

## 計算科学技術の将来

小池 秀耀\*<sup>1</sup>

### Future Computational Science and Engineering

by

Hideaki Koike \*<sup>1</sup>

#### ABSTRACT

Due to the radical strides of computers and networks, Computational Science and Engineering (CSE) such as CFD have been in progress of technical innovation. By this progress, application of CSE for practical subject has made great expansion to its possibility. Following the change, application software has become enlarged and complicated, and development of application software has become more difficult. Although Computational Science and Engineering is on a rapid progress, it is highly required to surmount following technical themes for the present, in order to come off the technical innovation making the best use of hardware improvement and storage of information technology. Establishment of ①parallel processing technique for tasks, ②technology integrating plural software on network and constructing software solving more complicated large-scaled problems, and ③simulation technique of multi-scale and multi-physics. Technical problems that Computational Science and Engineering is come up against are "Integration" in short. Above technical themes are the present themes necessary to materialize the "Integration". Technical innovation of Computational Science and Engineering is about to change the concept of currently used computer system centered toward "PSE: Problem-Solving Environments" providing all the hardware and software needed for the solution of subjected problems.

#### 1. はじめに

最初の汎用電子計算機 ENIAC が誕生してから、約半世紀が過ぎた。この間の情報技術の発展は目覚しく、社会生活全般を大きく変えつつある。科学技術分野においても、情報技術の応用が必要不可欠となっており、計算科学技術という新しい分野が発展している。計算科学技術はここ数十年の間に確立した学問であるが、すでに、新たな科学技術研究の手法として、不動の地位を確立している。現在、その計算科学技術が、ENIACの誕生に匹敵する技術革新の時代に入っている。本稿では技術革新の最中にある計算科学技術の現状について述べるとともに、計算科学技術の将来について考察する。

#### 2. 計算科学技術の構成要素

計算科学技術は情報技術と科学技術の各分野との融合領域である。一口に計算科学技術というが、計算科学技術は大きく二つの要素に分けられる。すなわち、数値実験と数値実験を行うためのソフトウェア・ハードウェアの開発に分けられる。前者は応用分野に近い領域にあり、後者は情報科学技術に近い領域にある。もちろん、数値実験とソフトウェアの開発は不可分の関係にあり、研究では同一の研究者が両方を行っている場合も多い。しかしながら、計算科学技術が発展し、研究対象が複雑で大規模なものとなるにしたがって、数値実験とソフトウェア開発は連携しつつも独立の学問となりつつある。本稿では主としてソフトウェアとハードウェアについて論じる。

#### 3. 計算科学技術の進歩

ENIACの誕生とともに生まれた計算科学技術は、この半世紀で実験、理論と並ぶ科学技術に成長し、さらに速度を速め発展しつつある。計算科学技術の将来を考察する為には、この半世紀の計算科学技術の発展を俯瞰する必要がある。計算科学技術は、その目覚ましい成長とともに、技術

領域、対象領域を急速に拡大している。計算科学技術の各構成要素毎に、この間の進歩を振り返ってみる。

#### 3. 1 コンピュータ

表1に ENIAC 以来のコンピュータの性能向上の推移を示す。この表を見るとわかるように、コンピュータのピーク計算速度は約1000億倍に、記憶容量は約100億倍に向上している。最近では、計算速度は5年間で10倍以上の速度で向上している。このようなコンピュータの発達はLSIの性能向上と並列コンピュータの実用化によるものである。LSIは今後も従来のトレンドで性能向上を続けるものと予想され、コンピュータのピーク性能は今後も5年間で10倍以上向上するものと予想される。記憶容量も同様の速度で向上するものと考えられる。

表1 コンピュータの発達

コンピュータ	年	演算速度 (MFLOPS)	記憶容量
ENIAC	1946	$3.3 \times 10^{-4}$	20W
CDC6600	1964	1.0	32kW
CDC7600	1968	4.0	65kW
CRAY-1	1976	160.0	8MB
VPP800	1998	$1.0 \times 10^6$	$2 \times 10^6$ MB
SX-5	1998	$1.0 \times 10^6$	$1 \times 10^6$ MB
SR8000	1998	$1.0 \times 10^6$	$1 \times 10^6$ MB
地球シミュレータ	2001	$40.0 \times 10^6$	$1 \times 10^6$ MB

