[大学 ICT 推進協議会 2015 年度年次大会論文集より転載]

暑熱環境下体温上昇解析コードの

スーパーコンピュータ SX-ACE での高速化と並列化

佐々木 大輔 1),山下 毅 1),西尾 涉 2),浅野 陽平 2),平田 晃正 2)

江川隆輔³⁾,小林広明³⁾

1) 東北大学 情報部 情報基盤課

2) 名古屋工業大学

 第北大学 サイバーサイエンスセンター スーパーコンピューティング研究部 d-sasaki@cc.tohoku.ac.jp

概要:東北大学サイバーサイエンスセンターでは、大規模科学計算システムを最大限活用 するために計算科学者と本センターの計算機科学者が連携しながら、プログラムの高速化 技法の研究・開発に取り組んでいる.本稿では、名古屋工業大学の研究グループが開発し てきた暑熱環境下体温上昇解析コードのベクトル型スーパーコンピュータ SX-ACE での高 速化について紹介する.現在ワークステーションで数時間程度かかっている解析時間を数 十秒程度に短縮できれば、様々な環境を模した解析を即時的に処理でき、熱中症の注意喚 起等への展開が期待できる.



図1 スーパーコンピュータ SX-ACE

1 はじめに

東北大学サイバーサイエンスセンター(以下,本 センター)は、全国共同利用機関として大規模科 学計算システムの運用と、本システムを最大限に 活用可能なコードの高速化技法や新しいシミュレ ーション技術の研究・開発に取り組んでいる.本 センターでは 1997 年からさまざまな分野におけ る実アプリケーションの高速化の支援を計算科学 分野の利用者との共同研究を通じて行っている [1].また、センター独自の共同研究に加え、全国 の情報基盤センター等と連携して、学際大規模情 報基盤共同利用・共同研究拠点(JHPCN)や革新的 ハイパフォーマンス・コンピューティング・イン フラ(HPCI)を構成し,多様なニーズに応える計算 環境の提供も行っている.以上のように本センタ ーでは,利用者である計算科学者と本センターの 計算機科学の専門家が密に連携しながら,科学・ 工学の恒常的な進歩を支える共同研究,利用者コ ードの高速化支援活動を推進している.

本稿では、名古屋工業大学の研究グループが開 発している暑熱環境下体温上昇解析コード[2]の 高速化について紹介する.

2 スーパーコンピュータ SX-ACE

本センターに導入されているスーパーコンピュ ータ SX-ACE を図 1 に示す. SX-ACE の CPU はこれ までのベクトルプロセッサと同様に,高ベクトル 演算性能と高メモリバンド幅を継承している.ま た,SX シリーズ初のマルチコア化により,4 コア で構成され最大ベクトル演算性能は 256GFLOPS で ある.各コアには容量が 1,024KB に拡張された ADB

(Assignable Data Buffer)が搭載され, ADB と コア間のメモリバンド幅は 256GB/sec を有する. データが ADB 経由でアクセスされる場合は,メモ リバンド幅は 4Bytes/FLOP となり,メモリ負荷の 高いアプリケーションでも高い実行効率で実行可 能となっている.また,単一コアで演算を実行す る場合も 256GB/sec のメモリバンド幅が利用でき, 4Byte/FLOP での実行が可能となっている.SX-ACE は高ベクトル演算性能,高データ供給性能により, 高い実行性能を得ることができる.

本センターのSX-ACEは2,560ノードで構成され ている.各ノード間は最大 4GB/sec×2(双方向) で接続された2段ファットツリーネットワークで 構成され,システム全体の性能は 706.6TFLOPS と なっている.利用者には,最大1,024ノードの大 規模な実行環境を提供している.

3 暑熱環境下体温上昇コードの概要

近年の地球温暖化に加え,2011年の東日本大 震災以降の節電要求と相まって,2011年以降, 熱中症による搬送者数は増加傾向にあり,2014 年にその数は全国で約58,000人に達したと言わ れている.熱中症に関する啓発活動は,温熱生理 (特に,スポーツ医学)あるいは救急医療に基づ く考察がほとんどであり対処療法的である.また, 啓発活動も展開される中,従来の「気温・湿度」 に加え,「暑さ指数」なども導入されているが, その認知度は高いとは言えない.

