

## マルチコアプログラミングコンテスト「Cellスピードチャレンジ2007」実施報告

吉瀬 謙 二<sup>†1</sup> 吉見 真 聡<sup>†2</sup>  
片桐 孝 洋<sup>†3</sup> 中村 宏<sup>†4</sup>

情報処理学会の計算機アーキテクチャ研究会、組込みシステム研究会、ハイパフォーマンスコンピューティング研究会の3つの研究会の主催で、先進的計算基盤システムシンポジウム SACSYS2007の併設企画として、マルチコアプログラミングコンテスト「Cellスピードチャレンジ2007」を開催した。決められた課題(ちょっと複雑なソートング)の処理速度を競う規定課題部門と自由に設定した課題に取り組む自由課題部門という2つの部門を設け、合計で65チームが参加する盛況なプログラミングコンテストとなった。本稿はCellスピードチャレンジ2007の実施報告である。

### The Report on Multicore Programming Contest Cell Speed Challenge 2007

KENJI KISE,<sup>†1</sup> MASATO YOSHIMI,<sup>†2</sup> TAKAHIRO KATAGIRI<sup>†3</sup>  
and HIROSHI NAKAMURA<sup>†4</sup>

This is the report on multicore programming contest "Cell Speed Challenge 2007". Cell Speed Challenge 2007 was held by three IPSJ special interest groups, Special Interest Group on Computer Architecture(ARC), Special Interest Group on Embedded Systems(EMB), and Special Interest Group on High Performance Computing(HPC). We provide two categories for the contest. One is a free theme category and the other is specific theme (slightly complicated version of sorting) category. It became a prosperous programming contest in which 65 teams are participated.

#### 1. はじめに

情報処理学会の計算機アーキテクチャ研究会、組込みシステム研究会、ハイパフォーマンスコンピューティング研究会の3つの研究会の主催で、先進的計算基盤システムシンポジウム SACSYS2007の併設企画として、マルチコアプログラミングコンテスト「Cellスピードチャレンジ2007」を開催した。本稿は、その実施報告である。

Cell Broadband Engine(Cell BE)<sup>1)</sup>は、高いピーク性能、独特のアーキテクチャ、将来性などから高い注目を集めている。その構成は、図1に示すように、PPEと呼ばれるPowerPCアーキテクチャの汎

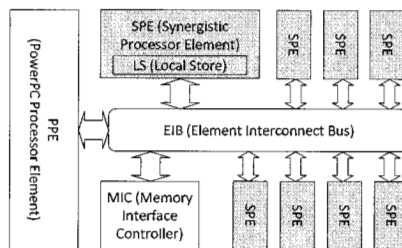


図1 Cell BEのブロック図。PPEと8個のSPEをバスで接続するヘテロジニアスなチップマルチプロセッサ。

用CPUコアを1個と、SPE(Synergistic Processor Element)と呼ばれるSIMD構成の独特のコア8個をリング型のバスで接続するヘテロジニアスなチップマルチプロセッサとなっている。

Cell BEの高い性能を引き出すための鍵となるSPE(図1の灰色の部分)は、動的な分岐予測を排除してソフトウェアのヒントを必要とする点や、キャッシュを排除して効率的なDMA転送を必要とする点などにおいてプログラマにとって挑戦的なアーキテクチャとなっている。また、実効性能をピーク性能に近づけるためには、効率的なSIMD化や多数のコアを用いた効率的な並列化が必要となる。

†1 東京工業大学 大学院情報理工学研究所  
Graduate School of Information Science and Engineering,  
Tokyo Institute of Technology  
†2 慶應義塾大学 大学院理工学研究所  
Graduate School of Science and Technology, Keio University  
†3 東京大学 情報基盤センター  
Information Technology Center, The University of Tokyo  
†4 東京大学 先端科学技術研究センター  
Research Center for Advanced Science and Technology,  
The University of Tokyo

このような挑戦的なアーキテクチャを対象とするプログラミングコンテストを開催することで、特に、チップマルチプロセッサの並列プログラミングに対するノウハウを蓄積するとともに、直面する課題を明確にすることを本プログラミングコンテストの実施意義の一つとした。