表2 アルゴリズムの進歩<sup>(1)</sup>

年代	計算時間	必要メモリー
1945~55	3000年	800MW
1955~65	200年	5MW
1965~95 (直接解法)	5時間	50MW
1965~95(逐次近似)	1時間	300KW

\* 1 (株) 富士総合研究所 計算科学技術研究センター  
Fuji Research Institute Corporation

注1) 100 MFLOPSの計算機を使用した仮定  
注2) エンジン・ブロック内の温度分布の計算が対象

3. 2 アルゴリズム

アルゴリズムの進歩は、応用分野ごとに状況が異なることもあり、定量的に評価することを難しい。エンジン・ブロック内の温度分布を対象として、アルゴリズムの進歩を評価した研究がある<sup>(1)</sup>。その結果を表2に示す。計算時間や必要とするメモリーが劇的に減少していることがわかる。

3. 3 ネットワーク

計算科学技術の領域でネットワークが本格的に普及したのは1990年代に入ってからであるが、この10年間で目覚ましい発展を遂げている。データ転送速度は基幹ネットワークに関しては1ギガビット/秒が標準になりつつあり、コンピュータはネットワークの一構成要素となりつつある。21世紀の計算科学技術はネットワークによる本格的な分散処理の時代となるものと考えられる。例えば、米国のNSFは1998年に従来の計算資源の提供を目的としたスーパーコンピュータ・センターを廃止し、新たにPACI (Partnerships for Advanced Computational Infrastructure Program) センターを設置した。二つあるPACIセンターの一つであるNCSA (National Computational Science Alliance)<sup>(2)</sup>では、高性能コンピュータ、先端的可視化環境、遠隔装置、大規模データベースを高速ネットワークで結ぶGRID (The Alliance's National Technology Grid)と名づけた、問題解決のための最強の環境を構築することを目指している。彼らは加速度的に増大するコンピュータ資源への要求に対して、高速コンピュータを開発し続けていくことは困難であり、コンピュータ・グリッドを構築し、必要に応じてメタコンピュータに組み立てる方が良いと考えている。

3. 4 ソフトウェア

コンピュータやネットワークの発達に伴い、計算科学技術の対象も飛躍的に拡大するとともに、問題も急速に大規模化・複雑化している。これに伴い、ソフトウェアも複雑化・大規模化している。表3に科学技術計算用大型ソフトウェアの変化を示すが、現在の最大規模のソフトウェアは数百万ステップに達している。人類が到達した最も複雑なシステムとなっている。

3. 5 計算流体力学

計算科学技術の発展の具体例として、米国のロスアラモス国立研究所における計算流体力学を例に取り検討する。図1にロスアラモス国立研究所における計算流体力学の歴史を示す<sup>(3)</sup>。この図から、計算流体力学の発展の様子がわかる。表4に計算流体力学研究グループT-3における現在の研究テーマを示す<sup>(3)</sup>。T-3では計算流体力学の現状と将来について次のように考えている<sup>(3)</sup>。①現在は、一つの手法で全ての問題を解くことはできない。②分散処理は、将来、最大のコンピュータ資源となるであろう。③コンピュータの機種に依存しないコードを開発するという課題は、現在、ほとんど達成されている。新しいコードは一部C++を用いているのを除くと、すべてFORTRAN 90で書かれている。

T-3の現在の研究テーマの数値計算上の目標は、①計算効率、精度、頑強性の向上、②マルチスケール現象の取り扱い、③非線型方程式の取り扱い、④境界条件の改良、⑤追加する物理モデルの実装である<sup>(3)</sup>。将来の研究課題として①支配方程式の特性に基づいた処理、②統計的計算流体力学、③データマイニング、④計算コード・ライブラリーの開発を挙げている<sup>(3)</sup>。

表3 計算科学技術の大型ソフトウェアの複雑化

項目	1985		1995
	第1期	第2期	第3期
アーキテクチャ	芸術的ソフトウェア	構造化設計	オブジェクト指向
規模 (ステップ)	~10万	~50万	数百万
ハードウェア	逐次処理	ベクトル処理	並列処理
コンピュータの例	CDC7600	CRAY-1	SX-4
CFDソフトウェア例	NASTRAN	α-FLOW	?
オペレーティング・システム	バッチ処理	クライアント・サーバ	協調・分散・並列
開発費 (オーダー)	~1億円	~10億円	~100億円

