

## VI. 高性能計算システム研究部門

### 1. メンバー

教授 佐藤 三久、朴 泰祐、児玉 祐悦、高橋 大介

准教授 建部 修見、埴 敏博

助教 多田野 寛人

研究員 田中 昌宏、辻 美和子、梅田 宏明、中尾 昌広、奴賀 秀男

### 2. 概要

本研究部門では、高性能計算システムアーキテクチャ、並列プログラミング環境、GPU 利用技術、並列数値処理の高速化研究、広域分散環境におけるデータ共有を中心とするグリッド計算技術等の研究を行っている。

### 3. 研究成果

【演算加速機構を持つ将来の HPCI システムに関する調査研究】(佐藤、朴、児玉、高橋)

本調査研究においては、将来の HPCI システムのあり方の調査研究に対して科学技術計算のアプリケーションに適合した演算加速機構による並列大規模システムを提案し、調査研究を行った。

現在の最先端のスパコンは大規模な並列システムであり、個々の要素であるプロセッサの高性能化とともに、システムを構成するプロセッサ数を増やすことにより高性能化を達成してきた。ナノテクやライフサイエンスの進歩、気候気象予測や地震・防災への対処には計算科学は不可欠かつ有効な手段であり、その他の様々な計算科学の諸分野において、そのためにはさらなる計算能力が要請されている。しかし、性能のさらなる向上のためにプロセッサ数をさらに増やす、これまでのアプローチは設置面積、消費電力等の制限から、限界が見えてきた。さらに性能を向上させるためには、演算性能を重視したプロセッサ構成や、チップ内メモリによるバンド幅の向上、特定アプリケーションに特化した演算回路などを導入することにより、汎用的な処理を行う従来の汎用プロセッサよりも大幅な処理性能の向上と電力効率の改善が必要である。さらに、ライフサイエンスの分子シミュレーションなど、多くのアプリにおいて一定の問題の高速化(強スケーリング)が要請されるようになってきた。本調査研究では、このような電力効率の大幅な効率化と強スケーリングによる新たな計算科学の展開を目指して、演算加速機構による並列大規模システムについて調査研究を行っている。

本調査研究に想定するシステムについての概略について図 1 に示す。多数の演算コアを内蔵したチップによる演算加速機構が汎用プロセッサで構成された並列システムの各ノードに接続もしくは内蔵されているヘテロジニアスな並列システムを想定する。

演算加速機構は、多数のスループットコアにより構成され、チップ内ネットワークにより結合される。コアはローカルメモリを持ち、メッシュネットワークで結合される。いくつかのコアごとにコントローラで同期制御（SIMD）される。

当該年度においては、各分野からのアプリを調査し、Co-design により基本アーキテクチャを検討した。

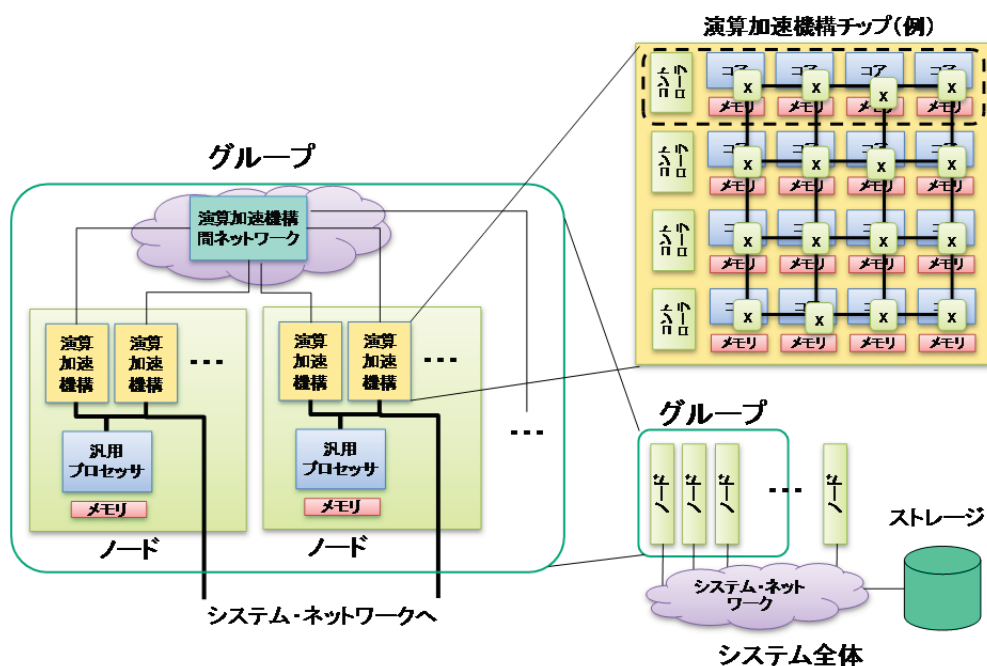


図 1 調査研究の対象とするシステムの想定概略

【次世代並列処理言語 XcalableMP の研究開発】（佐藤）

E-Science プロジェクト「並列プログラミング言語に関する研究開発」において開発を進めた、分散メモリ構成を基本とする大規模並列処理システムにおける並列 HPC アプリケーションのため、並列プログラミング言語 XcalableMP (XMP) の開発・改善を引き続き行っている。標準化の活動を PC クラスタコンソーシアムの XMP 規格部会を設置し、行っている。当該年度においては、1.0 を改善した、XMP Version 1.1 を公開した。

これまでの C 言語に加えて、Fortran95 の XMP コンパイラを行い公開した。

XMP version 1.1 の仕様及びプロトタイプコンパイラについては、それぞれ以下の URL において公開されている。

XMP version 1.0 仕様 : <http://www.xcalablemp.org/spec/xmp-spec-1.1.pdf>

プロトタイプコンパイラ : <http://www.xcalablemp.org/download.html>

## 【HA-PACS/TCA の研究開発】(朴、児玉、埴)

文部科学省特別経費「エクサスケール計算技術開拓による先端学際計算科学教育研究拠点の充実」(H23～H25 年度の 3 年間)において、密結合演算加速装置 (Tightly Coupled Accelerators: TCA) を提案し、中核となる PEACH2 (PCI Express Adaptive Communication Hub ver.2)チップを FPGA により実装し、これを汎用 GPU クラスタノードに実装するための PCI Express ボードを開発している。前年度に行ったプロトタイプハードウェアの実装に基づき、今年度は PEACH2 ボードの量産と、FPGA 上の回路に PEACH2 の基本的な機能を実装し、8 ノードの実験システム上での動作確認を行った。また、初期的な通信性能評価及び機能確認を行った。これらにより、TCA の GPU クラスタ実装において必要とされる基本機能が実現されていることを確認した。



