

## 次世代スーパーコンピュータに向けた アプリケーションの高性能化

(独)理化学研究所 次世代スーパーコンピュータ開発実施本部  
開発グループアプリケーション開発チーム  
南 一生\*、長谷川 幸弘\*、井上 孝洋\*、黒田 明義

現在理化学研究所において、2012年の完成を目指し次世代スーパーコンピュータシステムが開発されている。本システムは、極微細な量子の世界から膨大な数の銀河を内包する宇宙まで、広大なスケールの中に存在する様々な自然現象を解明し社会に貢献する革新的な手段として、その実現が期待されている国産技術の汎用スーパーコンピュータシステムである。本システムは、8万個のCPU（ノード）、64万個のプロセッサコアから構成される超並列計算機であり、各プロセッサコアには、高速計算のための多くの新しい機構が導入されている。理化学研究所は次世代スーパーコンピュータ開発プロジェクトを進めつつ、多様な応用分野のアプリケーションについて、スーパーコンピュータの性能を十分に生かしきるために、ある共通化した手法を用いてアプリケーションプログラムを高性能化する研究開発を実施している。本稿では、その概要について紹介する。

### 1. はじめに

計算機による数値シミュレーションで物理現象を解明する計算科学が、理論、実験と共に第3の科学であると云われて久しく、近年、世界中で計算科学による革新的な科学技術研究・開発が富に活発化している。特に、米国においては、国家戦略として、豊富なスーパーコンピュータ資源を野心的な大規模シミュレーション研究プログラムに優先的に割り当て、環境・新エネルギー開発等に関する研究活動を加速している。また、シミュレーションの計算資源をさらに増強するために、今後2-3年の間に複数の超大規模並列スーパーコンピュータの導入を予定している。一方、ヨーロッパ、中国、ロシア等でもスーパ

ーコンピュータを用いた計算科学を科学的発見や社会的問題の解決に役立てようとして、国家的に導入を図っている。

日本においても現在、理化学研究所において、2012年の完成を目指して次世代スーパーコンピュータシステムの開発プロジェクトが進行している。その目標は、10ペタフロップス級のスーパーコンピュータを国家基幹技術として開発するとともに、スーパーコンピューティング技術を発展させ、わが国の幅広い計算科学分野の利用に供する事である。技術的に見ると、大規模システムでは最も重要である低い消費電力、しかもシステム全体での高信頼性を確保できるCPU開発とそのシステム開発を鋭意進めているところである。またユーザーが使い易く、また運用性に優れ、さらに将来のエクサ級スーパーコンピュータにつながるシステム開発を目指している。

\*：現在、(財)高度情報科学技術研究機構から理化学研究所へ出向中

このように、世界中でスーパーコンピュータの利用が拡大している中、スーパーコンピュータの性能を十分生かしきるためには、使い方に特有の留意点が存在し、それを解決するスーパーコンピューティング技術が枢要技術として各国の注目の的となっている。

このため、理化学研究所では次世代スーパーコンピュータシステム開発プロジェクトの一翼として、多様な分野のアプリケーションについてスーパーコンピュータの性能を十分生かしきるために、共通化した手順・手法を用いて、アプリケーションプログラムを高性能化する研究開発を展開している。本稿では、次世代スーパーコンピュータ開発プロジェクトにおいて実施中のアプリケーションプログラムの高性能化のための研究開発について紹介する。