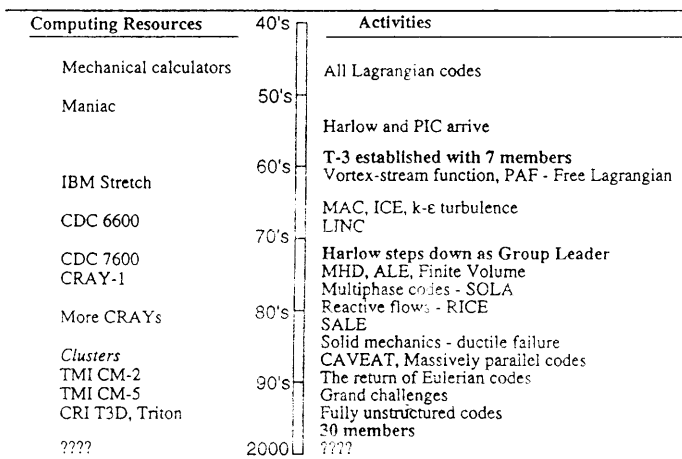


図1 ロスアラモス研究所におけるCFD研究の歴史<sup>(3)</sup>

表4 ロスアラモス研究所のT-3グループの研究テーマ<sup>(3)</sup>

<b>Reactive Flow and Combustion</b> • Automotive flows KIVA-3, KIVA-F90, KIVA-AC, NO-UTOPIA, Hydrogen-fueled powerplants • Wildfire code for Crisis Management	<b>Turbulence</b> • Spectral modeling • Direct numerical simulations • Engineering models
<b>Multiphase/Multimaterial/Multifield</b> • Reactive-multiphase flow (CFDLIB) • High distortion flows (PAGOSA) • Casting (TELLURIDE)	<b>Material modeling</b> • High strain-rate plasticity • Ductile and brittle failure • Composites
<b>Particle methods</b> • MHD (FLIP) • Granular flow modeling	<b>Miscellaneous</b> • CO <sub>2</sub> elimination • Underground tunnel location • and others
<b>Global modeling - Parallel computing</b> • Ocean flow modeling (POP) • Ocean ice modeling (CICE) • Coupled Ocean-Atmosphere modeling • Mantle dynamics	<b>Comments</b> • Mostly in collaboration • Funding from Industry partnerships DOE thrust areas Internal research support

4. 技術革新の時代

計算科学技術は技術革新の時代にあるが、この技術革新の最大のポイントは、コンピュータ、ネットワークの発達及びこの50年間のソフトウェア、情報技術、データの蓄積等により、従来は不可能であった複雑で大規模な問題を解析することが可能となったことである。具体的には、分散メモリー型並列コンピュータの実用化により、計算速度の飛躍的向上が可能となるとともに、メモリーやディスク容量も飛躍的に増大した。また、インターネット上に蓄積された知識(データ、ソフトウェアを含む)は、ここ5年間で驚異的に増大しており、だれもが容易にアクセスできるようになった。

しかしながら、この技術革新を推進する上で、新たな技術的課題が発生している。ソフトウェアがハードウェアの進歩とデータやソフトウェアの蓄積についていけないという問題である。たとえば、タスク並列を含めた並列処理技術は全く未成熟で、ハードウェアの進歩に利用技術が追いついていないという現象が生じている。また、ネットワーク上に分散する膨大な知識から必要とする知識をいかにして抽出するかが大きな問題となっている。さらに、大規模・複雑化したソフトウェアの開発はますます困難になっており、危機的状況に陥りつつある。表5に E.Yourdon がまとめたソフトウェア開発の難易度<sup>(4)</sup>を示すが、最近の計算科学技術用の先端的ソフトウェアは大規模・複雑化し、現在の技術レベルでは限界に近い規模と複雑さになっている。図2は米国の大規模ソフトウェアの開発における、計画からの開発の遅れを示したものである。大規模開発になると計画の2倍の開発期間がかかっている。図3は開発プロジェクトの中止率を示したものであるが、大規模開発では半数が中止に追い込まれている。計算科学技術は飛躍的發展期にあるが、ハードウェアの進歩や情報技術の蓄積を生かし、技術革新を実現する為には、ハードウェアを使いこなす技術、すなわちソフトウェアの面で大きなブレークスルーを必要としている。F.P. Preparata は、並列計算について次のように述べている<sup>(5)</sup>。「技術としても並列計算の現実には満足するものに程遠く、システム科学が対応する物理的現実よりも遅れているという、科学技術の歴史の中でも珍しい例となってしまっている。しかし、私は、並列計算は不可避であり、やがて中心的な役割を果たすようになる」と言いたい。並列性に頼るほかに手だてがない、社会的に重要な応用がある為である」。この言葉は、並列計算を大規模ソフトウェア開発やデータマイニングあるいは分散協調処理に置き換えても、そのまま成立する。