## 2. コンテストの設計と実装

### 2.1 コンテストの実施体制

コンテストを実質的に運営する組織として、20名のメンバーから構成される実行委員会を組織した。重要な決定事項の多くは、この実行委員会の承認を経て進められた。実行委員が集まってミーティングをおこなったのは2006年9月の1回のみで、その他は電子メールやテレビ会議システムを用いて議論した。

実行委員会に適切なアドバイスを与える上部の組織として4名のメンバーから構成されるアドバイザー委員会を組織した。

これらの委員会に加えて、実行委員の中から、参加チームが挑戦する課題の作成を担当する8名のメンバーを募り、問題作成ワーキンググループを組織した。このワーキンググループが主体となって、課題の検討およびツールキットの作成や入力データセットの作成などの作業をおこなった。

### 2.2 コンテストの日程

決められた課題の処理速度を競う規定課題部門、自由に設定した課題に取り組む自由課題部門という2つの部門を設けて準備を進めることとした。これらコンテストの枠組みの多くは過去の運営実績のあるグリッドチャレンジにおける方式を参考にした。

規定課題部門の問題作成に要する期間、Cellオンラインの利用開始の時期、参加条件を検討するための期間、十分なプログラミング時間の確保といった幾つかの制約を考慮して、次に示す日程に従ってコンテストを開催した。

2006/11/29: 規定課題概要の公開  
2006/12/08: 参加受付の開始  
2006/12/19: Cellオンラインの利用開始  
2006/12/29: お試し版ツールキットの公開  
2007/02/02: 参加受付の締切  
2007/02/09: 規定課題 詳細とツールキットの公開  
2007/02/09: 規定課題 予選ラウンド開始  
2007/03/09: 規定課題 予選ラウンド終了、プログラム等の提出  
2007/03/09: 自由課題 終了、ドキュメント締切りは16日  
2007/03/14: 規定課題 決勝ラウンド開始  
2007/03/28: 規定課題 決勝ラウンド終了、プログラム等の提出  
2007/05/24: SACSIS2007にて入賞者の表彰

規定課題部門では、途中結果を公開することでコンテストが盛り上がることを期待して、3月上旬にプログラムを提出する予選ラウンドと3月下旬にプログラムを提出する決勝ラウンドに分けて開催することとした。あらかじめ公開している練習問題と呼ばれる簡潔

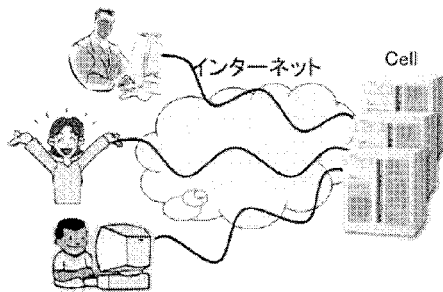


図2 Cellリファレンスセットの利用イメージ。Cellオンライン (Cellスピードチャレンジ2007) ユーザーマニュアルから引用。

な問題を正しく計算できたチームのみが予選ラウンドを通過して決勝ラウンドに進出できるシステムとした。

自由課題部門は12月中旬からスタートして、規定課題部門の決勝ラウンドが始まる直前に終了するように設定した。

12月中旬にCellオンラインの利用を開始してから約3ヶ月間のプログラミング期間を確保することができた。また、12月に設定した日程から大幅な変更を加えることなくコンテストを実施できた点は良かったと考えている。

### 2.3 Cellリファレンスセットを用いた実施環境

参加チームは株式会社東芝の運営するCell Users' Group向け「Cellオンライン」サービスにログインしてプログラミングをおこなう。このサービスはネットワーク経由でCell BEを搭載するCellリファレンスセット<sup>2)</sup>と呼ばれる計算機を利用できるサービスである。図2にCellリファレンスセットの利用イメージを示す。図右の3台の筐体がCellリファレンスセットである。Cell BEが集積するSPEは8個だが、Cellリファレンスセットにおいて利用できるSPEの数は7個である。