図 2 PEACH2 ボード (量産型)

PEACH2 ボードの量産タイプは、プロトタイプと基本的に同じ構成を持ち、Altera 社製 Stratix IV GX を用い、同社が提供する PCI Express gen.2 IP を 4 ポート (各ポート x8 lane) 実装している。この他、FPGA 内には汎用 CPU コア、DMA コントローラ等を組み込み、TCA アーキテクチャに基づく GPU 間直接通信における低レイテンシ通信と多様な HPC アプリケーションに対応する基本機能を備えている。図 2 に PEACH2 量産ボードの写真を示す。

このボードを HA-PACS ベースクラスタと同等の構成を持つ計算サーバに装着し、2 ノードに跨る通信性能を測定した結果を図 3 に示す。バンド幅については、ハードウェアとしての PCI Express gen.2 x8 lane の理論ピーク性能の 95%が出ており、レイテンシとしては CPU からの通信の場合に最小値で約  $1\mu$  秒が達成されている。ただし、現時点で使用している Intel SandyBridge E5 のプロセッサでは、PCI Express バス上のデバイス間通信にハードウェア的ボトルネックがあり、ノード間 GPU 間転送では  $2.5\mu$  秒程度がレイテンシの限界である。これは PEACH2 自体の本質的な性能ではなく (CPU を介した通信ではレイテンシはこの半分以下)、CPU の PCI Express の問題であり、今後の CPU の改良により改善されていくものと思われる。

## 【超並列 GPU コンピューティング技術に関する研究】(佐藤、朴)

戦略的国際科学技術協力推進事業（日仏共同研究）「ポストペタスケールコンピューティングのためのフレームワークとプログラミング」において、超並列 GPU クラスタにおける並列プログラミング環境に関する研究を行っている。当該年度においては、フランス側が開発したアルゴリズム記述用のフロー言語 YML との統合を行った。従来の YML では、フローの中で用いることができる計算コンポーネントが逐次プログラムだけだったが、XMP で記述された

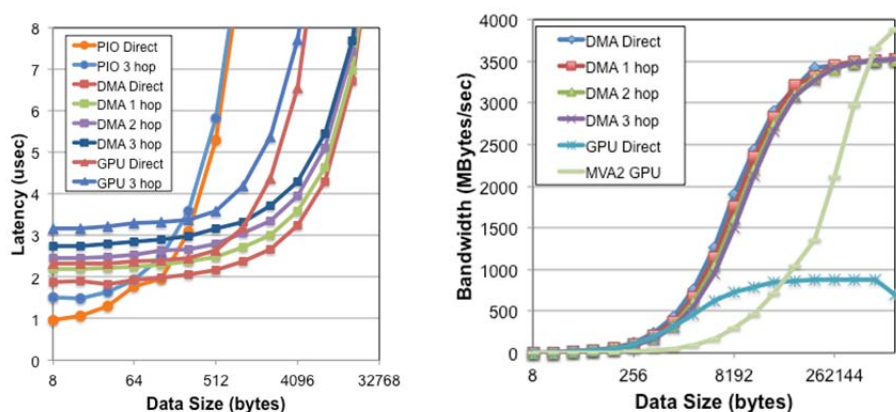


図3 PEACH2 ボードによる CPU 間及び GPU 間通信性能 (左：レイテンシ、右：バンド幅)

複数プロセスのコンポーネントが作成できる。YML は、我々が開発した OmniRPC を実行時の

スケジューラとして使っている。この拡張を行うために OmniRPC を改造して行った。これにより、MPMD (Multiple Program/Multiple Data) の新しいプログラミングモデルを提案することができる。これを、ブロック型のガウスジョルダン法のプログラムを作成し、その有効性を確認した。

また、GPU と併せて高性能化・コア数増大が進む CPU 性能に着目し、単一ループ内の多数の計算を各ノード上の GPU と CPU に割り当て、ノード上の計算リソースを最大限利用するアプローチとして、XMP の GPU 対応版である XMP-dev に GPU/CPU ワークシェアリング機能を追加した XMP-dev/StarPU を開発している。これはフランス INRIA において開発されている StarPU スケジューラと XMP コンパイラを組み合わせる形で実現される共同研究である。今年度の研究では、GPU と CPU コアの性能差が大きい点に注目し、ループ中のタスクを単にタスク数で分割するのではなく、割り当てるタスクサイズそのものを、リソースの性能に合わせて最適化し、適度なロードバランスを取ることで、GPU のみを利用した場合に比べ性能向上が得られることを確認した。行列積計算や多体問題を HA-PACS ベースクラスタ上の XMP-dev/StarPU プロトタイプコンパイラで評価し、

GPU のみの場合に比べ 1.1～1.4 倍程度まで性能が向上することを確認した。

【大規模広域分散ファイルシステム及びグリッド／クラウド技術に関する研究】(建部)

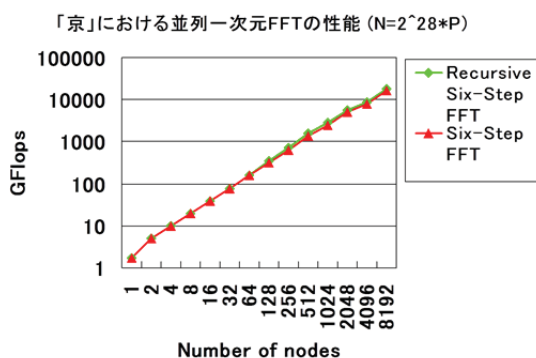
文部科学省が進める革新的ハイパフォーマンスコンピューティングインフラ (HPCI) の HPCI 共用ストレージのシステムソフトウェアとして利用される Gfarm ファイルシステムの整備を行った。具体的には、高負荷試験、不具合修正、ファイル複製数の自動保持、一貫性チェックの高速化、運用監視システム、性能監視システム、ドキュメントの更新、ファイル複製配置のグループ指定などである。この結果として、Gfarm バージョン 2.5.8 をリリースした。その成果を、運用中の QCD データ共有システムの JLDG で活用するための準備をすすめた。