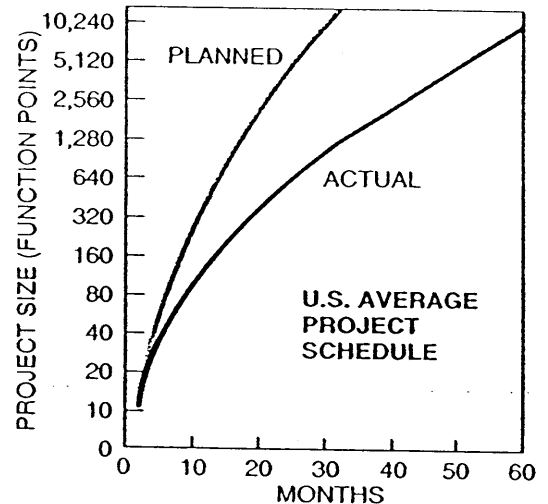
5. 計算科学技術が直面する課題

現在、計算科学技術が直面している技術的課題は一言で言えば「統合化」である。この50年間で計算科学技術は、流体解析、構造解析等の、保存方程式（質量、運動量、エネルギー）、あるいは、運動方程式の解析に必要な数値解法、コンピュータ技術をはほぼ確立した。これらの解析に用いられるソフトウェア、データ、あるいはアルゴリズム等の知識の集積は莫大である。しかしながら、構成方程式に代表される物理・化学現象は実験式などで与えざるを得なかった。見方を変えれば、これまでの計算科学技術の主要な成果は、運動方程式、保存方程式の解法を確立したにすぎないとも言える。

これからの計算科学技術が挑戦すべき課題は、過去の

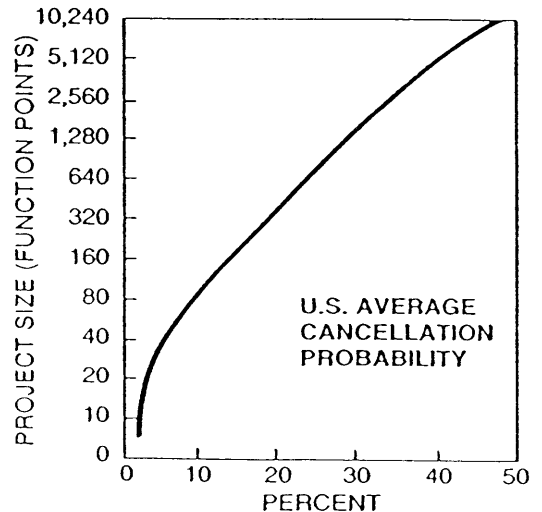
表5 ソフトウェア開発の難易度<sup>(4)</sup>

ソフトウェアの規模	難易度	開発人数	開発期間
1千行以下	非常に簡単	1	数週間
1万行まで	簡単	2, 3	半年
10万行まで	やや難しい	6~10	2, 3年
1百万行まで	難しい	50~100	3~5年
1千万行まで	不可能に近い	経験者はほとんどいない	
1千万行以上	非常識	Star Wars 計画	



SOURCE: Software Productivity Research

図2 大規模ソフトウェア開発における計画とのずれ<sup>(6)</sup>



SOURCE: Software Productivity Research

図3 大規模ソフトウェア開発における中止率<sup>(6)</sup>

蓄積をベースに、より複雑な自然現象全体を解析すること、すなわち「統合化」であろう。ハードウェアは並列コンピュータの実用化、ネットワークの発達、大容量記憶装置の出現により、複雑な自然現象全体を解析する為に必要な条件を満たしつつある。統合化を実現する為には、数値解法の面では多原理統合型シミュレーション技術などが必要となり、情報技術的にはタスク並列処理、ネットワーク上での分散協調処理などが必要となる。なによりも重要なことは、50年間に渡って蓄積されてきたリソースを、複雑で大規模な問題を解決する為に、ネットワークや並列コンピュータ上で統合化する技術の確立である。並列コンピュータやネットワークの発達も「統合化」のためのプラットフォームの構築という観点で位置づける必要がある。まとめると、統合化を実現する為に、当面、次のような技術的課題を克服する必要に迫られている。