複数の参加者(1名でも問題はない)がチームを構成して参加申し込みをおこなうが、Cellオンラインのアカウントは1チームに1つを提供した。今回は、大規模な計算機システムで利用されるようなバッチシステムは準備しなかった。コンテストでは5台のCellリファレンスセットが独占的に利用できたことから、全てのCellリファレンスセットが占有されることでプログラムの実行が待たされるようなケースはほとんど発生しなかった。

コンテストの期間はPLAYSTATION3(PS3)が発売<sup>\*</sup>されて間もないということもあり、LinuxをインストールしたPS3を用いて開発をおこなう例は少なかった様である。ただし、自由課題では、PS3を用い

<sup>\*</sup> PS3の発売日は2006年11月11日。その後しばらくは入手が難しい期間が続いた。

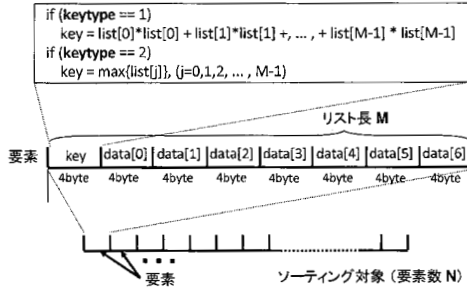


図3 ちょっと複雑なソートングのデータ構造。要素はキーとデータのリストから構成される。要素数  $N$ 、リスト長  $M$ 、キーの計算方法  $keytype$ 、入力データの傾向により様々な入力データを準備した。

て評価をおこなったチームも入賞していた。

### 3. 2つの課題部門の概要と参加チーム

#### 3.1 規定課題部門

規定課題部門では、Cell BE を用いて決められた課題をどれだけ高速に解くことができるかを競う。規定課題は「ちょっと複雑なソートング」とした。多数の要素の系列が入力として与えられたときに、これら要素に含まれるキーの値の大小によって要素を並び替える処理がソートングである。これに、キーを計算する処理を追加したものがちょっと複雑なソートングである。

図3にちょっと複雑なソートングのデータ構造を示す。ソートングの対象は要素の配列で、要素数を  $N$  とする。要素には1つのキーとある長さをもつリストが含まれる。リスト長を  $M$  とする。これらキーとリストは単精度の浮動小数点数である。今回の課題では、キーの値は与えられておらず、リストからキーを計算することとした。計算方法はリストの二乗和あるいは最大値のどちらかで、これは  $keytype$  により指定される。これら、 $M$ 、 $N$ 、 $keytype$  と入力データの傾向により様々な問題を準備した。

Cell BE の高い性能を引き出すための鍵は SPE のプログラミングにある。このため、参加チームは SPE のプログラムのみを作成することとして、PPE のプログラムは実行委員会が提供するコードからの変更を許可しないこととした<sup>☆</sup>。

チームの全メンバが、高校、高専、大学、大学院またはこれに準ずる学校の学生であることを規定課題部

<sup>☆</sup> PPE のプログラミングを許すかどうかは問題作成ワーキンググループにおいて論争となった。PPE のコードに初期化などの基本的な機能を記述しておくことで一般的な並列化に支障がないこと、SPE のコーディングのみに限っても簡単ではないので参加チームの負担を軽減することを主な理由として、PPE のコードの変更を禁止した。5章で議論するように、SPE のコーディングのみでも十分に難易度の高いものになったようである。

