

戦略的創造研究推進事業 SPPEXA(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「ポストペタスケールシミュレーション
のための階層分割型数値解法ライブラリ開発」

研究終了報告書

研究期間 平成28年1月～平成30年3月

研究代表者:塩谷 隆二
(東洋大学総合情報学部、教授)

§ 1 研究実施の概要

(1) 実施概要

ポストペタスケールシステムなど次世代の並列計算機アーキテクチャにおいて、大規模な数値計算データ処理を必要とする実アプリケーション・ソフトウェアが高い演算効率を得るためには、マイクロプロセッサやメモリなどハードウェアが持つ階層構造を考慮したプログラミングモデルを採用することが必要である。特に、入力データ生成や可視化などのプレ・ポスト処理から数値解析手法などのソルバー処理に至るまで、全ての処理がスパコン上で行われることを想定する必要がある。そこで本チームでは、次世代並列計算機上における大規模数値計算データ処理システムに関する基盤技術として、これまで主に数値解析手法向けに研究開発してきた階層型領域分割法(HDDM)の技術を応用した、HDDMによる大規模数値計算データ処理システムの研究開発を行った。特に、学術研究・産業界で需要が高い有限要素法(FEM)と粒子法による連続体力学のシミュレーションを対象を絞ることで高性能が得られるアプリケーション特化型システムソフトウェア開発を行った。ターゲットとするアプリケーション・ソフトウェアは、本チームメンバーがこれまで開発に携わってきている、HDDMによる大規模計算・超並列計算で実績があり、HPCI戦略プログラムやポスト「京」重点課題でも利用されているオープンソースCAEソフトウェア ADVENTUREとした。ただし、ADVENTUREにはこれまで粒子法に関連するソフトウェアは含んでいなかったため、粒子法ソルバーについては本研究による新たな開発アプリケーションとなる。

本研究は、「DDM 入出力ライブラリ」、「DDM ソルバーライブラリ」、「連続体力学向け DSL」、「連続体力学系シミュレータ」の 4 つの研究項目に分類して研究開発を行った。本研究の成果物であるソフトウェアは、ADVENTURE プロジェクトホームページ内のサブプロジェクトページ(URL; <http://adventure.sys.t.u-tokyo.ac.jp/lexadv/>)にて一般に無料公開している。

DDM 入出力ライブラリでは、粒子法シミュレーションに対応した標準 I/O ライブラリ AdvIO2、多階層領域分割と並列メッシュ細分割機能を有し、かつ、MPI-OpenMP ハイブリッド並列処理やリスタート機能によって大規模データ生成を可能とするツール AdvMetis2、領域内部自由度削除と多階層精度圧縮数値記録技術によって FEM や粒子法の計算データを圧縮する DDM 圧縮技術、超高解像度シミュレーション向けに 10 万×10 万ピクセル超のオフライン可視化を実現し、かつ、メッシュと粒子の描画に対応した高可搬な LexADV_VSCG ライブラリ、DDM のデータ構造を活用した MPI-OpenMP ハイブリッド並列可視化と独自トーナメント方式による Z バッファ画像合成処理を行う LexADV_WOVis を開発した。また、粒子法向けに、隣接プロセス間通信を少なくするバケットベース 2 階層領域分割と Halo 通信パターン生成機能を持つ分散メモリ並列 MPS 陽解法ソルバーフレームワーク LexADV_EMPS を開発した。これにより、AdvMetis2 を用いることでポストペタスケールシステムにおいて想定する 1 兆自由度規模メッシュの生成に成功し、さらに、LexADV_EMPS を用いることで従来困難であった数千万から数億規模の粒子法シミュレーションが可能となった。

DDM ソルバーライブラリでは、有限要素法シミュレーションコード開発者向けに領域分割メッシュと部分領域ごとにサブアセンブリした係数行列や右辺ベクトルを入力とし、実対称系向けに CG 法や MINRES 法、複素対称系向けに COCG 法や MINRES-like_CS 法などが利用可能、かつ、「京」で 85%以上の高い強スケーリング性能を持つ反復法ライブラリ LexADV_IsDDM を開発した。LexADV_IsDDM を用いることで、従来困難であった非構造メッシュによる 1 千億自由度規模の構造解析に成功した。また、高速・高安定な収束性を持つ Scaled-BDD 法を開発し、複数材料モデルにおいて反復回数・計算時間の削減に成功した。さらに、DDM 反復法のお試しや BDD 前処理の研究開発支援を目的として、領域分割メッシュと全体係数行列・右辺ベクトルを入力とし、全体 Schur 補元方程式を陽に構築する反復法ライブラリ LexADV_TryDDM も合わせて開発した。LexADV_TryDDM を用いることで、BDD 法と IC 分解や SSOR 前処理などとの比較検討が容易に行えるようになった。また、メッシュフリー向けには、粒子法で現れる大規模な圧力ポアソン方程式に対して PA-AMG 法を用いることで高速化できることを示した。

