

戦略的創造研究推進事業 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」  
研究課題「高性能・高生産性アプリケーションフレ  
ームワークによるポストペタスケール高性能計算の  
実現」

研究終了報告書

研究期間 平成 23年4月～平成28年3月

研究代表者：丸山直也  
(国立研究開発法人理化学研究所計  
算科学研究機構、チームリーダー)

## § 1 研究実施の概要

### (1) 実施概要

本研究課題ではポストペタスケールスーパーコンピュータアーキテクチャとして GPU 等のアクセラレータを用いたヘテロジニアスなアーキテクチャを想定し、同アーキテクチャにおいてアプリケーションの生産性と性能を両立することを目的とした垂直統合型ソフトウェアスタックの研究開発を行った。GPU 等のアクセラレータはその優れた電力効率によりポストペタ、さらにはエクサスケールに向けてますますその重要性が高まっているが、従来から用いられている GPU 向けプログラミング手法はハードウェアを制御することに主眼を置いた抽象度の低いものであり、生産性の低さが大きな課題となっている。これを解決するために、大域アドレス空間モデルを実現するスケラブルマルチスレッドランタイムを基盤とし、その上に将来に渡って有効なプログラミングモデルを実現するドメイン特化型アプリケーションフレームワークの開発を中心に研究を実施した。アプリケーションフレームワークでは特定の計算パターン専用のプログラミングに特化することで、自動並列化や通常のコンパイラ最適化を超えた高度な最適化が可能になり、汎用的なプログラムから GPU を含む種々のアーキテクチャ向けに最適化されたプログラムを自動生成する。これにより、機能的可搬性および性能可搬性を将来にわたって実現することが可能になり、プログラミングコストを大きく削減することが目的である。

我々は提案ソフトウェアスタックを流体計算および分子動力学法を対象として設計し、それらが大規模ヘテロジニアススーパーコンピュータである TSUBAME2.0/2.5 を基盤として設計、開発した。流体計算については青木グループ(東工大)、分子動力学法については泰岡グループ(慶応大学)が担当し、それらを対象としたアプリケーションフレームワークについては丸山グループ(理研/東工大)が中心的に進めた。またフレームワークの基盤となるランタイムについては田浦グループ(東大)が担当した。青木グループ、泰岡グループではフレームワークの手本となる参照実装の開発を中心に取り組み、それぞれ格子系流体計算および Fast Multipole Method (FMM) の高性能 GPU スパコン向け実装を開発した。特に青木グループによる Phase-field 法プログラムは TSUBAME2.0 を用いて 2011 年にゴードンベル賞を受賞した。泰岡グループは FMM 参照実装として ExaFMM を開発し、世界最高レベルの性能を達成した。

アプリケーションフレームワークおよびランタイムの開発はこれらの参照実装を設計の指針として進めた。まずランタイムとしては田浦グループにて共有メモリメニーコア向け軽量ユーザレベルスレッドライブラリ MassiveThreads や、その分散メモリ版である MassiveThreads/DM、また PGAS ライブラリ MGAS 等を開発した。これらはワークスチーリングによる負荷分散機能を有し、FMM や流体計算における AMR 等の負荷の不均衡性が生じるアプリケーションに特に有効である。

丸山グループを中心にこれらのランタイムを基盤としたアプリケーションフレームワークの開発を進めた。格子系流体計算についてはその基本計算パターンであるステンシル計算に着目し、ステンシル計算向けドメイン特化型言語 (DSL) Physis を開発し、これによって TSUBAME2.0 において高性能と高生産性の両立を実現した。またステンシル計算向けの種々の最適化アルゴリズムを開発し、気象・気候モデルなどの大規模実アプリケーションにおいて最大 1.7 倍の性能向上の達成などの成果を達成した。また、FMM のような階層的近似計算を伴う粒子間相互作用力の計算を簡便に記述することが可能なフレームワーク TAPAS を開発した。TAPAS はノード内外および GPU 向けに自動並列化を実現しており、共有メモリメニーコアについては MassiveThreads による負荷分散を実現しており、Physis と同様に高い抽象度によってプログラミングコストを大幅に削減し、生産性の向上を実現した。

以上のランタイムやフレームワークの研究成果については HPC における主要国際会議である ACM/IEEE SC, ACM HPDC, ACM ICS, IEEE IPDPS 等にて査読論文として発表した。また上記ゴードンベル賞や SIAM PP'14 の招待講演などアプリケーション参照実装についても国際的に非常に高く評価され、これらの成果をもとにエクサスケールに向けた国内・国際共同研究を各種進めている。

本研究でポストペタスケールシステムとして想定したアクセラレータを共用したアーキテクチャ

はエクサスケールに向けても重要な方向性の一つであり、我々が開発したソフトウェア基盤技術は継続的な拡張によってエクサスケールにおいても生産性と性能の両立が可能と見込んでいる。我々は本研究による成果を基盤とし今後も高性能・高生産性プログラミング技術の確立に貢献していく予定である。

## (2) 顕著な成果

< 優れた基礎研究としての成果 >

### 1. ステンシル向け高性能・高生産性プログラミング基盤技術

概要: (200 字程度) 格子系流体計算向け高性能・高生産性プログラミング基盤技術として、ステンシル計算 DSL からなる Physis フレームワークおよびスケーラブルなステンシルカーネル融合手法を開発した。Physis については ACM/IEEE SC'11 にて論文として発表され、その後と同様の研究が続く先駆的な研究となった。カーネル融合についても ACM/IEEE SC'14 およびその拡張が ACM HPDC'15 に採択され、概念としては古くからあるものでありながら、それに性能モデル技術を応用することで探索問題に帰着させ、大規模実アプリケーションにて最大 1.7 倍の性能向上を達成した点などが高く評価された。

### 2. 大域アドレス空間モデルと軽量マルチスレッドによるスケーラブルランタイム

概要: (200 字程度) 高生産と性能を両立したプログラミング言語の基盤として、共有メモリノード内および、異なる計算ノード間での、スケーラブル・高速な軽量スレッドライブラリの実装方式を確立した。同成果は MassiveThreads (公開中)、MassiveThreads/DM (公開予定) というソフトウェアとして実装されると共に、高性能並列分散計算に関するトップカンファレンスの一つ ACM HPDC'15 に採択された。

### 3. 高性能 Fast Multipole Method 実装の開発

概要: (200 字程度) Fast Multipole Method(FMM)の高性能な CPU・GPU 参照実装を行い、他の FMM コードとの比較を行った結果、単一ノードにおける性能でも大規模システムにおけるスケーラビリティにおいても世界最高性能を得ることができた。ExaFMMとしてコードを公開し、分子動力学、流体解析、電磁界解析などの分野で利用されている。CHARMM や GROMACS などの著名なソフトウェアにも組み込まれ、今後連立方程式の解法にも拡張される予定である。

< 科学技術イノベーションに大きく寄与する成果 >

### 1. 大規模 GPU スパコンにおけるフェーズフィールド法高性能実装技術の確立

概要: (200 字程度) フェーズフィールド法による 2 元合金の樹枝状凝固成長の大規模計算で、2011 年の ACM ゴードンベル賞を受賞した。ポストペタスケールの GPU スパコン TSUBAME2.0 のフルノードを用いたステンシル計算の参照実装であり、ピーク性能に対して 44% の実行性能 2.0 ペタフロップスを達成した。GPU を用いた計算での初受賞であるとともに、材料科学の分野の発展にも大きく貢献した。

### 2. 大規模 GPU スパコンにおける格子ボルツマン法高性能実装技術の確立

概要: (200 字程度) 典型的なステンシル計算である格子ボルツマン法による乱流計算の参照実装として、東京都心部の 10km 四方のエリアを 1m 格子で解像し、広域の都市気流解析を行った。空間平均を用いない大規模計算に適した LES モデルの導入にも成功している。50 億格子点を用い、メモリ律速の計算でありながら TSUBAME2.0 のフルノードで 600TFLOPS、TSUBAME2.5 で 1.1PFLOPS の実行性能を達成した。この成果は朝日新聞、読売新聞、TBS テレビ等、広くメディアに取り上げられた。

## § 2 研究実施体制

### (1) 研究チームの体制について

#### ① 「丸山(理研)」グループ

研究参加者

氏名	所属	役職	参加時期
丸山 直也	理化学研究所	チームリーダー	H23.4～H28.3
MohamedWahib Mohamed Attia	同上	特別研究員	H24.11～H28.3
松田 元彦	同上	研究員	H24.4～H28.3
Michel Müller	同上	テクニカルスタッフ	H25.1～H25.4
福田 圭祐	同上	リサーチアソシエイト	H27.10～H28.3
遠藤 敏夫	東京工業大学	特任准教授	H23.4～H24.9
野村 哲弘	同上	産学官連携研究員	H23.4～H24.3
Miquel Pericàs	同上	産学官連携研究員	H24.1～H24.3
Mark Siberstein	Israel Institute of Technology	Post Doctoral Fellow	H23.4～H24.3
張 家悦	東京工業大学	研究補助員	H23.4～H24.3
福田 圭祐	同上	研究補助員	H23.4～H24.9
Leonardo Bautista Gomez	同上	研究補助員	H23.4～H24.9
Irina Demeshko	同上	研究補助員	H23.4～H24.9
佐藤 賢斗	同上	研究補助員	H23.4～H24.9
金 光浩	同上	研究補助員	H23.4～H24.9
Aleksandr Drozd	同上	研究補助員	H23.9～H24.9
Amer Abdelhalim	同上	研究補助員	H23.10～H24.9
河村 知輝	同上	研究補助員	H23.9～H24.9
星野 哲也	同上	研究補助員	H23.9～H24.9
幸 朋矢	同上	研究補助員	H23.9～H24.3

研究項目

- ・ 全体とりまとめ
- ・ 高い生産性と性能を両立する格子系流体向けアプリケーションフレームワーク
- ・ 高い生産性と性能を両立する分子動力学法向けアプリケーションフレームワーク

#### ② 「青木」グループ

研究参加者

氏名	所属	役職	参加時期
青木 尊之	東京工業大学	教授	H23.4～H28.3
肖 鋒	同上	准教授	H23.4～H28.3
Christian Feichtinger	同上	連携研究員	H24.8～H25.1
CHENG-CHINSU (蘇正勤)	同上	准客員研究員	H24.7～H24.8
Andress Schäfer	同上	准客員研究員	H24.7～H24.8

Michel Müller	同上	準客員研究員	H24.7～H24.10
Michel Müller	同上	産学官連携研究員	H26.5～H26.8、 H26.12～H27.3
Michel Müller	同上	研究補助員	H27.4～H28.3
村主 崇行	理化学研究所	特別研究員	H23.4～H28.3
下川辺 隆史	東京工業大学	助教	H24.4～H28.3
小野寺 直幸	同上	特任助教	H24.4～H27.3
野村 哲弘	同上	産学官連携研究員	H24.4～H24.9
下川辺 隆史	同上	研究補助員	H23.5～H24.3
Marlon Arce ACUNA	同上	産学官連携研究員	H23.4～H28.3
黒木 雅弘	同上	研究補助員	H23.4～H25.3
黄 遠雄	同上	産学官連携研究員	H24.10～H28.3
孫 亮	同上	研究補助員	H23.4～H24.9
井上 孝一	同上	研究補助員	H23.4～H25.3
都築 怜理	同上	研究補助員	H23.10～H28.3
藤山 崇紘	同上	研究補助員	H25.4～H27.3
宮下 達次	同上	教育研究支援員	H23.11～H24.3
宮下 達次	同上	教育研究支援員	H24.6～H24.8
宮下 達次	同上	教育研究支援員	H24.1～H26.11
谷本 祐介	同上	研究補助員	H25.6～H27.8
Anna Marta Brown	同上	研究補助員	H26.4～H28.3
長谷川 雄太	同上	研究補助員	H26.4～H28.3
泉田 康太	同上	研究補助員	H26.4～H28.3
渡辺 勢也	同上	研究補助員	H26.4～H28.3
杉山 暁洋	同上	研究補助員	H26.4～H28.3
杉原 健太	同上	科学研究費 研究員	H26.9～H28.3
Sitompul Yos Panagaman	同上	研究補助員	H26.10～H28.3
趙 巍	同上	研究補助員	H27.4～H28.3
松下 真太郎	同上	研究補助員	H27.4～H28.3
渡邊 郁弥	同上	研究補助員	H27.4～H28.3
Gestrich Michael	同上	研究補助員	H27.5～H28.3
Johan Shu-Ren Hysing	同上	JSPS 外国人特別 研究員	H25.1～H27.11
津川 裕美子	同上	研究補助員	H27.5～H28.3

#### 研究項目

- ・ 格子系流体アプリケーションの大規模スーパーコンピュータにおける人手による参照実装
- ・ 高い生産性と性能を両立する格子系流体向けアプリケーションフレームワーク

#### ③ 「田浦グループ」

研究参加者

氏名	所属	役職	参加時期
田浦 健次郎	東京大学	准教授	H23.4～H28.3
吉本 晴洋	同上	研究補助員	H23.4～H25.3
頓 楠	同上	研究員	H23.4～H25.3
佐藤 重幸	同上	特任研究員	H27.4～H28.3
陳 婷	同上	研究補助員	H23.4～H25.9
中島 潤	同上	技術補佐員	H23.4～H28.3
秋山 茂樹	同上	技術補佐員	H23.5～H28.3
池上 克明	同上	研究補助員	H23.4～H25.3
河野 瑛	同上	研究補助員	H23.4～H25.3
堀内 美希	同上	研究補助員	H23.4～H25.3
中谷 翔	同上	研究補助員	H23.4～H26.3
中澤 隆久	同上	研究補助員	H25.4～H26.3
林 伸也	同上	研究補助員	H25.4～H26.3
菊池 悠平	同上	研究補助員	H25.4～H26.9
早水 光	同上	研究補助員	H25.4～H27.3
グエン ティエン バオ	同上	研究補助員	H25.4～H26.3
フィン ゴク アン	同上	研究補助員	H25.4～H28.3
島津 真人	同上	研究補助員	H26.4～H28.3
西岡 祐輔	同上	研究補助員	H26.4～H27.3
石川 康貴	同上	研究補助員	H26.4～H28.3
山部 芳朗	同上	研究補助員	H26.4～H28.3
岩成 達哉	同上	研究補助員	H26.4～H27.3
遠藤 亘	同上	研究補助員	H26.4～H28.3
佐藤 翔悦	同上	研究補助員	H26.4～H27.3
小野 裕也	同上	研究補助員	H26.4～H27.3
安東 一慈	同上	研究補助員	H26.4～H27.3
岩崎 慎太郎	同上	研究補助員	H26.4～H28.3

研究項目

- ・ 大域アドレス空間モデルと軽量マルチスレッドによるスケラブルランタイム
- ・ 高い生産性と性能を両立する分子動力学法向けアプリケーションフレームワーク

④「泰岡グループ」

研究参加者

氏名	所属	役職	参加時期
泰岡 顕治	慶應義塾大学理工学部 機械工学科	教授	H23.4～H28.3
成見 哲	電気通信大学 情報理工 学部 情報・通信工学科	教授	H23.4～H28.3
横田 理央	東京工業大学 学術国際 情報センター	准教授	H23.4～H28.3
川井 敦	慶應義塾大学	特任准教授	H23.4～H26.3
老川 稔	同上	研究員	H24.4～H27.3

高岩 大輔	同上	研究員	H24.4~H28.3
Milan Hodoscek	National Institute of Chemistry Slovenia	Senior Research Scientist	H23.4~H28.3
Siegfried Höefinger	Vienna University of Technology, Austria	HPC-Specialist	H23.4~H28.3
清水 陽介	電気通信大学	研究補助員	H23.4~H25.3
原 健一郎	同上	研究補助員	H23.4~H25.3
梶木 正博	同上	研究補助員	H24.4~H26.3
御崎 淳	同上	研究補助員	H24.4~H26.3
春田 英和	同上	研究補助員	H24.4~H26.3
吉川 和幸	同上	研究補助員	H24.4~H26.3
安枝 光	同上	研究補助員	H25.4~H26.3
堀田 将也	同上	研究補助員	H25.4~H27.3
神澤 俊	同上	研究補助員	H25.4~H27.3
塩谷 丈史	同上	研究補助員	H25.4~H27.3
高橋 悠	同上	研究補助員	H25.4~H27.3
Edgar Josafat Martinez Noriega	同上	研究補助員	H25.4~H28.3
平塚 将起	慶應義塾大学	研究補助員	H23.4~H24.3
山本 詠士	同上	研究補助員	H23.4~H25.3
増永 充宏	同上	研究補助員	H23.4~H25.3
野村 昴太郎	同上	研究補助員	H24.4~H28.3
大和 伸好	同上	研究補助員	H24.4~H26.3
中西 快斗	同上	研究補助員	H25.4~H26.3
湯原 大輔	同上	研究補助員	H25.4~H28.3
荒井 規允	近畿大学 理工学部 機械工学科	講師	H23.10~H28.3
古石 貴裕	福井大学大学院 工学研究科物理工学専攻	准教授	H24.1~H28.3
山本 詠士	慶應義塾大学	研究補助員	H26.4~H28.3
友部 勝文	同上	研究補助員	H26.4~H28.3
西村 龍斗	同上	研究補助員	H26.4~H28.3
野澤 拓磨	同上	研究補助員	H26.4~H28.3
井上 堅斗	同上	研究補助員	H26.4~H28.3
大和田 瑛美華	電気通信大学	研究補助員	H26.4~H28.3
嶋田 貴行	同上	研究補助員	H26.4~H28.3
瀬戸田 幸寿	同上	研究補助員	H26.4~H28.3
築島 卓弥	同上	研究補助員	H26.4~H28.3
土居 英男	慶應義塾大学	研究員	H26.4~H28.3
伊藤 一輝	電気通信大学	研究補助員	H27.4~H28.3
佐藤 知哉	同上	研究補助員	H27.4~H28.3

#### 研究項目

- ・ 分子動力学アプリケーションの大規模スーパーコンピュータにおける人手による参照実装
- ・ 高い生産性と性能を両立する分子動力学法向けアプリケーションフレームワーク

⑤ 「丸山(東工大)」グループ

研究参加者

氏名	所属	役職	参加時期
丸山 直也	東京工業大学	客員准教授	H24.10～H28.3
野村 哲弘	同上	産学官連携研究員	H24.10～H28.3
遠藤 敏夫	同上	准教授	H24.10～H28.3
福田 圭祐	同上	研究補助員	H24.10～H27.9
Irina Demeshko	同上	研究補助員	H24.10～H25.3
佐藤 賢斗	同上	研究補助員	H24.10～H26.3
Aleksandr Drozd	同上	研究補助員	H24.10～H25.9
Amer Abdelhalim	同上	研究補助員	H24.10～H27.3
河村 知輝	同上	研究補助員	H24.10～H26.3
星野 哲也	同上	研究補助員	H24.10～H28.3
Leonardo Bautista Gomez	同上	産学官連携研究員	H24.10～H25.3
Miquel Pericàs	同上	東京工業大学特別研究員	H25.5～H26.3
Hamid Reza Zohouri	同上	研究補助員	H27.10～H28.3

研究項目

- ・ 高い生産性と性能を両立する格子系流体向けアプリケーションフレームワーク
- ・ 高い生産性と性能を両立する分子動力学法向けアプリケーションフレームワーク

(2) 国内外の研究者や産業界等との連携によるネットワーク形成の状況について  
(研究チーム外での連携や協働についてご記入ください。ライフ分野では臨床医等を含みます。)

国内共同研究開発連携事例1

理研計算科学研究機構内にて気候シミュレーションの専門家(富田、八代、西澤ら)との連携によりステンシル向け各種ソフトウェアの開発、適用、最適化等の共同研究を実施し、フレームワーク設計の指針となった。また SC'14 および HPDC'15 にて発表した自動 GPU カーネル融合最適化等の研究へと繋がった。今後もポスト京およびポストムーアに向けて連携していく予定である。

国内共同研究開発連携事例2

気象庁との共同研究として、本研究課題にて開発した Hybrid Fortran を現業の天気予報に用いられている ASUCA へ適用を進めており、平成 27 年度内に ASUCA 全体の Hybrid Fortran による GPU 対応がほぼ達成された。現業コード全体をフレームワークによりハイブリッド対応させる試みは我々が知る限り世界でも例をみない。今後も引き続きポストペタおよび将来のエクサスケールに向けて気象庁と ASUCA の共同研究を進め、将来的な Hybrid Fortran ベースの実運用に向けた検討を続ける。

国際共同研究開発連携事例1

日独仏国際共同研究(SPPEXA)にドイツ Universität Hamburg およびフランス Ecole Polytechnique との共同プロジェクト AIMES が採択され、平成 28 年 1 月から平成 30 年 3 月まで実施することとなった。これはこれまでの我々の参照実装や DSL などといった種々のステンシル計算



向けソフトウェアが高く評価されたことによるものであり、今後日独仏の気象・気候モデルを中心とした大規模アプリケーションへの適用評価を通じた有効性・実用性を発展させ、それを次世代スパコンシステムにて実証することを計画しており、スイス CSCS や NVIDIA や Intel 等のベンダーとも連携して進める予定である。

#### 国際共同研究開発連携事例2

Cray 設計の並列プログラミング言語 Chapel で MassiveThreads が用いられており、今後も連携を続ける。

#### 国際共同研究開発連携事例3

SC'15 においてユーザレベルスレッドの標準化というテーマの Birds of Feather が、Argonne National Laboratory の Pavan Balaji 博士の主導で開催され、田浦はその Advisory Board メンバーとして今後標準化活動に貢献していくこととなっており、標準化活動に加わる研究者と連携を続ける。

#### 国際共同研究開発連携事例4

ExaFMM を中心に国際連携を展開した。平成 26 年度の国際活動強化費によりサウジアラビアアブドゥラ国王科学技術大学(KAUST)に3名の研究員・学生が 3 ヶ月間滞在し Extreme Computing Research Group (PI: David Keyes)のグループと国際共同研究を行った。この滞在では ExaFMM をより分子動力学法の研究者が安心して使えるように計算精度や信頼性に重点を置いて研究した。今後も横田准教授を中心にして FMM だけでなく H 行列などのテーマで David E. Keyes 教授との共同研究を継続していく予定である。また、分子動力学ソフトウェア CHARMM の開発者 Milan Hodoscek (National Institute of Chemistry, Slovenia)を 2011-2015 年にかけて毎年日本へ招聘し、CHARMM と ExaFMM の統合を行った。FMM を分子動力学シミュレーションコードに統合したいというニーズは他のコードでもあり、KTH の Berk Hess と共同で分子動力学ソフトウェア GROMACS と ExaFMM との統合も進めている。

#### 国際共同研究開発連携事例5

青木はドイツのミュンヘン工科大学およびエルランゲン・ニュルンベルグ大学との GPU のステンシル計算についての連携が進み、平成 27 年度から連携する SPPEXA に参画するだけでなく Steering Committee への就任を要請されている。

#### 国際共同研究開発連携事例6

丸山(兼務)、青木、横田らが所属する東京工業大学学術国際情報センターは米国オークリッジ国立研究所、スイス工科大学計算機センターと共同研究を推進するための枠組みである Accelerated Data Analytics and Computing (ADAC)を設立した。これはこれまでの東工大の TSUBAME を中心とした各種の研究成果が国際的に高く評価されたことの表れであるが、その一部は本研究成果によるものである。今後、本枠組みを活用してこれまでの研究成果を元にした共同研究を実施していく予定である。

#### 国際共同研究開発連携事例7

David Keys 教授が代表を務めるサウジアラビアアブドゥラ国王科学技術大学(KAUST)の Extreme Computing Research Center (ECRC)との連携を進めている。平成 26 年9月には本チームと ECRC の共催で ECRC-CREST Joint Workshop を KAUST にて開催し、共同研究に向けた研究発表および研究交流を行った。その後、平成 27 年4月に ECRC 所属であった横田が東工大学術国際情報センターに着任した。現在東工大学術国際情報センターと ECRC との国際交流協定締結に向けて準備中であり、平成28年 2 月末に KAUST にて学術国際情報センターと ECRC との共催で「KAUST-GSIC Workshop on Hierarchical Solvers for Complex Flow Simulation」を開催した。東工大からは青木、横田など6名が参加し、混相流、FMM 前処理疎行列解法、空力解析、MHD、フェ

ーズフィールド法、浅水波、格子ボルツマン法、AMR、GPUコンピューティングなどについて議論を行った。

#### ポストムーア時代に向けた次世代高性能計算に関する連携

丸山、田浦らはポストムーアに向けた次世代の計算機科学・計算科学に関する共同研究プロジェクト提案に主要メンバーとして参画しており、それぞれ本研究課題による成果を基にそれを将来のポストムーア時代に向けてさらに発展させるための研究を計画中である。

#### 高性能計算システムロードマップに関する連携

丸山は、ポストペタスケールにとどまらずその先の高性能計算システムに向けた技術開発ロードマップについて、田浦らを含む国内の37名の高性能計算に携わる研究者らによる協力のもと白書としてまとめた。本白書は <http://www.open-supercomputer.org/workshop/sdhpc> からダウンロード可能である。本取り組みは「戦略的高性能計算システム開発に関わるワークショップ」として実施した検討をまとめたものである。また、同白書をもとにした「今後の HPCI 技術開発に関する報告書」(上記 URL よりダウンロード可能)は現在検討が進められているポスト京に向けた基本方針を与えたものである。

#### GPUの利用に関するネットワーク形成

青木が主査を務める東京工業大学学術国際情報センターのGPUコンピューティング研究会は、全国の大学・公的機関の研究者、民間企業から約1000名の登録があり、スパコンTSUBAMEを利用した講習会、シンポジウム、セミナー等の開催やメーリングリストを通じて情報交換が行われており、ポストペタスケールの演算デバイスとして有望なGPUの利用に関するネットワークが形成されている。登録者の半数以上は産業界からである。

### § 3 研究実施内容及び成果

#### 3.1 高性能高生産性アプリケーションフレームワーク(理化学研究所/東京工業大学 丸山グループ)

##### (1)研究実施内容及び成果

本グループでは研究項目3格子系流体向けフレームワークおよび研究項目5分子動力学法向けアプリケーションフレームワークに主に取り組んだ。前者ではステンシル計算にて高生産性と高性能を達成するためのソフトウェア技術としてドメイン特化型言語(DSL)を中心とした種々の高生産性指向ソフトウェア技術を開発した。これは主に構格子計算用アプリケーションフレームワークであるPhysis(課題1)、同様にAMRに対応したフレームワーク(課題2)、スケーラブルな自動局所性最適化手法(課題3)、指示文によるプログラミングモデルにおけるデータレイアウト最適化(課題4)に分類され、さらにAMRフレームワーク(課題4)に取り組んだ。研究項目5についてはFMMに代表される階層的粒子法を対象としたフレームワークTapasを開発した(課題5)。これは木構造として表現される階層化された粒子集合の相互作用力計算について直感的な逐次プログラミングから分散メモリ並列化やGPUへのオフロードを自動化した。以下、それぞれについて実施内容・成果および位置づけについてまとめる。

##### 3.1.1 構格子向けフレームワーク Physis

#### 【実施内容・成果】

**概要** Physis はステンシル計算を宣言的に記述するためのDSLであり、多次元格子の作成、格子点に対するステンシル計算を定義できる [(1)–9]。図1に単純な7点ステンシルの記述例を示す。ステンシル計算はこの例にあるように各格子点に対する操作としてC言語の関数として定義し、格子の隣接点を用いて各点を更新する計算となる。ただし、隣接点へのアクセスには自動並列化

のための制約を設けており、具体的には隣接点へのオフセットが静的に解析可能でなければならない。

ユーザが記述した Physis コードは Physis DSL 変換器によって各種実行環境向けに変換される。現在のところ実行対象環境として単一 GPU、MPI 並列、MPI による複数 GPU をサポートしている。DSL 変換は Physis DSL にて記述されたコードを対象アーキテクチャ向け実行コードに変換するものであり、具体的には GPU 向け変換であれば格子の GPU メモリ上への確保、関数として記述されたステンシルの GPU デバイス関数への変換等を行う。また、分散メモリ環境実行向けに変換する場合は領域分割および格子の袖領域交換などの通信コードを生成する。ステンシル計算を分散メモリ環境上で実行する際の典型的な最適化として、袖領域交換の通信を内部領域計算とオーバーラップさせ通信コストを隠蔽する手法があるが、本フレームワークでは MPI 向け DSL 変換時に自動的に本最適化を適用したコードを生成可能である。

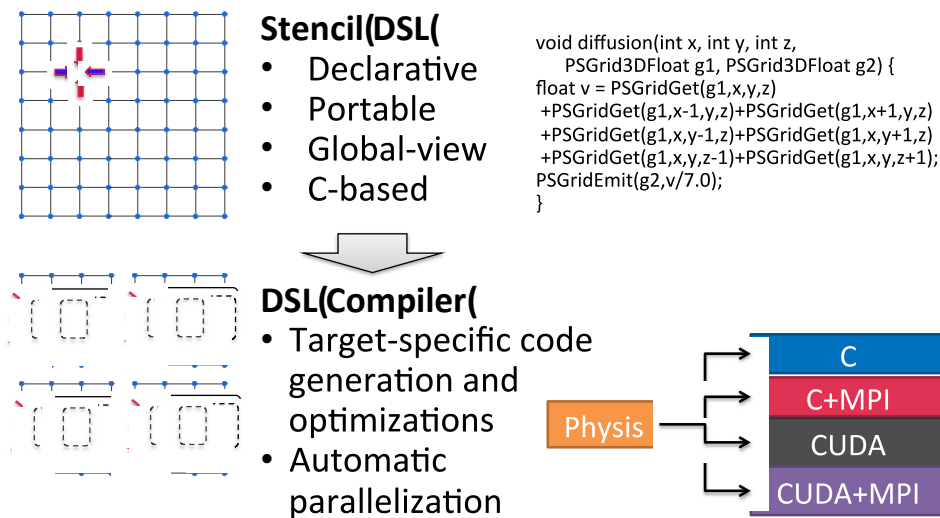


図 1 Physis フレームワーク概要

**生産性** ステンシル計算は比較的単純な計算パターンであるが、分散メモリ環境における領域分割や通信と計算のオーバーラップ最適化、CUDA による GPU 向け実装などは人手による実装ではプログラミングが煩雑になり誤りが混入しやすい。本フレームワークではステンシル計算に特化することでこのようなシミュレーションの実現には非本質的な処理を自動化し、これによって生産性を向上させる。生産性の評価の指標としてコードサイズを比較したところ、逐次計算を C 言語で記述した場合と同等のコードサイズに抑えられることを確認した。一般に MPI や CUDA などのプログラミングではコードサイズが大幅に増加し、プログラミングの手間も増えるが Physis ではステンシル計算に特化することでその問題を解決した。

**最適化** 高生産性に加えて高性能を実現するために Physis DSL 変換器によって生成されるコードの最適化を実現した。具体的には一般的な汎用コンパイラでも原理的には実現可能な基本最適化と、DSL による高い抽象度によって可能になる最適化に区分できる。基本最適化としては、DSL 変換器における最適化パスとして、配列オフセット計算の最適化、レジスタブロッキング、ループピーリングなどである。これらの最適化によって自動生成されたコードが人手によって最適化された CUDA コードの 95%の性能を達成しており、十分な性能を達成できたと言える(図 2)。さらに、これらの最適化の組み合わせや GPU におけるスレッドブロックサイズの最適値は適用されるステンシ

