解 説

最先端の科学技術とスーパコンピューティング

6. 航空宇宙工学における スーパコンピューティング†

藤 井 孝 藏††

1. はじめに

航空宇宙におけるスーパコンピュータの利用を語るとき，流体の数値シミュレーションを抜きには考えられない．航空宇宙とはいっても，スーパコンピュータが活躍しているのは，そのほとんどが流体力学に関連した数値シミュレーションなのである．宇宙に関しても，スペースプレーンなどの宇宙輸送機器の開発という工学的利用以外に，宇宙における星の生成や消滅などという天文学の分野でも流体の数値シミュレーションが使われているが，ここでは航空宇宙における工学的な流体数値シミュレーション(CFD: Computational Fluid Dynamics)を中心に考えることにする．

航空分野における実用的な数値シミュレーションは1970年代はじめのアメリカ航空宇宙学会で幕を開けた．それ以降の数値シミュレーション技術の進展には驚かされるものがある．その間，航空宇宙の分野は常にスーパコンピュータの進歩と関連付けて注目を浴びてきた．しかし，どんなシミュレーションでも可能となっているわけではない．ここでは，計算機の進歩とそれに応じた数値計算法の変化，そして，シミュレーションの現状とその将来像をスーパコンピュータに関連付けながら述べてみよう．

2. 計算機の進歩と計算法の変化

2.1 スーパコンピュータとシミュレーション能力

1970年から約25年，スーパコンピュータと計算法の進歩によって複雑な流れ場をより精度よくシミュレーションすることが可能になってきている．利用している方程式は，初期のポテンシャル方程式から，現在ではナヴィエ・ストークス方程式を利用するのが主流である．この方程式系を用いれば流れが物体から剥離するという物理現象を比較的正確にシミュレーションに取り込むことができる．このような利用方程式の変化は，数値シミュレーション技術の利用範囲を航空機の翼まわりの流れなど限定されたものから，ありとあらゆる流体現象へと広げる効果をもたらしている．約15年ほど前，スタンフォード大学における数値流体力学の国際会議において，Chapman教授は航空機に関する数値シミュレーションに必要な計算機能力を予測している[1]．彼の予測では，条件によって多少の違いはあるが，必要格子点数は百万から数百万，それに対応するメモリ要求は数百MB，結果を1時間程度で得るためには，スーパコンピュータの性能として約1GFLOPSの実行性能が必要であるとされている．格子点数というのは，差分法など離散化手法で計算する際に利用するノードの数で，シミュレーション結果としてこの各点における圧力や速度などの物理量が得られる．したがって，より詳細な流れを知りたければ，それだけ多くの格子点数を利用しなければならない．さて，この数字はハードウェア的には現在すでに凌駕しているが，筆者らが行ったナヴィエ・ストークス方程式計算コードでのベンチマークでも実性能で満足していることが証明されている[2]．さらに，その後行われたCRAY C-90/16でのベンチマークテストの結果では実効で8GFLOPS近い性能が得られている．これらの結果からすれば，1時間でシミュレーションの解が得られるという条件は現状のスーパコンピュータで十分に満足されていることになる．

航空宇宙に関連するシミュレーションの代表例をあげて，スーパコンピュータの性能向上を確認

† Supercomputing in Aerospace by Kozo FUJII (The Institute of Space and Astronautical Science).

†† 宇宙科学研究所

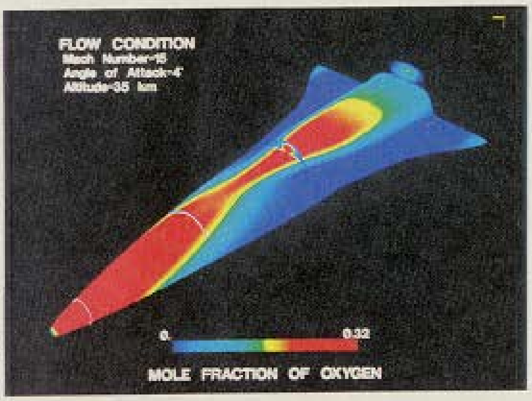


図-1　極超音速で飛ぶスペースプレーン上の生ずる流れ[3]
(空気の解離によって生ずる酸素原子の分布)