## 2. 次世代スーパーコンピュータへの期待

次世代スーパーコンピュータは、極微細な量子の世界から膨大な数の銀河を内包する宇宙まで、広大なスケールの中に存在する様々な自然現象を解明し社会に貢献する革新的な手段として期待されている。例えば、10のマイナス数乗メートルという極小さいスケールでは、溶液中のウイルス、リポソーム（数十万原子からなる）などの挙動を長時間シミュレーションで把握し、医療分野へ貢献すること、また実験試行回数が莫大で開発に時間と労力が掛かるセルロース分解酵素開発をシミュレーションにより短期間で行い、安価なバイオ燃料を提供する等、新エネルギー分野への貢献も期待されている。もう少し大きなスケールでは、次世代半導体ナノデバイス全体の設計シミュレーションやナノ炭素など非シリコン系物質等新機能物質の創製を通じて次世代エレクトロニクスの革新を加速することが期待されている。また、数十メートルから数百キロメートルという人間社会のスケールでは、地震波動伝播と構造物の応答を組み

合わせた耐震シミュレーションによる詳細な防災計画への貢献、地球規模の数千から数万キロメートルのスケールでは、解像度の高い全球気象・気候シミュレーションによる正確な台風の進路・強度の予測や気候変動研究への貢献等が期待されている。さらに大きな10の20乗メートル以上のスケールでは、太陽活動、星の生成や銀河の挙動といった宇宙現象の解明も期待されている。

## 3. 次世代スーパーコンピュータの概要

次世代スーパーコンピュータでは、メモリを共有する8個のプロセッサコアから、1つのCPU（ノード）が構成されている。システム全体は、8万個以上のCPU、64万個以上のプロセッサコアから構成される超大規模並列システムである。本システムに採用したCPUであるSPARC64<sup>TM</sup>VIIIfxでは、CPUの性能を最大限引き出すために、(a) 各コア内にSIMDと呼ばれる演算アクセラレータ技術の採用、(b) 8個のプロセッサコアの性能を最大限に引き出すハードウェアバリア機構の導入、(c) キャッシュと呼ぶCPU内の高速メモリをソフトウェアから（ユーザ側から）制御可能として高速かつ効率よくキャッシュ上のデータを読み込む機構の導入、(d) レジスタと呼ぶ最もアクセスの速いデータ格納機構の数を大幅に増強、など数々の機能強化・新機能の採用がなされている。

本システムのもう一つ重要な構成部分であるCPU（ノード）間を接続してデータを授受するネットワークについては、高性能・高信頼性の独自ネットワーク（Tofuと呼ぶ）が導入される。TofuネットワークはCPU（ノード）とCPU（ノード）を直接接続する直接結合網で、その基本構成は3次元トラスである。通常、3次元トラスは、ネットワークの構成要素の一つのノード部分が故障すると、通過するデータの授受ができず、場合によってはシステム全体がダウンする恐れもあ

る。このため、本システムでは、ネットワークに代替経路を設けて一部が故障してもそれを回避する機能を備え、可能な限りシステム全体のダウンを少なくする工夫をしている。また、このTofuネットワークでは、一度に転送できるデータ量（バンド幅）を高めCPU間のデータのやり取りの応答時間（レイテンシ）の短縮を図っている。それに加え多数のCPU上のデータを高速に集める機能などを備えている。このように、CPU内の演算性能及びCPU間の通信性能を高めることにより、アプリケーションの高速実行を図っている。

#### 4. 次世代スーパーコンピュータ利用の留意点

幅広い応用が期待される次世代スーパーコンピュータであるが、その性能を十分生かすために使い方において特有の留意点が存在する。

1940年代半ばのENIACの登場以来、これまで様々なアーキテクチャを有する計算機が開発されてきた。こうした中で、代表的な計算機ハードウェアであるベクトル計算機、スカラ計算機は、共に単体プロセッサの時代から、プログラムに内在する並列性をコンパイラで解釈することにより、高速処理を実現してきた。その後、スーパーコンピュータが並列アーキテクチャへと変化してからは、数千から数万に及ぶプロセス間の並列性をプログラム上で明示して利用することで超高速計算を実現してきた。言い換えればプログラマーは、プロセス間の並列性を意識して並列化し、またプロセス毎のデータの分散を意識してプログラミングすることが必要となった。