- ◆タスク並列処理技術の確立
- ◆ネットワーク上で複数のソフトウェアを統合化し、より複雑で大規模な問題を解決するソフトウェアを構築する技術の確立
- ◆マルチスケール、マルチフィジックスといった多原理統合型シミュレーション技術の確立

6. 計算科学技術の将来

6. 1 コンピュータ

半導体技術の進歩に支えられた、ハードウェアの発達は疑いないところである。J.R.Riceは2015年におけるハードウェアの性能を現状の1000から5000倍と予測している<sup>(1)</sup>。コンピュータのピーク性能に関しては、5年で10倍が現在のトレンドであるから、この予測は妥当であろう。並列コンピュータの実用化、およびLSIのロードマップを考慮すると、現在のピーク性能向上のトレンドが大幅に鈍るとは考えられない。実用上は計算速度と同時に記憶容量が重要である。文献(7)によればNギガフロップスの計算には、対象にも依存するが、だいたいNの3/4乗ギガバイトのメモリーが必要である。LSIのロードマップと分散メモリー型コンピュータが主流になることを考えると記憶容量は隘路にはならない。ただし、ペタフロップスの計算速度を実現する為には~100万プロセッサは必要と言われており<sup>(7)</sup>、ソフトウェア面で重大な困難が待ち構えている。

6. 2 アルゴリズム

アルゴリズムの進歩による計算効率の向上を定量的に評価することは難しいが、J.R.Riceは、2015年におけるアルゴリズムによる計算速度の向上を現状の1000倍から10000倍と予測している<sup>(1)</sup>。並列計算技術の進歩を考慮すると、この予測は妥当と考えられる。計算速度の向上も重要であるが、より重要な技術革新はタスク並列処理と多原理統合型シミュレーション技術である。この両者は密接に関連している。これらの技術が重要な理由は自然の本質が階層的でかつ並列であるからである。表6に例として燃焼問題における階層性を示す。空間スケール、時間スケールともに $10^6$ の差がある。このような問題を解く為には多原理統合型(マルチスケール、マルチフィジックス)シミュレーション技術の確立が必要となる。また、自然現象は瞬間的には、空間的に離れた部分は並列に現象が進行し、かつ、これらの現象が複雑に相互作用している。この様子(自然の階層性と並列性)をソフトウェア・システムとして表現すると図4のようになる。将来のアルゴリズム研究の最大の課題はアナリシスからシンセシスに移りつつある。

6. 3 ネットワーク

ネットワークの進歩は目覚ましいものがあり、今後も加速度的に進歩していくものと思われる。典型的な将来計画は米国の次世代インターネット(NGI)計画である。NGIでは2002年までにネットワークの通信速度を現状の1000倍(End-to-Endで1ギガビット/秒)を目指してい

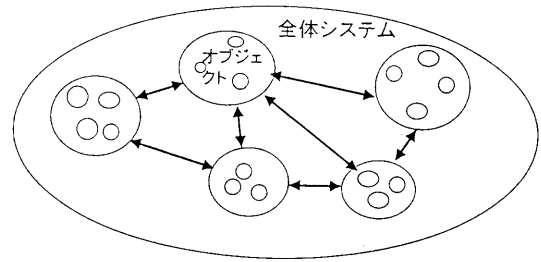


図4 自然界の階層性と並列性のモデリング

る。ネットワークを活用した新しい技術(データマイニング、分散オブジェクト技術、ネットワークによる知識の統合化など)が急速に発展しつつある。また、高性能コンピュータを開発する代りに、ネットワークで結合されたコンピュータ網(GRID)を用いて、必要なメタコンピュータを必要に応じて構築しようという研究も行われている。ネットワークの進歩は急速であり、10年後を定量的に予測することは困難である。

6. 4 ソフトウェア開発

前述したように、コンピュータとネットワークの驚異的な発達と情報科学技術の蓄積により、計算科学技術の適用範囲は飛躍的に拡大している。これに伴いソフトウェア・システムは従来のものと、あらゆる面で、大きく変わろうとしている。例えば、一般のユーザーがコンピュータを利用することを飛躍的に容易にする研究が集中的に行われている。具体的には情報エージェント、知識倉庫、バーチャルリアリティなどの研究が行われている。しかしながら、ソフトウェアに関する最も重要な課題は、大規模ソフトウェアを効率的に開発する技術である。なぜなら、将来の計算科学技術の発展にとって最大の障害はソフトウェアの開発の困難さにあるからである。