また,熱中症のリスクは性別・年齢のみならず, 身長・体重等の人体の個体差と置かれた環境に大 きく依存することが知られている.しかし,現状 では、年齢・性別の違いによるウェブ等による告知に留まっており、これらを人体の個体差とその変化を考慮した熱中症リスクの評価は行われていない.従って、体の個体差とその変化を考慮した高い精度を有する熱中症リスクを評価できれば、一般的な啓発活動のみならず、熱中症のリスク管理という新しい領域を開拓できると考えられる.

名古屋工業大学の研究グループでは,部位ごと の血液温度差を考慮できる混成熱解析手法を開発, 精巧な数値人体モデルに適用し,測定値との比較 により,その有効性を確認してきた.解析には, 図 2(a)の国立研究開発法人情報通信研究機構 (NICT)の成人男性[3]に相当する日本人の解剖学 的数値人体モデル[4]を使用している.これらのモ デルは皮膚,筋肉,脂肪,骨,骨髄液,心臓,水 晶体,血管など 51 種類の組織から構成されてお り, 2mm の分解能を有している.図 2(b)のよう に血液温度を考慮するため,モデルの各部位ごと に分割して計算している.



図2 数値人体モデルの外観(a)と部位分割(b)の定義図



図3 解析のフローチャート

暑熱環境下体温上昇解析コードのフローを図 3 に示す.本コードは実行すると,暑熱環境下にお ける熱定常状態の初期温度分布,人体モデル,発 汗モデル,外気温などのデータを読み込む.読み 込みが完了すると,発汗率や血流量の変化,体温 調整機能を考慮して,人体の温度変化を計算す る.

暑熱環境下体温上昇コードの解析例を図4に示 す.図は、3時間暑熱ばく露(37℃)を行った際 の体表面温度を表している.



図4 暑熱ばく露における表面温度上昇の解析結果

4 暑熱環境下体温上昇コードの高速化 4.1 SX-ACE での初期性能解析

名古屋工業大学の研究グループが開発した暑熱

環境下体温上昇コードの初期性能解析結果を表1 に示す.解析には、SX-ACEの簡易性能解析ツール FTRACEを用いた.

初期性能解析の結果,温度上昇の計算ルーチン (サブルーチンA)とファイルの入出力処理ルーチ ン(サブルーチンB)の実行時間が全体の約98%を 占めていたため,この2つのサブルーチンを高速化 することを検討した.また,コア性能の向上を目 的とした高速化と,将来の大規模並列実行を見据 えた,コードの並列化にも取り組んだ.

表1 初期性能

PROC.NAME	FREQUENCY	EXCLUSIVE	MFLOPS	V.OP	AVER.
		TIME[sec](%)		RATIO	V.LEN
サブルーチンA	300	3371.986(89.9)	193.7	14.8	216.5
サブルーチンB	1	325.450(8.7)	1.4	0.36	224.3
サブルーチンC	300	25.284(0.7)	7250	99.33	222
サブルーチンD	11	14.385(0.4)	154.6	41.36	219.9
サブルーチンE	300	13.450(0.4)	14626	99.26	223.6
サブルーチンF	1	0.885(0.0)	180.1	94.87	217.6
サブルーチンG	1	0.325(0.0)	3271.3	98.99	229.1
サブルーチンH	1	0.184(0.0)	0	99.1	218.6
total	915	3751 949(100 0)	276.4	45.62	221.5

以下では本コードに適用した高速化について述 べる.シングルコアでの高速化では,効率的に高 速化作業を行うため,反復回数を 300 回とし実行 時間を短縮した.並列化後は実際に研究で使用さ れている反復回数 5,400 回とした.