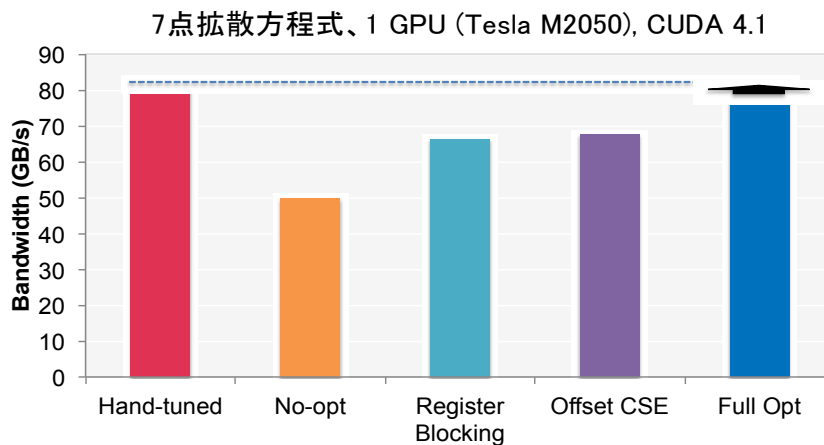


図 2 7点拡散方程式性能比較

ルに依存するものであるが、自動チューニングによって選定する機構を実現し、最適化の手間を削減した。

DSL ならではの最適化として、データレイアウトの自動最適化を実現した。Physis では多次元格子の各格子点が持つデータを C 言語の構造体として定義可能であり、プログラミングモデルとしては構造体の配列 (Arrays of Structures, AoS) として表現される。例えば、以下に示す格子ボルツマン法の場合では各格子点あたり 22 個の値を持つが、Physis DSL ではそれらを構造体としてまとめることでプログラミング可能である。Physis では AoS として DSL 上で記述されたプログラムを実際の実行アーキテクチャ向けに変換する際に対象アーキテクチャ向けに最適なレイアウトに変換する。一般に GPU 等のベクトル計算に最適化されたアーキテクチャでは配列の構造体 (Structures of Arrays, SoA) が AoS よりメモリアクセスの観点から効率が良く、スカラ CPU では AoS がキャッシュとの親和性が高く効率上優れている場合が多い。このデータレイアウトの切り替えは通常の手によるプログラミングでは大きな手間となっているが、Physis では DSL 変換器が対象アーキテクチャ毎に SoA と AoS を自動的に切り替えることで透過的に実現している。

さらに高度な最適化として時間軸方向のブロッキングの実現に向けた検討および設計も行い、主に予備評価および性能モデル化を実施した[(3)-②-98]。

**アプリケーション評価** 実アプリケーションによる評価として青木グループにおいて実装された格子ボルツマン法アプリケーションおよび気候シミュレーションコード SCALE-LES の Physis による実装および性能評価を行った。前者の格子ボルツマン法については Physis による実装を終えており、図 3 に示すように人手による実装と同等の性能が達成できることを確認した。後者の SCALE-LES については主要カーネルの一つであるルンゲクッタ法によるカーネルの Physis への移植を行い、GPU 実行による妥当な性能向上を達成できることを確認した。

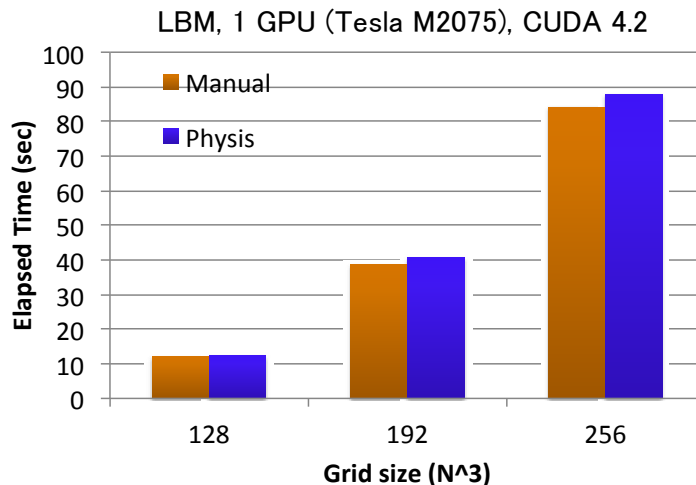


図 3 格子ボルツマン法性能比較

#### 【位置づけや類似研究との比較】

Physis と同様にステンスル計算を対象にした DSL や最適化の研究は近年特に活発に実施されている ([Unat 2011], [Christen 2011], [DeVito 2011], [Koestler 2014]等)。Physis はそれらの中でもいち早く GPU クラスタ向けに自動並列化や通信と計算のオーバーラップなど実現したものといえるが、これは我々が先駆的に高度な参照実装を開発する青木グループと密に共同研究を進めたことに依るものであり、本研究チーム構成の強みと言える。一方で、GPU 等のアクセラレータ向けプログラミングモデルとしては、DSL のようなドメイン特化型アプローチの他に指示文によるアプローチが以前から研究されていたが、本研究実施期間中の新たな傾向として OpenACC がその成熟度から広く利用されるようになってきた点があげられる。特にステンスル計算のような規則的な計算では指示文の追加のみにより CUDA による明示的なプログラミングと同等もしくは近い性能が達成できる場合が多く、

また既存 CPU 向けプログラムからの移植の容易さから特に大規模アプリケーションにおいては OpenACC がより実用的と言える。しかし、標準の OpenACC では上述のデータレイアウトの最適化等を実現することは困難と想定されるため、Physis のような DSL アプローチの方が本質的には高性能を達成可能である。今後は DSL による高度な最適化を OpenACC のような指示文コンパイラへの拡張として実現することが有望と思われ、その一部は課題 4 として実施した。

### 3. 1. 2 AMR フレームワーク

#### 【実施内容・成果】

ポストペタスケール時代に向けた高性能・高生産性 AMR フレームワークとして、GPU クラスタ向け Octree による AMR フレームワークに青木グループと共同で取り組んだ。これは Physis と同様に構造格子差分法を対象とし、AMR 機能をランタイムライブラリとして実現している。本稿執筆時点ではランタイム部の実装を終えており、Octree のリーフに相当するセルに対するステンスル計算やセルを refine するか coarsening するか判断はユーザから与えられた CUDA 関数を呼び出す実行方式としている。AMR ランタイムでは典型的に用いられる補完方式や格子間隔の調整方式を実装しており、プログラマはそれらを取捨選択してプログラミング可能である。ランタイムはユーザから与えられた関数を基に適切に格子の refinement および coarsening を実施しつつ計算を進め、その際に必要となるホスト・GPU 間のデータ転送や GPU メモリの管理などはランタイム側によって自動的に管理される。Gamer や Uintah 等の既存の GPU をサポートした AMR ではステンスルの計算のみ GPU を用い、AMR 処理は CPU 側で実装する方式が主流だが、我々のランタイムは CPU・GPU 間のデータ転送を最小化するためにすべての処理を GPU 側で実現している。また、複数ノード実行

にも対応しており、空間充填曲線による Octree の分散メモリにまたがる分割および隣接データの MPI による交換もランタイム側で自動的に処理される。

以上の AMR ランタイムの評価として GAMER との性能比較を hydrodynamics、shallow-waters シミュレーションにて行い、CPU・GPU 間データ移動を削減した効果により最大 1.4 倍の性能向上を確認した[(1)-84]。また、青木グループにて開発されたゴードンベルを受賞した Phase-field 法コードの AMR 化を青木グループと共同で実施し 1000GPU 弱までのウィークスケーリング評価を行い、必要な精度を保ちつつ AMR により性能を 1.6 倍に向上可能であることを確認した(図 4)。また AMR 化に必要なプログラム行数はたかだか 700 行程度でありランタイムにより AMR の実現を大幅に簡易化できた。

現在のフレームワークは GPU クラスタを対象としたプロトタイプ開発が完了しており、指示文にて指定されたステンシル計算コードから GPU 実行コードを自動生成する方式としている。これは上述の AMR ランタイムと協調して動作し、ユーザは一樣格子と同等のプログラミングに加えて格子粒度

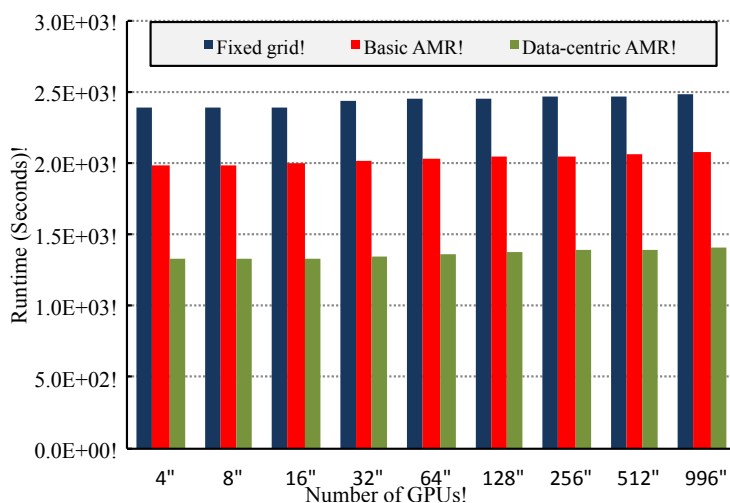


図 4 Phase-Field 法の AMR による並列性能比較 一樣格子(青)と提案 AMR(緑) 変更を宣言的に指示するプログラミングのみが必要とされ、GPU クラスタ上で実際に動作させるための並列化やデータ管理はコンパイラおよびランタイムの協調によって実現している。今後 OpenMP 等にも対応し、CPU プラットフォームなどの他のアーキテクチャ上でも高性能を達成するための拡張を予定している。

#### 【位置づけや類似研究との比較】

AMR に関する研究は古くから行われているが、GPU 等のアクセラレータに対応した研究は未だ多くはない。代表的な研究としては上記の GAMER やユタ大学の Uintah フレームワークによるものがあげられるが、それらも単にステンシル計算部分の GPU へのオフロードに留まり、AMR 処理自体は CPU 上で実行されるため、上述の通り我々の提案法規と比較して非効率的である。また異なるアーキテクチャに対応した可搬性を有したフレームワークは我々の知る限り未だ実現されていないが、我々はステンシルカーネル部分のコード自動生成を実現することでそれを実現した。

#### 3. 1. 3 スケーラブルな局所性最適化手法

##### 【実施内容・成果】

ステンシル計算を用いるアプリケーションレベルの特徴を用いた最適化としてステンシル計算カーネルの自動融合最適化手法を開発した。これは構造格子ステンシル計算の重要な応用例である気象・気候モデル等の特徴を応用したものである。そのようなアプリケーションでは単一のステンシ

ルを時間方向に繰り返し実行するのではなく、単一時間ステップに数十もの多数のステンシルを計算するパターンが一般的である。このような場合にはステンシルを適切に融合もしくは分割することが局所性最適化に有効だが、一般的なコンパイラや既存最適化手法では最適化対象問題空間が指数的に拡大するため実現されていない。

我々は探索ヒューリスティクスを応用することでこれまでの課題を解決し、数十、数百におよびステンシルカーネルの融合・分割を現実的な時間にて求める自動最適化手法を設計、開発した[(1)–68, (1)–81]。具体的には、まず CUDA プログラムとして与えられるステンシルカーネルのプログラム解析によりその性能モデルを構築し、またプログラム全体のカーネルの依存グラフを計算する。次に融合することによってオンチップメモリを介したデータの再利用が可能になるカーネルの組み合わせを全カーネルについて計算し、それぞれ性能モデルにより融合の効果を推定し、最良組み合わせを探索する。カーネルの組み合わせパターン数はカーネル総数に対して指数関数的に増加するため、総当たりによる探索は非現実的であり、我々は進化計算を応用したヒューリスティクスにより数百のカーネルに対しても数分で探索を終了可能なアルゴリズムを開発した。実際に気象気候モデル等の6つのアプリケーションに適用し、それぞれほぼ数分で最適解に到達可能であり、図 5 に示されているように実際に 1.1 倍から 1.7 倍の性能向上を達成した。

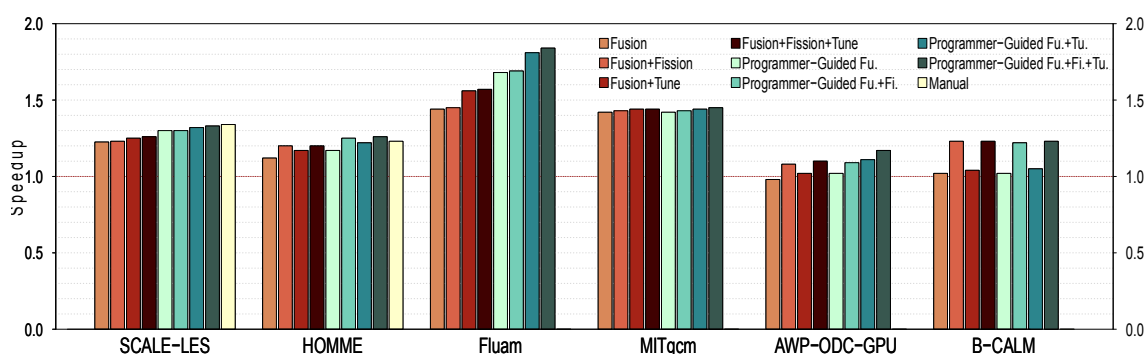


図 5 自動カーネル融合・分割による性能向上率

#### 【位置づけや類似研究との比較】

本研究は従来からあるループ融合最適化を性能モデル化によって探索問題に帰着させ、それによってこれまででは不可能であった規模の実アプリケーションコードにおいて最大 1.7 倍の性能向上をほぼ自動的に実現した点が画期的な成果である。ステンシル計算のベンチマーク的な小規模コードでは単一のステンシルのみの性能で評価するが、実際には気象・気候等の時間発展シミュレーションコードに代表されるように毎時間ステップ毎の多数のステンシルを計算する方法が一般的である。これは GPU に限らない問題であり、多数のステンシルループを融合し少数の大きなループボディを構成することによってキャッシュ利用効率の向上を狙えるが、一方で無制限に融合した場合データキャッシュおよび命令キャッシュともに不足し逆に性能低下に陥る可能性もある。実際に京コンピュータ等においてもアプリケーション開発者にとってジレンマとなっている問題であるが、本研究の手法を応用することによって解決可能である。

#### 3. 1. 4 指示文によるプログラミングモデルにおけるデータレイアウト最適化

##### 【実施内容・成果】

GPU 等に対応した指示文に基づいたコンパイラとして OpenACC などが普及しつつある。CUDA によるプログラミングと異なり既存 CPU 向けプログラムへの指示文の追加のみで GPU へのオフロードが可能となるが、一方で効率のためには GPU アーキテクチャを考慮した最適化が依然として必要である[(1)–31]。特に上述した AoS と SoA のデータレイアウトについては既存 CPU コード向けには

AoSとしてプログラミングされている場合が多いため GPU 向けに SoA に変更する必要があるが、これは指示文の追加の追加だけでは対応できずアプリケーション全体に跨がったコードの書き換えが必要になり、生産性の観点から好ましくない。我々は、OpenACC の拡張としてデータ構造を抽象化して扱うための指示文を設計、実装した。これはプログラマにデータレイアウトを SoA から AoS もしくはその逆などの変換を宣言的に指示可能とするものであり、実際に姫野ベンチマークにおいて既存 CPU コードからの指示文によるレイアウト最適化によって最大で 27%の性能向上を得た [(1)-68]。

#### 【位置づけや類似研究との比較】

最適データレイアウトのアーキテクチャ毎の違いは良く知られた問題であり、既存 CPU コードから GPU へ移植する際に典型的に実施される最適化である。OpenACC によって移植のコストが大幅に削減されたが、このような最適化までは考慮されていない点が大きな課題である。我々は OpenACC の拡張として独自の指示文を追加することで最適化のコストを大幅に削減することに成功した。今後はこれをさらに発展させ、最適レイアウトを推測することにより指示文を必須としない最適化を実現する計画である。

### 3. 1. 5 階層的粒子法向けフレームワーク TAPAS

#### 【実施内容・成果】

FMM や Barnes-Hut のような階層的粒子法アルゴリズムを対象としたフレームワーク TAPAS (Tree-based Adaptively Partitioned Space)を設計、開発した。泰岡グループで開発された ExaFMM を参照実装とし、それと同等の性能を達成することを性能目標とした。また生産性の目標としては GPU クラスタのような分散メモリアクセラレータ環境において自動並列化を実現することとした。本稿執筆時点では後者の生産性の目標を実現したところであり、本課題実施期間内において前者についても実現する計画である。以下 TAPAS の設計、実装について述べる。

TAPAS は ExaFMM の逐次実装を基にそれと同等のプログラミングが可能な設計とし、C++テンプレートフレームワークとして実現した。具体的にはユーザ定義データ構造の粒子を持った 3 次元空間を階層的に木として表現し、木に対する再帰的な計算が可能である。例えば FMM の場合は ExaFMMと同様に 2つの部分木を同時に辿りながらその部分木間の距離に応じた処理の分岐により遠方近似計算と近接直接計算をプログラム可能である。

上記設計のフレームワークにおいて生産性の目標である自動並列化を実現するために、我々は階層的粒子法の並列化における典型的な並列化手法をフレームワーク内において実現した。典型的にはまず空間充填曲線によって問題空間を並列プロセス間で分割し、並列プロセス間で LET を構築し、相互作用力の計算を各プロセスが自身の部分木について計算する。TAPAS においてもこれと同様に木の分割には空間充填曲線による手法を実装しており、プログラマからはライブラリ API 呼び出しのみが必要である。一方、LET 構築には FMM 等のアルゴリズムを固定した場合は異なり、部分木間のデータ依存解析が必要になる。これは TAPAS では木の辿り方はユーザの木走査コードによるため、実際にリモート部分木より必要になるデータは自明ではないためである。また再帰的な計算として表現される木走査であるため規則格子のステンシル計算のような静的解析は難しく、動的な解析が必要である。これを実現する方法としては田浦グループで開発されているような分散共有メモリを実現するランタイムを用いる方法が考えられるが、我々は最初の実装として Inspector-Executor 方式を採用した。ユーザから与えられる木走査コードをまず Inspector モードで実行し、リモートから必要なデータを求める。この際には木の走査のみ実行し、相互作用力の計算は省略する必要があるが、我々はこれをテンプレートメタプログラミング機能により実現した。依存性解析が計算された後、MPI 通信により LET を構築し、再度ユーザ木走査コードを実行し相互作用力を計算する。また、LET 構築後の計算には田浦グループによる MassiveThreads を用い自動的にスレッド並列化した。さらに一般的に計算負荷が大きい直接計算に相当するリーフセル間の計算は GPU に自動的にオフロードする。この際にセル毎のオフロードでは GPU 呼び出しのコストが大きくなるため、適当な数の対をまとめてオフロードする方式とした。実際に TAPAS 上に



Barnes-Hut や ExaFMM を実装し、逐次版実装とほぼ同等のプログラミングにより GPU クラスタ上で自動並列化が実現できることを確認した。コードサイズについても 5000 行程度の MPI 版 ExaFMM に対して、TAPAS では 2000 行弱と半分以下に抑えられた。

以上のとおり生産性の目標は達成したが、本稿執筆時点では TAPAS の性能最適化は完了しておらず、現状ではその性能は ExaFMM 等と比較して一部劣る状況である。現在泰岡グループ、田浦グループと共同で性能評価、チューニングを実施中であり、近日中に TSUBAME2.5 において ExaFMM と同等の性能を達成し、性能目標も達成する予定である。

#### 【位置づけや類似研究との比較】

N 体問題などの粒子法はその計算負荷の大きさから GPU などのアクセラレータへの親和性が高く、ExaFMM などこれまでも多くの高性能実装が開発されている。しかしながらそれらはアルゴリズムとアーキテクチャを固定し、それに対して人手によって並列化、最適化したものであり、性能可搬性を有せず生産性に問題がある。我々の TAPAS は FMM に限らず階層的粒子法一般について自動並列化を達成しており、ユーザは明示的な並列プログラミングの必要なしに大規模実行が可能なアプリケーションを実装可能である。現状ではチューニングがされていないため性能については参照実装には及ばないが、チューニング手法は過去の研究により良く知られておりそれらをフレームワーク内に内包することで同程度の性能を達成する予定である。

#### 【公開済みソフトウェア】

開発したソフトウェア： 構造格子流体シミュレーション向けフレームワーク (Physis)

公開： 公開済み (<http://github.com/naoyam/physics>)

機能： アーキテクチャ独立な簡易なステンシル記述からヘテロジニアスポストペタスケールシステム向けのコードを自動生成する機能を持つ。

特徴： 通常のプログラミング言語で記述する場合に比べて本フレームワークを用いることで可搬性および高性能を達成可能。

実行可能なマシン： 生成されるコードは通常の CPU 向けおよび GPU 向けコードであり、それぞれ MPI による並列をサポートしている。

潜在的なユーザ： Physis は構造格子を用いたステンシル計算であれば適用可能であり、気候気象シミュレーション、地震動シミュレーション等の流体シミュレーションに適用可能であり、これらは今日および将来のスーパーコンピュータにおける重要なアプリケーションドメインである。

開発したソフトウェア： 階層的粒子法フレームワーク TAPAS

公開： プロトタイプを公開 (<https://github.com/keisukefukuda/tapas>)

機能： 木構造に対する階層的な処理としてプログラミング可能な粒子法向けフレームワーク。

特徴： 自動並列化により明示的な並列プログラミングすることなく分散メモリシステムおよび GPU 上で並列動作。

実行可能なマシン： MPI をサポートした並列環境。GPU を利用の場合は CUDA がインストールされていること。

潜在的なユーザ： 粒子法シミュレーションコード開発者。FMM に限らず階層的に表現可能な粒子法相互作用力であればプログラミング可能であり、自動並列化により高生産性が保証される。性能についても今後改善予定。

開発したソフトウェア： 自動カーネル融合・分割フレームワーク

公開： プロトタイプを公開 (<https://github.com/wahibium/KFF>)

機能： 複数のカーネル呼び出しからなる CUDA アプリケーションソースコードを入力とし、局所性向上のためにカーネルの融合・分割を自動的に施した CUDA ソースコードを生成。融合・分割はユーザがヒントを与えることも可能。

特徴： 気象・気候モデルのように多数のカーネル呼び出しからなるアプリケーションでは GPU カ

カーネルの融合・分割は煩雑だが重要な最適化であるが、局所性とワーキングセットサイズのトレードオフの関係にあるため特に大規模アプリケーションでは最適化の機会が十分に活かされない場合が典型的である。本フレームワークによって局所性を考慮せずに記述されたプログラムから最適化されたプログラムを自動生成可能である。

実行可能なマシン： フレームワークが対象とするプログラムは CUDA プログラムであり GPU を対象としたものである。

潜在的なユーザ： 多数のメモリ律速なカーネルから構成されるアプリケーション開発者

#### 【公開予定ソフトウェア】

開発したソフトウェア： AMR フレームワーク

公開： 公開予定

機能： GPU 上で Octree による構造 AMR を実装するためのランタイムライブラリ。

特徴： マルチノード、マルチ GPU 上で自動的に実行。ほぼすべての処理を GPU 上で実行しデータ移動コストを削減

実行可能なマシン： GPU クラスタ。TSUBAME2.5 上の約1000GPU で動作確認済み

潜在的なユーザ： 流体計算等のアプリケーション開発者。上述のとおり一様格子に対してシミュレーションとしての精度を保ったまま性能を向上可能であり、これまで一様格子上で実装されてきたシミュレーションの性能向上にも有効である。

開発したソフトウェア： OpenACC 向けデータレイアウト最適化拡張

公開： 公開予定

機能： OpenACC において拡張プラグマにより SoA と AoS や配列の次元の入れ替えなどを実現

特徴： 高生産性を指向したハイレベルプログラミングモデルである指示文によるアクセラレータ向けコンパイラでは、計算やデータのオフロードが可能だが、必ずしも既存の CPU コードをそのままオフロードすれば高性能が達成できるとは限らずプログラムコードの書き替えが必要である。特にデータレイアウトの変更はソースコード全体に渡って書き換えが必要となる場合が多く、生産性の観点から好ましくない。本拡張により OpenACC においてディレクティブのみによってデータレイアウトの最適化が可能になる。

実行可能なマシン： フレームワークが対象とするプログラムは標準 OpenACC プログラムであり OpenACC がサポートした CPU および GPU 上で実行可能である。

潜在的なユーザ： OpenACC アプリケーション開発者。特に構造体の配列を用いた CPU 向けコードを元にしたアプリケーション開発時に有効。OpenACC は GPU 向けに利用が拡大しており、その潜在的なユーザ数は非常に多いと言える。

本研究ではポストペタスケールシステムとして CPU と GPU を共用したヘテロジニアスアーキテクチャを想定して研究開発を進めてきたが、エクサスケールに向けて GPU 等のアクセラレータはさらにその重要性を増している。我々はそのようなアーキテクチャにおける高い抽象度を持ったプログラミングモデルが必要であることに着目し、それを実現するために DSL 等のソフトウェアスタックを提案、実証してきた。一部はまだ開発中であるが、基本的には今後は我々のソフトウェアスタックをエクサスケールに向けて拡張していくことによって、それを用いて開発されたアプリケーションについては変更することなくエクサスケールにおいても高性能を達成可能である。このような将来に渡る性能可搬性はこれまでのアプリケーション開発において欠けていた重要な特質であり、それによる低い生産性が問題であったが、我々はそれを解決する方法論を確立し、エクサスケールにおけるプログラミングの課題の解決に大きく貢献した。

### 3.2 格子系流体計算用アプリケーションの参照実装およびフレームワークの開発(東京工業大学 青木グループ)

## (1)研究実施内容及び成果

ペタスケールのスパコンである TSUBAME2.0/2.5 において、格子系流体アプリケーションが十分な実行性能を達成できることを人手による実装で示した。格子ボルツマン法(LBM)による流体計算、流体計算と同じステンシル計算であるフェーズフィールド法による凝固計算、局所的に細かい格子を用いて効率的に格子計算を行う AMR 法の参照実装を行った。

また、ステンシル計算に基づいたアプリケーションを GPU スパコンで効率的に実行するため、参照実装で導入した複雑な最適化手法を適用したコードを自動生成するフレームワークを 2 種類開発した。DSL とは異なり、独自の言語拡張することなく通常の C++コードを記述するだけで GPU スパコンに最適なコードを高生産に開発できるフレームワークと、Fortran 言語で書かれた気象モデルのステンシル計算に対し、指示行を入れて GPU コードや CPU コードを自動生成する Hybrid Fortran フレームワークを開発した。

### 3. 2. 1 LBM による流体計算の人手による参照実装

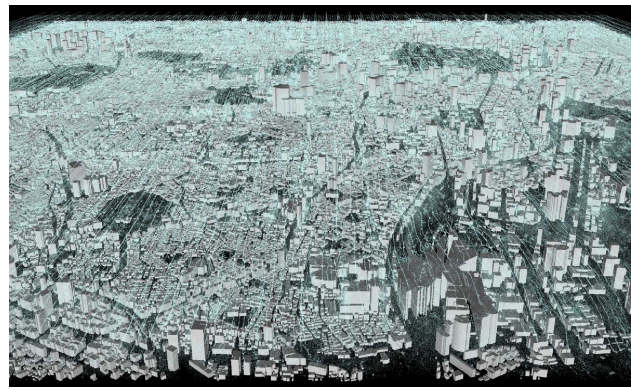
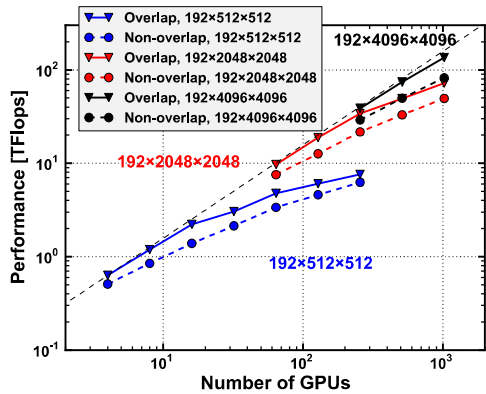
#### 【実施内容・成果】

LBM は連続体として記述される流体に対し、離散化した空間格子上を並進・衝突する仮想的な粒子の集合(速度分布関数)と仮定し、格子上の粒子の速度分布関数について時間発展を解く数値計算手法である。空間は等間隔の格子によって離散化され、粒子は並進運動により 1 タイムステップ後に隣接する格子点上に位置する速度のみを持つため、補間などによる離散化誤差を含まない。東京都心部の 10km 四方のエリアの気流計算に適用し、10,080 × 10,240 × 512 格子(520 億格子)に対して 4,032 個の GPU を用いて TSUBAME2.0 で 0.6PFLOPS、TSUBAME2.5 で 1.1PFLOPS(単精度計算)の実行性能を得た。レイノルズ数が 106 に達するため、ラージエディ・シミュレーション(LES)による乱流モデルを導入する必要があり、モデル係数を局所的に決定できるコヒーレント構造スマゴリンスキー・モデル(CSM)を格子ボルツマン法に初めて導入し、大規模な気流の LES 計算を可能にした。

単体 GPU での計算に対する高速化手法として、SFU(special function unit)を用いた演算の高速化、32bit 版のコンパイルによる配列の index 計算量の削減、LBM の並進・衝突過程のカーネル関数の結合を行った。MPI の領域分割法として、yz 方向に分割を行う 2 次元分割を採用した。LBM では各方向の速度分布関数のメモリ参照が非対称となるため、物理量が必要な領域のみ MPI 通信を行い通信量の削減を行った。CSM を導入したために通常の LBM よりも演算密度が 1.83 FLOP/Byte と上昇し、Roofline モデルによる上限値に対して 92%の実行性能を達成した。弱スケーリング計算では、1 GPU あたり (N1, N2, N3) = (192, 256, 256) の格子点数を割当てた。通信と計算のオーバーラップを行うことで通信の隠蔽が可能となり、オーバーラップをしない場合と比べて約 30% 性能が向上し、768 GPU で 115 TFLOP、1,000 GPU で 149 TFLOPS の実行性能が得られた。強スケーリングの結果においても同様にオーバーラップ計算を行うことにより良いスケーリングが得られ、格子点数 (N1, N2, N3) = (192, 2048, 2048) の 32 GPU を用いた結果に対して、2 倍の 64 GPU では 97%、4 倍の 128 GPU では 87%、8 倍の 256 GPU では 63% の効率を得られた [(1)-28, (3)-①-26, (3)-①-27, (3)-①-40]。

#### 【位置づけや類似研究との比較】

この成果は情報処理学会の 2012 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(HPCS2012)において最優秀論文賞[(1)-28]となるとともに、朝日新聞、日経新聞、TBS テレビ等、広くメディアで報道された。SC15 のゴードンベル賞ファイルリスト 2 件が格子ボルツマン法を用いていることから、エクサスケールを目指す流体計算手法に対して、本研究はその方向性を先駆的に示したと言える。



複数 GPU での強スケーリング実行性 粒子分布を用いた気流のスナップショット(北が上)