【高性能並列数値計算に関する研究】

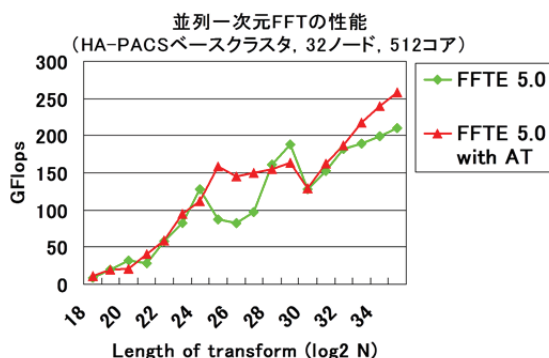
(1) 並列高速フーリエ変換 (FFT) の高速化手法に関する研究 (高橋)

科学技術計算で広く用いられている並列高速フーリエ変換 (FFT) の性能を改善するために、高速化手法に関する研究を行った。並列次元 FFT をポストペタスケール計算環境で実行する際に、どのようなアルゴリズムが望ましいかについて検討を行った。その結果、「京」における並列次元 FFT では、これまでに提案されていた三次元表現よりも、二次元表現を再帰的に適用して計算することで、キャッシュヒット率をさらに向上させることができることが分かった。

並列次元 FFT においては、全体に関わる性能パラメータとして、全対全通信方式と基底、そしてブロックサイズが存在するが、これらについて最適なパラメータを自動的にチューニングする機構をソフトウェアで実現した。その結果、並列次元 FFT において実行時間の多くを占めている全対全通信に要する時間を大幅に削減することに成功した。







「京」における並列次元 FFT の性能

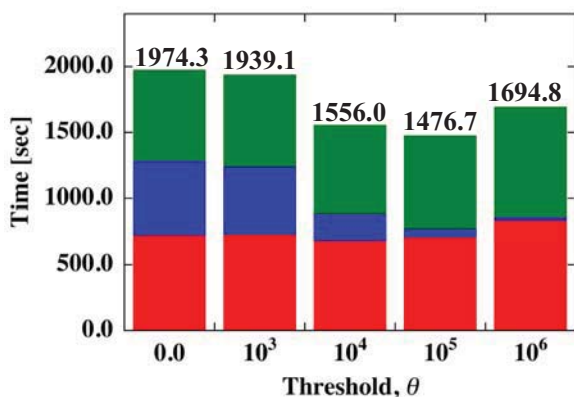
HA-PACS における並列次元 FFT の性能

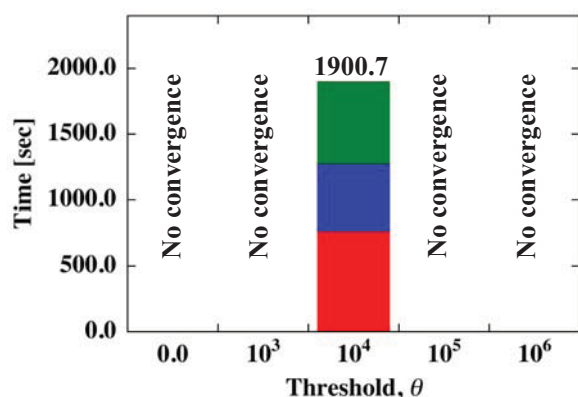
図 4 高性能 FFT の性能評価

(2) Block Krylov 部分空間反復法に関する研究 (多田野)

複数本の右辺ベクトルをもつ連立一次方程式を高速・高精度に解くための Block Krylov 部分空間反復法の研究を行った。Block Krylov 部分空間反復法では、右辺ベクトル数が増加すると数値的に不安定な状況に陥り、残差の発散や停滞を引き起こす。この数値的不安定性は、反復過程でベクトルの正規直交化を行うことで緩和されるが、多くの演算量を要する。

本研究では、正規直交化の実行を動的に判断するアルゴリズムを構築し、Block Krylov 部分空間反復法の高速化を図った。格子 QCD 計算で現れる連立一次方程式 (行列サイズ: 1, 572, 864, 右辺ベクトル数: 12) に対して実験を行った。その結果、Block BiCGGRRO 法に本アルゴリズムを適用することで、従来法である Modified Block BiCGSTAB 法よりも高速かつ安定に高精度近似解を生成できることが分かった。





(a) Block BiCGGRRO 法。

(b) Modified Block

BiCGSTAB 法。

図 5 正規直交化の実行回数削減による Block Krylov 部分空間反復解法の計算時間変化

■ : 行列ベクトル積、 ■ : 正規直交化、 ■ : その他。

【エネルギー利用最適化に関する研究】(佐藤、児玉)

NEDO グリーン IT プロジェクト「エネルギー利用最適化データセンタ基盤技術の研究開発/データセンタのモデル設計と総合評価」(平成 20 年度から平成 24 年度)において、サーバシステムの評価指標に関する研究を行っている。本年度は、GreenSLA 策定のための定量的評価について SEPCWeb を用いて精緻化するとともに、最終年度としてのまとめを行った。SPECWeb の評価では、QoS の評価がベンチマーク内に組み込まれているとともに、サーバ負荷を変化させてその電力あたりの性能 (PPW: Performance per Watt) を評価することが可能となっている。その結果、サーバ負荷が 100% でない場合には、その負荷に応じた性能に落としつつ省エネルギー運用を行うことにより PPW を向上させることが可能であることを明らかにした。これらの結果をもとに Green SLA の有効性の評価を行った。サーバの運用側は Green SLA の範囲で省エネ運用を行うことにより、電力キャップなどに柔軟に対応することが可能になる。一方、ユーザ側は一定の性能低下を許容する代わりに、料金や一時的なリソースの追加などの特典を省エネ運用のインセンティブとして得ることができると考えられる。

【LES 気象コードの並列 GPU 化に関する研究】(朴、埴)

計算科学研究センター地球環境研究部門の日下准教授らのチームとの共同研究により都市規模の気象に関する Large Eddy Simulation (LES) コードの並列 GPU 化を進めた。同研究部門では地域レベルの気象シミュレーションとして、都市モデルを対象とした LES 計算の研究を進めており、昨年度よりこれらの開発コードの GPU 化を進めている。