4.2 シングルコアでの高速化 4.2.1 ファイル入出力の高速化

サブルーチン B と入力データを解析すると,入 カデータがテキスト形式になっていることと,三 次元の人体モデルデータを読み込む際,2mm に分 割されているデータを,ループが実行される度に 読み込むようになっていたため,これが処理を遅 くする原因となっていることが判明した.ファイ ルの入出力を行う際,一般的にバイナリ形式で読 み込みを行う方がテキスト形式で読み込みを行う よりも高速となる.そのため,入力データをテキ スト形式からバイナリ形式に変換するコードを開 発し,本コードの入力データをバイナリ化した. バイナリ化することでファイルのサイズも半分程 度まで小さくなった.また,データを一括して読 み込むようにファイルの読み込み処理を変更した. 高速化前と後の実行時間を表2に示す.ファイ ル入出力の実行時間がテキスト形式では約325秒 かかっていたが,入力データをバイナリ形式にし, なおかつデータを一括して読み込むようにするこ とにより1秒以下にすることができた.

衣 ムーリ ノフレー ノ ノ DVフ 同 医 化 りろれま	表 2	サブル	ーチン	Bの福	高速化	の効果
-------------------------------	-----	-----	-----	-----	-----	-----

PROC.NAME	FREQUENCY	EXCLUSIVE	MFLOPS	V.OP	AVER.
		TIME[sec](%)		RATIO	V.LEN
before	1	325.450(8.7)	1.4	0.36	224.3
after	1	0 138(0 0)	844 6	99.35	2179

4.2.2 ベクトル化による高速化

次にサブルーチン A の高速化について検討した. 表1から,サブルーチン A はベクトル化率が約14% と非常に低い値となっている.SX-ACE のベクトル プロセッサは,複数のデータを一括して演算を行 うベクトル演算が可能であり,配列のそれぞれの 要素に同一の演算を行う計算に適している.ベク トルプロセッサの性能を引き出すためには,スカ ラ処理での実行時間とベクトル処理が可能な実行 時間の比であるベクトル化率を高めることが重要 である.ベクトル化率が 90%を超えると急速に性 能が向上するため,ベクトル化率を100%に限りな く近づけることが重要となる.

対象のサブルーチンを解析すると3重ループ構 造となっており,図5の前半では,後半の計算で 必要な変数の値を決めるための処理が行われてい る.この変数がスカラ型となっているためベクト ル化阻害の要因の1つとなっていた.また,図5 の後半では,別のサブルーチンを呼びだす処理が あり,これもベクトル化阻害の要因となっていた.

以上のベクトル化阻害要因を取り除くため,図 6 に示す通り,スカラ型の変数を配列変数に変更 し,サブルーチン呼び出しをインライン展開した.

高速化前と後の性能を表3に示す.サブルーチンAはベクトル化率が約99%になり,約22倍の性能向上を得ることができた.



図5 オリジナルコード



図6 高速化後コード

表3 サブルーチンAの高速化の効果

PROC.NAME	EXCLUSIVE	MFLOPS	V.OP	AVER.	VECTOR
	TIME[sec](%)		RATIO	V.LEN	TIME
before	3371.986(89.9)	193.7	14.8	216.5	12.55
after	147.017(73.1)	6448.5	99.16	196.4	138.76

4.2.3 シングルコアでの高速化後の性能

高速化を行ったコードをシングルコアで実行し た際の性能を図7に示す.棒グラフはコードの実行 時間,折れ線グラフはベクトル化率を表している. サブルーチンAとサブルーチンBに前項までに示し た最適化を施す事で,コード全体のベクトル化率 が45%から99%に向上し,約18倍の性能向上を実現 している.





4.3 コードの並列化

本コードはベクトル化等を行うことでシングル コアでの性能を高めてきた.更なる性能の向上の ためには、ネットワークに接続される複数のノー ドを利用し、多数のコアで計算をする並列化を検 討する必要がある.並列化にはノード内のコアレ ベルで MPI (Message Passing Interface)並列を 行う Flat MPI, ノード内はタスク並列,ノード間 は MPI 並列の Hybrid MPI がある.ノード内並列 にはコンパイラによる自動並列を利用した.

本節では先に述べたベクトル化を行ったコード の3重ループについて Flat MPI, Hybrid MPI によ る並列化を行い,性能の比較を行った.今回の入 カデータは,図8のループ1の反復回数は160回, ループ2の反復回数は320回となっている.