### 3. 2. 2 フェーズフィールド法による凝固計算の参照実装

#### 【実施内容・成果】

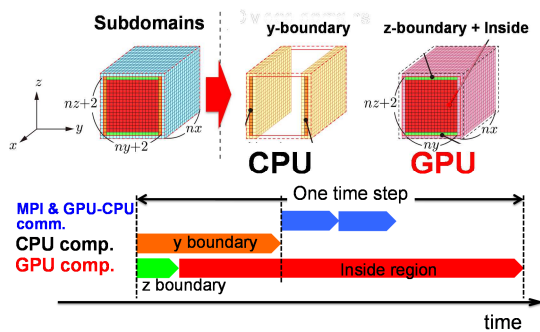
非平衡統計物理学から導出され、分子スケールとマクロの中間のメソスケールの現象を記述することができるフェーズフィールド法は材料の凝固過程を計算することができるが、マクロな材料特性を知るには大規模計算が必要となる。有限差分法の離散化により、直交格子上で流体計算と同じ19点ステンシル計算となる。

単一GPUでの手動チューニングでは、担当する計算領域を $64 \times 4 \times 32$ 格子のピースに分割し、1つのCUDAスレッドブロックが1つのピースを担当し、各ブロックでは2次的にスレッドを割り当て、z方向へマーチングしながら32格子点を計算させる。z方向のステンシルの参照データはレジスタに保持することでマーチングの際に再利用することができる。TSUBAME2.0に搭載されたFermiコアのGPUではL1/L2キャッシュが利用できたが、TSUBAME2.5のKeplerコアのGPUではL1キャッシュが有効でなくなり、アーキテクチャに応じたチューニングが必要になる。

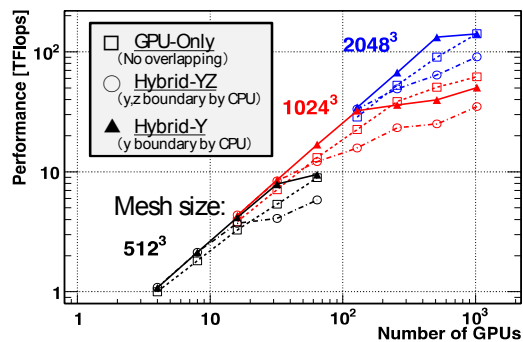
大規模な $4,096 \times 6,500 \times 10,400$ 格子に対して行った計算では、1つのGPUが担当するサブ領域をz方向の境界領域(x-y断面)と中心領域にカーネル関数を分割してGPUで計算する。y方向の境界領域についてはCPUで計算することで通信バッファへデータを詰め替える必要がなくなり、効率的な通信と計算のオーバーラップを行うことができた(Hybrid-Y方式)。TSUBAME2.0の4,000GPUを利用することで、2.0 PFlops(GPU:1.975 PFlops, CPU: 0.025 PFlops)という極めて高い実行性能(単精度のピーク性能に対して44.5%)を達成した[(1)-8, (3)-①-1, (3)-①-4, (3)-①-40]。

#### 【位置づけや類似研究との比較】

世界的に初めてGPUを用いた大規模計算を行い、2011年のACMゴードンベル賞・特別賞(Special Achievements in Scalability and Time-to-Solution)を受賞した。フェーズフィールド法の大規模計算としても非常に先駆的で、SC15のTechnical Paperでもフェーズフィールド計算の論文があり、SPPEXAプロジェクトとしても取り上げられている。



Hybrid-Y method のダイアグラム



複数 GPU 計算の実行性能 (強スケーリング)

### 3. 2. 3 格子系流体計算の AMR 法の参照実装

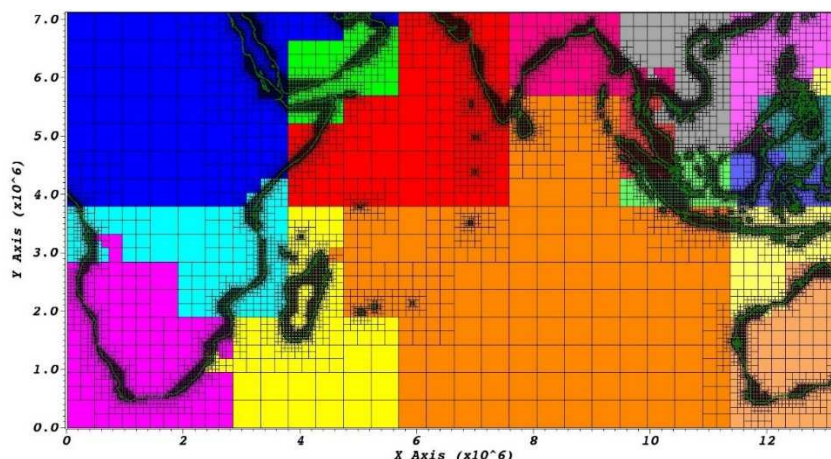
#### 【実施内容・成果】

均一な直交格子での格子系流体計算の参照実装では、ポストペタスケールで十分な実行性能を達成することができた。しかし、実際の商用アプリケーション等では、四面体要素で構成する非構造格子を用い、任意の空間を必要な格子解像度で計算することが多い。しかし、非構造格子はメモリアクセスが間接参照となり、ポストペタスケールでは十分な実行性能が得られず、小規模な計算に留まっている。一方、均一な直交格子では空間解像度が一樣なため非常に多くの格子点を必要とし、問題に寄っては Time-to-Solution は著しく低下してしまう。そこで、直交格子のまま任意の局所領域を任意の格子解像度で計算できる Adaptive Mesh Refinement (AMR) 法の参照実装を行った。

8 分木データ構造に基づいて格子を再帰的に分割し、末端のリーフに対して  $8 \times 8 \times 8$  格子や  $16 \times 16 \times 16$  格子のパッチを当て、リーフでのみ格子計算を行う。GPU 計算では、1 リーフに対して CUDA の 1 ブロックを割当てることになり、ある程度以上のリーフサイズが大きくなると十分なスレッド数を割当てることができず、実行性能が低下してしまう。逆にリーフが大きすぎると格子細分化の適合性が低下し、Time-to-Solution が低下してしまう。また、複数ノードで計算負荷を均一にするために、リーフを空間充填曲線で辿り均等長さで分割することにより計算領域の分割を行った。Morton 曲線よりも Hilbert 曲線の方が隣接する領域が分散せず、ノード間通信が少なくなることが分かった。さらに、動的に領域分割を変化させる際のリーフ・マイグレーションのコストが心配されたが、その頻度は 100 ステップに 1 回程度であるため、余り問題にならないことも明らかになった。広域の津波計算において、水深の深い海洋の格子間隔は広くし、複雑な海岸線と浅い海の領域は細かい格子点で計算する AMR を導入し、時間ステップを大きく取ることにより計算時間を大幅に短縮することができた。[(1)-51, (3)-①-43]

#### 【位置づけや類似研究との比較】

ステンシル計算に対して AMR 法の必要性は広く認識されているが、GPU に対する実装はさまざまな困難を伴い、台湾のグループが GAMER コードを開発しているだけである。それ以外の類似研究はない。実アプリケーションをエクサスケールで実現するためには、格子ボルツマン法と合わせるなど、今後の研究の発展が重要と言える。



適合格子細分化(Adaptive Mesh Refinement)法による広域津波シミュレーション

### 3. 2. 4 直交格子ステンシル計算に対するC++テンプレートによるフレームワーク

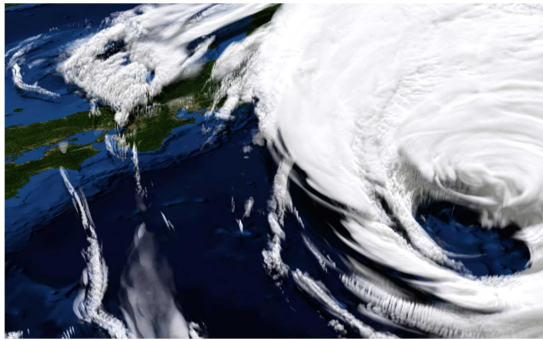
#### 【実施内容・成果】

格子点上のステンシル計算に対し、ユーザが格子点を更新する関数(ステンシル関数)のみを記述すればよいフレームワークをC/C++言語およびCUDAを用いて実装した。単一のステンシル関数からGPUおよびCPU用コードを生成し、GPUとCPUの両方でユーザーコードを実行することができる。計算ノードにまたがるGPU間通信はMPIを利用した通信を行い、ノード内GPU間通信は高速なGPUDirectを活用する。これらを統一的に扱えるユーザープログラム用のインタフェースを提供した。大規模GPU計算では、通信によるアプリケーション全体の性能低下を防ぐために、通信コストを計算で隠蔽するオーバーラップ手法がフレームワークで簡便に記述できる機能を提供した。GPUによる格子計算では、実行性能がスレッド数などの実行時パラメータに大きく依存するため、実行時に最適なパラメータを自動選択する機構をフレームワークに導入し、フレームワーク自身の高性能化も行った。

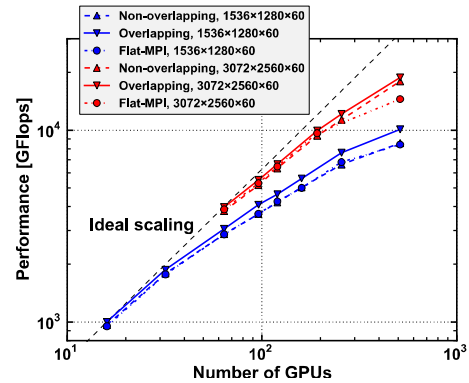
このフレームワークを気象庁が気象予報のために使っている非静力気象モデルASUCAの力学過程に適用した。フレームワークを用いることにより、実装の複雑な通信を隠蔽するオーバーラップ手法等を簡便にASUCAへ導入し、高い生産性・可搬性を実現しながら高い実行性能を達成することができた。このフレームワークに基づいたASUCAにより、現在の数値予報で使用されている初期値と境界値の実データを用いた台風の気象計算を行った。TSUBAME2.5の672GPUを用いて $5,376 \times 4,800 \times 57$ 格子(水平解像度500m)の計算を実行した。さらにTSUBAME2.5の4,108GPUを用い、単精度計算で209.6TFlopsを達成した。オーバーラップ手法を用いること、強スケーリングにおいても性能を向上することができた [(1)-29, (1)-50, (1)-70]。

#### 【位置づけや類似研究との比較】

ETH Zurichのグループとスイス気象庁が、欧州で用いられている気象コードCOSMOの力学過程にDomain Specific Language STELLAを開発し、適用している。それと比べると、気象以外のステンシル計算の実績もあり、適用範囲が広い。



TSUBAME2.5 の 672GPU を用いた台風の気象計算  
ング



ASUCA の実行性能の強スケーリ

### 3. 2. 5 Hybrid Fortran フレームワーク

#### 【実施内容・成果】

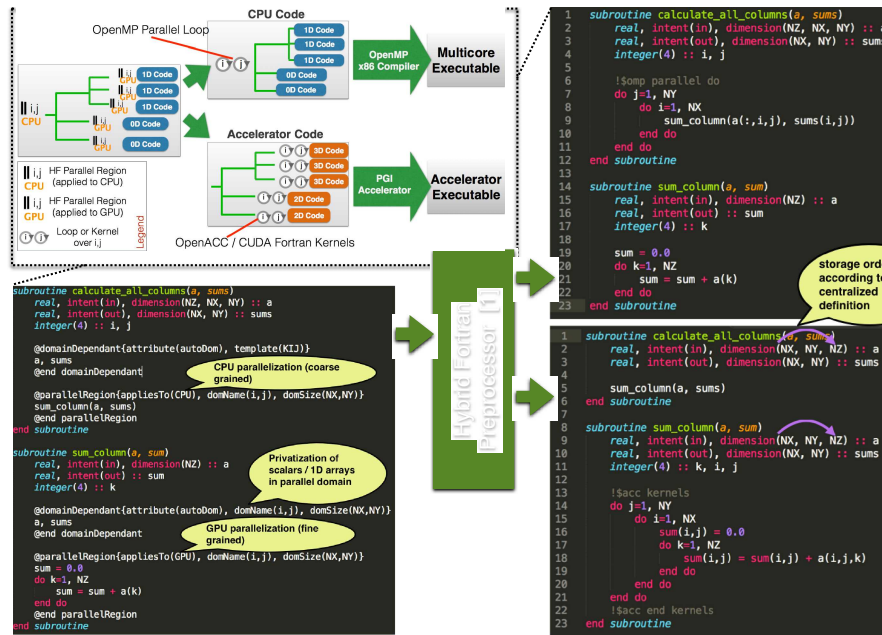
気象分野などでは Fortran 言語でプログラムを開発し、かなり長期に渡り利用し続けている。さらに、ASUCA などの現業コードでさえも、その物理過程は絶えず開発が続けられていて、コードは頻繁に変更される。そのため、CUDA や DSL によるソースコード全体の書き換えは維持のコストが高く、ユーザに受け入れられないことが多い。最近注目されている指示文ベースの OpenACC は既存 CPU コードを比較的簡単に GPU 化できるが、オリジナルコードの持つデータ構造やループ構造が変更できないため、しばしば実行性能が低下してしまう。

データ構造やループ構造の変更を自動的に行い、GPU および CPU ともに実行性能を引き出すことができるソースコードを生成する独自の指示文ベースのプログラミングフレームワークとして Hybrid Fortran を開発・発展させた。Hybrid Fortran では、ループ構造を指示文で抽象化し、CPU と GPU のそれぞれのアーキテクチャに合わせたコードを生成する。GPU 用コードでは、コアレスニングアクセスするため、水平方向のループ計算をカーネル関数によりモジュール内で計算する。一方、CPU 用コードでは水平方向のループ計算をモジュールの外側で行い、キャッシュのヒット率を向上させる。

Hybrid Fortran により ASUCA の物理過程と力学過程の全ての GPU 化を進めている。Hybrid Fortran で記述・生成されたコードは、オリジナルに対して GPU 計算で 3.6 倍の高速化を達成した。一方で、速度低下することなく、CPU コードも生成することができている [(1)-49, (3)-③-41]。

#### 【位置づけや類似研究との比較】

ETH Zurich のグループとスイス気象庁が、欧州で用いられている気象コード COSMO の物理過程を OpenACC で GPU 計算している。しかし、気象庁の ASUCA では OpenACC を適用できない部分が多く、実行性能も低い。エクサスケールのマシンでスムーズにステンシル・アプリケーションを実行させるには、ユーザー・コミュニティの要求にも合致した指示文ベースのフレームワークが必要であり、さらに発展させて行く必要がある。



Hybrid Fortran による GPU および CPU 向けのループ展開

### 【公開済みソフトウェア】

開発したソフトウェア： 指示文ベースのプログラミングフレームワーク Hybrid Fortran

公開： 公開済み (<https://github.com/muellermichel/Hybrid-Fortran>)

機能： 指示文ベースの Fortran 向けプログラミングフレームワークであり、データ構造やループ構造の変更を自動的に行い、GPU および CPU ともに実行性能を引き出すことができるソースコードを生成

特徴： ループ構造を指示文で抽象化し、CPU と GPU のそれぞれのアーキテクチャに合わせたコードを生成する。実際に気象庁の現業予報コードである ASUCA 全体の Hybrid Fortran による GPU 対応を進めている。

実行可能なマシン： 通常の CPU や CUDA をサポートした GPU

潜在的なユーザ： CPU・GPU 両方に対応した Fortran アプリケーションの開発者。特に CPU 向け大規模 Fortran コードを GPU へ移植する場合に有効。

青木グループでは格子系流体計算の参照実装やその開発を支援するフレームワークをペタスケール GPU スーパーコンピュータである TSUBAME2.0/2.5 を対象に開発、実証してきた。エクサスケールに向けてもこれらと同様のヘテロジニアスアーキテクチャがその主な方向性の1つとして進展することが想定されるため、上述の研究成果はエクサスケールに向けた方向性作りに貢献できたと言える。特にゴードンベル賞を受賞した成果など大規模 GPU スーパーコンピュータの有効性を実アプリケーションで早期に実証したことはその後のポストペタスケール、およびエクサスケールに向けたアーキテクチャの方向性作りにも貢献したと言える。今後も TSUBAME3.0 などポストペタスケール、エクサスケールに向けて先進的なアプリケーション開発を継続して予定である。

### 3.3 大域アドレス空間モデルと軽量マルチスレッドによるスケーラブルランタイム(東京大学田浦グループ)

#### (1)研究実施内容及び成果

生産性の高いプログラミングモデルの基本は、データの分散を隠蔽し、かつ負荷分散をプログラマの負担から取り除くことである。そのための基盤として、動的負荷分散とデータの大域的なビューを提供する実行時システムを設計・実装した。その際、特定のプログラミングモデルや専用の言語



処理系に依存しないライブラリの形で実装するという方針の基に研究を進めた。以下にその実施内容および成果をまとめる。

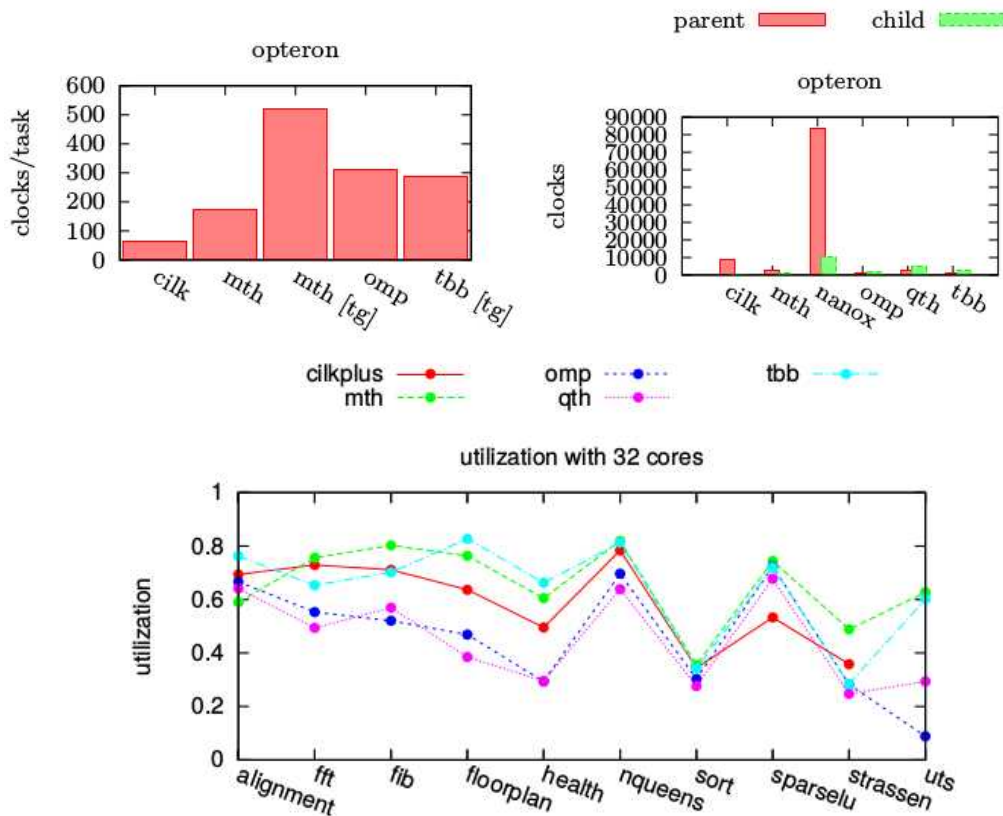
### 3. 3. 1 軽量スレッドライブラリ MassiveThreads の設計・実装

#### 【実施内容・成果】

MassiveThreads は、通常の OS スレッドとほぼ同じインタフェースを持ちながら、大量のスレッドを効率よく実行できるユーザレベルスレッドライブラリである。各コア内では depth-first (LIFO) 実行を行い、コア間の負荷分散は FIFO に基づいて行われる(Lazy Task Creation)。再帰呼出しや多重ループも、軽量スレッドを用いることで自然に並列化し、動的に負荷分散できる。

#### 【位置づけや類似研究との比較】

類似の機能はライブラリベースのものやプログラミング言語など様々あるが MassiveThreads を、他の類似のシステム(Cilk, OpenMP, Intel TBB, Qthreads, Nanos++)と比較して、多くの点で優れた性能を示していることが確認された [(3)-②-74]。また Barcelona OpenMP Task Suite (BOTS) の 10 種類のアプリケーションで性能評価を行ったところ、ほとんどのアプリケーションで最高の性能を示していることが確認された [(1)-85]。



### 3. 3. 2 分散メモリ環境で大域的な負荷分散を行う軽量スレッドライブラリ

#### 【実施内容・成果】

軽量スレッドおよびその動的負荷分散機能を、ノードをまたがって提供するライブラリ MassiveThreads/DM を設計・実装した。UniAddress 方式により、(1) C/C++ 既存言語処理系と協調可能、(2) 任意の時点でのスレッドの移送が可能、(3) 仮想アドレスを大量消費せず、片方向通信による負荷分散が可能、という性質を持つ大域負荷分散ライブラリを実現した [(1)-81]。

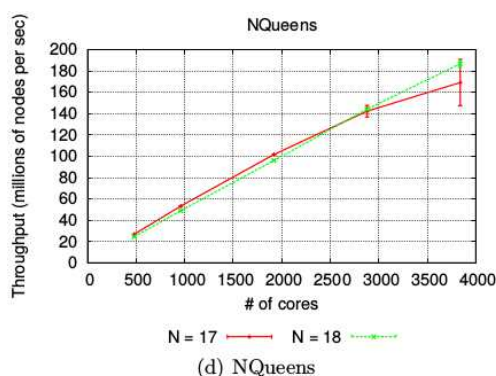
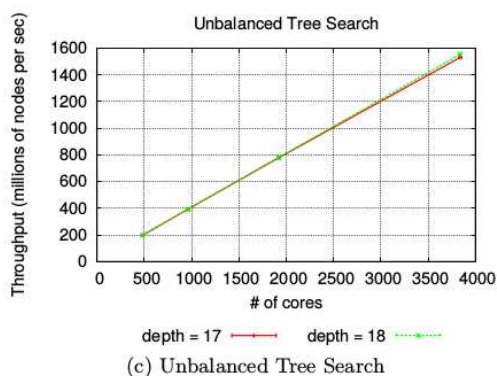
【位置づけや類似研究との比較】

軽量スレッドやその動的負荷分散は、1ノード内(ハードウェアにより共有メモリがサポートされる範囲)での実装に比べ、ノードをまたがった実装ははるかに課題が多く困難である。まず、ノード間では共有メモリが備わっていないため、スレッドの移送に伴って、そのスレッドが持つポインタが無効化されてしまうという問題がある。その問題を回避するためにはポインタがさしているデータも一緒に移送することが考えられるが、その場合そのデータは、移送元ノード、移送先ノードに置いて同じアドレスに配置されなくてはならない。その代わりに、移送先ノードにおいてデータがコピーされたアドレスに、ポインタを更新する方法も考えられるが、C/C++言語などの曖昧なポインタを持つ言語においてポインタの更新を正しく行うのは困難であり、C/C++言語の既存の処理系から使えるようなライブラリを実現することはほぼ不可能であろう。

上記の事情からこれまで大域負荷分散を実現している言語は、計算モデルや、スレッドが持つことのできるデータに大きな制限があるものがほとんどであった(下表)。

	model	tasks untied*	frontend	scale demonstrated
Scioto [Dinan 09]	BoT†	no	C/C++	8192
X10-GLB [Zhang 13]	BoT	no	X10	16384
Satin [Neuwpoort 01]	FJ††	no	Java	256
HotSLAW [Min 11]	FJ	no	C/C++	256
Distributed Cilk [Blumofe 96]	FJ	yes	custom	16
Tascell [Hiraishi 09]	FJ	yes	custom	128
MassiveThreads/DM	FJ	yes	C/C++	4096

C/C++言語のスレッドをノード間で移送する方式としては、移送先と移送元で必ず同じアドレスを用いるという方式(iso-address)が提案されていたが、各スレッドがすべてのノードでそのスレッド用の仮想アドレス範囲を確保しなくてはならないため、ノード数の多い並列処理環境へスケールする方式とは言えなかった。仮想とはいえ大量のアドレスを消費するため、現在の最大規模のマシンでは仮想アドレス空間が枯渇する可能性もある。また、大量の仮想アドレスを疎に用いてスレッドのスタックやデータを配置するため、RDMA を用いた片方向通信による負荷分散を実現することもできない。本研究では UniAddress 方式によりこれらの問題を克服した点が新しい [(1)-81]。



3. 3. 3 動的なデータの移送をサポートする大域アドレス空間ライブラリの効率的な実装方式

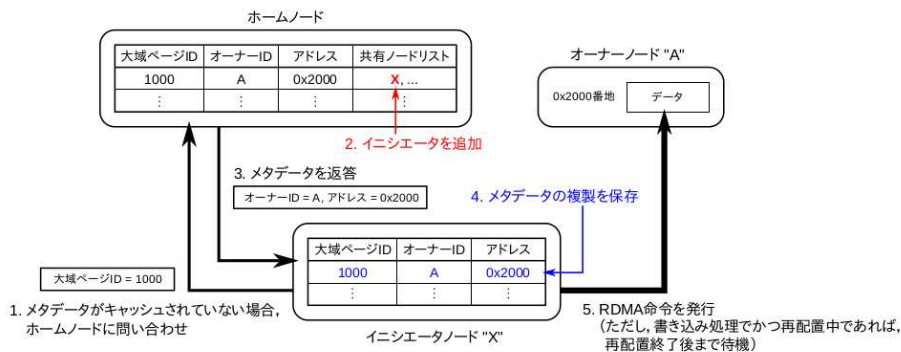
【実施内容・成果】

大域アドレス空間は、ノードにまたがって一意なアドレス空間をソフトウェア的に実現したものであり、配列、木構造、グラフなどのデータをノードをまたがって自然に表すことができる有用なアブストラクションである。本研究は、大域アドレス空間ライブラリに、動的にページを移送する機能、動的にデータをキャッシュ(複製)する機能を効率的に組み込む方式を提案した。

【位置づけや類似研究との比較】

これまで多くの大域アドレス空間ライブラリや言語が提案されてきたがその表現力や有用性は限られていた。ほとんどはブロックサイクリック分割などの定型的なデータ分散をサポートするのみであり、かつデータ分散は動的に変更できない。すなわちデータの移送がサポートされない。これはハードウェア共有メモリが、キャッシュや動的なページの移送などをサポートして柔軟性や性能を高めているのと対照的で、大域アドレス空間の適用範囲を限定してしまう。

一方でデータ移送をサポートすると大域アドレスをアクセスする際に、ページの現在位置を動的にルックアップする必要が生じ、オーバーヘッドが大きくなる。また、ページが動的に移動する可能性があるため、RDMA による一方向通信を用いることが簡単ではなくなる。本研究ではこれらの問題を解決し、大域アドレスの解決をスケーラブルかつ低オーバーヘッドで行うこと、データのアクセスを RDMA を用いて安全に行うことが可能な PGAS ライブラリを設計した [(3)-②-171]。



### 3. 3. 4 アプリケーションに応じた動的負荷分散方式を実現するための API の設計と実装

#### 【実施内容・成果】

軽量スレッドの動的負荷分散方式として現在多く用いられているのが random work stealing と呼ばれる方式で、タスクが持たないワーカ(1 ワーカが 1 コアに相当すると考えてよい)が他のワーカをランダムに(一様に)選択し、タスクが余っていればそこから移動させる。この方式は余剰なタスクを迅速にワーカに分散させることができる一方、キャッシュ局所性は良くないことが直感的に予想できる。

#### 【位置づけ・類似研究との比較】

実用性と汎用性を備えた、より良い負荷分散方式は見つかっていないのが現状で、プログラムに面倒な annotation を要するものか、データとスレッドの親和性などを考慮した経験則に基づくスケジューラが提案されているのが現状である。本研究ではより良いスケジューリング方式を実装するための基盤として、動的負荷分散のワーカ選択を容易にカスタマイズできる API を設計して評価した [(1)-34]。

### 3. 3. 5 タスク並列アプリケーション・実行時システムの性能解析・可視化ツール

#### 【実施内容・成果】

軽量スレッドライブラリによって動的負荷分散されるアプリケーション(タスク並列アプリケーション)の性能を詳細に解析するトレーサ及び、その可視化ツールの設計と実装を行った。

タスク並列アプリケーションは、開発者が複雑な負荷分散アルゴリズムを書かなくてもある程度良好な台数効果が得られることが多い一方で、予期した台数効果と離れた性能が得られた場合にその原因を追跡しにくいという問題がある。また、我々は動的負荷分散と大域アドレス空間を組み合わせた処理系を高並列環境にスケールさせることを目指しているが、そのためのスケジューラを探求・評価する際も、異なるスケジューラの実装を詳細に比較できることが必要である。

### 【位置づけや類似研究との比較】

現状の多くのトレーサは各 CPU コアの利用率のタイムライン表示などを行うものしかなく、異なるスケジューリングポリシーを比較・探求するうえで必要な情報である、どのタスクがどの CPU で実行されたかなどの情報を得ることはできない。そこで我々はタスク並列アプリケーションの実行からタスク生成や終了などのイベントを取得できる、特定の実行時処理系に依存しないトレーサ DAG Recorder と、そのトレースを解析できる可視化ツール DAGViz の設計と実装を行った [(1)-85]。



### 3. 3. 6 タスク並列を有効利用した並列アプリケーション

#### 【実施内容・成果】

タスク並列処理を有効利用した実証アプリケーションとして、高速多重極展開(FMM)、Burrows Wheeler Transform, 推薦行列の分解の並列化を行った。特に、FMMの並列化は泰岡グループ横田による ExaFMM のノード内並列化方式として採用されている。FMMには木構造の構築、多重極展開の係数の計算、相互作用の計算などの異なる計算フェーズがあるが、それらすべてが、タスク並列処理を用いて見通し良く並列化でき、かつ良好な台数効果が得られることが示された [(1)-23]。

#### 【位置づけ・類似研究との比較】

現在、タスク並列システムを用いた実用的かつ絶対性能の高いアプリケーションは例が少なく、ほとんどがベンチマーク用の小規模なプログラムやアルゴリズムカーネルにとどまっているのが現状である。ExaFMM は数多くのオープンソース FMM 実装の中でも最速のものの一つである。

#### 【公開済みソフトウェア】

開発したソフトウェア: MassiveThreads

公開: 公開済み (<https://code.google.com/p/massivethreads/>)

機能: 共有メモリノード内の軽量スレッドライブラリ。ユーザは C や C++の任意の関数を軽量スレッドとして実行でき、かつそれを OS の持つスレッドの機能を比べてはるかに小さい(2 桁)オーバーヘッドで行うことができる。作られたスレッドは複数のコアにまたがって自動的に負荷分散される。したがって、任意の深さまで入れ子になったループや再帰的なプログラムを並列化するためのライブラリ、あるいはプログラミング言語の実行時基盤として用いることができる。

特徴: よく知られたスレッドライブラリと同じインタフェースを持ちながら、スレッド生成が非常に高速(40 サイクル程度。 Intel Haswell 上で計測)である。かつ純粋なライブラリとしての実装であるため、プログラミング言語の実行時基盤として組み込むことが容易である。これは純粋なライブラリベースの実装の中では最高速であり、専用の言語処理系を用いて作られ、かつ分割統治(fork-join)しか

サポートしない言語処理系(Cilk)と比べても同等の性能である。かつ負荷分散の性能は Cilk を上回っている。

実行可能なマシン： これまで動作が確認できている環境は、Linux x86 プロセッサ、Linux SPARC プロセッサ(富士通 FX 10)、Linux Xeon Phi プロセッサ、Linux ARM プロセッサ環境である。