連続体力学向け DSL では、要素・セル・粒子に対する物理モデルを対象とし、LaTeX ベース

数式記述からプログラムコードへのトランスレータ開発、小規模行列やテンソル演算をマルチコア・メニーコアプロセッサや GPU などに最適化した LexADV_AutoMT ライブラリを開発した。トランスレータからは LexADV_AutoMT ライブラリをコールするプログラムが生成されるため、ユーザーは計算機アーキテクチャの違いを考慮する必要がなく、高性能を得ることが可能となった。

連続体力学系シミュレータでは、DDM 反復法を用いた大規模電磁界シミュレータを開発し、特にモーターなど移動体を含むモデル向け分散メモリ並列アルゴリズム開発による高効率化、医療画像から構築された 3 次元ボクセルデータ向け異材境界平滑化技術開発による高精度化などを実現した。また、LexADV_EMPS ライブラリを用いた MPS 陽解法による大規模流体シミュレータを開発し、特に流体剛体連成計算、高次精度微分モデル、表面張力モデルなどの機能の開発を行った。LexADV_EMPS を用いた津波遡上解析を実施し、浸水領域による妥当性確認によってその有効性を示した。図 1 に LexADV_EMPS を用いた津波遡上解析を行い、その流体圧力を地上構造物に与え、構造 FEM ソフトウェア AdvSolid を用いて応力解析を行った結果を示す。図 1 中に流体剛体連成機能によりタンクが流されている様子が示されている。このように、本研究成果により、大規模分散メモリ環境で、粒子法による流体解析と有限要素法による構造解析の連成解析が可能となった。

SPPEXA 共同研究では、EXASOLVERS チームの UG ソルバーを PC クラスタに移植し、ラプラス方程式ソルバーによる強スケーリング性能評価やポアソン方程式ソルバーにおける計算精度評価などを実施し、UG ソルバーと HDDM ソルバーの相互評価を行う環境を整備した。また、C++ Boost ライブラリを利用する UG4 の移植作業を通し、ポストペタスケールシステムに向けたコンパイラの課題が明らかになった。

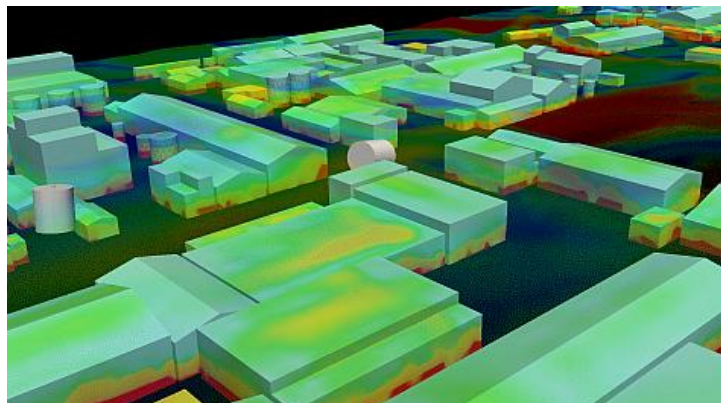


図 1 LexADV_EMPS による流体解析と AdvSolid による構造解析の結果

(2) 顕著な成果

< 優れた基礎研究としての成果 >

1. ParMETIS を用いた MPS 陽解法の分散メモリ型並列アルゴリズムの開発 概要:

分散メモリ型並列計算機に対して MPS 陽解法を効率的に実装するために、プロセス間通信が少ないバケットベース領域分割と動的負荷分散のアルゴリズムを開発した。これにより、世界的にトップクラスとなる数千万規模粒子、かつ、数千プロセス並列の計算が可能となった。本成果を含む論文が「平成 24 年度計算工学会論文賞」を受賞、国際会議 SC15 と SC16 において Best Poster Finalist に選ばれるなど、国内外で高く評価された。本成果の内容は、オープンソースソフトウェア LexADV_EMPS として一般公開した。

2. 階層型領域分割法による超大規模有限要素解析技術の開発

概要:

超並列計算機で超大規模有限要素解析を実現するために、メニーコアプロセッサを想定したハイブリッド並列化、局所 Schur 補元行列の陽的構築による演算効率化、複数材料モデル解析

を高速化する ScaledBDD 法開発, 複素線形対称方程式を効率的に求解する MINRES-like_CS 法開発, などを行った. これにより, 「京」8,196 計算ノードを用いて世界的にトップクラスとなる 1 千億自由度規模の有限要素解析に成功した. 本成果は, 「第 18 回日本計算工学講演会ベストペーパーアワード」を受賞, 査読付き国際会議 CEFC2016 で口頭発表(採択率は約 10%)に選ばれる, など国内外で高く評価された. 本成果の内容は, オープンソースソフトウェア LexADV_IsDDMとして整備した.