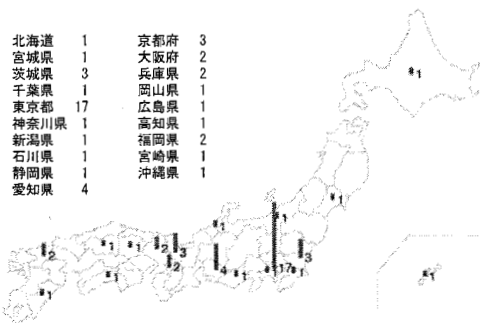


図4 規定課題部門における参加登録チームの分布(後に1チームが自由課題部門に移動)。北海道、沖縄を含む各地から44チームが参加した。

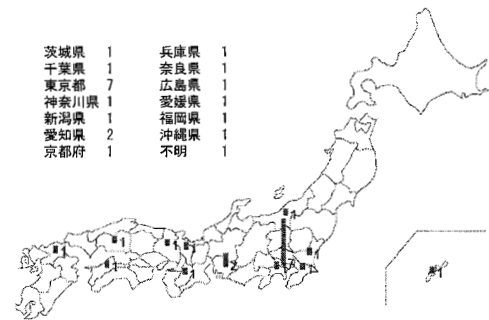


図5 自由課題部門における参加登録チームの分布。21チームが参加した。

門の参加資格の一つとした。図4に、規定課題部門における参加登録チームの分布を示す。北海道、沖縄を含む各地から44チームの参加を受理した。

#### 3.2 自由課題部門

自由課題部門では、Cell BE を利用してこれに興味を持つ人々が結果を共有できる興味深い実験や、既存のアプリケーションの移植(ポータリング)、プログラミングを容易にするツールの実装など、参加チームが自由に課題を設定して取り組む部門である。

自由課題部門の参加資格は学生に限定せず、大学の教員や企業の開発者の参加を可能とした。図5に、自由課題部門における参加登録チームの分布を示す。自由課題部門では21チームの参加を受理した。

### 4. 上位入賞チームとコンテストの成果物

参加チームの数などを考慮して、規定課題部門では3チーム、自由課題部門では2チームを入賞として選出した。

5チームの入賞者には、株式会社ソニー・コンピュータエンタテインメントからPS3が贈られた。加えて、1位の2チームにはTOSHIBA ハイビジョン液晶テレビ

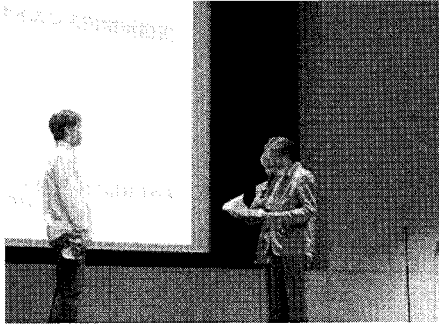


図 6 SACSIS2007 における Cell スピードチャレンジ 2007 表彰式の様子。学術総合センター講堂 一橋記念講堂にて。

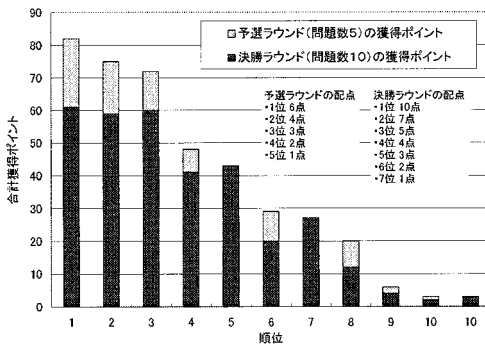


図 7 規定課題部門における獲得ポイント。予選ラウンドと決勝ラウンドの獲得ポイントの合計で順位を決めた。ただし、決勝ラウンドのポイントが多くなるように配点を調整している。

REGZA 47Z2000 が、2位の2チームには TOSHIBA HD DVD プレーヤー HD-XA2 が、規定課題部門の3位のチームには TOSHIBA W 録 VARDIA RD-S300 が (株) 東芝セミコンダクター社から贈られた。

これら豪華な賞品に加えて、それぞれの部門の1位のチームには、情報処理学会 コンピュータサイエンス領域奨励賞が贈られた。図 6 は SACSIS2007 における Cell スピードチャレンジ 2007 表彰式の様子である。

#### 4.1 規定課題部門の上位入賞チーム

規定課題部門では、予選ラウンドと決勝ラウンドの獲得ポイントの合計で順位を決めた。配点と獲得ポイントを図 7 にまとめる。予選ラウンドでは 5 個の問題を出題し、各問題の 1 位が 6 ポイントを獲得する。決勝ラウンドでは 10 個の問題を出題し、各問題の 1 位が 10 ポイントを獲得する。