昨年度の研究では、LES コードを CUDA 化したが、今年度の研究では日下グループのコード変更に柔軟に対応するために、Fortran コードをベースとし、PGI CUDA Fortran コンパイラで GPU 対応するという方針でコード移植を行った。コード全体中、単純なドメイン分割となっていない BiCGSTAB 法による行列計算以外の部分を完全に GPU 化し、基本的に全てのデータを GPU 内メモリに閉じ込め、カーネル関数呼び出しと I/O のオーバヘッドを最小化した。その結果、HA-PACS ベースクラスタのノード当たり 4GPU のメモリを最大限利用したケースで、CPU のみ（ノード当たり 16 core）を使った場合に比べ、GPU（ノード当たり 4 台）を使った場合では、関数に応じて 4.3～4.7 倍の高速化が得られた。しかし、BiCGSTAB 法計算は全体計算の約 30%を占めるため、コード全体での加速は 1.3 倍程度に留まった。今後、この部分も完全 GPU 化し、さらに最適化を施して性能を改善していく予定である。

#### 【核融合シミュレーションコードの並列 GPU 化に関する研究】（朴）

G8 多国間共同研究の一環として、日本原子力研究開発機構及び米国プリンストン大学との共同研究により、次世代核融合シミュレーションコードの並列 GPU 化を行った。前者においては「京」等で開発中の GT5D コードを、後者においては BG/Q 等で開発中の GTC-P コードを対象とする。

GT5D コードについては、PGI CUDA Fortran を用いて HA-PACS ベースクラスタへの移植を行い、全体の約 9 割のコードを GPU 化し、データに関しては全てを GPU メモリに保持するようにコードを作成した。各関数についての性能チューニングが不十分なことと、一部関数については GPU 化が完了していないため、現時点では HA-PACS の同数ノードの CPU のみを利用した場合に比べ 2 倍程度の速度向上に留まっており、今後改善して行きたい。

GTC-P コードについては G8 プロジェクト内で並列記述言語 XcalableMP (XMP) の応用例としてコーディングを進めており、逐次版コードを XMP で一旦記述し、その後で XMP-dev 拡張を行って GPU 化する予定である。今年度については XMP 化の基本方針と予備評価を行った。G8 プロジェクト最終年度である次年度で XMP/XMP-dev 化を完了する予定である。

#### 【ディペンダブルシステムのためのテストツール】（佐藤，埴）

##### (1) クラウドを用いたディペンダブルな並列分散システムのためのテスト支援環境 D-Cloud

これまで、JST-CREST「実用化を目指した組込みシステム用ディペンダブル・オペレーティングシステム」研究領域において、我々は並列分散テスト環境 D-Cloud を開発してきた。高い信頼性確保のためには異なる入力による網羅的なテスト実行やハード



ウェア故障に対する耐故障性のテストなど様々なテストが必要で、それらを実行するには非常に時間と手間がかかる。D-Cloud ではフォルトインジェクション可能な仮想マシンを用いて仮想デバイスレベルでの故障についてのテストが可能であるだけでなく、物理マシン群、および仮想マシンをクラウドとして管理することにより、多くの計算資源を柔軟に利用することができ、多くのケースについてのテスト作業を自動化することができる環境を提供する。同時に、東大石川チームと共同で、各種の定量的なディペンダビリティ指標のシステムティックな計測を支援することを目的に、ディペンダビリティ計測ツール群 DS-Bench Toolset を開発してきた。ハードウェア異常、ソフトウェアバグ、過負荷、人的ミスといった様々な異常を系統立てて扱うことによって、大規模なシステムテストを実現し、多くのテストパターンを用いた複雑なテストを加速することができる。さらに、システムのディペンダビリティについてステークホルダとの間で議論するための D-Case Editor と連携することができる。

今年度は、我々の開発した D-Cloud に関する研究成果、および DS-Bench のシステムテスト環境として統合を行った DS-Bench Toolset の研究成果について発表を行った。

#### 4. 外部資金の獲得状況

1. 文部科学省・将来の HPCI システムのあり方の調査研究「演算加速機構を持つ将来の HPCI システムに関する調査研究」H24 年度 32,148 千円（代表：佐藤三久）
2. 文部科学省，科学技術試験研究委託事業，「HPCI 共通運用システムの整備（共用ストレージソフトウェア整備）」， H24 年度，73,700 千円（業務主任者佐藤三久，担当責任者建部修見）
3. JST CREST 研究領域「ポストペタスケール高性能計算に資するシステムソフトウェア技術の創出」，「ポストペタスケールデータインテンシブサイエンスのためのシステムソフトウェア」， H23 年度～H27 年度， 241,941 千円（代表：建部修見）
4. JST CREST 研究領域「ポストペタスケール高性能計算に資するシステムソフトウェア技術の創出」，「ポストペタスケール時代に向けた演算加速機構・通信機構統合環境の研究開発」， H24～H29 年度， 312,380 千円（代表：朴泰祐）
5. JST CREST 研究領域「ポストペタスケール高性能計算に資するシステムソフトウェア技術の創出」，「数値計算ライブラリによる超並列複合システムの階層的抽象化に関する研究 H24～26 年度 15,132 千円（H24）（共同研究者：高橋大介）
6. 日仏戦略プログラム「ポストペタスケールコンピューティングのためのプログラミング言語拡張および数値計算アルゴリズム、性能評価、大規模データ管理技術」、H22～H24 年度 11,000 千円（代表：佐藤三久）
7. NEDO「グリーンネットワーク・システム技術研究開発プロジェクト(グリーン IT プロジェクト)/エネルギー利用最適化データセンタ基盤技術の研究開発/データセ

- ンタのモデル設計」 H20～H24 年度 3,780 千円（代表：佐藤三久）
8. 日本学術振興会・多国間国際研究協力事業「ECS：エクサスケール・コンピューティングによる精緻な気候シミュレーションの実現」H23～H25 年度 11,200 千円（代表：佐藤三久）
  9. 日本学術振興会・多国間国際研究協力事業「NuFuSE：エクサスケール・コンピューティングにおける核融合シミュレーション」H23～H25 年度 25,920 千円（代表：朴泰祐）
  10. 科学研究費補助金 若手研究 (B)「複数右辺項をもつ連立一次方程式の高速・高精度求解法の開発と科学技術計算への応用」780 千円（代表：多田野寛人）
  11. 科学研究費補助金 基盤研究 (B)「有限節点法・境界節点法の完全メッシュレス化とその工学的応用」195 千円（分担：多田野寛人）
  12. 科学研究費補助金 若手研究 (B)「複数右辺項をもつ連立一次方程式の高速・高精度求解法の開発と科学技術計算への応用」780 千円（代表：高橋大介）
  13. 科学研究費補助金 基盤研究 (B)「有限節点法・境界節点法の完全メッシュレス化とその工学的応用」195 千円（分担：高橋大介）
  14. 科学研究費補助金 基盤研究 (C)「エクサスケール計算環境に向けた高速フーリエ変換のアルゴリズムに関する研究」H24～26 年度 1,560 千円 (H24)（代表：高橋大介）
  15. 科学研究費補助金 新学術領域研究（研究領域提案型）「大規模並列環境における数値計算アルゴリズム」H22～26 年度 3,900 千円 (H24)（分担：高橋大介）

