

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「自動チューニング機構を有するアプリケーション開発・実行環境」

## 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：中島研吾  
(東京大学情報基盤センター、教授)

## § 1 研究実施の概要

### (1) 実施概要

メニョコクラスタによるポストペタスケールシステム上での科学技術アプリケーションの効率的開発、安定な実行に資する ppOpen-HPC の研究開発を計算科学、計算機科学、数理科学各分野の緊密な協力のもとに実施した。大規模シミュレーションに適した 5 種の離散化手法に限定し、各手法の特性に基づいたアプリケーション開発用ライブラリ群、耐故障機能を含む実行環境を実現する。ppOpen-HPC は以下の 4 階層より構成される(カッコ内は担当グループ)：

- ppOpen-APPL：各手法に対応した並列プログラム開発のためのライブラリ群 (中島・佐藤・古村・奥田・岩下・阪口グループ)
- ppOpen-MATH：各離散化手法に共通の数値演算ライブラリ群 (中島・佐藤グループ)
- ppOpen-AT：科学技術計算のための自動チューニング (AT) 機構 (中島グループ)
- ppOpen-SYS：耐故障機能に関連するライブラリ群 (中島グループ)

当該分野の先行研究においてメンバー自身が開発した大規模アプリケーションを元にして ppOpen-APPL の各機能を開発、実装した。ppOpen-AT は ppOpen-APPL の原型コードを対象として研究開発を実施し、その知見を各 ppOpen-APPL の開発、最適化に適用している。平成 24 年 11 月にマルチコアクラスタ向けに各グループの開発した ppOpen-APPL, ppOpen-AT, ppOpen-MATH の各ソフトウェアをソースコード、英文ドキュメントとともに MIT ライセンスに基づき公開した。平成 25 年度以降は各機能追加、最適化を重ねながら毎年 11 月の SC-XY においてソフトウェアを公開し、平成 27 年 11 月の SC15 では Ver.1.0 を公開した。また平成 25 年度以降は、Intel Xeon/Phi 等メニョコ向けに最適化に焦点を置くとともに、一部機能については OpenACC による GPU 向け最適化も実施した。

地球科学、工学等の幅広い分野の専門家と協力して開発成果を大規模シミュレーションに適用し、下記の分野で大きな成果をあげることができた：

- 高性能な並列 H 行列ライブラリ HACApK の地震発生サイクルシミュレーション、電磁場シミュレーション等様々な分野への適用 (ppOpen-APPL/BEM)
- ELL 型疎行列格納法に基づく線形ソルバーの二酸化炭素地中貯留シミュレーション等への適用、高速化 (ppOpen-APPL/FVM)
- 自動チューニング機構の三次元地震波動伝搬シミュレーションへの適用 (ppOpen-AT)
- 並列カプラーによる大気海洋シミュレーション、地震シミュレーションの高度化、一般問題向けライブラリとしての整備 (ppOpen-MATH/MP, ppOpen-APPL/FDM, ppOpen-APPL/FEM)

ppOpen-MATH/MP の地震シミュレーションに適用にあたっては、ppOpen-APPL/FDM, ppOpen-APPL/FEM の開発グループの密接な協力によってインタフェースの設計、実装、検証を行い、FEM, FDM 向けの汎用カプラーとして整備し、公開している。

また、疎行列ソルバーの通信削減アルゴリズムの研究開発においても、多重格子法ソルバーライブラリ ppOpen-MATH/MG の通信最適化手法を提案、実装、評価し、国際学会で高い評価を得た。提案手法はエクサスケール等より巨大なシステムで高い効果を発揮することも確認することができた。

## (2) 顕著な成果

### < 優れた基礎研究としての成果 >

1. 高性能なハイブリッド並列化された分散並列 H 行列ライブラリ(ppOpen-APPL/BEM)  
境界要素解析やN体問題等で用いられる高速行列演算技術である H 行列法のライブラリ (HACApK)を開発した。H 行列の生成過程に関する新手法の考案等により, 既存のライブラリであるマックス・プランク研究所の H-lib に対して, H 行列に関する行列ベクトル積演算で約 7 倍の高速化(逐次演算)を達成した。また, 国際的に初めてとなるハイブリッド並列化された H 行列法のライブラリ開発に成功し, その性能を応用分野の解析において確認した。

2. 並列多重格子法における通信最適化に関する研究(ppOpen-MATH/MG)  
大規模問題向けのスケラブルな手法として知られている多重格子法について, 通信 (Communication)最適化の観点から研究を実施した。Serial Communication については, 疎行列格納法を検討し, 世界に先駆けて Sliced ELL 法のデータ依存性を含むプロセスへの適用を実施した。Parallel Communication としては並列多重格子法の効率化に資する CGA 法 (Coarse Grid Aggregation), hCGA 法 (Hierarchical CGA)を提案し, 富士通 FX10, 4,096 ノードを使用して高い性能と安定性を得た。論文が IEEE ICPADS 2014 で Best Paper Award (投稿 322 件, 採択 96 件)に選ばれるなど国際的にも高い評価を得た。

3. 自動チューニング専用計算機言語の開発 (ppOpen-AT)  
ppOpen-AT は, 世界的にみてほとんど研究されていない性能自動チューニング(AT)のための専用計算機言語である。有限差分法などで現れる演算カーネルの計算パターンに着目し, コンパイラではできないコード最適化を提供する AT 技術の確立を行った。ppOpen-AT を活用し, 現在, 国立台湾大学等と国際共同研究を実施している。一方, ppOpen-AT を電力最適化に適用する論文を国際会議 IEEE MCSoc-13 で発表し, 最優秀論文賞を受賞した。このことにより ppOpen-AT の AT 技術は, 国際的にも高く評価されている。

### < 科学技術イノベーションに大きく寄与する成果 >

1. 分散並列 H 行列ライブラリの応用分野への展開(ppOpen-APPL/BEM)  
本 CREST で開発した分散並列 H 行列ライブラリをプロジェクト内外の応用分野に展開した。JAMSTEC, 京都大で実施している地震サイクルシミュレーションでは, H 行列の分散メモリ化により, 大幅な解析規模の拡大が可能となった。これは既存の H 行列ライブラリが分散メモリ化されておらず, 生成する H 行列のサイズが単一の計算ノードに搭載されたメモリ量に制限されていたことによる。開発ライブラリはこの制限を大幅に緩和している。また, マイクロマグネティクス解析や環境電磁場解析への応用に成功し, 各分野の発展に寄与した。

2. 並列連成カプラー(ppOpen-MATH/MP)  
FVM や FEM など異なる離散化手法を持つ複数のモデルを結合し大規模データ転送・変換を実施するための弱連成カップリングツール ppOpen-MATH/MP を開発し, ケーススタディとして大気モデル NICAM と海洋モデル COCO, および地震モデル Seism3D (ppOpen-APPL/FDM) と構造物モデル FrontISTR++ (ppOpen-APPL/FEM)を結合した。前者の結合は準構造格子大気モデルを結合した先駆的事例であり, 従来のスペクトル法では実現できなかった高解像度の気候シミュレーションの可能性を開くものである。また後者の実験によって構造格子と非構造格子, 陽解法と陰解法といった格子形状や格子の表現方法さらには解法にいたるまで全く異なるモデル同士でも結合可能なことが示された。

### 3. ppOpen-AT の応用

ppOpen-AT は既存の CPU 向けのコード最適化の候補の組み合わせ全てを試すコード(オート

チューナとその候補一式)を自動生成する機能を有すため、HPC ソフトウェア開発工数を削減できる基盤技術となる。効率良い AT を実現するには適切な候補を優先的に調べる機能が必要になるが、この機能を工学院大学との共同研究により開発し、d-Spline を用いた汎用的な AT 方式として論文発表と ppOpen-AT へ機能実装した。これらの成果は HPC ソフトウェアの高生産性に資する技術であり、実用的な HPC コードの開発コスト削減に寄与する。

## § 2 研究実施体制

### (1) 研究チームの体制について

#### ① 中島グループ

- 研究代表者: 中島 研吾 (東京大学情報基盤センター・教授)
- 研究参加者

氏名	所属	役職	参加時期
中島研吾	東京大学情報基盤センター	教授	H23.4～
片桐孝洋	同上	准教授	H23.4～
大島聡史	同上	助教	H23.4～
實本英之	東京工業大学学術国際情報センター	助教	H25.4～
久田俊明	東京大学新領域創成科学研究科	教授	H23.4～
松元亮治	千葉大学理学研究科	教授	H23.4～
松本正晴	東京大学情報基盤センター	特任講師	H25.4～
思 敏	東京大学情報理工学系研究科	大学院学生 (博士)	H24.4～
櫻井隆雄	同上	大学院学生 (博士)	H25.4～27.9
鴨志田良和	東京大学情報基盤センター	特任助教	H23.4～25.3
伊東 聡	同上	特任助教	H23.4～25.3
美添一樹	東京大学情報理工学系研究科	研究員	H23.4～25.3
林 雅江	東京大学情報基盤センター	客員研究員	H23.10～26.3
澤田武男	東京大学情報理工学系研究科	大学院学生 (修士)	H23.10～25.3
轟 侑樹	同上	大学院学生 (修士)	H23.10～25.3

- 研究項目: 自動チューニング機構を有するポストペタスケールアプリケーション開発・実行環境のための基盤ソフトウェア
  - ppOpen-HPC の基本設計
  - ppOpen-APPL/AMR-FDM の研究開発
  - ppOpen-APPL/FVM の研究開発
  - ppOpen-MATH の研究開発
  - ppOpen-AT の研究開発
  - ppOpen-SYS の研究開発
  - 通信・同期削減アルゴリズムの研究 (線形ソルバー)

#### ② 佐藤グループ

- 主たる共同研究者: 佐藤 正樹 (東京大学大気海洋研究所・教授)
- 研究参加者

氏名	所属	役職	参加時期
佐藤正樹	東京大学大気海洋研究所	教授	H23.4～
羽角博康	同上	教授	H23.4～
三浦裕亮	東京大学理学系研究科	准教授	H23.4～
富田浩文	理化学研究所	チームリーダー	H25.4～

河宮未知生	海洋研究開発機構	分野長	H23.4～
荒金 匠	東京大学大気海洋研究所	大学院学生（博士）	H23.4～27.3
Woosub Roh	同上	特任研究員	H26.4～27.3
大野知紀	同上	特任研究員	H24.4～27.3
山田洋平	同上	大学院学生（博士）	H24.4～
久保川陽呂鎮	同上	特任研究員	H23.10～24.4
久保川陽呂鎮	同上	特任研究員	H24.4～
西川雄輝	同上	大学院学生（博士）	H25.4～
沢田雅洋	同上	特任助教	H26.4～
宮川知己	同上	特任助教	H27.4～
八代 尚	理化学研究所	研究員	H26.4～

- 研究項目:ポストペタスケールアプリケーション連成機構
  - ppOpen-MATH/MP の研究開発

③ 古村グループ

- 主たる共同研究者:古村 孝志（東京大学地震研究所・教授）
- 研究参加者

氏名	所属	役職	参加時期
古村孝志	東京大学地震研究所	教授	H23.4～
Mak SUM	東京大学情報学環	特任研究員	H23.4～24.3
武村俊介	東京大学理学系研究科	博士課程 D3	H23.4～24.3
森 太志	岩手医科大学	特別研究員	H25.4～
前田拓人	東京大学情報学環	特任助教	H23.4～24.3

- 研究項目:差分法に基づくポストペタスケールアプリケーション開発環境
  - ppOpen-APPL/FDM の研究開発

④ 奥田グループ

- 主たる共同研究者:奥田 洋司（東京大学大学院新領域創成科学研究科・教授）
- 研究参加者

氏名	所属	役職	参加時期
奥田洋司	東京大学新領域創成科学研究科	教授	H23.4～
山田 進	日本原子力研究開発機構	研究副主幹	H23.4～
橋本 学	東京大学新領域創成科学研究科	講師	H23.4～
北山 健	同上	特任研究員	H23.4～
Olav Aanes Fagerlund	同上	大学院学生（博士）	H23.4～26.3
渡辺 起	同上	大学院学生（修士）	H23.4～23.9
森田直樹	同上	大学院学生（博士）	H25.4～27.3
井原 遊	同上	大学院学生（博士）	H25.4～27.3

- 研究項目:有限要素法に基づくポストペタスケールアプリケーション開発環境
  - ppOpen-APPL/FEM の研究開発
  - 混合精度演算手法に関する研究

⑤ 岩下グループ

- 主たる共同研究者:岩下 武史（京都大学学術情報メディアセンター・准教授）
- 研究参加者

氏名	所属	役職	参加時期
岩下武史	京都大学学術情報メディアセンター	客員教授	H23.4～
美船 健	京都大学工学研究科	助教	H23.4～
高橋康人	同志社大学理工学部	准教授	H23.4～
西村直志	京都大学情報学研究科	教授	H25.4～
平原和朗	京都大学理学研究科	教授	H23.4～
濱田昌司	京都大学工学研究科	准教授	H23.4～
伊田明弘	京都大学学術情報メディアセンター	特定助教	H24.4～27.11
伊田明弘	東京大学情報基盤センター	特任准教授	H27.12～
大谷真紀子	京都大学理学研究科	大学院学生（博士）	H23.4～27.3
河合直聡	京都大学情報学研究科	大学院学生（博士）	H23.4～26.3
南 武志	同上	大学院学生（博士）	H23.4～25.3
野瀬田裕樹	同上	大学院学生（修士）	H23.11～25.3
日比野元春	同上	大学院学生（修士）	H23.11～25.3
北尾純士	同志社大学工学研究科	大学院学生（修士）	H23.4～25.3
棟形克己	京都大学情報学研究科	大学院学生（修士）	H26.4～27.3
嶋田能之	同上	大学院学生（修士）	H26.4～27.3
奥田亮介	京都大学理学研究科	大学院学生（修士）	H26.4～

- 研究項目:境界要素法に基づくポストペタスケールアプリケーション開発環境
  - ppOpen-APPL/BEMの研究開発

#### ⑥ 阪口グループ

- 主たる共同研究者:阪口 秀(独立行政法人海洋研究開発機構・地球内部ダイナミクスグループ・プログラムディレクター)
- 研究参加者

氏名	所属	役職	参加時期
阪口 秀	海洋研究開発機構 数理科学・先端技術研究分野	研究担当理事補佐	H23.4～
西浦泰介	同上	技術研究員	H23.4～
山本美希	同上	特任研究員	H23.7～25.3
山本美希	同上	研究員	H25.4～
古市幹人	同上	主任研究員	H25.4～
邊見 忠	同上	特任技術主任	H27.4～
堀 高峰	同上	主任研究員	H23.4～25.4

- 研究項目:個別要素法に基づくポストペタスケールアプリケーション開発環境
  - ppOpen-APPL/DEMの研究開発
  - 通信・同期削減アルゴリズムの研究

#### (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

- CREST 内
  - 堀チーム（メニィコア混在型並列計算機用基盤ソフトウェア）：メニィコア向けノード間ライブラリに関する情報交換のためのワークショップを年 1 回実施している（ppOpen-MATH, ppOpen-AT, ppOpen-SYS）。
  - 櫻井チーム（ポストペタスケールに対応した階層モデルによる超並列固有値解析エンジンの開発）：反復法を中心とした並列疎行列ライブラリについてインタフェース統一などの検討を協力して実施した（ppOpen-APPL, ppOpen-MATH,

- ppOpen-AT)。DFG/SPPEXA ESSEX-II に向けて共同でプロポーザルを提出し、2016～2017 年度研究課題として採択された。
- 丸山チーム，建部チーム，櫻井チーム：Sapporo Summer HPC Seminar を 4 チーム合同で開催し，今後の研究のあり方について議論した（2015 年 7 月 23 日）
  - JST 研究成果展開事業「戦略的イノベーション創出推進プログラム（S-イノベ）」への展開
    - 京都大学大学院工学研究科電気工学専攻雨宮教授が実施している「高温超伝導を用いた高機能・高効率・小型加速器システムへの挑戦」における超伝導コイルの解析において，本 CREST で開発した分散 H 行列ライブラリ HACApK の利用を適用中である（ppOpen-APPL/BEM）。
  - JHPCN（学際大規模情報基盤共同利用共同研究拠点）共同研究課題への適用
    - 高精度行列 - 行列積アルゴリズムにおける並列化手法の開発（大石進一教授（早稲田大）他）（平成 24 年度，研究としては継続）：高精度行列-行列積演算における行列-行列積の実装方式選択（ppOpen-AT）。
    - 粉体解析アルゴリズムの並列化に関する研究（堀端康善教授（法政大）他）（平成 25 年度，研究としては継続）：粉体シミュレーションのための高速化手法で現れる性能パラメータへの自動チューニングの利用を検討（ppOpen-AT）。
    - 巨大地震発生サイクルシミュレーションの高度化（平原和朗教授（京大）他）（平成 23 年度～平成 25 年度，研究としては継続）：地震発生サイクルシミュレーションに並列化 H 行列法（HACApK），局所細分化手法を適用している（ppOpen-APPL/FVM，ppOpen-APPL/BEM）
    - ポストペタスケールシステムを目指した二酸化炭素地中貯留シミュレーション技術の研究開発（山本肇博士（大成建設）他）（H25 年度，研究としては継続）：有限体積法による二酸化炭素地中貯留シミュレーションコードにおける並列線形ソルバーのハイブリッド並列化，並列可視化機能の導入を実施している。特に疎行列格納形式として Block ELL 法を採用することによって，Fujitsu PRIMEHPC FX10（Oakleaf-FX）1,440 ノード使用時に従来 2-3 倍の計算性能が得られている（ppOpen-APPL/FVM，ppOpen-MATH/MG，ppOpen-MATH/VIS）。
    - 太陽磁気活動の大規模シミュレーション（横山央明准教授（東大）他）（平成 25 年度～）：有限差分法，有限体積法による太陽磁気活動シミュレーションコードにおいて，並列線形ソルバー，並列可視化機能の導入を実施している（ppOpen-APPL/FDM，ppOpen-APPL/FVM，ppOpen-MATH/MG，ppOpen-MATH/VIS）。
    - 天体活動現象の輻射磁気流体シミュレーション（松元亮治教授（千葉大）他）（平成 24 年度～）：有限差分法，有限体積法による天体活動現象の輻射磁気流体シミュレーションコードにおいて，並列線形ソルバー，並列可視化機能の導入を実施している（ppOpen-APPL/FDM，ppOpen-APPL/FVM，ppOpen-MATH/MG，ppOpen-MATH/VIS）。
  - 一般の共同研究・協力
    - 兵藤・堀グループ（海洋研究開発機構）：京コンピュータにおける地震サイクルシミュレーションを行っている海洋研究開発機構のグループのコードに本プロジェクトで開発した並列 H 行列法ライブラリ（HACApK）を提供し，同シミュレーション上で利用されている。
    - 田中輝雄教授（工学院大）：田中研究室開発の AT 方式（d-spline 方式）の適用対象として ppOpen-AT の AT 機能を拡張して適用している（ppOpen-AT）。
    - 須田礼仁教授（東大）：電力最適化のため，須田研究室で開発中の AT 方式と電力測定のコモン API を利用し，ppOpen-AT を用いた電力最適化方式を提案している（ppOpen-AT）。

- 辻本恵一博士（公益財団法人地球環境産業技術研究機構）：CO<sub>2</sub>の地下深部塩水層（帯水層）への地中貯留有限要素法シミュレーションへ大規模並列ソルバー、可視化機能を適用している（ppOpen-APPL/FEM）。
  - 臼井英之教授（神戸大学）：惑星間航行システム開発に向けたマルチスケール粒子シミュレーションへ AMR 機能を拡張して適用している（ppOpen-APPL/AMR-FDM）。
  - 宮下大氏（住友重機械工業）：透明導電膜を成膜する RPD（Reactive Plasma Deposition）装置の開発へ向けたシミュレーションへ AMR 機能を適用している（ppOpen-APPL/AMR-FDM）。
  - 将来のHPCIシステムに関する調査研究（アプリケーション分野）：ppOpen-APPL/FDMの原型コードである地震動シミュレーションコード（Seism3D）を提供し、併せて ppOpen-ATによる自動チューニング事例も紹介した（ppOpen-APPL/FDM, ppOpen-AT）（平成 24～25 年度）。
  - 石川裕教授（理化学研究所計算科学研究機構）：石川教授のグループで開発した McKernel 向け MPI 通信ライブラリに通信・同期削減アルゴリズムを適用
  - ポスト京重点課題⑦：東京大学情報基盤センターのメンバーの一部はポスト京重点課題⑦「次世代の産業を支える新機能デバイス・高性能材料の創成」（代表：常行真司教授（東京大学理学系研究科））のサブ課題 G「共通基盤シミュレーション手法」に参加しており、ppOpen-HPC の成果の適用を検討している。
- 国際的共同研究・協力
    - ESSEX グループ（Equipping Sparse Solvers for Exascale）：ドイツ DFG の SPPEXA（Software for Exascale Computing）のプロジェクトの一つである ESSEX（Leading-PI Professor Gerhard Wellein（Friedrich-Alexander-University Erlangen-Nürnberg））とは JST-DFG 協力により SPPEXA の第 2 フェーズに櫻井チームとともに共同でプロポーザルを提出し、採択され、2018 年 12 月まで協力して研究開発を実施する。量子物理分野固有値問題向け前処理付き反復法、科学技術計算性能評価モデル、自動チューニングなどの分野での研究開発を重点的に実施する（ppOpen-APPL/FVM, ppOpen-MATH/MG, ppOpen-AT）。
    - OPL（Open Petascale Libraries）プロジェクト：2012 年 10 月より Open Petascale Libraries プロジェクト（<http://www.openpetascale.org/>）に東大情報基盤センターが参加しており、ppOpen-HPC プロジェクトで開発したライブラリをコミュニティに広げて行く予定である。また、PETSc の OpenMP/MPI ハイブリッド化を実施している Imperial College のグループに協力した。（ppOpen-APPL, ppOpen-MATH, ppOpen-AT）（2014 年 11 月に終了）
    - Intel Parallel Computing Center（IPCC）：東京大学は 2013 年 12 月から IPCC のメンバーとして活動している（世界で約 60 拠点、日本には 3 拠点）。Intel Xeon/Phi 上での最適化、チューニングを主として実施している（ppOpen-APPL, ppOpen-MATH, ppOpen-AT）。
    - アメリカ国立 Lawrence Berkeley National Laboratory（LBNL）：LBNL と東京大学情報基盤センターは共同研究協約を結んでおり、Automatic Tuning（自動チューニング）、Communication/Synchronization Reducing Algorithm、H 行列法に関する共同研究、情報交換を実施している（ppOpen-APPL/BEM, ppOpen-MATH/MG, ppOpen-AT）。
    - 国立台湾大学：国立台湾大学数学科学研究センター（TIMS）と東京大学情報基盤センターは共同研究協約を結んでおり、王偉仲教授のグループとは Automatic Tuning（自動チューニング）、並列前処理手法に関する共同研究を実施している。
      - ◇ 王偉仲教授のグループで開発した AT 方式（サロゲーションモデル）の適用対象として ppOpen-AT の AT 機能を拡張して適用している（ppOpen-AT）。
      - ◇ 王偉仲教授のグループとは悪条件並列前処理実装法に関する共同研究を実施

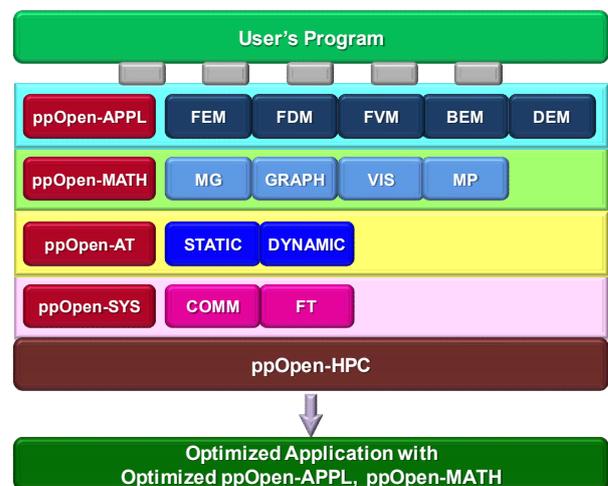
している (ppOpen-APPL/FVM)。

- Aleksandra Maluckov 氏 (Belgrade 大学 (セルビア)) : 「双極性ボーズ・アインシュタイン凝縮シミュレーションに対する並列 H 行列法 (HACApK) の適用」に関する研究を行っている (ppOpen-APPL/BEM)。

### § 3 研究実施内容及び成果

#### 3.1 ppOpen-HPC の設計 (東大情報基盤センター・中島グループ)

本研究ではメニョコアクラスタに基づくポストペタスケールシステムの処理能力を十分に引き出す科学技術アプリケーションの効率的な開発, 安定な実行に資する ppOpen-HPC の研究開発を実施している。大規模シミュレーションに適した 5 種の離散化手法 (有限要素法, 有限差分法, 有限体積法, 境界要素法, 個別要素法) に限定し, 各手法の特性に基づきハードウェアに依存しない共通インタフェースを有するアプリケーション開発用ライブラリ群, 耐故障機能を含む実行環境を実現する。ppOpen-HPC は図 1 に示す, 以下の 4 つの層より構成される (カッコ内は担当グループ) [原著論文 21,65] :



- ppOpen-APPL : 各手法に対応した並列アプリケーション開発のためのフレームワーク (中島・佐藤・古村・奥田・岩下・阪口グループ)
- ppOpen-MATH : 各離散化手法に共通の数値演算ライブラリ群 (中島・佐藤グループ)
- ppOpen-AT : 科学技術計算のための自動チューニング (AT) 機構 (中島グループ)
- ppOpen-SYS : 耐故障機能に関連するライブラリ群 (中島グループ)

図 1 ppOpen-HPC の構成, 利用イメージ

本サブテーマでは, ppOpen-HPC 全体の設計を実施した。各離散化手法に関するアプリケーション開発フレームワーク ppOpen-APPL (ppOpen-APPL/FEM (奥田グループ), ppOpen-APPL/FDM (古村グループ), ppOpen-APPL/FVM (中島・佐藤グループ), ppOpen-APPL/BEM (岩下グループ), ppOpen-APPL/DEM (阪口グループ)), については以下の機能を開発する :

- データ入出力, 領域間通信
- 簡易領域分割ユーティリティ
- 係数マトリクス生成部・陽解法ソルバー
- 離散化手法の特性を考慮した前処理付き反復法等の各機能

ppOpen-APPL では, 各グループ担当者が先行研究で開発済みの大規模シミュレーションコードを元に上記, 各機能をモジュール化, ライブラリ化した。特に, 並列分散データ構造については, メンバーの多く関わった GeoFEM, HPC-MW 等のフレームワークで使用していたものを採用した。また, ppOpen-APPL を使用したアプリケーションプログラムを自ら開発, 実行し, 動作の検証, 更なる機能の向上を実施した。

マルチコアクラスタ向けの ppOpen-APPL, ppOpen-MATH/VIS, ppOpen-AT/STATIC を平成 24 年 11 月にオープンソースとして公開し, 併せて英文ドキュメントの作成, MIT ライセンスによる公開もプロジェクトホームページ (<http://ppopenhpc.cc.u-tokyo.ac.jp/>) より実施している。各機能は MPI/OpenMP ハイブリッド並列プログラミングに対応している。平成 25 年度以降はポストペタスケールシステムとして想定しているメニョコアクラスタ向け機能の開発, 公開を実施している。ppOpen-APPL の各機能は Fortran で記述されているが, より一層の普及を図るため, 平成 26 年度より C 言語インタフェースを整備しており, 既に, ppOpen-APPL/FDM, ppOpen-APPL/FVM 向けのインタフェースは既に整備され, 今後順次公開の予定である。ppOpen-HPC は初心者から上級者まで幅広い利用者のニーズに応えることができる。各機能の詳細, 公開の状況については, 以下の各サブテーマにおいて述べる。

### 3.2 ppOpen-APPL/AMR-FDM の研究開発（東大情報基盤センター・中島グループ）

#### ① 実施方法

本研究では ppOpen-APPL ライブラリ群において提供される各離散化手法に対して適合格子細分化(Adaptive Mesh Refinement, AMR)法を導入し、ポストペタスケールの計算機環境において更なる計算性能の向上を実現する AMR フレームワークを開発することを目的とする。AMR 法ではシミュレーション内に生起する現象の空間的特性長を各格子点においてモニターし、それに対応した最適な空間分解能をもつ格子システムを局所階層的かつ動的に導入することにより、全体として計算資源の利用を抑えつつもマルチスケールシミュレーションを可能にする(図 2)。

AMR フレームワークの開発に際して、以前より神戸大学で開発が進められていた AMR 機能を有するプラズマ粒子シミュレーションコード Parmer を原型コードとして、そこから AMR 機能と負荷分散機能の方法論を参考に、新たに有限差分法用汎用 AMR フレームワークとしてライブラリ化を行う、という方法で実施した。