規定課題部門 1 位は、予選ラウンド、決勝ラウンドともに最高得点を獲得したチーム名 ylab(京都大学 花岡俊行) が受賞した。アルゴリズムとしてバイトニックソートを採用し、高速化のために DMA ダブルバッファリングや SIMD 命令による最適化を施している。規定課題部門 2 位は、チーム名 europa(東京大学

Luong D. Hung) が受賞した。アルゴリズムとして並列基数ソート (parallel radix sort) を採用し、Cell BE に適したバッファリングなどの最適化を施している。

規定課題部門 3 位は、チーム名 フツーにはえー★ (大阪府立工業高等専門学校 藤原賢二, 木下正喬, 浜田悠樹, 岩見宏明) が受賞した。こちらもアルゴリズムとして基数ソートを採用し、SIMD の利用、データ局所性の向上といった最適化を施している。

#### 4.2 自由課題部門の上位入賞チーム

自由課題部門では、参加チームが提出した 4 ページ程度のドキュメントを実行委員が採点することで上位入賞チームを選出した。

自由課題部門 1 位は、チーム名 HORN(千葉大学 柘植宗範) による「Cell BE における計算機合成ホログラムのソフトウェア開発」が受賞した。計算機合成ホログラムのシステムを Cell BE を用いて構築し、CPU と比較して約 29 倍という高い速度向上を達成している。このシステムを用いて作成した恐竜が動くホログラムのムービーが再生され、会場を大いに盛り上げた。

自由課題部門 2 位は、チーム名 ひびきの神経細胞 (九州工業大学 五十嵐潤) による「Cell Broadband Engine™ による神経回路網」が受賞した。計算論的神経科学において Cell BE による並列計算が有効となることを明かにしている。

#### 4.3 コンテストの成果物

受賞した各チームによる 4 ページ程度の開発記録をまとめたドキュメントと、SACSIS2007 における受賞チームの講演スライドは Cell Users' Group のホームページなどからダウンロードできるようになる予定である。

規定課題部門の参加チームには、GNU GENERAL PUBLIC LICENSE Version 2 に基づいて決勝ラウンドのためのソースコードを公開資料としてご提供してもらった。これらのソースコードは Cell スピードチャレンジのホームページなどからダウンロードできる。教育や研究などの目的で活用していただきたい。

### 5. コンテストを終えて

#### 5.1 ちょっと複雑なソーティングのコード量

規定課題部門でポイントを獲得した 11 チームのソースコードの行数を図 8 に示す (ポイント数が同じために 10 位が 2 チームとなっていることに注意)。図に示す行数にはコメントと空白は含まれていない。これらは Resource Standard Metrics を用いて計測した。

図 7 に示したように、1 位、2 位、3 位の 3 チームの獲得ポイントが拮抗している\* が、コード量では 1 位の 1,319 行と 3 位の 335 行との間に約 4 倍の差が生じている点は興味深い。