一方、計算科学の初期において高級言語とコンパイラが整備されてからは、研究者やプログラマーは、定式化・離散化された理論モデル式に忠実に、かつ物理現象に沿った素直なループ構造・制御構造・データ構造でプログラミングすることが一般的であった。しかし、近年、計算機のメモリ構造が拡大し複雑

になってくるにつれ、メモリ構造、とりわけ1次キャッシュ、2次キャッシュといった多階層メモリ構造を意識してプログラミングを行う必要が顕在化した。したがって、こうした現代の高性能計算機（HPC：High Performance Computing）においては、研究者は、あらかじめ実行性能を考えたデータ構造・ループ構造等をプログラミング時に採用しなければ、開発したシミュレーションプログラムを高速に実行させる事はできない。つまり、研究者やプログラマーにとって、これまで物理現象のモデリングとプログラミングでは決して意識する必要は無かった実行性能を意識したプログラミングが新たに必要となったことを意味している。

ここに述べた2点、すなわち「並列性を意識したプログラミング」と「実行性能を意識したプログラミング」は現代のHPC利用において、ユーザ、研究者、プログラマーが認識すべき非常に重要な留意点である。特に、次世代スーパーコンピュータは、前述の通り、約64万個余に及ぶプロセッサコアを備えており、またプロセッサにも数々の機能強化・新機能の導入が図られている。これらのプロセッサコアの全てを効率よく利用するためには、ユーザはアプリケーションに内在する固有の超並列性を最大限に引き出し、加えてプロセッサに導入された新機能や強化された機能を十分発揮・活用させなければならない、そこには高度なコンピューティング技術が必要とされるのである。

#### 5. 次世代スーパーコンピュータ利用に向けた準備

##### (1) アプリケーションの準備

理化学研究所では、次世代スーパーコンピュータの運用開始に先立ち、システム性能を実証するために先行的に試行するアプリケーション群の準備を進めている。その準備の中で、先行的アプリケーション群において、

超並列性を最大限に引き出すとともに、高並列化し、またプロセッサに導入された新機能や強化された機能を十分活用するためにプログラミングの工夫を加え、アプリケーション群の高性能化の作業を進めている。

先行的アプリケーション群は、次世代スーパーコンピュータの汎用性を活かし、幅広い様々な応用分野のアプリケーションが幅広く高い性能を発揮できることを実証できるように選択されている。また今後の計算機開発に役立つように、計算機科学的特性の観点も含まれている。ここで云う計算機科学的特性とは、具体的には、(a) 並列化では、比較的シンプルな並列化手法で良好な並列性能が得やすいか、それとも複雑な並列化手法を採用しないと高い並列性能が得られないか、(b) 単体性能では、アプリケーションが要求するメモリバンド幅と浮動小数点演算速度の比(B/F値)が高く、スカラ型計算機では高い単

体性能が得にくい傾向にあるか、またはアプリケーションが要求するB/F値が低く、比較的の高い単体性能が得やすい傾向にあるか等、の観点である。これら複数の観点を基に、対象アプリケーションを評価し、後述する並列特性の分析による評価も加え、並列性能が見込めるような複数のアプリケーションを選択した。図1が選択した先行的アプリケーションの一覧である

応用分野で具体的に見ると、地球科学分野のアプリケーションが2本(NICAM[1]、Seism3D[2])、ナノ分野のアプリケーション2本(PHASE[3]、RSDFT[4])、工学分野のアプリケーション1本(FrontFlow/Blue[3])、物理分野のアプリケーション1本(LatticeQCD[5])、合計6本がである。これらは、前述した計算機科学的特性の面から見ると、以下の様な特徴を持っている。