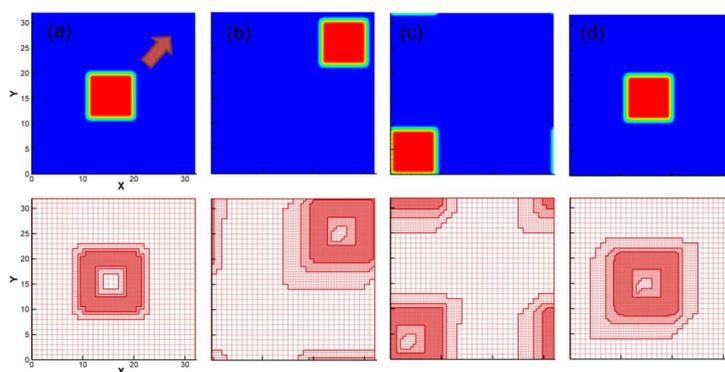


図 2 ppOpen-APPL/AMR-FDM による移流方程式のシミュレーション例(上:波形のコンター図, 下:計算格子)。波形は図中の矢印方向へ伝播し、境界は周期境界条件、急勾配領域を細分化するように AMR criterion を設定

#### ② 研究成果

H25～H26 年度にかけて、陽的有限差分法用 Cell-based AMR フレームワークの設計・開発・評価、ならびにそのライブラリ(ppOpen-APPL/AMR-FDM)の公開を行った。本フレームワークの機能として、各種 kernel に対応できるように汎用性を持たせるため、支配方程式の離散式を記述する kernel 部分をフレームワークから切り離し、利用者が自由に kernel 部を記述できるようにしていることや、MPI プロセス並列化に伴い発生する各プロセス間の計算負荷の不均一を是正する機構として動的領域分割(Dynamic Domain Decomposition, DDD)法を実装していること、などが挙げられる[原著論文 48]。

図 3 に代表的な計算条件(512 MPI プロセス並列時)における ppOpen-APPL/AMR-FDM ライブラリによる 3 次元移流方程式のシミュレーション結果として(1)DDD を導入しない場合(各プロセスが対応する計算領域を固定、青線)と、(2) DDD を導入する場合(赤線)の計算時間の変化を示す。DDD を導入することによって、各プロセス間で計算負荷に偏りが生じた際に、負荷バランスが均衡するよう計算領域を動的に再分割し、負荷の偏りによる計算速度の劣化を抑える。その結果として図 3 左に示すように DDD を導入しない場合に比べ計算時間を低減させることができる。DDD 機能は常に各プロセス間の負荷の状況を観測しており、設定した DDD criterion に応じて動的に ON/OFF を行う。図 3 右は DDD が ON/OFF 時それぞれの場合における計算時間の違いを示しており、この差が DDD 機能のオーバーヘッドとなるが、これを含めても DDD を導入しない場合と比較して十分に DDD の効果があることがわかる。

一方、上記の Cell-based AMR フレームワークでは、kernel 部分をライブラリの仕様に沿って使用者自らが実装する必要があるため、更なる使用者の利便性向上へ向けて、Block-based AMR フレ

ームワークの設計・開発を進めた[ポスター22]。Block-based AMR フレームワークでは、計算空間内の格子を細分化する領域をブロック単位に分けることで、そのブロック内部では従来の整合配列データ構造を持つ kernel の利用が可能となるため、AMR フレームワークとしては Cell-based AMR よりも、よりライブラリ化に適している。

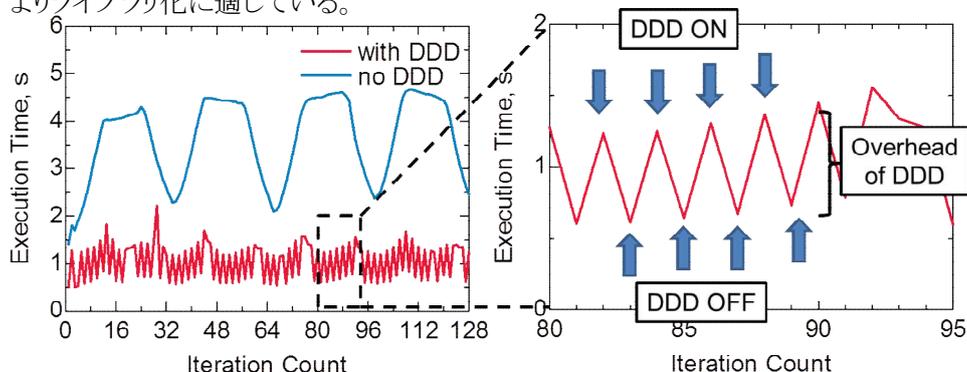


図 3 代表的な計算条件における DDD の有無による毎計算ステップに対する計算時間(512 プロセス並列時)

H26 年度から最終年度である H27 年度にかけては、AMR フレームワークの追加機能として、Multigrid 法を併用する陰解法用 kernel の実装を可能とするための改良を進めた。Multigrid 法で用いる V-Cycle の各階層レベルと AMR による格子の階層を対応させることによって、AMR 機能による格子の細分化と Multigrid 法の適用を同時に行うことを目指す。また、理工学分野への応用の一環として ppOpen-APPL/AMR-FDM の原型コードである Parmer を用いて、理工学分野への応用を進めた。宇宙推進用イオンエンジンのイオンビーム中和器のプラズマ挙動に関するシミュレーション[ポスター28]、反応性プラズマ蒸着装置開発に向けたシミュレーション[ポスター37] (図 4) を実施した。AMR 機能を導入し、計算空間内の密度分布に適したサイズの格子を利用することにより、静的な格子系では 10 億個必要と見積もられた粒子数を 1000 万個程度まで減らすことができ、計算時間を低減させることに成功した。

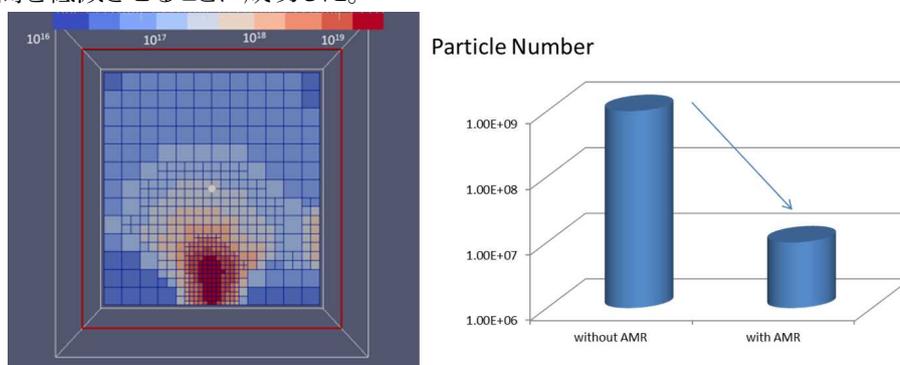


図 4 反応性プラズマ蒸着装置開発に向けたプラズマ数値シミュレーション(左:蒸着装置内プラズマ密度と計算格子分布, 右:AMR 機能の有無による計算に必要な粒子の数の推移)

### ③ ソフトウェア公開状況

これまでの研究・開発によって作成され公開されたソフトウェアは、有限差分法用汎用 AMR フレームワーク ppOpen-APPL/AMR-FDM Ver.0.3 であり、今後 Ver.1.0 を公開する予定である。同ソフトウェアは、有限差分法用汎用 AMR フレームワークであり、利用者自らが計算 kernel 部を実装することにより様々な計算 kernel の利用を実現できる設計となっている。Ver.0.3 では、陽解法用 kernel の実装が可能であり、また Ver.1.0 では、Multigrid 法を併用した陰解法 kernel の実装が可能となる見込みである。ソースコードは Fortran95 の標準的な文法で記述されており、実行実績のあるマシンは Intel コンパイラを搭載した Linux マシンや Oakleaf-FX (富士通 FX10) がある。本ソフトウェアはマルチスケールシミュレーションを目指す広範囲な分野に応用できると想定され、動的負荷分散

機能の方法論はエクサスケールへ貢献できると考えられる。

### 3.3 ppOpen-APPL/FVM の研究開発（東大情報基盤センター・中島グループ）

#### ① 実施方法

ppOpen-APPL/FVM は有限体積法 (Finite Volume Method, FVM) によるアプリケーション開発フレームワークであり、データ入出力、領域間通信、簡易領域分割ユーティリティ、係数マトリクス生成部・陽解法ソルバー、前処理付き反復法、適応格子・動的負荷分散等の各機能を提供する。ppOpen-APPL/FVM は、担当者がこれまでに開発した、有限要素法、有限体積法に基づく下記のアプリケーション群の主要機能を取り出し、並列化、最適化によってフレームワークとして整備し、新しい機能を付加したものである。

- A) Parthasarathy, V., Kallinderis, K. and Nakajima, K., Hybrid Adaptation Method and Directional Viscous Multigrid with Prismatic/Tetrahedral Meshes, AIAA Paper 95-0670, 1995
- B) Nakajima, K., Fingberg, J. and Okuda, H., Parallel 3D Adaptive Compressible Navier-Stokes Solver in GeoFEM with Dynamic Load-Balancing by DRAMA Library, HPCN Europe 2001, Amsterdam, Netherlands, Lecture Notes in Computer Science 2110, p.183-193, Springer, 2001.
- C) Nakajima, K., Parallel Iterative Solvers of GeoFEM with Selective Blocking Preconditioning for Nonlinear Contact Problems on the Earth Simulator, ACM/IEEE Proceedings of SC2003, 2003

#### ② 研究成果

平成 25 年度までは上記参考文献 A), B) に基づき、圧縮性流体シミュレーションをサポートするための機能の開発を実施した。三角柱要素、四面体要素を使用し、辺ベース有限体積法 (陽解法) のプログラムを作成するためのフレームワークを整備した。平成 24 年 11 月に Ver.0.1.0 をサンプルコード、領域分割ユーティリティとともに公開し、平成 25 年度には領域間通信部分の最適化を実施し、平成 25 年 11 月公開の Ver.0.2.0 に反映した。

平成 26 年度以降は、上記参考文献 C) に基づき、主として陰解法向けのフレームワーク [口頭発表 93] の開発を実施するとともに六面体要素を追加した。連立一次方程式の求解に使用する OpenMP/MPI ハイブリッド並列プログラミングモデルによる前処理付き反復法については、主として Sliced ELL 法に基づき Intel Xeon/Phi 等のメニコア向けの解法に関する研究開発を実施した [口頭発表 38,75] [ポスター 34] (成果の詳細については 4.7 で一部を紹介する) 他、GPU 向けに OpenACC を使用した実装に関する研究開発も実施した [口頭発表 65,91,171]。また、悪条件問題向けの前処理手法である ILUT (p,d,t) 法、領域分割法を提案し Fujitsu FX10 (Oakleaf-FX) を使用して安定な収束性と高い並列性能を得ている [原著論文 13]。また、並列可視化機能である ppOpen-MATH/VIS のインターフェースも整備した。この他、有限要素法における行列生成プロセスの最適化における先駆的研究も実施している [口頭発表 68,94]。

#### ③ 成果の位置づけ・エクサスケールへの貢献度

本研究は担当者がこれまでに開発した、並列有限要素法、有限体積法フレームワーク (GeoFEM, HPC-MW) に基づいている。これらは、既に、地球シミュレータ、T2K 等のシステムで高い並列性能、安定性を得ているが、今回は特に前処理付き反復法の最適化に注目している。疎行列格納法の一つである Sliced ELL 法は、CPU、GPU において高い性能を発揮することが知られているが、これまでは疎行列ベクトル積にのみ適用されてきた。本研究では、複雑なデータ依存性を有する前進後退代入を含むプロセスへの適用手法の提案と実装を世界に先駆けて実施しており、特に Intel Xeon/Phi 等のメニコア上で高い性能を発揮している。本手法は、1 ノード当りのスレッド数が数百から数千のオーダーとなるエクサスケールのアーキテクチャでは特に有効な手法である。

また有限要素法における行列生成プロセス最適化においても、Intel Xeon/Phi で高い性能が得られており、エクサスケールシステム上でのアプリケーション開発に大きく貢献すると期待される。

#### ④ ソフトウェアの公開状況

現在は、ppOpen-APPL/FVM Ver.1.0.0 として、基本的な機能を公開している。

ppOpen-APPL/FVM はそれまで有限要素法, 有限体積法のプログラムを作った経験が無い人でも手軽に利用でき, 並列アプリケーションを用意に開発することができる。線形ソルバー等の機能を切り出して使うことも可能であり, ppOpen-HPC の特徴である初心者から上級者まで幅広い利用者をカバーすることが可能である。

現在は悪条件問題向けの前処理手法, 対応した領域分割手法に対応したユーティリティ等は研究途上であるため, 公開していないが, 今後広範囲のアプリケーションにおける安定性が保証されれば, 順次公開していく予定である。また, 適応格子・負荷分散機能についても今後, 開発, 公開を実施する予定である。

### 3.4 ppOpen-MATH の研究開発 (東大情報基盤センター・中島グループ)

#### ① 実施方法

ppOpen-MATH は ppOpen-APPL のサポートする各離散化手法に共通の数値演算ライブラリ群であり, ここでは ppOpen-MATH/MP を除く以下のライブラリ群を開発する:

- ppOpen-MATH/MG: 多重格子法を前処理手法とし, 様々な問題を安定かつ効率的に解けるような機能を提供する Krylov 部分空間型反復解法ライブラリ (詳細は 4.7 で述べる)
- ppOpen-MATH/GRAPH: 領域分割・再分割, リオーダーリングなどのグラフ処理を実施するライブラリ
- ppOpen-MATH/VIS: 局所細分化を含むボクセル型背景格子を使用したリアルタイム可視化ライブラリ

#### ② 研究成果

ppOpen-MATH/MG の詳細については 4.7 で述べる。ppOpen-MATH/GRAPH は領域分割・再分割, リオーダーリング等のグラフ処理を実施するライブラリである。本研究では ppOpen-APPL/FVM の一環として研究開発を実施している様々な前処理付き反復法ソルバーのためにリオーダーリング手法 (Multicoloring (MC), Reverse-Cuthill-McKee (RCM), Cyclic-Multicolored RCM (CM-RCM)) [口頭発表 38,75] [ポスター34], 領域分割ツール (オーバーラップ付き Localized Block Jacobi, 改良型 Hierarchical Interface Decomposition) [原著論文 13] 等を開発し, 高速な計算と安定な収束に貢献している。現在はノード内リオーダーリング手法のマルチスレッド並列化を実施している。

ppOpen-MATH/VIS は局所細分化を含むボクセル型背景格子を使用した並列可視化ライブラリであり, 並列シミュレーションコードに組み込むことによって計算を実施しながら, PC 上の可視化ソフト (Micro AVS, ParaView 等) 向けの可視化用ファイルを出力することが可能である。平成 23 年度から基本的設計を開始し, 平成 24 年 11 月の公開では差分格子用の ppOpen-MATH/VIS-FDM3D を公開し, その後 OpenMP/MPI ハイブリッド化を実施した。本ライブラリは ppOpen-APPL/FDM の可視化ライブラリとして呼び出すことができるようになっている。非構造格子版である ppOpen-MATH/VIS に関しては, 平成 24 年度から基本設計を開始し, ppOpen-APPL/FVM から呼び出すライブラリとして OpenMP/MPI ハイブリッド版も含めて開発済みであり, 実問題による検証を実施している。ppOpen-MATH/VIS は当初 C 言語で開発を実施していたが, 途中 Fortran に変更したため, 当初よりやや開発が遅れている。

#### ③ 成果の位置づけ・エクサスケールへの貢献度

本研究は担当者がこれまでに開発した, 並列有限要素法, 有限体積法フレームワーク (GeoFEM, HPC-MW) に基づいている。これらは, 既に, 地球シミュレータ, T2K 等のシステムで高い並列性能を得ることに成功している。ppOpen-MATH/GRAPH の提供するリオーダーリング, 領域分割手法は大規模計算に不可欠のものであり, 特にエクサスケールシミュレーションでは, 前処理付き反復法の安定な収束と高い計算性能への貢献に対する期待は大きい。並列可視化手法も同様にエクサスケールシミュレーションで重要な役割を果たす。ppOpen-MATH/VIS は大規模な結果ファイルを PC で見られるようにサイズを圧縮する手法を採用しており, 手軽に使用できるツールとして

期待できる。

#### ④ ソフトウェアの公開状況

並列可視化部分については、現在は差分格子用の ppOpen-MATH/VIS-FDM3D を公開しており、平成 28 年 3 月までに非構造格子用の ppOpen-MATH/VIS を公開する予定である。ppOpen-HPC を使用して並列シミュレーションコードを開発する利用者を対象としているが、データ構造、インタフェースを合わせれば一般の並列シミュレーションプログラムから呼び出すことも可能である。

ppOpen-MATH/GRAPH については、現在独立したソフトウェアとしては公開しておらず、ppOpen-APPL/FVM 及びそのサンプルプログラムの一部となっている。今後の予定は未定であるが、特にマルチスレッド並列化されたりオーダリング手法は様々な分野で需要が高いため、今後公開する可能性はある。

### 3.5 ppOpen-AT の研究開発（東大情報基盤センター・中島グループ）

#### ① 実施方法

##### ■概要

ppOpen-APPL で用いられている有限差分法(FDM), 有限要素法(FEM), 有限体積法(FVM), 境界要素法(BEM), 個別要素法(DEM)に現れる計算カーネルの最適化ができる性能自動チューニング(AT)機能と、AT言語を開発する。このことで、多様なポストペタスケールの計算機環境でも高性能を達成する。AT 言語をもとにコード生成、自動実行、および性能パラメータ調整機構を有する AT 機構を実現する。対象となるチューニング手法は、ループ変換やアルゴリズム選択を中心とするハードウェア依存のチューニングである。ppOpen-APPL コードに ppOpen-AT による AT 機能〔招待講演 41〕を自動付加することで、複数の実計算機で稼働する AT 機能付き数値計算ミドルウェアを実現する。

- I. ppOpen-APPL の処理に特化した Domain Specific Language (DSL): ppOpen-HPC に現れる演算パターンに特化することで言語機能を簡素化する。具体的には (1)パラメータ変更機能; (2)ループアンローリング機能;(3)アルゴリズム選択機能;(4)ループ変換機能;(5)演算順序変更機能;に限定し AT 機能を実現する。
- II. ディレクティブ形式の AT 言語: もとのコードの実行を阻害せずに AT 機能を付加することができる。そのため AT 機能付加の際のバグの切り分けを行い、効率的にソフトウェア開発ができる。
- III. ミドルウェア開発者知識の付与: 最適化候補の組合せは制約がない状態では組合せ爆発を起こす。その結果、現実的な時間で AT が実行できない。一方、ループ変換方式によっては、もとのコードに対しメモリ量や演算量が増加するため、開発者の許可が必要であり通常のコンパイラでは実現できない。そこで本研究では、ミドルウェア開発者の知識(許可)をディレクティブ形式で記述し、コンパイラではできないコード最適化を AT 機能として付与する。
- IV. 汎用的な性能モデルを用いたAT方式の開発: 任意のプログラムにおける探索を効率的に行う汎用的な性能モデルとそのAT方式を開発し、かつ、AT 言語としてそのAT方式を提供する。

ppOpen-HPC を利用するユーザは、ppOpen-AT の言語機能とは無関係で、かつ意識せずに、ppOpen-AT による AT 機能の効果を享受できるため、以降の ppOpen-AT の性能評価とは、②AT ライブラリの性能評価を対象として評価を行う。

##### ■AT 実行のタイミング

FIBER 方式により、インストール時、実行起動前時、実行時のAT指定ができる。インストール時 AT と実行起動前時 AT 機能を有する ppOpen-AT/Static と、実行時の指定ができる ppOpen-AT/Dynamic の機能開発を行う。また、大規模計算のソフトウェアユースケースを考慮し、ppOpen-APPL の実コードに実装する AT のタイミングは、問題サイズ、MPI プロセス数と OpenMP スレッド数がユーザにより確定した時点で行う実行起動前時 AT を実装することを前提とする。

■ 提供機能

ループ変換機能: ループ分割(Loop Split), ループ融合(Loop Collapse)を提供する。ループ変換機能は, ppOpen-AT 固有の新規開発ディレクティブとして実現し, 本研究での成果である。ループ分割とループ融合指定には, **!oat\$ install LoopFusionSplit region start ~!oat\$ install LoopFusionSplit region end** 指示子, ループ分割場所指定には, **!oat\$ SplitPoint** 補助指示子, および, ループ分割のため再計算が必要となる箇所には, **!oat\$ SplitPointCopyDef region start ~ !oat\$ SplitPointCopyDef region end** 補助指示子で指定される。AT 言語の機能としてこれらの機能を提供することは世界初となる。

式並び変更およびアルゴリズム選択機能: 式並び変換機能は ppOpen-AT の新規開発ディレクティブ **!OATS RotationOrder sub region start ~ !OATS RotationOrder sub region end** 補助指示子で指定される。ループ分割, ループ変換との併用が可能である。式並び変更機能を, AT 言語として提供することは世界初である。また, アルゴリズム選択機能と, ループ変換機能の併用が可能であり, この併用機能を AT 機能として提供することは世界初となる。

② 研究成果

平成 25 年度までは ppOpen-AT のループ変換を中心とする各 AT 機能の策定, 適用, 効果検証を, ppOpen-APPL/FDM, ppOpen-APPL/FVM, ppOpen-APPL/BEM を用いて行った。複数の計算機環境で AT 機能の評価し, 有効性を検証した。

平成 26 年度以降は, Xeon Phi 特有の AT 機能, アルゴリズム選択機能, および GPU などの非均質計算環境に向けた機能拡張を行った。以下に, 特筆する成果を記載する。

ppOpen-APPL/FDM における AT 効果: Xeon Phi クラスタにおいて, ppOpen-AT による AT 機能を ppOpen-APPL/FDM ver.0.2.0(東大情報学環・古村グループ)へ適用した。その結果を図 5 に載せる。なお, 「P8T240」の記載は, MPI 8 プロセス, 1MPI プロセスあたり OpenMP の 240 スレッドの実行を意味する。

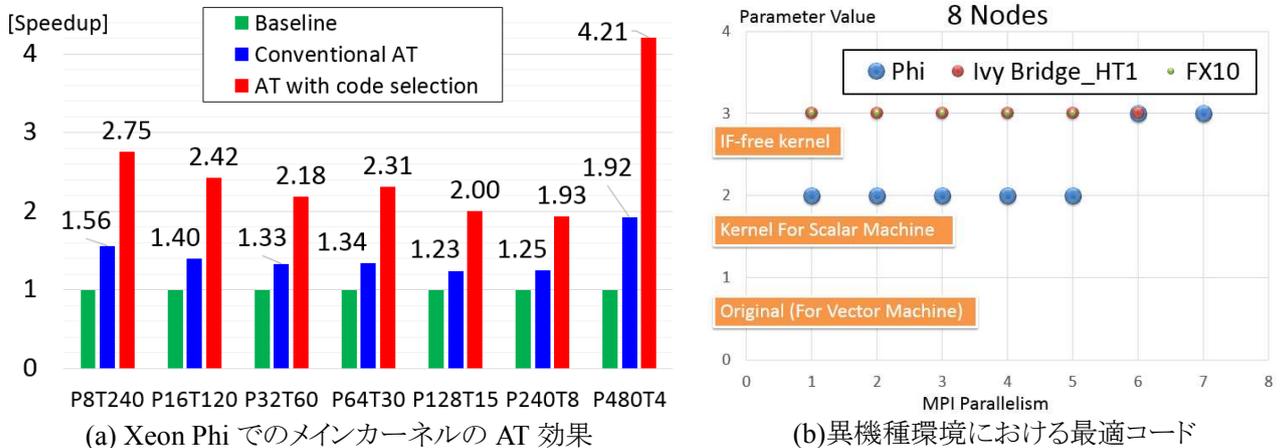


図 5 ppOpen-APPL/FDM における AT 効果

図 5 から以下が検証でき, 本研究で開発した AT 機能の有効性が実証された。

- Xeon Phi において, ループ変換とアルゴリズム選択機能の AT を実装することで, ppOpen-APPL/FDM における最大負荷の演算カーネルにおいて, 最大で 4.2 倍の速度向上が達成できた(図 5(a))。これは, 従来のループ変換のみの AT では実現できなかった高速化であり, 本年度開発の AT 機能の有効性が高いことが示された。
- Xeon Phi, Intel Ivy Bridge, および Fujitsu FX10 を用いた複数の計算機環境で評価の結果, 並列処理の実行形態の違いにより, 最速となる演算カーネル(AT の候補)が異なることが明らかとなった。そのため, ppOpen-AT により, 異なる計算機環境でも高性能が達成できることが

実証された。(図 5(b))

⑤ 成果の位置づけ・類似研究との比較

AT 言語の観点での位置づけ

表 1(次頁)に、以上で示したコード変換機能等の AT 方式の新規性を、既存の AT 言語の観点からまとめた結果を載せる。

表 1 から、既存研究においては、ppOpen-AT で開発された、以下の機能を明示的に行う AT 機能とディレクティブが提供されていない：

- 演算量やメモリ量を増加するループ融合とループ分割[原著論文 40,54,60]
- 演算式の変更機能[原著論文 54]、および、
- アルゴリズム選択、および、階層性を有する AT 記述指定、

本研究において、初めてこれらの AT 機能の有効性を検証し、さらには、実アプリケーションを用いて性能実証を行った。

一方、本研究では、FIBER 方式により全ての AT 候補は静的に一度だけ生成されるため、スクリプト言語やコンパイラ基盤が一切不要である。そのため、運用中のスパコン環境でも簡便に AT が動作する。このような静的にコード生成を行う AT 方式が採用されているのは FIBER 方式による AT ソフトウェアのみであり、AT ソフトウェア構築方式としてオリジナリティを有する。

表 1 既存研究との比較

AT Language / Items	# 1	# 2	# 3	# 4	# 5	# 6	# 7	# 8
ppOpen-AT	OAT Directives	✓	✓	✓	✓	✓		None
Vendor Compilers	Out of Target			Limited				-
Transformation Recipes	Recipe Descriptions	✓					✓	ChILL
POET	Xform Description	✓					✓	POET translator, ROSE
X language	Xlang Pragmas	✓					✓	X Translation, 'C and tcc
SPL	SPL Expressions	✓				✓	✓	A Script Language
ADAPT	ADAPT Language	✓					✓	Polaris Compiler Infrastructure, Remote Procedure Call (RPC)
Atune-IL	Atune Pragmas					✓		A Monitoring Daemon
PEPPHER	PEPPHER Pragmas (interface)	✓				✓	✓	PEPPHER task graph and run-time
Xevolver	Directive Extension (Recipe Descriptions)		(✓)	(✓)	(✓)			ROSE, XSLT Translator

#1: Method for supporting multi-computer environments. #2: Obtaining loop length in run-time.  
 #3: Loop split with increase of computations<sup>3)</sup>, and loop collapses to the split loops<sup>2),3),4)</sup>.  
 #4: Re-ordering of inner-loop sentences<sup>3)</sup>. #5: Code selection with loop transformations (Hierarchical AT descriptions)\* This is originality in current researches of AT as of 2015. #6: Algorithm selection.  
 #7: Code generation with execution feedback. #8: Software requirement.

