型機の主記憶容量が絶えず増加の傾向をたどっている原因としては、システムの大型化と、それともなうオペレーティング・システムの大型化によるところが大きい。本質的には、主記憶と、機械的なアクセス法に頼る補助記憶の間の速度差にある。このため機械的なアクセス法によらないブロック転送記憶 (Block Oriented Random Access Memory, BORAM) の研究が進められており、磁壁移動や磁気音響による記憶が実用化される可能性があり、今後 Cache とともに新しい階層を構成するものと考えられる。

使用者にみかけ上連続な巨大な記憶空間を提供するためのハードウェアとソフトウェアとからなる仮想記憶 (Virtual Memory) 方式は当初 TSS の記憶割当てを要求発生時に能率よく行なうために考案されたものであるが、記憶保護や、プログラム作成の簡易化にも役立つことが強調され、次第に大型汎用機にも用いられるようになってきている。これはオペレーティング・システムの一部をハードウェア化する動きとしてとらえることもでき、このような傾向は今後の超大型機にいろいろな形で現われるものと考えられる。

#### 4. 制御の分散と並列化

論理素子の高速化に限界が感じられはじめるとともに多数の論理機能を配置し、それらを同時動作させることによって実効的な高速化を行なわせることが超大型機を中心に研究されてきた。最も初期のものとしてはチャンネル制御を独立させることによって入出力装置の速度が高速化の隘路となることを防いだし、次に記憶の速度がボトルネックとなると命令取出し部と命令実行部の制御を独立させる命令の先取りの手法などが開発された。演算装置の高速化のためには多数の加減算器や乗算器、除算器などをおいて論理的な矛盾の起こらない範囲で同時に各種の演算を別々のデータについて実行させる演算の並列化や、ベクトル演算のように同種の演算を一連のデータに対して実行するときには、演算をいくつかの段階に分解し、そこにデータを流し込んで、他端から演算結果が流れ出るようにしたパイプ・ライン化などの手法がとられている。

演算の並列化は、演算器内部の論理操作の並列化、

多数の演算器間での並列動作、命令実行部と命令取出し部との並列化、多数の処理装置の並列化といったさまざまなレベルでの並列化が実行されている。超大型機といった場合、処理装置自体の大型化が対象となるが、超大型システムとして考えるときには、個々の処理装置はそれほど大きくなくても、多数の処理装置が有機的に結合されて、全体として高性能を発揮することが期待され、今後の超大型化の一つの傾向といえる。後にふれるように、超大型機になると、単体としての MTBF は低下するから、実時間システムはもちろんのこと、一般のシステムでも、故障発生時にシステムが完全に停止するのを避けるために複数台の処理装置でシステムを構成する場合が多くなる。また IC や LSI の普及によって記憶や入出力機器の価格に対して処理装置の相対的な価格が低下する傾向にあるからこの傾向は強まるものと考えられる。

高速化の手段として並列化とならんで、パイプ・ライン制御と呼ばれる制御方式がとられていることについては先に述べた。パイプを使って水を流す場合のように、個々のデータに着目したとき、演算速度は普通の制御方式と変わらないが、一連のデータの処理時間をそのデータ量で割った場合には、非常に高速になる。たとえば、 $N$ 段からなるパイプライン制御の演算があり、これに  $M$  個のデータが次々に送り込まれ、1段当りの演算時間が  $t$  秒であるとする。  $t$  は通常クロック時間程度である。全体のデータ処理に要する時間  $T_p$  は次式で与えられる。

$$T_p = (N + M - 1)t$$

1 個のデータあたりの所要時間  $t_p$  は

$$t_p = T_p / M = \left(1 + \frac{N-1}{M}\right)t$$

で、 $M$  が増加すると  $t_p$  は  $t$  に収斂する。

並列処理の場合、 $K$  個多重化し、各演算器の演算時間が  $Nt$  であるとする  $M$  個のデータ処理時間  $T_c$  は

$$T_c = Nt \left\lceil \frac{M}{K} \right\rceil$$

で与えられ、 $M$  が十分大きいときのデータ一つ当りの所要時間  $t_c$  は  $N=K$  のとき  $t$  になる。

パイプライン制御の方が制御自体は簡単であるが、汎用性の面で劣り、用途に限られる。命令取出しの制御、乗算器の内部制御、ベクトル演算、ストリング処理などの特殊目的演算器の制御などで威力を発揮している。