3. 数値人体モデルに対する高精度電磁界解析技術の開発

概要:

温熱療法シミュレーションにおける電磁界解析を高精度化するために, 医療画像から構築したボクセルベースの 3 次元数値人体モデルに対して, 異材境界間の平滑化処理を伴った自動メッシュ細分割技術を開発した. これにより, 骨表面などにおける電界ノイズを低減し, 高精度化することに成功した. 本成果の内容は, オープンソースソフトウェア AdvMagnetic_HF として整備した.

< 科学技術イノベーションに大きく寄与する成果 >

1. ズームアップ津波遡上解析システムの開発

概要:

動的津波荷重を受ける沿岸構造物の健全性評価を行うために, 波源から沿岸部までの津波伝播解析に 2 次元浅水長波方程式ベースの解法, 沿岸部から市街地までの津波遡上・浸水解析に 3 次元粒子法, 建屋内部への津波浸水解析に 3 次元粒子法を用いて, それらを接続するズームアップ津波遡上解析システムを開発した. 2 次元浅水長波方程式ベースの解法は商用ソフトウェアを用いており, さらに本成果を応用して異なる企業の商用ソフトウェア同士を接続する計画があるなど, オープンイノベーション推進に貢献するものである.

2. 超高精細オフスクリーン描画ライブラリの開発

概要:

ポストペタスケールシステムで実施される高解像度シミュレーションに資する可視化技術として, 超高精細画像を最初に生成してズームレベルで表示する情報量を変える First Detail Image の概念を提案し, それを実現するものとして 10 万×10 万ピクセル超の超高精細画像を描画可能なオープンソースソフトウェア LexADV_VSCG を開発した. 高解像度シミュレーションにおける可視化の問題を解決するものであり, 科学技術シミュレーション全般に有用な技術であることから, イノベーション創出への貢献が期待される.

3. 連続体力学分野向け DSL の開発とハイパフォーマンス・デザインパターンによる性能最適化

概要:

連続体力学分野向けシミュレーションソフトウェア開発においてソフトウェア開発効率とコード実行性能とを両立させることを狙い, 問題領域特化言語 (DSL) LexADV_AutoMT を開発した. これは LaTeX の数式から C および Fortran のコードを生成するトランスレータである. またこれは, 同名の行列・テンソル演算向けライブラリ AutoMT の上に構築されており, ハイパフォーマンス・デザインパターンの採用により各種 HPC プラットフォーム上において高い実行効率が得られている. 高速なテンソル演算は深層学習や量子力学など他分野への展開も期待され, イノベーション創出への貢献が期待される.

§ 2 研究実施体制

(1) 研究チームの体制について

①「東洋大学」グループ

研究参加者

氏名	所属	役職	参加時期
塩谷 隆二	東洋大学総合情報学部	教授	H23.10～
中林 靖	同上	准教授	H23.10～
田村 善昭	同上	教授	H23.10～
矢川 元基	東洋大学計算力学研究センター	客員研究員	H23.10～
鄭 宏杰	同上	研究助手	H26.3～
金山 寛	日本女子大学	特任教授	H26.4～
Abul Mukid Mohammad Mukaddes	Shahjalal University of Science and Technology	Professor	H24.1～
河合 浩志	東洋大学総合情報学部	教授	H24.4～
杉本 振一郎	諏訪東京理科大学工学部	助教	H25.4～
古川 知成	バージニア工科大学工学部	教授	H23.10～
淀 薫	株式会社インサイト	技術開発部	H24.10～
田上 大助	九州大学マス・フォア・インダストリ研 究所	准教授	H25.4～
井元 佑介	東北大学知の創出センター	助教	H25.4～
松原 仁	琉球大学大学院理工学研究科	助教	H23.10～
岡田 裕	東京理科大学理工学部	教授	H27.4～
遊佐 泰紀	同上	助教	H27.4～
武居 周	宮崎大学工学部	准教授	H29.4～