## 5. 研究業績

### (1) 研究論文

1. Adnan, M. Sato, “Dynamic Multiple Work Stealing Strategy for Flexible Load Balancing”, IEICE Transactions 95-D(6): 1565-1576 (2012)
2. A. Hori, J. Lee, M. Sato, “Audit: A new synchronization API for the GET/PUT protocol”, J. Parallel Distrib. Comput. 72(11): 1464-1470 (2012)
3. 椋木大地, 高橋大介, “GPUにおける3倍・4倍精度浮動小数点演算の実現と性能評価,” 情報処理学会論文誌 コンピューティングシステム, Vol. 6, No. 1, pp. 66—77, 2013.
4. M. Naito, H. Tadano, T. Sakurai, “A modified Block IDR(s) method for computing high accuracy solutions”, JSIAM Letters, Vol. 4, pp. 25-28, 2012.
5. 合田 憲人, 東田学, 坂根栄作, 天野浩文, 小林克志, 棟朝雅晴, 江川隆輔, 建部修見, 鴨志田良和, 滝澤真一郎, 永井亨, 岩下武史, 石川裕, “高性能分散計算環境のための認証基盤の設計”, 論文誌コンピューティングシステム(ACS), 情報処理学会, No.5, Vol.5, pp.90-102, 2012

6. Y. Kodama, S. Itoh, T. Shimizu, S. Sekiguchi, H. Nakamura and N. Mori, “Imbalance of CPU temperatures in a blade system and its impact for power consumption of fans”, *Journal of Cluster Computing*, Springer, Vol.16, No.1, pp.27-37, 2013.

## (2)学会発表

### (A)招待講演

1. M. Sato, " The next step for Post-Petascale Computing in Japan", HPC in Asia Workshop, ISC 2012, June 2012.
2. T. Boku, “HA-PACS Project: Challenge for Next Step of Accelerating Computing”, ATIP/A\*CRC Workshop, Singapore, May 2012.
3. T. Boku, “HA-PACS: Next Step for Scientific Frontier by Accelerated Computing”, GTC Japan 2012, Tokyo, July 2012.
4. T. Boku, “HPC Trend in Asia”, HPC in China Workshop (ISC2012), Hamburg, June 2012.
5. D. Takahashi, “Automatic Tuning for Parallel FFTs”, 2013 Conference on Advanced Topics and Auto Tuning in High Performance and Scientific Computing (2013@^2HPSC), National Taiwan University, Taipei, Taiwan, March 28, 2013.
6. D. Takahashi, “Automatic Tuning for Parallel FFTs on Clusters of Multi-Core Processors”, Special Session: Auto-Tuning for Multicore and GPU (ATMG) (held in conjunction with IEEE MCSoc-12), The University of Aizu, Aizu, Japan, September 22, 2012.
7. O. Tatebe, “File System for Post-Petascale Data-Intensive Computing”, International Supercomputing Conference, 2012
8. 朴 泰祐, “「京」をはじめとする最先端スーパーコンピュータの動向”, 核融合エネルギー連合講演会2012, 2012年6月.
9. 多田野 寛人, “複数右辺ベクトルをもつ連立一次方程式の数値解法と並列固有値計算への応用”, 第5回日本数式処理学会理論分科会&システム分科会合同研究会, 2012.
10. 児玉祐悦, “FPGA の応用事例 ～並列計算機とネットワーク～,” 電子情報通信学会リコンフィギャラブルシステム研究会, 2012.
11. 塙 敏博, “FPGAによる Tightly Coupled Accelerators向け通信機構の実現”, 次世代 RHW 創造研究会 (JACORN2012), 2012.

### (B)その他の学会発表(査読付)

1. M. Nakao, J. Lee, T. Boku, M. Sato, “Productivity and Performance of Global-View Programming with XcalableMP PGAS Language”, CCGRID 2012: 402-409, 2012.
2. M. Tsuji, M. Sato, A. S. Tanabe, Y. Inagaki, T. Hashimoto, “An asynchronous parallel

- genetic algorithm for the maximum likelihood phylogenetic tree search”, IEEE Congress on Evolutionary Computation 2012: 1-8, 2012.
3. T. Abe, M. Sato, “On-the-Fly Synchronization Checking for Interactive Programming in XcalableMP”, Proc. of P2S2 (with ICPP 2012), 29-37, 2012.
  4. H. Yoshizawa and D. Takahashi, “Automatic Tuning of Sparse Matrix-Vector Multiplication for CRS format on GPUs”, Proc. 2012 IEEE 15th International Conference on Computational Science and Engineering (CSE 2012), pp. 130—136 (2012).
  5. D. Takahashi, “An Implementation of Parallel 2-D FFT Using Intel AVX Instructions on Multi-Core Processors”, Proc. 12th International Conference on Algorithms and Architectures for Parallel Processing (ICA3PP 2012), Part II, Lecture Notes in Computer Science, No. 7440, pp. 197—205, Springer-Verlag (2012).
  6. D. Takahashi, A. Uno and M. Yokokawa, “An Implementation of Parallel 1-D FFT on the K computer”, Proc. 2012 IEEE 14th International Conference on High Performance Computing and Communications (HPCC-2012), pp. 344—350 (2012).
  7. Y. Miki, D. Takahashi and M. Mori, “A Fast Implementation and Performance Analysis of Collisionless N-body Code Based on GPGPU”, Proc. International Conference on Computational Science (ICCS 2012), Procedia Computer Science, Vol. 9, pp. 96—105, Elsevier (2012).
  8. T. Nomizu, D. Takahashi, J. Lee, T. Boku and M. Sato, “Implementation of XcalableMP Device Acceleration Extension with OpenCL”, Proc. 2012 IEEE 26th International Parallel and Distributed Processing Symposium Workshops & PhD Forum (IPDPSW 2012), Multicore and GPU Programming Models, Languages and Compilers Workshop (PLC 2012), pp. 2394—2403 (2012).
  9. D. Mukunoki and D. Takahashi, “Implementation and Evaluation of Triple Precision BLAS Subroutines on GPUs”, Proc. 2012 IEEE 26th International Parallel and Distributed Processing Symposium Workshops & PhD Forum (IPDPSW 2012), The 13th Workshop on Parallel and Distributed Scientific and Engineering Computing (PDSEC-12), pp. 1378—1386 (2012).
  10. D. Mukunoki and D. Takahashi, “Performance Comparison of Double, Triple and Quadruple Precision Real and Complex BLAS Subroutines on GPUs”, Proc. ATIP/A\*CRC Workshop on Accelerator Technologies for High-Performance Computing: Does Asia Lead the Way? (ATIP/A\*CRC Workshop '12), pp. 788—790 (2012).
  11. T. Odajima, T. Boku, T. Hanawa, J. Lee, M. Sato, "GPU/CPU Work-Sharing with Parallel Language XcalableMP-dev for Parallelized Accelerated Computing", Proc. of P2S2-2012 (with ICPP2012), Pittsburgh, CD-ROM, 2012.