(A) 地球科学分野 (NICAM、Seism3D) : (a) 高並列化の観点では、比較的シンプルな領域

ES:地球シミュレータ

プログラム名	分野	アプリ概要	コードの計算科学的特徴	物理モデル、手法
NICAM	地球科学	全球解後大気大循環シミュレーション	ES ではピーク性能比 40%。プログラミング上は B/F 性能を要求するため、次世代スパコンではキャッシュの有効利用等の高速演算機構の利用が必須。	大気大循環、FDM
Seism3D	地球科学	地震伝播・強振動シミュレーション	ES ではピーク性能比 40%。プログラミング上は B/F 性能を要求するため、次世代スパコンではキャッシュの有効利用等の高速演算機構の利用が必須。	地震波動、FDM
PHASE	ナノ	平面波展開第一原理分子動力学解析	単体性能向上は主要処理の行列・行列積化により可能との見通しが立っている。しかし超並列での性能確保には相当原子数を増加させる必要があり、高並列化の検討が要。	DFT、波数空間法(平面波法)
RSDFT	ナノ	真空第一原理分子動力学解析	単体性能向上は主要処理の行列・行列積化により可能との見通しが立っている。しかし超並列での性能確保には相当メッシュ数を増加させる必要があり、高並列化の検討が要。	DFT、真空空間法
LatticeQCD	物理	格子 QCD シミュレーションによる素粒子・原子核解析	通信トポロジーを意識した高度な並列化チューニング、また実機を意識した単体性能向上策が必須。	QCD、経路積分法
FrontFlow/Blue	工学	Large Eddy Simulation (LES)による非定常流解析	ES ではピーク性能比 25%。プログラミング上は B/F 性能を要求するため、またリストアクセスのため、次世代スパコンではキャッシュの有効利用等の高速演算機構の利用、データアクセスの効率化が必須。	非圧縮非定常流体、FEM

図1 先行的アプリケーション一覧

分割の手法が用いられ、隣接通信が主であるため、高並列においても高い並列性能は比較的得易い傾向を持つ。(b) 単体性能から見ると、地球シミュレータ(ベクトル並列計算機)を利用した場合は、ピーク性能比40%程度の高い性能を示し、高いB/F性能が必要とされる傾向がある。一方、演算ピーク性能に対し、相対的にメモリバンド幅性能が弱いスカラ並列計算機にとっては高性能を得るには工夫が要るアプリケーションである。このため、次世代スーパーコンピュータではキャッシュの有効利用をはじめとし、新たに導入された高速演算機構の活用が必須となる。

**(B) ナノ分野 (PHASE、RSDFT) :** (a) 高並列化の観点では、並列特性分析の結果、現状の並列化手法では、数万のノードを備える次世代スーパーコンピュータでの並列化には適応し難く、抜本的な並列化手法の見直しが鍵となる。(b) 単体性能から見ると、主要処理の行列・行列積化により、高性能は得易いと予想される。

**(C) 工学分野 (FrontFlow/Blue) :** (a) 高並列化の観点では、比較的並列性を識別し易い領域分割の手法を用いるが、非構造格子法を採るため、構造格子法等の地球科学分野のアプリケーションよりも並列化手法は多少複雑になる。並列特性分析の結果、隣接通信は高並列時でも大きな負荷とならないが、大域通信負荷(時間)は、高並列時に増大する傾向がある。しかし、現時点では、次世代スーパーコンピュータのフルノード使用時でも大域通信時間は高負荷とならない範囲に収まると見積られる。(b) 単体性能から見ると、地球シミュレータ利用時ではピーク性能比20%程度の性能を得られるが、高いB/F性能が要求される傾向がみえる。一方、そこではリストアクセスが存在するため、ピーク性能に対し相対的にメモリバンド幅性能が弱いスカラ計算機では、高い性能を得ることはかなり厳しいアプリケーションとなる傾向がある。

**(D) 物理分野 (LatticeQCD) :** (a) 高並列化の観点では、領域分割手法を用いるが、並列特性分析の結果、通信回数(頻度)が多くなることが特徴付けられた。このため、通信トポロジーの活用を意識した高度な並列化が必要であろう。(b) 単体性能の面から見ると、次世代スーパーコンピュータのアーキテクチャを意識した単体性能向上策が必須のアプリケーションである。