潜在的なユーザ： 並列プログラミング言語の実装者、動的負荷分散を要する並列フレームワークや領域特化言語の実装者、並列アプリケーション開発者

開発したソフトウェア： DAG Recorder

公開： 公開 (MassiveThreads の一部として公開)

機能： タスク並列プログラムを実行し、その実行トレースを(有向非循環グラフ)DAG 形式で取り出す。DAG の各ノードは、並列プリミティブ呼び出しのない逐次的なセクションの実行を表しており、エッジは、タスクの生成、タスクの終了待ちによる同期による依存関係を表している。各ノードにはその開始時刻、終了時刻、実行されたコアなどが付加情報として書かれている。

特徴： タスク並列プログラムがスケジューラによってどのように実行されたかを、詳細に解析することができる。特に、DAG はプログラムの論理的なタスク構造を表しており、どの時点でタスクが実行可能になったか、実際にいつ、どのコアで実行されたか、などの情報を取得可能であるため、異なるスケジューラ間の比較などを行うことができる。また、タスク並列プリミティブは非常に頻繁に呼び出されるため、安直に全てのイベントを保存すると、実行トレースの大きさは、容易にメモリに収まらないほど巨大になる。実行トレースの中で、一つのコアで実行された部分グラフに関してはサマリだけを保存する機能により、多くのプログラムで数% のオーバーヘッドでトレースを取得可能である。

実行可能なマシン： Linux x86, Linux Sparc (FX10), (MassiveThreads と同様)

潜在的なユーザ： タスク並列処理系のユーザおよびタスク並列処理系の開発者

## 【公開予定ソフトウェア】

開発したソフトウェア： MassiveThreads/DM

公開： 公開予定

機能： 分散メモリ計算機上での軽量スレッドライブラリ。MassiveThreads と同等の機能に加え、作られたユーザレベルスレッドを(ハードウェアでアドレス空間を共有しない)ノード間で負荷分散させることができる。つまり、動的負荷分散機能をノード内のプロセッサ間にとどまらずノード間にまたがって提供する。

特徴： MassiveThreads 同様、よく知られたスレッドライブラリと同じインタフェースを持ち、かつスレッド生成が非常に高速である。純粋なライブラリベースの実装で、C/C++の軽量スレッドをノード間で移送して、負荷分散をすることができる。そのため、通常のノード内の並列プログラムとほとんど同じプログラムを、そのままノード間で負荷分散を行うプログラムに拡張することができる。ノード間で動的な負荷分散を行うフレームワークで、このような高い連続性、既存コンパイラとの高い親和性を持つものは我々の知る限り存在しない。

実行可能なマシン： Linux x86 プロセッサ環境および Linux Sparc プロセッサ環境(富士通 FX10)。

潜在的なユーザ： 並列プログラミング言語の実装者、動的負荷分散を要する並列フレームワークや領域特化言語の実装者、並列アプリケーション開発者

開発したソフトウェア： DAGViz

公開： 公開予定

機能： DAG Recorder によって出力されたプログラムの実行トレース (有向非循環グラフ)を可視化、解析する。

特徴： トレースをグラフの形式、並列度のタイムライン、各 CPU の状態(busy/idle)のタイムラインなど、同一のデータを様々な視点、様々な詳細度で表示可能である。また、トレースファイルが巨大

であっても、詳細度を低く設定することで、一部のファイルしか読み込まずに DAG の概要を表示することが出来、そこから対話的に一部だけを拡大していくことができる。

実行可能なマシン: Linux x86 環境 (Ubuntu 上で GTK ライブラリを用いて開発)

潜在的なユーザ: タスク並列処理系のユーザおよびタスク並列処理系の開発者

エクサスケール環境においては様々な理由で軽量スレッド技術の重要性が高まることが予想されている(本年度の SC15 においてもユーザレベルスレッドの標準化エフォートが提案されている)。まず IESP ロードマップにおいてもプログラマビリティの向上が明示的に歌われている点あげられる。また、コア数の増大や、動的な低消費電力化技術によるコア性能のばらつきの増大により、単純な静的負荷分散がスケールしないことが多くなる。さらに、通信遅延を隠蔽する技術の重要性が高まる点あげられる。そのような環境でのプログラミングシステムの基盤技術として本研究成果が大いに貢献できると考える。

### 3.4 分子動力学シミュレーション用アプリケーションの参照実装およびフレームワークの開発(慶應義塾大学 泰岡グループ)

#### (1)研究実施内容及び成果

我々は Fast Multipole Method(FMM)の高性能な CPU・GPU 参照実装を行い、他の FMM コードとの比較を行った結果、単一ノードにおける性能でも大規模システムにおけるスケーラビリティにおいても世界最高性能を得ることができた。ExaFMM としてコードを公開し、分子動力学、流体解析、電磁界解析などの分野で利用されている。CHARMM や GROMACS などの著名なソフトウェアにも組み込まれ、今後連立方程式の解法にも拡張される予定である。

#### 3.4.1 GPU を用いた FMM の TSUBAME2 上での手動最適化

##### 【実施内容・成果】

渦法を用いた乱流計算において TSUBAME2 の 4096GPU を用いて 1Pflops の速度を達成した。これは当時 FMM において世界最高の性能であった。計算規模としても、4096<sup>3</sup> は世界最大規模である。図 6 は FMM を用いた場合と FFT を用いてスペクトル法で計算した場合の並列化効率について比較している。FMM は 4096 ノードで効率が 0.75 までしか落ちていないが、FFT は 0.14 まで落ちている。これは FFT が Global 通信を多く必要とするからであり、FMM の有効性が確認できた [(1)-30]。

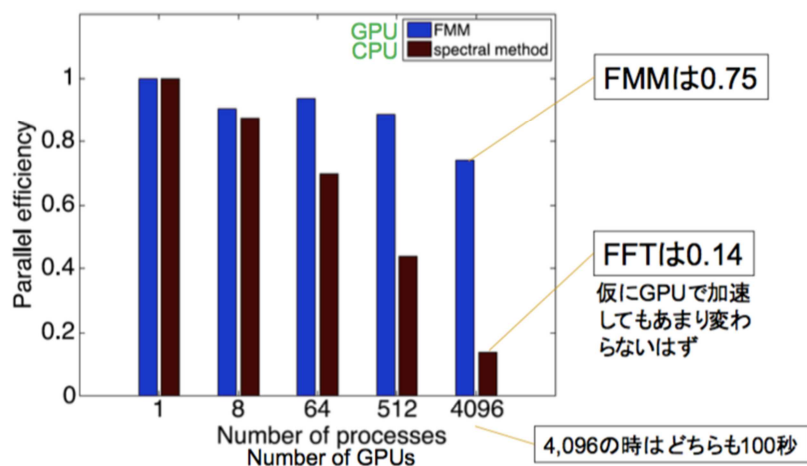


図 6 FMM と FFT の並列化効率(Weak Scaling)の違い

##### 【位置づけや類似研究との比較】

類似研究には FMM を GPU 上でランタイムを用いて最適化した ScalFMM や Treecode を GPU

上で最適化した Bonsai などのコードがある。ScalFMM は比較的少数の GPU までは良好な並列化効率が得られているが 100GPU を超える計算には対応できていない。これに対して本研究で開発した ExaFMM は TSUBAME2.5 の 4096GPU を用いた計算で 1Pflops を超える演算性能を記録している[(1)-30]。Bonsai は Titan のフルノードまで良好な並列化効率が得られており性能的には十分であるが、重力多体問題にしか用いることができない設計になっている。ExaFMM には Bonsai をベースに流体解析、分子動力学、連立一次方程式などに拡張した GPU コードが含まれている。

### 3. 4. 2 負荷分散、通信と計算のオーバーラップ等について自動化アルゴリズムの開発

#### 【実施内容・成果】

FMM の負荷分散は Morton key による領域分割によって実現した。ノード間の動的負荷分散は前のステップの計算負荷で重みづけした領域分割を行うことで実現した。ノード内の動的負荷分散は QUARK や Intel TBB、MassiveThreads を用いて行った[(1)-37]。QUARK はオーバーヘッドが大きく、MassiveThreads が性能的に優れていることが分かった。通信と計算のオーバーラップ機能に関しては、領域内部の計算と袖領域の通信のオーバーラップを実装した。図 7 に FMM の 131,072 コアまでの Weak Scaling の結果を示す。

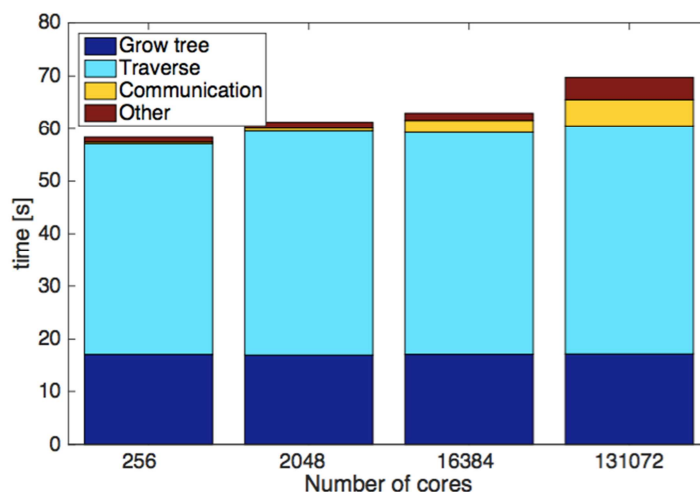


図 7 FMM コードの Weak Scaling とその計算時間の内訳

#### 【位置づけや類似研究との比較】

類似研究には 2010 年に Gordon Bell 賞を受賞した KIFMM コードに関するものが挙げられる。KIFMM では Hypercube 型の Local essential tree の通信を用いることで P プロセス、問題サイズ N における通信量を  $O(P(N/P)^{2/3}(\log N)^{1/3})$  から  $O(\sqrt{P}(N/P)^{2/3})$  へと削減し、ORNL の Jaguar で 0.7Pflops を達成した。本研究で開発した exaFMM は木構造上層部のデータの冗長性を活かすことで通信量をさらに  $O(\log P + (N/P)^{2/3})$  へと低減することができた[(1)-66]。

### 3. 4. 3 プログラムをフレームワークとそれ以外に切り分けるためのアプリケーションプログラムの再設計及び改造

#### 【実施内容・成果】

FMM の内部カーネルは SSE、AVX、MIC などのインtrinsic関数を C++ の演算子オーバーロードを用いて隠ぺいする形で書かれている。ポータビリティの観点から SSE、AVX、MIC、FX10、SX-ACE の SIMD 命令の有無をコンパイル時に自動検知し、適切なベクトル長を選択し、マシンに合ったインtrinsic命令を用いて演算子をオーバーロードする仕組みになっている。また、木構造は OpenMP、Intel Thread Building Blocks (TBB)、Cilk、MassiveThreads などを用いてタスクパー

スのスレッド並列化を行っている。ベクトル化とタスク並列化を併用し高度にチューニングされた内部カーネルと木構造を実装することで他のFMM実装と比べて大幅に高速な実装を実現することができた[1]-74]。世界の主要なFMMコードと本課題で開発したExaFMMとの比較を図8に示す。

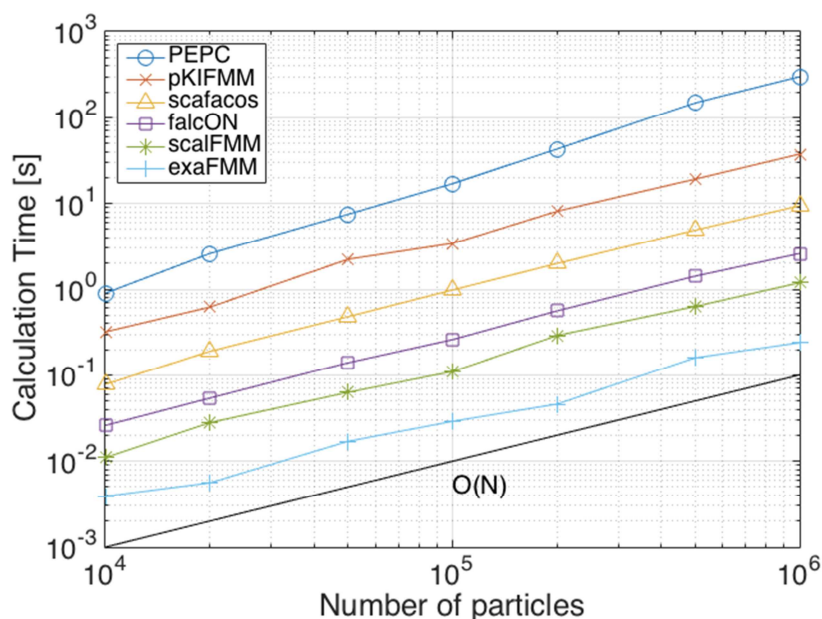


図8 ExaFMM と他の FMM コードとの性能比較

【位置づけや類似研究との比較】

類似研究には StarPU を用いた ScalFMM や charm++ を用いた ChaNGa などのコードがあるが、これらはいずれも一つのフレームワークに特化したアプリケーションコードの改良を行っている。本研究で開発した ExaFMM では、Intel Thread Building Blocks (TBB)、Cilk、MassiveThreads、QUARK、OmpSs、charm++ など様々なフレームワークに対応しており、類似研究と比べて拡張性が高いといえる。

3. 4. 4 分子動力学シミュレーションパッケージ CHARMM から FMM ライブラリを使用

【実施内容・成果】

FMM を広く普及させる方法として CHARMM などの分子動力学シミュレーションパッケージに組み込むのが有効である。CHARMM はクーロン力の計算に PME を用いているが、この部分を FMM で代替することで性能の向上を図る。FMM と PME の結果を比較したところ FMM の場合に長時間積分において僅かなエネルギーの上昇がみられた。このエネルギーの上昇を改善するために近傍場と遠方場を滑らかに接続する方法を開発した。

【位置づけや類似研究との比較】

FMM を分子動力学ソフトウェアに組み込む研究には GROMACS との統合に向けて開発中の GROMEX コードなどがある。ただし、GROMEX コードは GROMACS 側からの仕様要求に対応できず未だに統合にはいたっていない。そのため GROMACS の開発者は本研究で開発した ExaFMM コードを組み込む方向で現在共同研究を進めている[3]-①-25]。将来は生体系の分子シミュレーションにもこの技術が役立つと期待される[1]-20]。

3. 4. 5 高い生産性と性能を両立する分子動力学法向けアプリケーションフレームワーク



【実施内容・成果】

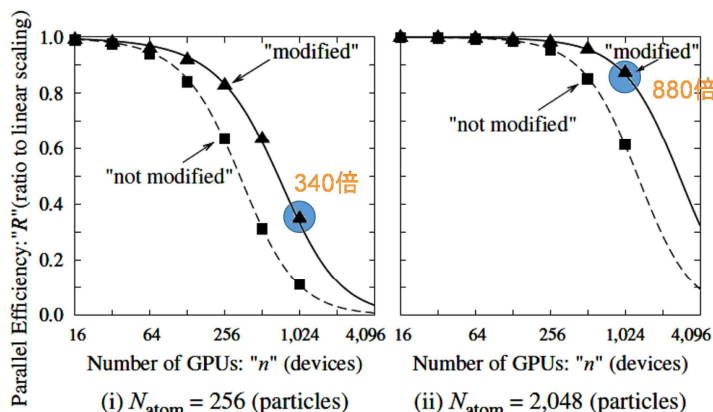


図 9 DS-CUDA を用いたレプリカ交換分子動力学シミュレーション性能

ポストペタスケールの計算機を想定した場合、ノード数の増加やノードの信頼性の相対的低下が考えられるため、動的負荷分散や耐故障性機能が不可欠になってくる。FMM に関するノード間動的負荷分散機能はライブラリ内に実装しており、ノード内では MassiveThreads による負荷分散が組み込まれている[(3)-①-51]。耐故障性機能に関しては、GPU を使用した場合についてミドルウェア DS-CUDA によって実現した[(1)-19, (1)-27, (3)-①-45, 3-①-54]。

ポストペタスケールのマシンでは GPU 等のアクセラレータを使うアーキテクチャが一つの候補だが、GPU は通常の CPU に比べ様々な要因で信頼性の低下が考えられる。PCI Express Bus のコネクタ経由で接続することに起因する接触不良、GPU の発熱による温度上昇によるサーバの不安定、GPU 向けフレームワーク CUDA の未成熟さに起因する不安定、GPU によって加速したために相対的に通信に負荷がかかることによる通信不安定などがあり得る。実際 TSUBAME GPU クラスタのフルノードを使った計算では上記のような様々な不具合が発生した。

泰岡グループでは上記のような GPU の不安定さをミドルウェアで解決するために、GPU 仮想化ソフトウェア DS-CUDA (Distributed-Shared CUDA)を開発した。DS-CUDA は一種の CUDA コンパイラであり、ユーザのソースコードを変更することなく耐故障性機能を実現出来る。CUDA コードを実行するクライアント上では仮想的に CUDA API を実行させ、CUDA の引数を GPU を搭載したサーバ側にネットワーク経由で転送し、本物の CUDA API は GPU サーバ側で実行する。

DS-CUDA の信頼性向上の機能は二つある。一つ目は自動冗長計算機能である。同じ計算を複数の GPU 上で実行して結果を比較し、結果が違う場合は再計算をさせることで信頼性を向上する。DS-CUDA ではユーザには見かけ上一つの GPU を使っているように見せつつ実際には複数の GPU を使うことが出来るため、完全に透過的にこの機能を実現出来る。再計算していることもユーザには見えない。

もう一つの機能はマイグレーション機能である。GPU がソフトウェア的/ハードウェア的に不安定になった場合、GPU サーバがネットワーク的に接続不能になった場合など、GPU サーバからの応答がなくなった際にその GPU での計算を別の GPU で引き継いで計算する機能である。この機能を実現するため、定期的に GPU 上の情報をクライアント側にバックアップする必要がある [(3)-①-54]。

DS-CUDA を使う上でのデメリットは二つある。一つはネットワークを経由して GPU と通信するためにネットワークがボトルネックになる可能性があることである。GPU との通信が多いアプリケーションで性能が出ないのは仕方がないが、レプリカ交換分子動力学シミュレーションを使った例[(1)-63]では、一つのクライアントから 1,024GPU を使用して並列化効率が 80%以上出ることを示した(図 9)。タブレット等の無線ネットワークしかない環境では、CUDA の Dynamic Parallelism 機能を使用することで GPU との通信を減らし DS-CUDA のオーバーヘッドをかなり低減出来ることも分かった [(1)-75]。

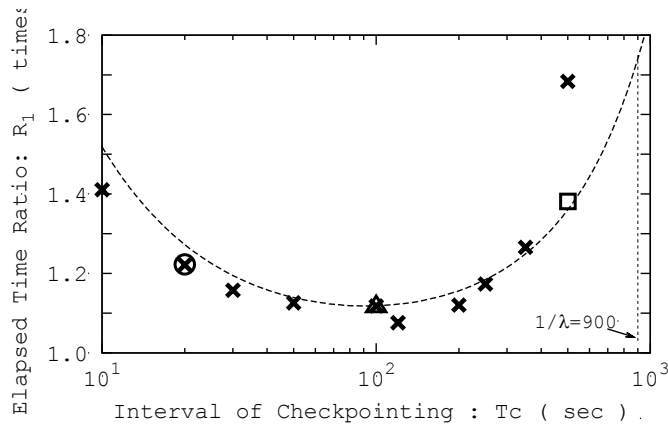


図 10 チェックポイントによるオーバーヘッド

もう一つのデメリットは GPU の状態を定期的にバックアップすることによるオーバーヘッドである。バックアップする間隔が長いと、その間に GPU の障害が発生してロールバックする確率が増え計算速度が遅くなるが、間隔が短いとバックアップするのにかかる時間が無視できずやはり計算速度が遅くなる。GPU をオーバークロックして 900 秒に一回程度間違う状態で分子動力学シミュレーションのテストをした結果、100 秒間隔でバックアップを取っても計算効率は 15% 程度しか悪くならなかった(図 10)。このためもっとエラー頻度の低い実際の GPU ではそれ程オーバーヘッドはないことが示された。900 秒に一回の故障は極端な例ではあるが、10,000GPU を使用するような状況では平均故障間隔が 104 日の GPU を使った時に 900 秒に一回どれかの GPU が故障することになるので、それ程非現実的な数値ではない。1 ビットの計算間違いも故障と定義すれば、プロセッサ内のエラー保護機能に乏しいコモディティ向け GPU ではあり得る数字である。

【位置づけ・類似研究との比較】

類似の研究として rCUDA(<http://www.rcuda.net/>)がある。GPU を仮想化してリモートの GPU を使う点は同様であるが、耐故障性機能はない。また、自動変換ツールはあるもののソースコードを変更しないとイケない点や、我々の知る限り driver API や Dynamic Parallelism が使えない点など不便なところも多い。

【公開済みソフトウェア】

作成したソフトウェア: GPU 仮想化ソフトウェア (DS-CUDA)

公開: 公開済み (<http://narumi.cs.uec.ac.jp/dscuda/>)

機能: ネットワークで離れたマシンに搭載されている GPU を、あたかもローカルに搭載されているかのように見せることが出来る。冗長計算による自動エラーリカバリ機能や、GPU サーバ停止時に違う GPU で計算を続けるマイグレーションして機能がある。

特徴: 単一ノードから `cudaSetDevice()` で切り替えるだけで数十～数百 GPU を使うことが出来るので、MPI を使わずに多くの GPU を簡単に使うことが出来る。実際に使っているコードで信頼性のある GPU 計算が行える。

実行可能なマシン: サーバは NVIDIA の GPU を搭載した Linux マシン、クライアントは Linux マシン

潜在的なユーザ: パラメータ並列計算などで GPU を大量に使いたいプログラム開発の手間を減らしたいユーザ。GPU が搭載出来ない計算機上で GPU を使いたいユーザ。

作成したソフトウェア: 大規模並列計算機向け FMM ライブラリ (ExaFMM)

公開: 公開済み (<https://github.com/exafmm/exafmm>)

機能: MPI や OpenMP、CUDA 等で並列計算機用に記述された FMM ライブラリ。

特徴:TSUBAME や京コンピュータのフルノードで実行出来るように最適化されている。

実行可能なマシン: x86, Xeon Phi, SPARC64, Power,GPU

潜在的なユーザ: 並列計算機で FMM を使用したいが、FMM の複雑な計算式を実装する手間や、並列化した際の通信の最適化などの手間をかけたくないユーザ。

ExaFMM はその名の通りエクサスケールを目指して設計されており、次々世代のマシンで Byte/flop の低下、メモリ階層の深化、信頼性の低下、並列数のさらなる増大に対応できるよう工夫がなされている。FMM の内部カーネルは演算密度が高く Byte/flop の多少の低下にも関わらず演算器のピーク性能に近いパフォーマンスを発揮できる。FMM の階層構造と空間充填曲線を用いた領域分割は深いメモリ階層をフルに活用できる。FMM の高い非同期性は耐故障性の面でも大規模なノード間通信の際にも優位である。ExaFMM は現存の最大級のシステムでフルノードまでスケールリングしており、今後もエクサスケールまで最適化を続けていく予定である。実際に分子動力学シミュレーションコードへの組み込みや、別の分野の研究者と交流して成果が出始めていることから、単なる一分野のコード開発にとどまらず計算科学の広範囲に渡って貢献し始めている。

## § 4 成果発表等

(1)原著論文発表 (国内(和文)誌 16 件、国際(欧文)誌 72 件)

1. Mark Silberstein, Naoya Maruyama, "An exact algorithm for energy-efficient acceleration of task trees on CPU/GPU architectures", Proceedings of the 4th Annual International Conference on Systems and Storage (SYSTOR '11), 7:1--7:7, Haifa, Israel, 2011-05-31, (DOI: 10.1145/1987816.1987826), (Best Paper)
2. T. Shimokawabe, T. Aoki, J. Ishida, K. Kawano, C. Muroi, "145 TFlops Performance on 3990 GPUs of TSUBAME 2.0 Supercomputer for an Operational Weather Prediction", First International Workshop on Advances in High-Performance Computational Earth Sciences, Singapore, 2011-06-01
3. Naoyuki Onodera, Takayuki Aoki, Hiromichi Kobayashi, "Large-eddy simulation of turbulent channel flows with conservative IDO scheme", Journal of Computational Physics, Volume 230, Issue 14, pp.5787-5805, 2011-06-20
4. 岡元太郎, 竹中博士, 中村武史, 小林直樹, 青木尊之, "フル GPU 計算による地震波伝播シミュレーション", GTC Workshop Japan 2011, 東京・六本木, 2011-07-22
5. T. Miki, X. Wang, T. Aoki, Y. Imai, T. Ishikawa, K. Takase and T. Yamaguchi, "Patient-specific modelling of pulmonary airflow using GPU cluster for the application in medical practice", Computer Methods in Biomechanics and Biomedical Engineering, 2011-08-02, (DOI: 10.1080/10255842.2011.560842)
6. Xian Wang and Takayuki Aoki, "Multi-GPU performance of incompressible flow computation by lattice Boltzmann method on GPU cluster", Parallel Computing, 521-535, 2011-09-01, (DOI: 10.1016/j.parco.2011.02.007)
7. 丹愛彦, 青木尊之, 井上景介, 吉谷清文, "回転体に駆動される気液二相流の数値計算", 日本機械学会論文集 B 編, Vol.77, No.781, 1699-1714, (2011), 2011-09-25
8. Takayuki AOKI, Sato OGAWA and Akinori YAMANAKA, "Multiple-GPU Scalability of Phase-Field Simulation for Dendritic Solidification", Progress in Nuclear Science and Technology, Vol.2, pp.639-642, 2011-10-01
9. Naoya Maruyama, Tatsuo Nomura, Kento Sato, Satoshi Matsuoka, "Physis: An Implicitly Parallel Programming Model for Stencil Computations on Large-Scale GPU-Accelerated Supercomputers", Proceedings of the 2010 ACM/IEEE conference on Supercomputing (SC'11), Seattle, WA, USA, 2011-11-15
10. Takashi Shimokawabe, Takayuki Aoki, Tomohiro Takaki, Akinori Yamanaka, Akira Nukada, Toshio Endo, Naoya Maruyama, Satoshi Matsuoka, "Peta-scale Phase-Field Simulation for Dendritic Solidification on the TSUBAME 2.0 Supercomputer",

- Proceedings of the 2010 ACM/IEEE conference on Supercomputing (SC'11), Seattle, WA, USA, 2011-11-15
11. Leonardo Arturo Bautista Gomez, Dimitri Komatitsch, Naoya Maruyama, Seiji Tsuboi, Franck Cappello, Satoshi Matsuoka, and Takeshi Nakamura, "FTI: High Performance Fault Tolerance Interface for Hybrid Systems", Proceedings of the 2011 ACM/IEEE conference on Supercomputing (SC'11), Seattle, WA, USA, 2011-11-16
  12. Taro Okamoto, Hiroshi Takenaka, Tatsuhiko Hara, Takeshi Nakamura, and Takayuki Aoki, "Rupture Process And Waveform Modeling of The 2011 Tohoku-Oki, Magnitude-9 Earthquake", Abstract U51B-0038 presented at 2011 Fall Meeting, AGU, San Francisco, 2011-12-05
  13. Masaki Hiratsuka, Ryo Ohmura, Amadue K. Sum, Kenji Yasuoka, "Molecular Vibrations of Methane Molecules in the Structure I Clathrate Hydrate from Ab Initio Molecular Dynamics Simulation", The Journal of Chemical Physics, 136, 044508(2012), 2012-01-24, (DOI: 10.1063/1.3677231)
  14. Akihiro Nomura, Yutaka Ishikawa, Naoya Maruyama, Satoshi Matsuoka, "Design and Implementation of Portable and Efficient Non-blocking collective Communication", The 12th IEEE/ACM International Symposium on Cluster, Cloud and Grid Computing (CCGrid2012), Ottawa, Canada, 2012-05-13, (DOI: 10.1109/CCGrid.2012.96)
  15. Shafiq, Muhammad and Pericàs, Miquel and Navarro, Nacho and Ayguadé, Eduard, "BSArc: Blacksmith Streaming Architecture for HPC Accelerators", Proceedings of the 9th ACM International Conference on Computing Frontiers, CF '12, ACM, Ischia, Italy, 2012-05-15
  16. 堀内美希、田浦健次郎, "広域分散ファイルシステムのための適応的な先読み手法", 先進的計算基盤システムシンポジウム(SACSIS)2012, 神戸, 2012-05-17
  17. Nan Dun, Kenjiro Taura, "An Empirical Performance Study of Chapel Programming Language", 26th IEEE International Parallel & Distributed Processing Symposium, 中国、上海, 2012-05-21, (DOI: 10.1109/IPDPSW.2012.64)
  18. Jun Nakashima and Kenjiro Taura, "MassiveThreads: A Thread Library for High Productivity Languages", Symposium on Concurrent Objects and Beyond. From Theory to High-Performance Computing, Kobe, Japan, 2012-05-28
  19. Atsushi Kawai, Kenji Yasuoka, Kazuyuki Yoshikawa, Tetsu Narumi, "Distributed-Shared CUDA: Virtualization of Large-Scale GPU Systems for Programmability and Reliability", The Fourth International Conference on Future Computational Technologies and Applications, FUTURE COMPUTING 2012, Nice, France, 2012-07-24
  20. Höfner, S., Acocella, A., Pop, S. C., Narumi, T., Yasuoka, K., Beu, T. and Zerbetto, F., "GPU-Accelerated Computation of Electron Transfer", Journal of Computational Chemistry, vol. 33, pp. 2351-2356, 2012-07-30, (DOI: DOI : 10.1002/jcc.23082)
  21. Leonardo Bautista Gomez, Bogdan Nicolae, Naoya Maruyama, Franck Cappello, SATOSHI MATSUOKA, "Scalable Reed-Solomon-based Reliable Local Storage for HPC Applications in IaaS Clouds", International European Conference on Parallel and Distributed Computing, Rhodes Island, Greece, 2012-08-31, (DOI: 10.1007/978-3-642-32820-6\_32)
  22. Leonardo Bautista Gomez, Thomas Ropars, Franck Cappello, Naoya Maruyama, SATOSHI MATSUOKA, "Hierarchical Clustering Strategies for Fault Tolerance in Large Scale HPC Systems", 2012 IEEE International Conference on Cluster Computing, Beijing, China, 2012-09-27, (DOI: 10.1109/CLUSTER.2012.71)
  23. Kenjiro Taura, Jun Nakashima, Rio Yokota, Naoya Maruyama, "A Task Parallelism Meets Fast Multipole Methods", Workshop on Latest Advances in Scalable Algorithms