研究項目

- ・ DDM 入出力ライブラリ／多階層領域分割
- ・ DDM 入出力ライブラリ／標準 I/O ライブラリ
- ・ DDM 入出力ライブラリ／DDM 圧縮技術
- ・ DDM ソルバーライブラリ／DDM 反復法
- ・ DDM ソルバーライブラリ／多階層前処理技術
- ・ 連続体力学向け DSL／DSL 基本機能
- ・ 連続体力学向け DSL／アクセラレータ対応コード自動生成
- ・ 連続体力学系シミュレータ／シミュレータ実装
- ・ UG ソルバーの実行
- ・ UG ソルバー性能評価
- ・ UG/HDDM ソルバー相互評価
- ・ HDDM ソルバーの改良

②「名古屋大学」グループ

研究参加者

氏名	所属	役職	参加時期
荻野 正雄	名古屋大学情報基盤センター	准教授	H23.11～
劉 麗君	同上	研究員	H27.9～
和田 義孝	近畿大学理工学部	准教授	H24.9～

研究項目

- ・ DDM 入出力ライブラリ/DDM 圧縮技術
- ・ DDM ソルバーライブラリ/DDM 反復法
- ・ DDM ソルバーライブラリ/多階層前処理技術
- ・ DDM ソルバーライブラリ/DDM 数値解析技術
- ・ HDDM ソルバーの改良

③「東京大学」グループ

研究参加者

氏名	所属	役職	参加時期
越塚 誠一	東京大学大学院工学系研究科	教授	H23.10～H29.3
鈴木 美穂	同上	技術補佐員	H24.10～H29.3
藤澤 智光	プロメテック・ソフトウェア株式会社	取締役ファウンダー兼 CTO	H23.10～H29.3
武居 周	宮崎大学工学部	准教授	H25.4～H29.3

研究項目

- ・ DDM 入出力ライブラリ/多階層領域分割
- ・ DDM 入出力ライブラリ/標準 I/O ライブラリ
- ・ DDM 入出力ライブラリ/多階層計算格子操作
- ・ DDM ソルバーライブラリ/DDM 数値解析技術
- ・ 連続体力学向け DSL/DSL 基本機能
- ・ 連続体力学向け DSL/アクセラレータ対応コード自動生成
- ・ 連続体力学系シミュレータ/シミュレータ実装

(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

まず、領域内の櫻井チーム(平成 22 年度採択)と固有値ライブラリの利用について連携を行った。さらに、近藤チーム(平成 24 年度採択)と開発する有限要素法や粒子法ソフトウェアの消費電力評価について連携した。

次に、ポストペタスケールシステムに向けて開発するソフトウェアの実用性を「京」で評価するにあたり、研究チーム外との連携を行った。特に、理化学研究所計算科学研究機構並びに富士通株式会社とコンパイラに関する共同研究を実施し、連続体力学向け DSL を高性能化するコンパイラオプションを開発した。また、HPCI 戦略プログラム分野 3 及び分野 4 と連携し、開発ソフトウェア LexADV_VSCG と LexADV_WOVis を「京」で実施したプロダクションラン結果の後処理ソフトウェアとして利用した。

また、データ圧縮について、学際大規模情報基盤共同利用・共同研究拠点(JHPCN)の共同研究課題「大規模データ系の VR 可視化解析を効率化する多階層精度圧縮数値記録の実用化研究」(荻野が副代表、平成 26～27 年度実施)と連携し、同共同研究で開発した圧縮技術 JHPCN-DF を LexADV ソフトウェアに組み込んで性能評価を実施した。これにより、大規模データ系に関する課題解決に向けた分野横断的な研究者ネットワーク形成につながった。

産業界を含む国内におけるその他の連携として、株式会社豊田中央研究所、東京理科大学理工学部機械工学科計算固体力学研究室などで連続体力学向け DSL の β テスト、明星大学情報学部情報学科横山研究室などで粒子法ライブラリの β テスト、京都大学大学院工学研究科機械理工学専攻生産システム工学研究室で開発技術のトポロジー最適化計算への応用研究、(株)構造計画研究所と開発技術の商用ソフトへの応用研究などを行った。

国外との連携として、国際ワークショップ International Industrial Supercomputing Workshop (IISW)に参加し、海外スパコンセンターと HPC 技術の産業界向け応用について情報交換を行った。特に、韓国 KISTi における HPC クラウド開発への協力、米国 NCSA の Blue Waters への開発ライブラリインストール協力などを行った。