汎用的な性能モデルの観点

工学院大学との共同研究により、d-Spline に基づく AT 方式と ppOpen-AT への拡張[原著論文 51]を行った。疎行列演算などの基本的な数値計算演算へ、本 AT 方式の適用と AT 効果の実証に成功した。d-Spline による汎用的な性能モデルを用いた AT 方式は我が国独自の技術であり、オリジナリティが高い。

⑥ ソフトウェアの公開状況

■ 公開済みのもの (ppOpen-AT ver.0.2.0)

最適化候補のコード生成機能として、ループ分割、ループ融合、式並び変換、ループアンローリング、およびコード選択機能を提供している。ppOpen-APPL/FDM ver.0.2.0(古村グループ)、ppOpen-APPL/BEM ver.0.1.0(岩下グループ)、および、ppOpen-APPL/FVM(中島・佐藤グループ)のコードに対して AT を適用できる。それぞれ、AT 機能付き ppOpen-APPL として、ppOpen-AT ver.0.2.0 による自動生成コードを公開している。

AT 対象となるコードを静的に自動生成し、対象となるプログラムに蓄積することで、計算機環境で提供されるコンパイラのみを利用するだけで AT 機能が実現される。コードの自動生成のための

プリプロセッサはスクリプト言語を一切使用せず、C++コンパイラのみでコンパイル可能である。多くの国産スーパーコンピュータにインストールできる。このことで、コード自動生成時に遠隔利用をする必要がなく、簡便な AT 機能の利活用を実現した。

ppOpen-AT で実行可能なコードは以下の 2 種がある：(1)ppOpen-AT のプリプロセッサが実行できる環境；(2)ppOpen-AT が自動生成するコードが実行できる環境；

(1)は、富士通 FX10, Intel X86アーキテクチャ(XeonおよびXeon Phi)での実行が確認されている。(2)は、富士通 FX10 (Sparc64 IXfx, 16 コア), T2K オープンスパコン (AMD Opteron 8356, 16 コア), Intel Xeon (Sandy Bridge, Ivy Bridge), SR16000 (Power7, 32 物理コア, 64 スレッド)で動作を確認した。またこれらの環境において、AT による速度向上の効果があることを実証した。

既に説明したように ppOpen-AT は、ppOpen-HPC のコード開発者のための AT 機能の付加ツールであり、一般のプログラマが ppOpen-AT のユーザになることは想定されていない。一般ユーザは、ppOpen-AT により自動生成された AT 機能付き ppOpen-HPC を利用し、意識せずに AT の恩恵を受ける。この一般ユーザは、AT 機能付き ppOpen-HPC コードのダウンロードを行ったユーザであり、すでに多数存在が確認されている。

一方 ppOpen-AT の開発目的以外の利用がある。この利用者を「潜在ユーザ」と定義する。以下にその種別を述べる。

- 第1種 潜在ユーザは、AT 研究者である。ppOpen-AT はフリーコードによる提供をしている数少ない AT 言語である。提案する自らの AT 方式との比較対象として、ppOpen-AT を利用することを目的とする。
- 第2種 潜在ユーザは、コンパイラ開発者である。コンパイラが提供する性能最適化が十分か調査する目的で、ppOpen-AT による最適化との性能比較を行うことを目的とする。
- 第3種 潜在ユーザは、低いコストでチューニングの効果を知りたいコード開発者である。自分が持っているプログラムに、ppOpen-AT が提供する AT 機能を適用することで、どれだけ性能が向上するか調査することを目的にする。ここでこのユーザは、自分のコードに AT 機能を実装することは目的ではない点に注意する。

第1種 潜在ユーザは、我々と共同研究を行っている研究者である。少なくとも、工学院大学、東京大学、および、国立台湾大学の研究者がこの種別のユーザとして存在している。

#### ■公開予定のもの (ppOpen-AT ver. 1.00, 2016 年 3 月中)

ppOpen-AT ver. 0.2.0 の機能に加え、以下の機能を提供する。

- ppOpen-APPL/FDM における、アルゴリズム選択機能(階層型 AT 方式)の実装。
- ppOpen-APPL/FVM における、Xeon Phi におけるデータプリフェッチ距離を AT する機能。
- GPU (OpenACC) の対応機能

今後の展開としては、以下の機能について、研究段階として AT 効果を確認している。これらの最新成果をもとに、今後 ppOpen-AT への実装を計画している。

- OpenACC のディレクティブ選択： GPU を利用するためのディレクティブ OpenACC では、並列処理の実行方式の種類(gang, vector, parallel 等)の指定がいくつか存在し、これらの指定はプログラマ自身が行う。また、並列実行のためのブロックサイズの指定が必要であり、そのサイズが性能に影響を及ぼす。これら並列処理の実行方式の種類やブロックサイズの値をチューニングする ppOpen-AT の拡張[口頭発表 171]を行う。
- OpenMP の動的負荷分散方式： ppOpen-APPL/FDM の演算カーネルにおいて古村 G によるコード最適化方式の調査により、OpenMP の動的スケジューリング schedule(dynamic, n)の指定が有効であることが確認されている。動的スケジューリングを行う/行わないの指定、および、チャンクサイズ n の値の AT 機能を ppOpen-AT に拡張機能として実装する。

#### ⑦ エクサスケールへの貢献度

本研究により開発された AT 技術は、以下の観点からエクサスケールに資する：

- 1 ノード 200 超の並列実行が可能なミニコア CPU に向くコード最適化技術：ループ融合 (Collapse)によりループ長を長くするループ変換を適用し、実行条件に柔軟に適応した並列性を高める方式を本研究成果の AT 方式により実現することで、次世代スパコンで想定される 1ノード 200 超の並列実行が行われる計算機環境においても高性能化が達成できる道筋を示した。また、その際に必要となる AT 技術の基礎を確立した。
- 電力最適化における AT 技術：電力最適化の AT について、ppOpen-AT が適用できる枠組みを示した〔原著論文 41〕。このことにより、次世代スパコン環境で想定される電力最適化の AT 研究の展開を示した。
- 非均質計算環境向けの AT 技術：OpenMP による動的負荷分散方式、および、GPU の利用を想定した OpenACC ディレクティブへの AT 技術適用により、次世代スパコン環境で想定される非均質な計算機環境に向けた AT 技術の深化を行った。

### 3.6 ppOpen-SYS の研究開発（東大情報基盤センター・中島グループ）

#### ① 実施方法

ポストペタスケール環境におけるシステムソフトウェア関連のライブラリ群 ppOpen-SYS の開発を実施する。ノード間通信ライブラリ (ppOpen-SYS/COMM)、耐故障機能記述ライブラリ (ppOpen-SYS/FT)から構成される。当初は、本研究のターゲットとするポストペタスケールシステムにおける計算ノード間のメッセージパッシング型通信ライブラリ ppOpen-SYS/COMM を開発する予定であったが、McKernel 向けの MPI ライブラリ (理研 AICS 石川チーム) を使用し、本プロジェクトで開発した、通信削減アルゴリズム (4.7) を実装した実アプリケーション上で評価することとした (詳細は 4.7 参照)。

アプリケーション開発者に、容易に耐故障アルゴリズムを記述できる環境を提供するライブラリとして ppOpen-SYS/FT の研究開発を実施する。ポストペタスケール、エクサスケールシステムは数百万から数億規模のコアを有するため、耐故障性 (Fault Tolerant) はシステムの備えるべき必須の機能である ppOpen-SYS/FT はアプリケーションの特性に応じた柔軟な対応が可能であり、より効率的に耐故障機能を提供可能である。以下、4.6 では ppOpen-SYS/FT の開発状況について述べる。

東京大学情報基盤センターの HA8000 クラスタシステム (T2K 東大)、Fujitsu PRIMEHPC FX10 (Oakleaf-FX) 等のマルチコアクラスタにおいて、ppOpen-APPL によるアプリケーション、または研究チームメンバーによる NICAM、COCO などの大規模アプリケーションを対象とした研究開発、検証を実施したのち、ターゲットとするポストペタスケール環境であるミニコアクラスタでの開発を実施する。

#### ② 研究成果

(平成 25 年度まで)

ppOpen-SYS/FT は耐故障機能について容易な記述環境を提供するライブラリである。プログラムのコアループを仮想クロックとして用い、自主的なコーディネーションを行うことで、外部から与えられる最適周期に対応し、同期を極力行わない手法を検討した。また、この検討から、定期的なチェックポイントを取得するに当たり故障率、チェックポイント時間、I/O 帯域により動的に適切なチェックポイント間隔を適用するフレームワークについて提案、実装した。このフレームワークはアプリケーションにいくつかのディレクティブを挿入することにより、自動的にチェックポイントを管理する環境を構築しプロセス間同期を行わずにチェックポイントの間隔変更や取得を行う〔口頭発表 39〕。

さらに実装したプロトタイプについて、T2K 東大の最大 7,680 並列の 3 次元 FDM に適用し環境構築時間の傾向を確認した結果、最大でも 50 秒程度となり、アプリケーション開始時に 1 度しか行われない動作であることを考えると充分実用可能であることが確認されている。

(平成 26 年度以降)

平成 25 年度に行った高並列への評価・対応を加味し大規模海洋シミュレーションコード「COCO」への組み込みに向け、東京大学スーパーコンピュータFX10の環境、および運用ポリシーに合わせた実装の調整を行った。また、ppOpen-APPL/FVMのAMR（Adaptive Mesh Refinement）機能との連携を検討した。最後に、ppOpen-SYS/FT フレームワーク上で効率の良いチェックポイントを実現する仕組みについて予備研究実施し、ppOpen-SYS/FT 上に展開する手法の設計と、適切なクラスタリングを高速に行うための手法の提案・検証を行った〔原著論文 49〕。

平成 27 年度は、大規模海洋シミュレーションコード「COCO」へのフレームワークの組み込みを行った。COCO には、独自のリスタートファイル作成機構が存在するが、設定ファイルに実行者が記述する一定周期にてチェックポイントを行う。ppOpen-SYS/FT では、実行環境や問題サイズに合わせた適切な周期でチェックポイントが作成されるため、チェックポイントファイルの作成を適切な頻度・量に抑えることが可能となった。

### 3.7 通信・同期削減アルゴリズムの研究（線形ソルバー）（東大情報基盤センター・中島グループ）

#### ① 実施方法

本研究では ppOpen-MATH/MG に関して様々な通信削減（Serial, Parallel）による最適化を試みた。また、Krylov 部分空間法においては、内積等による集団通信（Collective Communication）によるオーバーヘッドがノード数増加時に顕著となることが予想されることから、MPI-3 以降でサポートされる MPI\_Iallreduce 等を活用して集団通信を隠蔽する Pipelined アルゴリズム（例えば Ghysels, P. and Vanroose, W., Hiding global synchronization latency in the preconditioned Conjugate Gradient algorithm, *Parallel Computing* 40-7, 224-238, 2014）が提案されている。本研究では理研 AICS 石川研究室で開発された McKernel 向け MPI ライブラリを使用して、このような Pipelined アルゴリズムに適用し、効果を検証する。

#### ② 研究成果

多重格子法ライブラリ ppOpen-MATH/MG については、下記のような研究成果が得られている：

- 平成 23 年度：粗い格子レベルにおけるソルバー（Coarse Grid Solver）の収束性改善、通信量削減に関する検討を実施した〔原著論文 20〕。
- 平成 24 年度：パラメータ自動チューニング手法の開発〔原著論文 29〕、Coarse Grid Solver の収束性改善、通信量削減に関する検討を継続し、CGA 法（Coarse Grid Aggregation）を提案し、性能、有用性を Fujitsu PRIMEHPC FX10 4,096 ノードを使用して約 172 億円の連立一次方程式を解くことによって示した〔原著論文 22〕。
- 平成 25 年度：Serial Communication の改善のために、行列格納法に Sliced ELL 法を適用することにより、従来の CRS と比較して、ELL+CGA 法で 2 倍近い計算性能の向上が得られた（図 6）〔原著論文 32〕。
- 平成 26 年度：Parallel Communication の改善のために、hCGA（Hierarchical CGA）法を提案し、Fujitsu PRIMEHPC FX10 4,096 ノードにおいて、特に Flat MPI の場合に、CGA 法と比較して Weak Scaling で約 60%（図 7）、Strong Scaling で約 6 倍の性能向上が得られた。研究成果をまとめた論文が 20<sup>th</sup> IEEE International Conference for Parallel and Distributed Systems (ICPADS 2014) で Best Paper Award を受賞した〔原著論文 58〕。

#### ③ 成果の位置づけ・エクサスケールへの貢献度

ppOpen-MATH/MG に関する研究はコミュニティでも高い評価を受けており、IEEE ICPADS 2014 で Best Paper Award を受賞した他、SC15 併設のワークショップ Scala 15 でも Keynote Speaker として招待されている。hCGA は MPI プロセスの多い Flat MPI では効果が高いものの、ハイブリッド並列プログラミングモデルではほとんど効果がない。例えば Fujitsu FX10 で 1 ノード 16 スレッド当り

1-MPI プロセスとするような HB 16×1 を適用した場合、*hCGA* が効果を発揮するのは約 25 万ノード(400 万コア)、ピーク性能 60PFLOPS 程度のシステムであり、現在の世界最高速のシステムの約 2 倍の性能である。*hCGA* はエクサスケールシステムに向けて有用な手法であり、多重格子法においては必須である。同様に MPI-3 の非同期集団通信を併用した *Pipelined* アルゴリズムもエクサスケールシステムに向けて有用な手法であると考えられる。

#### ④ ソフトウェアの公開状況

ppOpen-MATH/MG は研究用途のため、公開していないが、公開のリクエストが最も多いライブラリでもある。

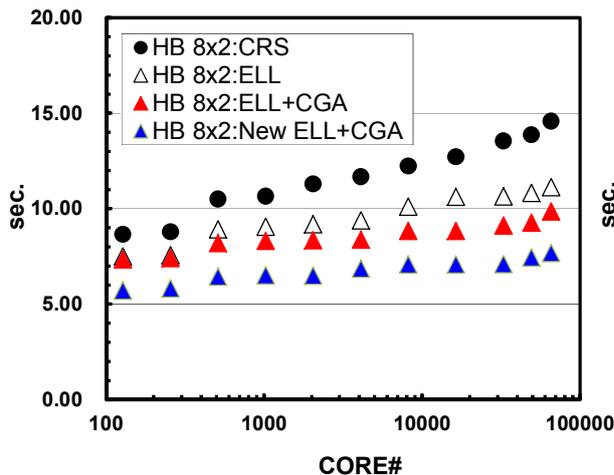


図 6 Fujitsu FX10 における性能評価(Weak Scaling) (最大:4,096 ノード (65,536 コア), 172 億自由度)

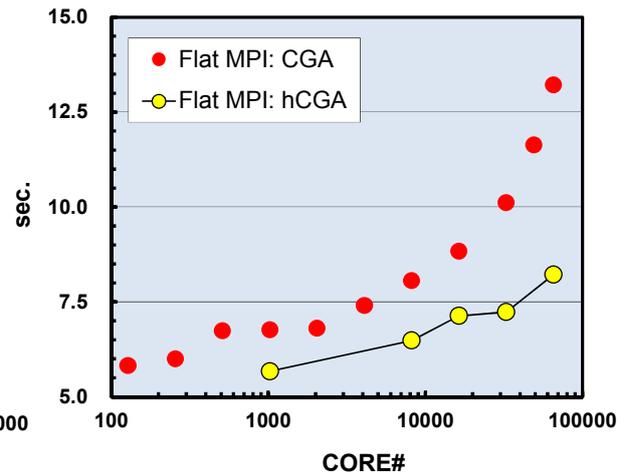


図 7 CGA 法, *hCGA* 法による MGCG の Fujitsu FX10 4,096 ノード (65,536 コア) での性能(Weak Scaling) (Flat MPI, 172 億自由度)

### 3.8 ppOpen-MATH/MP の研究開発 (東大気海洋研・佐藤グループ)

#### ① 実施方法

本研究の目的は、複数のアプリケーションを結合し、大規模データ転送、変換を実施する弱連成のためのカップリングツール ppOpen-MATH/MP の開発である。ppOpen-MATH/MP は、1) ppOpen-APPL のサポートする様々な離散化手法を全てサポートし、二次元、三次元カップリング機能を提供する、2) 異なった離散化手法によるモデル間のカップリングも可能とする、3) 計算プロセスだけでなく、シミュレーションとそれ以外 (IO や可視化等) のプロセスの並列実行も可能とする。ソフトウェアである。これによって、従来、結合の困難だったモデル間での弱連成シミュレーションが可能となる。

離散化手法の異なる複数分野のシミュレーションコードを対象として離散化手法や格子の表現方法などを調査し、カップリングツールの設計を行う。設計に基づいてコードを実装した後、実モデルに適用し設計の妥当性を検証するとともに、検証で明らかになった問題点については適宜改修を実施する。

#### ② 研究成果

研究初年度は、カップラーの検討とマッピングツールの開発、大気海洋モデルを用いた結合試験を行った。カップラーの検討に際して考慮したのは、カップリングライブラリ *Jcup* の利用である(1)。*Jcup* は格子の形状や補間アルゴリズムに依存しない、広汎なモデルの結合を可能にするライブラリである。ただし、実際にモデルを結合するためには格子間の対応関係(マッピングテーブル)を *Jcup* に与え、補間コードを実装する必要がある。従って、モデルに応じたマッピングツールを作製するとともに、*Jcup* をソフトウェアスタックの最下層に置き、補間コードや結合用インタフェースをその上に作成することでカップリングツールを構築することとした。マッピングツールについては、単

純な総当たり法では  $O(n^2)$  の演算量にある計算を  $O(n)$  で実行するアルゴリズムを開発し、実装した(2)。マッピングツール開発の後、大気海洋モデルを用いて結合試験を行った。結合試験の対象としたのは、大気モデル NICAM と海洋モデル COCO である。NICAM は正二十面体格子で地球表面を覆う全球非静力学大気モデルである。一方 COCO は北極点の格子集中を避けるためにユーラシア大陸と北米大陸に極点を移動した Tri-polar 格子の海洋モデルである。これら 2 つのモデルとも従来の緯度経度格子とは異なる格子系を採用した次世代型モデルであり、本研究の目的である様々な離散化手法に対応したカップリングツール開発のテストに最適なモデルと言える。結合試験結果の一部を図 8 に示す。左図は COCO の海面温度、右図はカップラーを通じて NICAM が受信した海面温度である。格子間隔の差が大きい高緯度域では、わずかな差が見られるものの、低緯度域では両者は極めてよく一致しており、補間計算を含むデータ交換が正しく行われていることが判る。

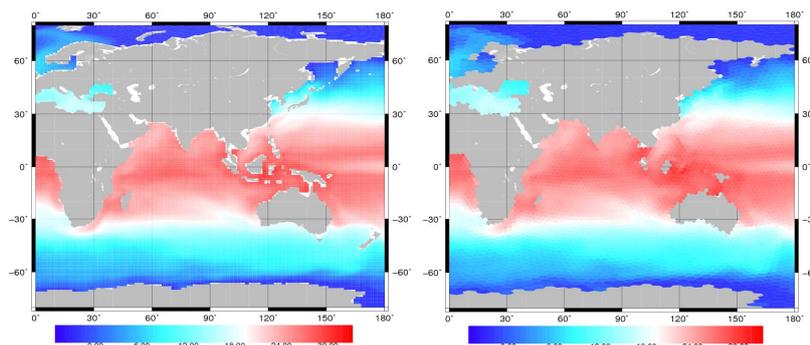


図 8 COCO と NICAM の海面温度  
左図：COCO の海面温度，右図：NICAM の海面温度

研究第 2 年度は大気海洋モデルの結合について時間積分試験を実施するとともに、モデルの出力をリアルタイムで受信し格子変換の後ファイルに出力する IO コンポーネントの作成・試験を実施した(3)。IO コンポーネントは NICAM の正二十面体格子データをリアルタイムに受信し、緯度経度格子に変換した後、ファイルに出力するソフトウェアである。全球大気シミュレーションでは緯度平均した値が重要な情報であり、また気象・気候分野で広く用いられているデータ解析・作図プログラムが緯度経度格子のデータを前提としているなど、NICAM の正二十面体格子は、そのままでは解析に不向きである。そこで NICAM の実行と並列に動作し、計算結果を緯度経度格子に変換してファイルに出力する IO コンポーネントは全体のシステムの中でも重要なパーツと位置づけられる。IO コンポーネント自身も領域分割によって並列化されており NICAM の並列数とは独立にプロセッサを割り当てることができる。

正二十面体格子から緯度経度格子への変換は bi-linear 補間と control volume 補間の 2 種類の補間方法を実装した。

研究第 3 年度は、前年度に作成した IO コンポーネントに対して更なる改良を施した。改良の主要な内容は格子の変換アルゴリズムとして最近傍近似を追加したことである。これによって、NICAM の計算結果について、緯度経度格子への平均化を経ない値を直接取り扱うことが可能となる。最近傍近似は bi-linear 補間の補間点のうち、もっとも補間係数の大きい点の値を採用す

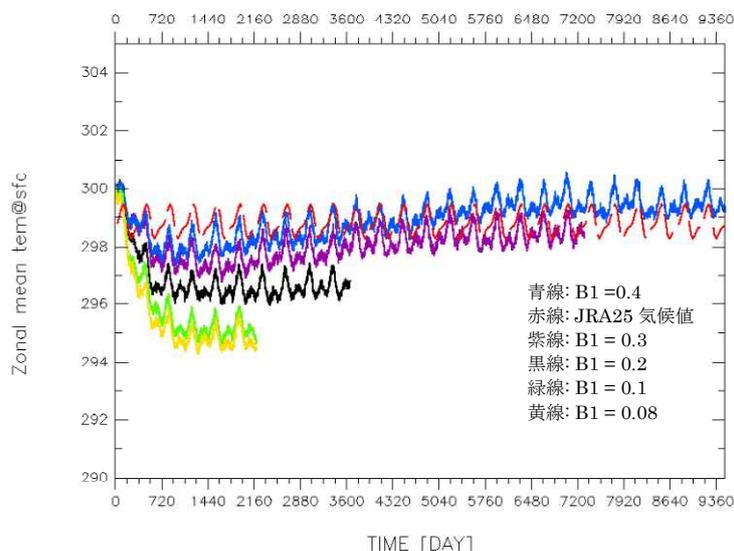


図 9 緯度平均した大気最下層温度の推移

ることで実現される。Jcup は、補間計算プログラムを利用者が自由に改良できる設計になっているため、容易に最近傍近似アルゴリズムを追加することができた。

研究第4年度は、大気海洋モデルの結合での温度ドリフトを解消すべくパラメータチューニングを行うとともに、地震モデルと構造物モデルの結合計算を実施した。はじめにパラメータチューニングについて述べる。大気海洋結合は研究初年度から開発を開始し、第3年度には数十年の長期積分が可能までの完成度となった。そこで 30 年間の積分を実施したところ、対流圏下部の大気および海面付近の水温が低下してゆくドリフトが検出された。調査の結果、このドリフトは放射収支のアンバランスに起因することが判明したため、大気モデルのパラメータを調整することでドリフトの解消を試みた。調整したのは大規模凝結に関するパラメータ B1 である。結果を図 9 に示す。当初の値である B1=0.1 では積分開始 5 年で 5 度程度低下していた気温が、B1=0.3 および B1=0.4 では赤線で示される観測値に近い値に回復していることが判る。

次に、地震モデルと構造物モデルの結合について述べる(4)。結合の模式図を図 10 に示す。地震モデルは各時間ステップで地盤

の変位速度  $U$ ,  $V$ ,  $W$  を計算する。構造物モデルは建築物の他に建物が乗る構造地盤をもっており、地震モデルから与えられる速度の情報は境界条件として構造地盤の格子が受信する。構造物モデルは変位を入力情報とするため、カップラーの補間計算ルーチンで速度から変位への変換計算を行うようにした。

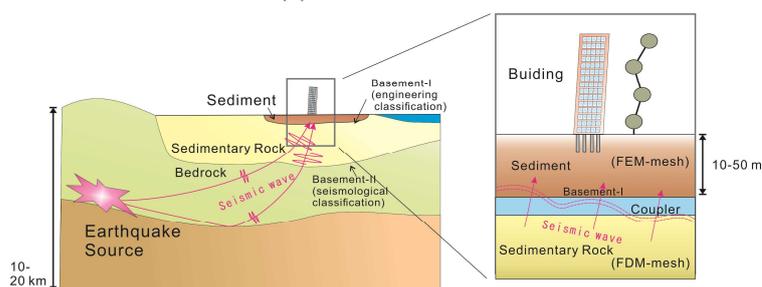


図 10 地震構造物結合の模式図

にした。地震モデルと構造物モデルの結合は東京大学情報基盤センターが実施している FX10 スーパーコンピュータシステム(Oakleaf-FX)全系を使用する大規模 HPC チャレンジの一環として行われた。今回の計算では構造物として京コンピュータの建て屋をモデリングした上で、このモデルを地盤の異なる2地点に設置し地震モデルと結合した。計算領域は阪神淡路地域の東西約 60km 南北約 60km の領域である。震源は淡路島中部に、また構造物モデルは京コンピュータの建て屋のあるポートアイランドと、比較的地盤の強固な神戸スタジアムの位置に設定した。

地震モデルと構造物モデルの計算条件を表 2 に示す。地震モデルの水平格子間隔は 40m, 鉛直 20m, 格子点数は 1536×1536×1600, 構造物モデルの全節点数は約 570 万節点である。構造地盤の格子間隔および格子位置は地震モデルと同じになるようにした。構造地盤の領域サイズは東西南北 1km, 鉛直 300m である。

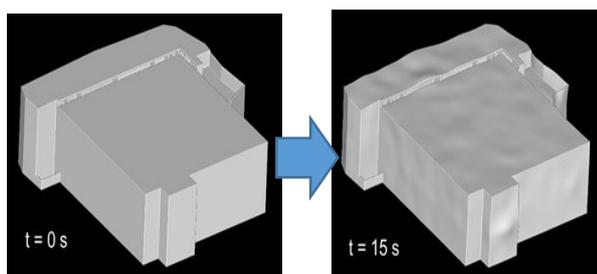


図 11 構造物モデルの変位

地震モデルは 3 次元の領域分割を採用しており、今回の分割数は 16×16×10=2560 である。各領域を 1 計算ノードに割り当て、ノード内は OpenMP によるスレッド並列を用いて並列化した。一方、構造物モデルで用いた計算ノードの数は 1000 ノード× 2=2000 ノードである。

$\Delta T$  はそれぞれ 1 ミリ秒と 0.2 ミリ秒であり、データ交換は 1 ミリ秒毎に行われる。

表 2 地震構造物結合計算の計算条件

	格子点数・節点数	格子間隔	計算ノード数	$\Delta T$
地震モデル	1536×1536×1600	40m, 40m, 20m	16×16×10=2560	1m sec
構造物モデル	5,705,600	可変(構造地盤は地震モデルと同一)	1000 ノード×2	0.2m sec

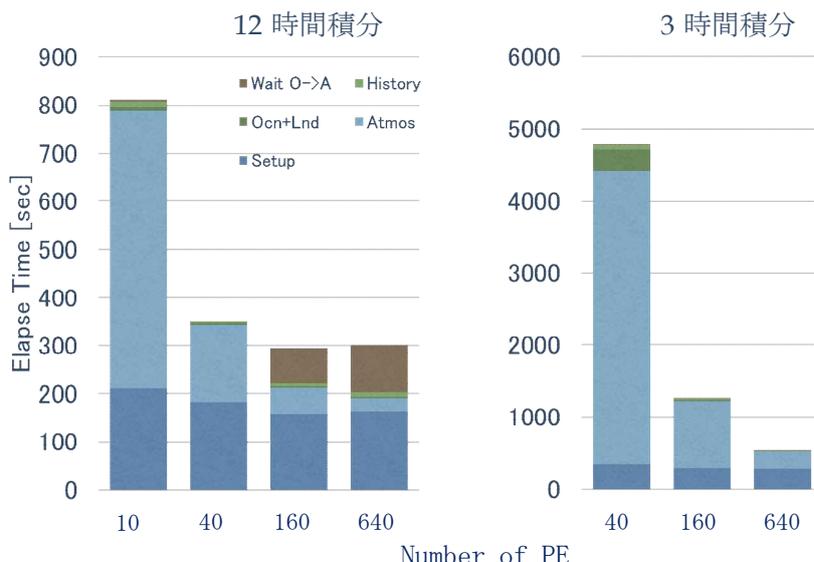


図 12 大気海洋結合の実行時間 左図：GL07、右図：

FX10 を 4560 ノード用いた計算では、地震モデル側は 6 時間の計算時間で予定していた 90 モデル秒の計算を終了した。一方、構造物モデルは 16 時間の計算時間で 20 モデル秒の計算まで実施できた。地震モデル側が構造物モデル側よりも早く計算が終了した理由は、地震モデル側で call した `mpi_isend` で送るデータが MPI ライブラリの内部バッファに蓄積されることで直ちに次の計算に復帰できる(非同期通信)ことによると考えられる。計算結果の一部としてポートアイランド地点に設定した構造物モデルの変位を図 11 に示す。部分的な変形とともに、図ではわかりにくいだが地盤の動きによって建物全体が振動し初期位置からずれている。

研究第 5 年度は大気海洋結合モデルを高解像度化し性能測定を実施するとともに、カップリングツールのインタフェースを整備し様々なモデルに対して汎用的に用いることができるようにした。はじめに大気海洋結合の性能測定結果を図 12 に示す。左図は大気モデルの解像度 GL07 (格子点数 163840)、右図は解像度 GL09 (格子点数 2621440) の結果である。横軸は使用したノード数、縦軸は実行時間を表す。海洋モデルの解像度は  $0.25^\circ$  (格子数  $1440 \times 720$ )、用いたノード数は 32PE である。青は初期化に要する時間、水色は時間積分ループ中の大気の計算時間、茶色は海洋モデルからのデータ待ち時間を表す。海洋モデル 32PE に対して解像度 GL07 では 160PE 以上を用いると大気モデルの実行速度が海洋モデルを上回りデータ待ちが生じることが判る。解像度 GL09 の場合はいずれのノード数でもデータ待ちは生じず、ノード数に応じて実行時間が短くなっている。

更に基本的なインタフェースを整備して ppOpen-HPC 上で開発された FEM コード、FDM コードから呼び出せるようにした。

### ③ ソフトウェア公開状況

これまでの研究・開発によって作成されたソフトウェアはマッピングテーブル計算プログラム ppOpen-MATH/MP-PP およびカップリングツール ppOpen-MATH/MP である。両者はいずれも公開されており、下記のような機能・特徴を有する。

#### マッピングテーブル計算プログラム

格子間の対応関係および補間係数を計算する機能を有し、対応関係の計算に演算量  $O(n)$  の高速なアルゴリズムを実装していることが特徴である。実行実績のあるマシンは Intel コンパイラを搭載した Linux クラスタや富士通 FX10 がある。コードは Fortran95 の標準的な文法で記述されており、可搬性は高いと考えられる。このプログラムはコンポーネント結合プログラムのプリプロセッサという位置づけにあり、異なる離散化手法を持つ複数のモデルの結合計算を必要とする研究・開発者が

潜在的なユーザと考えられる。

#### カップリングツール

異なる離散化手法を持つ複数のモデルの弱連成計算を行う機能を有する。格子形状に依存せず少数のインタフェースサブルーチンコールで連成を実現できる設計になっており、高い汎用性を持つことが特徴である。中核となっているカップリングライブラリ Jcup は Linux クラスタや FX10、地球シミュレータや京コンピュータ等、広汎なマシンで稼働実績があり、ppOpen-MATH/MP も Linux クラスタや FX10 で実行実績がある。結合計算を必要とする分野は全て潜在的ユーザであり、気象・気候分野のみならず、地震や津波+構造物シミュレーション、複数の臓器を対象とした人体シミュレーションなど、広範囲な応用分野が想定される。