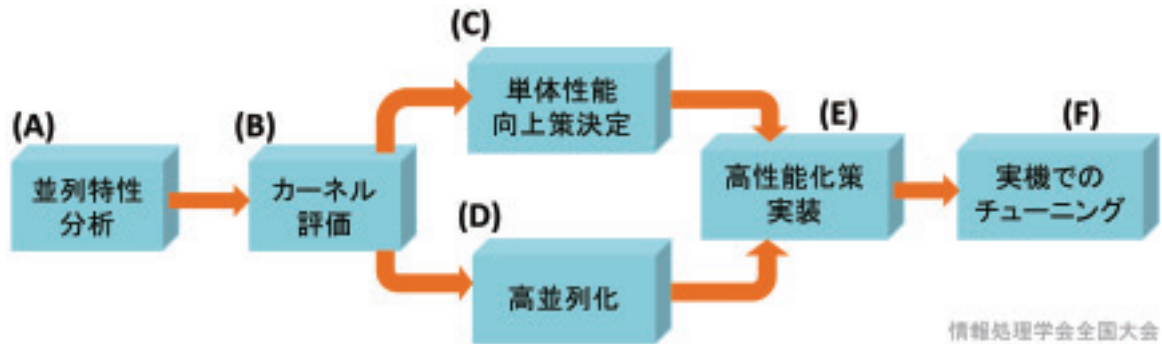
理化学研究所では、選択された各アプリケーションに対し、それぞれの開発者と協力しながら、数万ノードに対応させる高並列化、単体性能を引き出す高性能化プログラミングを実施している。そこでは、密接に連絡を取り合いながら高並列化・高性能化の検討を実施し、理化学研究所側はハードウェア情報に基づく高並列化・高性能化の試作・性能評価を提示し、一方、開発者側では、提示された試作・評価結果を基にアプリケーションコード全体に反映し、さらなる開発を行う方法を採用している。

## (2) アプリケーションコードの高性能化

理化学研究所では、全ての分野のアプリケーションについて、図2に示す共通な手順に則りアプリケーションコードの高性能化へ向けた開発作業を進めている。各手順について簡単に紹介する。

### (A) 並列特性分析 (図3)

まず、アプリケーションコードの処理構造を分析し物理的処理ブロック(計算ブロックか通信ブロック)を抽出する。次に、その処理ブロックの物理的処理内容を把握する。コードの実行時間の実測結果とプログラムソースコードの調査結果から、物理的な計算ブロック毎に非並列/完全並列/部分並列等の計算特性を把握する。また計算量の問題規模(N)に対する依存性の特性を把握する(例えば、Nに比例、 $N^2$ に比例等)。さらに通信



情報処理学会全国大会

図2 アプリケーション高性能化のステップ

ブロック毎に、隣接通信、大域通信等の通信特性を把握する。加えて、通信量の問題規模に対する依存性を把握する（分割された領域の隣接面に比例、領域体積に比例等）。プログラムの実行時間の実測においては、先ずストロングスケリング<sup>1</sup>測定により通信量・演算量と実行時間の関係を確認し、次にウィークスケリング<sup>2</sup>測定により大規模なターゲット問題実行時の高並列応答挙動を評価する。高並列応答挙動の評価については、このあとの (D) でも同様の評価を実施するため詳細は (D) に述べる。

### (B) 計算・通信カーネル評価

並列特性分析の結果から得た計算量や通信量の問題規模に対する依存性の情報を元に、計算・通信ブロック群について物理的処理内容やコーディングの評価を行い、同種の計算ブロックや通信ブロックに分類し、それらの中からターゲット問題実行時に、また高並列実行時に主要部となるブロックを洗い出す。これを計算カーネル・通信カーネルと呼ぶ。