\* 決勝ラウンドにおける 1 位、2 位、3 位の 3 チームのポイントは 61, 59, 60 であり、それぞれ数ポイントの差しかない。

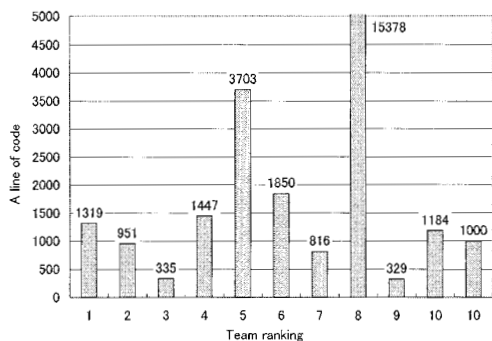


図 8 規定課題部門でポイントを獲得した 11 チームのソースコードの行数。コメントと空行は行数に含めない。優勝したチームのコードは 1,319 行だった。

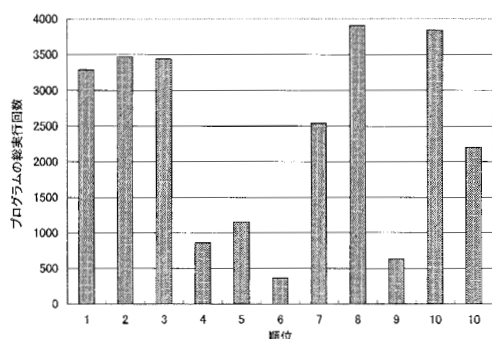


図 9 規定課題部門においてポイントを獲得した 11 チームの総実行回数。入賞したチームは合計で 3,000 回を超える実行をおこなっている。

8 位のチームのコード量が 15,378 行と著しく多いが、これは、7 個の SPE のそれぞれについて異なるソースコードを用いてプログラムを記述しているためである。他のチームは、1 種類のソースコードによって全ての SPE のための実行ファイルを生成している。

### 5.2 実行回数と成績の関係

規定課題部門においてポイントを獲得した 11 チームの実行回数を図 9 に示す。ここに示した実行回数とは、コンテストの全ての期間中に Cell オンラインにログインして、Cell BE にてプログラムを実行させた総実行回数のことである。実行回数とプログラミングに要した時間が必ず比例するという訳ではないが、ある程度の相関があると考えられる。

コード量が最も多い 8 位のチームが最も実行回数が多い。やはり、コード量が多いことでデバッグに苦労したのかもしれない。入賞した上位 3 チームの実行回数が 3,000~3,500 回の部分に密集している点は興味深い。この実行回数は、1 日に 100 回の実行をおこなったとして 30 日を超える期間を要することになる。こ

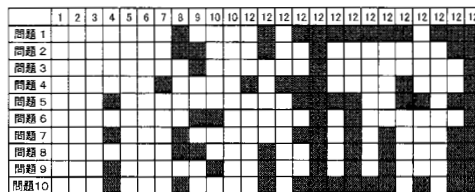


図 10 規定課題の決勝ラウンドの 10 問題について 25 チームのプログラムが正しく動作した箇所。一番上の行はチームの順位で、ポイントを獲得していない多数のチームを 12 位として表示している。正しく動作しない、あるいは時間切れの部分黒色で示した。

のことからも、プログラミングに多くの時間を費やしたことを推測できる。

### 5.3 マルチコアプログラミングの難しさ

決勝ラウンドの 10 個の問題の設定 (図 3 に示したパラメータの値) を列挙する。

- 問題 1: keytype=2, N=5760K, M=4
- 問題 2: keytype=1, N=2560K, M=8
- 問題 3: keytype=1, N=20K, M=1024
- 問題 4: keytype=2, N=10K, M=2048
- 問題 5: keytype=2, N=100K, M=256
- 問題 6: keytype=1, N=20K, M=1024
- 問題 7: keytype=2, N=1536K, M=16
- 問題 8: keytype=1, N=2560K, M=8
- 問題 9: keytype=2, N=2560K, M=8
- 問題 10: keytype=2, N=800K, M=32

問題 4 のようにリスト長  $M$  が大きい問題では、キーを計算するための処理時間が長くなる。問題 1 のように要素数  $N$  が大きい問題ではソーティングの性能が重要となる。問題 1~5 の入力データは乱数により設定している。一方、問題 5~10 の入力データは、多くのキーがほとんど同じ値になるもの、多くのデータが逆順にソートされているもの、キーのレンジが非常に大きくなるものといった特徴的なものとした。

これら決勝ラウンドの 10 個の問題について 25 チームのプログラムが正しく動作した箇所を図 10 にまとめる。一番上の行はチームの順位を表しており、ポイントを獲得していない多数のチームを 12 位として表示している。図では、正しく動作しない、あるいは時間切れの部分黒色で示している。

図 10 のデータから、予選ラウンドを突破して、決勝ラウンドのプログラムを提出した 25 チームについても、10 個の決勝ラウンドの問題に対して正しく動作するプログラムを実装できたチームは僅か 6 チームと少ないことがわかる。この結果は、想像以上にマルチコアプログラミングの敷居が高いことを示しているのではないだろうか。