#### ④ エクサスケールへの貢献度

FX10 を用いた HPC チャレンジの計算では、地震モデル(FDM モデル)1に対して構造物モデル(FEM モデル)を2つ結合し異なる地盤条件でシミュレーションを実施した。作成したカップリングツールは結合対象モデルの数を自由に増やせる設計になっているため、例えば地震モデルに対して都市全体の構造物を個々に結合するような大規模結合シミュレーションも可能であり、エクサスケールの計算にも十分貢献できると考えられる。

### 3.9 ppOpen-APPL/FDM の研究開発 (東大地震研・古村グループ)

#### ① 実施方法

本研究では、メニョコクラスタに基づくポストペタスケールシステムの処理能力を十分に引き出す科学技術アプリケーションの効率的な開発と安定な実行に資する ppOpen-HPC の研究として、大規模並列シミュレーションに適した離散化手法の一つである、差分法 (FDM) について、ハードウェアに依存しない共通インタフェースを有する並列アプリケーション開発用ライブラリ群 (ppOpen-APPL/FDM) を開発した。

ライブラリ群は、データ入出力機能、モデル領域分割、領域間通信、低次及び高次差分法ソルバー、陽解法ソルバーから構成される。メニョコクラスタを用いた実計算に向け、カプラー (ppOpen-MATH/MP) を通した他の離散化手法 (ppOpen-APPL/FEM 等) との連成計算機能や計算結果の可視化ライブラリとのインタフェース機能も整備した。また、自動チューニング機能 (ppOpen-AT) を装備しており、異なるモデルパラメータやハードウェア上での最適なチューニングコードを得ることができる。

研究開発の前半(平成 23~24 年度)では、ppOpen-APPL/FDM をマルチコクラスタにおいて基本性能を測定し、それに基づいて平成 25 年度からはポストペタスケールシステムを想定したメニョコクラスタ向け開発 (Flat MPI と MPI/OpenMP ハイブリッド並列計算環境の整備) を行なった。カーネル毎の性能チューニングとともに実計算を FX-10 等を用いた大規模並列計算に基づき実施し、開発コードの有効性と性能を確認するとともに、研究過程で得られた性能チューニングに関する情報を、自動チューニング ppOpen-AT 開発グループと共有することで ppOpen-APPL/FDM の自動チューニングの高度化をはかった。

#### ② 研究成果

(平成 25 年度まで)

ppOpen-APPL/FDM について、①動的固体力学、②非定常熱伝導、および③非圧縮性流体力学の 3 つを対象としたアプリケーションを開発し、入・出力および時空間微分演算等の共通機能のライブラリ化をはかった。特に動的固体力学 (地震波伝播) の実アプリケーションを対象に、FX10 や Xeon Phi による計算で計算コストが高いカーネルを抽出し、ppOpen-AT グループと共同して性能最適化に関する検討を進めた。

Intel Xeon Phi をメニョコクラスタ計算 (240 コアハイパースレッド並列演算) において、計算の 3 重ループから 2 重ループに融合 (MPI collapse(2)) して OpenMP 並列化ループの「粒」を大きくすることで、スレッド並列計算の効率が大幅に高まる (最大 2 倍程度) ことを確

認した (図 13 [原著論文 59])。1 重ループ融合ではスレッド毎の配列アクセスに非連続となる結果、ベクトル化が阻害され演算性能が著しく低下することも判明し、メモリアクセスの連続性を保つために配列境界を考慮した明示的なスレッドの割り当ての必要性も明らかになった。性能チューニングを行った ppOpen-APPL/FDM コードの公開に向け、入・出力インタフェース (汎用可視化ソフトへのフォーマット変換プログラム) 等のユーティリティを整備した。

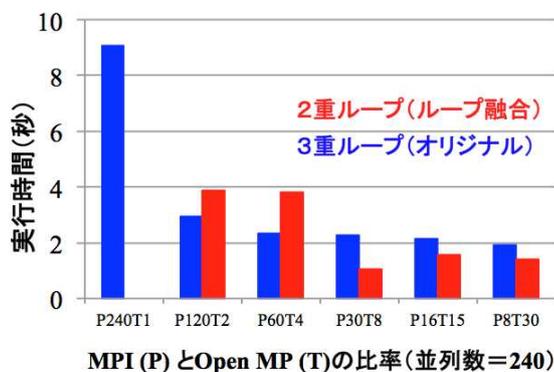


図 13 3 重ループ (オリジナル) の 2 重ループ融合による実行時間の変化 (Xeon Phi 240 コアで MPI(P) と OpenMP(T) の比率を変えた場合)。

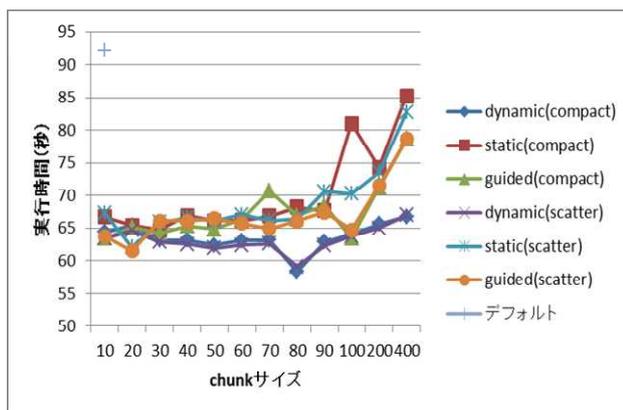


図 14 OpenMP スケジューリングタイプおよびチャンクサイズの違いによる実行時間の変動

(平成 26 年度以降)

MPI/OpenMP ハイブリッド並列におけるそれぞれの最適化比率を、MPI 通信量と通信時間のバラツキによる待ち時間 (バリア) の観点から評価し、最終的にモデルサイズ拠らない最適化比率 (MPI/OpenMP=4:1) を得た。また、OpenMP スレッド計算を動的 (dynamic) 割り当てとし、適切なチャンクサイズ (80) により、スレッド並列計算の高速化 (静的 (static) スケジューリングの 1.5 倍) を確認した (図 14)。その原因として、Dynamic スケジューリングでは、L1 キャッシュアクセスがランダム化されスラッシングのペナルティが回避されることを確認した。これらのメニコアマシンでの高速化に向けた知見は、自動チューニング ppOpen-AT の拡張機能の開発に還元した。

エクサスケールマシンでの高性能計算の課題として、ppOpen-APP/FDM 等の陽的 FDM 計算の高い要求 B/F 値 (2.5 B/F 程度、倍精度計算ではその 2 倍) があげられる。本研究では、FDM 計算順序を見直しメモリの読み書き回数を減らすことで、要求 B/F 値を 0.4 程度に低減させた「省メモリコード」を開発した。本コードは、Intel Xeon Phi プロセッサにおいて、従来コードの 1.84 倍の性能向上を達成したほか [原著論文 59], B/F 値が比較的大きい (0.5) 「京」においても 1.22 倍の性能向上を確認した。

また、ppOpen-APP/FDM コードに OpenACC 指示子を記述した GPGPU コードを整備した。

東工大 TSUBAME(K20x)で性能測定を行い、CPU (X5670 2.97GHz) 比 2.92 倍の性能向上を確認した。また、実計算において 200 GPU 程度までの weak scaling 性能を確認した。

### ③ 成果の位置づけ・類似研究との比較

陽的 FDM 計算に基づく動的固体力学（弾性波動，地震波伝播）計算コードは各機関において研究者が独自に開発し，一部は公開されているが（たとえば，防災科学技術研究所，GMS 簡単に使える3次元差分法による地震動計算ツール，[http:// http://www.gms.bosai.go.jp/GMS/](http://www.gms.bosai.go.jp/GMS/)），計算科学的な視点から計算性能チューニングされたものではなく，特にメニコア向けに最適化された公開コードは存在しない。

互いに依存関係がない演算を対象とする多重ループ演算が行われ，いっぽう高い B/F を必要とする FDM 計算で性能チューニングの効果が大きく，自動チューニング機能を持つ FDM コードはマシンアーキテクチャ毎に大きく異なる最適化作業を助け，メニコアクラスタ計算に基づきエクサスケール計算の実現に向け大きな力を発揮すると期待される。

これまで CUDA 言語を用いた GPU 向け FDM コードの開発が他研究で進められたが，OpenACC の利用により，メニコア向けコードに OpenACC 指示子を加えるだけで，コード自体の変更なしに GPU で高速計算が実現できたことは，今後のアクセラレータを用いた高性能計算に向けた大きな進展といえる。

### ④ 作成したソフトウェアの公開状況

#### ■公開済み(ppOpen-APPL/FDM ver.0.3.1)

- **機能:**動的固体力学問題（弾性波動，地震波伝播）の陽的 FDM 計算（2次元，3次元問題）の並列計算（Flat MPI, MPI/OpenMP Hybrid 並列）コードである。低次（4次）・高次（8，16次）精度空間微分演算モジュール，入出力モジュールのほか，可視化インタフェース等のユーティリティを提供する。
- **特徴:** B/F が小さいマシンを対象とした「省メモリコード」と，B/F が比較的大きなマシンを対象とした「通常コード」が用意されている。省メモリコードでは，メニコアプロセッサ（Intel Xeon/Phi）に最適化されたループ分割，ループ多重度の変更（3重→2重化）等のチューニングが施されている。通常コードは，FX-10 及び「京」を意識した性能最適化が行われている。GPGPU コードは，Open ACC 指示子により CPU（MPI 通信及び入出力）と GPGPU（FDM 計算）を用いた並列 FDM 計算を実行する。
- **実行可能なシステム:** T2K オープンスパコン（東大版），富士通「京」・FX10，Intel X86 アーキテクチャ（Xeon, Xeon Phi）において Flat MPI 及び MPI/Open MP Hybrid 実行が確認されている。また，GPGPU コードは，NVIDIA GPU K40 単体及び，K20 x 実装した TSUBAME（東工大）での並列計算実行が確認されている。
- **潜在的なユーザー:** ppOpen-APPL/FDM は，動的固体力学問題（弾性は動，地震波伝播）エンジニア（資源開発，自然環境コンサルタント）の実解析に資するほか，メニコア CPU を用いた陽的 FDM 並列計算開発のための基本的モジュールとして活用される。ppOpen-AT を併用することで，モデル規模やマシンアーキテクチャに拠らず最適コードを自動生成することができるため，性能最適化には不慣れなユーザーを潜在的に取り込むことができると期待される。

#### ■公開予定（ppOpen-APPL/FDM ver.1.0）

- **特徴:**上記公開済みコードの機能に加え，メニコアマシン（Xeon Phi）を対象としたループ分割・融合，Flat MPI/OpenMP 比の最適化，OpenMP スケジューリング変更，ループタイリング等の高度な性能チューニングが施されたコードを完成版として公開予定である。また，GPGPU 版コードには，GPU/CPU 同時実行による MPI 通信の隠蔽機能を含める予定である。

### ⑤ エクサスケールへの貢献度

本研究開発コードは，エクサスケール計算の実現に向けた課題である，数十数～数百万

万コアを有効に用いた MPI/OpenMP ハイブリッド並列計算の自動チューニング, FDM 計算における要求 B/F 値を低減させた省メモリコード, OpenACC 指示子によるアクセラレータ (GPGPU) の利用の有効性の検討に直接資するものである。

### 3.10 ppOpen-APPL/FEM の研究開発 (東大新領域・奥田グループ)

#### ① 実施方法

本研究の目的は, 大規模並列計算機環境において有限要素法(Finite-Element Method, FEM)によるアプリケーションの開発を支援するミドルウェア, ppOpen-APPL/FEM(ppohFEM)の研究開発を実施する事である。ppohFEM は, 共通インタフェースに基づくデータ入出力部, エラーメッセージ等の出力, 領域間通信, 領域分割, 係数マトリクス生成, 陽解法ソルバー, 離散化手法の特性を考慮した前処理付き反復法, 適応格子, 動的負荷分散, 3次元四面体, 六面体, 梁・板・シェル要素(低次, 高次)のサポート, ppOpen-MATH, ppOpen-AT, ppOpen-SYS の各機能へのインタフェースを機能として持つ。

研究開発においては, 先行研究として公開されている hecmw ミドルウェアの成果を利用した。有限要素法の計算に必要な操作を抽出して API として提供する事により, hecmw ではアプリケーションに公開されているミドルウェア内部のデータ構造をユーザから隠蔽するように ppohFEM の設計を行った。

#### ② 研究成果

ppOpen-APPL/FEM では OpenMP と MPI を用いたハイブリッド並列化を行っている。ILU 前処理はループ間に依存性があるため, 依存性を取り除くためにマルチカラー法によるインデックスのリオーダーリングを行った。リオーダーリング後の行列を OpenMP のスレッドに割り当てる手法として, 行列の行をスレッドと同じ数のブロックに分割し, 各ブロックをスレッドに割り当てるアルゴリズム(block row)と, 行列内の非ゼロ要素の数が各スレッドで一定になるように, スレッド毎に異なる数の行を割り当てるアルゴリズム(equiv elem)を実装し, 性能評価を行った。25 万自由度のモデルで静解析を行い, ソルバーが収束するまでの経過時間を割り当てアルゴリズムとマルチカラーリオーダーリングに用いる色数を変えて, 前処理ルーチン(precond\_33)及び行列ベクトル積ルーチン(matvec\_33)毎に比較したところ, マルチカラーリオーダーリングを行う際に用いる色数を 10 色とした場合, block row アルゴリズムでは 8.01 倍, equiv elem アルゴリズムでは 9.81 倍の高速化となった。また, 計算時間はマルチカラーリオーダーリングに用いる色数に対しても依存し, 1000 色を用いた場合, equiv elem アルゴリズムでは大きく性能が劣化する事が判った。

ppOpen-APPL/FEM を用いたアプリケーションの開発の例として, FEM による動的固体力学アプリケーション FrontISTR++を作成した。ppOpen-HPC ミドルウェアの一部である ppOpen-MATH/MP によるカップリングツールを用いて, FrontISTR++及び同じく ppOpen-HPC ミドルウェアである ppOpen-APPL/FDM による, 差分法を用いた地震動伝搬解析アプリケーションである Seism3D を結合して, 地盤・建屋系連成振動解析を行った。

アプリケーション開発の別の例として, 有限要素法を用いた既存の流体解析のプログラムを ppOpen-APPL/FEM を用いて並列化した。分散メッシュの読み込み, 行列の全体化, 境界条件の設定, 並列疎行列ソルバ, 袖領域の通信, 計算結果の出力等をミドルウェアが行うことによって, 元のプログラムのソースコードが 1502 行あったのに対して, 並列化後のプログラムは 1041 行と短くすることができた。

#### ③ 公開したソフトウェア, エクサスケールへの貢献度

ppohFEM は, マニュアル等のドキュメントを追加した上で 2015 年 11 月に ppOpen-APPL/FEM Ver. 1.0.0 として公開している。並列有限要素法を用いた計算に必要な操作, 具体的には構造解析(線形静解析)に必要な操作を抽出し, API として実装した。また, 並列計算の際に必要なメッシュ分割ツール, ppohFEM を用いたアプリケーションの参照実装として, 構造解析及び熱伝導解析のソースコードを公開した。

ppohFEM の特徴としては, 並列計算に必要な操作を全てミドルウェア内に隠蔽し, アプリケーシ

ョン開発者は API を用いれば並列計算を意識せずに FEM アプリケーションを開発できる点が挙げられる。

潜在的なユーザとしては、自ら FEM プログラムを開発利用している大学等の研究者が、大規模並列 FEM 計算を行う際に ppohFEM を利用して並列化を行なうという事例が考えられる。エクサスケールへの貢献としては、ハードウェアの構成が変化した場合でも、アプリケーションが利用する API は変更せずにミドルウェア内部のデータ構造の変更で対処できる場合は、アプリケーション製作者はソースコードをそのまま利用できるため、エクサスケールマシンへの移行がスムーズに行える事が考えられる。

### 3.11 混合精度演算手法に関する研究（東大新領域・奥田グループ）

#### ① 実施方法

本研究の目的は、数百万～数千万コアを有するポストペタスケールシステムで効率的に高精度な計算を実現するための混合精度演算手法に関する研究開発を実施する事である。混合精度演算 (Mixed Precision Computation) はポストペタスケール、エクサスケールシステムのキーワードとなっており、効率的に高精度な計算を実現するためには必須の項目である。

前処理付反復解法について Iterative Refinement に基づき、行列の性質に応じた最適なパラメータの自動設定手法を、本研究でターゲットとするメニコアキテクチャを対象として実施する。また、Iterative Refinement とは異なる混合精度演算手法として、前処理付き反復法ソルバーにおいて、前処理行列部分を単精度で持つ手法を検討する。

#### ② 研究成果

前処理つき反復法ソルバー部の、混合精度演算を用いた Iterative Refinement 手法の開発について、inner loop の収束判定に用いる閾値の動的な決定手法について検討を行い、outer loop の残差に基いて決定する手法と、行列の条件数の推定値に基いて決定する手法を組合せた新しい手法を開発した。

ヘテロジニアス環境 (CPU-GPU 系) における、反復法ソルバールゴリズムを中心としたオーバーラッピング機能の開発および性能評価について、SpMV において行列が GPU のメモリに載らない大きさの場合に CPU-GPU 間の通信の隠蔽を行う手法を OpenACC を用いて実装し、性能評価を行った。ベンチマークプログラムにおいては、通信の隠蔽を行う事で最大で 40% の性能向上が得られた [原著論文 62]。

Iterative Refinement とは異なる混合精度演算手法として、前処理付き反復法ソルバーにおいて、前処理行列部分を単精度で持つ手法を検討した。大きな条件数をもつ連立一次方程式の前処理として、安定化近似逆行列分解 (Stabilized Approximate Inverse, SAINV) から得られる分解因子を用いて新たな不完全分解因子を生成する、ロバスト不完全分解 (Robust Incomplete Factorization, RIF) が知られている。並列計算への適用と前処理生成時間の高速化のために、従来必要であった分解因子の棄却処理に代わり、係数行列の非零要素プロファイルを元に前処理生成を行う、フィルインを考慮しない局所並列化した RIF(0) と、フィルインを考慮し局所並列化した RIF(1) を提案した [原著論文 6]。RIF 前処理において、単精度を用いて前処理生成を行うことで前処理行列生成時間を削減し、その他の部分を倍精度実数で計算する事で計算精度を確保する方式の混合精度演算を検討した。本研究で採用した RIF 前処理は、前述した係数行列の直交過程を用いて、前処理行列の対角項が常に正の値となるように分解を進めるため、低い精度の浮動小数点数を用いた計算でも、安定した前処理を生成できると考えられる。

#### ③ 類似研究との比較

反復法ソルバーにおいて前処理を単精度で行う混合精度演算手法はこれまでも提案されているが、ILU 分解を元にした手法では、悪条件の問題では単精度演算を用いると前処理行列の正定値性が崩れる場合があるために、適用できる問題に制限が見られた。本研究で提案した RIF 前処理を元にした混合精度演算手法では、前処理行列の生成方法が ILU 分解と異なり、対角項が常に正の値となる分解であるため、単精度演算を用いても安定した前処理が可能となった。

#### ④ 公開したソフトウェア

本研究に関しては、ソフトウェアとしての公開は行っていない。

### 3.12 ppOpen-APPL/BEMの研究開発（京大・岩下グループ）

#### ① 実施方法

本研究では本プロジェクトで対象とした代表的な 5 種の離散化手法の内、境界要素法を対象としたソフトウェアフレームワーク、ライブラリの開発を行う。境界要素法は、離散化の対象がモデルの表面に限られることから、使用する要素の数が有限要素解析等と比べて少なく済む、また開領域問題を精度よく扱うことができるという利点を持つ。一方で、境界要素解析では、要素間の関係を表す行列が密となるため、計算時間やメモリ量の点が問題となる場合があり、特に大規模解析ではその影響が顕著である。このような問題点を解決する方法として、以下の 2 種が考えられる。即ち、1)分散並列処理の利用、2)高速多重局展開法(FMM)またはH行列法の利用 である。そこで、本研究ではポストペタスケール時代にはこの2種の高速化、省メモリ化の両方を効果的に利用する必要があるとの見地に立ち、ユーザが境界要素解析のプログラム作成にあたってこれらの技術を簡単に利用できるようなソフトウェアフレームワーク、ライブラリの研究開発を行う。

本研究では、まず密行列演算を用いた境界要素解析を対象として、その分散並列プログラミングを支援するソフトウェアフレームワークを開発する。本フレームワークはデータ入出力部、エラーメッセージ等の出力部、領域間通信／領域分割部、係数マトリクス／右辺ベクトル生成部、境界要素法解析の特性を考慮した線形反復法ソルバーを有している。ここで、線形反復法ソルバーはポストペタ時代の計算機を意識し、ハイブリッド並列化を行う。次に、本研究の主たる研究開発対象として、H行列法を取り上げ、その分散並列ライブラリを開発する。本ライブラリにおいてもマルチスレッド／マルチプロセス型のハイブリッド並列処理に対応する。また、開発した並列境界要素解析フレームワークと分散並列 H 行列を連携し、大規模解析に対応するソフトウェアフレームワークとしてとりまとめる。ソフトウェア全体の名称が ppOpen-APPL/BEM であり、本ソフトウェアには以下の 4 つのコンポーネントが含まれる。即ち、密行列計算による境界要素解析フレームワーク、分散 H 行列ライブラリ、H 行列計算による境界要素解析フレームワーク、解析用テンプレートである。

#### ② 研究成果

(平成 25 年度まで)

- (ア) 密行列演算を用いた並列境界要素解析を対象としたフレームワークを設計し、Fortran, MPI, OpenMP を用いて実装した。多様な境界要素解析に対応するために、要素間積分に関する処理をユーザ定義関数としてユーザが記述する方式を提案し、実装した。線形ソルバーには非対称係数行列向けのソルバーとしてよく用いられる BiCGSTAB 法を採用し、ハイブリッド並列プログラミングモデルに基づいた分散並列化を行った〔口頭発表 34,42〕。
- (イ) ACA (Adaptive Cross Approximation)に基づく H 行列生成に関して調査し、その分散並列アルゴリズムを考案した。さらに、その Fortran による実装に着手した。

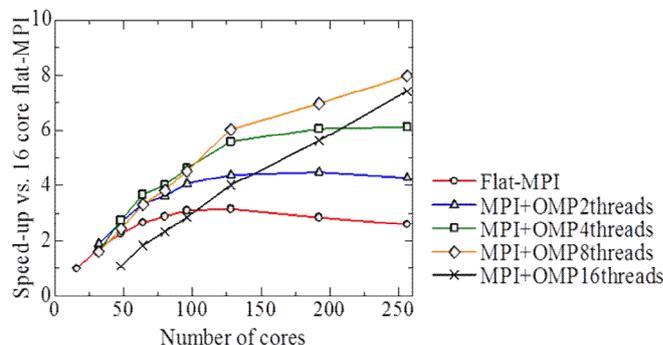


図 15 H 行列ベクトル積における並列台数効果  
(100 万自由度静電場解析，東大情報基盤センターFX10 を利用)

(平成 26 年度以降)

- (ア) ACA (Adaptive Cross Approximation) に基づく H 行列生成および H 行列ベクトル積について、MPI と OpenMP によるハイブリッド並列処理に基づいたライブラリを開発し、静電場解析や地震サイクルシミュレーションにおいてその性能を評価した(図 15) [原著論文 66]。例えば、境界要素解析では比較的大規模な解析といえる 100 万自由度の静電場解析では、図 15 にみられる通り、ハイブリッド並列処理の導入より、Flat-MPI 方式による場合と比べて、2 倍以上の高速化を達成した。ハイブリッド並列処理に対応した H 行列ライブラリは既存ソフトウェアに見られない本開発ライブラリの独自機能であり、本解析結果からその有用性が確認された。
- (イ) 本研究で開発した H 行列ライブラリを地震サイクルシミュレーションに適用する過程において、既存のアルゴリズムを用いた場合、対象とする解析のカーネル関数の性質に依存して、部分行列の低ランク化が不十分となる場合があることが発見された。そこで、ACA を利用した H 行列生成において、スケーリングとあらたな行列精度評価指標を導入することを提案した。本提案手法により、大規模問題における必要なデータ量を大幅に削減することに成功し、部分行列のランク数を従来の 3 分の 1 程度とできた [原著論文 66]。
- (ウ) 開発した H 行列ライブラリと境界要素解析フレームワークが連携して動作することを確認し、電磁場解析等の応用分野の解析への展開を行った。また、クリロフ部分空間法の前処理として H 行列を使用する方法を提案し、電磁場境界要素解析においてその効果を検証した [原著論文 68]。

### ③ 成果の位置づけ・類似研究との比較

境界要素解析は要素間の積分に関する処理が対象とする問題(基礎方程式)により異なり、また要求精度によって積分の方式が変わる多様性がある。このため、積分の対象が要素の補間関数となることが多い有限要素解析とは異なり、汎用性を持ったフレームワークの設計・開発が困難である側面があった。そのため、境界要素解析を対象としたフレームワークで、特に大規模並列処理やハイブリッド並列処理に対応したものはほとんど見られず、本研究による開発は他に類をみないものと言える。

H 行列法に関するライブラリでは、マックスプランク研究所の H-Lib が著名であり、応用分野での利用例も数多く報告されている。しかし、同ライブラリは並列化への対応が不十分であり、ポストペタ時代の計算機で必要となる大規模スレッド並列処理と大規模分散処理の双方を活用することが困難であった。特にメモリ分散がなされていない点は、応用解析の解析規模拡大の大きな足かせとなっていた。本研究で開発したライブラリである HACApK はこれらの欠点を解消し、メモリ分散、ハイブリッド並列処理の双方に対応している。また、主に実装面での改良から、単体コアによる逐次性能においても H-Lib と比べて 40% の計算時間の短縮(約 2 万自由度の問題、行列生成部)を実現している。

### ④ ソフトウェア公開状況

本グループでは、ppOpen-APPL/BEM の構成要素として、並列境界要素解析フレームワーク(BEM-BB framework)と分散並列 H 行列ライブラリ(HACApK)を公開している。また、解析事例のサンプルとしても利用可能な表面電荷法による解析をフレームワークと連動して行うプレートファイルも合わせて公開している。

BEM-BB フレームワークは、ユーザが規定のフォーマットに従った入力データと要素間積分に関するユーザ定義関数を与え、さらに境界条件に関する処理を行うことで並列境界要素解析コードを与える。本フレームワークは H 行列ライブラリと連携して動作することも可能となっている。全体としてハイブリッド並列化された解析を実行可能であり、京都大学の Cray XE6 や東京大学の FX10 で動作することが確認されている。潜在的なユーザは並列境界要素解析を実行したいと考えている応用分野の研究者で、分野は多岐にわたる。

H 行列ライブラリ HACApK は ACA に基づいた H 行列の生成と H 行列ベクトル積をハイブリッド

並列実行することができる。京都大学の Cray XE6 や東京大学の FX10 における実行の他, Xeon Phi プロセッサによる大規模スレッド実行についても動作確認が行われている。潜在的なユーザは境界要素解析フレームワークよりも広く、積分方程式法や N 体問題を扱う研究者、技術者もユーザとなり得る。低ランク行列の生成が機能するかどうかを度外視すれば、あらゆる密行列に適用可能であり、ビッグデータ解析といった従来の計算科学の枠外の応用でも機能する可能性がある。

#### ⑤ エクサスケールへの貢献度

エクサスケールシステムのアーキテクチャはまだ確定しているとは言えないが、電力性能等の観点からみて、大規模スレッド並列処理と大規模プロセス並列処理の双方を同時に活用することはまず最低限必要な要件であると考えられる。そのような背景の下で、本グループで開発したソフトウェア群は境界要素解析や積分方程式に基づく解析のハイブリッド並列化や高性能化を大きく促進させる機能を有している。即ち、これらの解析の実行者がエクサスケールマシン向けのプログラムを開発する場合、本グループで開発したソフトウェアを利用することで大幅にプログラミングコストを削減することができる。このようなエクサスケールマシン向け計算科学プログラムの開発コストの削減に開発した成果物は貢献すると考えられる。

### 3.13 ppOpen-APPL/DEM の研究開発、通信・同期削減アルゴリズムの研究（海洋研究開発機構・阪口グループ）

#### ① 実施方法

ppOpen-APPL/DEM は、個別要素法による離散化手法の特性に基づき、データ入出力、領域間通信、簡易領域分割ユーティリティ、係数マトリクス生成部および陽解法ソルバー、そしてこの離散化手法の特性を考慮した前処理付き反復法等の各機能を有するライブラリ群を研究開発する。

ppOpen-APPL/DEM は、個別要素法に基づくポストペタスケールアプリケーション開発環境である ppOpen-APPL/DEM について、京や東京大学情報基盤センターの Fujitsu PRIMEHPC FX10 (Oakleaf-FX, Oakbridge-FX) 等のマルチコアクラスタ及び GPU (Graphics Processing Unit) や MIC (Many Integrated Core) などを搭載したさまざまな並列計算機システムを利用することにより、開発された既存のフレームワークに基づいて各機能の設計、アルゴリズム開発、実装、動作確認、大規模問題への適用を実施した。また、アルゴリズムの有用性の実証のため、本研究により開発されたコードをマルチフィジクスシミュレーションに適用した。可視化については、シミュレーションの結果を POV-Ray のデータファイル(シーンファイル)に変換して直接出力するライブラリをプログラムに実装し、シェルスクリプトを用いることでシミュレーションを実行しながら可視化もプログラムの終了を待たずに追いかけて行えるようにした。

