

## 特集②

米国政府の高性能  
コンピューティングへの取り組み

情報通信ユニット 野村 稔

## 1. はじめに

現在、米国政府における情報通信技術の研究開発は、国家科学技術会議 (NSTC) が策定したネットワーキング及び情報技術研究開発 (Networking and Information Technology Research and Development: NITRD) プログラムに基づいている。NITRDには12の政府機関が参加し、7つの個別研究分野がある。高性能コンピューティング (High-End Computing: 以下 HEC と略記する) に関する個別研究分野としては、「HEC のインフラストラクチャおよびアプリケーション (HEC I&A)」と「HEC の研究開発 (HEC R&D)」がある<sup>1, 2)</sup>。

2003年3月には NSTC の下に NITRD の特別プロジェクトとして HEC Revitalization Task Force (タスクフォース) が編成された。共同議長 (Co-Chair) は、DoD/ODDR&E、DOE/Office of Science、

National Coordination Office、Office of Science and Technology Policy からのメンバーが務め、その他の参加機関は、DARPA、DoD/HPCMP、DoD/Missile Defense Agency、DOE/NNSA、EPA、NASA、NIST、NSA、NSF、OMB などが入っている。レポートに載っている名前は、総勢で約70名となっている。

このタスクフォースの使命は、今後の科学技術で米国がリーダーシップを維持するための強力な計画の策定である。タスクフォースは、2004年5月に、今後5～10年間に渡る、HEC 研究開発、HEC リソース、HEC システムの調達への対策を盛込んだ「米国政府の HEC 計画」(以下、HEC 計画と略記)を作成した<sup>3)</sup>。科学技術の発展、国家安全保障、国際競争力に HEC は必須である。しかし、米国政府のミッション遂行

に使われている HEC システムは、政府機関の計算ニーズを必ずしも満たしていないという問題意識がある。こうした問題意識の背景には、日本の最近の HEC への取り組みについての危機感があると考えられる。

HEC 計画の具体化の動きと推測される少なくとも3つの法案が2004年度の第108回米国議会で審議された。このうち、2004年エネルギー省高性能コンピューティング再生法(以下、再生法と略記する)が11月末に成立した。今、米国政府は HEC の研究開発と活用により、国力を上げる戦略を強力に進めている。

本稿の目的は、まず第2章において、「米国政府の HEC 計画」の概要を紹介することである。次に、その内容についての注目点を第3章で述べる。

2. 「米国政府の HEC 計画」<sup>4)</sup> の概要

以下、「米国政府の HEC 計画」を要約して示す。

タスクフォースは、HEC を活用して研究を進めているさまざまな専門分野の先端的科学者からの意見を徴集した。それによると各分野の目標達成には、今日の HEC リソースの100～1,000倍までの能力が必要と見積もられている。図表1は、各領域での「科学

的チャレンジ」と「現状の能力の100から1,000倍の能力で得られることが期待される成果」を示す。

## 2-1

HEC :  
科学技術でリーダーシップを  
とるための戦略的ツール(1) HEC 再生 (Revitalization)  
の背景

最近の政府機関による調査の結果、「現在の HEC リソース、アーキテクチャ、そしてソフトウェアツールと環境は、現状において必要とされるニーズを満たしていない。同時に、次世代の HEC システムの設計、開発のために必要な

図表1 科学、工学への HEC の便益

領域	応用	科学チャレンジ	現状の能力の100から1,000倍の能力で得られることが期待される成果
物理	宇宙物理	星間、超新星のような宇宙環境シミュレーション	宇宙における重粒子の起源につながる理解
	高エネルギー物理	強い核間相互作用の詳細な理解	量子色力学からクォークグルオンプラズマまでの遷移同定の実験の先導
	加速物理	粒子加速性能の正確なシミュレーション	将来の加速の設計、技術、コストを最適化、既存の加速器をより効果的、効率的に使用
	核物理	クォークグルオンプラズマのリアルなシミュレーション	核物質の新しい相の定量的理解を進展させて、重イオン衝突における実験的な発見を実現
ナノサイエンス	触媒科学 / ナノスケール科学技術	溶液中の均質・不均質触媒現象の解析	化学物質の製造過程におけるエネルギーコストと排気物の削減。自動車の排ガス中のNOx削減等
	ナノスケール科学技術	中程度の複雑さをもつナノスケール電子デバイスの挙動解析	電子デバイスの小型化を質的に新しいレベルで行い、高速計算機、ドラッグデリバリーシステム、民需・軍需用電子デバイスの開発に寄与
	ナノスケール科学技術	簡単なナノ構造材料の構造的、磁気的性質のシミュレートと予測	広く産業に影響を与える多様な応用に資する新しい先進的材料の発見・開発
航空	航空・宇宙機の飛行シミュレーション	作動中の飛行体、再利用ロケットの全シミュレーション	航空・宇宙機の開発時間の短縮、性能、安全性、信頼性の改善
	液体ロケットエンジンシミュレーション	上昇中のターボポンプ、燃焼装置を含む全宇宙船のシステムシミュレーション	軌道と地表間飛行のリスク評価、宇宙輸送システムの安全性と信頼性の改善
	運航システムシミュレーション	高精度な空域シミュレーション、ターミナルエリアに関する意思決定システムや管理ツールの開発	効果的な領空管理、ターミナルエリアの安全性の改善
ライフサイエンス	構造・システム生物学	酵素触媒、タンパク質の畳み込み、細胞膜でのイオン伝達のシミュレーション	特定の目的のための薬品の発見、設計、テストを可能とし、より効率的な水素、その他のエネルギーの貯蔵法の設計、製造
	情報伝達経路	細胞の信号伝達経路と崩壊の説明、予測のための原子レベルの計算モデルと複雑な生物分子のシミュレーション	分子レベルでの癌その他の疾病の発生源の理解、カーボンサイクルやグローバル変化のような自然の生物サイクルへの影響を与える微細組織中での変化の予測
国の安全	知的信号処理	未知のコード、暗号、複雑な通信システムをモデル化、シミュレーション、利用	国家安全、防衛、戦闘における重要情報により、米国の政策決定者、軍司令官、戦闘員を支援
	指向性エネルギー	指向性エネルギーの設計プロセスを科学の領域から工学的設計領域へ発展させる	次世代の攻撃・防衛指向性エネルギー兵器の効率的設計、設計プロセスの短縮化（数年から数日へ）
	信号、イメージ処理、自動標的認識	ステルス兵器の実際の電磁波放射実験をシミュレーションで行う	よりステルスな航空機、船、地上システムの開発、新しい敵兵器システムに、より早く適応可能な兵器創製のシステムの構築
	武器システムの総合的モデリングとテストシステム	複雑なシステムをリアルタイムでモデル化	多くの高価で危険が伴い時間のかかる実際の兵器システムのテストをシミュレーションで置き換え、兵器システムの迅速で安価な開発システムを実現する
地球と大気科学	気候科学	物理モデルの拡張：海洋渦、陸地モデル、雲、気象予測モデル	米国の政策決定者に対し、政策決定のための先導的科学的技術データを提供。気候変動メカニズムの理解を進め、気候変動予測の不確かさを減らす
	気象と短期気候予測	90日前に、ハリケーン、台風、冬の嵐の頻度と強さを予測する	局地、領域、広域の戦闘環境に関して、海軍、空軍、陸軍への重要な情報提供を行う
	固体地球科学	地震災害の統計的被害予測精度の向上（断層破壊の可能性、震度予測）	優先順位の戦略を提供、生命、財産の損失の軽減、災害軽減
	宇宙科学	太陽表面の爆発、星間物質を通しての発生事象からくるエネルギー、粒子の伝播、それらの地球磁場、イオン圏、熱圏との相互作用のシミュレーション	数時間から数日における正確な宇宙天気予報を、民間・軍の意思決定者へ提供
エネルギーと環境	地下の汚染科学	地表面下における、放射性、有機物質汚染の伝播、減衰のシミュレーション	土壌、地下水中の汚染物質の動きを予測し、汚染土壌、地下水の革新的汚染除去技術の開発に対して根拠を与える
	核融合	プラズマによる発熱と電磁場乱流による熱ロスのバランスを最適化する	将来的な国際的核融合研究協力への米国の意思決定の支援、商用炉の仕様決定において重要な、燃焼プラズマの総合的シミュレーション
	燃焼科学	燃焼流体における、燃焼と乱流の相互作用の理解	燃焼システムにおける燃焼メカニズム（例えば、エンジン・ノック）の解明、ディーゼルエンジンのスス発生問題の解決