超大型機の目的の一つとして偏微分方程式の解など、特に長時間の演算を必要とするものに対する解決手段を提供することがあげられる。この目的に着目した場合、従来のように汎用機にたよるのがよいのか、特定の問題に重点をおいた一種の専用機にたよるのがよいのかといった問題がある。アレー・プロセッサや, Illiac IV は後者の道を選んだ例と考えることができる。汎用超大型システムを実現する場合でも、多数の処理装置からなるシステムとし、各処理装置は一応の汎用性をそなえたうえで、特にコンパイル機能強化したものとかファイル処理機能を強化したもの、アレー処理機能を強化したものなどの特色を持たせることも考えられる。今後どのような形で超大型システムが実現されてゆくか、それに関連して超大型機がどのような発展をたどるかは、構成装置のモジュール化、制御の分散技術、設計自動化技術、保守技術の自動化などの発展に複雑にからみ合って決定されてゆくものと考えられ、現時点で明確な見通しを述べることは困難である。ただ多処理装置システムが一つの大きな方向として超大型システムの発展に寄与することは確かである。

## 5. RAS 技術

RAS は Reliability, Availability, Serviceability の頭文字からとった略語である。見かけの性能には直接関係しないが、超大型機をささえる基礎的技術として今後その重要性がますます増大する技術である。

超大型機の信頼性を高める基礎は、それを構成する基本素子の信頼性を高めることにあることはいうまでもない。しかし故障の発生した場合、これを速かに発見し、短時間に修復するための技術を確立することは計算機技術者に課せられた責務である。特に超大型機の場合、基本素子の数が増すだけ MTBF は低下し、一方故障点の検出の困難さは増大する。しかも故障によるダウン時間当りの損害は増加し、超大型機の規模に限界を与える要因になりかねない。超大型機の製造台数はそれほど多くないから従来のような経験による保守技術の改善は望めず、保守員の養成の問題に困難が多い。この問題を解決するためには故障点自動検出用プログラムの自動発生技術が必要であり、また故障検出回路を処理装置の各部に十分取り付け、故障の早期発見と、故障範囲の局地化をすることが望ましい。このための金物が全体の 10% 以上をしめるようになってきている。また誤動作には固定的な故障と、間欠

発生するものがあり、後者は前者の 3 倍程度に達するという。後者については演算の再試行が自動的にできるようになっていれば、回復可能であり、このような機能が超大型機には欠かせないものとなっている。命令の先取りなど各部に制御が分散され、パイプ・ライン方式などがとられていると、この演算再試行なども複雑になり、超大型機の設計を困難にしている大きな要因である。

計算機の汎用性が重視された理由には、計算機設計の困難さとともに、機種増加にともなう保守の困難さが大きな理由としてあげられていた。しかし保守プログラムの自動作成が可能となり、保守員は計算機の命令するままに部品の取り替えをやるだけでよいのならば専用機製造の問題点も設計製造コストだけの問題になる。

## 6. オペレーティング・システム

オペレーティング・システム(以下 OS と略記する)は計算機システムをより使用者に使いやすい形で提供するために開発されたソフトウェアであるということができ、大規模の計算機システムを能率よく運用するためには不可欠の技術となっている。超大型機を運用するためにも必然的に OS を必要とし、この製造に莫大な費用のかかることが、今後の超大型機の発展に制約を課する可能性がある。すなわち新しい機種はできたけれども、その能力を十分に発揮するためのソフトウェアが準備されないということでは、実用にならない。

この立場を重視すると少なくとも汎用超大型機としては、OS 製造技術が確立し、安易に作成できるようになるまでは、既存の計算機ファミリーの延長線上にあるものとして超大型機を位置づけることになる。

OS の製作技術としては高級言語による記述によって OS は計算機とできるだけ独立のものとすること、OS の業務の中標準的なものをハードウェア化することなどが考えられ、後者は今後の超大型機の中に取り組まれて発展してゆく技術と考えられる。

現在の OS は汎用超大型システムを目指し、単一の OS でバッチ、リモート・バッチ、会話形、実時間形といったあらゆる種類の仕事を一緒に能率よく処理することを目標としている。そして各機能をモジュール化することによって、それぞれのシステムに適合した OS をシステム生成時に作り出すことになっているが、必ずしも所期の目的が十分達成されているとはいえない。OS については現在なお経験の集積をまず必要と

する段階ということができ、OS が超大型機にどのような形で影響を及ぼすかは興味深い問題点である。

## 7. おわりに

以上超大型機についていろいろな角度から考察してきたが、要約すると以下のようなになる。

1) 超大型機はこれまでの機種では不可能なような特殊超大型計算を実施する目的と、超大型システムを中心処理装置として性能/価格比を向上させる目的とから開発される。そこで開発された技術は次には大型機以下の機種に反映させられる。

2) LSI 化が当面の方向であり、これが全く新しい

方式を生み出すか、従来の延長線上の機種が設計自動化の技術によって作り出される。

3) 半導体記憶も新しい方式を生み出す原動力の一つと考えられ、複雑な論理装置が作りやすい地盤は固まりつつある。

4) 超大型システムが、超大型を中心に発展するか、多処理装置システムを中心になるかは、超大型機が汎用機中心でゆくか、専用機化するかとともに、興味ある問題で、設計・製造・保守技術、さらにはソフトウェア製作技術の自動化の進み具合とも密接に関連してくる。

(昭和46年5月10日受付)