#### ② 研究成果

(平成 25 年度まで)

個別要素法に基づくポストペタスケールアプリケーション開発環境である ppOpen-APPL/DEM については、開発された既存のフレームワークに基づき各機能の設計、アルゴリズム開発、実装、動作確認、大規模問題への適用を実施した。また、アルゴリズムの有用性の実証のため、開発されたコードをマルチフィジクスシミュレーションに適用した。

(平成 26 年度以降)

平成 26 年度は、GPU (Graphics Processing Unit) や MIC (Many Integrated Core) などを利用したさまざまな並列計算機システムにおける粒子法 (SPH: Smoothed particle hydrodynamics) のプログラムの実装、および最適化と評価を行った〔原著論文 67〕。GPU を使った並列計算については、グローバルメモリに対するアクセス方式を Coalesce Access となるように変更することにより、従来の方式よりも約 2 倍

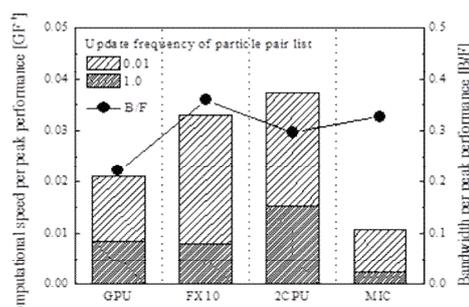


図 16 粒子法 (SPH) の実行効率

の高速化に成功した。図 16 はその実行効率を示したものであるが、MIC を除き概ねハードウェアの B/F 値と相関が得られており、本粒子法プログラムが各ハードウェアの性能を十分に活用していることを確認できた。MIC を使った並列計算については十分な性能を得ることができず、さらなる SIMD 化やメモリアクセス方式の改良などのチューニングが必要であることが判明した。また、MPI プロセス並列では、2 次元の領域分割に対してスライスグリッド法による動的負荷分散アルゴリズムを実装した。粒子法による津波遡上シミュレーションに対してこの動的負荷分散アルゴリズムを導入したところ、384core を用いたテスト計算では各 MPI プロセス間の CPU 時間に対する不均衡を時間平均で4%以内に留めることに成功した。

平成 27 年度は、ppOpen-APPL/DEM のユーティリティライブラリである ppOpen-APPL/DEM-Util の機能を拡充させ、STL ファイルフォーマットによる 3D ポリゴンデータの入力と 3D オブジェクトデータへの変換ユーティリティ、ならびに ppOpen-APPL/DEM プログラム本体内の 3D オブジェクトデータの平行移動と回転を行うユーティリティの開発と実装を行った。このライブラリを利用することにより、STL ファイルフォーマットの 3D ポリゴンデータを ppOpen-APPL/DEM プログラム本体内で簡単に扱えるようになった。さらに、3D オブジェクトデータの回転にはクォータニオンを導入することで、複雑な動きを簡略に表現できるようになった。

### ③ ソフトウェアの公開状況

開発したソフトウェアについて、公開済みのものとしては、ppOpen-APPL/DEM および ppOpen-APPL/DEM-Util ライブラリの機能の拡充に伴い、ソフトウェアに対するマニュアルを刷新し、刷新したマニュアルを更新した ppOpen-APPL/DEM および ppOpen-APPL/DEM-Util ライブラリとともに Ver. 1.0.0 として公開した。Ver. 1.0.0 のライブラリは Linux クラスタや FX10 で実行実績があり、DEM の計算を行う幅広いユーザーが利用可能である。

また、ppOpen-APPL/DEM によって開発されたコードを混相流に対する粒子法シミュレーションに適用し、アルゴリズムの有用性を実証した〔原著論文 10〕。

開発実施および公開予定のものとしては、平成 27 年度末までに領域分割に基づいた動的負荷分散手法を実装し、メニコア用の個別要素法コードを更新、そしてメニコアで最適稼動するためのアルゴリズムを改善してマニュアルとともにライブラリをアップデートする予定である。

### ④ 通信同期・削減アルゴリズムに関する研究

ppOpen-APPL/DEM については新しい領域分割方法を模索しながら、粒子計算のマルチコア化には不可避でありながら相反する通信削減と動的負荷分散手法を同時に最適化するための手法開発を行った。1次元動的領域分割法の単体のプログラムは完成し、今後 STL3D オブジェクトデータとの連携部分の調整を行った後、平成 27 年度末までに公開する予定である。

また、更なるプログラムの負荷分散の効率化のために動的領域分割法を 2 次元に拡張しプログラムに適用する予定であるが、現在開発および改良を実施しており、平成 27 年度末までに開発を終了させる予定である。

## § 4 成果発表等

(1)原著論文発表 (国内(和文)誌 13 件、国際 (欧文) 誌 55 件)

〈国内〉

1. 森田樹一郎, 西村 直志, 周期性の乱れを含む領域における Helmholtz 方程式の境界値問題の解法について, 計算数理工学論文集, vol. 11, pp. 65-70, 2011
2. 河合直聡, 岩下武史, 中島浩, ブロック化赤-黒順序付け法に基づく並列マルチグリッドポアソンソルバ, 情報処理学会論文誌:コンピューティングシステム(ACS), Vol. 5, No. 3, pp.1-10, 2012 (DOI:N/A)
3. 片桐孝洋, ppOpen-AT:ポストペタスケール時代の数値シミュレーション基盤ソフトウェア ppOpen-HPC のための自動チューニング基盤, 京都大学数理解析研究所研究集会「科学技術計算における理論と応用の新展開」, 京都大学数理解析研究所講究 1791, 107-111, 2012
4. 佐藤正樹, 八代尚, 全球非静力学モデル NICAM を用いた京コンピュータによる台風予測シミュレーション. 日本シミュレーション学会誌「シミュレーション」, 第 31 巻第 4 号, 204-209, 2013
5. 佐藤正樹, 斉藤和雄, 八代尚, 防災・減災に資する気象・気候・環境予測 — 台風予測およびメソ気象予測— 計算工学, 18, 2881-2884, 2013
6. 森田直樹, 橋本学, 奥田洋司, 並列有限要素法のための A-直交過程に基づく RIF 前処理, 日本計算工学会論文集, Paper No. 20140015, pp.1-7, 2014
7. 松本正晴, 高木成郎, 奥野喜裕:数値計算によるレーザー駆動 MHD 発電の基礎的検討, 日本航空宇宙学会論文集, Vol.62, No.5, pp.170-176, 2014
8. 岩本哲也, 中瀬仁, 西浦泰介, 東山和博, 菅野高弘, 八尋明彦, “GPGPU を用いた SPH-DEM カップリング解析による津波越流実験の再現計算”, 土木学会論文集 A1, vol. 70, No. 4, pp.I\_295-I\_303, 2014
9. Takahiro Katagiri, Satoshi Ohshima and Masaharu Matsumoto, Towards Auto-tuning for the Finite Difference Method in Era of 200+ Thread Parallelisms, IPSJ Proceedings of the 1st Annual Meeting on Advanced Computing System and Infrastructure (ACSI) 2015, 2015
10. 西浦泰介, 古市幹人, 阪口秀, 混相流に対する粒子法シミュレーション —津波からマグマまで—, 金属, Vol. 85, No. 11, pp. 10-16, 2015
11. 松本正晴, 高木成郎, 奥野喜裕:パルスレーザー駆動 MHD 発電機の発電特性に関する電磁流体シミュレーション, 電気学会論文誌 A, Vol.135, No.6, pp.379-384, 2015
12. Takahiro Katagiri, Masaharu Matsumoto, and Satoshi Ohshima, Towards Code Selection by Auto-tuning with ppOpen-AT: An Example of Computation Kernels from FDM, IPSJ Proceedings of the 2nd Annual Meeting on Advanced Computing System and Infrastructure (ACSI2016), 2016
13. Nakajima, K., Parallel Iterative Solvers based on Domain Decomposition with Robust Preconditioners for Ill-conditioned Problems, IPSJ Proceedings of the 2nd Annual Meeting on Advanced Computing System and Infrastructure (ACSI2016), 2016

〈国際〉

14. Y. Takahashi, H. Kaimori, A. Kameari, T. Tokumasu, M. Fujita, S. Wakao, T. Iwashita, K. Fujiwara, and Y. Ishihara, Convergence Acceleration in Steady State Analysis of Synchronous Machines Using Time-Periodic Explicit Error Correction Method, IEEE Transaction of Magnetics, vol. 47, no. 5, pp. 1422-1425, May 2011 (DOI: 10.1109/TMAG.2010.2091947)
15. Ohtani, K. Hirahara, Y. Takahashi, T. Hori, M. Hyodo, H. Nakashima, and T. Iwashita, Fast Computation of Quasi-Dynamic Earthquake Cycle Simulation with Hierarchical Matrices, Procedia Computer Science, vol. 4, pp. 1456-1465, June 2011. (DOI: 10.1016/j.procs.2011.04.158)
16. Takashi Arakawa, Hiromasa Yoshimura, Fuyuki Saito and Koji Ogochi, Data exchange algorithm and software design of KAKUSHIN coupler Jcup, Procedia Computer Science,

- 2011, 4, 1516-1525
17. Kazuki Yoshizoe, Akihiro Kishimoto, Tomoyuki Kaneko, Haruhiro Yoshimoto and Yutaka Ishikawa, Scalable Distributed Monte-Carlo Tree Search, Proceedings of the Fourth Annual Symposium on Combinatorial Search (SoCS 2011), pp. 180-187, Barcelona, Spain, July 2011
  18. Hori, T. and H. Sakaguchi, Mechanism of dcollement formation in subduction zones, Geophysical Journal International, 187, 1089-1100, doi:10.1111/j. 1365-246X.2011.05204.x, October 2011.
  19. Y. Takahashi, T. Iwashita, H. Nakashima, S. Wakao, K. Fujiwara, and Y. Ishihara, Micromagnetic Simulations of Perpendicular Recording Head Using the Parallel Fast Multipole Method Specialized for Uniform Brick Elements, IEEE Transaction of Magnetics, vol. 47, no. 10, pp. 3805-3808, October 2011. (DOI: 10.1109/TMAG.2011.2154305)
  20. Nakajima, K., New strategy for coarse grid solvers in parallel multigrid methods using OpenMP/MPI hybrid programming models, ACM Proceedings of Proceedings of the 2012 International Workshop on Programming Models and Applications for Multicores and Manycores, ACM Digital Library, February 2012 (DOI: 10.1145/2141702.2141713)
  21. Kengo Nakajima, ppOpen-HPC: Open Source Infrastructure for Development and Execution of Large-Scale Scientific Applications on Post-Peta-Scale Supercomputers with Automatic Tuning (AT), Proceedings of the ATIP/A\*CRC Workshop on Accelerator Technologies for High-Performance Computing: Does Asia Lead the Way?, ACM Digital Library (ISBN: 978-1-4503-1644-6), 2012
  22. Kengo Nakajima, OpenMP/MPI Hybrid Parallel Multigrid Method on Fujitsu FX10 Supercomputer System, IEEE Proceedings of 2012 International Conference on Cluster Computing Workshops, 199-206, IEEE Digital Library: 10.1109/ClusterW.2012.35, 2012
  23. Satoshi ITO, Satoshi OHSHIMA, Takahiro KATAGIRI, SSG-AT: An Auto-tuning Method of Sparse Matrix-vector Multiplicataion for Semi-Structured Grids - An Adaptation to OpenFOAM -, Proceedings of 2012 IEEE 6th International Symposium on Embedded Multicore SoCs (MCSoc2012), DOI 10.1109/MCSoc.2012.26, pp.191-197, 2012
  24. Hiroshi Kawabata, Daisuke Nishiura, Hide Sakaguchi, and Yoshiyuki Tatsumi, Self-organized domain microstructures in a plate-like particle suspension subjected to rapid simple shear, Rheologica Acta, vol. 52, pp.1-21,2013
  25. Takashi Furumura, Visualization of Strong Ground Motion from the 2011 Off Tohoku, Japan (MW=9.0) Earthquake Obtained from Dense Nation-Wide Seismic Network and Large-Scale Parallel FDM Simulation, VECPAR 2012, Lecture Note of Computer Sciences, vol 7851, pp.9-16, 2013
  26. Masatoshi Kawai, Takeshi Iwashita, Hiroshi Nakashima and Osni Marques, Parallel Smoother Based on Block Red-Black Ordering for Multigrid Poisson Solver, Selected Papers of 10th International Meeting on High-Performance Computing for Computational Science (VECPAR 2012), Lecture Notes in Computer Science 7851, 2013
  27. Serban Georgescu, Peter Chow, Hiroshi Okuda, GPU Acceleration for FEM-Based Structural Analysis, Archives of Computational Methods in Engineering, Vol.20, Issue 2 , pp 111-121, 2013
  28. Satoshi Ohshima, Masae Hayashi, Takahiro Katagiri, Kengo Nakajima, Implementation and Evaluation of 3D Finite Element Method Application for CUDA, Selected Papers of 10th International Meeting on High-Performance Computing for Computational Science (VECPAR 2012), Lecture Notes in Computer Science 7851, 140-148, 2013
  29. Kengo Nakajima, Automatic Tuning of Parallel Multigrid Solvers using OpenMP/MPI Hybrid Parallel Programming Models, Selected Papers of 10th International Meeting on High-Performance Computing for Computational Science (VECPAR 2012), Lecture Notes in Computer Science 7851, 435-450, 2013
  30. Noguchi, S., T. Maeda, and T. Furumura, FDM simulation of an anomalous later phase from the Japan Trench subduction zone earthquakes, Pure Appl. Geophys., 170(1-2), 95-108, doi:10.1007/s00024-011-0412-1, 2013
  31. Maeda, T., and T. Furumura, FDM simulation of seismic waves, ocean acoustic waves, and tsunamis based on tsunami-coupled equations of motion, *Pure Appl. Geophys.*, 170(1-2), 109-127, doi:10.1007/s00024-011-0430-z, 2013

32. Nakajima, K., Large-scale Simulations of 3D Groundwater Flow using Parallel Geometric Multigrid Method, *Procedia Computer Science* 18, 1265-1274, Proceedings of IHPCES 2013 (Third International Workshop on Advances in High-Performance Computational Earth Sciences: Applications and Frameworks) in conjunction with ICCS 2013, 2013
33. Yamada, Y. and Satoh, M. (2013) Response of ice and liquid water paths of tropical cyclones to global warming simulated by a global nonhydrostatic model with explicit cloud microphysics. *J. Climate*, accepted. <http://dx.doi.org/10.1175/JCLI-D-13-00182.1>.
34. Satoh, M., and Kitao, Y. (2013) Numerical examination of the diurnal variation of summer precipitation over southern China. *SOLA*, 9, 129-133, doi:10.2151/sola.2013-029.
35. Satoh, M., Nihonmatsu, R., and Kubokawa, H. (2013) Environmental conditions for tropical cyclogenesis associated with African easterly waves. *SOLA*, 9, 120-124, doi:10.2151/sola.2013-027.
36. Hashino, T., Satoh, M., Hagihara, Y., Kubota, T., Matsui, T., Nasuno, T., Okamoto, H. (2013) Evaluating cloud microphysics from the NICAM against CloudSat and CALIPSO. *J. Geophys. Res.*, 118, 7273-7292. doi:10.1002/jgrd.50564.
37. Ham, S.-H., Sohn, B.-J., Kato, S., Satoh, M. (2013) Vertical inhomogeneity of ice cloud layers from CloudSat? and CALIPSO measurements and comparison to nicam simulations. *J. Geophys. Res.*, accepted. doi:10.1002/jgrd.50582.
38. Yamaura, T., Kajikawa, Y., Tomita, H., Satoh, M. (2013) Possible impact of a tropical cyclone on the northward migration of the baiu frontal zone. *SOLA*, 9, 89-93, <http://dx.doi.org/10.2151/sola.2013-020>.
39. Kinter III, J. L., B. Cash, D. Achuthavarier, J. Adams, E. Altshuler, P. Dirmeyer, B. Doty, B. Huang, L. Marx, J. Manganello, C. Stan, T. Wakefield, E. Jin, T. Palmer, M. Hamrud, T. Jung, M. Miller, P. Towers, N. Wedi, M. Satoh, H. Tomita, C. Kodama, T. Nasuno, K. Oouchi, Y. Yamada, H. Taniguchi, P. Andrews, T. Baer, M. Ezell, C. Halloy, D. John, B. Loftis, R. Mohr, and K. Wong (2013) Revolutionizing Climate Modeling - Project Athena: A Multi-Institutional, International Collaboration. *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, 94, 231-245.
40. Takahiro Katagiri, Satoshi Ito, Satoshi Ohshima, Early Experiences for Adaptation of Auto-tuning by ppOpen-AT to an Explicit Method, Proceedings of 2013 IEEE 7th International Symposium on Embedded Multicore SoCs (MCSoc2013) 123-128, Special Session: Auto-Tuning for Multicore and GPU (ATMG), 2013
41. Takahiro Katagiri, Cheng Luo, Reiji Suda, Shoichi Hirasawa, Satoshi Ohshima, Energy Optimization for Scientific Programs Using Auto-tuning Language ppOpen-AT, Proceedings of 2013 IEEE 7th International Symposium on Embedded Multicore SoCs (MCSoc2013) 153-158, Special Session: Auto-Tuning for Multicore and GPU (ATMG), 2013
42. Junji Kitao, Yasuhito Takahashi, Koji Fujiwara, Takeshi Mifune, and Takeshi Iwashita, Automatic Determination of Acceleration Factor Based on Residual and Functional in Shifted ICCG Method for 3-D Electromagnetic Field Analyses, *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 49, no. 5, pp. 1741—1744, 2013. (DOI: 10.1109/TMAG.2013.2239277)
43. Daisuke Nishiura, Yamamoto Matsuo, Hide Sakaguchi, ppohDEM: Computational performance for open source code of the discrete element method, *Computer Physics Communications*, 185(5), 1486-1495 (2014) doi:10.1016/j.cpc.2014.02.01
44. Masaki Satoh, Hirofumi Tomita, Hisashi Yashiro, Hiroaki Miura, Chihiro Kodama, Tatsuya Seiki, Akira T Noda, Yohei Yamada, Daisuke Goto, Masahiro Sawada, Takemasa Miyoshi, Yosuke Niwa, Masayuki Hara, Tomoki Ohno, Shin-ichi Iga, Takashi Arakawa, Takahiro Inoue and Hiroyasu Kubokawa, The Non-hydrostatic Icosahedral Atmospheric Model: Description and Development, *Progress in Earth and Planetary Science*, pp.1- 18, 2014, doi:10.1186/s40645-014-0018-1
45. Daisuke Nishiura, Miki Yamamoto and Hide Sakaguchi, “ppohDEM: Computational performance for open source code of the discrete element method”, *Computer Physics Communications*, vol. 185, No. 5, pp.1486-1495, 2014 (DOI: 10.1016/j.cpc.2014.02.01)
46. Nakajima, K., Satoh, M., Furumura, T., Okuda, H., Iwashita, T., Sakaguchi, H., and Katagiri, T., ppOpen-HPC: Open Source Infrastructure for Development and Execution of Large-Scale Scientific Applications with Automatic Tuning (AT), PASC'14 (The Platform for Advanced Scientific Computing), Zurich, Switzerland, 2014

47. Takashi Arakawa, Takahiro Inoue, and Masaki Satoh, "Performance Evaluation and Case Study of a Coupling Software ppOpen-MATH/MP", *Procedia Computer Science*, vol.29, pp.924-935, 2014, doi:10.1016/j.procs.2014.05.083, Proceedings of Fourth International Workshop on Advances in High-Performance Computational Earth Sciences: Applications and Frameworks (IHPCES 2014) in conjunction with ICCS 2014
48. Masaharu Matsumoto, Futoshi Mori, Satoshi Ohshima, Hideyuki Jitsumoto, Takahiro Katagiri and Kengo Nakajima, "Implementation and Evaluation of an AMR Framework for FDM Applications", *Procedia Computer Science*, vol. 29, pp.936-946, 2014 (DOI: 10.1016/j.procs.2014.05.084), Proceedings of Fourth International Workshop on Advances in High-Performance Computational Earth Sciences: Applications and Frameworks (IHPCES 2014) in conjunction with ICCS 2014
49. Hideyuki Jitsumoto, Yuki Todoroki, Yutaka Ishikawa and Mitsuhisa Sato. "Grid-Oriented Process Clustering System for Partial Message Logging", 2014 44th Annual IEEE/IFIP International Conference on Dependable Systems and Networks (DSN), pp. 714-719., 2014(DOI: 10.1109/DSN.2014.72)
50. O. A. Fagerlund, T. Kitayama, G. Hashimoto and H. Okuda, Effect of GPU Communication-Hiding for SpMV using OpenACC, Proceedings of the 5th International Conference on Computational Methods, 28th – 30th July 2014, Cambridge
51. Teruo Tanaka, Ryo Otsuka, Akihiro Fujii, Takahiro Katagiri, Toshiyuki Imamura, "Implementation of d-Spline-based incremental performance parameter estimation method with ppOpen-AT", *Scientific Programming*, IOS Press, Vol. 22, No. 4, pp. 299-307, 2014 (DOI 10.3233/SPR-140395)
52. Miki Y. Matsuo, Daisuke Nishiura, and Hide Sakaguchi, Geometrical effect of angle of repose revisited, *Granular matter* 16, pp.441-447, 2014 (DOI: 10.1007/s10035-014-0489-1)
53. Daisuke Nishiura and Hide Sakaguchi, "Microscopic measurements of planar viscoelastic body eccentric impacts on a convex corner", *International Journal of Non-Linear Mechanics*, vol. 67, pp.133-143, 2014 (DOI: 10.1016/j.ijnonlinmec.2014.08.015)
54. Takahiro Katagiri, Satoshi Ohshima, Masaharu Matsumoto, "Auto-tuning of Computation Kernels from an FDM Code with ppOpen-AT", Special Session: Auto-Tuning for Multicore and GPU (ATMG-14) (In Conjunction with the IEEE MCSoc-14 ), Proceedings of MCSoc2014, pp.91-98, 2014 (DOI: 10.1109/MCSoc.2014.22)
55. Satoshi Ohshima, Takahiro Katagiri, Masaharu Matsumoto, "Performance optimization of SpMV using CRS format by considering OpenMP scheduling on CPUs and MIC", Special Session: Auto-Tuning for Multicore and GPU (ATMG-14) (In Conjunction with the IEEE MCSoc-14 ), Proceedings of MCSoc2014, pp.253-260, 2014 (DOI: 10.1109/MCSoc.2014.43)
56. Ida A., Iwashita T., Mifune T. and Takahashi Y., Parallel Hierarchical Matrices with Adaptive Cross Approximation on Symmetric Multiprocessing Clusters, *Journal of Information Processing*, 22, pp. 642-650, 2014. (DOI:10.2197/ipsjip.22.642)
57. Daisuke Nishiura, Hide Sakaguchi and Atsuko Shimosaka, Wet dispersion mechanism of fine aggregates in multiphase flow with solid beads under simple shear", vol. 60, No. 12, pp.4076-4085, 2014 (DOI: 10.1002/aic.14614)
58. Nakajima, K., Optimization of Serial and Parallel Communications for Parallel Geometric Multigrid Method, Proceedings of the 20<sup>th</sup> IEEE International Conference for Parallel and Distributed Systems (ICPADS 2014) 25-32, Hsin-Chu, Taiwan, 2014
59. Futoshi Mori, Masaharu Matsumoto, Takashi Furumura, Performance of the FDM simulation of Seismic Wave Propagation using the ppOpen-APPL/FDM library on Intel Xeon Phi Coprocessor, *Lecture Notes in Computer Science* 8969, 66–76, 2015
60. Katagiri, T., Ohshima, S., Matsumoto, M., Directive-based Auto-tuning for the Finite Difference Method on the Xeon Phi, The Tenth International Workshop on Automatic Performance Tuning (iWAPT2015) (In Conjunction with the IEEE IPDPS2015 ), Proceedings of IPDPSW2015, 1221-1230, 2015 (DOI:10.1109/IPDPSW.2015.11)
61. Masaharu Matsumoto, Takashi Arakawa, Takeshi Kitayama, Futoshi Mori, Hiroshi Okuda, Takashi Furumura and Kengo Nakajima, Multi-Scale Coupling Simulation of Seismic Waves and Building Vibrations using ppOpen-HPC, Proceedings of the 5th International Workshop

- on Advances in High-Performance Computational Earth Sciences: Applications and Frameworks (IHPCES 2015) in conjunction with ICCS2015, Reykjavik, Procedia Computer Science 51, 1514-1523, 2015
62. Olav Aanes Fagerlund, Takeshi Kitayama, Gaku Hashimoto and Hiroshi Okuda, Effect of GPU communication-hiding for SPMV using OpenACC, International Journal of Computational Methods, Vol. 13, No. 2, pp. 1640011-1-1640011-14, 2015
  63. Nakajima, K., and Katagiri, T., ppOpen-HPC: Open Source Infrastructure for Development and Execution of Large-Scale Scientific Applications with Automatic Tuning (AT), Proceedings of PASC'15 (The Platform for Advanced Scientific Computing), Zurich, Switzerland, 2015
  64. Murata, R., Irie, J., Fujii, A., Tanaka, T., Katagiri, T., Enhancement of Incremental Performance Parameter Estimation on ppOpen-AT, Special Session: Auto-Tuning for Multicore and GPU (ATMG-15) (In Conjunction with the IEEE MCSoc-15), Proceedings of MCSoc2015, 2015
  65. Nakajima, K., Satoh, M., Furumura, T., Okuda, H., Iwashita, T., Sakaguchi, H., Katagiri, T., Matsumoto, M., Ohshima, M., Jitsumoto, H., Arakawa, T., Mori, F., Kitayama, T., Ida, A., and Matsuo, M.Y., ppOpen-HPC: Open Source Infrastructure for Development and Execution of Large-Scale Scientific Applications on Post-Peta-Scale Supercomputers with Automatic Tuning (AT), Optimization in the Real World –Towards Solving Real-Worlds Optimization Problems, Mathematics for Industry 13, 15-35, Springer, 2015
  66. Ida, A., Iwashita, T., Ohtani, M. and Hirahara, K., Improvement of Hierarchical Matrices with Adaptive Cross Approximation for Large-scale Simulation”, Journal of Information Processing, Vol. 23, No. 3(2015) pp. 366-372. (DOI:10.2197/ipsjip.23.366)
  67. Daisuke Nishiura, Mikito Furuichi, Hide Sakaguchi, Computational performance of a smoothed particle hydrodynamics simulation for shared-memory parallel computing, Comp. Phys. Comm., 194, 18-32 (2015), doi:10.1016/j.cpc.2015.04.006
  68. Ida A., Iwashita T., Mifune T. and Takahashi Y., Variable Preconditioning of Krylov Subspace Methods for Hierarchical Matrices with Adaptive Cross Approximation, IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 52, No.3(2016) Article# 7205104, doi: 10.1109/TMAG.2015.2464104
  69. Satoshi Ohshima, Takahiro Katagiri and Masaharu Matsumoto, Utilization and Expansion of ppOpen-AT for OpenACC, The Eleventh International Workshop on Automatic Performance Tuning (iWAPT2016) (In Conjunction with the IEEE IPDPS2016), IEEE Proceedings of IPDPS 2016, 2016 (accepted)
  70. Takahiro Katagiri, Masaharu Matsumoto and Masaharu Matsumoto, Auto-tuning of Hybrid MPI/OpenMP Execution with Code Selection by ppOpen-AT, The Eleventh International Workshop on Automatic Performance Tuning (iWAPT2016), IEEE Proceedings of IPDPS 2016, 2016 (accepted)
  71. Nakajima, K., Parallel Iterative Solvers for Ill-conditioned Problems with Heterogeneous Material Properties, Proceedings of IHPCES 2016 (Sixth International Workshop on Advances in High-Performance Computational Earth Sciences: Applications and Frameworks) in conjunction with ICCS 2016, 2016 (accepted)

(2)その他の著作物(総説、書籍など)

1. 佐藤正樹, 全球雲解像大気モデルの熱帯気象予測への実利用化に関する研究. 日本計算工学会誌 Vol.16 No.3, 2594-2597, 2011
2. 片桐孝洋, スパコンプログラミング入門ー並列処理と MPI の学習ー, 東大出版会, ISBN978-4-13-062453-4, 発売日:2013年3月12日
3. Satoh, M., Atmospheric Circulation Dynamics and General Circulation Models, 2nd edition. Springer-PRAXIS, 757 pp, hard-cover: ISBN 978-3-642-13573-6; e-book: ISBN 978-3-642-13574-3, 2013
4. 佐藤正樹, 斉藤和雄, 八代尚, 防災・減災に資する気象・気候・環境予測ー台風予測およびメソ気象予測ー, 計算工学, 18, 2881-2884, 2013年
5. 佐藤正樹, 八代尚, 全球非静力学モデルNICAMを用いた京コンピュータによる台風予測シミュレーション. 日本シミュレーション学会誌「シミュレーション」, 第31