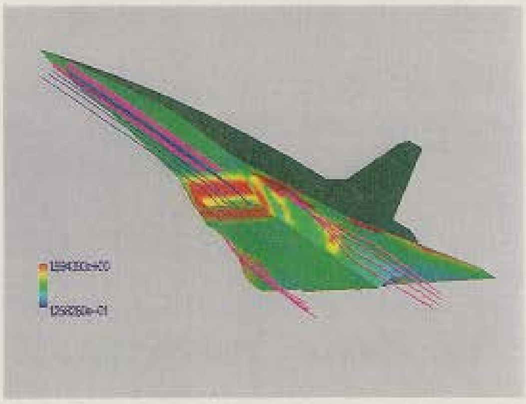


図-2　超音速で飛ぶスペースプレーンまわりの流れ[4]
(表面圧力の分布と流線図)

してみよう．**図-1** は航空宇宙技術研究所の和田氏によって計算されたスペースプレーンまわりの超高速流である[3]．格子点数は 20 万点程度で，計算時間は富士通 VP 400 で 6 時間程度である．**図-2** はわれわれの行ったエンジン付きのスペースプレーンに対するシミュレーション結果である[4]．計算は非粘性の仮定の下で行われ，機体とエンジンなどを一体として計算することで機体単独の解析では評価できない機体/エンジンの空力的な干渉を評価することができる．計算格子点数は約 26 万点，計算時間は富士通 VP 200 で 10 時間を越えている．**図-3** は三菱重工の海田らによる H II ブースタ分離のシミュレーションである[5]．計算格子点数は 48 万点，計算時間は富士通 VP 2400 でおよそ 10 時間である．

これらの例から分かるように，実用的な計算に

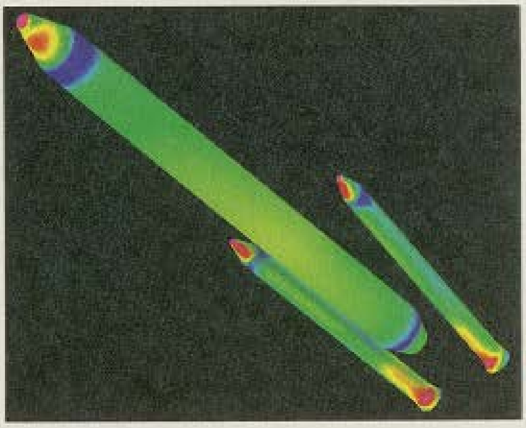
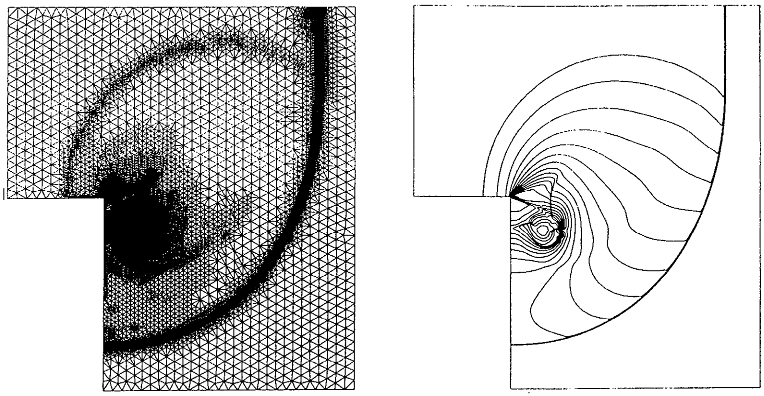


図-3　HII ロケットブースター分離のシミュレーション[5]
(表面圧力分布)