従来、ソフトウェアの生産性はほとんど上がっておらず、ライブラリーや再利用はあまり効果が無い<sup>(1)</sup>。この原因は科学技術分野の応用ソフトウェアが完成するには使用経験の蓄積が必要だからである。計算科学技術用ソフトウェアの生産効率を上げる新しい方法としてPSE: (Problem-Solving Environments)が提案されている<sup>(8)</sup>。PSEの定義は、対象とする問題群を解くために必要な全ての計算環境を提供するコンピュータ・システムというものである。PSEに関する具体的な研究開発課題は以下のとおりである。

- ◆PSEの開発
- ◆マルチレベルの抽象化と複雑な特性の開拓
- ◆レガシー・ソフトウェアの再利用
- ◆コンポーネントとコンビネーションのためのテスト・ベッドの構築
- ◆重要なコンポーネントの開発  
形状モデリング、可視化、シンボリック数学、データベース、最適化など
- ◆ソルバーと問題のための知識ベースの構築
- ◆マルチスケール、マルチフィジックスの応用問題に関する統合化

PSEを構築することにより、プログラミングの生産性は2~3オーダー向上すると予測されている<sup>(8)</sup>。

6. 5 まとめ

これまで述べたハードウェア、アルゴリズム、ソフトウェアの発展を累積すると、20年後には現在のProblem-

表6 燃焼問題における階層構造

階層	マイクロ	メゾ	マクロ
空間スケール	$< 10^{-6}$	$\sim 10^{-3}$	$> 1$
時間スケール	$< 10^{-3}$	$\sim 10^{-1}$	$> 1000$
現象	化学反応	乱流変動	NS平均流
解析手法	分子軌道法 確率論的手法 分子動力学	確率論的手法 連続体力学	連続体力学

Solving Powerは1000万倍増強されると予想される。過去20年間のProblem-Solving Powerの向上は100万倍程度と推定される<sup>(1)</sup>。計算科学技術は従来以上の速度で発展するものと予想される。

7. 計算科学技術の新たな潮流

計算科学技術の技術革新は、ハードウェアを中心とした従来のコンピュータ・システム概念も大きく変えつつある。将来のコンピュータ・システムは、対象とする問題解決のために必要な、全てのハードウェア、ソフトウェアを提供する「問題解決のための計算環境」(PSE)へ向かっている。特に、これからの高性能のコンピュータ・システムは複雑で大規模な問題を解決する為のPSEでなければならない。米国のASCIプロジェクトにおいてもPSEの構築が主要課題の一つとして位置づけられている。計算科学技術の将来を先取りした、これらの新しい潮流について述べる。

7.1 ASCI (Advanced Strategic Computing Initiative)

ASCI計画は米国が進めているプロジェクトで、核実験を数値シミュレーションで代替することを目標としている。この目標を達成するためには、高性能コンピュータの開発とともに、ソフトウェアの開発においても重要な技術革新が必要とされている。具体的には、

- ◆フルスケールの統合ソフトウェア・システムの開発
- ◆サブグリッド領域の物理モデルの開発
- ◆原子核—原子—固体までのマルチスケールの物質シミュレーション

が必要である。プロジェクトの予算は年2億ドルから3.5億ドルである。2004年までに100テラフロップスの高性能コンピュータを開発する。ASCIでは、核実験の数値シミュレーションに必要な、高性能コンピュータ以外の研究も総合的に実施している。図5にASCIの研究サブテーマを示す。ASCIにおけるPSEの定義は、基盤技術として狭い意味で使用されている。高性能コンピュータの開発以外に以下のようなサブプロジェクトを実施している。

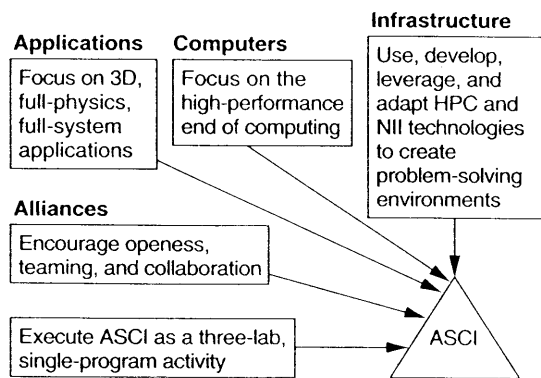


図5 ASCI計画の研究要素

(1) ASCI PSE (Problem-Solving Environments)