開発技術を利用する ADVENTURE がポスト「京」ターゲットアプリケーションに選定されており、ポストペタスケールシステムに向けて国内外の連携はさらに強化している。特に、DFG(ドイツ)研究公募 Priority Programme “Software for Exascale Computing” (2016/1～2018/3)にドイツ HLRS と共同申請した研究課題が採択され、エクサ向けソフトウェア開発を協力して実施している。また、ポスト「京」重点課題(6)として開発ソフトを利用した研究課題が採択され、ソフトウェア開発に協力している。

SPPEXA との連携において、ドイツの EXASOLVERS チームから 2 名を東洋大学で開催された CCMR-HDDMPPS 合同シンポジウムに招待し、UG ソルバーと本チームの HDDM ソルバーについて、ソフトウェアの相互利用や技術交流を行った。また、2017 年 4 月 30 日-5 月 2 日にサウジアラビアで開催されたドイツの EXASOLVERS チームの Gabriel Wittum 教授が主催する HPC 関連国際ワークショップ Computational Science and Engineering with High Performance Computers Workshop KAUST, ECRC, CEMSE に日本側の研究者 4 名が講演者として招待され講演をするなどの研究交流の機会を持った。さらに、CREST のチームから研究者 2 名をドイツのヨハン・ヴォルフガング・ゲーテ大学のゲーテ計算センターに派遣し、ポストペタスケールに向けたシステムソフトウェア開発及び応用研究などに関する情報交換を行っている。

§ 3 研究実施内容及び成果

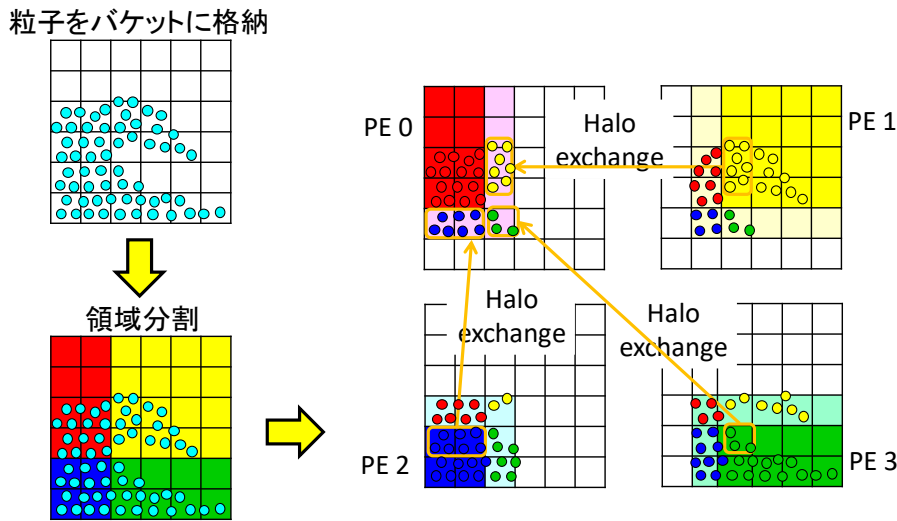
3.1 DDM 入出力ライブラリ

本研究項目は、領域分割法(DDM)に基づくメッシュフリー向けアルゴリズムの開発を行うものである。一般的なアプリケーションシステムは、プレ・ソルバー・ポスト処理に分けられるが、これまでは最も高負荷であるソルバー部のみがスパコン上に実装されてきた。ポストペタスケールシステムでは、全ての処理をスパコン上に実装し、並列化することが当然求められてくる。しかし、従来の枠組みで並列化したのみでは、それに伴い生成される大規模な数値計算データ処理に多くの時間が割かれてしまうことが予想される。そこで、これまでソルバー部の並列化手法として圧倒的な高い並列効率を示してきた階層型領域分割法(HDDM)の技術を応用したデータ処理システムの開発を行った。

3.1.1 多階層領域分割(東洋大グループ・東大グループ)

(1)研究実施内容及び成果

粒子法向け階層型領域分割アルゴリズムを開発した。特に、粒子法シミュレーションにおける MPI-OpenMP ハイブリッド並列計算向けのバケットベース 2 階層領域分割(図 2)、分散メモリ並列計算向けの Halo 通信パターン生成を開発した。本アルゴリズムを粒子法向け連続体力学系シミュレータに組み込んだ結果、東大 FX10 において理想的な解析条件の下で 12 ノードから 4,800 ノードまでのストロングスケーリング 93 %、ウィークスケーリング 99 %の並列化効率を達成できた。これらの成果は、分散メモリ並列向け陽的 MPS 法ソルバーライブラリ LexADV_EMPS として整備した。