### (C) 単体性能向上策決定

洗い出された計算カーネルを独立実行可能なテストプログラムとして切り出す。次に、そのテストプログラムを使用し、配列次元の入れ替え、配列の統合、ループの組み替え等

様々な性能向上策を試行・試作し、それらの効果を評価する。また、性能向上策を実施した場合のコード全体に対するコードの書き換えの影響を評価し、その作業量を見積もる。性能向上の効果と作業負荷の双方を含めて効果を評価し性能向上策を決定する。

### (D) 高並列化

(A) の並列特性分析評価結果に基づき、高並列化方針を策定する。策定した方針の下に、計算カーネル・通信カーネルの修正を試行し、高並列時の挙動を分析・評価する。先ず、実際の実行環境を使用し100並列程度/1000並列程度/数千並列程度と段階を経て、可能な限り高い並列度まで実測をおこない、並列性能を実測・確認する。次に、この実測結果に基づき、ターゲット問題実行時の高並列における実行時間・通信時間を評価する。評価の結果、問題点が洗い出された場合は、その解決方策を検討し、その方策を施行し、再度結果を評価する。以下、具体的な作業について説明する。超高並列を目指した場合の分析・評価においては、ターゲット問題実行時の超高並列時に以下の4点を評価する事が重要である。(a) 処理の中に非並列部が残っていないか、残っている場合にはターゲット問題実行時に問題にならないか、(b) 高並列においてロードバランス（負荷分散）が悪化しないか、(c) ターゲット問題実行時に隣接通信時間が全体実行時間の内、どの程度の割合を占めるか (d) 一般的に高並列が増大すれ

1：全体の問題規模を一定にして並列数を増やし測定する方法  
2：1プロセッサで実行する問題規模をほぼ一定に設定し、並列数を増やし測定する方法

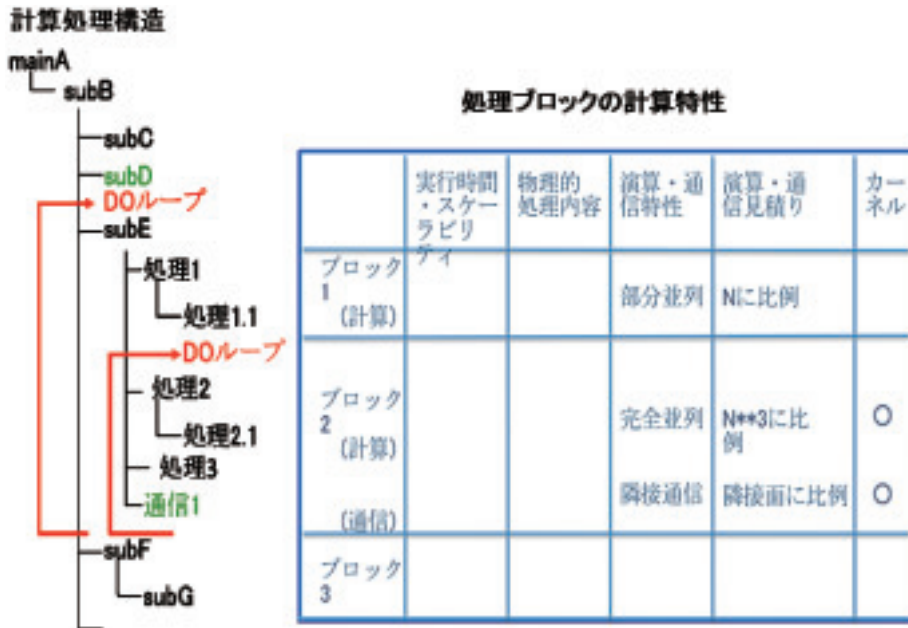


図3 並列特性分析の例

ば、大域通信時間は増大する。大域通信時間が増大した結果、最終的なターゲット問題実行時に大域通信時間が実行時間の内のどの程度の割合を占めるか、等である。

これらの分析・評価のために、以下の手順で作業を実施する(図4)。まず、ターゲット問題を定める。つぎに、1プロセッサの問題規模がターゲット問題と同程度になるような、100並列程度のテスト問題を作成する。次のステップでは、このテスト問題で実行時間・ロードインバランス・隣接通信時間・大域通信時間を測定・評価する。ここで問題が発見されれば、数並列から、100並列程度まで、ストロングスケールで並列特性を測