12. L.Du, T. Sakurai, H. Tadano, M. Naito, “IDR(s) for linear systems with multiple shifts and multiple right-hand sides”, The 8th East Asia SIAM Conference (EASIAM2012), 2012.
13. T. Sakurai, Y. Futamura, L. Du, H. Tadano, “A hierarchical parallel implementation of a contour integral-based eigensolver on Trilinos”, SIAM Conference on Computational Science and Engineering, 2013.
14. Masahiro Tanaka, Osamu Tatebe, “Workflow Scheduling to Minimize Data Movement using Multi-constraint Graph Partitioning”, Proceedings of IEEE/ACM International Symposium on Cluster, Cloud and Grid Computing (CCGrid), pp.65-72, doi: 10.1109/CCGrid.2012.134, 2012
15. Shun Ishiguro, Jun Murakami, Yoshihiro Oyama and Osamu Tatebe, “Optimizing Local File Accesses for FUSE-Based Distributed Storage”, Proceedings of the international workshop on data-intensive scalable computing systems, 2012.
16. H. Fujita, Y. Matsuno, T. Hanawa, M. Sato, S. Kato, and Y. Ishikawa, "DS-Bench Toolset: Tools for Dependability Benchmarking with Simulation and Assurance," 42nd IEEE/IFIP International Conference on Dependable Systems and Networks (DSN 2012), 8 pages, Jun. 2012.
17. 佐藤佳州, 高橋大介, “大規模な対局に基づいた教師データの重要度の学習”, 第 17 回ゲームプログラミングワークショップ, pp. 22—29 (2012).
18. 合田憲人, 東田学, 坂根栄作, 天野浩文, 小林克志, 棟朝雅晴, 江川隆輔, 建部修見, 嶋志田良和, 滝澤真一郎, 永井亨, 岩下武史, 石川裕, “高性能分散計算環境のための認証基盤の設計”, 先進的計算基盤システムシンポジウム SACSIS2012 論文集, pp.227-236, 2012
19. 扇谷 豪, 三木 洋平, 朴 泰祐, 森 正夫, 中里 直人, “重力多体系用 Tree Code の並列 GPU 化による計算加速”, 2013 年ハイパフォーマンスコンピューティングと計算科学シンポジウム HPCS2013 論文集, 2013.
20. 鷹津冬将, 建部修見, “ログ構造化ファイルシステム mylfs の設計と初期評価”, 先進的計算基盤システムシンポジウム SACSIS2012 ポスター発表, 2012.
21. 小田嶋 哲哉, 李 珍泌, 朴 泰祐, 佐藤 三久, “XMP-dev に基づく CPU/GPU ハイブリッド負荷分散システム”, 先進的計算基盤システムシンポジウム SACSIS2012 ポスター発表, 2012.
22. 鷹津冬将, 平賀弘平, 建部修見, Gabriel Antoniu, “広域分散ファイルシステム Blobseer-wan/HGMDS の設計と初期評価”, 2013 年ハイパフォーマンスコンピューティングと計算科学シンポジウム HPCS2013 ポスター発表, 2013.
23. 藤田 典久, 奴賀 秀男, 朴 泰祐, 井戸村 泰宏, “GPU クラスタにおける核融合シミュレーションコードの実装”, 2013 年ハイパフォーマンスコンピューティングと計



算科学シンポジウム HPCS2013 ポスター発表, 2013.

(C)その他の学会発表(査読無)

1. 椋木大地, 高橋大介: GPU における高速な CRS 形式疎行列ベクトル積の実装, 情報処理学会研究報告, 2013-HPC-138, No. 5 (2013).
2. 椋木大地, 高橋大介: GPU における 4 倍精度演算を用いた疎行列反復解法の実装と評価, 情報処理学会研究報告, 2012-ARC-202, 2012-HPC-137, No. 37 (2012).
3. 三木洋平, 高橋大介, 森正夫: 大規模 GPU クラスタにおける N 体計算コードの演算性能とスケーラビリティの評価, 情報処理学会研究報告, 2012-HPC-136, No. 1 (2012).
4. 高橋大介: ポストペタスケール計算環境に向けた並列 FFT の自動チューニング, 日本応用数理学会 2012 年度年会講演予稿集, pp. 285—286 (2012).
5. 吉澤大樹, 高橋大介: GPU における CRS 形式疎行列ベクトル積の自動チューニング, 情報処理学会研究報告, 2012-HPC-135, No. 31 (2012).
6. 高橋大介: 並列 FFT における自動チューニング, 計算工学講演会論文集, Vol. 17, E-7-2 (2012).
7. 内藤 理大, 多田野 寛人, 櫻井 鉄也, Block IDR(s)法における残差停滞の回避法について, 日本応用数理学会 2012 年度年会, pp. 89-90, 2012.
8. 多田野 寛人, 櫻井 鉄也, 偽収束を回避する Block Krylov 部分空間反復法の安定化と計算量削減について, 日本応用数理学会 2012 年度年会, pp. 287-288, 2012.
9. 今倉 暁, 杜 磊, 多田野 寛人, 複数右辺ベクトルを持つ線形方程式に対する Weighted Block GMRES 法, 日本応用数理学会「行列・固有値問題の解法とその応用」研究部会 第 14 回研究会, 2012.
10. 田中昌宏, 建部修見, 大規模ワークフローに対応した Pwrake システムの設計と実装, 情報処理学会研究報告, 2012-HPC-135(14), pp.1-7, 2012
11. 大西健太, 建部修見, 冗長符号を用いたサーバマシン間でのデータ分散手法の検討, 情報処理学会研究報告, 2012-HPC-135(22), pp.1-7, 2012
12. 鷹津冬将, 建部修見, 高速なストレージに適したログ構造化ファイルシステム MyLFS の設計と評価, 情報処理学会研究報告, 2012-HPC-135(27), pp.1-7, 2012
13. 平賀弘平, 建部修見, ノンブロッキングトランザクションに基づく分散ファイルシステムのための分散メタデータサーバの設計と実装, 情報処理学会研究報告, 2012-HPC-135(28), pp.1-9, 2012
14. 大辻弘貴, 建部修見, Infiniband を用いたファイルアクセスの高速化, 情報処理学会研究報告, 2012-HPC-135(29), pp.1-6, 2012
15. 大辻弘貴, 建部修見, RDMA による低オーバーヘッドファイルアクセスと冗長記録,