アイデアやエキスパートの供給も削減されており、代替システムの調査研究も殆ど停止していた」ということが判った。

この結果が再生計画の必要性をもたらしたと記述されている。

**(2)目標**

- HEC の使用容易性と生産性を向上する (Make high-end computing easier and more productive to use)
- 新世代の HEC システム・技術に対する発展と革新を促進する (Foster the development and innovation of new generations of high-end computing)
- 政府の HEC を効率的に管理、調整する (Effectively manage and coordinate Federal high-end computing)
- 政府機関のミッション遂行に必要な HEC をいつでも利用可能にする (Make high-end computing readily available to Federal agencies that need it to fulfill their missions)

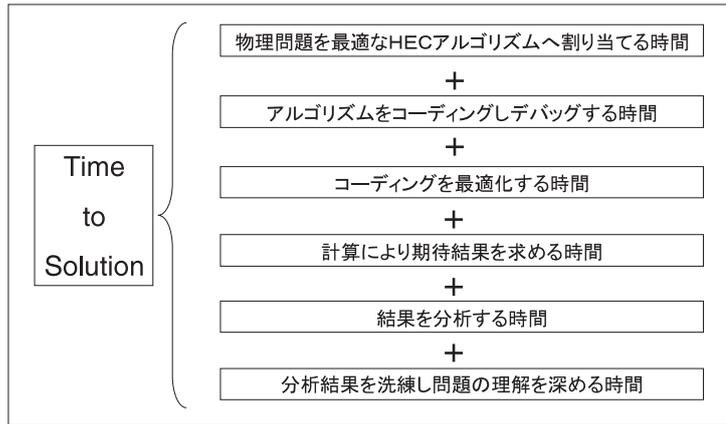
HEC の使用容易化と生産性の向上の中で、研究者にとっては、新規アイデアから結果が導き出されるまでの Time to Solution の短縮が最も重要であり、これを HEC システムの研究開発目標にすべきであると述べている。Time to Solution の要素を図表 2 に示す。全体の最短化には、計算だけではなく各フェーズにおける最短化の努力が必要であるとしている。

**(3)計画の範囲** (注1)

HEC 計画は、今後約 15 年以内に製造され得る HEC システムにとって必要となる全てのコア技術をロードマップとして示している。主要要素を以下に示す。

- ハードウェア、ソフトウェア、

図表 2 Time to Solution



資料<sup>4)</sup>を基に科学技術政策研究所で編集

システムにおけるコア技術の研究開発

- 科学、工学コミュニティにいつでも利用可能にする HEC の性能 (Capability)、供給能力 (Capacity) の向上、及びアクセス容易化の戦略
- ユーザ要求を満たす HEC システムの効率的な政府機関での調達戦略

NITRD プログラムの中で HEC 関連の年度予算は約 9 億ドルであり、その内で、HEC 計画に関連する活動は約 1.58 億ドル (2004 年度) である。再生化の活動が成功した場合には、HEC に関する全体で 26 億ドルの政府の長期的な活動へインパクトを与えるだろうと述べられている。

**2 - 2 研究開発**

研究開発に関しては、政府機関の計算性能へのニーズと商用システムの性能間の乖離の問題が示されている。HEC 市場は、Web を活用したコマース市場やビジネス用コンピューティング市場など

と比較すると、コンピュータ産業界が注意を向けるほど大きくはない。市場での売上対比で見ると、HEC の調達 (procurement) は年約 10 億ドルであるが、サーバー市場は年 500 億ドル以上である。このため、産業界がサーバー市場へ集中することになり、産業界で製品化される HEC システムは、サーバー市場で必要とされる小規模システムのために設計された非常に多くのプロセッサから構成されるものになっている。そうした膨大な量のプロセッサからなるマルチプロセッサシステムは、HEC 向けのプログラム開発が非常に難しく、重要なアプリケーションにおける高性能レベルの達成に問題があった。

近年、プロセッサの性能改善が継続しており、理論的なピーク性能は急峻に上昇している。しかし、マルチプロセッサシステムでは、プロセッサのスピードとメモリバンド幅の不均衡が増大しており、実運用環境での実効性能を抑えてしまう。プロセッサのスピードの伸びは年率約 40% であるのに対して、メモリのスピードは年率約 7% の改善である。

(注1) この計画書では、ビジュアライゼーション、ネットワークング、グリッドコンピューティング、セキュリティ、アプリケーションソフトウェア、小規模クラスター等については検討から除外されている。

実効性能の現状として、米国で投資が集中しているクラスタシステムは、全てのアプリケーションに適しているわけではなく、国家の優先度の高いアプリケーションでは別のアーキテクチャが適しているものがあることが述べられている。又、並列効率としては次のような記述もある。