要する典型的な計算時間はけっして 1 時間では収まっていない．図-1 の例では空気が高温となって解離するなどの現象も含めてシミュレーションが行われているし，図-2 や図-3 の例では，複雑物体に対応するために，領域分割の手法が利用され領域間のデータのやりとりによるオーバヘッドの時間がかかっている．これからすると，先端的な研究においては，思ったほどシミュレーションに要する時間の短縮化は図られておらず，むしろ，より多くの格子点数を利用して精度向上を図ったり，より複雑な方程式を解いたり，より複雑な形状や流れ条件を扱うといった方向に研究者の利用が変化している．もちろん，重工メーカでの日常的な利用では少し事情が異なっているかもしれない．

2. 2　計算手法の動向

スーパコンピュータの性能向上に比べて計算法による数値シミュレーションの効率化はここ数年かなり鈍化しているといえよう．計算法の改良は計算効率をあげることよりも，得られる解の精度の向上と実用化の方向を向いている．80 年代後半における一つの大きな成果は TVD 法(Total Variation Diminishing Scheme)に代表される高解像度風上差分法であろう[6]．差分法に代表される離散化手法の多くは局所的な物理量の連続性を仮定している（差分近似がテイラー展開から得られることを思い浮かべていただきたい)．そのため微係数が急激に変化する衝撃波など，流れの不連続をシャープに捉えることは数値計算法の課題の一つであった．この TVD 法（実際にはもう少



(a)時間とともに増減する計算格子　　　　　　(b)ある瞬間の密度等高線

図-4　非構造格子を利用した数値シミュレーション[7]
(角をまわる衝撃波の挙動)

し数学的な意味付けがあるがここでは省略する）によれば計算している場全体としては高次精度を維持しつつ，このような不連続を数格子で捉えることができる．このことはメモリの制限から，限られた格子点数しか利用できない現状では大きな助けとなっている．現在，航空宇宙分野の数値シミュレーションでは，上記の例も含めて，そのほとんどが高解像度風上差分法を利用している．

ここ数年，応用される物体の形状や計算条件が複雑化してきているのにともなって，離散化の方法の改良に加えて，それらの手法をいかに実問題に適用するかという利用方法の工夫が数多く試みられるようになってきた．それには二つの方向がある．

一つは非構造格子系の利用である．航空宇宙分野では，有限差分法と計算格子に序列のある有限体積法が主流であった．これらの場合にはある格子点 j での物理量を q_j と定義すると隣りの格子点での物理量は q_{j-1}, q_{j+1} などと定義でき，計算機内では配列の順番，または一定ストライドに近隣のデータが並ぶことになる．このような格子を構造格子と呼ぶ．一方，非構造格子ではデータの順番に構造性がなく，j の格子の隣は j+10 かもしれないし，j−23 かもしれない．そのかわりデータの位置関係を示すテーブルが別に用意されている．したがって，データへのアクセスは非連続的であり，添字も陰的に定義される．スーパコンピュータでは，そのため効率上の低下を招く．非構造格子の代表は有限要素法であるが，有限体積法においても非構造格子を利用することができる．非構造格子利用の利点は，形状適合性が高いことと，格子の再配分や追加などが容易なことである．そのような例を**図-4**に示す．衝撃波の伝播をシミュレーションした例[7]であるが，時間とともに移動していく衝撃波にあわせて局所的に格子が増減する．

もう一つは領域分割の方法である．物体適合座標系を利用した数値シミュレーションでは物体まわりに計算格子を作成すれば，一つのプログラムでさまざまな形状を扱うことができた．しかし，形状がさらに複雑になると，序列をもった計算格子を生成することが次第に困難になってきた．そこで考えられたのが，物体をいくつかの要素に分け，それぞれの要素に対して計算格子を用意し，各要素格子の間で情報をやりとりしながら計算を進める，領域分割の方法である．この方法の代表的なものとして，融通性に優れた重合格子法がある．図-2 や図-3 はそのような例である．この方法を利用すれば，たとえばエンジン形状を変えたければエンジンの格子のみを変えればよい，というぐあいに複雑な形状に対処できるだけでなく，格子生成，計算，後処理といったシミュレーション全体のプロセスの効率化を図ることができる．