- for Large-Scale Systems at SC12, 米国、ソルトレイクシティ, 2012-11-11
24. Ting Chen, Kenjiro Taura, "A Comparative Study of Data Processing Approaches for Text Processing Workflows", WORKS2012(SC2012 併設ワークショップ), 米国、ソルトレイクシティ, 2012-11-12
  25. Miki Horiuchi, Kenjiro Taura, "Acceleration of Data-intensive Workflow Applications by Using File Access History", WORKS2012(SC2012 併設ワークショップ), 米国、ソルトレイクシティ, 2012-11-12
  26. Kento Sato, Naoya Maruyama, Kathryn Mohror, Adam Moody, Todd Gamblin, Bronis R. de Supinski, Satoshi Matsuoka, "Design and modeling of a non-blocking checkpointing system", Proceedings of the 2012 ACM/IEEE conference on Supercomputing (SC'12), Salt Lake City, Utah, 2012-11-13
  27. Minoru Oikawa, Atsushi Kawai, Kentaro Nomura, Kazuyuki Yoshikawa, Kenji Yasuoka, Tetsu Narumi, "DS-CUDA: a Middleware to Use Many GPUs in the Cloud Environment", International Workshop on Sustainable HPC Cloud at SC12, Salt Lake City, USA, 2012-11-16
  28. 小野寺直幸, 青木尊之, 下川辺隆史, 小林宏充, "格子ボルツマン法による 1m 格子を用いた都市部 10km 四方の大規模 LES 気流シミュレーション", 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主催 HPCS シンポジウム 2013, 東工大, 2013-01-16, (<http://hpcs.hpcc.jp/program.html#session5>)
  29. 下川辺隆史, 青木尊之, 小野寺直幸, "ブロック AMR 法の GPU コンピューティング・フレームワーク", 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主催 HPCS シンポジウム 2013, 東京, 2013-01-16, (<http://hpcs.hpcc.jp/>)
  30. Rio Yokota, L.A. Barba, Tetsu Narumi, Kenji Yasuoka, "Petascale Turbulence Simulation Using a Highly Parallel Fast Multipole Method", Computer Physics Communications, Vol. 184, pp. 445-455, 2013-03-01, (DOI: 10.1016/j.cpc.2012.09.011)
  31. Tetsuya Hoshino, Naoya Maruyama, Satoshi Matsuoka, Ryoji Takaki, "CUDA vs OpenACC: Performance Case Studies with Kernel Benchmarks and a Memory Bound CFD Application", Proceedings of the 13th IEEE/ACM International Symposium on Cluster, Cloud and Grid Computing, Delft, Netherland, 2013-05-14, (Accepted)
  32. Mohamed Slim Bouguerra, Ana Gainaru, Leonardo Bautista Gomez, Franck Cappello, Satoshi Matsuoka, Naoya Maruyama, "Improving the Computing Efficiency of HPC Systems Using a Combination of Proactive and Preventive Checkpointing", 2013 IEEE 27th International Symposium on Parallel & Distributed Processing (IPDPS), 501-512, Boston, MA, USA, 2013-05-20, (DOI: 10.1109/IPDPS.2013.74)
  33. 大筒裕之, 中島潤, 田浦健次郎, "タスク並列処理系における CPU の利用効率に着目したスケジューリング手法", 先進的計算基盤システムシンポジウム(SACSIS)2013, 仙台, 2013-05-23
  34. Jun Nakashima, Sho Nakatani, Kenjiro Taura, "Design and Implementation of a Customizable Work Stealing Scheduler", 3rd International Workshop on Runtime and Operating Systems for Supercomputers(ROSS2013, ICS13 併設), Eugene, OR, USA, 2013-06-10
  35. Abdelhalim Amer, Naoya Maruyama, Miquel Pericàs, Kenjiro Taura, Rio Yokota, Satoshi Matsuoka, "Fork-Join and Data-Driven Execution Models on Multi-core Architectures: Case Study of the FMM", 28th International Supercomputing Conference, ISC 2013,, ドイツ, 2013-06-16
  36. T. Takaki, T. Shimokawabe, M. Ohno, A. Yamanaka, T. Aoki, "Unexpected selection of growing dendrites by very-large-scale phase-field simulation", Journal of Crystal Growth, 21-25, Volume 382, 2013-07-28, (DOI:

- <http://dx.doi.org/10.1016/j.jcrysgro.2013.07.028>)
37. Rio Yokota, "An FMM based on dual tree traversal for many-core architectures", *Journal of Algorithms and Computational Technology*, , Vol. 7, No. 3, pp. 301-324, 2013-08-21, (DOI: 10.1260/1748-3018.7.3.301)
  38. 都築怜理, 青木尊之, 下川辺隆史, "GPU スパコンにおける1 億個のスカラー粒子計算の強スケーリングと動的負荷分散", *情報処理学会論文誌コンピューティングシステム IPSJ Transactions on Advanced Computing System (ACS, Vol.9, No.3, P.82-93, 2013-09-01*
  39. Mohamed Attia Wahib, Naoya Maruyama, "Highly Optimized Full GPU-Acceleration of Non-hydrostatic Weather Model SCALE-LES", *IEEE Cluster 2013, Indianapolis, IN, USA, 2013-09-25*
  40. Toshiya Komoda, Shinobu Miwa, Hiroshi Nakamura, Naoya Maruyama, "Integrating Multi-GPU Execution into an OpenACC Compiler", *42nd International Conference on Parallel Processing (ICPP), 260--269, Lyon, France, 2013-10-02, (DOI: 10.1109/ICPP.2013.35)*
  41. Shinya Hayashi, Kenjiro Taura, "Parallel and Memory-efficient Burrows-Wheeler Transform", *IEEE Big Data Workshop for Bioinformatics and Health Informatics (IEEE BHI).*, 米国 サンタクララ, 2013-10-06
  42. Miquel Pericàs, Abdelhalim Amer, Kenjiro Taura, Satoshi Matsuoka, "Analysis of Data Reuse in Task-Parallel Runtimes", *4th International Workshop on Performance Modeling, Benchmarking and Simulation of High Performance Computer Systems (PMBS13), 米国デンバー, 2013-11-01*
  43. Yuchen Xin, Hon-Cheng Wong, Un-Hong Wong, "Transfer Function for Direct Volume Rendering in the the Fashion of WYSIWYD (What You See Is What You Design)", *International Journal of Advancements in Computing Technology*, 84-95, 2013-11-30, (<http://www.aicit.org/ijact/global/ppl.html?jname=IJACT>)
  44. Un-Hong Wong, Hon-Cheng Wong, Yonghui Ma, "Global magnetohydrodynamic simulations on multiple GPUs", *Computer Physics Communications* 185 (2014), 144-152, 2014-01-01, (DOI: 10.1016/j.cpc.2013.08.027), (<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0010465513003007#>)
  45. Un-Hong Wong, Hon-Cheng Wong, Yonghui Ma, "Global magnetohydrodynamic simulations on multiple GPUs", *Computer Physics Communications* 185 (2014), 144-152, 2014-01-01, (DOI: 10.1016/j.cpc.2013.08.027), (<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0010465513003007#>オンラインと論文誌)
  46. 下川辺隆史, 青木尊之, 小野寺直幸, "複数 GPU による格子に基づいたシミュレーションのためのマルチ GPU コンピューティング・フレームワーク", *HPCS2014, 一橋大学, 2014-01-08, (<http://hpcs.hpcc.jp>)*
  47. Un-Hong Wong, Yunzhao Wu, Hon-Cheng Wong, Yanyan Liang, Zesheng Tang, "Modeling the Reflectance of the Lunar Regolith by a New Method Combining Monte Carlo Ray Tracing and Hapke's Model with Application to Chang'E-1 IIM Data", *The Scientific World Journal (volume 2014)*, 2014-01-12, (DOI: 10.1155/2014/457138), (<http://www.hindawi.com/journals/tswj/2014/457138/>オンラインのみ)
  48. Naoya Maruyama, Takayuki Aoki, "Optimizing Stencil Computations for NVIDIA Kepler GPUs", *International Workshop on High-Performance Stencil Computations, Vienna, Austria, 2014-01-21*
  49. Michel Müller, "ASUCA on GPU: Uncompromising Hybrid Port for Physical Core of Japanese Weather Model", *GTC 2014(GPU Technology Conference) Japan 2014, San Jose, US, 2014-03-27, (<http://www.gputechconf.com/>)*

50. Takashi Shimokawabe, "Weather Prediction Code Witten by a High-productivity Framework for Multi-GPU Computing", GTC 2014(GPU Technology Conference) Japan 2014, San Jose, US, 2014-03-27, (<http://www.gputechconf.com/>)
51. Takayuki Aoki, "AMR-Based on Space-Filling Curve for Stencil Applications", GTC 2014(GPU Technology Conference) Japan 2014, San Jose, US, 2014-03-27, (<http://www.gputechconf.com/>)
52. Xian Wang, Yanqin Shanguan, Naoyuki Onodera, Hiromichi Kobayashi, Takayuki Aoki, "Direct Numerical Simulation and Large Eddy Simulation on a Turbulent Wall-Bounded Flow Using Lattice Boltzmann Method and Multiple GPUs", Mathematical Problems in Engineering, Vol.2014, Article ID 742432, 10pages(1-10), 2014-04-14, (<http://www.hindawi.com/journals/mpe/2014/742432/>)
53. Taro Okamoto, Hiroshi Takenaka, Tatsuhiko Hara, Takeshi Nakamura, Takayuki Aoki, "Large-Scale Multi-GPU Simulation of Seismic-Wave Propagation and Its Application to Analysis of the 2011 Great Tohoku-Oki Earthquake", The 1st International Conference on Computational Engineering and Science for Safety and Environmental Problems, pp. 678 - 681, Sendai, Japan, 2014-04-17, (<http://www.compsafe2014.org/>)
54. Marlon Arce Acuña, Takayuki Aoki, "Large Scale AMR Multi-GPU Tsunami Simulation", The 1st International Conference on Computational Engineering and Science for Safety and Environmental Problems, pp. 708 - 710, Sendai, Japan, 2014-04-17, (<http://www.compsafe2014.org/>)
55. Takashi Shimokawabe, Takayuki Aoki, Naoyuki Onodera, "Multi-GPU Computing of Weather Prediction Code Written by a High-Productivity Framework", The 1st International Conference on Computational Engineering and Science for Safety and Environmental Problems, pp. 711 - 712, Sendai, Japan, 2014-04-17, (<http://www.compsafe2014.org/>)
56. Nurul Huda Ahmad, Atsushi Inagaki, Manabu Kanda, Naoyuki Onodera, Takayuki Aoki, "Simulation of the Gust Factor in Highly Dense Urban Area in Tokyo", The 1st International Conference on Computational Engineering and Science for Safety and Environmental Problems, pp. 718 - 721, Sendai, Japan, 2014-04-17, (<http://www.compsafe2014.org/>)
57. 小野寺直幸、青木尊之, "GPUを用いた固体粒子を含む固気液三相流の大規模シミュレーション", 日本混相流学会 混相流 27 巻 5 号(2014), p. 607-613, 2014-05-01, (<http://www.jsmf.gr.jp/>)
58. Kento Sato, Adam Moody, Kathryn Mohor, Todd Gamblin, Bronis R. de Supinski, Naoya Maruyama, Satoshi Matsuoka, "Fault Tolerant Messaging Interface for Fast and Transparent Recovery", 28th IEEE International Parallel and Distributed Processing Symposium (IPDPS'14), Phoenix, AZ, 2014-05-22
59. Kento Sato, Kathryn Mohor, Adam Moody, Todd Gamblin, Bronis R. de Supinski, Naoya Maruyama, Satoshi Matsuoka, "A User-level Infiniband-based File System and Checkpoint Strategy for Burst Buffers", 14th IEEE/ACM International Symposium on Cluster, Cloud and Grid Computing (CCGrid'14), Chicago, IL, 2014-05-27, (Best Paper)
60. Un-Hong Wong, Takayuki Aoki, Hon-Cheng Wong, "Real-time Ray Tracing for CFD Visualization via NVIDIA Iray", 16th International Symposium on Flow Visualization, Okinawa, Japan, 2014-06-24, (<http://www.isfv.org/>)
61. Un-Hong Wong, Takayuki Aoki, Hon-Cheng Wong, "Efficient magnetohydrodynamic simulations on distributed multi-GPU systems using a novel GPU Direct-MPI hybrid approach", Computer Physics Communications 185 (2014), 1901-1913, 2014-07-01, (DOI: 10.1016/j.cpc.2014.03.018),

(<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0010465514000988>)

62. 老川 稔,野村 昂太郎,泰岡 顕治,成見 哲, "1,024GPU を使用したレプリカ交換分子動力学シミュレーションの並列化", 情報処理学会論文誌 コンピューティングシステム, Vol.7, No.4, pp.1-14, 2014-08-19
63. Hiroshi Inou, Moriyoshi Ohara, and Kenjiro Taura, "Faster Set Intersection with SIMD instructions by Reducing Branch Mispredictions", Proceedings of the VLDB Endowment, Volume 8, 2014-2015, 2014-09-01
64. Nomura K., Oikawa M., Kawai A., Narumi T. and Yasuoka K., "GPU-Accelerated Replica Exchange Molecular Simulation on Solid-Liquid Phase Transition Study of Lennard-Jones Fluids", Molecular Simulation, Vol. 41, pp.874-880, 2014-09-17, (DOI: 10.1080/08927022.2014.954572)
65. Yousuke Ohno, Rio Yokota, Hiroshi Koyama, Gentaro Morimoto, Aki Hasegawa, Gen Masumoto, Noriaki Okimoto, Yoshinori Hirano, Huda Ibeid, Tetsu Narumi, Makoto Taiji, "Petascale molecular dynamics simulation using the fast multipole method on K computer", Computer Physics Communications, Vol.185, No. 10, pp.2575-2585, 2014-10-01, (DOI: doi:10.1016/j.cpc.2014.06.004)
66. Un-Hong Wong, Takayuki Aoki, Hon-Cheng Wong, "Real-time Volume Visualization for Large-scale Grid-based Fluid Simulations on Distributed multi-GPU System", International Symposium Mathematical Progress in Expressive Image Synthesis (MEIS2014), Fukuoka, Japan, 2014-11-14, ([http://mcg.imi.kyushu-u.ac.jp/meis2014/?page\\_id=30](http://mcg.imi.kyushu-u.ac.jp/meis2014/?page_id=30))
67. Tetsuya Hoshino, Naoya Maruyama, Satoshi Matsuoka, "An OpenACC Extension for Data Layout Transformation", Proceedings of the First Workshop on Accelerator Programming using Directives (WACCPD '14), New Orleans, LA, 2014-11-17, (DOI: 10.1109/WACCPD.2014.12)
68. Mohamed Attia Wahib, Naoya Maruyama, "Scalable Kernel Fusion for Memory-Bound GPU Applications", Proceedings of the International Conference for High Performance Computing, Networking, Storage and Analysis (SC'14), New Orleans, LA, 2014-11-18, (DOI: 10.1109/SC.2014.21)
69. Takashi Shimokawabe, Takayuki Aoki, Naoyuki Onodera, "High-productivity Framework on GPU-rich Supercomputers for Operational Weather Prediction Code ASUCA", Proceedings of the 2014 ACM/IEEE conference on Supercomputing (SC'14), New Orleans, LA, USA, 2014-11-18, (<http://sc14.supercomputing.org>)
70. Yusuke Nishioka and Kenjiro Taura, "Scalable Task-Parallel SGD on Matrix Factorization in Multicore Architectures", Annual Meeting on Advanced Computing System and Infrastructure (ACSI) 2015, 筑波, 2015-01-26
71. Kenjiro Taura, Jun Nakashima, and Miquel Pericas, "DAG Recorder: A Task-Centric Tracing Algorithm for Task Parallel Applications", Annual Meeting on Advanced Computing System and Infrastructure (ACSI) 2015, 筑波, 2015-01-26
72. Un-Hong Wong, Takayuki Aoki, Hon-Cheng Wong, "A GPU Direct-MPI Hybrid Parallel and Its Application to Large-scale Global MHD Simulation and In-Situ Visualization on Distributed Multi-GPU Systems", Annual Meeting on Advanced Computing System and Infrastructure (ACSI) 2015, つくば国際会議場 (筑波), 2015-01-28, (<http://acsi.hpcc.jp/2015/>)
73. Rio Yokota and David E. Keyes, "ExaFMM -- a Testbed for Comparing Various implementations of the FMM", SIAM Conference on Computational Science and Engineering, Salt Lake City, USA, 2015-03-16
74. Edgar Josafat Martinez Noriega, "High Performance Computing on Mobile Devices through Distributed Shared CUDA", GPU Technology Conference 2015, S5290, San



Jose, 2015-03-18

75. 都築怜理,青木尊之, “動的領域分割を用いた流体構造連成によるサスペンション・フローの大規模 GPU 計算”, 2015 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, 111-119, 東京大学 武田先端知ビル 5 階 武田ホール(東京), 2015-05-20, (<http://hpcs.hpcc.jp/>)
76. T Takaki, R Rojas, M Ohno, T Shimokawabe, T Aoki, “GPU phase-field lattice Boltzmann simulations of growth and motion of a binary alloy dendrite”, *Materials Science and Engineering*, Vol. 84, 2015-06-11, (DOI: doi:10.1088/1757-899X/84/1/012066), (<http://iopscience.iop.org/1757-899X/84/1/012066;jsessionid=55498AA8E6829F8436D139765D2A232D.c3>)
77. S Sakane, T Takaki, M Ohno, T Shimokawabe, T Aoki, “GPU-accelerated 3D phase-field simulations of dendrite competitive growth during directional solidification of binary alloy”, *Materials Science and Engineering*, Vol. 84, 2015-06-11, (DOI: doi:10.1088/1757-899X/84/1/012063), (<http://iopscience.iop.org/1757-899X/84/1/012063>)
78. Mohamed Attia Wahib, Naoya Maruyama, “Automated GPU Kernel Transformations in Large-Scale Production Stencil Applications”, *Proceedings of the 24th International ACM Symposium on High-Performance Parallel and Distributed Computing (HPDC’15)*, 259–270, Portland, OR, 2015-06-19, (DOI: 10.1145/2749246.2749255)
79. Hiroshi Inoue and Kenjiro Taura, “SIMD-and cache-friendly algorithm for sorting an array of structures”, *Proceedings of the VLDB Endowment*, 1274-1285, Kohala Coast, Hawaii, 2015-07-01
80. Mohamed Attia Wahib, Naoya Maruyama, “Data-centric GPU-based Adaptive Mesh Refinement”, *5th Workshop on Irregular Applications: Architectures and Algorithms (IA’3 2015)*, Austin, TX, 2015-11-15
81. An Huynh, Douglas Thain, Miquel Peric  $\bar{e}$ ’s, and Kenjiro Taura, “DAGViz: a DAG visualization tool for analyzing task-parallel program traces”, *The 2nd Workshop on Visual Performance Analysis*, Austin, Texas, 2015-11-15
82. 渡辺勢也、青木尊之、都築怜理、下川辺隆史, “接触による粒子間相互作用の GPU 計算での近傍探索手法”, *情報処理学会論文誌コンピューティングシステム* Vol.8 No.4, 50-60, 2015-11-20, (<http://acs.hpcc.jp/>)
83. 渡辺勢也、青木尊之、都築怜理, “GPU による非球形粒子を用いた DEM の大規模シミュレーション”, *粉体工学会誌* Vo.;52 No.12, 730-734, 2015-12-10, (<http://www.sptj.jp/>)
84. Yusuke Nishioka and Kenjiro Taura, “Scalable Task-Parallel SGD on Matrix Factorization in Multicore Architectures”, *The 4th International Workshop on Parallel and Distributed Computing for Large Scale Machine Learning and Big Data Analytics*, Hyderabad, India, 2015/05/29
85. Shigeki Akiyama and Kenjiro Taura, “Uni-Address Threads: Scalable Thread Management for RDMA-Based Work Stealing”, *The 24th International ACM Symposium on High-Performance Parallel and Distributed Computing*, Portland, Oregon, 2015/06/15
86. Christian Feichtinger, Johannes Habich, Harald Kostler, Ulrich Rude, Takayuki Aoki, “Performance modeling and analysis of heterogeneous lattice Boltzmann simulations on CPU-GPU clusters”, *Parallel Computing*, Volume 46, Pages 1-13, 2015/6 月, (DOI: 10.1016/j.parco.2014.12.003), (<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0167819114001446>)
87. Tomohiro Takaki, Munekazu Ohno, Yasushi Shibuta, Shinji Sakane, Takashi

- Shimokawabe, Takayuki Aoki, "Two-dimensional phase-field study of competitive grain growth during directional solidification of polycrystalline binary alloy", *Journal of Crystal Growth*, 2016-01-29, (DOI: doi:10.1016/j.jcrysgro.2016.01.036), (<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022024816300185>)
88. R. Yokota, L. A. Barba, "ExaFMM: An Exascale Fast Multipole Method Library", *Communications in Computational Physics*, (accepted)

(2)その他の著作物(総説、書籍など)

1. 下川辺 隆史, 青木 尊之, 石田 純一, 河野 耕平, 室井 ちあし, "メソスケール気象モデル ASUCA の Tsubame 2.0 での実行", *日本流体力学会雑誌「ながれ」*, Vol.30, pp.75-78, 2011-04-01
2. 青木尊之, "「新用語解説」GPU コンピューティング", *日本気象学会誌「天気」*, 2011年7月号, P.83-85, 2011-07-01
3. 青木尊之, 下川辺隆史, "GPU スパコンを用いた大規模数値シミュレーション", *日本シミュレーション学会誌*, Vol.30, No.3, ISSN 0285-9947, pp.163-172, 2011-09-01
4. 青木尊之, "GPGPU", *シミュレーション辞典*, コロナ社, 367, ISBN978-4-339-02458-6 (2012), 2012-02-27
5. Taro Okamoto, Hiroshi Takenaka, Takeshi Nakamura, and Takayuki Aoki, "GPU-Accelerated Simulation of Seismic Wave Propagation, in GPU Solutions to Multi-scale Problems in Science and Engineering", Yuen, D.; Wang, J.; Johnsson, L.; Chi, C.-H.; Shi, Y. (Eds.), 250 p., Springer, ISBN 978-3-642-16404-0, 2012-02-29
6. 青木尊之, "水と空気が激しく混じり合う流れのシミュレーション", *油空圧技術*, 日本工業出版, Vol. 51, No.3, 日本工業出版, pp.7-13 ISSN0914-6253, 2012-03-01
7. 丸山直也, 星野哲也, "OpenACC プログラミング", *情報処理メディア学会誌* 2012年10月号, 2012-10-01
8. 青木尊之, "GPU スパコン Tsubame2.0 による大規模格子系アプリケーション", *日本機械学会誌*, P.81-85, 2013-02-05, (DOI: ISSN 0021-4728)
9. 丹愛彦, 青木尊之, "CFD が描く流体潤滑の新しい世界", *日本トライボロジー学会誌「トライボロジスト」*, P.361-366, 2013-06-15, (DOI: ISSN 0915-1168)
10. 青木 尊之, "GPU コンピューティングによる大規模シミュレーション", *プラズマ核融合学会誌・説記事* 2014 (J. Plasma Fusion Res. Vol.90, No.12 (2014) pp.755-763), P.755-763, 2014-12-01, ([http://www.jspf.or.jp/Journal/PDF\\_JSPF/jspf2014\\_12/jspf2014\\_12-en.pdf](http://www.jspf.or.jp/Journal/PDF_JSPF/jspf2014_12/jspf2014_12-en.pdf))
11. 山中晃徳、岡本成史、下川辺隆史、青木尊之, "マルチフェーズフィールド法を用いた金属多結晶組織形成シミュレーションの大規模 GPU 計算", *TSUBAME ESJ* Vol.13, P2-6, 2015-03-10, ([http://www.gsic.titech.ac.jp/TSUBAME\\_ESJ](http://www.gsic.titech.ac.jp/TSUBAME_ESJ))
12. 都築怜理、渡辺勢也、青木尊之, "個別要素法による粉体の大規模シミュレーション", *TSUBAME ESJ* Vol.13, P12-17, 2015-03-10, ([http://www.gsic.titech.ac.jp/TSUBAME\\_ESJ](http://www.gsic.titech.ac.jp/TSUBAME_ESJ))
13. 中島研吾、青木尊之, "スーパーコンピューティングの展望 計算機とアルゴリズム", *日本計算工学会 20 周年記念号(2016 Vol.21 No.1)*, P30-33, 2016-01-31, (DOI: ISSN 1341-7622), (<http://www.jscs.org/Issue/Journal/>)

(3)国際学会発表及び主要な国内学会発表

① 招待講演 (国内会議 30 件、国際会議 28 件)

1. Takayuki Aoki, "Large scale GPU computing for CFD applications", 23th International Conference on Parallel Computational Fluid Dynamics (ParCFD 2011), Barcelona, 2011-05-17
2. Naoya Maruyama, "Accelerating the Tsubame Supercomputer with Graphics

- Processing Units and its Implications for Systems Research”, Workshop on Large-Scale Parallel Processing (LSPP’11) in conjunction with IEEE International Parallel and Distributed Processing Symposium (IPDPS’11), Anchorage, AK, USA, 2011-05-20
3. Takayuki Aoki, “GPU Powered Supercomputer TSUBAME 2.0”, Joint Int’l Workshop on HPC for Natural Disaster Simulation and GPU Computing,, Bangkok, 2011-06-27
  4. Takayuki Aoki, “Peta-FLOPS Simulation for Metal Dendritic Solidification on TSUBAME 4,000 GPUs”, International Workshop of GPU Solutions to Multiscale Problems in Science and Engineering (GPU-SMP’2011),, LanZhon, China, 2011-07-19
  5. 成見哲, “並列 GPU による N 体問題の加速”, 第3回アクセラレーション技術発表討論会, 神戸, 2011-09-01
  6. Takayuki Aoki, “GPU-based operational atmosphere model JMA-ASUCA with horizontal 500m resolution”, Computing in Atmospheric Sciences 2011 (CAS2K11), Annecy, France, 2011-09-13
  7. Takayuki Aoki, “Large-scale GPU Applications on TSUBAME 2.0 SL390 Platform”, HP-CAST Taiwan 2011, Taipei, Taiwan, 2011-09-23
  8. Takayuki Aoki, “A 2-Petaflops Stencil Application on SL390/GPU-based TSUBAME 2.0”, HP-CAST 17, Seattle, WA, USA, 2011-11-12
  9. 村主崇行, “GPU クラスタとプログラム自動生成による磁気流体シミュレーション”, Plasma Conference 2011, 石川県 金沢市, 2011-11-22
  10. Takayuki Aoki, “Large-scale CFD applications on GPU-rich supercomputer TSUBAME2.0”, Accelerated Computing Workshop at OzViz 2011, Sydney, Australia, 2011-11-23
  11. Takayuki Aoki, “GPU-based operational Weather Model with Horizontal 500m resolution”, GTC Asia 2011, Beijing, China, 2011-12-15
  12. Takayuki Aoki, “A 2-Petaflops Stencil Application on GPU-rich Supercomputer TSUBAME 2.0”, GTC Asia 2011, Beijing, China, 2011-12-15
  13. Takayuki Aoki, “Large-scale Stencil Applications on GPU-rich Supercomputer TSUBAME2.0”, The annual IEEE International Conference on High Performance Computing (HiPC 2011), Bangalore, India, 2011-12-21
  14. 成見哲, “GPU による N 体問題の加速”, 兵庫県立大学大学院シミュレーション学研究所「連携セミナー」, 神戸, 2012-01-11
  15. Takayuki Aoki, “GPGPU - Desktop Supercompute Recipient of Gordon Bell Prize 2011”, GPGPU Programming Workshop, Chulalongkorn University, Bangkok, Thailand, 2012-01-13
  16. 青木尊之, “グリーンスパコン TSUBAME 2.0 における大規模アプリケーション”, 北大・東工大・国立情報学研究所連携「グリーンスパコン・クラウド連携シンポジウム」, 北大, 2012-03-26
  17. 青木尊之, “GPU スパコン TSUBAME2.0 における大規模流体計算と実行性能”, 京都大学・学術情報メディアセンターセミナー「GPU コンピューティングと流体力学」, 京大, 2012-03-27
  18. Takayuki Aoki, “Peta-scale GPU applications on TSUBAME2.0”, The Salishan Conference on High-Speed Computing 2012, Gleneden Beach, OR, 2012-04-25
  19. Takayuki Aoki, “A 2-Petaflops Stencil Application with Stereoscopic 3D Visualization - Gordon Bell Prize 2011”, GTC 2012, San Jose, 2012-05-15, (<http://www.gputechconf.com/page/home.html>)
  20. 青木尊之, 下川辺隆史, 小野寺直幸, “流体解析・電磁界解析に適した GPU コン

- ピューティングと大規模計算化”, 電子情報通信学会, 2012 年ソサエティ大会, 富山, 2012-09-14, (<http://www.gakkai-web.net/gakkai/ieice/2012Spro/index.html>)
21. 青木尊之, “Al-Si 二元合金の GPU スパコンによる樹枝状凝固シミュレーション”, 第 25 回計算力学講演会, 日本機械学会, 神戸, 2012-10-06, (<http://www.jsme.or.jp/conference/cmdconf12-2/>)
  22. 青木尊之, “TSUBAME 2.0 によるペタ・スケール格子系アプリケーション”, 理研シンポジウム「ペタフロップス・マシンのアプリケーション～その使い方とは～」, 理化学研究所 (和光), 2012-10-12, ([http://www.riken.go.jp/r-world/research/symposium/121012\\_2.html](http://www.riken.go.jp/r-world/research/symposium/121012_2.html))
  23. Takayuki Aoki, “Large-scale stencil applications using the whole TSUBAME2.0 resources”, 7th IAPR International Conference on Pattern Recognition in Bioinformatics (PRIB 2012), 東工大, 2012-11-09, (<http://prib2012.org/invited-speakers.html>)
  24. 丸山直也, 星野哲也, “CUDA vs OpenACC: マイクロベンチマークとアプリケーションによる OpenACC コンパイラの評価”, 第 4 回自動チューニング技術の現状と応用に関するシンポジウム, 東京大学, 2012-12-25
  25. Rio Yokota, “Advances in Fast Multipole Methods for Scalable Electrostatics Calculations”, Workshop: Electrostatics Methods in Molecular Simulation, Stockholm, Sweden, 2013-05-13
  26. Takayuki Aoki, “GPU Computing and HPC Applications on a GPU-rich Supercomputer”, Annual Meeting of TWSIAM, P.18, Providence University (Taichung), Taiwan, 2013-06-02, ([http://msvlab.hre.ntou.edu.tw/TWSIAM\\_ProgramBook.pdf](http://msvlab.hre.ntou.edu.tw/TWSIAM_ProgramBook.pdf))
  27. Takayuki Aoki, “A Turbulent Air Flow Simulation in Metropolitan Tokyo for 10km x 10km area with 1m resolution and Several Peta-scale Real-world Simulations on TSUBAME 2.0”, Workshop: Big Data and CFD Simulation on TSUBAME 2.0, A\*STAR Computational Resource Centre (A\*CRC), Singapore, 2013-07-02, (<http://www.acrc.a-star.edu.sg/index.php?q=aoki&type=search&admin=&cx=004688633280895412792%3Alera26zbta4&cof=FORID%3A10&ie=UTF-8&sa.x=25&sa.y=9>)
  28. 丸山直也, “アプリケーションフレームワークによる性能と生産性の両立”, 京大大学学術情報メディアセンターセミナー「計算科学の明日を担うソフトウェア」, 2013-07-23
  29. 小野寺直幸, “TSUBAME2.0 の全ノードを用いた東京都心部 10km×10km の 1m 解像度による気流シミュレーション”, GTC (GPU Technology Conference) Japan 2013, 東京・六本木 (ミッドタウン), 2013-07-30, (<http://www.gputechconf.jp/page/home.html>)
  30. 青木 尊之, “スパコン TSUBAME によるペタスケール格子系アプリケーション”, GPU コンピューティングチュートリアル講演会, 首都大学東京南大沢キャンパス, 2013-08-06, (<http://www.sd.tmu.ac.jp/assets/files/25802kou.pdf>)
  31. Takayuki Aoki, “Large-scale CFD Applications on GPU Supercomputer TSUBAME”, 第二十届全国計算流体力学学術研討會 (CFD21), 中興大學惠蓀林場 (台中, 台湾), 2013-08-22, (<http://www.aasrc.org.tw/~conference/cfd20.htm>)
  32. 小野寺直幸, “TSUBAME 2.0 の全ノードを用いた格子ボルツマン法による東京都心部 10km 四方の大規模 LES 気流シミュレーション”, 第 5 回アクセラレーション技術発表討論会 (主催: 電子情報通信学会 集積回路研究専門委員会), 会津大学, 2013-09-05, (<http://icd-ieice-jp.com/modules/bulletin/index.php?page=article&storyid=11>)