現在の HEC は、各々が独立したオペレーティングシステムを持つ小規模のノードを数百接続したクラスタに集中しており、一般にはピーク性能の 10% 以下、そしてあるアプリケーションでは時々 1% 以下の並列効率になっている。原文を以下に示す。

「The current HEC focus on clustering hundreds of small nodes, each with a separate OS, results in poor parallel efficiency, generally below 10% and sometimes lower than 1% of peak on some applications.」

図表 3 は、主要な HEC センターで見られる理論的なピーク性能と実効的なシステム性能 (Sustained system performance : SSP) 間での乖離を示している。

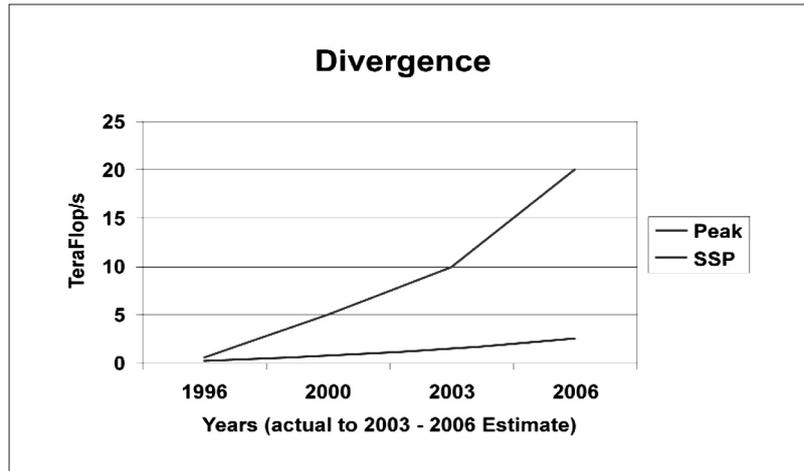
**(1) HEC 技術へのユーザ要求**

HEC の効果的な活用に向けた当面の主な挑戦として以下の項目が述べられている。

- 複雑なアプリケーションでの高い実効性能の達成
- 複雑なアプリケーションソフトウェアの開発とメンテナンス
- 入出力双方で劇的に増加するデータ量への対応
- 空間軸と時間軸の双方でマルチスケールへの対応、マルチディシプリナリ・シミュレーションへの対応

又、将来の HEC システムのために以下の目標が述べられている。

図表 3 性能間の乖離の問題



Peak : 理論的ピーク性能  
 SSP : Sustained system performance (実効的なシステム性能)

- 実効性能 (ピークではなく) で 100 倍の増加 (現在の多くの科学技術問題を解くために要求される性能レベル)
- 簡単に並列化されない問題に対しての超高速プロセッサと新アルゴリズムの開発
- 性能を決定付けるメモリとプロセッサ間通信でのバンド幅とレイテンシの改善
- 多様なアプリケーション要求に応えるアーキテクチャ

ソフトウェアツール、プログラミングモデル、及びオペレーティングシステムに関わるソフトウェアの不足も重視している。現行のものは、1,000 プロセッサまでは相応の性能を期待できるが、2010 年に目標とされている 100,000 プロセッサでは、実質的な改善がない限り、ほとんど性能が期待できないとしている。

**(2) HEC 研究開発の戦略**

HEC 計画では、今後のハードウェア、ソフトウェア、システムにおけるユーザ要件への対応として、キー技術の①ロードマップ、②研究・評価システム、そして③ HEC 研究開発投資の優先度が示されている。以下では、それぞれ順を追って概要を述べる。

①ロードマップ

ロードマップはハードウェア、ソフトウェア及びシステムから成る。またアプリケーションからのトップダウンの要求と、技術の進化からのボトムアップの要求を基に決められ、定期的な更新が必要であることが言及されている。このロードマップの特徴は、今後 10 年に渡る 2 つのシナリオが記述されていることである。

まず、「現在のプログラム」は、2004 年度からの新たなリソース割付が無いと仮定した場合の今後のシナリオを示している。

また、「ロバスト (強力) な研究開発計画」は、新 HEC システムへの計画、実行、システム配備などがタイムリーに行われた場合を想定した今後のシナリオを示している。

詳細を図表 4 から 8 に示す。

【ハードウェアロードマップ】

以下では、「現在のプログラム」と「ロバストな研究開発計画」を対比して示す。

「現在のプログラム」では、更なる研究努力がない場合には、次 5 年以降の改善はほとんど無いであろう。その期間の改善は、産業界主導の COTS (Commercial-Off-

The-Shelf：汎用量販品）技術の進展と既存又は過去の研究投資の結果に主に依存するだろう。又、技術のブレークスルーがない限り2015年ごろムーアの法則が終焉するだろう。

「ロバストな研究開発計画」は、それに対する推進策を示している。

【ソフトウェアロードマップ】

以下では、「現在のプログラム」と「ロバストな研究開発計画」を対比して示す。

「現在のプログラム」シナリオは、新アーキテクチャを次の5年にリリースするDARPA (Defense Advanced Research Projects Agency) のHPCS (High Productivity Computing Systems) プログラムによる進展に依存する。DARPAのプログラムは、2010年に終了するため、「現在の

プログラム」による将来の改善は、主にそれらのアーキテクチャに基づくことになるだろう。「ロバストな研究開発計画」は、それに対する推進策を示している。

【システムロードマップ】

以下では、「現在のプログラム」と「ロバストな研究開発計画」を対比して示す。

「現在のプログラム」シナリオは、既存の研究活動（HPCSを含む）に依存し、次の5年以降は進展が難しいだろうとしている。「ロバストな研究開発計画」は、それに対する推進策を示している。

②研究・評価システム

将来の10,000から100,000プロセッサに及ぶ大規模システムを正しく機能させるためには、適切な開発と評価が必要とされるた

め、タスクフォースは、研究・評価システムの調達をHEC研究開発の不可欠な戦略として提言している。

タスクフォースが研究・評価システムと呼んでいる「早期アクセス」システムは、プロトタイプの早期段階でのテストを可能にし、新しいアルゴリズムや計算手法を開発するために必要なプラットフォームを提供する。又、このシステムは、ソフトウェアに関する機能性とスケーラビリティの研究を評価するためにも必要である。ソフトウェア開発での試験ではしばしばハードウェア故障を引き起こすため、アプリケーションソフトウェアの開発上で支障が生じる。そのため、ソフトウェア開発用のテストベッドとアプリケーションソフトウェア開発用のテストベッドを分けることが必要である。