情報処理学会研究報告, 2012-HPC-137(29), pp.1-6, 2012

16. 鷹津冬将, 平賀弘平, 建部修見, Gabriel Antoniu, 広域分散ファイルシステム BlobSeer-wan/HGMDS の設計と評価.情報処理学会研究報告, 2013-HPC-138(22), pp.1-7, 2013
17. 梅田 宏明, 埜 敏博, 庄司 光男, 朴 泰祐, "分子軌道計算の GPGPU 化に向けた行列加算手法の提案", 2013-HPC-138, 2013.
18. 藤田 典久, 奴賀 秀男, 朴 泰祐, 井戸村 泰宏, "GPU クラスタにおける核融合シミュレーションコードの実装", 2013-HPC-138, 2013.
19. 小田嶋 哲哉, 李 珍泌, 朴 泰祐, 佐藤 三久, 埜 敏博, 児玉 祐悦, Raymond Namyst, Samuel Thibault, Olivier Aumage, "GPU クラスタ向け並列言語 XMP-dev における GPU/CPU 協調計算", 2013-HPC-138, 2013.
20. 埜敏博, 児玉祐悦, 朴泰祐, 佐藤三久, "Tightly Coupled Accelerators アーキテクチャ向け通信機構の予備評価", 2012-ARC-202(13), pp.1-8, 2012.
21. 藤田典久, 奴賀秀男, 朴泰祐, 井戸村泰宏, "核融合シミュレーションコードの GPU クラスタ向け最適化", 2012-HPC-135, 2012.
22. 小田嶋哲哉, 李珍泌, 朴泰祐, 佐藤三久, 埜敏博, 児玉祐悦, Raymond Namyst, Samuel Thibault, Olivier Aumage, "GPU クラスタにおける GPU/CPU ハイブリッド・プログラミング環境", 2012-HPC-135, 2012.
23. 扇谷豪, 三木洋平, 朴泰祐, 森正夫, 中里直人, "重力多体系用 Tree Code の並列 GPU 化", 2012-HPC-135, 2012.
24. 埜敏博, 児玉祐悦, 朴泰祐, 佐藤三久, "Tightly Coupled Accelerators アーキテクチャのための通信機構", 2012-ARC-193, 2012.
25. 金子紘也, 埜敏博, 児玉祐悦, 朴泰祐, 佐藤三久, "PCI EXPRESS ネットワーク PEARL における耐故障機構", 2012-ARC-193, 2012.

(D) 著書

1. 佐藤三久 他 (共著) : スーパーコンピュータ (岩波講座 計算科学 別巻)
2. T. Hanawa, M. Sato 他 (共著) , "D-Cloud: Software Testing Environment for Dependable Distributed Systems Using Cloud Computing Technology", Software Testing in the Cloud, Perspectives on an Emerging Discipline, Scott Tilley, Tauhida Parveen (Editors), IGI Global, ISBN 9781466625365, pp. 340-356, Nov. 2012.
3. T. Hanawa 他 (共著) , "Dependability Test Support Tools", Open Systems Dependability -- Dependability Engineering for Ever-Changing Systems, Mario Tokoro (Editor), CRC Press, ISBN 978-1-4665-7751-0, pp.112-123, Nov. 2012.
4. T. Boku, T. Hanawa, Y. Kodama, M. Sato 他 (共著) , "Contemporary High Performance

Computing: From Petascale Toward Exascale”, J. Vetter (Editor), CRC Press, ISBN 1466568348, 9781466568341, 2013.

## 6. 異分野間連携・国際連携等

1. 戦略的国際科学技術協力推進事業（日仏共同研究）「ポストペタスケールコンピューティングのためのフレームワークとプログラミング」（佐藤）
2. 多国間国際研究協力事業 G8 Research Councils Initiative “Nuclear Fusion Simulation for Exascale” 日本代表 PI（朴）
3. 多国間国際研究協力事業 G8 Research Councils Initiative “Exascale Climate Simulation” 日本代表 PI（佐藤）

## 7. 国際活動

1. 佐藤三久：エジンバラ大学交流連絡交流責任者
2. T. Boku: Program Committee, 2012 International Workshop on High Performance Power-Aware Computing (HP-PAC2012)
3. T. Boku: Program Committee, IEEE/ACM International Conference for High Performance Computing, Networking, Storage and Analysis (SC12)
4. T. Boku: Program Committee, 2012 International Workshop on Partitioned Global Address Space (PGAS2012)
5. T. Boku: Program Committee, 2012 International Conference on High Performance Computing (HiPC2012)
6. T. Boku: Program Committee, 2012 International Workshop on Large Scale Parallel Processing (LSPP2012)
7. T. Boku: Program Committee, 2012 IFIP International Conference on Network and Parallel Computing (NPC2012)
8. T. Boku: Program Committee, 2012 International Workshop on Parallel Programming Models and System Software for High-End Computing (P2S2-2012)
9. T. Boku: Scientific Committee, 10th International Meeting on High-Performance Computing for Computational Science (VECPAR 2012)
10. T. Boku: Program Committee, 2012 International Symposium on Cluster, Cloud and Grid Computing (CCGrid2012)
11. T. Boku: Program Committee, 2012 International Workshop on Communication Architecture for Scalable Systems (CASS2012)
12. T. Boku: Program Committee, 2012 International Parallel and Distributed Processing Symposium (IPDPS2012)