目標は、高性能コンピュータ、アプリケーション・ソフトウェア、情報に机上からアクセスできるようにすることである。このため、次のような研究開発を行っている。

- ・問題解決のためのリソースを統合する。
- ・超並列コンピュータ用のシミュレーション・コードの開発をサポート

・科学者がシミュレーションを行う環境を構築する  
 主要な研究項目は以下のとおりである。

- ・PSEの構築
- ・シミュレーション開発環境
- ・可視化
- ・データの転送とストレージ
- ・分散コンピューティング環境
- ・ハイパフォーマンス・コンピューティング支援
- ・データの探索と管理

(2) ASCIシミュレーション開発環境 (ASDE)

目標は、共通基礎環境CBE (Common Basic Environment)をACSIプラットフォームの一部として構築し、将来のテラスケール・プラットフォームで使用できる環境に拡張することである。具体的には、応用ソフトの開発を加速すること、コードの信頼性をあげること、並列計算効率をあげることを目標としている。

(3) ASCI分散コンピューティング環境 (DCE)

多数のコンピュータを単一システムのように動かす環境を構築することを目的としている。分散オブジェクト技術を基盤技術として採用している。UNIX, WINDOW Sの上で、マルチベンダー、マルチ・プラットフォーム・ソフトウェアを走らせることや、セキュリティの確保を研究している。

(4) ASCI可視化

ASCIアプリケーションに必要な可視化機能の開発する。100テラフロップス対応の可視化機能の開発が課題である。

(5) ASCIハイパフォーマンス・コンピューティング支援

プラットフォームとアプリケーションの間のインフラを構築することが目標である。ハイエンド・アプリケーションの実行とテラスケールデータ管理を支援する技術の研究開発を行う。例えば、大量データの保管、データ管理、高速相互結合、スケーラブルI/O、分散リソース管理、プラットフォームとサービスの統合などが研究テーマである。

以上のようにASCIプロジェクトでは核実験の数値シミュレーションという目的を達成するために必要な開発に総合的に取り組んでいることがわかる。今後の計算科学技術の大規模プロジェクトは、単なる高性能コンピュータの開発といったものではなく、ASCIのように問題解決のための統合環境の構築を目指す方向にある。

7.2 仮想ロケット工学<sup>(9)</sup>

次に、統合コンピュータ環境構築プロジェクト例として、固体燃料ロケットの全システム・シミュレーション・プロジェクトについて紹介する。このプロジェクトはイリノイ大学のCSAR (Center for Simulation of Advanced Rockets)が実施しているプロジェクトである。図6に示す固体ロケットのフルスケール・シミュレーションが目的である。このため、図7に示すような統合シミュレータの開発を行っている。多原理統合型(マルチスケール、マルチフィジックス)シミュレーション技術の確立が必要であるとともに、複雑で大規模なソフトウェアを開発する必要がある。

8. まとめ

計算科学技術の誕生以来、半世紀が過ぎたが、計算科学技術は新たな飛躍の時代を迎えている。この飛躍を実現するには、主としてソフトウェアの面で本質的な技術革新が必要とされている。この技術革新に挑戦する多くのプロジ

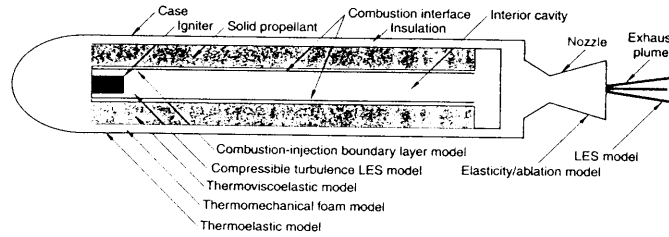


図6 固体ロケットの概念図 (9)