図表4 HWロードマップ：現在のプログラム

	短期（1年以内）	中期（5年以内）	長期（10年以内）
マイクロアーキテクチャ	COTSの牽引するマイクロアーキテクチャ	チップ当たりマルチCPUコア、チップ当たりメモリバンド幅は減少	ムーアの法則の終焉？
インターコネクト技術	電気接続と電気スイッチに基づいた接続技術	電子・光接続と電気スイッチに基づいた接続技術	HECシステムに対する通信技術に牽引された接続技術の発展
メモリ	キャッシュによるプロセッサ/メモリ性能ギャップが性能とプログラミングの容易性を制限	プロセッサ/メモリ性能ギャップに対応する初期のPIMベースのCOTSとストリーミング技術	進化的な改善；PIMの利用の増加
電力、冷却、パッケージング	熱、パッケージングでの空冷能力の限界	ハイエンドシステム開発のための能力に意味ある進歩はない	システム性能は、熱の壁によって制限される
I/Oとストレージ	ストレージと接続の領域でCOTSベースのI/Oシステムを必要とする	COTS技術に基づいたPetaFLOPSスケール ファイルシステム、RASはユーザビリティを制限	3次元ストレージ技術に依存

図表5 HWロードマップ：ロバストな研究開発計画

	初-中期（5年以内）	長期（10年以内）
マイクロアーキテクチャ	HECシステム向けに開発されたプロトタイプマイクロプロセッサが使用可能	HEC向けに最適化された革新的なポストシリコン技術
インターコネクト技術	光接続と電気スイッチに基づいた接続技術	HECのための全光接続技術
メモリ	HECニーズ向けに開発されたメモリシステム：PIM採用の加速	PetaFLOPSスケールの革新的高バンド幅メモリ
電力、冷却、パッケージング	クリティカルな設計リミットに対応するスタックド3次元メモリと先進的冷却技術	システム全体に渡る高実装パッケージング技術
I/Oとストレージ	HECのためのRASを具備したPetaFLOPSスケールのファイルシステム	エクサスケールのファイルシステムへの革新的なアプローチ

PIM：Processor-In-Memory、RAS：Reliability, Availability, Serviceability  
COTS：Commercial-Off-The-Shelf

図表6 ソフトウェアロードマップ：現在のプログラム

	短期（1年以内）	中期（5年以内）	長期（10年以内）
オペレーティングシステム（OS）	デスクトップやサーバーのOSの拡張。不安定で1,024プロセッサ以上のスケールアップ不可。	HPCSシステムアーキテクチャ対応の10,000プロセッサまでスケール化可能なOSの初期の導入。クラスターは課題が残る。	殆ど進歩は期待出来ない。
言語、コンパイラ、ライブラリ	レガシー言語とライブラリ（例えば、FORTRAN、C、C++、MPI）。スケラブルな並列性を実現するにはコンパイラ技術が不足。	制限付の製品レベルのコンパイラ（例えば、UPC、Co-Array FORTRAN (CAF)）。MPIの支配が継続。2,048プロセッサ以上の計算には挑戦的なプログラミングが必要。	プログラム技術での更なる改善には限度。UPCやCAFなどの製品レベルのコンパイラが広く利用される。コンパイラ最適化やMPI適用での段階的な改善。言語には革新的な進歩はない。
SWツール、開発環境	ベンダー特有の又は研究レベルの幅広いツール：統合に制限、使用が難しい、ポータビリティが殆どなし。HECシステム用に利用可能な統合開発環境（IDE）がない。	ツール性能がHECシステムを遅らせる（例えば、250,000以上のプロセッサのジョブのデバッグ）。小規模システム（32プロセッサぐらい）のIDEサポート。	大規模システムを理解するための能力とツールとの間のギャップが広がる。中規模の共有メモリシステムのIDEサポート。
アルゴリズム	ある問題に関しては効率の良い並列アルゴリズム（例えば、密行列の線形計算）。効果的にインプリメントするためには熟練のノウハウが必要。	非構造化でスパースな問題に対する改良された並列アルゴリズム。	先進的アーキテクチャに対するマッピングアルゴリズムの多少の進歩。

図表7 ソフトウェアロードマップ：ロバストな研究開発計画

	初～中期（5年以内）	長期（10年以内）
オペレーティングシステム（OS）	スケラビリティと信頼性に対応した新しい研究的なHEC OS。	製品レベルのフォールトトレランス、スケラブルなOS。
言語、コンパイラ、ライブラリ	選ばれたHECシステムの開発を容易にするための最適化。最適化のためのマルチレベルの抽象化を支援する新しいHEC言語の研究レベルの開発。	HECシステムの全てのクラスに渡った自動的な移植容易性のためのハイレベルなアルゴリズム認識言語とコンパイラ。
SWツール、開発環境	広いシステムレンジに渡って使用容易化を改善したインターオペラブルなツール。HECシステムに利用可能な最初の研究レベルの統合開発環境（IDE）システム。	デスクトップから大規模なHECシステムへのシームレスな移行を支援するIDEシステム。
アルゴリズム	HECシステムに最適な新しいマルチスケールアルゴリズム。アーキテクチャに非依存な並列計算の初期プロトタイプ。	不規則で負荷がアンバランスな科学問題のための自動並列化アルゴリズム。物理系の詳細なリアルシミュレーションを可能とする並列アルゴリズムのスケールアップ。

図表8 システムロードマップ：現在のプログラム

	短期（1年以内）	中期（5年以内）	長期（10年以内）
システムアーキテクチャ	サーバークラスのOSで10から100TFLOPSピーク（1,000から10,000プロセッサ）のCOTSベースシステム：不安定で、プログラムが難しい。	ある選択されたミッションのアプリケーションで実効PetaFLOPS（100,000プロセッサ又はそれ以上）を実現可能な多くて2つのDARPA HPCSシステム。	HPCSシステムを超える進化的改善が必要。
システムモデリング、性能解析	刹那的で、不完全で、使用が難しく、統合されていないシステムモデリングと性能解析ツール。	熟練者の使用によるレガシーシステムとアプリケーションのためのモデル/ツールにおける精度の改善。HPCSシステムのモデリングは複雑さの課題あり。	使用容易性とシステムの統合への進化的改善が必要。
プログラミングモデル	レガシーな並列計算モデルはプログラム容易性に限界。主なモデルはメッセージパッシング。非挑戦的なプログラミングの実践：64から256でのMPIや16から128のOpenMP。	並列計算モデルでのマイナーな進展。非挑戦的なプログラミング：128から512プロセッサに適用可能なMPI-2や64から256プロセッサで利用可能なDSMの実現（UPC、CAF...）。	共有メモリプログラミングモデルの不完全な実現と受け入れ。（例、UPC、CAF）
RAS + セキュリティ	RASは慎重なユーザにより実現される（例えば、チェックポイントリスタートと再スケジューリング）。	1,024プロセッサまでの限定付きのRASソリューション。部分的な故障切り離し、インサイドアタックを防ぐユーザ行動のプロファイル作成。	10,000プロセッサシステムまでのRASソリューション。アプリケーションのセキュリティにおける多少の改善。