13. Y. Kodama: Program Committee, CoolChips 2012
14. D. Takahashi: Program Committee, 14th IEEE International Conference on High Performance Computing and Communications (HPCC-2012)
15. D. Takahashi: Program Committee, 11th IEEE/ACM International Conference on Ubiquitous Computing and Communications (IUCC 2012)
16. D. Takahashi: Program Committee, 2012 International Conference on Computational Science (ICCS 2012)
17. O. Tatebe: Editorial Board, International Journal of Computational Science and Engineering (IJCSE)
18. O. Tatebe: Co-chair, Open Grid Forum (OGF) Grid File System WG (GFS-WG)
19. O. Tatebe: Program Committee, IEEE/ACM International Conference for High Performance Computing, Networking, Storage and Analysis (SC12)
20. O. Tatebe: Program Committee, 4th IEEE International Conference on Cloud Computing Technology and Science (CloudCom 2012)
21. O. Tatebe: Program Committee, The 41st International Conference on Parallel Processing (ICPP)
22. O. Tatebe: Co-organizer, 4rd Workshop on Interfaces and Architectures for Scientific Data Storage (IASDS)
23. O. Tatebe: Program Committee, The Sixth International Conference on Complex, Intelligent, and Software Intensive Systems (CISIS-2012)
24. O. Tatebe: Program Committee, International Workshop on Data-Intensive Distributed Computing (DIDC'12)
25. O. Tatebe: Program Committee, First Workshop on Big Data Management in Clouds
26. O. Tatebe: Scientific Committee, 10th International Meeting on High-Performance Computing for Computational Science (VECPAR 2012)

## 8. 教育

### ・学位論文（博士課程）

1. Adnan, 博士（工学）, Study on Efficient Work Stealing Based Execution of Parallel Programs for Multicore Processors, 筑波大学大学院システム情報工学研究科博士論文, 2013年3月（指導：佐藤三久）

### ・学位論文（修士課程）

1. 藤田典久, 修士（工学）, GPU クラスタにおける核融合シミュレーションコードの開発, 筑波大学大学院システム情報工学研究科修士論文, 2013年3月（指導：朴

泰祐)

2. 扇谷豪, 修士 (工学), 計算宇宙物理のための GPU クラスタ向け並列 Tree Code の開発と性能評価, 筑波大学大学院システム情報工学研究科修士論文, 2013 年 3 月 (指導: 朴泰祐)
3. 小田嶋哲哉, 修士 (工学), GPU クラスタ向け並列言語 XMP-dev における GPU/CPU 協調計算, 筑波大学大学院システム情報工学研究科修士論文, 2013 年 3 月 (指導: 朴泰祐)
4. 金子拓也, 修士 (工学), PCI Express ネットワーク PEARL における耐故障・省電力支援機構, 筑波大学大学院システム情報工学研究科修士論文, 2013 年 3 月 (指導: 朴泰祐)
5. 野水拓馬, 修士 (工学), 並列言語 XcalableMP の OpenCL 実装とその最適化, 筑波大学大学院システム情報工学研究科修士論文, 2013 年 3 月 (指導: 高橋大介)
6. 吉澤大樹, 修士 (工学), GPU における CRS 形式疎行列ベクトル積の自動チューニング, 筑波大学大学院システム情報工学研究科修士論文, 2013 年 3 月 (指導: 高橋大介)
7. 三木洋平, 修士 (工学), 直接法に基づく無衝突系向け N 体計算コードの GPU 実装と性能評価, 筑波大学大学院システム情報工学研究科修士論文, 2013 年 3 月 (指導: 高橋大介)
8. 大辻弘貴, 修士 (工学), 高速・高信頼なネットワークファイルアクセスに関する研究, 筑波大学大学院システム情報工学研究科修士論文, 2013 年 3 月 (指導: 建部修見)
9. 大西健太, 修士 (工学), 冗長符号を用いたノード間のデータの冗長化に関する研究, 筑波大学大学院システム情報工学研究科修士論文, 2013 年 3 月 (指導: 建部修見)

・ 学外教育

1. 佐藤三久: 神戸大学システム情報学研究科・客員教授

**9. 社会貢献**

1. 佐藤三久: PC クラスタコンソーシアム 理事 XMP 規格部会会長
2. 佐藤三久: グリッド協議会 理事
3. 佐藤三久: 情報処理学会フェロー 2013/06 情報処理学会 フェロー
4. 朴泰祐: 先進的計算基盤システムシンポジウム SACSIS 運営委員会委員
5. 朴泰祐: 情報処理学会ハイパフォーマンスコンピューティング研究会運営委員
6. 児玉祐悦: 情報処理学会 ACS 論文誌 編集委員



7. 児玉祐悦: 情報処理学会 デジタルプラクティス査読委員
8. 児玉祐悦: 情報処理学会 計算機アーキテクチャ研究会運営委員
9. 児玉祐悦: 電子情報通信学会 リコンフィギャラブルシステム研究専門委員
10. 建部修見: 情報処理学会ハイパフォーマンスコンピューティングと計算科学シンポジウム HPCS2013 実行委員
11. インターネットカンファレンス 2012 プログラム委員
12. 建部修見: 先進的計算基盤システムシンポジウム SACSIS2012 プログラム委員
13. 建部修見: 情報処理学会ハイパフォーマンスコンピューティング研究会運営委員
14. 多田野寛人: 日本応用数理学会「行列・固有値問題の解法とその応用」研究部会 幹事
15. 多田野寛人: 日本応用数理学会「若手の会」研究部会 運営委員
16. 多田野寛人: 日本応用数理学会「応用数理」編集委員
17. 多田野寛人: 情報処理学会ハイパフォーマンスコンピューティングと計算科学シンポジウム HPCS2012 プログラム委員
18. 多田野寛人: 先進的計算基盤システムシンポジウム SACSIS2012 プログラム委員

#### 10. その他

1. T. Boku: Organizing Chair, 2012 International Workshop on HPC in Asia at ISC2012
2. 筑波大学計算科学研究センター・HPC サマーセミナー開催