2.3　利用形態の現状

一口に流体の数値シミュレーションといっても二つの大きな目的をもっている．一つは現象理解を深めようとするもので，いわば流体物理学的な解析である．乱流の直接シミュレーションなどはこの典型である．大学や諸研究所などで行われている若干実用的な研究の多くもここに含められ

る．一つ一つのシミュレーションに要する時間は，短いに越したことはないが，ある程度融通性をもつ．もう一つは企業，研究所などが実際の開発に利用するためのシミュレーションである．航空機の設計に長らく数値シミュレーションを利用してきたボーイング社のCFDグループのリーダDr. Paul Rubbertはいう[8]．「CFD分野での目標というのは単に正確な物体形状まわりの正しい物理現象を解く以上のものでなければならない．ある限られた時間内にセットアップから計算，結果の解析までを行えることが重要である．」すなわち，1ケースの計算がいかに速いかでなく，何ケースもの計算を限られた時間に行うことが重要となる．

どちらもCFDをシミュレーションの道具として利用してはいるが，その要求は微妙に異なる．スーパコンピュータ利用の将来を考える上でもこのことを念頭に置いておく必要がある．

3. ハードウェアの変化への対応

設計や開発目的の利用に関しては，並列ベクトル型スーパコンピュータは最適であろうと考えられる．実際に，マッハ数や気流角度，形状などを変えた多くのケースに対して同じ計算を行うことが必要で，トータルとして短時間であることが重要となる．したがって，一つ一つのケースを各プロセッサに割り当てて計算を進める方式を利用すれば，並列度ほぼ100%の効率で結果が得られる．

物理現象理解のためのシミュレーションでは，単一格子系を利用した差分法や有限体積法のプログラムに関する限りは一般の並列化手法を用いることにそれほど難しさはない．工夫をすれば，かなりの性能が期待できる．

たとえば，2.でふれたベンチマーク[2]に利用されたプログラムLANS 3 DUPの最新版を利用して最近行ったベクトル並列型のスーパコンピュータVPP 500における評価では，7プロセッサで約4 GFLOPSという数字が得られている．1プロセッサでの実性能は0.63 GFLOPS程度であるから，メモリ分散型の計算機としては並列化率はきわめて高い．うまくいけば，本質的なプログラムの書き換えをほとんどせずにこの程度の並列化効率を得ることができる．しかし，いいことばかりではない．

たとえば，非構造格子の利用はランダムなデータアクセスを必要とするが，分散型のメモリの計算機では合理的にデータを分散するのはたやすくない．他のプロセッサ上のメモリへのアクセススピードが自分の所のメモリアクセスに比べてそれほど遅くなければ，問題は生じないが，現実にはそうはいかない．さらに格子数がシミュレーションの最中に増えたり，減ったりすることに対処するのは容易ではないと予想される．

領域分割の場合はどうであろう．領域分割のプログラムを並列化する方法は二つ考えられる．一つは単に演算部分を並列化して領域分割のデータであることを意識しない方法が考えられる．一見，この方法は簡単に利用できるように思えるが，実際やろうとしてみると，各領域のデータ量が異なるため，うまくデータのメモリ分散を行うことが難しいなど多くの障害がある．

他の並列化法は各領域の計算をプロセッサに分割することである．この場合は各プロセッサの負担をいかに平等にするかが問題となる．残念ながら，各領域の大きさは大概の場合まちまちで，これも簡単にはいかない．できる限り格子数の大きさなどをそろえることができれば良いのであるが，現状ではある程度の待ち時間を覚悟して各領域の演算をプロセッサに割り当てている．各領域ごとに個数の違うプロセッサを割り当てることができれば，すなわち，heterogeneousに計算機が利用できれば，合理的な処理ができるかもしれない．