図表9 システムロードマップ：ロバストな研究開発計画

	初～中期 (5年以内)	長期 (10年以内)
システムアーキテクチャ	広範なアプリケーションに関する実効PetaFLOPS (100,000プロセッサ以上) を可能とする3つ以上のシステムの開発。大規模でのより簡単なプログラミング。自己適応型システムの出現。	大部分のアプリケーションに関して実効的に10から100PetaFLOPSを可能にするHECシステム。大多数の科学者や技術者にプログラミングが可能。自己適応型システムが広がる。
システムモデリング、性能解析	HECシステムとアプリケーションのための正確なモデル/ツール。アーキテクチャ/アプリケーションの相互作用をよく把握できるツールとベンチマーク。	ソフトウェア動作の解析と予測を可能にするモデル。自動かつ知的な性能解析ツールとベンチマークが広く利用可能で容易に利用できる。
プログラミングモデル	優れた並列計算モデルの研究レベルの開発。非挑戦的なプログラミング; 1,024プロセッサのためのMPI後継や強力なDSM (UPC, CAF...) 開発が広く、1,024プロセッサで利用可能。	新しいまた計画段階のアーキテクチャとアプリケーションに効率的、効果的に適合する並列計算モデルの開発。優れた並列計算パラダイムは、新アーキテクチャや新プログラミング言語を育てる。
RAS+セキュリティ	故障をしても稼動する半自動機能。侵入や内部攻撃の防御の強化。	自己認識システム: 信頼性をユーザの支援に頼らない。システムはマルチレベルのセキュア環境を具備。

CAF: Co-Array Fortran, COTS: Commercial-Off-The-Shelf, DARPA: Defense Advanced Research Projects Agency, DSM: Distributed Shared Memory, HPCS: High Productivity Computing Systems, IDE: Integrated Development Environment, MPI: Message Passing Interface, OpenMP: Open specification for MultiProcessing, OS: Operating System, RAS: Reliability, Availability, Serviceability, UPC: Unified Parallel C

研究・評価システムの評価で得られる性能情報は、HECシステムの将来の調達を成功に導く貴重なものである。この評価によって失敗のアプローチを識別できたとしたら、政府は、期待通りに実行しないシステムを購入しなくて済むことになる。又、この評価は、失敗の原因を取り除くことで更に意味あるアプローチを提案できうるものでもある。

③ HEC 研究開発投資の優先度

優先度は研究開発の主要な4つの段階を、以下の様に定義した上で検討している。

- (a)基礎・応用研究 (Basic and Applied Research): 新しいアイデアや専門知識の継続的な創出により、HECの基盤となる概念開発に焦点を絞る。
- (b)先進開発 (Advanced Development): 高性能システムへ向けた革新的な技術やアーキテクチャを選択し洗練する。
- (c)プロトタイプ (Engineering and Prototypes): HECシステムとその要素の構築に必要とされる統合やエンジニアリングの実現。
- (d)試験評価 (Test and Evaluation): HECソフトウェアや現在及

び新世代 HEC システムを適切な規模で試験評価を行う。

また、ソフトウェアの長期的進化支援は、重要な HEC ソフトウェアインフラストラクチャを長期間に渡って維持するものとしている。

そして、それぞれに対し研究開発投資の推奨案を図表10の様に述べている。ここでは、「現在のプログラム」に比較した予算の増分の大小で優先度を示している。

2-3

HEC リソース

本計画では、政府機関のミッションを遂行するために必要とされる HEC システムの獲得、運用、維持を「HEC リソース」と呼んでいる。

全体的に計算能力が不足しており、強力な HEC の投資が必要とされている。政府機関の中には、利用者に対して十分な計算能力を供給できないために他の機関のリソースを借用しているところもある。又、現在、米国の民間機関は、リーダーシップクラスシステムにアクセスしていないので、重要な計算問題に対して真にブレークスルーをもたらす機会が限られているとも述べている。

(1) HEC リソースへのユーザ要求

連邦政府の広範な科学分野の HEC 要求を調査した結果、2つのクラスの資源問題があることがわかった。第1番目はアーキテクチャの利用可能性であり、第2番目は HEC の供給の問題であり、それぞれを順に述べる。

①アーキテクチャの利用可能性

今日の HEC 市場は、最も過酷な科学アプリケーションの性能要求を満足する製品を生み出していない。商用コンピューティングのニーズと科学ニーズの間で重なっているところではベンダーは素晴らしい製品を供給してくれるが、科学又は国防ニーズで商用 IT と重なっていないところでは製品が不足している。

② HEC の供給 (Capacity)

政府の科学技術での HEC 利用要求は、供給 (Capacity) の約3倍であり、年約80%の割合で増加している。この傾向は、アプリケーションの高度な利用や、利用領域の拡大に伴って益々増加すると予想される (図表11)。

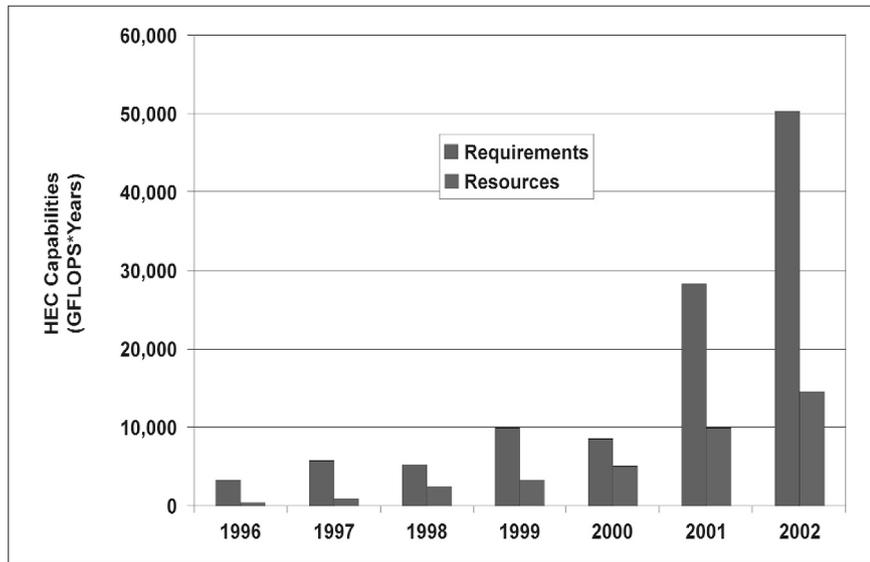
図表 10 推奨優先度

		現在のプログラム*	現在の HEC 研究開発プログラム比の増分				
		2004 年度 (百万ドル)	2006 年度	2007 年度	2008 年度	2009 年度	2010 年度
ハードウェア	a. 基礎・応用研究	\$5					
	b. 先進開発	\$5					
	c. プロトタイプ	\$0					
	d. 試験評価	\$2					
ソフトウェア	a. 基礎・応用研究	\$33					
	b. 先進開発	\$21					
	c. プロトタイプ	\$15					
	d. 試験評価	\$2					
	e. 長期的進化支援	\$0					
システム	a. 基礎・応用研究	\$4					
	b. 先進開発	\$40					
	c. プロトタイプ	\$1					
	d. 試験評価	\$30					
合計		\$158**					