### 5.4 プログラミングコンテストの負荷

実行委員が集まって議論したミーティングは 1 回のみで、その他は電子メールやテレビ会議システムを用

いて議論した。しかしながら、実行委員会関係の電子メールが約 500 件、問題作成ワーキンググループ関係が約 180 件、その他の電子メールが約 340 件、合計で 1,000 件を超える電子メールのやり取りがあった。

このように、プログラミングコンテストを実施するためにはかなりの負荷を覚悟しなければならないことは確かである。しかしながら、これらの負荷を背負ってでも、時には、必要と信じるイベントを開催すること(文献 3)が指摘する「運転権」の行使)が重要ではないだろうか。

## 6. おわりに

情報処理学会の計算機アーキテクチャ研究会、組込みシステム研究会、ハイパフォーマンスコンピューティング研究会の 3 つの研究会の主催、(株)東芝セミコンダクター社、株式会社ソニー・コンピュータエンタテインメント、日本アイ・ビー・エム株式会社の協賛で、マルチコアプログラミングコンテスト「Cell スピードチャレンジ 2007」を開催した。

本稿では、Cell スピードチャレンジ 2007 の実施報告をおこなった。本コンテストの成果物として、豊富な資料とソースコードを公開する予定である。これらを研究や教育の目的で活用していただきたい。また、本稿が、プログラミングコンテストなどのイベント開催の一助になれば幸いである。

幸いにも、Cell スピードチャレンジ 2007 に対する多くの肯定的な意見をもらっている。次回のマルチコアプログラミングコンテストの開催に向けて準備を進めている。是非とも、次回のコンテストへの参加準備をお願いしたい。

## 謝 辞

Cell スピードチャレンジ 2007 に協賛していただきました(株)東芝セミコンダクター社、株式会社ソニー・コンピュータエンタテインメント、日本アイ・ビー・エム株式会社に深く感謝します。

適切なアドバイスをいただきましたアドバイザリ委員の朴泰祐、高田広章、天野英晴、中島浩の皆様へ感謝いたします。

実行委員として Cell スピードチャレンジ 2007 の実現に尽力していただきました井上弘士、合田憲人、富山宏之、追川修一、中田秀基、光来健一、高橋大介、菅原豊、大津金光、木村啓二、近藤正章、福田悦生、近藤伸宏、山崎剛、瀧塚博志、川瀬桂の皆様へ感謝いたします。特に、井上弘士、近藤正章の両氏にはビデオ会議やオフラインの話し合いを通じて多岐にわたる問題点の指摘や解決策を提示していただきました。重ねて感謝いたします。また、山崎剛氏には問題作成ワーキンググループにおきまして常に適切なアドバイスをいただきました。深く感謝いたします。

本プログラミングコンテストの設計には、運営実績のあるグリッドチャレンジにおける方式を参考にさせていただきました。グリッドチャレンジの関係者の皆様に深く感謝します。

「Cell オンライン」サービスおよび Cell リファレンスセットを提供していただきました(株)東芝セミコンダクター社に深く感謝いたします。これらの利用につきまして(株)東芝セミコンダクター社の福田悦生、近藤伸宏の両氏に大変お世話になりました。これらの環境なくして Cell スピードチャレンジ 2007 の実現はありませんでした。深く感謝いたします。

## 参 考 文 献

- 1) Kistler, M., Perrone, M. and Petrini, F.: Cell Multiprocessor Communication Network: Built for Speed, *IEEE micro*, Vol. 26, No. 3, pp. 10-23 (2006).
- 2) 上村剛, 大溝孝, 栗津浩一: Cell リファレンスセット概要, *東芝レビュー*, Vol. 61, No. 6, pp. 25-29 (2006).
- 3) 中島浩: 若手が動かす学会へ - 事例研究と将来展望 -, *情報処理*, Vol. 48, No. 6, pp. 638-641 (2007).