48

図 2 OpenMP-MPI ハイブリッド並列処理向け粒子のバケットベース 2 階層領域分割

3. 2 DDM ソルバーライブラリ

本研究項目は、DDM に基づく連続体力学向け線形代数ソルバーの分散メモリ並列ライブラリ開発を行うものである。一般的な線形代数ソルバーは、アセンブリされた連立一次方程式を入力とするため、FEM におけるメッシュ情報など本来解析手法が持つ特徴を利用せずに実装されてきた。それらは共有メモリ環境及びその中で解くことができる解析規模では問題となりにくいが、ポストペタスケールシステムで対象とする解析規模では入力データから解析手法まで含めた分散メモリ環境向け並列化技術が必要となることが予想される。そこで、DDM による多階層型データ構造を活用した、大規模な線形代数ソルバーの分散メモリ環境に適したライブラリを開発を行った。

3. 2. 1 DDM 反復法(東洋大グループ・九大グループ・名大グループ)

(1)研究実施内容及び成果

有限要素法向けに、多階層領域分割情報を利用した DDM 反復ライブラリを開発を行った。DDM の静的縮約によって得られる Schur 補元方程式を反復法で解くアルゴリズムとなっており、反復法としては実対称向けに共役勾配(CG)法、共役残差(CR)法、準最小残差(QMR)法、最小残差(MINRES)法、複素対称向けに共役直交共役勾配(COCG)法、共役直交共役残差(COCR)法、対称版 QMR(QMR_SYM)法を実装した。さらに、複素対称向けには MINRES-like_CS 法を新たに開発した。また、MPI-OpenMP ハイブリッド処理に適した 2 階層領域分割に基づく実装、線形代数演算のアプリケーション特化型最適化として節点自由度数に応じた手動ループ展開や SIMD 向け最適化を行った。さらに、メモリアクセスなどに伴う B/F 値低下に対応するため、DDM 反復法の部分領域問題ソルバーとして Eisenstat 技法に基づく CG 法+SSOR 前処理を実装した。これにより、「京」の 8,196 計算ノードを用いて 1,040 億自由度規模有限要素解析(古代建築物パルテノンモデルの自重解析)に 81.8 時間で成功した(図 3)。本手法は、「京」で強スケーリング性能として 85%以上の高い並列効率を示しており(図 4)、ポストペタスケールシステムでは 1 千億自由度超の超大規模有限要素解析を実用化できる可能性が示された。