増分大 (Robust funding increment)
  増分小 (Modest funding increment)
   
 増分中 (Moderate funding increment)
  小変更 (Modest redirection)

\* 2004 年度からの計画への変更がないと仮定  
 \*\* この予算額は HEC 計画の範囲内の活動のみの金額を示す  
 出典：資料<sup>4)</sup>を基に科学技術政策研究所で編集

図表 11 DoD の High Performance Computing Modernization Program 用の HEC 要求と利用可能リソース



することを提言している。

(2) HEC アクセス、

アベイラビリティ、  
リーダーシップへの対応

タスクフォースは、HEC リソース問題に対して、アクセシビリティ、アベイラビリティ、リーダーシップシステムの3つの異なった問題にわけ、個々へアプローチ

①アクセシビリティ

リソースの共有化について提言している。

- 他の政府機関からのリソースを用いて研究をする政府機関は、共同契約を通してリソースをユーザに供給するなどの

選択肢を検討する。

- 各政府機関はミッションの優先度に基づいてリソースニーズを評価調整する。

②アベイラビリティ

ミッション遂行に必要なリソースの増加を要求している。

- 計算リソース需要の増加と、既に負荷が過剰なシステムへの増加要求に対応するため、政府機関は、リソース再割当の有用性を検討する。
- 最適リソース再割当のために、理論、実験、計算などの研究や工学のモード間のバランスを評価し、調整することを希望する。

③リーダーシップシステム

米国の科学研究者に世界最高性能の HEC を提供するために、タスクフォースがリーダーシップシステムと呼ぶシステムの開発を提言している。

システム目標は、現在、市場で

得られる性能に比べて少なくとも100倍の性能を目指すものと示されている。リーダーシップシステムの使用に関しては、限られた科学アプリケーション（1年あたり約10）が選択され、かなりの量のアクセス権が与えられるだろう。又、将来、リーダーシップシステムを全体規模で稼動する準備として、より広いアプリケーション（1年あたり約50）がパイロット的な実験のために選ばれ、短時間のアクセスが割り当てられる可能性もある。リーダーシップシステムは、その性格上、数年間使用し、科学ニーズや研究開発活動から生み出される技術に基づいて、定期的に新しいものと置き換えられるものと位置づけられるだろう。HECでのコア技術研究開発はHECシステムに向けられるが、それらの技術は時間と共に、サーバー、最終的にはデスクトップへと適用されるだろうとある。提言内容は以下の通りである。

- 最高の計算能力を持ち最優先の研究用にリーダーシップシステムを設置する。
- 政府機関が、国家リソースとしてリーダーシップシステムを管理する。
- 政府機関は、オープンなユーザ施設としてリーダーシップシステムを運用する。
- システムへのアクセスはピアレビューによる管理を原則とする。

## 2-4 調達

HECシステムの調達は非常に複雑な仕事であり、政府とベンダー双方での煩雑さを軽減するための調達アプローチが必要である。10年前はHECのサービス寿命は5年以上が普通だったが、現在では平均寿命は約3から4年であり調達期間の短縮が必要である。

政府のHEC調達の効率改善に向け、政府機関を横断した3つのパイロットプロジェクト（HECベンチマーク、TCO（Total Cost of Ownership）、調達）の設定を推奨する。

以下、各々のプロジェクトを述べる。

### ① HECベンチマーク・パイロットプロジェクト

実効性能は調達の選定判断として唯一の容認できる性能基準である。計算ピーク性能又はリンパックベンチマークのような単一の性能測定は、有用ではあるが購入判断のベースとして使われるべきではなく、実際のアプリケーションのベンチマーク性能が、実運用環境でのシステム性能の最良の指標であるとして以下を提言する。

- 政府機関のうちで類似のHECアプリケーションを持つ機関を選択し、それらのアプリケーションの基礎となるベンチマークのセットを開発し、このベンチマークをパイロット購入段階で使用する。
- 参加政府機関は、そのベンチ

マーク結果を用い各政府機関のアプリケーションに合わせて適当な重み付けを行い、各政府機関で必要とするベンチマークの代りに用いる。

② TCOパイロットプロジェクト  
TCOは、HECサービスを供給するための全ての財政的な観点を含み、次の4つの主なコスト領域に分けられる。

- ハードウェア
- システムソフトウェア
- スペース、ユーティリティ、人員、センター外の通信（ネットワークキング）
- ユーザ生産性（アプリケーションソフトウェア開発コストを含む）

パイロットプロジェクトとして以下を提言する。

- 複数政府機関からなるチームが、TCOの全ての要素（例えば、購入とメンテナンス、人員、センター外通信、ユーザ生産性）を幾つかの類似のシステム間で評価し、TCOを決定付けるベストプラクティスを開拓する。

③ 複数の政府機関による共同HEC調達パイロットプロジェクト

参加政府機関は、上記した2つのプロジェクトによって開発された新しい方法を用いて共同で調達の方法を開発する。そしてその有効性を評価する。評価は、購買力の改善、全体の人件費の削減、調達に要する全時間、及び参加政府機関の要求への適合性などの観点から行う。

## 3. 注目点

以上、「米国政府のHEC計画」の概要を述べた。このHEC計画には、多くの注目すべき点がある。そこで以下では、そのいくつかについて述べる。併せて関連する技術動向も紹介する。

### (1) Time to Solutionの短縮

HEC計画には、Time to Solutionという用語が頻繁に使われている。これは、研究者が演算処理結果を手にするまでの時間であ

り、演算実行時間に加えてプログラムの開発や試行を含む。計画ではこのTime to Solutionを重視し、HECに関する総合力での進化を目標にすべきとしている。又、Time to Solutionは、HECのライ

フサイクルでのコストを左右するものとして捉えられており、HEC 研究開発、HEC リソース、調達など全域での考え方の基点としている。

**(2)実効性能の重視** (注2)

実効性能に関しては、現状の HEC システムに対する認識、研究開発のあり方、調達のあり方などの点で詳細に検討され、その重要性が力説されている。ロードマップには、その改善策が提言されている。