(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 14 件、国際会議 48 件)

〈国内〉

1. 伊東聰, OpenFOAM 高速化のための自動チューニング機構, 日本応用数学会 2012 年若手の会 単独研究会 (東京, 2012.12.26)
2. 中島研吾, ポストペタスケール・エクサスケールシステムへ向けての東京大学情報基盤センターの取組, 物性研スパコン共同利用・CMSI 合同研究会 (第 4 回 CMSI 研究会) (東京大学 (柏), 2013.12.10)
3. 佐藤正樹, Joint-simulator for satellite sensors 開発について. 複数の地球観測衛星データを利用した分野横断型研究に関するワークショップ (東京大学生産技術研究所, 2013.12.16)
4. 岩下武史, 「時空間タイリングによる 3 次元 FDTD 法の通信削減実装」, 日本応用数学会「行列・固有値問題の解法とその応用」研究部会 第 16 回研究会 (東京大学 (本郷), 2013.12.26)
5. 中島研吾, ポストペタ・エクサスケール時代のアプリケーション開発, 弥生研究会「粒子法研究会」(東京大学 (本郷), 2014.3.11)
6. 中島研吾, エクサスケール時代のシミュレーションと可視化, 日本計算工学会第 7 回 S&V (Simulation & Visualization) 研究会「可視化: 私はここに着目する」, 東京大学 (東京大学 (本郷), 2014.4.9)
7. Furuichi, M., Nishiura, D., “Development of coupled Stokes-DEM simulation scheme for geodynamical magmatic studies”, 地球惑星連合大会 2014 (パシフィコ横浜, 2014.04.28)
8. 中島研吾, ポストペタスケール時代のシミュレーションと大規模並列可視化, CMSI 若手技術交流会, 理化学研究所計算科学研究機構 (神戸, 2014.7.8)
9. Satoshi Ohshima, Performance Evaluation and Comparison of ICCG method using OpenMP and OpenACC, Workshop on HPC and Cloud Accelerators, RIKEN AICS (神戸, 2014.8.26)
10. 西浦泰介, 古市幹人, メニコア計算機に対する粒子法プログラムの実装と並列性能, STE シミュレーション研究会, 海洋研究開発機構 (東京, 2014.12.23)
11. 中島研吾, 並列前処理付き反復法, 日本応用数学会「応用数理解セミナー」, 早稲田大学 (東京, 2014.12.26)
12. 實本英之, 実行環境に動的対応する耐故障フレームワーク, 第 2 回「耐故障性のためのミドルウェアの研究」ワークショップ (つくば, 2015.3.19)
13. 伊田明弘, 階層型行列法の大規模解析に向けた改良と並列化, 第 28 回計算数理工学フォーラム, 京都大学 (京都, 2015.3.20)
14. 西浦泰介, 混相流に対する粒子法シミュレーション - 津波からマグマまで -, 第 24 回素材工学研究懇談会, 東北大学 (仙台, 2015.11.11)

〈国際〉

15. Takahiro Katagiri, “Towards Auto-tuning Description Language to Heterogeneous Computing Environment”, Proceedings of Fifth International Workshop on High-level Parallel Programming and Applications (HLPP 2011), Affiliated to ICFP 2011, Sponsored by ACM SIGPLAN (DOI: 10.1145/2034751.2034753) (Tokyo, 2011.9.18)
16. Satoh, M.: Global Cloud Resolving Simulations. The 1st International Symposium on Large-scale Computational Science and Engineering -local disaster, global earth and space problems, Nihon-Gakujutsu-Kaigi (Tokyo, 2011.10.17)
17. Nakajima, K., ppOpen-HPC: Open Source Infrastructure for Development and Execution of Large-Scale Scientific Applications on Post-Petascale Supercomputers

- with Automatic Tuning (AT), International Workshop on Collaborative Development of Simulation Software of Next Generation (CO-DESIGN) (Beijing, China, 2011.10.25-26)
18. Satoh, M., Overview of the Nonhydrostatic Icosahedral Atmospheric Model (NICAM). Int'l Symposium on the 20th Anniversary of Operational Numerical Weather Prediction (Seoul, Korea, 2011.12.6)
  19. Satoh, M., NICAM - Nonhydrostatic Icosahedral Atmospheric Model. 1th Workshop on Dynamical Cores for Climate Models, Carlo V Castle – (Lecce, Italy, 2011.12.14-16)
  20. Nakajima, K., ppOpen-HPC: Open Source Infrastructure for Development and Execution of Large-Scale Scientific Applications on Post-Peta-Scale Supercomputers with Automatic Tuning (AT), ATIP/A\*CRC Workshop on Accelerator Technologies for High-Performance Computing: Does Asia Lead the Way? (Singapore, 2012.5.8)
  21. Nakajima, K., Parallel Multigrid Methods on Post-Peta/Exascale Systems, The 6th Korea-Japan Workshop on Computational Mechanics (Kyoto, 2012.5.31)
  22. \*Takashi Furumura, Peta-scale FDM Simulation of Strong Ground Motion and Tsunami: Towards Disaster Prediction and Mitigation, VECPAR 2012 (Kobe, 2012.7.19)
  23. Nakajima, K., ppOpen-HPC: Open Source Infrastructure for Development and Execution of Large-Scale Scientific Applications on Post-Peta-Scale Supercomputers with Automatic Tuning (AT), The First Spain-Japan Workshop on Computational Mechanics (Barcelona, Spain, 2012.9.17)
  24. Satoh, M., The global cloud-resolving simulation by the Nonhydrostatic Icosahedral Atmospheric Model, NICAM. Conference on Computational Physics (CCP2012), (Kobe, 2012.10.15)
  25. Nakajima, K., Automatic Tuning of Preconditioned Iterative Solvers with Hybrid Parallel Programming Models, International Workshop on Collaborative Development of Simulation Software of Next Generation (CO-DESIGN) (Beijing, China, 2012.10.25)
  26. Hiroshi Okuda, Hierarchically Parallel FE Software for Assembly Structures: FrontISTR - Parallel Performance Evaluation and Its Industrial Applications, CO-DESIGN 2012 (Beijing, China, 2012.10.25)
  27. Nakajima, K.: ppOpen-HPC: Open Source Infrastructure for Development and Execution of Large-Scale Scientific Applications with Automatic Tuning (AT), CUG Seminar (China University of Geosciences) (Beijing, China, 2012.10.26)
  28. Satoh, M., NICAM: Nonhydrostatic Icosahedral Atmospheric Model. 1st International Conference on Frontiers in Computational Physics: Modeling the Earth System (Boulder, Colorado, USA, 2012.12.16-20)
  29. Nakajima, K., Parallel Multigrid Method on Post-Peta/Exa Scale Supercomputer Systems, Advances in Computational Mechanics (ACM 2013) — A Conference Celebrating the 70th Birthday of Thomas J.R. Hughes: Parallelism in Matrix Computations (San Diego, CA, USA, 2013.2.25)
  30. Nakajima, K., ppOpen-HPC: Open Source Infrastructure for Development and Execution of Large-Scale Scientific Applications with Automatic Tuning (AT), SDSC Seminar, San Diego Supercomputer Center (San Diego, CA, USA, 2013.2.26)
  31. Nakajima, K., Y. Ishikawa and T. Katagiri, HPCI towards Exascale Era, 17th Workshop on Sustained Simulation Performance (WSSP 2013) (Tokyo, 2013.3.12)
  32. Arakawa, T., Inoue, T., Satoh, M., Structure of a coupling library Jcup and its application example for earth system modeling, The 16<sup>th</sup> International Workshop on Next Generation Climate Models for Advanced High Performance Computing Facilities (Berkeley CA, USA, 2013.3.21)
  33. Nakajima, K., Automatic Tuning of Preconditioned Iterative Solvers with Hybrid Parallel Programming Models, Climate 2013 Workshop (The next-generation of

- climate models and knowledge discoveries through the extreme high-performance simulations and big data) (Berkeley CA, USA, 2013.3.21)
34. Takahiro Katagiri, Early Experiences of Adaptation of ppOpen-AT: Towards Performance Portability for Exa-flops Era, Conference on Advanced Topics and Auto Tuning in High Performance Scientific Computing (2013@<sup>2</sup>HPSC), National Taiwan University (Taipei, Taiwan, 2013.3.27)
  35. Nakajima, K., Automatic Tuning of Parallel Multigrid Solvers with Hybrid Parallel Programming Models, Conference on Advanced Topics and Auto Tuning in High Performance Scientific Computing (2013@<sup>2</sup>HPSC), National Taiwan University (Taipei, Taiwan, 2013.3.28)
  36. Satoshi Ohshima: Effective SpMV Implementation on Modern Parallel Architectures, 2013 Conference on Advanced Topics and Auto Tuning in High Performance Scientific Computing (2013@<sup>2</sup>HPSC), National Taiwan University (Taipei, Taiwan, 2013.3.28)
  37. Masaki Satoh, Simulations of MJO cases using NICAM with the K-computer, Workshop on the Nature of MJO George Mason University (Fairfax, VA, 2013.6.10-11)
  38. \* Nakajima, K., Challenges in Sparse Linear Solvers for Post-Peta/Exascale Systems, Latest Advances in Scalable Algorithms for Large Scale Systems, International Supercomputing Conference (ISC'13) (Leipzig, Germany, 2013.6.19)
  39. Masaki Satoh and Yohei Yamada, Response of ice and liquid water paths of tropical cyclones to global warming simulated by a global nonhydrostatic model with explicit cloud microphysics. AOGS 10th Annual Meeting (Brisbane, Australia, 2013.6.28)
  40. Nakajima, K., Parallel Geometric Multigrid Method for Large-scale Simulations of 3D Groundwater Flow through Heterogeneous Porous Media, LBNL Seminar, Lawrence Berkeley National Laboratory (Berkeley, CA, USA, 2013.9.13)
  41. Takahiro Katagiri, ppOpen - AT : Yet Another Directive - base AT Language, Dagstuhl Seminar 13401, Automatic Application Tuning for HPC Architectures, Schloss Dagstuhl, Leibniz-Zentrum fur Informatik (Dagstuhl, Germany, 2013.9.29-10.4)
  42. Hiroshi Okuda, Open-Source Parallel FE Software : FrontISTR -- Performance Considerations about B/F (Byte per Flop) of SpMV on K-Supercomputer and GPU-Clusters --, Parallel Processing for Energy Efficiency, Norwegian University of Science and Technology (Trondheim, Norway, 2013.10.3)
  43. Nakajima, K., Iterative Linear Solvers for Post-Peta/Exascale Systems, International Workshop on Collaborative Development of Simulation Software of Next Generation (CO-DESIGN) (Guilin, China, 2013.10.30)
  44. Mikito Furuichi, Computational performance of a smoothed particle hydrodynamics simulation for shared-memory parallel computing, GPU and MIC solutions for Multiscale Coupling and Multiphysics Approaches in Computational Sciences (University of Western Austria, 2013.11.11)
  45. Nakajima, K., Recent Activities in Japan towards Post-Peta/Exascale Systems, Fujitsu Open Petascale Libraries SC13 Workshop (Denver, CO, USA, 2013.11.17)
  46. \* Takashi Furumura, Visualization of strong ground motion and tsunami for the great 2011 Off Tohoku, Japan, earthquake, Supercomputing 2013 (SC13) (Denver, CO, USA, 2013.11.20)
  47. \* Masaki Satoh, A Super High-Resolution Global Atmospheric Simulation by the Nonhydrostatic Icosahedral Atmospheric Model Using the K Computer, 11th International Meeting High Performance Computing for Computational Science (VECPAR 2014) (Eugene, OR, USA, 2014.7.7)
  48. Nakajima, K., Challenges towards Post-Peta/Exascale Computing -Information Technology Center, The University of Tokyo-, 53rd IDC (International Data Corporation) HPC User Forum, RIKEN AICS (Kobe, 2014.7.16)

49. Nakajima, K., ppOpen-HPC: Open Source Infrastructure for Development and Execution of Large-Scale Scientific Applications with Automatic Tuning (AT), IMI (Institute of Mathematics for Industry, Kyushu University) Workshop on Optimization in the Real World, Kyushu University (Fukuoka, 2014.10.14)
50. Furuichi, M., May, D., Robust computational techniques for studying Stokes flow within deformable domains: Applications to global scale planetary formation processes, AGU Fall meeting, (San Francisco, CA, USA, 2014.12.15)
51. Satoh, M., A 20-year climatology of a NICAM AMIP-type simulation. The 2015 Workshop on High-Resolution Climate Simulation, Projection, and Application, Academia Sinica, Taipei. (2015.1.19-20)
52. Nakajima, K., Development of Large-Scale Scientific & Engineering Applications on Post-Peta/Exascale Systems, Seventh Korea-Japan Workshop on Computational Engineering (**Keynote Lecture**) (Busan, Korea, 2015.4.10)
53. Nakajima, K., Optimization of Communications for Scalable Algorithms on Supercomputers in Next Generation, MS 602: Iterative Methods and Parallel Computing, 13<sup>th</sup> US National Congress on Computational Mechanics (USNCCM-13) (San Diego, CA, USA, 2015.7.27)
54. Nakajima, K., ppOpen-HPC: Open Source Infrastructure for Development and Execution of Large-Scale Scientific Applications with Automatic Tuning (AT), LBNL Seminar, Lawrence Berkeley National Laboratory, (Berkeley, CA, USA, 2015.7.28)
55. Nakajima, K., ppOpen-HPC: Open Source Infrastructure for Development and Execution of Large-Scale Scientific Applications with Automatic Tuning (AT), SDSC Seminar, San Diego Supercomputer Center, (La Jolla, CA, USA, 2015.7.30)
56. Satoh, M., Ohno, T., Yamada, Y., Warm Core Structures in a Global High-Resolution Nonhydrostatic Model without Cumulus Parameterization. 12th the Annual Meeting of Asia Oceania Geoscience Society, Singapore. (2015.8.7)
57. Ida, A. and Iwashita, T., H-matrices with ACA for Large-scale Simulation using Integral Equation Method, (EPASA2015), (Tsukuba, Japan 2015.9.16)
58. Daisuke N, Hide S, Hirotaka S, Akira A, Discrete Element Modeling of Ballasted Railway Track, 3rd International Workshops on Advances in Computational Mechanics (IWACOM-III) (Tokyo, Japan, 2015.10.13)
59. Ida, A. and Iwashita, T., HACApK: Library for Hierarchical Matrices with Adaptive Cross Approximation, (IWACOM-III), (Tokyo, Japan, 2015.10.14)
60. Satoshi Ohshima, Masaharu Matsumoto, Takahiro Katagiri, Toshihiro Hanawa, Kengo Nakajima, Implementation and Performance of ICCG solver on GPU using OpenACC, The 3rd International Workshops on Advances in Computational Mechanics (IWACOM-III) (Tokyo, Japan, 2015.10.14)
61. Nakajima, K., Parallel Preconditioning Methods for Ill-Conditioned Problems, 3rd International Workshops on Advances in Computational Mechanics (IWACOM-III) (Tokyo, Japan, 2015.10.14)
62. \* Nakajima, K., Optimization of Communications towards Scalable Algorithms on Post Petascale Supercomputers, ScalA15: Workshop on Latest Advances in Scalable Algorithms for Large-Scale Systems, conjunction with SC15 (Austin, TX, USA, 2015.11.16)

② 口頭発表 (国内会議 94 件、国際会議 88 件)

〈国内〉

1. 堀高峰, 阪口秀, Mechanical processes of preparation for large scale events, 地球惑星科学連合2011年度連合大会, SSS029-06 (千葉, 2011.5.23)
2. 平原和朗, 大谷真紀子, 兵藤守, 堀高峰, 大規模マルチスケール地震発生サイクルシミュレーションの高速化手法, 日本地球惑星科学連合 2011 年大会 (千葉, 2011.5.24)
3. 西浦 泰介, 阪口 秀, 混相流解析のための大規模高速化粒子法アルゴリズムとそ

- の応用例及び課題, 第 7 期第 1 回土木学会応用力学委員会計算力学小委員会 (横浜, 2011.6.6)
4. 大島聡史, 林雅江, 片桐孝洋, 中島研吾, 三次元有限要素法アプリケーションにおける行列生成処理の CUDA 向け実装, 情報処理学会研究報告 (HPC-130-11), 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, 2011.7.27)
  5. 中島研吾, 佐藤正樹, 古村孝志, 奥田洋司, 岩下武史, 阪口 秀, 自動チューニング機構を有するアプリケーション開発・実行環境 ppOpen-HPC, 情報処理学会研究報告 (HPC-130-44), 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, 2011.7.27)
  6. 中島研吾, 林雅江, 大島聡史, 階層型領域間境界分割に基づくハイブリッド並列プログラミングモデル向け前処理手法, 日本応用数理学会「行列・固有値問題の解法とその応用」研究部会 (MEPA), 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, 2011.7.27)
  7. 阪口 秀, 西浦 泰介, SPH と DEM の連成による津波災害シミュレーション手法の開発, 平成 23 年度土木学会全国大会 (愛媛, 2011.9.7-9)
  8. 渡辺起, 奥田洋司, FEM メッシュ領分割に基づく省メモリ並列マルチフロントソルバの開発, 日本応用数理学会 2011 年度年会講演予稿集, pp.303-304 (京都, 2011.9.15)
  9. 片桐孝洋, 「自動チューニング記述専用言語 ppOpenAT/Static の開発」, 日本応用数理学会 2011 年度年会予稿集, pp.187-188 (京都, 2011.9.15)
  10. 堀高峰, 阪口秀, 大きな破壊への準備過程: 数値実験にもとづく考察, 日本地震学会 2011 年度秋季大会, p.272 (静岡, 2011.10.13)
  11. 西浦 泰介, 阪口 秀, DEMIGLACE, サイエンスエキスポ関西 2011 (大阪, 2011.10.19-21)
  12. 北山 健, 竹田 毅, 奥田 洋司, ポストペタ環境を想定した有限要素法アプリケーションの開発支援ライブラリ設計, 第 30 回日本シミュレーション学会大会 (JSST 2011) (東京, 2011.10.23)
  13. Olav Aanes Fagerlund, Hiroshi Okuda and Lasse Natvig, OpenCL acceleration of a Krylov solver library for finite element applications: Performance observations, 30th JSST Annual Conference (JSST 2011), International Conference on Modeling and Simulation Technology, 東京 (東京, 2011.10.23)
  14. 河合直聡, 岩下武史, 中島浩, ブロック化赤黒順序付け法による並列マルチグリッドポアソンソルバ, 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 (名古屋, 2012.1.26)
  15. 西浦 泰介, GPU を使って粒子法計算を大規模高速化するためには, GPU セミナー 2012 春 (東京, 2012.2.6)
  16. 北山健, 奥田洋司, FEM アプリケーション開発支援ミドルウェアの開発, 第5回原子力計算科学セミナー「原子力分野に不可欠な計算機科学技術」(東京大学(柏), 2012.5.18)
  17. Olav Aanes Fagerlund and Hiroshi Okuda, OpenCL Acceleration of a Krylov Solver Library for Finite Element Applications: Performance Observations, 第5回原子力計算科学セミナー「原子力分野に不可欠な計算機科学技術」(東京大学(柏), 2012.5.18)
  18. 堀高峰・阪口秀, 大きな破壊への準備過程: 数値実験にもとづく考察, 地球惑星科学連合 2012 年合同大会, SSS29-P05 (千葉, 2012.5.22)
  19. 平原和朗, 鹿倉洋介, 大谷真紀子, 兵藤守, 堀高峰, 橋間昭徳, 成層粘弾性媒質中での準動的な地震発生サイクルシミュレーション, 日本地球惑星科学連合 2012 年大会 (千葉, 2012.5.23)

20. 北山健, 奥田洋司, A Design of Development Support Middleware for Finite Element Method Application, 第1回 CREST 合同ワークショップ(東大・理研)(神戸, 2012.5.24)
21. Olav Aanes Fagerlund and Hiroshi Okuda, Efficient SpMV storage formats for FEM applications on Tera-scale GPUs, 第17回計算工学講演会, 京都教育文化センター(京都, 2012.5.29-31)
22. 伊東聰, 大島聡史, 片桐孝洋, ppOpen-AT における OpenFOAM 高速化の取り組み, 第17回計算工学講演会, 計算工学講演会論文集, Vol.17, 京都教育文化センター(京都, 2012.5.30)
23. 片桐孝洋, ppOpen-HPC のための自動チューニング基盤 ppOpen-AT の開発, 第17回計算工学講演会, OS16 自動チューニング技術の最新研究動向, 計算工学講演会論文集, Vol.17, 京都教育文化センター(京都, 2012.5.30)
24. 西浦 泰介, 阪口 秀, 粒子法による固体粒子と流体の混相流計算に対する並列化手法, 第17回 計算工学講演会, 京都教育文化センター(京都, 2012.5.30)
25. 奥田洋司, アセンブリ・階層データ構造に基づく大規模並列有限要素法, Marc Users Meeting 2012, Tokyo, 新宿ファーストウエストビル(東京, 2012.6.19)
26. 奥田洋司, ポストペタスケール有限要素法に向けて, 第24回 CCSE ワークショップ, 先端的計算機の発展とモデリング&シミュレーション技術への期待と展望(東京大学(柏), 2012.6.19)
27. 伊東聰, ppOpen-AT における OpenFOAM®自動最適化への取り組み, オープン CAE ワークショップ 2012 (東京, 2012.6.20)
28. 中島研吾, Oakleaf-FXにおける前処理付反復法の最適化, 日本応用数理学会「行列・固有値問題の解法とその応用」研究部会 (MEPA), 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) (鳥取, 2012.8.1)
29. 北山健, 佐藤陽平, 奥田洋司, 並列FEMプログラムの実効性能についての現状と課題, 第6回原子力計算科学セミナー「原子力分野に不可欠な計算機科学技術」(東京大学(柏), 2012.8.23)
30. 中島研吾, メニィコアクラスタ向け並列多重格子法アルゴリズム, 日本応用数理学会2012年年会 (稚内, 2012.8.29)
31. 片桐孝洋, ポストペタスケール環境のための自動チューニング基盤 ppOpen-AT の新機能について, 日本応用数理学会 2012 年度年会, 正会員主催 OS:ソフトウェア自動チューニング研究最前線 2012 —ポストペタスケールへの適用とエクサスケールへ向けて—, 稚内 (稚内, 2012.8.31)
32. 古市 幹人・西浦 泰, GPU やベクトル計算機における粒子マッピングアルゴリズムの比較, 第25回計算力学講演会(CMD2012)(神戸, 2012.10.7)
33. 堀高峰・阪口秀, 大きな破壊に向けた準備過程並びに変形から破壊への移行過程, 日本地震学会 2012 年度秋季大会, P2-74(函館, 2012.10.18)
34. 野瀬田裕樹, 河合直聡, 伊田明弘, 岩下武史, 中島浩, 美船健, 高橋康人, 並列計算機上での境界要素解析を支援するソフトウェアフレームワークの開発, 第138回 HPC 研究会(福井県あわら市, 2013.2.21)
35. 西浦 泰介, 粒子法による津波と建造物の連成シミュレーション手法開発と「京」への実装, HPCI 戦略プログラム(分野 3) 地震津波シミュレーションワークショップ〜「京」が果たす役割と計算科学の推進に向けて〜(神戸, 2013.2.27)
36. 山本美希, 粒子計算にみる粉粒体集団の内部と外部のレオロジー, ソフトマターワークショップ(海老名, 2013.3.7)
37. 臼井英之, 梅澤美佐子, 松本正晴, 西野真木, 三宅洋平: プラズマ粒子シミュレーションによる太陽風—小型ダイポール磁場相互作用の解析とその Reiner Gamma 磁場への応用, 日本地球惑星科学連合 2013 年大会(幕張, 2013.5.23)

38. 中島研吾, 前処理付きマルチスレッド並列疎行列ソルバー, 情報処理学会第 139 回 HPC 研究会(東京大学(柏), 2013.5.29)
39. 實本 英之, 鴨志田良和, 適切なチェックポイント周期を与えるアプリケーションレベルチェックポイントライブラリ, 情報処理学会第 139 回 HPC 研究会(東京大学(柏), 2013.5.29)
40. 大島聡史, 金子勇, メニコアプロセッサ Xeon Phi の性能評価, 情報処理学会第 139 回 HPC 研究会(東京大学(柏), 2013.5.30)
41. 臼井英之, 八木耀平, 松本正晴, 沼波政倫: 適合格子細分化プラズマ粒子シミュレーションにおける動的負荷バランス手法, 第 18 回計算工学講演会(東京, 2013.6.19)
42. 伊田明弘, 岩下武史, 美舩健, 高橋康人, 高速行列演算を用いた境界要素解析支援フレームワーク, 第18回計算工学講演会, 東京大学生産技術研究所(東京, 2013.6.21)
43. 北山健, Olav Aanes Fagerlund, 奥田洋司, 高並列環境における有限要素法開発支援ミドルウェアの性能評価, 第18回計算工学講演会, 東京大学生産技術研究所(東京, 2013.6.21)
44. 後藤和哉, 奥田洋司, 大規模構造接触解析への並列反復法線形ソルバの適用, 第18回計算工学講演会, 東京大学生産技術研究所(東京, 2013.6.21)
45. 奥田洋司, 佐藤陽平, 末光啓二, 「京」におけるFEM構造解析コードのハイブリッド並列最適化 - FrontISTR反復法ソルバーを中心として -, 第18回計算工学講演会, 東京大学生産技術研究所(東京, 2013.6.21)
46. 佐々成正, 山田進, 町田昌彦, 今村俊幸, 奥田洋司, GPBLAS^GPUの開発と性能評価, 第18回計算工学講演会, 東京大学生産技術研究所(東京, 2013.6.21)
47. 竹田毅, 佐藤陽平, 奥田洋司, 並列多重格子アセンブル解析モデルのデータ管理ライブラリ, 第18回計算工学講演会, 東京大学生産技術研究所(東京, 2013.6.21)
48. 片桐孝洋, 大島聡史, 伊東聡, 陽解法カーネルのための自動チューニング記述言語ppOpen-AT の新機能について, 第18回計算工学講演会, OS27: エクサスケールに向けた自動チューニング技術の最新研究動向, 計算工学講演会論文集, Vol.18, 東京大学生産技術研究所(東京, 2013.6.21)
49. 中島研吾, 片桐孝洋, 三次元有限差分法コードのppOpen-AT による最適化, 第10回戦略的高性能計算システム開発に関するワークショップ(SDHPC), ミニアプリセッションーミニアプリをどう作る, どう使う, どう育てる? - (北九州, 2013.7.30)
50. 中島研吾, ポストペタスケールシステムのための並列前処理付き反復法, 日本応用数理学会「行列・固有値問題の解法とその応用」研究部会 (MEPA), 2013年並列/分散/協調処理に関する『北九州』サマー・ワークショップ (SWoPP北九州2013) (北九州, 2013.8.1)
51. 大島聡史, 金子勇, 片桐孝洋, Xeon PhiにおけるSpMVの性能評価, 2013年並列/分散/協調処理に関する『北九州』サマー・ワークショップ (SWoPP北九州2013) (北九州, 2013.8.1)
52. 片桐孝洋, 大島聡史, 松本正晴, ppOpen-AT により自動生成された ppOpen-HPC コードにおける自動チューニング機能の性能評価, 正会員主催 OS: 自動チューニング技術とその周辺, アクロス福岡(福岡, 2013.9.9-11)
53. 大島聡史, 金子勇, 片桐孝洋, メニコアキテクチャ向けの SpMV 最適化と自動チューニング, 日本応用数理学会 2013 年度年会, アクロス福岡(福岡, 2013.9.9-11)
54. 高木成郎, 松本正晴, 奥野喜裕: パルスレーザ駆動 MHD 発電機の電磁流体シミュレーション, 電気学会新エネルギー・環境研究会(長岡, 2013.9.26)
55. 西浦 泰介, 古市 幹人, メニコアコンピューティングにおける粒子法の並列性能,