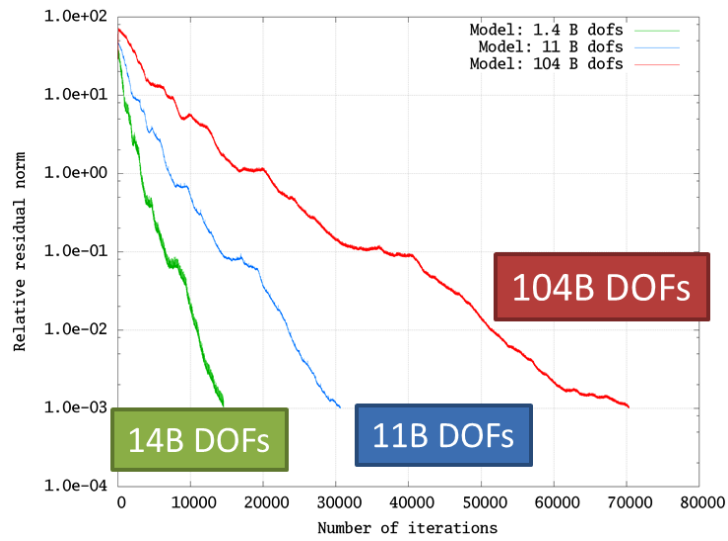


図3 1000億自由度有限要素解析における反復法の収束履歴

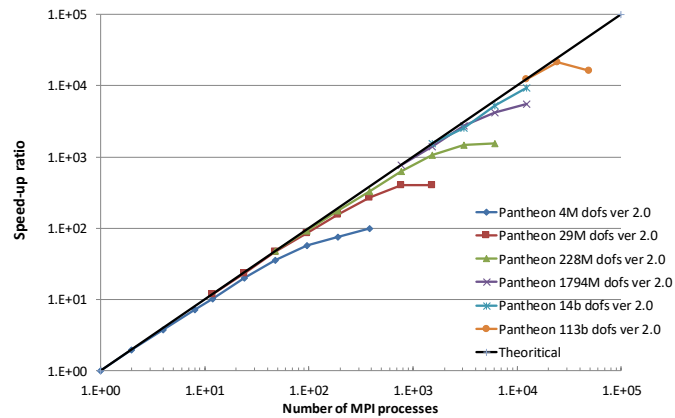
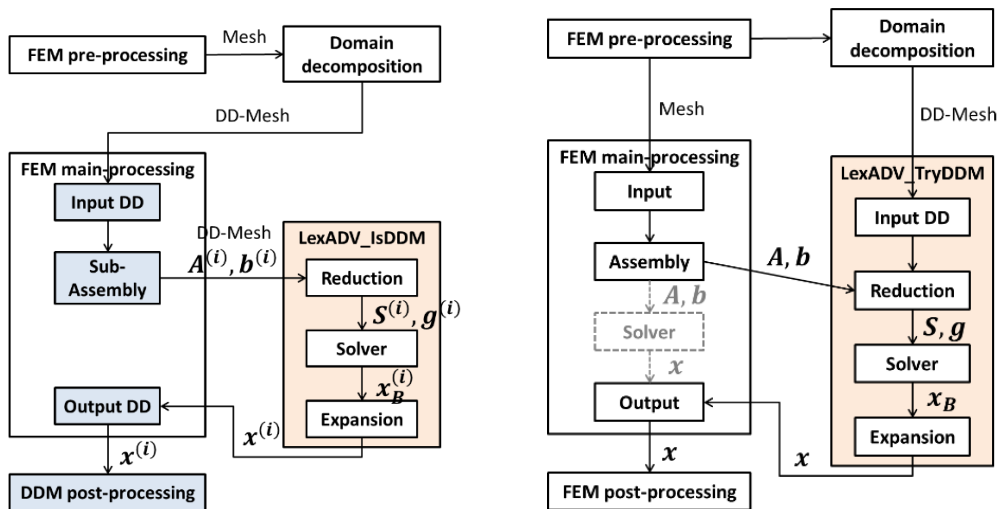


図4 DDM反復法の京における強スケーリング



(a) 高性能版 LexADV_IsDDM (b) お試し版 LexADV_TryDDM

図5 DDM反復法ライブラリのフローチャート

これらの成果は、2種類の DDM 反復法ライブラリとして整備した。ポストペタスケールシステムに

において高性能が期待できる LexADV_IsDDM(図 5(a)), 並びに DDM 反復法の試験環境を提供する LexADV_TryDDM(図 5(b))である。LexADV_TryDDM の開発は当初計画には含まれていなかったが、図 5(a)に示すように DDM 反復法ライブラリは領域分割されたメッシュ読み込みとそこから部分領域ごとにサブアセンブリされた剛性行列の作成が必要になるなど、一般的な反復法ライブラリと比較して導入コストが高いため、手軽にその有効性を検証できる環境として開発した。結果として、DDM 向け前処理に ILU(0)や SSOR などの一般的な前処理を適用した場合の性能評価が簡単に行えるようになり、DDM 反復法の研究開発環境としても有効なライブラリとなった。

今後需要が見込める FEM による電磁場解析への対応も進めた。悪条件な複素対称行列を係数に持つ高周波電磁界問題において、新規提案した MINRES-like_CS 法に基づく DDM 反復法を適用した結果、COCG 法や COCR 法など広く利用されている手法に比べて反復回数・計算時間ともに削減できることが示された(図 6)。また特異な係数行列を持つ時間調和渦電流問題において、Lagrange 乗数の導入によって磁気ベクトルポテンシャルに対するゲージ条件を考慮した混合型定式化とその簡略化を利用した DDM の計算アルゴリズム見直しを行い、DDM 反復法の収束性を大幅に改善することに成功した(図 7)。これにより、従来の計算アルゴリズムでは 5,000 万自由度程度までしか求解できなかったが、東京大学 FX10 の 720 ノードで 35 億自由度モデルを 9 時間弱で求解することに成功し、ポストペタスケールシステムにおいて解くべき問題に対しても有効な計算手法であることが示された。また、C 言語における複素数型に関して複数の実装を行い、性能評価と最適化を行った結果、東京大学 FX10 における高周波電磁波解析のピーク性能比を asis コードの 0.9 %から 7 %へ向上させることに成功した。これらの成果は、電磁場解析ソフトウェア AdvMagnetic にフィードバックし、整備した。さらに、Nédelec 要素対応などを行い、LexADV_TryDDM を電磁界解析ソフトウェアからも利用できるように開発した。