33. 小野寺直幸, "TSUBAME 2.0 の 4,032 台の GPU を用いた格子ボルツマン法による大規模 LES 気流シミュレーション", 学術情報メディアセンターセミナー, 京都, 2013-10-22,  
(<http://www.media.kyoto-u.ac.jp/ja/services/accms/whatsnew/event/detail/01747.html>)
34. 青木尊之, "Space-filling Curve に基づいた AMR (Adaptive Mesh Refinement) 法による圧縮性流体計算のアルゴリズムと GPU 実装", 学術情報メディアセンターセミナー, 京都, 2013-10-22,  
(<http://www.media.kyoto-u.ac.jp/ja/services/accms/whatsnew/event/detail/01747.html>)
35. 青木尊之, "GPU スパコン TSUBAME によるペタスケール物理シミュレーション", 日本計算工学会・S&V (Simulation & Visualization) 研究会, 東京(中央大学), 2013-11-26, (<http://www.jsces.org/research/sv/index.html>)
36. 青木尊之, "複数 GPU (Graphics Processing Unit) による大規模格子計算 (FDTD)の高速化", 電子情報通信学会・マイクロウェーブワークショップ, パシフィコ横浜, 2013-11-28, (<http://apmc-mwe.org/mwe2013/>)
37. 小野寺直幸, "TSUBAME の GPU を用いた格子ボルツマン法による流体構造連成のラージエディ・シミュレーション", 日本学術会議 第 3 回計算力学シンポジウム, 日本学術会議講堂, 2013-12-03
38. 青木尊之, "ものづくり系アプリの将来 - エクサスケール時代のスパコンを見通して -", 第 14 回 IPAB(並列生物情報処理イニシアティブ)シンポジウム, 東京, 2013-12-06, (<http://www.ipab.org/>)
39. 青木尊之, "GPU スパコン TSUBAME による大規模 CAE アプリと産業利用", 第 24 回関東 CAE 懇話会, 早稲田大学(東京), 2014-01-21, ([http://www.cae21.org/kanto\\_cae/Kanto\\_No24/kanto24\\_annai.shtml](http://www.cae21.org/kanto_cae/Kanto_No24/kanto24_annai.shtml))
40. Takayuki Aoki, "Large-scale GPU Applications for Scientific Computing", SIAM Parallel Processing 2014, Portland, US, 2014-02-20, (<http://www.siam.org/meetings/pp14/>)
41. Takayuki Aoki, "Peta-Scale Flow Simulations using GPUs", Advances in Computational Fluid-Structure Interaction and Flow Simulation, Waseda U., 2014-03-20, (<http://www.tafsm.org/TET60/>)
42. 都築怜理, "動的負荷分散による SPH/DEM 大規模粒子法シミュレーション", GTCJapan2014, 六本木, 2014-07-16, (<http://gpu-computing.gsic.titech.ac.jp/node/81>)
43. Takayuki Aoki, "Large-scale Stencil and Particle Simulations on GPU supercomputer TSUBAME", CEMSE(Computer, Electrical and Mathematical Sciences & Engineering) Seminar, KAUST(King Abdullah University of Science and Technology), Thuwal, Saudi Arabia, 2014-09-03, (<http://cemse.kaust.edu.sa/events/Pages/CEMSE-Seminar-Takayuki%20Aoki.aspx>)
44. 青木尊之, "Large-scale HPC Applications on a GPU supercomputer TSUBAME", エレクトロニクス実装学会 システムインテグレーション実装技術委員会・研究会, 東京・西荻窪(回路会館), 2014-09-11
45. 成見哲, "マルチ GPU の活用を簡単にする仮想化技術", Prometech Simulation Conference 2014, GPU Computing Workshop for Advanced Manufacturing, Tokyo, 2014-09-26
46. Naoya Maruyama, "High Performance and Highly Productive Stencil Framework for GPU Accelerators", International Workshop on Codesign, Gungzhou, CN, 2014-11-08

47. Naoya Maruyama, "Japanese HPC Update: Exascale Research and Next-Generation Flagship Supercomputer", 3rd Workshop on Extreme-Scale Programming Tools, New Orleans, LA, 2014-11-17
  48. Naoya Maruyama, "Domain-Specific Approaches in Scientific Computing", 16th IEEE International Workshop on Parallel and Distributed Scientific and Engineering Computing (PDSEC'15), Hyderabad, India, 2015-05-29
  49. 青木尊之, "GPU スパコンによる大規模流体・粒子シミュレーション", 2015年度 放電学会シンポジウム, 東京 (TTF ロイヤルブルーホール), 2015-06-05, (<http://houdens.org/event.html>)
  50. R. Yokota, "Various implementations of FMM and their performance on future architectures", Multi-resolution Interactions Workshop, Durham, USA, 2015-08-28
  51. 都築怜理, 青木尊之, "GPU スパコンによる動的領域分割を用いたサスペンション・フローの大規模粒子法シミュレーション", 日本応用数理学会 2015 年度年会, 金沢大学(金沢), 2015-09-09, (<http://annual2015.jsiam.org/>)
  52. Michel Müller, "Performance meets Portability: Unified Parallel Programming for GPU and CPU", GTC Japan 2015, 虎ノ門ヒルズフォーラム, 2015-09-18, (<http://gpu-computing.gsic.titech.ac.jp/node/90>)
  53. 成見 哲, "数十枚の GPU を手軽に使える GPU 仮想化ツール: DS-CUDA", GPU Technology Conference Japan, 東京, 2015-09-18
  54. 青木尊之, "GPU スパコンによる粒子法・格子法の大規模シミュレーション", 東北地区応用力学フォーラム ～計算力学コロキウム～, 東北大学 青葉山キャンパス, 2015-11-24, (<https://www.jsce.or.jp/committee/amc/forum/forum.html>)
  55. Kenjiro Taura, "A Common Runtime System in Massively Parallel Environments", 10th AEARU Workshop on Computer Science and Web Technology, 筑波, 2015/02/27
  56. 青木尊之, "GPU スパコンを用いた格子ボルツマン法/有限体積法/粒子法による大規模流体シミュレーション", 日本機械学会 第 28 回バイオエンジニアリング講演会, 東京工業大学 大岡山キャンパス, 2016-01-10, (<http://www.jsme.or.jp/conference/bioconf16/doc/program.html>)
  57. Takayuki Aoki, "Beyond Peta-scale on Stencil and Particle-based GPU Applications", SPPEXA Annual Plenary Meeting, Munich, Germany, 2016-01-28, (<http://www.sppexa.de/sppexa-activities/annual-plenary-meeting/2016/invited-talks.html>)
  58. Takayuki Aoki, "Large-scale physics-based simulations and scientific visualizations", The Visualisation, Big Data, Art and Science Festival 2016, Brisbane, Queensland, 2016-02-18, (<http://visualisation.matters.today/program/>)
- ② 口頭発表 (国内会議 144 件、国際会議 46 件)
1. 黒木 雅広, 青木 尊之, 小野寺 直幸, "GPGPU によるマルチモーメント法の圧縮性流体計算", 第 16 回計算工学講演会, 日本計算工学会, CD-ROM, 東大・柏キャンパス, 2011-05-25
  2. アルセアクニャ マルロン, 青木 尊之, "Mesh Refinement for Real-Time Tsunami Simulation", 第 16 回計算工学講演会, 日本計算工学会, CD-ROM, 東大・柏キャンパス, 2011-05-25
  3. 杉原 健太, 青木 尊之, 黒木 雅広, "GPU による二相流シミュレーションの開発 II", 第 16 回計算工学講演会, 日本計算工学会, CD-ROM, 東大・柏キャンパス, 2011-05-25
  4. 小野寺 直幸, 青木 尊之, "複数 GPU を用いた複雑物体周りのラージエディ・シ

- ミュレーション”, 第 16 回計算工学講演会, 日本計算工学会, CD-ROM, 東大・柏キャンパス, 2011-05-25
5. Takashi SHIMOKAWABE, Takayuki AOKI, Tomohiro TAKAKI, Akinori YAMANAKA, “Multi-GPU Computing of Ultra Large Scale Phase-Field Simulation”, 第 16 回計算工学講演会, 日本計算工学会, CD-ROM, 東大・柏キャンパス, 2011-05-25
  6. 丹 愛彦, 青木 尊之, 井上 景介, 吉谷清, “回転体に駆動される気液二相流の数値計算”, 第 16 回計算工学講演会, 日本計算工学会, CD-ROM, 東大・柏キャンパス, 2011-05-25
  7. 平塚将起, 大村亮, Amadeu K. Sum, 平塚将起, “第一原理分子動力学法を用いた構造 H ハイドレート振動スペクトル解析”, 第 48 回日本伝熱シンポジウム, 岡山, 2011-06-02
  8. Naoya Maruyama, Tatsuo Nomura, Toshio Endo, Satoshi Matsuoka, “A Sequential Programming Framework for Large-Scale GPU-Accelerated Structured Grids”, SIAM 7th International Congress on Industrial & Applied Mathematics (ICIAM’11), MS386: Creating the Next Generation of High Performance Numerical Computing Capabilities, Vancouver, Canada, 2011-07-21
  9. Aleksandr Drozd, Satoshi Matsuoka, Naoya Maruyama, “Fast GPU Read Alignment with Burrows Wheeler Transform Based Index”, IPSJ SIG Technical Report, Vol. 2011-HPC-130 No.13 (SWoPP), 1--4, 鹿児島, 2011-07-27
  10. 中島潤, 田浦健次郎, “高効率な I/O 処理が可能な細粒度マルチスレッド処理系の Chapel による評価”, 2011 年並列/分散/協調処理に関する『鹿児島』サマー・ワークショップ (SWoPP 鹿児島 2011), 鹿児島, 2011-07-27
  11. 加辺友也, 田浦健次郎, “PARP: プロファイル比較に基づく並列アプリケーションの性能解析”, 2011 年並列/分散/協調処理に関する『鹿児島』サマー・ワークショップ (SWoPP 鹿児島 2011), 鹿児島, 2011-07-27
  12. 野村 哲弘, 石川 裕, “非同期コレクティブ通信の実装方式の検討”, IPSJ SIG Technical Report, Vol. 2011-HPC-130 No.50 (SWoPP), 鹿児島, 2011-07-28
  13. Nan Dun, Sugianto Angkasa, Kenjiro Taura, Ting Chen, “Cynk: A Hybrid Rsync and SSH Filesystem for Cloud Computing”, 2011 年並列/分散/協調処理に関する『鹿児島』サマー・ワークショップ (SWoPP 鹿児島 2011), 鹿児島, 2011-07-28
  14. 秋山茂樹, 中島潤, 田浦健次郎, “大域アドレス空間に基づく細粒度マルチスレッド処理系”, 2011 年並列/分散/協調処理に関する『鹿児島』サマー・ワークショップ (SWoPP 鹿児島 2011), 鹿児島, 2011-07-29
  15. 池上克明, 田浦健次郎, “Design and Implementation of a High Productivity Language with Communication Aggregation for Parallel Scientific Computation”, 2011 年並列/分散/協調処理に関する『鹿児島』サマー・ワークショップ (SWoPP 鹿児島 2011), 鹿児島, 2011-07-29
  16. 河野瑛, 田浦健次郎, “重心ボロノイ分割を用いた並列粒子法のための動的負荷分散法”, 2011 年並列/分散/協調処理に関する『鹿児島』サマー・ワークショップ (SWoPP 鹿児島 2011), 鹿児島, 2011-07-29
  17. 平塚将起, 大村亮, Amadeu K. Sum, 泰岡顕治, “第一原理分子動力学シミュレーションを用いたクラスレート水和物の振動解析”, 可視化情報学会全国講演会, 富山, 2011-09-26
  18. Takayuki MURANUSHI, “Paraiso, a code generator for partial differential equations solvers”, Formation of Stars and Planets 2011, Ishigaki, Okinawa, Japan, 2011-10-03
  19. Jun Nakashima, Nan Dun, Kenjiro Taura, “MassiveThreads Tasking Layer”, Chapel Lightning Talk at SC11, Seattle, WA, USA, 2011-11-16

20. Kento Sato, Adam Moody, Kathryn Mohror, Todd Gamblin, Bronis R. De Supinski, Naoya Maruyama, Satoshi Matsuoka, "Towards an Asynchronous Checkpointing System", IPSJ SIG Technical Report, Vol. 2011-HPC-132 No.28 (HOKKE), 札幌, 2011-11-28
21. 横田理央, 成見哲, Barba Lorena, 泰岡顕治, "大規模 GPU と FMM を用いた一様等方性乱流の解析", 第 19 回ハイパフォーマンスコンピューティングとアーキテクチャの評価に関する北海道ワークショップ (HOKKE19), 札幌, 2011-11-28
22. 福田圭祐, 丸山直也, 松岡聡, "動的タスクスケジューリングによる CPU/GPU ヘテロニアス環境での FMM の最適化", IPSJ SIG Technical Report, Vol. 2011-HPC-132 No.28 (HOKKE), 札幌, 2011-11-29
23. Marlon Arce Acuna, Takayuki Aoki, "Large-Scale GPU Tsunami Simulation on a Multi-Level Mesh", International RIAM Symposium on Analysis on marine renewable energy dynamics and marine environment dynamics, Kyushu University, 九州大学・応用力学研究所, 2011-12-17
24. 鈴木智也, 肖鋒, "GPU アクセラレータを用いたウィンドファームレイアウト最適化システムの開発", 日本流体力学学会, 第 25 回数値流体シンポジウム, CD-ROM, 大阪大, 2011-12-21
25. 都築怜理, 青木尊之, 王嫻, "複数 GPU を利用した大規模パッシブ・スカラー粒子計算の高速化", 日本流体力学学会, 第 25 回数値流体シンポジウム, CD-ROM, 大阪大, 2011-12-21
26. 黒木雅広, 青木尊之, "GPU コンピューティングによるマルチモーメント法に基づいた大規模爆風シミュレーション", 日本流体力学学会, 第 25 回数値流体シンポジウム, CD-ROM, 大阪大, 2011-12-21
27. 孫 亮, 青木尊之, "Coupled Lattice BGK モデルにより熱流体シミュレーションの GPU 加速化", 日本流体力学学会, 第 25 回数値流体シンポジウム, CD-ROM, 大阪大, 2011-12-21
28. Naoya Maruyama, Satoshi Matsuoka, "Physis: A Domain-Specific Language for FDM Code on GPU Clusters", SIAM Conference on Parallel Processing for Scientific Computing, MS42: Parallel Programming Models, Algorithms and Frameworks for Scalable Manycore Systems, Savannah, GA, USA, 2012-02-16
29. Naoya Maruyama, "Physis: An Implicitly Parallel Framework for Stencil Computations", GPU Technology Conference (GTC'12), San Jose, USA, 2012-05-19
30. 下川辺隆史, 青木尊之, 高木知弘, 山中晃徳, 額田彰, "GPU スパコン TSUBAME 2.0 によるフェーズフィールド法を用いた 2 petaflops 樹枝状凝固成長計算", 第 17 回 計算工学講演会, 京都, 2012-05-30, (<http://www.jsces.org/koenkai/17/index.htm>)
31. 小野寺直幸, 青木尊之, "GPU を用いた Local Mesh Refinement 法による LES 解析/Local mesh refinement for large eddy simulation with GPU", 第 17 回 計算工学講演会, 京都, 2012-05-30, (<http://www.jsces.org/koenkai/17/index.htm>)
32. 黒木雅広, 青木尊之, "マルチモーメント法に基づく爆風シミュレーションの大規模 GPU 計算", 第 17 回 計算工学講演会, 京都, 2012-05-30, (<http://www.jsces.org/koenkai/17/index.htm>)
33. 都築怜理, 青木尊之, 王嫻, 宮下達路, "パッシブスカラー粒子の大規模 GPU 計算", 第 17 回 計算工学講演会, 京都, 2012-05-30, (<http://www.jsces.org/koenkai/17/Program/index.html>)
34. 吉川和幸, 川井敦, 泰岡顕治, 成見哲, "GPU 仮想化による自動冗長計算システム", 第 134 回ハイパフォーマンスコンピューティング研究発表会, HPC134-6, 1-5, Tokyo, Japan, 2012-06-01



35. 星野哲也, 丸山直也, 松岡聡, "大規模流体アプリケーションの CUDA・OpenACC への移植性の評価", 2012 年並列/分散/協調処理に関する『鳥取』サマー・ワークショップ (SWoPP 鳥取 2012) 情報処理学会研究報告 Vol. 2012-HPC-135 No. 42, 鳥取市, 2012-07-07
36. 河村知輝, 丸山直也, 松岡聡, "並列ステンシル計算における通信の自動最適化に向けた性能モデルの評価", 2012 年並列/分散/協調処理に関する『鳥取』サマー・ワークショップ (SWoPP 鳥取 2012) 情報処理学会研究報告 Vol. 2012-HPC-135 No. 42, 鳥取市, 2012-07-07
37. Satori Tsuzuki, Takayuki Aoki, Takashi Shimokawabe, Wang Xian, "Passive scalar computation of billion particles on a GPU supercomputer", WCCM, Sao Paulo, 2012-07-10, (<http://www.wccm2012.com/>)
38. Takashi Shimokawabe, Takayuki Aoki, Tomohiro Takaki, Akinori Yamanaka, Akira Nukada, "Peta-scale GPU Computing of Phase-Field Simulation for Dendritic Solidification on the TSUBAME 2.0 supercomputer", The 10th WORLD CONGRESS ON COMPUTATIONAL MECHANICS (WCCM 2012), Sao Paulo, Brazil, 2012-07-11, (<http://www.wccm2012.com/>)
39. 丸山直也, "気象コード SCALE の GPU を用いた性能評価", 2012 年並列/分散/協調処理に関する『鳥取』サマー・ワークショップ (SWoPP 鳥取 2012) 情報処理学会研究報告 Vol. 2012-HPC-135 No. 42, 鳥取市, 2012-07-25
40. 中島潤, 田浦健次郎, "スケジューリング方針をカスタマイズ可能な軽量スレッド処理系の提案", 並列/分散/協調処理に関するサマー・ワークショップ (SWoPP2012), 鳥取, 2012-08-01
41. 池上克明, 田浦健次郎, "分散メモリ環境上におけるタスク並列処理系 MassiveThreads/DM に対する共有メモリ環境上での模擬評価", 並列/分散/協調処理に関するサマー・ワークショップ (SWoPP2012), 鳥取, 2012-08-01
42. 秋山茂樹, 田浦健次郎, "軽量マルチスレッディング向け大域アドレス空間ライブラリ", 並列/分散/協調処理に関するサマー・ワークショップ (SWoPP2012), 鳥取, 2012-08-01
43. 中澤隆久, 田浦健次郎, "bitonic sort の高速な並列化", 並列/分散/協調処理に関するサマー・ワークショップ (SWoPP2012), 鳥取, 2012-08-01
44. 田浦健次郎, 中島潤, 横田理央, 丸山直也, "ExaFMM のタスク並列処理系 MassiveThreads による並列化とその評価", 並列/分散/協調処理に関するサマー・ワークショップ (SWoPP2012), 鳥取, 2012-08-01
45. Ting Chen, Kenjiro Taura, "Data-Intensive Text Processing Workflows with a Parallel Database", 並列/分散/協調処理に関するサマー・ワークショップ (SWoPP2012), 鳥取, 2012-08-01
46. 中谷翔, Ting Chen, 田浦健次郎, "ワークフローアプリケーション基盤としての並列 DB の性能評価", 並列/分散/協調処理に関するサマー・ワークショップ (SWoPP2012), 鳥取, 2012-08-02
47. 堀内美希, 田浦健次郎, "ファイルアクセス履歴を用いたデータ集約的ワークフローアプリケーションの高速化", 並列/分散/協調処理に関するサマー・ワークショップ (SWoPP2012), 鳥取, 2012-08-02
48. Yousuke Ohno, Rio Yokota, Hiroshi Koyama, Gentaro Morimoto, Aki Hasegawa, Gen Masumoto, Tetsu Narumi, and Makoto Taiji, "Optimization of Molecular Dynamics Core Program on the K computer", International Conference on Simulation Technology (JSST2012), Kobe, Japan, 2012-09-12
49. Naruhiko Tan, Takayuki Aoki, Changhong Hu, Makoto Sueyoshi, "Large-Scale Simulation of Violent Flow Impacting on an Obstacle", 2nd International Conference on Violent Flows, Nantes, France, 2012-09-27,

- (<http://vf2012.sciencesconf.org>)
50. 福田圭祐, 丸山直也, Miquel Pericas, 松岡聡, “動的タスクスケジューリングエンジン StarPU による KIFMM の実装と性能評価”, 情報処理学会研究報告 Vol. 2012-HPC-136, 那覇市, 2012-10-03
  51. 都築怜理, 青木尊之,, “複数 GPU を用いた大規模粒子計算の動的負荷分散”, 第 25 回 計算力学講演会, 神戸, 2012-10-07, (<http://www.jsme.or.jp/conference/cmdconf12-2/>)
  52. 小野寺直幸, 青木尊之,, “複数 GPU による Local Mesh Refinement 法を用いたチャンネル乱流の LES 解析”, 第 25 回 計算力学講演会, 神戸, 2012-10-07, (<http://www.jsme.or.jp/conference/cmdconf12-2/>)
  53. 小野寺直幸, 青木尊之, 小林宏充, “GPU を用いた格子ボルツマン法に対するコヒーレント構造 Smagorinsky モデルの開発”, 第 25 回 計算力学講演会, 神戸, 2012-10-08, (<http://www.jsme.or.jp/conference/cmdconf12-2/>)
  54. 青木尊之, 下川辺隆史, “GPU スパコンにおけるフェーズフィールド法による樹枝状凝固成長の大規模シミュレーション”, 物性研究所 計算物質科学研究センター 第 2 回 シンポジウム, 東京大学・物性研究所(柏), 2012-10-23, ([http://www.cms-initiative.jp/ja/events/events\\_CCMS/cmsi\\_sympo10222012](http://www.cms-initiative.jp/ja/events/events_CCMS/cmsi_sympo10222012))
  55. 野村 哲弘, 遠藤 敏夫, 松岡 聡, “TSUBAME2.0 における Multi-rail InfiniBand ネットワークの性能評価”, ハイパフォーマンスコンピューティングとアーキテクチャの評価に関する北海道ワークショップ(HOKKE-20) 情報処理学会研究報告 Vol. 2012-ARC-194/HPC-137, 札幌市, 2012-12-13
  56. 頓 楠, 中島 潤, 田浦 健次朗, “Porting MassiveThreads Thread Library to FX10 Supercomputer System”, 第 194 回 ARC・第 137 回 HPC 合同研究発表会 (HOKKE-20), 北海道, 2012-12-13
  57. Tetsuya Hoshino, Naoya Maruyama, Satoshi Matsuoka, “Porting and Optimizing a Large-Scale CFD application with CUDA and OpenACC”, Society for Industrial and Applied Mathematics Conference on Computational Science and Engineering, Boston, MA, USA, 2013-02-25
  58. Naoya Maruyama, Satoshi Matsuoka, “Achieving High Performance and Portability in Stencil Computations”, Society for Industrial and Applied Mathematics Conference on Computational Science and Engineering, Boston, MA, USA, 2013-02-25
  59. 成見 哲, “GPU による大規模分子動力学シミュレーション”, 高分子計算機科学研究会, Tokyo, Japan, 2013-03-06
  60. 小野寺 直幸, “コヒーレント構造スマゴリンスキー・モデルを用いた格子ボルツマン法による東京都心部の超大規模シミュレーション”, 第 28 回生研 TSFD シンポジウム, 2013-03-08
  61. Michel Mueller, “Hybrid Fortran - New Directive Based GPGPU / CPU Framework”, GPU Technology Conference, San Jose, CA, USA, 2013-03-27
  62. 岡元太郎・竹中博士・青木尊之, “地震学における大規模・高性能 GPU 計算”, 日本地球惑星科学連合 2013 年大会, STT59-03, 千葉県幕張市, 2013-05-20, ([http://www.jpgu.org/meeting\\_2013/](http://www.jpgu.org/meeting_2013/))
  63. 岡元太郎・竹中博士・原辰彦・中村武史・青木尊之, “3 次元グリーンテンソル波形によるインバージョンで推定した 2011 年東北地方太平洋沖地震の破壊過程”, 日本地球惑星科学連合 2013 年大会, SSS35-17, 千葉県幕張市, 2013-05-23, ([http://www.jpgu.org/meeting\\_2013/](http://www.jpgu.org/meeting_2013/))
  64. 野村昂太郎, 老川稔, 川井敦, 成見哲, 泰岡顕治, “GPU を用いたレプリカ交換分子動力学シミュレーションによる Lennard-Jones 流体の固液相転移点の推定”, 第 50 回日本伝熱シンポジウム, Sendai, Japan, 2013-05-31

65. 都築怜理、青木尊之、下川辺隆史、小野寺直幸, "GPU スパコンにおける 大規模粒子法計算の動的負荷分散", 第 18 回計算工学講演会, 東京, 2013-06-19, (<http://www.jsces.org/koenkai/18/>)
66. 黄 遠雄、青木 尊之、黄 漢青, "Efficient CFD/MHD Simulation for Distributed Multi-GPU System using GPU Direct 2.0", 日本計算工学会, 東京大学生産技術研究所 (東京都目黒区駒場 4-6-1), 2013-06-19, (<http://www.jsces.org/koenkai/18/index.html>)
67. 藤山 崇紘、青木 尊之、小野寺 直幸、下川辺 隆史, "最新マルチコアにおける 圧縮性流体計算 ~GPU と MIC の比較~", 日本計算工学会, 東京大学生産技術研究所 (東京都目黒区駒場 4-6-1), 2013-06-19, (<http://www.jsces.org/koenkai/18/index.html>)
68. 都築怜理、青木尊之、下川辺隆史、小野寺直幸, "GPU による 1 億個の粒子を用いた大規模個別要素法シミュレーション", 第 18 回計算工学講演会, 東京, 2013-06-20, (<http://www.jsces.org/koenkai/18/>)
69. 老川 稔、野村 昂太郎、川井 敦、泰岡 顕治、成見 哲, "256GPU を用いたレプリカ交換分子動力学シミュレーションの高速化", 第 18 回計算工学講演会, C-5-2, Tokyo, Japan, 2013-06-20
70. 成見 哲, "GPU による大規模シミュレーションと支援ツール", 第 339 回 CBI 学会研究講演会, Tokyo, Japan, 2013-06-27
71. 星野哲也, "OpenACC の理想と現実", GPU Technology Conference Japan (GTC Japan'13), 東京, 2013-07-29
72. 中澤隆久, 田浦健次郎, "省メモリでスケーラブルなマージソートアルゴリズム", 並列/分散/協調処理に関するサマー・ワークショップ (SWoPP2013), 北九州, 2013-07-31
73. An Huynh, Jun Nakashima, Kenjiro Taura, "A Performance Analyzer for Task Parallel Applications based on Execution Time Stretches", 並列/分散/協調処理に関するサマー・ワークショップ (SWoPP2013), 北九州, 2013-07-31
74. 田浦健次郎, 中島潤, "6 種のタスク並列処理系の比較評価", 並列/分散/協調処理に関するサマー・ワークショップ (SWoPP2013), 北九州, 2013-08-01
75. 中島潤, 河野瑛, 田浦健次郎, "ワークスチーリング戦略のカスタマイズによる AMR 法の高速化", 並列/分散/協調処理に関するサマー・ワークショップ (SWoPP2013), 北九州, 2013-08-01
76. 小野寺 直幸、青木 尊之, "GPU を用いた固体粒子群を含む固気液三相流の大規模シミュレーション", 日本混相流学会・混相流シンポジウム 2013, 信州大学長野 (工学) キャンパス, 2013-08-07, (<http://www.jsmf.gr.jp/konsosymp2013/program.html>)
77. 小野寺 直幸、青木 尊之, "GPU を用いた固体粒子群を含む固気液三相流の大規模シミュレーション", 日本混相流学会混相流シンポジウム, 信州大学(長野), 2013-08-09, (<http://www.jsmf.gr.jp/konsosymp2013/>)
78. 都築怜理, 青木尊之, 下川辺隆史, "近接相互作用に基づく大規模粒子計算(個別要素法)における効率的な動的負荷分散手法の提案と GPU スパコンでの実装", 日本応用数理学会 2013 年度年会, 2, 福岡, 2013-09-09, (<http://jsiam2013.kyushu-u.ac.jp/>)
79. 小野寺 直幸、青木 尊之、下川辺 隆史, "GPU を用いた格子ボルツマン法による大規模流体・構造連成解析", 日本流体力学会年会 2013, 東京農工大学, 2013-09-12, (<http://www2.nagare.or.jp/nenkai2013/>)
80. S. Tsuzuki, T. Aoki and T. Shimokawabe, "A Large-scale Particle Simulations based on Dynamic Load Balance on a GPU-rich Supercomputer", Third Conference on Particle-Based Methods PARTICLES 2013, Stuttgart, Germany,