4. 将来への期待

期待される将来像は，いうまでもなく，いくらでも速く，大きなメモリをもった計算機である．スーパコンピュータも次第に並列化の方向に向かっている．それもTCMP(Tightly Coupled Multi-Processor)タイプのものから分散メモリ型のものに移行しつつあるといえる．航空宇宙の分野では，実際には開発タイプの計算と現象理解のタイプの計算が混在していることが多い．したがって，単一のプロセッサでも，ある程度のメモリ容量を維持でき，それなりの性能が期待できるものが都合が良い．このようなアーキテクチャをもつスーパコンピュータでは上述のごとく，プロセッサ間の通信のスピード向上が一つのキーになるであろ

う．世の中の動向は確かに超並列の計算機に向かっているが，使いこなせない並列計算機ならば，メモリ分散のないTCMPタイプの既存のスーパコンピュータのほうがずっと利用価値は高い．

並列化，またはメモリ分散を行う作業の合理化も鍵であろう．これだけさまざまな要素が絡んでくると，コンパイラだけにすべてを押しつけるのは不可能といえる．かといって並列化のための努力は，最小限に抑えたい．こう考えると結局利用者が関与するしかないが，その作業を合理的に行いうる「並列プログラム開発支援システム」が鍵となる．たとえば，ある配列内のどの添字のデータにはプログラム中どこでどのような頻度でアクセスが起こっているか，アクセスの順番はどうなっているか，処理時間はどうかなどを分かりやすく教えてくれることがプログラム修正の大きな助けとなる．当然，このようなシステムは実際にプログラムを稼働しながら利用するもので，グラフィクスを利用した表示が不可欠になるであろう．

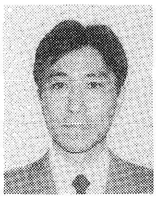
5. おわりに

航空宇宙分野におけるスーパコンピューティングについて述べてきた．できる限り公平な目で現状と将来を考えたつもりであるが，私的な意見もあるかもしれない．これについてはお許しいただきたい．また，もっと長期的なことも書いてみたかったがスペースに限りがあり，それもできなかった．いまや，航空宇宙の分野はスーパコンピュータによる数値シミュレーションなくしては成立しない．宇宙輸送にともなう流体現象は地上で実験することが困難な場合も多く，実際に宇宙往還機HOPEの設計過程などでもさかんに数値シミュレーションが利用されている．現状を知っていただくだけでなく，今後のスーパコンピュータの進展にもこの記事が役だってくれれば幸いである．

参考文献

1) Chapman, D. R.: Lecture Notes in Physics 141, pp. 1-11, Springer-Verlag (1980).
2) Fujii, K. (Ed.): Notes on Numerical Fluid Mechanics, Vol. 37, pp. 77-103, Vieweg (1993).
3) Wada, Y., Ogawa, S., Kubota, H. and Akimoto, T.: Proc. 17 th ISTS Symposium, pp. 719-728, Tokyo (1990).
4) 黒田眞一，藤井孝藏：航空宇宙技術研究所特別資料 SP-19, pp. 81-86 (1992).
5) Kaiden, T. and Tamura, Y.: Proc. 5 th ISCFD Symposium, pp. 408-413, Sendai (1993).
6) 藤井孝藏：流体力学のための数値計算法，第3章，東大出版会 (1994).
7) Fursenko, A. A. et al.: Computational Fluid Dynamics Journal, Vol. 2, No. 1, pp. 1-36 (1993).
8) Rubbert, P.: Conference Textbook, Supercomputing Japan 91, pp. 25-40 (1991).

(平成6年3月15日受付)



藤井　孝藏

1951年生．1974年東京大学工学部航空学科卒業．1980年同大学院博士課程修了，工学博士．NASAエイムズ研究所NRC研究員，航空宇宙技術研究所主任研究官などを経て，現在，宇宙科学研究所宇宙輸送研究系助教授．主に数値シミュレーションによる圧縮性流れの解析とその可視化手法の開発に従事．著書「流体力学のための数値計算法」(東大出版会)，「Supercomputers and Their Performance in CFD (Ed. Vieweg)」など．Notes on Numerical Fluid Mechanics 誌編集委員，航空宇宙学会，日本機械学会，流体力学会，可視化情報学会，AIAA (アメリカ航空宇宙学会) 各会員．