**(3)研究開発の優先度**

HEC 研究開発投資における推奨の優先度付けは力点を示すものとして意味がある。ここには HEC 計画に関係する 2004 年度予算が示されており比重のかけかたが概観できる。ソフトウェアとシステムの合計額がハードウェアに比べて高いことが特筆される。ハードウェアでの基礎・応用研究、先進開発、ソフトウェアでのプロトタイプ、試験評価と長期的進化支援 (Long-Term Evolution and Support)、システムでのプロトタイプへの増分を当初から多く推奨していることも注目される。

**(4)大規模で挑戦的な問題へのリソース対応：リーダーシップシステム**

最高性能を必要とする大規模で挑戦的な研究課題への対応としてリーダーシップシステム施設を設置し、産業界や政府機関の研究者に開かれた運用をすることが必要であると記述されている点が注目される。現在、米国でも民間機関は、リーダーシップクラスのシステムにアクセスしてないことにも簡単に触れられており、その改善を促していると言える。又、リーダーシップシステムの開発目標として波及効果が記述されている。HEC でのコア技術研究開発

は当初は限られた政府ミッションの HEC システムに向けられるが、それらの技術は時間と共に、サーバー、最終的にはデスクトップへと適用されるとあり、HEC システム開発によって極限の技術を開発し、その成果を後の商用製品で積極的に適用していくことを強く意識しているといえよう。

**(5)HEC へのアクセスの増加**

HEC へのアクセスの増加として、国立衛生研究所 (National Institutes of Health : NIH) で、HEC 利用の急激な増加が起こっていること、産業界では化学、半導体、材料分野など実験を通して必要なデータを得ることが難しく時間消費が大で高価につく領域での HEC へのアクセスが増加していることが述べられている。

本計画の冒頭では、物理、ナノサイエンス、航空、ライフサイエンス、国の安全、地球科学、エネルギー・環境の各領域に対して、科学的チャレンジと期待される成果という非常に興味深い内容が述べられており注目に値する。そして、特に、気候・気象研究、ナノスケール科学技術、ライフサイエンス、航空宇宙機最適設計に対しては、多数のページを割き、それらの問題の内容と HEC 要求を詳細に述べている。HEC へのアクセスが今後益々増加していくことが表されている。

**(6)TCO を重視した調達** (注3)

TCO は、HEC サービスを供給するための全ての財政的な観点を含み、ベンチマークと並び、システム購入判断としての重要な要素であると述べられている。特に、HEC システムのライフサイクルにおけるコストドライバとしての Time to Solution が重要なファクターとなっていることが言及されている。

TCO の要素としてユーザ生産性も強く意識されている。ロードマップにも、コンパイラへの重要な進展をはじめとしたアプリケーションソフトウェアの開発容易性、HEC システム間の移植性を向上したプログラミング環境など Time to Solution の重要な課題とされている。ソフトウェア寿命はハードウェア寿命より長いのが現実であり、長期間に渡って開発し蓄積してきた膨大なソフトウェア資産の活用、高度にチューニングされたアプリケーション資産の機能面、性能面での移植容易性は重要な課題である。

**(7)実用的な性能測定** (注4)

調達においては実効性能を測定できるベンチマークが購入判断の重要な要素であるとし、類似のアプリケーションを持つ複数の政府機関の間で、実運用環境での性能を反映するベンチマー

※本内容は HEC 計画には述べられていないが参考として示す  
 (注2) 実効性能関連の情報：米国の HEC システムに関する実効性能の問題は、米国の学術研究者が執筆した米学術研究会議 (NRC) 報告書 (参考文献<sup>8)</sup>) にも取り挙げられている。又、参考文献<sup>9)</sup> には高い実効性能を達成している日本の地球シミュレータについて説明されている。詳細は資料を参照されたい。  
 (注3) ユーザ生産性関連の情報：ユーザ生産性の議論として DARPA の HPCS の活動内容が参考文献<sup>3)</sup> にあり、参照されたい。  
 (注4) ベンチマーク関連の情報：実運用環境での実効性能測定に向けたベンチマークの新しい動きが参考文献<sup>10,11)</sup> にあり、参照されたい。

クを開発し共用を図るという内容が述べられている。又、実際のアプリケーションが使用できない場合に対応して、合成ベンチマーク (Synthetic benchmarks) という研究がDOD、DOEの支援で行われていることも述べられており注目したい。

**(8)再生 (Revitalization) に向けた包括的なアプローチ**

HEC計画では、再生(Revitalization)

は、研究開発の主要な4つの段階である基礎・応用研究、先進開発、プロトタイプ、試験評価の全域に渡っての革新が進展するよう支援される必要があるとし、これを包括的なアプローチと呼んでいる。そして、このアプローチが継続的な研究開発プロセスの構築に必須であると述べている。

この計画には具体的な記述はないが、2004年11月9日の高性能コンピュータ関連の国際会議

(SC2004)でのタスクフォース関連の発表では、前記した4つの段階の目的と実行主体が図表12の様に示されており、このアプローチの推進形態がうかがえるので参考として示す。

**(9)ユーザ視点での政府機関の調整がとれた計画**

HEC計画を策定したタスクフォースのメンバーがHEC計画の付録に記載されている。メンバーは全てHECに関係した政府機関のユーザ部門であり、ユーザの視点でHECの有るべき方向性を計画している。又、HEC計画からは、研究開発、HECリソース、調達に全てに渡り一貫して、政府機関のミッションを意識して策定されたことが読み取れる。

図表12 研究開発の進め方

活動	目的	実行主体
基礎・応用研究	新しい考えと人材で学究領域を満たす	大学と政府研究所
先進開発	要素、サブシステム技術開発	大学と政府研究所との連携で産業界が主導
プロトタイプ	システムレベルでの統合と第一号機開発	産業界
試験評価	開発、製造、政府調達のリスク軽減	政府研究所とHECセンター

出典：参考文献<sup>5)</sup>

**4. おわりに**

HEC計画に関連して、HECに関する再生(Revitalization)を法案名に掲げた少なくとも3つの法案(HR4516、S2176、HR4218)が第108回米国議会で審議された。このうちHR4516は、「2004年エネルギー省高性能コンピューティング再生法」<sup>6)</sup>(以下、再生法と略記する)で11月末に成立した<sup>(注5)</sup>。再生法の審議過程をみると、HECは、基礎科学の進展を加速する能力をもつこと、国家安全保障と経済競争力の必須の要素であること、産業への波及効果が大いこと、政府の関与が必要であること等を述べ、日本の地球シミュレータを何度も引用しHECの必要性を強く言及している<sup>7)</sup>。再生法には、HECに関する予算として別段に定められた金額に加え、歳出予算期間が3年、予算額は2005年度に0.5億ドル、2006年度に0.55億ドル、2007年度に0.6億ドルの総額1.65億ドル