- 2013-09-18, (<http://congress.cimne.com/particles2013/frontal/default.asp>)
81. 都築怜理、青木尊之, "GPU で演算加速された 1 億個の粒子による大規模粉体シミュレーション", 粉体工学会 2013 年度秋期研究発表会, 2, 大阪, 2013-10-09, (<http://www.sptj.jp/akiprogram.html>)
  82. 野澤拓磨, 高橋和義, 成見哲, 泰岡頭治, "5CB 液晶の秩序化における静電相互作用の影響", 日本機械学会熱工学コンファレンス 2013, G134, Hirosaki, Japan, 2013-10-19
  83. 岡本成史, 山中晃徳, 下川辺隆史, 青木尊之, "多結晶粒成長の大規模マルチフェーズフィールドシミュレーション ~GPU スパコン SUBAME 2.0 への実装~, 日本機械学会・第 26 回計算力学講演会, 佐賀, 2013-11-02, (<http://www.jsme.or.jp/conference/cmdconf13/index.html>)
  84. 小野寺直幸, 青木尊之, 下川辺隆史, "GPU を用いた格子ボルツマン法による流体構造連成のラージエディ・シミュレーション", 日本機械学会・第 26 回計算力学講演会, 佐賀, 2013-11-02, (<http://www.jsme.or.jp/conference/cmdconf13/index.html>)
  85. 黄遠雄, 青木尊之, 黄漢青, "Large-scale 3D MHD simulation on GPU-rich supercomputer TSUBAME", 日本機械学会・第 26 回計算力学講演会, 佐賀, 2013-11-02, (<http://www.jsme.or.jp/conference/cmdconf13/index.html>)
  86. 下川辺隆史, 青木尊之, 小野寺直幸, "気象計算コードのための GPU コンピューティング・フレームワーク", 日本機械学会・第 26 回計算力学講演会, 佐賀, 2013-11-02, (<http://www.jsme.or.jp/conference/cmdconf13/index.html>)
  87. 都築怜理, 青木尊之, "GPU スパコンを用いた大規模 DEM シミュレーションによる粉体の攪拌解析", 日本機械学会・第 26 回計算力学講演会, 佐賀, 2013-11-02, (<http://www.jsme.or.jp/conference/cmdconf13/index.html>)
  88. S. Tsuzuki and T. Aoki, "Large-scale Particle Simulations using Dynamic Load Balance on TSUBAME 2.0 Supercomputer", Proceedings of the 5th Asia Pacific Congress on Computational Mechanics and 4th International Symposium on Computational, Singapore, 2013-12-11, (<http://www.apcom2013.org/>)
  89. Naoyuki Onodera, Takayuki Aoki, Takashi Shimokawabe, Tatsuji Miyashita, and Hiromichi Kobayashi, "Large-Eddy Simulation of Fluid-Structure Interaction using Lattice Boltzmann Method on Multi-GPU Clusters", Proceedings of the 5th Asia Pacific Congress on Computational Mechanics and and 4th International Symposium on Computational, Singapore, 2013-12-11, (<http://www.apcom2013.org/>)
  90. Takashi Shimokawabe, Takayuki Aoki, and Naoyuki Onodera, "A High-productivity Framework for Weather Prediction Code on Multi-GPU Computing", Proceedings of the 5th Asia Pacific Congress on Computational Mechanics and and 4th International Symposium on Computational, Singapore, 2013-12-11, (<http://www.apcom2013.org/>)
  91. Takashi Shimokawabe, Takayuki Aoki and Naoyuki Onodera, "Scalability model for multi-GPU computation of stencil applications using regular structured meshes with explicit time integration", 第 189 回 ARC・第 132 回 HPC 合同研究発表会 (HOKKE-19), 北海道大学, 2013-12-16
  92. 小野寺直幸、青木尊之、下川辺隆史、宮下達治, "TSUBAME の GPU を用いた格子ボルツマン法による 東京都心部の大規模気流シミュレーション", 第 27 回数値流体力学シンポジウム, 名古屋大学, 2013-12-19, (<http://www2.nagare.or.jp/cfd/cfd27/>)
  93. 黄遠雄(東工大) 青木尊之(東工大) 黄漢青(MUST), "Efficient large scale MHD simulations: 3D OT vortex and Solar Wind - Earth interaction using

- distributedmulti-GPU system”, 第 27 回数値流体力学シンポジウム, 名古屋大学, 2013-12-19, (<http://www2.nagare.or.jp/cfd/cfd27/>)
94. Takashi Shimokawabe, Takayuki Aoki and Naoyuki Onodera, “A High-productivity Framework for Multi-GPU computation of Mesh-based applications”, HiStencil, Vienna, Austria, 2014-01-21, (<http://www.exastencils.org/histencils/>)
  95. Mohamed Attia Wahib, Naoya Maruyama, “Scalable Kernel Fusion for Memory-Bound GPU Applications”, SIAM Conference on Parallel Processing, MS 49: Parallel Methods and Algorithms for Extreme Computing, Portland, OR, 2014-02-20
  96. 星野哲也, 丸山直也, 松岡聡, “CPU-GPU それぞれに最適なデータレイアウトを選択可能にする OpenACC ディレクティブ拡張”, 情報処理学会研究報告ハイパフォーマンスコピューティング(HPC), 2014-HPC-145, 2014-03-03
  97. 松田元彦, 丸山直也, 滝澤真一郎, “Xeon Phi (Knights Corner) の性能特性とステンシル計算の評価”, 情報処理学会研究報告ハイパフォーマンスコピューティング(HPC), 2014-HPC-145, 2014-03-04
  98. 河村知輝, 丸山直也, 松岡聡, “自動テンポラルブロッキングによる大規模ステンシル計算の実現”, 情報処理学会研究報告ハイパフォーマンスコピューティング(HPC), 2014-HPC-145, 2014-03-04
  99. Naoya Maruyama and Toshio Endo, “Locality Optimizations for Stencil Computations: Algorithms and Implementations”, Workshop on Programming Abstractions for Data Locality (PADAL), Lugano, CH, 2014-04-28
  100. Naoyuki Onodera and Takayuki Aoki, “Peta-scale large-eddy simulation using lattice Boltzmann method on the TSUBAME supercomputer”, KSME-JSME Joint Symposium on Computational Mechanics & CAE 2014 at JEJU, JEJU, Korea, 2014-05-01, (<http://www.jsces.org/Overview/Award/index.html>)
  101. 都築怜理, 青木尊之, “GPU スパコンを用いたバンカーショットの大規模DEM計算”, 粉体工学会 2014 年度春期研究発表会, 2, 京都, 2014-05-30, (<http://www.sptj.jp/haru.html>)
  102. 下川辺隆史, 青木尊之, 小野寺直幸, “GPU コンピューティング・フレームワークを用いた気象計算コードの開発”, 日本計算工学会・第 19 回計算工学講演会, 広島, 2014-06-11, (<http://www.jsces.org/koenkai/19/>)
  103. Un-Hong Wong, Takayuki Aoki, Hon-Cheng Wong, “Large-scale Global MHD Simulation and Visualization for Solar Wind Magnetosphere Interaction on TSUBAME 2.5”, 日本計算工学会 第 19 回計算工学講演会, 広島, 2014-06-11
  104. 都築怜理, 青木尊之, “GPU による大規模粒子法シミュレーションの実問題への適用”, 日本計算工学会 第 19 回計算力学講演会, 2, 広島, 2014-06-11, (<http://www.jsces.org/koenkai/19/>)
  105. 小野寺直幸, 青木尊之, 下川辺隆史, “複数 GPU を用いた格子ボルツマン法による卓球競技のピンポン玉のシミュレーション”, 日本計算工学会・第 19 回計算工学講演会, 広島, 2014-06-12, (<http://www.jsces.org/koenkai/19/>)
  106. 都築怜理, 青木尊之, “GPU スパコンによる大規模粒子法 (DEM, SPH) シミュレーション”, 第 6 回アクセラレーション技術発表討論会, 沖縄, 2014-06-20, (<http://icd-ieice-jp.com/modules/bulletin/index.php?page=article&storyid=13>)
  107. 小野寺直幸, 青木尊之, 下川辺隆史, 小林宏充, “複数 GPU を用いた格子ボルツマン法による大規模流体・構造連成解析 —卓球競技におけるピンポン玉の軌道の解析—”, 学術大規模情報基盤共同利用・共同研究拠点 第6回シンポジウム, 東京, 2014-07-10, (<http://jhpcn-kyoten.itc.u-tokyo.ac.jp/sympo/6th/>)
  108. Naoyuki Onodera, Takayuki Aoki, “Large-eddy simulation of turbulent flow around a car body using lattice Boltzmann method on the TSUBAME supercomputer”,

- 11th. World Congress on Computational Mechanics (WCCM XI), Barcelona, Spain, 2014-07-20, (<http://www.wccm-eccm-ecfd2014.org/frontal/default.asp>)
109. Satori Tsuzuki, Takayuki Aoki, "large-scale particle simulations using dynamic load balance on GPU supercomputer", 11th. World Congress on Computational Mechanics (WCCM XI), Barcelona, Spain, 2014-07-24, (<http://www.wccm-eccm-ecfd2014.org/frontal/default.asp>)
110. 星野哲也, 丸山直也, 松岡聡, "OpenACC デイレクティブ拡張によるデータレイアウト最適化", 情報処理学会研究報告, Vol. 2014-HPC-145 (SWoPP 2014), 新潟, 2014-07-28
111. Keisuke Fukuda, Naoya Maruyama, Jeremy S. Meredith, Jeffrey S. Vetter, Satoshi Matsuoka, "Performance Modeling of a Hierarchical N-body Algorithm for Arbitrary Particle Distribution", IPSJ SIG Technical Report, Vol. 2014-HPC-145 (SWoPP 2014), Niigata, 2014-07-28
112. 老川稔, 野村昂太郎, 泰岡顕治, 成見哲, "GPU 仮想化による耐故障性を考慮した分子動力学シミュレーション", SWoPP2014, Niigata, 2014-07-30
113. Takashi Shimokawabe, "A High-productivity Framework on GPU-rich Supercomputers for Mesh-based applications", Workshop on HPC and Cloud Accelerators, 神戸, 2014-08-26, (<http://mt.aics.riken.jp/events/workshop-on-hpc-and-cloud-accelerators/>)
114. Jun Nakashima, "MassiveThreads: A Thread Library for Efficient Intra-node Task Parallelism", CREST-ECRC workshop in King Abdullah University of Science and Technology, Thuwal, Saudi Arabia, 2014-09-03
115. Kenjiro Taura, An Huynh, Miquel Pericas, and Jun Nakashima, "DAG Recorder: A Portable Task-Centric Analyzer for Task Parallel Applications", CREST-ECRC workshop in King Abdullah University of Science and Technology, Thuwal, Saudi Arabia, 2014-09-03
116. Takayuki Aoki, "Stencil Applications with AMR based on Space-Filling Curve for GPU computing", KAUST the CREST-ECRC workshop(KAUST Invited Lecture), KAUST(King Abdullah University of Science and Technology), Thuwal, Saudi Arabia, 2014-09-04, (<http://cec.kaust.edu.sa/Pages/crest.aspx>)
117. Takashi Shimokawabe, "High-productivity Framework on GPU-rich Supercomputers for Weather Prediction Code", KAUST the CREST-ECRC workshop(KAUST Invited Lecture), KAUST(King Abdullah University of Science and Technology), Thuwal, Saudi Arabia, 2014-09-04, (<http://cec.kaust.edu.sa/Pages/crest.aspx>)
118. 小野寺直幸, 青木尊之, 下川辺隆史, 杉原健太, 宮下達治, 泉田康太, "GPU を用いた大規模アプリケーションの最適化および可視化", 日本原子力学会「2014年秋の大会」、計算科学技術部門企画セッション「解析結果可視化の最前線」, 京都, 2014-09-08, ([http://www.aesj.or.jp/meeting/2014f/j/J14Fall\\_TOP.html](http://www.aesj.or.jp/meeting/2014f/j/J14Fall_TOP.html))
119. 杉原健太, 小野寺直幸, 青木尊之, "格子法による気液二相流の GPU スパコンを用いた大規模シミュレーション -粒子法と同じ自由度で直接比較-", ワークショップ 自由表面や気液界面を含む流れの数値解析 -粒子法と格子法, 数理と実践 -, 博多, 2014-09-10, (<http://pbm2014.math.kyushu-u.ac.jp/>)
120. 都築怜理, 青木尊之, "動的負荷分散による粒子法(SPH/DEM)の大規模シミュレーション -GPU スパコンでの実装と性能-", ワークショップ 自由表面や気液界面を含む流れの数値解析 -粒子法と格子法, 数理と実践 -, 博多, 2014-09-10, (<http://pbm2014.math.kyushu-u.ac.jp/>)
121. 小野寺直幸, 青木尊之, 泉田康太, "格子ボルツマン法を用いたピンポン玉の運動の大規模ラージエディ・シミュレーション", 日本流体力学会年会 2014, 仙台,

- 2014-09-16, (<http://www2.nagare.or.jp/nenkai2014/>)
122. 小野寺直幸、青木尊之、泉田康太, “ピンポン玉の運動のスパコンによる大規模流体構造連成解析”, 第 92 期 日本機械学会流体工学部門, 富山, 2014-10-26, (<http://www2.nagare.or.jp/nenkai2014/>)
  123. Naoya Maruyama, Takayuki Aoki, Kenjiro Taura, Kenji Yasuoka, “Highly Productive, High Performance Application Frameworks for Post Petascale Computing”, Japanese Research Toward Next-Generation Extreme Computing, New Orleans, LA, 2014-11-17
  124. 都築怜理、青木尊之, “GPU スパコンにおける動的負荷分散を用いた粒子法による大規模流体シミュレーション”, 日本機械学会 第 27 回計算力学講演会, 盛岡, 2014-11-22, (<http://www.jsme.or.jp/conference/cmdconf14/>)
  125. 小野寺直幸、青木尊之、泉田康太, “ピンポン玉の乱流中での浮遊の大規模流体構造連成解析”, 日本機械学会 第 27 回計算力学講演会, 盛岡, 2014-11-24, (<http://www.jsme.or.jp/conference/cmdconf14/>)
  126. Kenjiro Taura, Jun Nakashima, Shigeki Akiyama, and Wataru Endo, “A Common Runtime System for Hierarchical and Dynamically Load-Balancing Applications”, JST/CREST International Symposium on Petascale System Software, Kobe, Japan, 2014-12-03
  127. Naoya Maruyama, “High Performance and Highly Productive Stencil Framework for GPU Accelerators”, JST/CREST International Symposium on Post Petascale System Software, Kobe, 2014-12-04
  128. Takayuki Aoki, “Large-scale Stencil and Particle Applications and Their Performances on a GPU supercomputer”, JST/CREST International Symposium on Post Petascale System Software, Kobe, Japan, 2014-12-04, (<http://wallaby.aics.riken.jp/isp2s2/program/thursday.html>)
  129. 杉山暁洋、青木尊之、本多潔, “インド洋に面した地域の津波ハザード・シミュレーション II -高精度スキームによる遡上シミュレーション-”, 第 28 回数値流体力学シンポジウム, 東京(船堀タワーホール), 2014-12-09, (<http://www2.nagare.or.jp/cfd/cfd28/>)
  130. 泉田康太、青木尊之、小野寺直幸、杉原健太、中島聖、本郷均、横畑 英明, “流入・流出を伴う気液二相が存在する容器内における気泡挙動の解析”, 第 28 回数値流体力学シンポジウム, 東京(船堀タワーホール), 2014-12-09, (<http://www2.nagare.or.jp/cfd/cfd28/>)
  131. Marlon Arce Acuña, Takayuki Aoki, Kiyoshi Honda, “Tsunami Hazard Simulation in Indian Ocean Coasts I - Wide-area Simulation with Fine Mesh Adaptation -”, 第 28 回数値流体力学シンポジウム, 東京(船堀タワーホール), 2014-12-09, (<http://www2.nagare.or.jp/cfd/cfd28/>)
  132. 杉原健太、青木尊之、内山久和, “垂直軸型風車付き津波避難タワーの解析 I - VOF ベース大規模シミュレーションによる津波衝撃圧の評価 -”, 第 28 回数値流体力学シンポジウム, 東京(船堀タワーホール), 2014-12-09, (<http://www2.nagare.or.jp/cfd/cfd28/>)
  133. 都築怜理、青木尊之, “GPU スパコンにおける動的負荷分散を用いた粒子法による大規模流体シミュレーション”, 第 28 回数値流体力学シンポジウム, 東京(船堀タワーホール), 2014-12-10, (<http://www2.nagare.or.jp/cfd/cfd28/>)
  134. 長谷川雄太、青木尊之、小野寺直幸, “格子細分化を導入した D3Q27 格子ボルツマン法の GPU 実装”, 第 28 回数値流体力学シンポジウム, E08-3, 東京(船堀タワーホール), 2014-12-10, (<http://www2.nagare.or.jp/cfd/cfd28/>)
  135. 藤山 崇紘、青木 尊之, “適合細分化格子を用いた複数 GPU による圧縮性流体計算”, 第 28 回数値流体力学シンポジウム, 東京(船堀タワーホール),

- 2014-12-10, (<http://www2.nagare.or.jp/cfd/cfd28/>)
136. 下川辺隆史、青木尊之、小野寺直幸, “ステンシル計算のための GPU コンピューティング・フレームワークのチューニング高度化”, 第 205 回 ARC・第 147 回 HPC 合同研究発表会 ( HOKKE-22 ), 小樽, 2014-12-10, (<http://www.ipsj.or.jp/kenkyukai/event/arc205hpc147.html>)
  137. 渡辺勢也、青木尊之、都築怜理、下川辺隆史, “GPU による近接相互作用に基づく粒子計算の近傍探索手法”, 第 205 回 ARC・第 147 回 HPC 合同研究発表会 (HOKKE-22), 小樽, 2014-12-10, (<http://sigarc.ipsj.or.jp/mtg/fy2014/arc205/>)
  138. 下川辺隆史、青木尊之、小野寺直幸, “GPU スパコンによる格子に基づいたシミュレーションのための GPU コンピューティング・フレームワーク”, AXIES 大学 ICT 推進協議会 2014 年度年次大会, 仙台, 2014-12-12, (<http://axies.jp/ja/conf/2014/z8ymqr>)
  139. 藤山 崇紘、青木 尊之, “7 点ステンシル計算(拡散方程式)に対する GPU と MIC の実行性能比較”, 首都大学東京ミニ研究環ワークショップ「メニーコアシステムにおける格子アプリケーション-GPU と MIC の実行性能比較-」, 首都大学東京秋葉原サテライトキャンパス, 2014-12-12, (<http://www.comp.tmu.ac.jp/manycore/>)
  140. Johan Hysing, “A Stencil Based Finite Element Method”, ICCP9 - 9th International Conference on Computational Physics, Singapore, 2015-01-08, (<http://www.physics.nus.edu.sg/iccp9/>)
  141. Takayuki Aoki, “Large-scale stencil and particle applications and their performances on a GPU supercomputer”, Workshop on Recent Advances in Parallel and High Performance Computing Techniques and Applications, Singapore, 2015-01-15, (<http://www2.ims.nus.edu.sg/Programs/015hiper/wk.php>)
  142. Tetsuya Hoshino, Naoya Maruyama, Satoshi Matsuoka, “Evaluations of Directive Based Programming Model for GPUs and Extensions for Performance Portability”, SIAM Conference on Computational Science and Engineering, Salt Lake City, USA, 2015-03-14
  143. Johan Hysing, “A Stencil Based Finite Element Method”, SIAM CSE15 - 2015 Conference on Computational Science and Engineering, Salt Lake City, USA, 2015-03-18, (<http://www.siam.org/meetings/cse15/>)
  144. 渡辺勢也、青木尊之、都築怜理, “非球形粒子を用いた個別要素法による大規模粉体シミュレーション”, 粉体工学会・2015 年度春期研究発表会, 東京(連合会館@神田駿河台), 2015-05-19, (<http://www.sptj.jp/haru.html>)
  145. 都築怜理、青木尊之, “サスペンション・フローの超大規模シミュレーション”, 粉体工学会 2015 年度春期研究発表会, 連合会館 (東京都千代田区神田駿河台 3-2-11), 2015-05-20, (<http://www.sptj.jp/haru.html>)
  146. Naoya Maruyama, “Domain-Specific Approaches in Scientific Computing”, Platform for Advanced Scientific Computing Conference (PASC'15), Zurich, Switzerland, 2015-06-01
  147. 下川辺隆史, “ステンシル計算のための高生産 GPU コンピューティング・フレームワークの高度化”, 第 20 回計算工学講演会, つくば国際会議場, 2015-06-08, (<http://www.jsces.org/koenkai/20/program.html>)
  148. 泉田康太、青木尊之、小野寺直幸、杉原健太、中島聖、本郷均、横畑 英明, “複数 GPU を用いた気液分離装置のシミュレーション”, 第 20 回計算工学講演会, つくば国際会議場, 2015-06-08, (<http://www.jsces.org/koenkai/20/>)
  149. 渡辺勢也、青木尊之、都築怜理、下川辺隆史, “GPU を用いた個別要素法計算における近傍探索手法の比較評価”, 第 20 回計算工学講演会, つくば国際会議場 (つくば), 2015-06-08, (<http://www.jsces.org/koenkai/20/index.html>)
  150. 長谷川雄太、青木尊之、小野寺直幸, “格子ボルツマン法における適合細分化格子



- の GPU 実装”, 第 20 回計算工学講演会, E-4-6, つくば国際会議場, 2015-06-08, (<http://www.jsces.org/>)
151. 都築怜理, 青木尊之, “GPU スパコンにおける動的負荷分散を用いた大規模流体構造連成シミュレーション”, 第 20 回計算工学講演会, E-4-6, つくば国際会議場, 2015-06-08, (<http://www.jsces.org/>)
  152. 杉山暁洋, 青木尊之, 本多潔, “浅水波方程式の高精度スキームによる安定な遡上シミュレーション”, 第 20 回計算工学学会, つくば国際会議場, 2015-06-08
  153. 杉原健太, 青木尊之, 内山久和, “垂直軸型風車付き津波避難タワーに対する津波波圧の数値解析”, 第 20 回計算工学講演会, A-3-3 (CD-ROM), つくば国際会議場, 2015-06-09, (<http://www.jsces.org/koenkai/20/>)
  154. 岡本 成史, 山中 晃徳, 下川辺 隆史, 青木 尊之, “多結晶粒成長過程における析出物によるピンニングの大規模マルチフェーズフィールドシミュレーション”, 第 20 回計算工学講演会, つくば国際会議場, 2015-06-10, (<http://www.jsces.org/koenkai/20/program.html>)
  155. 坂根 慎治, 高木 知弘, 大野 宗一, 澁田 靖, 下川辺 隆史, 青木 尊之, “Phase-field 格子ボルツマン法による対流内でのデンドライト成長の大規模 3D 計算”, 第 20 回計算工学講演会, つくば国際会議場, 2015-06-10, (<http://www.jsces.org/koenkai/20/program.html>)
  156. S.Tsuzuki and T.Aoki, “Large-scale SPH Simulations using Dynamic Load Balance on a GPU Supercomputer”, Computational Methods in Marine Engineering (Marine 2015), National Research Council(CNR): Piazzale Aldo Moro, 7 00185, Rome, Italy, 2015-06-15, (<http://congress.cimne.com/marine2015/frontal/default.asp>)
  157. 渡辺勢也, 青木尊之, 都築怜理, “接触相互作用に基づく粒子法の GPU 計算におけるメモリアクセスの改善による高速化”, 第 149 回ハイパフォーマンスコンピューティング研究発表会, 工学院大学(東京), 2015-06-26, (<https://www.ipsj.or.jp/kenkyukai/event/hpc149.html>)
  158. 長谷川雄太, 青木尊之, “ステンシル計算の高速化のための C++テンプレートによる GPU カーネル生成”, 情報処理学会第 149 回ハイパフォーマンスコンピューティング研究会, 工学院大学(新宿), 2015-06-26, (<https://www.ipsj.or.jp/kenkyukai/event/hpc149.html>)
  159. 下川辺隆史, “マルチ GPU コンピューティング・フレームワークを用いた高精度気象計算コードの開発”, 学際大規模情報基盤共同利用・共同研究拠点 第 7 回シンポジウム, 品川(THE GRAND HALL、東京都港区港南 2-16-4 品川グランド セン ト ラ ル タ ワ ー 3F ) , 2015-07-09, (<http://jhpcn-kyoten.itc.u-tokyo.ac.jp/sympo/7th/>)
  160. 青木尊之, “動的負荷分散による GPU スパコンを用いた粒子法の大規模シミュレーション手法の開発”, 学際大規模情報基盤共同利用・共同研究拠点第 7 回シンポジウム, THE GRAND HALL(品川), 2015-07-10, (<http://jhpcn-kyoten.itc.u-tokyo.ac.jp/sympo/8th/>)
  161. 丸山直也, Hamid Reza Zohouri, 松田元彦, 松岡 聡, “OpenCL による FPGA の予備評価”, 情報処理学会研究報告 Vol. 2015-HPC-150, 1--5, 別府国際コンベンションセンター, 2015-07-28
  162. Takayuki Aoki, Satori Tsuzuki, Seiya Watanabe, “Large-Scale Suspension Flow Simulations Using a Particle Method on a GPU Supercomputer”, 13th US National Congress on Computational Mechanics, San Diego, USA, 2015-07-28, (<http://submissions.usnccm.org/schedule/1313/>)
  163. 野村 哲弘 佐々木 淳 三浦 信一 遠藤 敏夫 松岡 聡, “TSUBAME2 におけるスケジュール効率化への取り組みとユーザ動向の見える化”, 情報処理学会研究報告 Vol. 2015-HPC-150, 1--6, 別府国際コンベンションセンター,

2015-08-04

164. An Huynh, Douglas Thain, Miquel Pericas, and Kenjiro Taura, "Analyzing Task Parallel Program Traces based on DAG Visualization", 2015 年並列／分散／協調処理に関する『別府』サマー・ワークショップ (SWoPP 別府 2015), 別府、大分, 2015-08-06
165. 石川 康貴, 田浦 健次郎, "高速な Property Path クエリ検索を可能にする SPARQL 処理系", 2015 年並列／分散／協調処理に関する『別府』サマー・ワークショップ (SWoPP 別府 2015), 別府、大分, 2015-08-06
166. 岩崎 慎太郎, 田浦 健次郎, "タスク並列プログラムの効果的なカットオフ閾値の決定", 2015 年並列／分散／協調処理に関する『別府』サマー・ワークショップ (SWoPP 別府 2015), 別府、大分, 2015-08-06
167. 遠藤 亘, 田浦 健次郎, "再配置可能な大域アドレス空間システムの設計と RDMA を用いた実装", 2015 年並列／分散／協調処理に関する『別府』サマー・ワークショップ (SWoPP 別府 2015), 別府、大分, 2015-08-06
168. 島津 真人, 田浦 健次郎, "AMFS: アトミックなデータ永続化を備えた次世代不揮発性メモリ向けファイルシステム", 2015 年並列／分散／協調処理に関する『別府』サマー・ワークショップ (SWoPP 別府 2015), 別府、大分, 2015-08-06
169. Shigeyuki Sato and Kenjiro Taura, "Abstraction of Space Partitioning for Spatial Computation", 2015 年並列／分散／協調処理に関する『別府』サマー・ワークショップ (SWoPP 別府 2015), 別府、大分, 2015-08-06
170. 下川辺 隆史, 青木 尊之, 小野寺 直幸, "自動チューニング機構の導入によるステンシル計算のための GPU コンピューティング・フレームワークの高度化", 日本応用数理学会 2015 年度年会, 金沢大学(金沢), 2015-09-11, (<http://annual2015.jsiam.org/program>)
171. Ahmad Nurul Huda, 神田学, 小野寺直幸, 青木尊之, 八木 綾子, "LBM を用いた中立都市大気境界層の相似性の検討", 日本流体力学会 年会 2015, 東京工業大学, 2015-09-26, (<http://www2.nagare.or.jp/nenkai2015/index.html>)
172. Seiya Watanabe, Takayuki Aoki, Satori Tsuzuki, "Large-scale DEM Simulations using Non-spherical Elements on GPU", PARTICLES2015, Barcelona, Spain, 2015-09-28, (<http://congress.cimne.com/particles2015/frontal/default.asp>)
173. Satori Tsuzuki and Takayuki Aoki, "Large-scale Particle-based Simulations for Granular and Fluid Dynamics using Dynamic Load Balance on a GPU supercomputer", PARTICLES2015, Barcelona, Spain, 2015-09-29, (<http://congress.cimne.com/particles2015/frontal/default.asp>)
174. 岡元成史, 山中晃徳, 下川辺隆史, 青木尊之, "可動分散粒子によるピンニングを考慮した多結晶粒成長の 3 次元マルチフェーズフィールドシミュレーション", 第 28 回 計算力学講演会, 横浜国立大学, 2015-10-10, (<http://www.jsme.or.jp/conference/cmdconf15/index.html>)
175. 高木知弘, 坂根慎治, Rojas Roberto, 大野宗一, 澁田靖, 下川辺隆史, 青木尊之, "液相流動を伴うデンドライト成長の大規模 phase-field lattice Boltzmann シミュレーション", 第 28 回 計算力学講演会, 横浜国立大学, 2015-10-10, (<http://www.jsme.or.jp/conference/cmdconf15/index.html>)
176. 長谷川雄太, 青木尊之, "適合細分化格子 LBM による複雑形状物体周りの流れの LES 計算", 第 28 回 計算力学講演会, 横浜国立大学, 2015-10-10, (<http://www.jsme.or.jp/conference/cmdconf15/index.html>)
177. 渡辺勢也, 青木尊之, 都築怜理, "GPU による実形状粉粒体モデルを用いた大規模 DEM シミュレーション", 日本機械学会 第28回計算力学講演会 (CMD2015), 横浜国立大学(横浜), 2015-10-11, (<http://www.jsme.or.jp/conference/cmdconf15/>)

178. Takayuki Aoki, Satori Tsuzuki, Yuta Hasegawa, "Dynamic domain decomposition using space-filling curves for large-scale computational mechanics applications", IWACOM-III (the 1st International Workshops on Advances in Computational Mechanics ), 東京 , KFC Hall & Rooms( 両国 ), 2015-10-13, (<http://tsys.jp/iwacom/2015/program/OW4-1.html>)
179. Takashi Shimokawabe, Takayuki Aoki and Naoyuki Onodera, "Advanced High-productivity Framework for Stencil Applications on GPU Supercomputers", 3rd International Workshops on Advances in Computational Mechanics, KFC Hall & Rooms、両国、東京、2015-10-14, (<http://www.jsces.org/IWACOM/>)
180. 渡辺勢也、青木尊之、長谷川雄太, "LBM-DEM 固液二相流の GPU 計算", 第 29 回数値流体力学シンポジウム, 九州大学 筑紫キャンパス, 2015-12-15, (<http://www2.nagare.or.jp/cfd/cfd29/>)
181. 長谷川雄太、青木尊之、小林宏充, "Octree 細分化格子を導入した格子ボルツマン法による乱流の GPU 計算", 第 29 回数値流体力学シンポジウム, C08-2, 九州大学筑紫キャンパス, 2015-12-16, (<http://www2.nagare.or.jp/cfd/cfd29/>)
182. Hamid Reza Zohouri, Naoya Maruyama, Aaron Smith, Motohiko Matsuda, Satoshi Matsuoka, "Optimizing the Rodinia Benchmark for FPGAs", 情報処理学会研究報告 Vol. 2016-HPC-152, 札幌, 2015-12-17
183. Un-Hong Wong, Takayuki Aoki, "Advanced GPU Direct-MPI Hybrid Framework with Block-Based Data Structure for Efficient AMR on Multi-GPU Systems", 第 29 回数値流体力学シンポジウム, 九州大学 筑紫キャンパス, 2015-12-17
184. Takashi Shimokawabe, "High-resolution Weather Prediction Code based on High-productivity Framework for Multi-GPU computation", 2nd Annual Meeting on Advanced Computing System and Infrastructure (ACSI2016), 九州大学医学部百年講堂, 2016-01-19, ([http://acsi.hpcc.jp/2016/program\\_VLNC.html.ja](http://acsi.hpcc.jp/2016/program_VLNC.html.ja))
185. Takayuki Aoki, "Large-scale Complex Flow Simulations on a GPU Supercomputer", KAUST-GSIC Symposium on Hierarchical Solvers for Complex Flow Simulation, King Abdullah University of Science and Technology (Saudi Arabia), 2016-02-28, (<https://ecrc.kaust.edu.sa/Pages/News-gsic.aspx>)
186. Un-Hong Wong, Takayuki Aoki, "Advanced GPU Direct-MPI Hybrid Framework for Efficient CFD/MHD Simulations with AMR on Multi-GPU Systems", KAUST-GSIC Symposium on Hierarchical Solvers for Complex Flow Simulation, King Abdullah University of Science and Technology (Saudi Arabia), 2016-02-28, (<https://ecrc.kaust.edu.sa/Pages/News-gsic.aspx>)
187. Kenta Sugihara, "Two Phase Flow Simulation Based on the Interface-tracking Method on Multi-GPU Cluster", KAUST-GSIC Symposium on Hierarchical Solvers for Complex Flow Simulation, King Abdullah University of Science and Technology (Saudi Arabia), 2016-02-28, (<https://ecrc.kaust.edu.sa/Pages/News-gsic.aspx>)
188. 福田圭祐, 松田元彦, 丸山直也, 横田理央, 田浦健次朗, 松岡聡, "階層的多次体問題向けプログラミングフレームワーク Tapas", 情報処理学会研究報告 Vol. 2016-HPC-153, 松山, 2016-03-02
189. Kenta Sugihara, Takayuki Aoki, "Numerical study on the tsunami impact pressure for structures using a VOF-based two-phase solver on a GPU supercomputer", Violent Flows 2016, I-site Namba, Osaka, Japan, 2016-03-09, (<http://violentflows2016.naoe.eng.osaka-u.ac.jp/programevent.html>)
190. Satori Tsuzuki and Takayuki Aoki, "Large-scale Particle-based Simulations for Debris Flows using Dynamic Load Balance on a GPU Supercomputer", Violent Flows 2016, I-site Namba, Osaka, Japan, 2016-03-10,