定し、問題点を見つけ解決する。100並列程度まで問題が解決した段階で、現状で使用可能な実行環境(計算機)を使用し、100並列程度/1000並列程度/数千並列程度と段階的に並列数を上げ、できる限り高い並列度までウィークスケールで大規模並列の挙動を測定する。そこで、先に示した4点について評価し、並列性能を確認する。アプリケーションの中には、ウィークスケール測定が難しいプログラムもあるが、その場合は個別に評価方法を工夫する。

ここまでの測定と並行し、演算処理ブロック毎に計算特性を把握し演算量に関する評価モデルを作成する。また演算処理ブロック毎

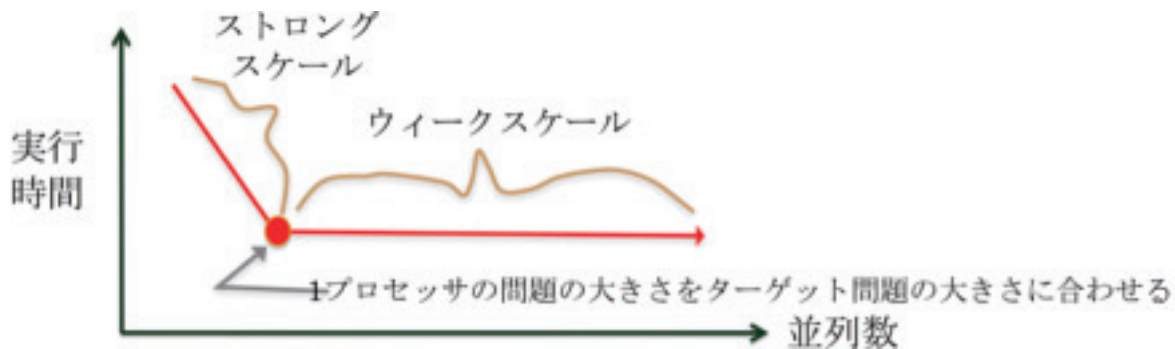


図4 高並列化作業での性能評価

に通信特性を把握し通信回数・通信量の評価モデルを作成する。このような演算特性と通信特性が、定量的に評価されれば、次世代スーパーコンピュータでの演算時間・通信時間、高並列時での実行時間・通信時間を予め見積もることができ、演算挙動・通信挙動を予測・評価できる。

#### (E) 高性能化策の実装

(C) の評価結果で決定した単体性能向上策の試行・試作結果と (D) の評価結果で決定した高並列化の試行・試作結果を合わせて現行のスーパーコンピュータで動作するよう実装する。この作業は、通常のソフトウェアの開発・デバッグ作業と同様であり、作業量は多くなるものと予想される。

#### (F) 次世代スーパーコンピュータでのアプリケーションコードのチューニング (実機調整)

上記まで実施されたアプリケーションコードを次世代スーパーコンピュータ上 (実機) で実行させ、実行性能を確認し、さらに性能チューニングを施す。その後、実機で演算時間・隣接通信時間・大域通信時間を実測し、(A) (C) (D) で実施した評価結果と比較を行い、評価結果と著しい差異がある場合はその原因を究明し対策を実施し、実機上での性能を向上させる。