(注5) その他の法案の状況：S2176は、HR4516とほぼ同内容で歳出予算の要求期間が5年、総予算額8億ドル規模であり2004年3月上院で説明された。HR4218は、法案名を「2004年高性能コンピューティング再生法」といい、「1991年High-Performance Computing法」の改正案である。この法案は、2004年7月下院通過後に上院で受領され商務、科学、運輸委員会に付託された。本HEC計画は、この法案の審議過程の2004年5月に下院科学委員会において説明されている。又、2005年1月の第109回米国議会では、HR28が下院に提出されている。

の支出権限が与えられている。エネルギー省は、この資金を使って、HECの研究、HECシステムの開発・購入、ソフトウェア開発センターの設立、同技術の民間部門への移転を行うことになる。

再生法は、複数のアーキテクチャの研究、アーキテクチャ開発活動と連携したHECシステム用ソフトウェアの研究、高性能ソフトウェア開発センターの設置などを定めている。又、米国内にいる研究関係者が高性能コンピューティング・システム及びリーダーシッ

プ・システムを利用できる環境を整備するとある。HECシステムの利用に関して、米国産業界所属の研究者、高等教育機関、国立研究所その他の政府機関に対し、リーダーシップ・システムを利用する権利を付与することで優先度の高い処理向けのHEC環境を強化している。

以上、HEC計画の概要を紹介し、その注目点について述べた。タスクフォースは、現在、産業界で供給されているHECシステムが、政府機関のミッションを果た

すアプリケーションの性能要求を満たすには不十分とし、科学者、大学、産業界、政府機関と連携をとり、科学技術の進展を目指して今後のHEC投資への提言をまとめた。HEC計画では、HECシステムは政府機関が最大のユーザであり、そのニーズを満たすHECの研究開発には、政府による支援が必要としている。日本の地球シミュレータは、卓越したシステムとして米国政府のHEC関係者に認識されており、今後の研究開発の方向性に対し大きなインパクトを与えたのは間違いない。

今、米国政府は、科学技術でのグローバルリーダーシップの維持のために、HECを軸にした戦略を強力に進めている。そして、このHECに関しての極限技術を追求することで、波及効果を生む技術力の維持、継承を図ろうとしている姿がうかがえる。

## 謝 辞

本稿の執筆にあたって、佐藤哲也博士、渡邊國彦博士（地球シミュレータセンター）、中村壽氏（高度情報科学技術研究機構）、姫野龍太郎博士、福井義成氏（理

化学研究所）、谷啓二博士、平山俊雄氏、松岡浩博士（日本原子力研究所）、加藤千幸教授（東京大学）、根元義章教授、小林広明教授（東北大学）、上村洸教授（東京理科大学）、伊藤聡博士（東芝）他のHECの専門家の皆様から、ご意見、資料のご提供などの協力を頂きました。また、小笠原敦主任研究員（産業技術総合研究所）、藤井章博主任研究官（科学技術動向研究センター）には本稿作成において多大な協力を頂きました。ここに関係の皆様へ厚く御礼申し上げます。

## 参考文献

- 1) [http://www.hpcc.gov/pubs/brochures/nitrd\\_20041029.pdf](http://www.hpcc.gov/pubs/brochures/nitrd_20041029.pdf)
- 2) 2004年度、2005年度 NITRD BlueBook
- 3) The NITRD PROGRAM : FY2004 INTERAGENCY COODINATION REPORT  
Interagency Working Group on Information Technology Research and Development (IWG/ITR&D) October 2004 : [http://www.nitrd.gov/pubs/20041020\\_icr.pdf](http://www.nitrd.gov/pubs/20041020_icr.pdf)
- 4) Federal Plan for High-End Computing  
Report of the High-End Computing Revitalization Task Force (HECRTF) May10, 2004 : [http://www.itrd.gov/pubs/2004\\_HECRTF/20040702\\_HECRTF.pdf](http://www.itrd.gov/pubs/2004_HECRTF/20040702_HECRTF.pdf)
- 5) [http://www.hpcc.gov/hecrtf-outreach/sc04/20041109\\_culhane.pdf](http://www.hpcc.gov/hecrtf-outreach/sc04/20041109_culhane.pdf)
- 6) Department of Energy High-End Computing Revitalization Act of 2004 H.R.4516
- 7) <http://thomas.loc.gov/cgi-bin/cpquery/T?&report=sr379&dbname=cp108&>
- 8) Getting Up to Speed : The Future of Supercomputing (2004) <http://books.nap.edu/books/0309095026/html/R1.html>
- 9) 特集：地球シミュレータ（情報処理 2004. 2）
- 10) 科学技術動向 2005年2月号 科学技術トピックス
- 11) 「HPC チャレンジでのSX システムの性能評価」（SENAC（東北大学情報シナジーセンター大規模科学計算システム広報誌）、Vol.38, No.1, pp.5 - 28, 2005、小林他）

## 《用 語》

**CAF** : Co-Array Fortran  
**COTS** : Commercial-Off-The-Shelf  
**DARPA** : Defense Advanced Research Projects Agency  
**DOE/NNSA** : Department of Energy/National Nuclear Security Administration  
**DSM** : Distributed Shared Memory  
**EPA** : Environmental Protection Agency  
**HEC** : High-End Computing  
**HECRTF** : HEC Revitalization Task Force  
**HPCC** : HPC Challenge Benchmarks  
**HPCMP** : High Performance Computing Modernization Program  
**HPCS** : High Productivity Computing Systems  
**IDE** : Integrated Development Environment  
**MPI** : Message Passing Interface

**NASA** : National Aeronautics and Space Administration  
**NIH** : National Institutes of Health  
**NIST** : National Institute of Standards and Technology  
**NITRD** : Networking and Information Technology Research and Development  
**NOAA** : National Oceanic and Atmospheric Administration  
**NSA** : National Security Agency  
**NSF** : National Science Foundation  
**NSTC** : National Science and Technology Council  
**ODDR & E** : Office of the Deputy Director Research and Engineering  
**OMB** : Office of Management and Budget  
**OpenMP** : Open specification for MultiProcessing  
**OS** : Operating System  
**OSTP** : Office of Science and Technology Policy  
**PIM** : Processor-In-Memory  
**RAS** : Reliability, Availability, Serviceability  
**TCO** : Total Cost of Ownership  
**UPC** : Unified Parallel C