(<http://violentflows2016.naoe.eng.osaka-u.ac.jp/>)

③ ポスター発表 (国内会議 25 件、国際会議 21 件)

1. 福田 圭祐, 丸山 直也, 松岡 聡, "CPU/GPU ヘテロジニアス環境における FMM の最適化", SACSIS2011 - 先進的計算基盤システムシンポジウム, 秋葉原, 2011-05-26
2. 中島潤, 田浦健次朗, "適合格子細分化法による細粒度マルチスレッドライブラリの評価", 先進的計算基盤システムシンポジウム(SACSIS)2011, 東京, 2011-05-26
3. 福田 圭祐, 丸山 直也, 松岡 聡, "CPU/GPU ヘテロジニアス環境における FMM の最適化", GTC Workshop Japan 2011, 六本木, 2011-07-22
4. 小野寺直幸, 吉田啓之, 高瀬和之, 青木尊之, "複数 GPU を用いた複雑物体周りの乱流のラージエディ・シミュレーション解析", GTC Workshop Japan 2011, 東京・六本木, 2011-07-22
5. Xian Wang, Takayuki Aoki, Satori Tsuzuki, "Numerical Simulation on the Air Flow in an Urban City by Lattice Boltzmann Method using Multi-Node GPU Cluster", GTC Workshop Japan 2011, 東京・六本木, 2011-07-22
6. Takashi Shimokawabe, Takayuki Aoki, Tomohiro Takaki, and Akinori Yamanaka, "Multi-GPU Computing of Large Scale Phase-Field Simulation for Dendritic Solidification on TSUBAME 2.0", GTC Workshop Japan 2011, 東京・六本木, 2011-07-22
7. Aleksandr Drozd, Naoya Maruyama, Satoshi Matsuoka, "Fast GPU Read Alignment with Burrows Wheeler Transform Based Index", Proceedings of the 2011 ACM/IEEE conference on Supercomputing (SC'11), Seattle, WA, USA, 2011-11-15
8. 平塚将起, 大村亮, 泰岡顕治, "アルコールハイドレート的第一原理分子動力学シミュレーション", 第 25 回分子シミュレーション討論会, 東京, 2011-12-05
9. 星野哲也, 丸山直也, 松岡聡, "大規模流体アプリケーションの GPU による高速化手法の評価", 先進的計算基盤システムシンポジウム, 神戸市, 2012-05-16
10. 河村知輝, 丸山直也, 松岡聡, "Physis フレームワークにおける性能モデルに基づく通信の自動最適化に向けて", 先進的計算基盤システムシンポジウム, 神戸市, 2012-05-16
11. Akihiro Nomura, Yutaka Ishikawa, Naoya Maruyama, Satoshi Matsuoka, "Implementation of Efficient Non-blocking Collective Communication Framework", HPC in Asia Workshop, Hamburg, Germany, 2012-06-17
12. 野村昂太郎, 老川稔, 川井敦, 成見哲, 泰岡顕治, "GPU を用いたレプリカ交換分子動力学シミュレーションの高速化", 第 26 回分子シミュレーション討論会, 123P, Fukuoka, Japan, 2012-11-26
13. 高岩大輔, 坂牧隆司, Amadeu K. Sum, 成見哲, 泰岡顕治, "剛体水モデルにおける水/氷共存状態の分子動力学シミュレーション", 第 26 回分子シミュレーション討論会, 220P, Fukuoka, Japan, 2012-11-27
14. 星野哲也, 丸山直也, 松岡聡, "ディレクティブベースプログラミング言語 OpenACC の性能評価", 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, 東京都目黒区, 2013-01-15
15. 河村知輝, 丸山直也, 松岡聡, "ステンシル計算における通信の自動最適化に向けた性能モデルの評価", 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, 東京都目黒区, 2013-01-15
16. Tetsuya Hoshino, Naoya Maruyama, Satoshi Matsuoka, "CUDA vs OpenACC: Performance Case Studies", GPU Technology Conference, San Jose, CA, USA, 2013-03-18

17. Keisuke Fukuda, Naoya Maruyama, Miquel Pericàs, Satoshi Matsuoka, "Fast Multipole Method on a Dynamic Scheduling Engine on Heterogeneous Environments", GPU Technology Conference, San Jose, CA, USA, 2013-03-18
18. Michel Mueller, "Hybrid Fortran - New Directive Based GPGPU / CPU Framework", GPU Technology Conference, San Jose, CA, USA, 2013-03-18
19. Mohamed Wahib, Naoya Maruyama, "GPU-acceleration of a Weather Simulation Application: SCALE", GPU Technology Conference, San Jose, CA, USA, 2013-03-18
20. Edgar Josafat Martinez-Noriega, Atsushi Kawai, Kazuyuki Yoshikawa, Kenji Yasuoka, Tetsu Narumi, "CUDA Enabled for Android Tablets through DS-CUDA", 先進的計算基盤システムシンポジウム SACSIS 2013, Sendai, Japan, 2013-05-23
21. 吉川 和幸, Edgar Josafat Martinez-Noriega, 川井 敦, 泰岡 顕治, 成見 哲, "DS-CUDA を用いた GPGPU の信頼性向上システム", 先進的計算基盤システムシンポジウム SACSIS 2013, Sendai, Japan, 2013-05-23
22. 菊地 悠平, 田浦 健次郎, "CellsQL: 大規模データ処理のための表計算ソフトウェア", 先進的計算基盤システムシンポジウム(SACSIS)2013, 仙台, 2013-05-23
23. An Huynh, Jun Nakashima, Kenjiro Taura, "A Performance Analyzer for Task Parallel Applications based on Execution Time Stretches", 先進的計算基盤システムシンポジウム(SACSIS)2013, 仙台, 2013-05-23
24. 野澤拓磨, 亀岡駿, 高橋和義, 成見哲, 泰岡顕治, "棒状液晶の分子動力学シミュレーションにおける静電相互作用の影響", 第 17 回液晶化学研究会シンポジウム, P36, Tsukuba, Japan, 2013-06-13
25. Un-Hong Wong, Takayuki Aoki1, Hon-Cheng Wong, "Efficient TVD MHD Simulations on a Distributed Multi-GPU System Using GPU Direct 2.0", The 11th International School / Symposium for Space Simulations, National Central University, Taiwan, R.O.C., 2013-07-23, (<http://iss11.ss.ncu.edu.tw/>)
26. Un-Hong Wong, Hon-Cheng Wong, Meng Zhu, Aoki Takayuki, "Toward Real-time Ray Tracing for CFD Visualization via NVIDIA Iray", GTC (GPU Technology Conference) Japan 2013, 東京・六本木(ミッドタウン), 2013-07-30, (<http://www.gputechconf.jp/page/home.html>)
27. Takuma Nozawa, Kazuaki Takahashi, Tetsu Narumi, and Kenji Yasuoka, "Molecular dynamics of 5CB with GPU accelerated Coulombic calculation", 1st International Symposium on Computer Materials and Biological Sciences, P9, Tokyo, Japan, 2013-09-11
28. Kentaro Nomura, Minoru Oikawa, Atsushi Kawai, Tetsu Narumi, Kenji Yasuoka, "Acceleration of Replica Exchange Molecular Dynamics Simulation on Graphics Processing Units", 1st International Symposium on Computational Materials and Biological Sciences, P13, Tokyo, Japan, 2013-09-11
29. 岡元太郎・竹中博士・原辰彦・中村武史・青木尊之, "3次元グリーンテンソル波形による2011年東北地方太平洋沖地震の破壊過程(2)", 日本地震学会2013年秋季大会, P1-62, 神奈川県横浜市, 2013-10-07, (<http://www.zisin.or.jp/index.html>)
30. Takuma Nozawa, Kazuaki Takahashi, Tetsu Narumi, Kenji Yasuoka, "The dependence of ordering process on Coulombic interaction treatment 5CB system", 3rd International Conference on Molecular simulation, 1P52, Kobe, Japan, 2013-11-18
31. Kentaro Nomura, Minoru Oikawa, Atsushi Kawai, Tetsu Narumi, Kenji Yasuoka, "GPU Accelerated Replica Exchange Molecular Dynamics Simulation of Lennard-Jones Fluid", 3rd International Conference on Molecular simulation, 3P56,

Kobe, Japan, 2013-11-18

32. Takashi Shimokawabe, "A High-productivity Framework for Multi-GPU Computing of Weather Prediction Code", The 4th AICS International Symposium, 理化学研究所 AICS (神戸), 2013-12-02, (<http://www.aics.riken.jp/AICS-Symposium/2013/>)
33. Satori Tsuzuki, Takayuki Aoki, "Dynamic load balance for a granular simulation using billion particles on GPU supercomputer", The 4th AICS International Symposium, 理化学研究所 AICS (神戸), 2013-12-02, (<http://www.aics.riken.jp/AICS-Symposium/2013/>)
34. Tetsuya Hoshino, Naoya Maruyama, Satoshi Matsuoka, "OpenACC Performance and Optimization Studies With Kernel and Application Benchmarks", GPU Technology Conference, 2014-03-24
35. Kento Sato, Akira Nukada, Naoya Maruyama, Satoshi Matsuoka, "I/O Acceleration With GPU for I/O-Bound Applications", GPU Technology Conference, 2014-03-24
36. Mohamed Wahib, Naoya Maruyama, "Scalable Kernel Fusion for Memory-Bound GPU Applications", GPU Technology Conference, 2014-03-24
37. Un-Hong Wong, Takayuki Aoki, Hon-Cheng Wong, "Large-scale Global MHD Simulation for Solar Wind Magnetosphere Interaction on TSUBAME 2.5", GTC 2014(GPU Technology Conference) Japan 2014, San Jose, US, 2014-03-24, (<http://www.gputechconf.com/>)
38. 青木尊之、都築怜理, "動的負荷分散による GPU スパコンを用いた粒子法の大規模シミュレーション手法の開発", 学際大規模情報基盤共同利用・共同研究拠点第6回シンポジウム, 東京, 2014-07-10, (<http://jhpcn-kyoten.itc.u-tokyo.ac.jp/sympo/6th/>)
39. 下川辺隆史、青木尊之、小野寺直幸, "マルチ GPU コンピューティング・フレームワークを用いた高精度気象計算コードの開発", 学際大規模情報基盤共同利用・共同研究拠点第6回シンポジウム, 東京, 2014-07-10, (<http://jhpcn-kyoten.itc.u-tokyo.ac.jp/sympo/6th/>)
40. Satori Tsuzuki, Takayuki Aoki, "Large-scale granular simulations using Dynamic load balance on a GPU supercomputer", Proceedings of the 2014 ACM/IEEE conference on Supercomputing (SC'14), New Orleans, USA, 2014-11-18, (<http://sc14.supercomputing.org/>)
41. Michel Müller, "Performance Portable Parallel Programming - Compile-Time Defined Parallelization and Storage Order for Accelerators and CPUs", Proceedings of the 2014 ACM/IEEE conference on Supercomputing (SC'14), New Orleans, USA, 2014-11-18, (<http://sc14.supercomputing.org/>)
42. Shigeki Akiyama and Kenjiro Taura, "MassiveThreads/DM: a Global-View Task-Parallel Library for Distributed Memory Machines", JST/CREST International Symposium on Petascale System Software, Kobe, Japan, 2014-12-03
43. EDGAR JOSAFAT MARTINEZ-NORIEGA, ATSUSHI KAWAI, KAZUYUKI YOSHIKAWA, KENJI YASUOKA AND TETSU NARUMI, "Running CUDA on Android through GPU Virtualization", GPU Technology Conference 2014, P4160, San Jose, USA, 2014/3/24-27
44. Tetsuya Hoshino, "An OpenACC Extension for Data Layout Transformation", GTC 2015, San Jose, CA, USA, 2015-03-17
45. Takashi Shimokawabe, "A High-Productivity Framework for Multi-GPU Computing of Weather Prediction Code ASUCA", GTC 2015, San Jose, CA, USA, 2015-03-17

46. 青木尊之, “動的負荷分散による GPU スパコンを用いた粒子法の大規模シミュレーション手法の開発 II - 流体・構造連成計算への適用 -”, 学際大規模情報基盤共同利用・共同研究拠点第7回 シンポジウム, THE GRAND HALL(品川), 2015-07-09, (<http://jhpcn-kyoten.itc.u-tokyo.ac.jp/sympo/7th/>)

#### (4)知財出願

- ①国内出願 (0 件)
- ②海外出願 (0 件)
- ③その他の知的財産権

#### (5)受賞・報道等

##### ①受賞

1. \* Takashi Shimokawabe, Takayuki Aoki, Tomohiro Takaki, Akinori Yamanaka, Akira Nukada, Toshio Endo, Naoya Maruyama, Satoshi Matsuoka, “ACM Gordon Bell Prize: Special Achievements in Scalability and Time-to-Solution,” Peta-Scale Phase-Field Simulation for Dendritic Solidification on the TSUBAME 2.0 Supercomputer, ACM, 2013-11-17.
2. 青木尊之, “第 1 回 応用数学会・業績賞”, 応用数学会, 2012-02-05, (<http://www.jsiam.org/modules/xfsection/article.php?articleid=85>)
3. Takayuki Aoki, “CUDA Fellow”, NVIDIA, 2012-04-11, (<http://research.nvidia.com/content/cuda-fellows>)
4. \* 松岡聡, 遠藤敏夫, 青木尊之, “文部科学大臣表彰 科学技術賞(開発部門)”, 文部科学省, 2012-04-18, ([http://www.mext.go.jp/b\\_menu/houdou/24/04/1319413.htm](http://www.mext.go.jp/b_menu/houdou/24/04/1319413.htm))
5. 下川辺隆史, 青木尊之, 高木知弘, 山中晃徳, 額田彰, “ベストペーパーアワード 講演題目:GPU スパコン TSUBAME 2.0 によるフェーズフィールド法を用いた 2 petaflops 樹枝状凝固成長計算”, 第 17 回 計算工学講演会, 京都, 2012-07-25, ([http://www.jsces.org/koenkai/17/\\_Program/index.html](http://www.jsces.org/koenkai/17/_Program/index.html))
6. 都築 怜理, “2012 年度コンピュータサイエンス領域奨励賞”, 情報処理学会, 2012-08-12, (<http://www.ipsj.or.jp/kenkyukai/csaward/cs-award-2012.html>)
7. \* 小野寺直幸, 青木尊之, 下川辺隆史, 小林宏充, “HPCS2013 最優秀論文賞 論文題目: 格子ボルツマン法による 1m 格子を用いた都市部 10km 四方の大規模 LES 気流シミュレーション”, 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主催 HPCS シンポジウム 2013, 東工大, 2013-01-16
8. 下川辺隆史, “手島精一記念研究賞(博士論文賞) Study on Peta-scale Mesh-based Simulations for Physical Phenomena on GPU-rich Supercomputers”, 東京工業大学, 2013-02-21
9. 小野寺直幸, 青木尊之, 杉原健太, “平成24年度 日本計算工学会・論文賞「コンパクト差分を用いた高次精度マルチ・モーメント法の開発」”, 日本計算工学会, 2013-05-16, (<http://www.jsces.org/Overview/Award/index.html>)
10. 下川辺隆史, 青木尊之, 小野寺直幸, “最優秀論文賞”, HPCS2014, 一橋大学, 2014-01-08, (<http://hpcs.hpcc.jp>)
11. 下川辺隆史, “IEEE Computer Society Japan Chapter 優秀若手研究賞”, HPCS2014, 一橋大学, 2014-01-08, (<http://hpcs.hpcc.jp>)

12. 下川辺隆史, "計算機アーキテクチャ研究会若手奨励賞", 第 189 回 ARC・第 132 回 HPC 合同研究発表会 (HOKKE-19), 2014-01-15
13. 都築 怜理, "若手講演フェロー賞", 日本機械学会・計算力学部門, 佐賀, 2014-05-15, (<http://www.jsme.or.jp/cmd/japanese/award/index.html>)
14. 都築怜理、青木尊之, "グラフィクスアワード最優秀賞", 日本計算工学会・第 19 回 計 算 工 学 講 演 会 , 広 島 , 2014-06-12, ([http://www.jsces.org/koenkai/19/graphics\\_award.html](http://www.jsces.org/koenkai/19/graphics_award.html))
15. 都築怜理、青木尊之, "ベストCFDグラフィックス・アワード動画部門 第1位", 第 28 回数値流体力学シンポジウム, 東京 (船堀タワーホール), 2014-12-10, (<http://www2.nagare.or.jp/cfd/cfd28/>)
16. 泉田康太、青木尊之、小野寺直幸、杉原健太、中島聖、本郷均、横畑 英明, "ベストCFDグラフィックス・アワード動画部門 第2位", 第 28 回数値流体力学シンポジウム, 東京 (船堀タワーホール), 2014-12-10, (<http://www2.nagare.or.jp/cfd/cfd28/>)
17. 杉原健太、青木尊之、内山久和, "ベスト CFD グラフィックス・アワード静止画部門 第2位", 第 28 回数値流体力学シンポジウム, 東京 (船堀タワーホール), 2014-12-10, (<http://www2.nagare.or.jp/cfd/cfd28/>)
18. 渡辺勢也, "粉体工学会ベストプレゼンテーション賞 (BP 賞)", 粉体工学会・2015 年度春期研究発表会, 東京 (連合会館@神田駿河台), 2015-05-19, (<http://www.sptj.jp/haru.html>)
19. 都築怜理、青木尊之, "最優秀論文賞", 2015 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, 東京大学 武田先端知ビル 5 階 武田ホール (東京), 2015-05-19, (<http://hpcs.hpcc.jp/>)
20. 都築怜理, "IEEE Computer Society Japan Chapter 優秀若手研究賞", 2015 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, 東京大学 武田先端知ビル 5 階 武田ホール (東京), 2015-05-19, (<http://hpcs.hpcc.jp/>)
21. 都築怜理, 青木尊之, "ビジュアルコンピューティング賞", 第 20 回計算工学講演会, つくば国際会議場, 2015-06-08, (<http://www.jsces.org/koenkai/20/>)
22. 泉田康太、青木尊之、小野寺直幸、杉原健太、中島聖、本郷均、横畑 英明, "グラフィクスアワード優秀賞", 第 20 回計算工学講演会, つくば国際会議場, 2015-06-08, (<http://www.jsces.org/koenkai/20/>)
23. 渡辺勢也、青木尊之、長谷川雄太, "ベスト CFD グラフィクスアワード 動画部門 第2位", 第 29 回数値流体力学シンポジウム, 九州大学 筑紫キャンパス, 2015-12-16, (<http://www2.nagare.or.jp/cfd/cfd29/>)

## ②マスコミ(新聞・TV等)報道

1. 青木尊之, "東工大・青木教授の研究グループがゴードンベル賞・特別賞を受賞", クラウド Watch, 2011-11-18, ([http://cloud.watch.impress.co.jp/docs/news/20111118\\_492092.html](http://cloud.watch.impress.co.jp/docs/news/20111118_492092.html))
2. 青木尊之, "「京」の計算成果がゴードン・ベル賞に 東工大「TSUBAME2.0」も受賞", IT Media ニュース, 2011-11-18, (<http://www.itmedia.co.jp/news/articles/1111/18/news085.html>)
3. 青木尊之, "ビジネスでもペタ級スパコンの活用を-TSUBAME2.0 の Gordon Bell 賞受賞の意義", マイナビニュース, 2011-11-22, ([http://news.mynavi.jp/articles/2011/11/22/sc11\\_tsubame2/index.html](http://news.mynavi.jp/articles/2011/11/22/sc11_tsubame2/index.html))
4. 青木尊之, 小野寺直幸, "都心の気流 高精度予測 スパコンで 1m 単位解析", 日刊工業新聞 24 面, 2012-10-11
5. 青木尊之, 小野寺直幸, "東工大、スパコンの GPU を使い都心部の気流を 1m 解像度で計算", インプレス PC Watch, 2012-10-11,



([http://pc.watch.impress.co.jp/docs/news/20121011\\_565410.html](http://pc.watch.impress.co.jp/docs/news/20121011_565410.html) アクセスランキング 16 位)

6. 青木尊之, 小野寺直幸, “都心部特有の風 予測精度高める 東工大”, 日経新聞・朝刊 14 面, 2012-10-16, (<http://www.nikkei.com/article/DGXNZO47294780V11C12A0TJM000/>)
7. 青木尊之, 小野寺直幸, “都心部の風の動き再現 - 東工大、スパコン上で -”, 読売新聞・朝刊 23 面, 2012-10-28
8. 青木尊之, 小野寺直幸, “報道特集「N スタ」”, TBS テレビ, 2012-11-10
9. 青木尊之, “都心の風、スパコンで予測”, 朝日新聞・朝刊 25 面, 2012-11-15, (探究人)
10. 青木尊之, “スパコン TSUBAME「VDI」- NVIDIA、GTC Japan 2015 ではディープラーニングにフォーカス”, PC Watch, 2015-09-18, ([http://pc.watch.impress.co.jp/docs/news/20150918\\_722007.html](http://pc.watch.impress.co.jp/docs/news/20150918_722007.html))
11. 青木尊之, “GRID Virtual Desktop Infrastructure(仮想デスクトップ環境)-ディープラーニングの最先端情報を求めて2500人が参加 - GTC Japan 2015”, マイナビニュース, 2015-09-24, ([http://news.mynavi.jp/articles/2015/09/24/gtc\\_japan\\_2015/](http://news.mynavi.jp/articles/2015/09/24/gtc_japan_2015/))

### ③その他

#### (6)成果展開事例

##### ①実用化に向けての展開

- 開発したソフトウェアの多くはオープンソースソフトウェアに公開済み (§ 4参照)。
- MassveThreads は CRAY のプログラミング言語 Chapel の実行時システム(オプション)として利用されている(Chapel は CRAY が公開中)
- Hybrid Fortran フレームワークを開発者の青木グループ Michel Mueller(東工大博士課程学生)のベンチャー企業のホームページ上で公開している。(<http://typhooncomputing.com>)
- 気象庁との共同研究として上記 Hybrid Fortran を現業の天気予報に用いられている ASUCA へ適用を進めており、将来的な Hybrid Fortran ベースの実運用に向けた検討を続けている。
- 参照実装として開発した ExaFMM をオープンソースライブラリとして github 上に公開中。現在、CHARMM, GROMACS などの分子動力学ソフトウェアや連立方程式の前処理としてオープンソースライブラリ PETSc に統合予定。

##### ②社会還元的な展開活動

- ポストペタスケールにとどまらずその先の将来の高性能計算システムに向けた研究開発ロードマップである「HPCI 技術ロードマップ白書」にて、本研究成果である生産性と性能の両立の重要性およびその方法であるアプリケーションフレームワーク等のハイレベルな抽象度を持ったプログラミングモデルの重要性を提言した。
- 東工大青木が主査を務める東京工業大学学術国際情報センターの GPU コンピューティング研究会は GPU の利用やプログラミングに関する研究会である (<http://gpu-computing.gsic.titech.ac.jp>)。全国の大学・公的機関の研究者、民間企業から約 1000名の登録があり、TSUBAME2.0/2.5 を利用した GPU プログラミングの講習会、シンポジウム、セミナー等を開催し、メーリングリストを通じて情報交換が行われている。

## § 5 研究期間中の活動

本研究チームでは博士研究員のキャリアパスのために学会や共同研究などの人的ネットワークを

構成する機会に幅広く主体的な参加することを促してきた。実際に丸山グループではゴメズ博士研究員が H25 年 4 月より米国アルゴンヌ国立研究所にて博士研究員として異動した。青木グループでは 2012 年に博士研究員の Xian WANG が中国の西安交通大学・准教授として転出し、2015 年には博士研究員の小野寺直幸が(独)海上技術安全研究所の研究員に転出した。また、下川辺隆史博士研究員が H25 年 1 月より東京工業大学・学術国際情報センター助教として着任した。田浦グループでは研究員 Nan Dun がシカゴ大学 Andrew Chien 教授の研究グループの研究員として採用され、転出した。

また、泰岡グループでは、博士研究員のキャリアパスについては、本人と相談し普段から企業への就職も含めたキャリアパスの支援を行ってきた。川井氏については、非常勤の特任准教授として 3 年間雇用したが、本務であるベンチャー企業の仕事が忙しくなったことからこちらの研究員の雇用を終了した。老川氏は、研究員として 3 年間雇用したが、本プロジェクトが始まる前に企業での就業経験があることから大学等での研究職を希望し、千葉大学にて特任准教授のポストを得たために退職した。高岩氏は、研究員として 4 年間雇用し、企業への就職を希望していることから、様々な企業の関係者との面会機会を設定し、キャリアパス確保に向けた取り組みをしている。土居氏は博士課程修了後、本プロジェクトの最後の 2 年間のみの雇用であったので、さらに数年の博士研究員などの研究職でのキャリアパスを希望しており、現在大学や研究所の関係者に接触をはかりキャリアパスの確保に取り組んでいる。また、プロジェクト期間中に博士号を取得した平塚氏は、工学院大学助教として勤務している。

#### 5. 1 主なワークショップ、シンポジウム、アウトリーチ等の活動

年月日	名称	場所	参加人数	概要
平成 23 年 6 月 17 日	第 1 回 PPC セミナー	東京工業大学	21 人	講演「Biros (Georgia Tech)らによる KIFMM の実装」(東京工業大学研究補助員 福田圭祐)
平成 23 年 7 月 7 日	第 2 回 PPC セミナー	東京大学	19 人	講演「Chapel+GPGPU Attempt for Fast Multipole Method」(東工大学研究員 頓楠)
平成 23 年 11 月 25 日	第 3 回 PPC セミナー	東京工業大学	20 人	講演「FMM の近況と Exascale への道のり」(King Abdullah University of Science and Technology, Kingdom of Saudi Arabia 博士研究員 横田理央)
平成 24 年 2 月 3 日	第 4 回 PPC セミナー	東京工業大学	18 人	講演 1「The OmpSs programming model and its application to a tree-based N-body simulation」(東京工業大学産学官連携研究員 Miquel Pericàs) 講演 2「Paraiso : 偏微分方程式の陽解法のための自動チューニングフレームワーク」(京都大学特定助教 村)

				主 崇行)
平成 24 年 8 月 31 日	ポストペタワークショップ	東京工業大 学 学術情報セ ンター	約 50 人	ポストペタスケールコンピ ューティングに関する研究発 表会 本領域の他の課題との合同 でのワークショップを開催し た。
平成 26 年 5 月 23 日	AICS HPC Seminar	理化学研究 所計算科学 研究機構	約 20 人	Ivan Raikov らを招いて DSL 等についての講演会
平成 26 年 8 月 26 日	Workshop on HPC and Cloud Accelerators	理化学研究 所計算科学 研究機構	約 20 人	アクセラレータに関するワー クショップ
平成 26 年 9 月 3～4 日	ECRC-CREST Joint Workshop	King Abdullah University of Science and Technology	約 30 人	KAUST ECRC グループの David Keys 教授らと本チー ムにて共同のワークショップ を開催
平成 26 年 12 月 2～4 日	JST/CREST International Symposium on Post Petascale System Software	神戸大学・ 理化学研究 所計算科学 研究機構	250 人強	ポストペタ領域国際シンポジ ウム

## § 6 最後に

### 研究の目標等から見た達成度、得られた成果の意義等の自己評価

本研究では高性能・高生産性アプリケーションフレームワークの開発を目標とし、構造格子流体計算やその AMR 版、および FMM 等の粒子法をアプリケーションドメインとして設定した。本稿執筆時点では構造格子についてはその目的をほぼ達成できたが、FMM については本稿執筆時点では開発途中であり、性能チューニングについて現在取り組んでいる段階である。以上の通り、当初の開発目標の完全な実現には至っていないが、本研究ではゴードンベル賞や主要国際学会での多くの査読論文採録などに代表されるように、国際的に高く評価される研究成果を達成したと考えている。現時点では開発途中な項目についても研究実施期間内に完成する見込みはたっており、2016 年ごろに登場が予定されている数十 PFLOPS 級のポストペタスケールシステムにおいて実証する計画である。

### 今後の研究の展開

今後の展開としては、まず田浦グループによるランタイムのフレームワークへのさらなる利用を計画している。FMM 向けフレームワークでは田浦グループによるランタイムを一部使っているが、分散メモリ並列化などは現状では MPI を利用しており、田浦グループランタイムによる実装の簡便性や負荷分散などの利点は享受できていない。これはフレームワークの開発とランタイムの開発が同時進行で進んだためであるが、今後さらに田浦グループによるランタイムのフレームワークへの統合を進め、より先進的なソフトウェアへと発展させていく予定である。また、フレームワークを用いたアプリケーション実証についてもさらに拡充する予定である。特に日独仏国際共同研究 (SPPEXA)

において我々の構造格子流体向けソフトウェア技術を日独仏の気象・気候モデルへ応用し、それらのエクサスケールに向けた高度化を推進する予定である。気象・気候モデルは格子系流体計算の応用であるだけでなく、次世代に向けた計算科学の重要な計算でもあり、我々のソフトウェア技術を国際的に実証し、本研究の成果を大きくアピールする機会である。SPPEXA 以外にも § 3(2) に述べたとおりその他にも多くの国際連携を進めており、それらの機会を通じてこれまでの研究成果を応用、発展させて行く予定である。

#### 研究代表者としてのプロジェクト運営について(チーム全体の研究遂行、研究費の使い方等)、その他

本研究チームは東工大、東大、慶応の3大学、4つの研究グループの共同研究として開始したが、2年度目から研究代表者が東工大から理研計算科学研究機構へ異動したため、理研と東工大両方に拠点をおき、研究契約上は5つのグループとして研究を進めた。当初は全グループが東京近郊に位置していたことも共同研究を推進する上で都合が良かったが、研究代表者が神戸に位置する理研へ異動後はテレビ会議を多用しつつ、必要に応じて東京・神戸でのミーティングを持つことで共同研究が円滑に進むように努めた。また、領域会議やサイトビジットなど、定期的に研究進捗について領域アドバイザーに助言頂けたことは研究遂行に大いに役立った。研究費の使い方については、研究員の雇用など人件費が主であるため必ずしも当初の想定通りに進まない場合もあったが、全体としては流用や繰り越しなどの柔軟な制度に助けられ、必要な時に必要な予算を執行することができ、研究成果達成につながったものと考えている。