- 第 26 回計算力学講演会, 佐賀大学(佐賀, 2013.11.2)
56. 伊田 明弘, 超大規模境界要素解析に向けた階層型行列法の改良と並列化手法, 17 回環瀬戸内応用数理学会, 愛媛大学(愛媛, 2014.1.12)
  57. 奥田洋司, 非構造格子における前処理付き反復法ソルバーの最適化カーネル, 日本原子力学会, 2014 年春の大会, 東京都市大学(東京, 2014.3.27)
  58. 西浦泰介, 阪口秀, Multi-QDEM シミュレーションにおけるバラスト軌道の衝撃応答試験, 第 19 回計算工学講演会, 広島国際会議場 (広島, 2014.6.11)
  59. 山本美希・西浦泰介・阪口秀, Acceleration of calculations of particle interactions on DEM for GPGPU, 第 19 回計算工学講演会, 広島国際会議場 (広島, 2014.6.11)
  60. 森田直樹, 橋本学, 奥田洋司, 並列有限要素法のための A-直交過程に基づく RIF 前処理, 日本計算工学会, 第 19 回計算工学講演会, 広島国際会議場 (広島, 2014.6.11)
  61. Olav Aanes Fagerlund, Tomohiko Nishioka, Takeshi Kitayama, Gaku Hashimoto and Hiroshi Okuda, SpMV on 'larger-than-accelerator-memory' data-sets in OpenACC; overlapping, performance and profiling, 日本計算工学会, 第 19 回計算工学講演会, 広島国際会議場 (広島, 2014.6.11)
  62. 片桐孝洋, 大島聡史, 松本正晴, 第19回計算工学講演会, Xeon Phi における ppOpen-AT を用いた有限差分法コードの自動チューニング, OS19-1:ポストペタスケール高性能計算に向けた通信削減アルゴリズムと自動チューニング技術(1), 第 19 回計算工学講演会, 広島国際会議場 (広島, 2014.6.12)
  63. 伊田明弘, 岩下武史, 美舩健, 高橋康人, 「大規模境界要素解析に向けた 並列化階層型行列法ライブラリの開発」, 第 19 回計算工学講演会, 広島国際会議場 (広島, 2014.6.12)
  64. 中島研吾, 並列多重格子法における通信削減 (最適化) について, 日本応用数理学会「行列・固有値問題の解法とその応用」研究部会 (MEPA), 2014 年並列/分散/協調処理に関する 『新潟』サマー・ワークショップ (SWoPP 新潟 2014) (新潟, 2014.7.28)
  65. 大島聡史, 松本正晴, 片桐孝洋, 埴敏博, 中島研吾, 様々な計算機環境における OpenMP/OpenACC を用いた ICCG 法の性能評価, 情報処理学会 研究報告 (HPC-145), 7月 21 日発行 (Vol.2014-HPC-145 No.21), SWoPP 新潟 2014, 朱鷺メッセ 新潟コンベンションセンター (新潟, 2014.7.29)
  66. 大島聡史, 松本正晴, 片桐孝洋, 疎行列ソルバーにおける自動チューニングを用いた OpenMP 指示文の最適化, 日本応用数理学会 2014 年度年会, 政策研究大学院大学 (東京, 2014.9.3)
  67. 西浦泰介・下坂厚子・阪口秀, 剪断流中における凝集体の分散挙動に対する数値シミュレーション, 東京工業大学 (東京, 2014.9.27)
  68. 中島研吾, 大島聡史, 埴敏博, 有限要素法係数行列生成プロセスのマルチコア・メニコア環境における最適化, 情報処理学会第 146 回 HPC 研究会(那覇), 2014.10.3)
  69. 櫻井隆雄, 片桐孝洋, 大島聡史, 猪貝光祥, 黒田久泰, “OpenFOAM への疎行列計算ライブラリ Xabclib の適用と評価”, オープン CAE シンポジウム 2014 (東京, 2014.11.14)
  70. 西浦泰介, 阪口秀, Multi-QDEM シミュレーションにおけるバラスト軌道の衝撃応答試験, 第 27 回計算力学講演会, 岩手大学 (盛岡, 2014.11.23)
  71. 伊田明弘, 岩下武史, 「階層型行列に対する クリロフ部分空間法前処理の検討」, 環瀬戸内応用数理研究部会 第 18 回シンポジウム, 加計学園 国際学術交流センター (倉敷, 2014.12.6)
  72. 平原和朗, 大谷真紀, 列島規模海溝型地震サイクルシミュレーション, 日本

- 地震学会 2014 年秋季大会, 朱鷺メッセ新潟コンベンションセンター (新潟市), A31-11 (新潟, 2014.11.26)
73. 縣亮一郎, 市村強, 平原和朗, 兵藤守, 堀高峰, 橋本千尋, 堀宗朗, 高詳細モデルを用いた余効変動の大規模粘弾性有限要素シミュレーション, 日本地震学会 2014 年秋季大会, 朱鷺メッセ新潟コンベンションセンター(新潟市), A31-10 (新潟, 2014.11.26)
  74. 高木成郎, 松本正晴, 奥野喜裕:パルスレーザ駆動 MHD 発電実験, 電気学会新エネルギー・環境研究会(郡山, 2014.11.26)
  75. 中島研吾, 拡張型 Sliced-ELL 行列格納手法に基づくメニコア向け疎行列ソルバー, 第 22 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 (小樽, 2014.12.9)
  76. 大島聡史, 片桐孝洋, 櫻井隆雄, 中島研吾, 黒田久泰, 直野健, 猪貝光祥, 動的な並列実行機構を用いた SpMV 実装の性能評価, 情報処理学会第 148 回 HPC 研究会(別府, 2015.2.23)
  77. 荒川隆, 井上孝洋, 八代尚, 久保川陽呂鎮, 佐藤正樹, 全球大気モデル NICAM への結合ソフトウェアの適用と性能評価, 情報処理学会全国大会, 京都大学 (京都, 2015.3.17)
  78. 濱田 昌司, 近傍場計算に 3D-FFT を併用するボクセルモデル用高速多重極表面電荷法, 平成 27 年電気学会全国大会, 1-019 (東京, 2015.3.24)
  79. 半田恭平, 黄磊, 松本正晴, 奥野喜裕:パルスレーザ駆動 MHD 発電機の発電特性, 平成 27 年度電気学会全国大会(東京, 2015.3.26)
  80. 中島研吾, ppOpen-HPC における大規模疎行列計算と自動チューニング, オーガナイズドセッション:ppOpen-HPCと大規模シミュレーション, 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(HPCS2015), (東京, 2015.5.19)
  81. 伊田明弘, 岩下武史, HACApK ライブラリにおける階層型行列法の大規模解析に向けた改良, オーガナイズドセッション:ppOpen-HPC と大規模シミュレーション, 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(HPCS2015), (東京, 2015.5.19)
  82. 松本正晴, ppOpen-HPC による地震波動-建築物連成シミュレーション, オーガナイズドセッション:ppOpen-HPC と大規模シミュレーション, 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(HPCS2015), (東京, 2015.5.19)
  83. 古市幹人, 西浦泰介, Stokes--DEM 法によるマグマだまりの粒子--流体混相シミュレーション, 地球惑星科学連合 2015 年度連合大会, SVC46-14, (幕張, 2015.5.25)
  84. 西浦泰介, 古市幹人, 阪口秀, ハイパフォーマンスコンピューティングにおける流体と粒状体に対する粒子法シミュレーションの進展と社会貢献的利用, 地球惑星科学連合 2015 年度連合大会, STT55-03, (幕張, 2015.5.27)
  85. 森田直樹, 高橋容之, 橋本学, 奥田洋司, 並列有限要素解析のための RIF 前処理(要素タイプ混在問題における適用性評価), 日本計算工学会, 第 20 回計算工学講演会公園論文集, Vol. 20, 2015 (つくば, 2015. 6. 8)
  86. 片桐孝洋, 大島聡史, 松本正晴, 1ノード 200 超スレッド時代の自動チューニングに向けて ~FDM コードを例にして~, 第 20 回計算工学講演会, OS:エクサスケールに向けた自動チューニング技術の最新研究動向, 計算工学講演会論文集, Vol.20 (つくば, 2015.6.8)
  87. 大島聡史, Implementation of Sparse Matrix Solver on Modern Parallel Architectures, Sapporo Summer HPC Seminar 2015(札幌, 2015.7.23)
  88. 片桐孝洋, 松本正晴, 大島聡史, SCG-AT:静的コード生成のみによる自動チューニング実現方式, 情報処理学会第 150 回 HPC 研究会(別府, 2015.8.6)
  89. 大島聡史, 片桐孝洋, 松本正晴, ppOpen-AT を用いた OpenACC プログラムの自

- 動チューニング, 情報処理学会第 150 回 HPC 研究会(別府, 2015.8.6)
90. 片桐孝洋, 松本正晴, 大島聡史, ppOpen-AT による静的コード生成で実現する自動チューニング方式の評価, 日本応用数理学会 2015 年度年会, 正会員主催 OS: 先進的環境での数値計算と自動チューニング技術 (金沢, 2015.9.11)
  91. 大島聡史, 片桐孝洋, 松本正晴, ppOpen-AT による OpenACC プログラムの自動チューニング, 日本応用数理学会 2015 年度年会(金沢, 2015.9.11)
  92. 荒川隆, 井上孝洋, 松本正晴, 久保川陽呂鎮, 佐藤正樹, 結合ソフトウェア ppOpen-MATH/MP の性能評価と最適化, 情報処理学会第 14 回情報科学技術フォーラム(愛媛, 2015.9.17)
  93. 中島研吾, 片桐孝洋, 大島聡史, 埜敏博, ppOpen-APPL/FVM を使用した並列有限要素法アプリケーションの開発, 情報処理学会研究報告 (HPC-151-24), 情報処理学会第 151 回 HPC 研究会(那覇, 2015.10.1)
  94. 中島研吾, 成瀬彰, 大島聡史, 埜敏博, 片桐孝洋, 田浦健次朗, 有限要素法係数行列生成プロセスのメニコア環境における最適化, 情報処理学会研究報告 (HPC-152-12) 情報処理学会第 152 回 HPC 研究会(札幌, 2015.12.17)
- 〈国際〉
95. Takahiro Katagiri, Towards Auto-tuning Language of Numerical Libraries in Heterogeneous Computing Era, 7th International Congress on Industrial and Applied Mathematics (ICIAM 2011): Creating the Next Generation of High Performance Numerical Computing Capabilities (Vancouver, Canada, 2011.7.18-22)
  96. Nakajima, K., Hayashi, M., Ohshima, S., Infrastructure for Application Development on Heterogeneous Parallel Computers, 7th International Congress on Industrial and Applied Mathematics (ICIAM 2011): Creating the Next Generation of High Performance Numerical Computing Capabilities (Vancouver, Canada, 2011.7.18-22)
  97. Kazuki Niino and Naoshi Nishimura, Preconditioning based on Calderon's formulae with the Galerkin method for periodic boundary value problems for Helmholtz' equation, Waves 2011 (Vancouver, Canada, 2011.7.28)
  98. Hori, T. and H. Sakaguchi, Spontaneous dcollement formation and evolution in accretionary prisms, SE66-A021, AOGS 2011 (8th Annual Meeting and Geosciences World Community Exhibition) (Taipei, Taiwan, 2011.8.8-12)
  99. Furumura, T., Visualization of Strong Ground Motion and Tsunami due to the Destructive Mw9.0 Off the Pacific Coast of Tohoku Earthquake in 2011, AOGS 2011 (8th Annual Meeting and Geosciences World Community Exhibition) (Taipei, Taiwan, 2011.8.8-12)
  100. Hirahara, K., M. Ohtani, and Y. Shikakura, Quasi-dynamic earthquake cycle simulation in a viscoelastic medium with memory variables, 2011 AGU Fall Meeting (San Francisco, 2011.12.8)
  101. Yohei SATO, Takeshi TAKEDA and Hiroshi OKUDA, Hierarchical Parallel Finite Element Method for Large-Scale Assembly Structures, Proceedings of International Workshop on Application of Iterative Methods to Engineering and Its Mathematical Element (Osaka, 2012.1.26-27)
  102. Nakajima, K., Coarse Grid Solvers in Parallel Multigrid Methods using OpenMP/MPI Hybrid Programming Models, 15th SIAM Conference on Parallel Processing for Scientific Computing (PP12): Parallel Programming Models, Algorithms and Frameworks for Scalable Manycore Systems (Savannah, Georgia, USA, 2012.2.15-17)
  103. Satoshi Ohshima, Masae Hayashi, Takahiro Katagiri, Kengo Nakajima, Implementation of FEM application on GPU, 15th SIAM Conference on Parallel Processing for Scientific Computing (PP12): Parallel Programming Models, Algorithms and Frameworks for Scalable Manycore Systems (Savannah, Georgia, USA, 2012.2.15-17)
  104. Takahiro Katagiri, ppOpen-AT: An Auto-tuning Language for ppOpen-HPC ---Its

- New function and Impact to Application Software, TIMS Workshop on State-of-the-Art Technologies for High Performance Computing Software Auto-Tuning (in conjunction with EASIAM 2012), National Taiwan University (Taipei, Taiwan, 2012.6.25-27)
105. Takahiro Katagiri, "Adaptation of ppOpen-AT To Numerical Kernels on Explicit Method", 2012 SIAM Annual Meeting (SIAM AN12), MS105: Programming Paradigms, Algorithms and Frameworks for High Performance Scalable Manycore Systems - Part III of III (Minneapolis, Minnesota, USA, 2012.7.13)
  106. Nakajima, K., ppOpen-HPC: Open Source Infrastructure for Development and Execution of Large-Scale Scientific Applications on Post-Peta-Scale Supercomputers with Automatic Tuning (AT), SIAM Annual Meeting 2012 (AN12), Programming Paradigms, Algorithms and Frameworks for High Performance Scalable Manycore Systems - Part III of III (Minneapolis, Minnesota, USA, 2012.7.13)
  107. Hiroshi Okuda, Paratrel finite element analysis for incompressible materials with hierarchical mesh, WCCM10 (Sao Paulo, Brazil, 2012.7.8-13)
  108. K. Hirahara, M. Ohtani, M. Hyodo, T. Hori, Y. Mitsui, "Earthquake cycle models for the 2011 Tohoku giant earthquake", 9th General Assembly of ASC(Asian Seismological Commission) (Ulaanbaatar, Mongolia, 2012.9-18)
  109. M. Ohtani, K. Hirahara, T. Hori, M. Hyodo, "Possible occurrence of a giant interplate earthquake in northeast Japan greater than the 2011 Tohoku earthquake", APEC Cooperation for Earthquake Simulation (ACES) 8th International Workshop -Advances in Simulation of Multihazards- (Maui, Hawaii, USA, 2012.10.25)
  110. Nakajima, K., Overview of ppOpen-HPC, International Workshop on Software for Peta-scale Numerical Simulation (SPNS2012) (Kyoto, 2012.12.6)
  111. Katagiri, T., Development of ppOpen-AT: An Auto-tuning Description Language for ppOpen-HPC, International Workshop on Software for Peta-scale Numerical Simulation (SPNS2012) (Kyoto, 2012.12.6)
  112. Ohshima, S., Implementation of fast FEM library for GPU, International Workshop on Software for Peta-scale Numerical Simulation (SPNS2012) (Kyoto, 2012.12.6)
  113. Ida, A. and Iwashita, T., Application of H-Matrix Technique to A Framework of Boundary Element Analysis: ppOpen-APPL/BEM, International Workshop on Software for Peta-scale Numerical Simulation (SPNS2012) (Kyoto, 2012.12.6)
  114. Mori, F. and Furumura, T., A generalization of the FDM calculation code for post peta-scale - a test of performance, International Workshop on Software for Peta-scale Numerical Simulation (SPNS2012) (Kyoto, 2012.12.7)
  115. Kitayama, T., Takeda, T., Fagerlund O.A., and Okuda, H., Effects of matrix data structures for solver performance of Development Support Middleware for Finite Element Method Application, International Workshop on Software for Peta-scale Numerical Simulation (SPNS2012) (Kyoto, 2012.12.7)
  116. Arakawa, T. and Satoh, M., A coupling tool development for a weak coupling in a large-scale simulation, International Workshop on Software for Peta-scale Numerical Simulation (SPNS2012) (Kyoto, 2012.12.7)
  117. Yamamoto, M., Nishiura, D., and Sakaguchi, H., High-performance discrete element method developed for shared and distributed memory architectures, International Workshop on Software for Peta-scale Numerical Simulation (SPNS2012) (Kyoto, 2012.12.7)
  118. FURUICHI MIKITO, NISHIURA, DAISUKENAKAGAWA TAKASHI, Development of fluid-particle coupled simulation method in the Stokes flow regime: toward 3-D geodynamic simulation including granular media, AGU fall meeting (San Francisco, CA, USA, 2012.12.3-7)
  119. Takahiro Katagiri, Early Experience of Adaptation of ppOpen-AT: An Auto-tuning Description Language ", SIAM Conference on Computational Science & Engineering (CSE13), MS153 Auto-tuning Technologies for Tools and Development

- Environment Extreme-Scale Scientific Computing - Part I of III (Boston, MA, USA, 2013.2.25-3.1)
120. Satoshi Ohshima, Takahiro Katagiri, Kengo Nakajima, Samuel Thibault and Raymond Namyst: Implementation of FEM Application on GPU with StarPU, SIAM CSE13, MS162 Parallel Programming Models, Algorithms and Applications for Scalable Manycore Systems - Part I of III (Boston, MA, USA, 2013.2.27)
  121. Nakajima, K., Development of Applications on ppOpen-HPC, 2013 SIAM Conference on Computational Science and Engineering (CSE13): Parallel Programming Models, Algorithms and Applications for Scalable Manycore Systems Part-III of III (Boston, MA, USA, 2013.2.27)
  122. Masaki Satoh,: MJO and tropical cyclone simulations using the global non-hydrostatic model NICAM. 2nd CCLiCS Workshop on Climate System Modeling, Academic Sinica (Taipei, Taiwan, 2013.4.1-3)
  123. Masaki Satoh, 2013: Simulations of MJO cases using NICAM with the K-computer. Workshop on the Nature of MJO George Mason University (Fairfax, VA, USA, 2013.6.11)
  124. Masaki SATOH, KENTO ARAMAKI, MASAHIRO SAWADA, 2013: Structure of tropical convective systems using aqua-planet experiments with a global non-hydrostatic model NICAM. AOGS 10th Annual Meeting (Brisbane, Australia, 2013.6.24)
  125. Masaki Satoh and Yohei Yamada, 2013: Response of ice and liquid water paths of tropical cyclones to global warming simulated by a global nonhydrostatic model with explicit cloud microphysics. AOGS 10th Annual Meeting (Brisbane, Australia, 2013.6.28)
  126. Yasuhito Takahashi, Comparison between Electric Field Analysis Methods Induced in Human Body by ELF Magnetic Field, the 19th International Conference on the Computation of Electromagnetic Fields (COMPUMAG 2013) (Budapest Hungary, 2013.7.4)
  127. Nakajima, K., ppOpen-HPC and beyond, International Workshop on Software for Peta-Scale Numerical Simulation (SPNS2013) (Tokyo, 2013.12.5-6)
  128. Masaki Satoh, A Super High-Resolution Global Atmospheric Simulation by the Nonhydrostatic Icosahedral Atmospheric Model (NICAM) using the K-computer. SPNS2013, International Workshop on Software for Peta-Scale Numerical Simulation (SPNS2013) (Tokyo, 2013.12.5-6)
  129. Takashi Furumura, Large-scale parallel FDM simulation of strong ground motion and tsunami for recent and future earthquake, International Workshop on Software for Peta-Scale Numerical Simulation (SPNS2013) (Tokyo, 2013.12.5-6)
  130. Hiroshi Okuda, Considerations on Mixed Precision Computation in an Iterative Refinement Solver, International Workshop on Software for Peta-Scale Numerical Simulation (SPNS2013) (Tokyo, 2013.12.5-6)
  131. Takeshi Iwashita, ICCG(B) : Strategy of the fill-in selection for incomplete factorization preconditioning using SIMD instructions", International Workshop on Software for Peta-Scale Numerical Simulation (SPNS2013) (Tokyo, 2013.12.5-6)
  132. Miki Yamamoto, Basic Algorithm of particle method on GPU, International Workshop on Software for Peta-Scale Numerical Simulation (SPNS2013) (Tokyo, 2013.12.5-6)
  133. Takahiro Katagiri, Impact of Auto-tuning of Kernel Loop Transformation by ppOpen-AT, International Workshop on Software for Peta-Scale Numerical Simulation (SPNS2013) (Tokyo, 2013.12.5-6)
  134. Satoshi Ohshima, Fast SpMV Implementation on GPU/Manycore Architectures and its Application, International Workshop on Software for Peta-Scale Numerical Simulation (SPNS2013) (Tokyo, 2013.12.5-6)
  135. Masaharu Matsumoto, Development of an Adaptive Mesh Refinement Framework for ppOpen-APPL/FDM, International Workshop on Software for Peta-Scale Numerical Simulation (SPNS2013) (Tokyo, 2013.12.5-6)

136. Hideyuki Jitsumoto, Application-Level Checkpoint/Restart Framework with Checkpoint Interval Optimization, International Workshop on Software for Peta-Scale Numerical Simulation (SPNS2013) (Tokyo, 2013.12.5-6)
137. Takashi Arakawa, Takahiro Inoue and Masaki Satoh, A coupling library ppOpen-MATH/MP, its features and application, International Workshop on Software for Peta-Scale Numerical Simulation (SPNS2013) (Tokyo, 2013.12.5-6)
138. Futoshi Mori, A Test of Performance on Many Core and Many Integrated Core using by FDM Calculation Code, International Workshop on Software for Peta-Scale Numerical Simulation (SPNS2013) (Tokyo, 2013.12.5-6)
139. Takeshi Kitayama, Hiroshi Okuda, Effects of Re-Ordering and Blocking in a Hybrid Parallel Solver of ppOpen-APPL/FEM, International Workshop on Software for Peta-Scale Numerical Simulation (SPNS2013) (Tokyo, 2013.12.5-6)
140. Akihiro Ida, Development of the parallel hierarchical matrices library for large-scale SMP cluster, International Workshop on Software for Peta-Scale Numerical Simulation (SPNS2013) (Tokyo, 2013.12.5-6)
141. Mikito Furuichi, Computational performance of a smoothed particle hydrodynamics simulation for shared-memory parallel computing, International Workshop on Software for Peta-Scale Numerical Simulation (SPNS2013) (Tokyo, 2013.12.5-6)
142. Takeshi Kitayama, Olaf. A. Fagerlund, Hiroshi Okuda, Effect of Matrix Data Structures in a Parallel FE Iterative Solver Using 23,040 cores, 5th Asia Pacific Congress on Computational Mechanics & 4th International Symposium on Computational Mechanics (APCOM & ISCM 2013) (Singapore, 2013.12.12)
143. Satoshi Ohshima, Takahiro Katagiri, Kengo Nakajima, Preconditioned Iterative Solvers on Manycore Architectures, 16th SIAM Conference on Parallel Processing for Scientific Computing (PP14): Parallel Methods and Algorithms for Extreme Computing Part-I of III (Portland, OR, USA, 2014.2.18-21)
144. Nakajima, K., Optimization of Communications/Synchronizations for Preconditioned Iterative Linear Solvers, 16th SIAM Conference on Parallel Processing for Scientific Computing (PP14): Parallel Methods and Algorithms for Extreme Computing Part-II of III (Portland, OR, USA, 2014.2.18-21)
145. Akihiro Ida, Takeshi Iwashita, Parallel H-Matrices with Adaptive Cross Approximation for Large-Scale Simulation, 16th SIAM Conference on Parallel Processing for Scientific Computing (PP14): Parallel Methods and Algorithms for Extreme Computing Part-II of III (Portland, OR, USA, 2014.2.18-21)
146. Masaharu Matsumoto, Shigeo Takagi and Yoshihiro Okuno: Feasibility Study of a Laser Beamed Magnetohydrodynamic Energy Conversion, Asian Joint Conference on Propulsion and Power 2014, (Jeju, South Korea, 2014.3.7)
147. Masaki Satoh, Clouds and changes simulated by NICAM, International Workshop on Climate System Modeling— Climate2014, Hawaiian Convention Center (Hawaii, 2014.3.10-11)
148. Satoshi Ohshima, Implementation and Performance Evaluation of SpMV on Modern Parallel Processors, 2014 Conference on Advanced Topics and Auto Tuning in High Performance Scientific Computing (2014 ATAT in HPSC) (Taipei, Taiwan, 2014.3.14-15)
149. Nakajima, K., Parallel Preconditioning Methods for Ill-conditioned Problems, 2014 Conference on Advanced Topics and Auto Tuning in High Performance Scientific Computing (2014 ATAT in HPSC) (Taipei, Taiwan, 2014.3.14-15)
150. Takahiro Katagiri, Towards Auto-tuning Facilities into Supercomputers in Operation- The FIBER approach and Minimizing Software-stack Requirements -, 2014 Conference on Advanced Topics and Auto Tuning in High Performance Scientific Computing (2014 ATAT in HPSC) (Taipei, Taiwan, 2014.3.14-15)
151. Masaki Satoh, Global nonhydrostatic model simulations with single and double momentum cloud microphysics schemes and evaluation using satellite simulators, A workshop on the theme of clouds, circulation and climate sensitivity (Schloss Ringberg, Germany, 2014.3.24-28)

152. Nakajima, K., Satoh, M., Furumura, T., Okuda, H., Iwashita, T., Sakaguchi, H., and Katagiri, T., ppOpen-HPC: Open Source Infrastructure for Development and Execution of Large-Scale Scientific Applications with Automatic Tuning (AT), ATIP Workshop on Japanese Research Toward Next-Generation Extreme Computing in conjunction with SC14 (New Orleans, LA, USA, 2014.11.17)
153. Kengo Nakajima, ppOpen-HPC: Open Source Infrastructure for Development and Execution of Large-Scale Scientific Applications on Post- Peta-Scale Supercomputers with Automatic Tuning (AT), JST/CREST International Symposium on Post Petascale System Software (ISP2S2) (Kobe, 2014.12.3)
154. Ida A. and Iwashita T., Development of Software Infrastructure for Large-scale BEM Analyses, JST/CREST International Symposium on Post Petascale System Software (ISP2S2) (Kobe, 2014.12.3)
155. Takahiro Katagiri, Adaptation of ppOpen-AT to Codes from Finite Difference Method, JST/CREST International Symposium on Post Petascale System Software (ISP2S2) (Kobe, 2014.12.4)
156. Ohtani, M. and K. Hirahara, Effect of the Earth's surface topography on the quasi-dynamic earthquake cycle, AGU2014 Fall Meeting, S33B-4532 (San Francisco, CA, USA, 2014.12.15)
157. Takahiro Katagiri, Towards Auto-tuning of Scientific Codes for Many-core Architectures in Era of Exa-flops, 2015 Conference on Advanced Topics and Auto Tuning in High-Performance Scientific Computing (ATAT2015), National Taiwan University (Taipei, Taiwan, 2015.2.27)
158. Iwashita, T., Numerical Libraries and Software Framework for Application Programs in the Post Peta Era, BDEC Barcelona (Big Data & Extreme- Scale Computing) (Barcelona, Spain, 2015.1.30)
159. Nakajima, K., Optimization of serial and parallel communications towards scalable algorithms on supercomputers in next generation, BDEC Barcelona (Big Data & Extreme- Scale Computing) (Barcelona, Spain, 2015.1.30)
160. Nakajima, K., Parallel Preconditioning Methods on Intel Xeon/Phi, 2015 Conference on Advanced Topics and Auto Tuning in High-Performance Scientific Computing (ATAT2015), National Taiwan University (Taipei, Taiwan, 2015.2.28)
161. Satoshi Ohshima: Performance evaluation of Preconditioned Iterative Linear Solver Using OpenMP and OpenACC, 2015 Conference on Advanced Topics and Auto Tuning in High-Performance Scientific Computing, National Taiwan University (Taipei, Taiwan, 2015.2.28)
162. Nakajima, K., pK-Open-HPC: A Framework for Development of Parallel FEM/FVM Applications on Manycore Architectures, MS17: Parallel Programming Models, Algorithms and Frameworks for Extreme Computing Part I of III, SIAM Conference on Computational Science & Engineering (CSE15) (Salt Lake City, UT, USA, 2015.3.14)
163. Satoshi Ohshima, Masaharu Matsumoto, Takahiro Katagiri, Toshihiro Hanawa, Kengo Nakajima: Optimization of Preconditioned Iterative Linear Solvers Using OpenMP/OpenACC on GPU and MIC, MS43: Parallel Programming Models, Algorithms and Frameworks for Extreme Computing Part II of III, 2015 SIAM Conference on Computational Science and Engineering (CSE15) (Salt Lake City, UT, USA, 2015.3.14)
164. Takahiro Katagiri, Satoshi Ohshima, Masaharu Matsumoto, Towards Auto-tuning in the Era of 200+ Thread Parallelisms --- FIBER Framework and Minimizing Software Stack, MS258: Streamlining Application Performance Portability - Part I of II, SIAM Conference on Computational Science & Engineering (CSE15) (Salt Lake City, UT, USA, 2015.3.18)
165. Nakajima, K., ppOpen-HPC: Open Source Infrastructure for Development and Execution of Large-scale Scientific Applications on Post-Peta-Scale Supercomputers with Automatic Tuning (AT), International Workshop: Sparse Solvers for Exascale: From Building Blocks to Applications (Greifswald, Germany, 2015.3.25)