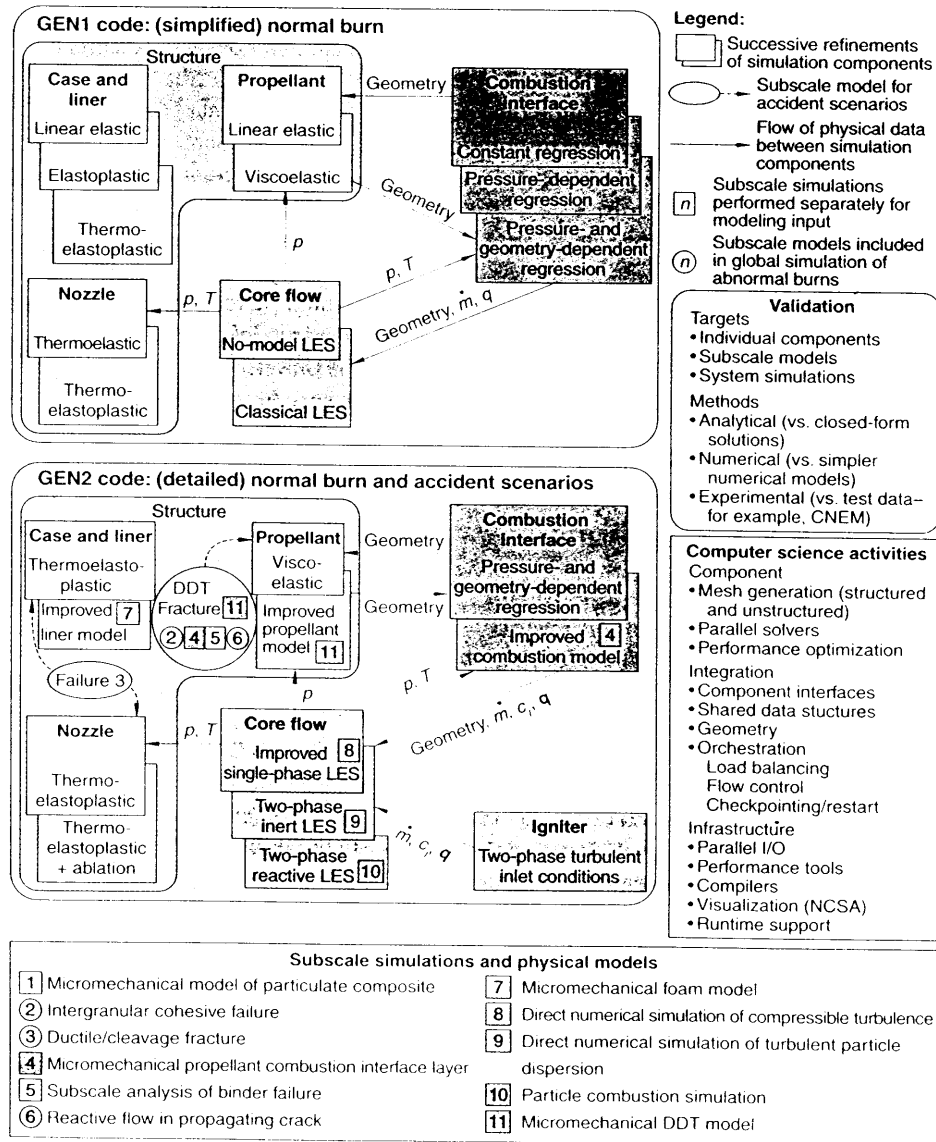


図7 仮想ロケット工学のシミュレーション開発ロードマップ (9)

エクトが開始されている。米国のASCIプロジェクトが代表的なプロジェクトである。計算科学技術は、従来の各要素の研究開発から、問題を解決するために必要なコンピュータ環境全体 (PSE) の研究開発へとシフトしている。このような研究努力により、技術革新は着実に進行しつつある。計算科学技術の来るべき20年は、過去の20年を上回る飛躍を実現するものと思われる。

参考文献

(1) R. Rice: Future Scientific Software Systems, IEEE Computational Science & Eng. (1997).  
 (2) NSTC CCIC: Technologies for the 21 Century

Supplement to the President's FY 1998 Budget, (1997).

(3) N.L. Johnson: 1996 Canadian CFD Conference, Ottawa, Canada, June 3-4 (1996).  
 (4) E. ヨードン: CASE時代の最新プロジェクト管理技術、マグロウヒル (1988).  
 (5) 上林弥彦他 編: 超並列計算講義、共立出版 (1996).  
 (6) W.W. Gibbs: Scientific American, Sept. (1994) p86.  
 (7) T. Sterling et al.: ベタフロップス コンピュータ、筑波出版会 (1997).  
 (8) E. Houstis et al.: IEEE Computational Science & Eng. (1997).  
 (9) M.T. Heath and W.A. Dic: IEEE Computational Science & Eng. (1997)