DO K=1,MODELZ	ループ1
DO J=1,MODELY	ループ2
DO I=1,MODELX	
!体温上昇計算	
END DO	
END DO	
END DO	

Flat MPIでは MPI 並列による分割を図8のルー プ1で行った. Hybrid MPIでは,ループ1を MPI 並列で分割し,分割後のループ1をさらに自動並 列した.また,利用するコア数を同一にすること で両並列化の効果を比較することとした.

並列化後の実行時間を図 9 に示す. 32 コアま での利用の場合は Flat MPI (194.9sec) が高速と なっている. 40 コアを超えたあたりで, Flat MPI と Hybrid MPI の差は徐々に縮まり, 160 コアの場 合は Hybrid MPI (59.5sec) の方が高速となった. この原因は, Flat MPI はプロセス数の増加に伴い プロセス間のデータ通信のオーバヘッドが増加し ためと考えられる.



4.4 並列化後の全体の性能

並列化前後の性能向上比を並列数毎にまとめた 図 10 に示す. 図の点線はコア数を n 倍にしたとき に性能向上比が n 倍になる理想値を表している. Hybrid MPI で 40 ノード 160 コア利用した場合, 並列化前の反復回数 5,400 回のシングルコア実行 (3,552sec)に比較し,約 60 倍の性能向上が得ら 今回実装した Hybrid MPI では図 8 のループ1を 分割し1プロセス4タスク並列で実行しているた め,SX-ACE を最大40ノードまでしか利用できな い.そこで,将来の大規模化を見据え図8のルー プ2を自動並列し,160プロセス,4タスク並列の 計640コアを利用することも検討した.640コア で実行した場合,実行時間は約38秒となりもっと も高速となったが、性能向上比は理想値の約14% 程度となった.この原因として,今回のMPI 並列 による人体モデルの分割方法は,胴体付近は処理 量が大きく,腕などは比較的処理量が小さいため, プロセス間の処理量のインバランスが発生してい ると考えられる.更なる並列化とインバランスの 解消による高速化は今後の課題である.

5 まとめ

本稿では暑熱ばく露における人体の表面温度上 昇の解析に、本センターが今までに取り組んでき た高速化支援で得られた高速化技法を適用し高速 化を行った事例について紹介した.本センターの 提供しているスーパーコンピュータ SX-ACE の性 能を最大限に引き出すためには、ベクトル化率を 100%に限りなく近づくよう高める必要である.ま た、SX-ACE は従前のベクトル型スーパーコンピュ ータより、さらにノードを多数接続することで性 能の向上を図る構成となっている.従って、今後 の高速化支援においては、シングルコアでの高速 化に加え、複数のノードのコアを利用する並列化 を行うことで性能を引き出していくことが重要と なる.

研究の最前線で開発が行われている暑熱環境下 体温上昇の解析コードの性能解析情報に基づき高 速化を行い,160 コア利用で約60倍の性能向上が 得られた.各プロセス間の処理量のインバランス の改善により,更なる並列化効率の向上が今後の 課題となっている.

本コードは,高速化により数時間程度を要する シミュレーションを数十秒程度で計算することが 可能となった.今後,熱中症リスクのリアルタイ ム評価・予測への応用が期待される.

6 参考文献

東北大学サイバーサイエンスセンター,高速化推進研究活動報告,第6号,p8-12,(2015).
西尾渉,浅野陽平,佐々木大輔,山下毅,平田晃正,江川隆輔,ベクトルスーパーコンピュータSX-ACEによる暑熱環境下体温上昇の高速解析,信学技法,Vol.115, No.213, p43-48, 2015.
T. Nagaoka, S. Watanabe, K. Sakurai, E. Kunieda,

M. Taki and Y. Yamanaka, S. Momose, Y. Isobe, : "Development of realistic high-resolution whole-body voxel models of Japanese adults male and female of average high and weight, and application of models to radio-frequency electromagnetic-field dosimetry", Phys. Med. Biol., vol. 49, pp. 1-15, (2004).

[4] T. Nagaoka, E. Kunieda, and S. Watanabe : "Proportion-corrected scaled voxel models for Japanese children and their application to the numerical dosimetry of specific absorption rate for frequencies from 30 MHz to 3 GHz", Phys. Med. Biol., vol. 53, no. 23, pp. 6695-6712, (2008).