### 6. 現在の適用状況

5. に示した6本の先行的アプリケーションについては、現在、並列特性分析と計算・通信カーネルの評価が終了している。地球科学分野のNICAMとSeism3Dについては、並列特性分析の結果、単体性能の向上を重要視し、現在は単体性能向上のための開発作業を主に展開するとともに、数千プロセスコアまでの高並列挙動の把握・結果の評価を実施中である。ナノ分野のPHASEとRSDFTについては、並列特性分析の結果、現状では、数万のノードを備える次世代スーパーコンピュ

ータでの高並列化は難しいため、現状の並列化手法に、もう一つの並列化の観点を加える開発作業を実施している。合わせて単体性能を向上させるための主要計算部の行列・行列積への書き換えを実施している。工学分野のFrontFlow/Blueについては、並列特性分析の結果、単体性能の向上が重要であるため、現在は非構造格子を処理するために導入されているリストアクセスの高速化を含む単体性能向上のための開発作業を主に実施している。合わせて、高並列化を実現する上では一番の性能の阻害要因となり得る大域通信の挙動を含め、数千プロセスまでの高並列挙動の把握・結果の評価を実施している。物理分野のLatticeQCDについては、並列特性分析の結果、通信の回数が多い事が問題であることが分かっており、通信回数を減らすと共に通信トポロジーを意識した高度な並列化手法を開発している。また単体性能の面では、性能特性を把握すると共に、単体性能向上策の策定を実施している。

### 7. まとめ

理化学研究所では次世代スーパーコンピュータシステムを開発中である。この中で、国産技術で汎用型の次世代スーパーコンピュータのシステムの性能を十分生かすため、アプリケーションコードの高性能化の研究開発を展開中であり、本稿ではその概要を紹介した。これまで、様々な分野・計算特性をもつ6本の先行アプリケーションを選定し、(A) 並列特性分析 (B) 計算・通信カーネル評価 (C) 単体性能向上策決定 (D) 高並列化 (E) 高性能化策の実装 (F) 実機チューニング、というこれまでの経験を体系化したアプリケーションプログラム高性能化手法に則り、アプリケーションの高性能化研究開発作業を進めている。

運用開始に向けたアプリケーションの準備作業は、今後、実機利用を睨んだステップに



進み、アプリケーションの性能高度化をさらに本格化し、次世代スーパーコンピュータのシステム性能を実証していく予定である。これらの準備・開発研究の中で蓄積した計算科学、計算機科学の統合的な経験・知見は、詳細に定量評価され、また体系化され、今後のエクサ級スーパーコンピュータへ応用されるであろう。

#### 参考文献

- [1] Satoh, M., T. Matsuno, H. Tomita, H. Miura, T. Nasuno, S. Iga, (2008) : Nonhydrostatic Icosahedral Atmospheric Model (NICAM) for global cloudresolving simulations. *Journal of Computational Physics*, the special issue on Predicting Weather, Climate and Extreme events, 227, 3486-3514, doi:10.1016/j.jcp.2007.02.006.
- [2] Furumura, T. and L. Chen, Parallel simulation of strong ground motions during recent and historical damaging earthquakes in Tokyo, Japan, *Parallel Computing*, 31, 149-165, 2005.
- 古村孝志, 差分法による3次元不均質場での地震波伝播の大規模計算, *地震*, 61巻, S83-S92, 2009.
- [3] <http://www.ciss.iis.u-tokyo.ac.jp/riss/>
- [4] Jun-Ichi Iwata, Daisuke Takahashi, Atsushi Oshiyama, Taisuke Boku, Kenji Shiraishi, Susumu Okada, *Journal of Computational Physics* 229, 2339-2363 (2010).
- [5] PACS-CS Collaboration (S.Aoki, K.-I.Ishikawa, N.Ishizuka, T.Izubuchi, D.Kadoh, K.Kanaya, Y.Kuramashi, Y.Namekawa, M.Okawa, Y.Taniguchi, A.Ukawa, N.Ukita and T.Yoshie), "2+1 Flavor Lattice QCD toward the Physical Point", *Physical Review D* 79 (2009) 034503.