166. Nakajima, K., and Katagiri, T., ppOpen-HPC: Open Source Infrastructure for Development and Execution of Large-Scale Scientific Applications with Automatic Tuning (AT), Proceedings of PASC'15 (The Platform for Advanced Scientific Computing) (Zurich, Switzerland, 2015.6.1)
167. Nakajima, K., Parallel Multigrid Solvers on Multicore Cluster Architectures, Sparse Days 2015 in Saint-Girons III (Saint Giron, France, 2015.6.30)
168. Nakajima, K., CAE Applications to be Ready for Exascale Systems: What we can see beyond ppOpen-HPC, Sapporo Summer HPC Seminar 2015 (Sapporo, Japan, 2015.7.23)
169. Satoh, M., Y. Yamada, C. Kodama, M. Sugi, M. Nakano, A. T. Noda, Tropical cyclone (TC) statistics simulated by a NICAM AMIP-type simulation and their future change. 12th the Annual Meeting of Asia Oceania Geoscience Society, Singapore. (2015.8.4)
170. Naoki Morita, Gaku Hashimoto and Hiroshi Okuda, Robust incomplete factorization preconditioner with mixed-precision for parallel finite element analysis, SIAM Conference on Applied Linear Algebra (Atlanta, Georgia, USA, 2015.10.26)
171. Satoshi Ohshima, Takahiro Katagiri, Masaharu Matsumoto, Utilization and Expansion of ppOpen-AT for OpenACC program, Second Workshop on Accelerator Programming using Directives (WACCPD) (Austin, USA, 2015.11.16)
172. Nakajima, K., ppOpen-HPC beyond Post-Peta Scale Computing, International Workshop on Software for Peta-Scale Numerical Simulation (SPNS2015) (Tokyo, 2015.12.3-4)
173. Satoh, M., High-resolution global nonhydrostatic simulations by NICAM using the K computer, International Workshop on Software for Peta-Scale Numerical Simulation (SPNS2015) (Tokyo, 2015.12.3-4)
174. Ida, A. and Iwashita, T., HACApK: Library for Large-scaled Simulations Using the Integral Equation Method, International Workshop on Software for Peta-Scale Numerical Simulation (SPNS2015) (Tokyo, 2015.12.3-4)
175. Katagiri, T., Matsumoto, M., and Ohshima, S., Towards Automatic Code Selection with ppOpen-AT: A Case of FDM - Variants of Numerical Computations and Its Impact on a Multi-core Processor -, International Workshop on Software for Peta-Scale Numerical Simulation (SPNS2015) (Tokyo, 2015.12.3-4)
176. Arakawa, T., Introduction of atmosphere-ocean model coupling and seismic-structure model coupling by a coupler ppOpen-MATH/MP, International Workshop on Software for Peta-Scale Numerical Simulation (SPNS2015) (Tokyo, 2015.12.3-4)
177. Furumura, T., Design of parallel FDM simulation code for earthquake ground motion simulation suitable for many-core machines, International Workshop on Software for Peta-Scale Numerical Simulation (SPNS2015) (Tokyo, 2015.12.3-4)Matsumoto, M., Arakawa, T., Kitayama, T., Coupled Multi-scale Simulations using ppOpen-HPC Libraries
178. Okuda, H., Morita, N., and Hashimoto, G., Parallel Localized Robust Incomplete Factorization Preconditioning IRIF(p) with Mixed-precision, International Workshop on Software for Peta-Scale Numerical Simulation (SPNS2015) (Tokyo, 2015.12.3-4)
179. Kitayama, T., and Okuda, H., Development and Usage of ppohFEM: A Library for Parallel Application with Finite Element Method, International Workshop on Software for Peta-Scale Numerical Simulation (SPNS2015) (Tokyo, 2015.12.3-4)
180. Takahashi, Y., Tokumasu, T., Fujiwara, K., and Iwashita, T., Error Correction Method for High Performance Electromagnetic Field Simulation, International Workshop on Software for Peta-Scale Numerical Simulation (SPNS2015) (Tokyo, 2015.12.3-4)
181. Hemmi, T., The ppOpen-APPL/DEM-Util libraries and the DEM applications, International Workshop on Software for Peta-Scale Numerical Simulation (SPNS2015) (Tokyo, 2015.12.3-4)

182. Yamamoto, M., Particle method in large scale simulation and its application, International Workshop on Software for Peta-Scale Numerical Simulation (SPNS2015) (Tokyo, 2015.12.3-4)

③ ポスター発表 (国内会議 12 件、国際会議 25 件)  
〈国内〉

1. 野瀬田裕樹, 河合直聡, 岩下武史, 高橋康人, 美船健, 中島浩, 並列境界要素解析フレームワークの設計と実装, 先進的計算基盤システムシンポジウム (SACSIS2012) (神戸, 2012.5.16)
2. 大谷真紀子, 平原和朗, 堀高峰, 兵藤守, 福島沖における固着の変化を含む東北地方太平洋沖地震発生サイクルシミュレーション, 日本地球惑星科学連合 2012 年大会 (千葉, 2012.5.25)
3. 荒川隆, 井上孝洋, 佐藤正樹, 全球大気モデル NICAM と海洋大循環モデル COCO の結合, 気象学会秋季大会, 北海道大学 (札幌, 2012.10.5)
4. 平原和朗, 大谷真紀子, 鹿倉洋介, 兵藤守, 堀高峰, 橋間昭徳, 漸化型メモリ変数法を用いた粘弾性媒質における地震発生サイクルシミュレーション, 日本地震学会 2012 年秋季大会 (函館, 2012.10.17)
5. 大谷真紀子, 平原和朗, 堀高峰, 兵藤守, 2011年東北地方太平洋沖地震より大きな地震は東北で発生するか, 日本地震学会2012年秋季大会 (函館, 2012.10.18)
6. 河合直聡, 最新プロセッサの SIMD 演算を活用する並列化ガウス=ザイデルスムーザの実装方法, 先進的計算基盤システムシンポジウム (SACSIS 2013), 仙台国際センター (仙台, 2013. 5. 23)
7. 梅澤美佐子, 臼井英之, 松本正晴, 西野真木, 三宅洋平:太陽風プラズマと月面局所磁場の相互作用に関する粒子シミュレーション, 日本地球惑星科学連合 2013 年大会(幕張, 2013.5.24)
8. 荒川隆, 井上孝洋, 久保川陽呂鎮, 八代尚, 佐藤正樹: NICAM-COCO/NICAM-IO 結合の現状と将来展望, 気象学会秋季大会, 仙台国際センター (仙台, 2013. 11. 21)
9. 松本正晴, 臼井英之, 沼波政倫, 中島研吾, “適合格子細分化手法を用いたプラズマ PIC シミュレーションの開発”, 2014 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 (HPCS2014) (東京, 2014.1.7)
10. Furuichi, M., Nishiura, D., “Parallel performance of particle method in Multi-core and Many-core system”, 地球惑星連合大会 2014, パシフィコ横浜 (横浜, 2014.4.30)
11. 荒川隆, 井上孝洋, 久保川陽呂鎮, 八代尚, 佐藤正樹: NICAM 低解像度計算における単体実行と COCO 結合時の比較, 気象学会秋季大会, 福岡国際会議場 (福岡, 2014.10.21)
12. Ida A., Iwashita T., Mifune T. and Takahashi Y., Adaptive Cross Approximation-based Preconditioner of Klyrov Subspace Methods for Hierarchical Matrices, ACSI2015, つくば国際会議場 (筑波, 2015.1.27)

〈国際〉

13. Takahiro Katagiri, Satoshi Ito, Satoshi Ohshima, Kengo Nakajima, Yoshikazu Kamoshida and Hideyuki Jitsumoto, Development of ppOpen-AT --An Auto-tuning Description Language for ppOpen-HPC--, 2nd AICS International Symposium-Computer and Computational Sciences for Exascale Computing (Kobe, 2012.3.1-2)
14. Nakajima, K., OpenMP/MPI Hybrid Parallel Multigrid Method on Post-Peta/Exa Scale Supercomputer Systems, HPC in Asia Workshop, ISC'12 (Hamburg, Germany, 2012.6.17)
15. Satoshi ITO, Satoshi OHSHIMA, Takahiro KATAGIRI, Implementation of ppOpen-AT into OpenFOAM, 110th International Meeting on High-Performance

- Computing for Computational Science (VECPAR 2012), RIKEN Advanced Institute for Computational Science (AICS) (Kobe, Japan, 2012.7.19)
16. Takeshi Kitayama, Takeshi Takeda and Hiroshi Okuda, An Implementation of Development Support Middleware for Finite Element Method Application, 10th International Meeting on High-Performance Computing for Computational Science (VECPAR 2012), RIKEN Advanced Institute for Computational Science (AICS) (Kobe, Japan, 2012.7.19)
  17. Masaharu Matsumoto, Yohei Yagi, Hideyuki Usui and Masanori Nunami, Development of Parallelized Plasma PIC Simulation Code with Adaptive Mesh Refinement, 2013 International Supercomputing Conference (ISC' 13), HPC in Asia Session (Leipzig, Germany, 2013.6.17)
  18. Satoshi OHSHIMA, Performance Evaluation of SpMV on Current Parallel Processors -- CPU vs GPU vs MIC --, HPC in Asia at International Supercomputing Conference (ISC'13) (Leipzig, Germany, 2013.6.17)
  19. Hideyuki Jitsumoto, Yoshikazu Kamoshida, Application-Level Checkpoint/Restart Framework with Optimal Checkpoint Interval, HPC in Asia at International Supercomputing Conference (ISC'13) (Leipzig, Germany, 2013.6.17)
  20. Akihide Nagara, Masanori Nunami, Masaharu Matsumoto and Hideyuki Usui: Development of a Computational Module for Adaptive Mesh Refinement Simulations, 23rd International Toki Conference (Toki, Japan, 2013.11.20)
  21. Hideyuki Usui, Misako Umezawa, Yohei Miyake, Masaharu Matsumoto and Masaki Nishino: PIC Simulations on Plasma Response to a Meso-Scale Magnetic Dipole, The American Geophysical Union's 46th annual Fall Meeting (San Francisco, USA, 2013.12.13)
  22. Hideyuki Usui, Akihide Nagara, Masanori Nunami and Masaharu Matsumoto, "Development of a Computational Framework for Block-Based AMR Simulations", *Procedia Computer Science*, vol.29, pp.2351-2359, 2014 (DOI: 10.1016/j.procs.2014.05.219), Proceedings of Fourth International Workshop on Advances in High-Performance Computational Earth Sciences: Applications and Frameworks (IHPCES 2014) in conjunction with ICCS 2014 (Cairns, Australia, 2014.6.1-3)
  23. Nakajima, K., Parallel Preconditioning Methods for Iterative Solvers based on BILUT(p,d,t), HPC in Asia Workshop Poster Session (Finalist of the Best Poster Award), ISC'14 (Leipzig, Germany, 2014.6.26)
  24. Satoshi Ohshima, Performance Evaluation of SpMV Considering Matrix Layout Parameters, HPC in Asia session, ISC'14 (Leipzig, Germany, 2014.6.26)
  25. Masaharu Matsumoto, Futoshi Mori, Satoshi Ohshima, Hideyuki Jitsumoto, Takahiro Katagiri and Kengo Nakajima: Development of an AMR Framework for FDM Applications on Parallel Processors, HPC in Asia session, ISC'14 (Leipzig, Germany, 2014.6.26)
  26. Nakajima, K., Parallel Preconditioning Methods for Iterative Solvers based on BILUT(p,d,t), 11th International Meeting High Performance Computing for Computational Science (VECPAR 2014) (Eugene, OR, USA, 2014.7.1)
  27. Takeshi Kitayama, Olav Aanes Fagerlund and Hiroshi Okuda, Effects of Blocking and Re-Ordering of Matrix Index in a Parallel Linear Iterative Solver of FEM Application Development Support Middleware, 11th International Meeting High Performance Computing for Computational Science (VECPAR 2014) (Eugene, OR, USA, 2014.7.1)
  28. Kazuki Tsuchiya, Hideyuki Usui, Takuma Matsubara, Masanori Nunami and Masaharu Matsumoto: Three-Dimensional AMR-PIC Simulations on Ion Beam Neutralization in Ion Engine, 24th International Toki Conference (Toki, Japan, 2014.11.6)
  29. Kengo Nakajima, ppOpen-HPC: Open Source Infrastructure for Development and Execution of Large-Scale Scientific Applications on Post- Peta-Scale

- Supercomputers with Automatic Tuning (AT), JST/CREST International Symposium on Post Petascale System Software (ISP2S2) (Kobe, 2014.12.2)
30. Takashi Arakawa, Multi-scale and Multi-physics simulation of Seismic wave-building vibration coupling by using the ppOpen-HPC libraries, JST/CREST International Symposium on Post Petascale System Software (ISP2S2) (Kobe, 2014.12.2)
  31. Miki Yamamoto, ppOpen-APPL/DEM: Integrated libraries for simulation of many particles with short-range interactions, JST/CREST International Symposium on Post Petascale System Software (ISP2S2) (Kobe, 2014.12.2)
  32. Masaharu Matsumoto, Performance Evaluations of Applications using the ppOpen-APPL/FDM Library, JST/CREST International Symposium on Post Petascale System Software (ISP2S2) (Kobe, 2014.12.2)
  33. Ida, A., Iwashita, T., Mifune, T. and Takahashi, Y., A Variable Preconditioning of Krylov Subspace Methods for Hierarchical Matrices with Adaptive Cross Approximation, (Compumag 2015), (Montreal, Canada 2015.7.12).
  34. Nakajima, K., Sparse linear solver based on extended ELL storage format of coefficient matrix for manycore architectures, HPC in Asia Poster Session, ISC15 (Frankfurt, Germany, 2015.7.15)
  35. Masaharu Matsumoto, Takashi Arakawa, Takeshi Kitayama, Futoshi Mori, Hiroshi Okuda, Takashi Furumura and Kengo Nakajima, Implementation and Evaluation of Coupled Multi-Scale Simulation for Seismic Wave and Building Vibration, HPC in Asia Poster Session, ISC15 (Frankfurt, Germany, 2015.7.15)
  36. Satoshi Ohshima, Masaharu Matsumoto, Takahiro Katagiri, Toshihiro Hanawa and Kengo Nakajima, Implementation and Performance of ICCG solver using OpenMP and OpenACC, HPC in Asia Poster Session, ISC15 (Frankfurt, Germany, 2015.7.15)
  37. Masaru Miyashita, Masaharu Matsumoto and Kenichi Kubota: The Development of Adaptive Mesh Refinement Technique for Hybrid Kinetic/Fluid Plasma Simulation, 2015 International Conference on Numerical Simulation of Plasmas (Golden, USA, 2015.8.12)

#### (4)知財出願

##### ①国内出願 (1 件)

1. 阪口 秀, 西浦 泰介, 「解析装置, 解析方法, 解析プログラム及び記録媒体」, 特願 2011-228247

##### ②海外出願 (0 件)

##### ③その他の知的財産権

1. ppOpen-HPC : 科学技術振興機構戦略的創造研究推進事業 (CREST) 「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: 自動チューニング機構を有するアプリケーション開発・実行環境」, <http://ppopenhpc.cc.u-tokyo.ac.jp/>

#### (5)受賞・報道等

##### ①受賞

1. \*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 最優秀論文賞, 河合直聡, 岩下武史, 中島浩(2012.1.25)
2. JACM Fellows Award, Takashi Furumura(2012.7.10)
3. \* Best Paper Award in IEEE MCSoc-13, Takahiro Katagiri, Cheng Luo, Reiji Suda, Shoichi Hirasawa, Satoshi Ohshima(2013.9.26)
4. \*第 19 回計算工学講演会グラフィックスアワード特別賞, 西浦泰介・阪口秀(2014.6.12)

5. \*Best Paper Award, 5th International Conference on Computational Methods, O. A. Fagerlund, T. Kitayama, G. Hashimoto and H. Okuda (2014.7.28-30)
6. \*Best Paper Award, 20<sup>th</sup> IEEE International Conference for Parallel and Distributed Systems (ICPADS 2014), Kengo Nakajima (2014.12.18)

②マスコミ(新聞・TV等)報道

③その他

ソフトウェア公開

<http://ppopenhpc.cc.u-tokyo.ac.jp/>

[http://cpc.cs.qub.ac.uk/summaries/AESI\\_v1\\_0.html](http://cpc.cs.qub.ac.uk/summaries/AESI_v1_0.html)

(6)成果展開事例

① 実用化に向けての展開

- JHPCN (学際大規模情報基盤共同利用共同研究拠点) 共同研究課題等への適用
  - 粉体解析アルゴリズムの並列化に関する研究 (堀端康善教授 (法政大) 他) (平成 25 年度~): 粉体シミュレーションのための高速化手法で現れる性能パラメータへの自動チューニングの利用を実施している (ppOpen-AT)。
  - ポストペタスケールシステムを目指した二酸化炭素地中貯留シミュレーション技術の研究開発 (山本肇博士 (大成建設) 他) (H25 年度~): 有限体積法による二酸化炭素地中貯留シミュレーションコードにおける並列線形ソルバーのハイブリッド並列化, 並列可視化機能の導入を実施している。特に疎行列格納形式として Block ELL 法を採用することによって, Fujitsu PRIMEHPC FX10 (Oakleaf-FX) 1,440 ノード使用時に従来 2-3 倍の計算性能が得られている (ppOpen-APPL/FVM, ppOpen-MATH/MG, ppOpen-MATH/VIS)。
- JST 研究成果展開事業「戦略的イノベーション創出推進プログラム (S-イノベ)」への展開
  - 京都大学大学院工学研究科電気工学専攻雨宮教授が実施している「高温超伝導を用いた高機能・高効率・小型加速器システムへの挑戦」における超伝導コイルの解析において, 本 CREST で開発した分散 H 行列ライブラリ HACApK の利用を適用中である (ppOpen-APPL/BEM)。

② 社会還元的な展開活動

本研究の成果はインターネット (URL: <http://ppopenhpc.cc.u-tokyo.ac.jp>) で公開し, 一般に情報提供している。ソフトウェア, ドキュメントのダウンロードも可能である。下記に個別の共同研究事例, 適用事例等を示す:

- JHPCN (学際大規模情報基盤共同利用共同研究拠点) 共同研究課題への適用
  - 高精度行列 - 行列積アルゴリズムにおける並列化手法の開発 (大石進一教授 (早稲田大) 他) (平成 24 年度, 研究としては継続): 高精度行列-行列積演算における行列-行列積の実装方式選択 (ppOpen-AT)。
  - 巨大地震発生サイクルシミュレーションの高度化 (平原和朗教授 (京大) 他) (平成 24 年度~): 地震発生サイクルシミュレーションに並列化 H 行列法, 局所細分化手法を適用している (ppOpen-APPL/FVM, ppOpen-APPL/BEM)
  - 太陽磁気活動の大規模シミュレーション (横山央明准教授 (東大) 他) (平成 25 年度~): 有限差分法, 有限体積法による太陽磁気活動シミュレーションコードにおいて, 並列線形ソルバー, 並列可視化機能の導入を実施している (ppOpen-APPL/FDM, ppOpen-APPL/FVM, ppOpen-MATH/MG, ppOpen-MATH/VIS)。

- 天体活動現象の輻射磁気流体シミュレーション（松元亮治教授（千葉大）他）（平成 24 年度～）：有限差分法，有限体積法による天体活動現象の輻射磁気流体シミュレーションコードにおいて，並列線形ソルバー，並列可視化機能の導入を実施している（ppOpen-APPL/FDM，ppOpen-APPL/FVM，ppOpen-MATH/MG，ppOpen-MATH/VIS）。
- その他共同研究への適用
  - OPL（Open Petascale Libraries）プロジェクト：2012 年 10 月より Open Petascale Libraries プロジェクト（<http://www.openpetascale.org/>）に東大情報基盤センターが参加しており，ppOpen-HPC プロジェクトで開発したライブラリをコミュニティに広げて行く予定である。また，PETSc の OpenMP/MPI ハイブリッド化を実施している Imperial College のグループに協力している。（ppOpen-APPL，ppOpen-MATH，ppOpen-AT）
  - Aleksandra Maluckov 氏（Belgrade 大学（セルビア））：「双極性ボーズ・アインシュタイン凝縮シミュレーションに対する並列 H 行列法の適用」に関する研究を行っている（ppOpen-APPL/BEM）。
  - 兵藤・堀グループ（海洋研究開発機構）：京コンピュータにおける地震サイクルシミュレーションを行っている海洋研究開発機構のグループのコードに本プロジェクトで開発した並列 H 行列法ライブラリを提供し，同シミュレーション上で利用されている。
  - 田中輝雄教授（工学院大）：田中研究室開発の AT 方式（d-spline 方式）の適用対象として ppOpen-AT の AT 機能を拡張して適用している（ppOpen-AT）。
  - 須田礼仁教授（東大）：電力最適化のため，須田研究室で開発中の AT 方式と電力測定の間通 API を利用し ppOpen-AT を用いた電力最適化方式を提案した。本成果は，国際会議 IEEE MCSoc-13 の最優秀論文賞を受賞した。（ppOpen-AT）。
  - 王偉仲教授（国立台湾大学）：王教授のグループで開発した AT 方式（サロゲーションモデル）の適用対象として ppOpen-AT の AT 機能を拡張して適用している（ppOpen-AT）。
  - 辻本恵一博士（公益財団法人地球環境産業技術研究機構）：CO<sub>2</sub> の地下深部塩水層（帯水層）への地中貯留有限要素法シミュレーションへ大規模並列ソルバー，可視化機能を適用している（ppOpen-APPL/FEM）。
  - 将来の HPCI システムに関する調査研究（アプリケーション分野）：ppOpen-APPL/FDM の原型コードである地震動シミュレーションコード（Seism3D）を提供し，併せて ppOpen-AT による自動チューニング事例も紹介している（ppOpen-APPL/FDM，ppOpen-AT）。
  - 臼井英之教授（神戸大学）：惑星間航行システム開発に向けたマルチスケール粒子シミュレーションへ AMR 機能を拡張して適用している（ppOpen-APPL/AMR-FDM）。
  - 宮下大氏（住友重機械工業）：透明導電膜を成膜する RPD（Reactive Plasma Deposition）装置の開発へ向けたシミュレーションへ AMR 機能を適用している（ppOpen-APPL/AMR-FDM）。
- 講義・講習会での使用
  - 東京大学大学院で実施されている以下の講義で，並列可視化機能 ppOpen-MATH/VIS を教材として使用している：
    - ◇ 並列計算プログラミング・先端計算機演習（理学系研究科）
    - ◇ 科学技術計算 II（情報理工学系研究科）
    - ◇ コンピュータ科学特別講義 II（情報理工学系研究科）
  - 東京大学で実施されている以下の講義で，最先端の研究事例として ppOpen-AT を教材として使用している：
    - ◇ 工学部共通科目「スパコンプログラミング（1）（I）」
    - ◇ 東京大学教養学部「全学研究ゼミナール」「スパコンプログラミング研究ゼミ」

- ▶ 東京大学教養学部「全学体験ゼミナール」で ppOpen-APPL/FDM を地震波伝播の並列シミュレーションの演習の教材として活用している。
- ▶ 東京大学情報基盤センターで実施しているお試しアカウント付き講習会において教材として使用し、普及に努めている。
  - ◇ ライブラリ利用：高性能プログラミング初級入門（2014年3月，2014年9月，2015年3月，2015年9月）（ppOpen-APPL/FDM）
  - ◇ MPI 応用編：並列有限要素法入門：（2013年6月，2014年5月，2014年10月，2015年5月）（ppOpen-MATH/VIS）
  - ◇ ppOpen-HPC で学ぶ並列プログラミングと並列前処理付き反復法（2015年2月）（ppOpen-APPL/FVM, ppOpen-MATH/VIS）

## § 5 研究期間中の活動

### 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
H23.06.01	First International Workshop on Advances in High-Performance Computational Earth Sciences: Applications & Frameworks (IHPCES)	Nanyang Technological University, Singapore	50	ICCS 2011 のワークショップ，中島・佐藤・古村がオーガナイザ
H24.05.24-25	CREST 堀チームとの合同ワークショップ（一部公開）	理化学研究所 計算科学研究機構	48人	堀チームとの合同ワークショップ
H24.12.06-07	International Workshop on Software for Peta-scale Numerical Simulation (SPNS2012)(公開)	京都大学学術情報メディアセンター	50	国際ワークショップ，研究進捗報告，学術交流

年月日	名称	場所	参加人数	概要
H25.12.04	第16回先進スーパーコンピューティング環境研究会（Advanced Supercomputing Environment, ASE）	東京大学情報基盤センター	16	SPNS2013（後掲）の海外招待講演者のうち4名の講演によるセミナーを実施した
H25.12.05-06	International Workshop on Software for Peta-Scale Numerical Simulation (SPNS2013)	東京大学地震研究所	50	本プロジェクトの国際ワークショップ

年月日	名称	場所	参加人数	概要
H26.03.24-25	第35回お試しアカウント付き並列プログラミング講習会「ライブラリ利用：高性能プログラミング初級入門」	東京大学情報基盤センター	5	ppOpen-APPL/FVM，ppOpen-APPL/FDM の利用講習会
H26.09.10-11	第39回お試しアカウント付き並列プログラミング講習会「ライブラリ利用：高性能プログラミング初級入門」	東京大学情報基盤センター	10	ppOpen-APPL/FDM の利用講習会

年月日	名称	場所	参加人数	概要
H26. 10.07-08	第 40 回お試しアカウント付き並列プログラミング講習会「MPI 応用編:並列有限要素法入門」	東京大学情報基盤センター	15	ppOpen-MATH/VIS 利用
H26.02.18	第 42 回お試しアカウント付き並列プログラミング講習会「ppOpen-HPC で学ぶ並列プログラミングと並列前処理」	東京大学情報基盤センター	15	ppOpen-APPL/FVM の利用講習会
年月日	名称	場所	参加人数	概要
H27. 03.26-27	第 44 回お試しアカウント付き並列プログラミング講習会「ライブラリ利用:高性能プログラミング初級入門」	東京大学情報基盤センター	10	ppOpen-APPL/FDM の利用講習会
H27.05.19	オーガナイズドセッション: ppOpen-HPC と大規模シミュレーション	東京大学武田先端知ホール	120	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(HPCS2015)オーガナイズドセッション(発表者:中島, 伊田, 松本)
H27. 05.26-27	第 46 回お試しアカウント付き並列プログラミング講習会「MPI 応用編:並列有限要素法とハイブリッド並列プログラミング入門」	東京大学情報基盤センター	15	ppOpen-MATH/VIS 利用
H27.06.01	MS08: Scientific Libraries/Frameworks in Japan for Future HPC Systems	ETH Zurich	50	Minisymposium: PASC'15 (The Platform for Advanced Scientific Computing) (発表: 中島 T, 櫻井 T, 丸山 T, 塩谷 T)
H27.07.22	サイトビジット	東京大学情報基盤センター	16	研究進捗報告
H27.07.23	Sapporo Summer HPC Seminar	北海道大学	20	ポストペタ CREST 4 チーム合同セミナー
H27. 09.01-02	第 48 回お試しアカウント付き並列プログラミング講習会「ライブラリ利用:高性能プログラミング初級入門」	東京大学情報基盤センター	10	ppOpen-APPL/FDM の利用講習会

年月日	名称	場所	参加人数	概要
H27.10.16	第 20 回先進スーパーコンピューティング環境研究会 (Advanced Supercomputing Environment, ASE)	東京大学情報基盤センター	20	IWACOM-III 海外招待講演者 3 名の講演によるセミナー (CREST 予算で招聘)
H27.12.02	第 21 回先進スーパーコンピューティング環境研究会 (Advanced Supercomputing Environment, ASE)	東京大学情報基盤センター	20	SPNS2015(後掲)の海外招待講演者のうち 3 名の講演によるセミナーを実施した
H27.12.03-04	International Workshop on Software for Peta-Scale Numerical Simulation (SPNS2015)	東京大学地震研究所	30	本プロジェクトの国際ワークショップ

## §6 最後に

多様な機能を備えたアプリケーション開発フレームワークの開発は研究代表者(中島)の長年の夢であった。自分が関わったものも含めて多くの既存研究があったが、「自動チューニング」の考え方を導入することによって新しい提案を行うことができた。

主たる共同研究者としては、各分野を代表する経験豊富な研究者の皆様にお集まりいただいた。大規模アプリケーション⇒機能を切り出してフレームワーク・ライブラリ開発⇒アプリケーションへの適用⇒フィードバックによる更なる高度化、というサイクルをチーム内、場合によってはグループ内で閉じて実施できることは大きな強みであった。システムソフトウェア、自動チューニング、数値アルゴリズムから地球科学(大気海洋科学、地震学)、工学など幅広い分野の専門家が多数集まって協働することには当初は困難も感じたが、

- 実用アプリケーションへの積極的な適用
- ソフトウェアの公開

という方針を各メンバーが良く理解してくれたことで、徐々に研究開発が円滑に進むようになった。プロジェクト開始1年半後に第1回の公開をできたことは、各メンバーのそれまでの蓄積もあるとは言え、持続的に研究開発を実施していく上では非常に重要な分岐点となった。各メンバーの幅広い人脈を通じて様々な分野への応用を早い時期に開始できた点も重要であった。

本研究では自動チューニング、行列ソルバー、連成カプラーなどの数値アルゴリズム、計算機科学的な成果だけでなく、それらを利用した大気-海洋連成シミュレーションなど、科学的にも重要な成果をあげることができた。

個人的には自分自身で研究開発をもっとやりたい気持ちが強かったのだが、中々計画通りに進まない面があった。各メンバーが成果を出してくれたおかげで(ターゲットとしていたポスト T2K システム導入の遅れなどはあったものの)全体としては、平成 22 年秋に提案書を執筆した当時の予定通り、あるいはそれを上回る成果を達成することができた。また、本研究の実施を通じて、ポスト京、エクサスケール、またポストムーアへ向けての見通しも立てることができた。

本報告書提出直前(2015年12月3・4日)に当プロジェクトの国際ワークショップ(SPNS 2015)が開催された。以下は招待講演者の1人が会議終了後に送ってくれたメールの一部である:

It was good for me to meet and discuss ideas with the people on your team. As I mentioned, I am very impressed by the scope of your project, its depth, and what it has accomplished.

「広く、深く」ということを目標としてきたので、このように評価してもらえたのは非常に喜ばしいことである。各メンバーには深く感謝したい。



SPNS 2015 集合写真