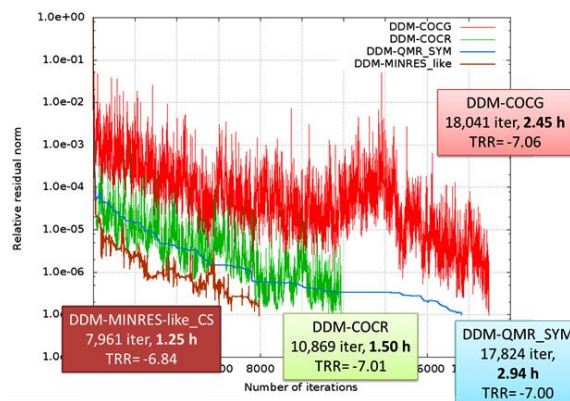


図 6 DDM-MINRES-like_CS 法を用いた高周波電磁界解析における収束性改善

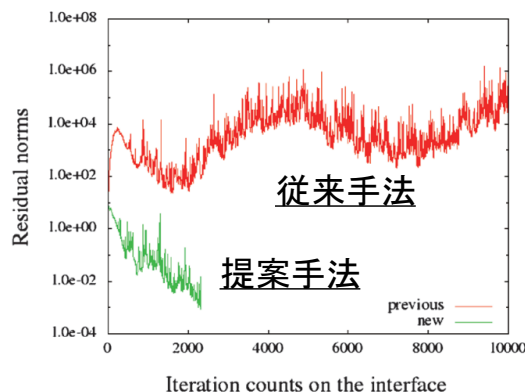


図 7 DDM 定式化見直しによる渦電流解析における収束性改善

さらに粒子法向け DDM 反復法の開発も行った。我々が用いている有限要素法向け DDM の場

合、人工境界問題は弱形式に基づいて定式化されているが、MPS のような粒子法向け DDM の場合、人工境界問題を強形式に基づいて再定式化する必要がある。また MPS で境界条件を表現する際に仮想粒子を配置するのと同様に、粒子法向け DDM では、人工境界を挟んで隣接する他の部分領域内部の粒子を着目する部分領域の仮想粒子として取り扱う必要がある。これは部分領域のオーバーラップを許容する DDM と同様、高精度・高効率な並列化の障害となる。そこで我々は、MPS に基づく粒子法向け DDM アルゴリズムを構築する際、人工境界近傍における仮想粒子の設定方法として異なる 2 つの手法を提案した。さらに、流れ問題に対する粒子法で現われる圧力ポアソン方程式の求解に用いる多階層ソルバーを提案した。古典的 DDM アルゴリズムである Alternating Schwarz 法や Substructuring 法では、領域間境界部分の粒子数が多くなるため、人工境界問題に CG 法や Bi-CGSTAB 法など適用する場合と比べて計算効率が低下することが判明した。そこで Plain Aggregation AMG 法を前処理に適用することで、大規模解析においては提案手法が優位となることが分かった(図 8)。提案手法を用いれば、例えば 100 万粒子の問題で約 7 倍の高速化が実現した。

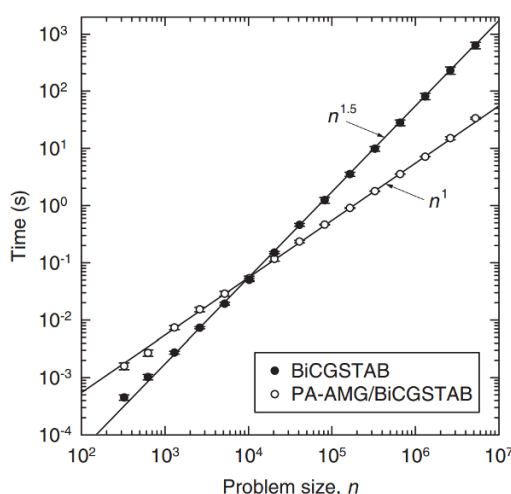


図 8 2次元ポアソン方程式における問題規模と計算時間

3. 2. 2 多階層前処理技術(東洋大グループ・名大グループ)

(1)研究実施内容及び成果

多階層前処理技術として、有限要素法向け BDD 法の開発を行った。既の実績がある構造解析向け BDD 法については超並列計算環境向け実装技術の開発を行い、「京」の 256 計算ノードで弱スケーリング 89%、強スケーリング 92%の並列効率が得られた。また、世界トップレベルの 112 億自由度有限要素解析への BDD 法適用実験を行い、53 反復(収束判定値は相対残差が 3 桁小さくなった時点)で収束解を得ることに成功した。

また、異種材料混在モデルにおける BDD 法の収束性を改善するために、DDM 反復法に対する簡易対角スケーリング処理法の新解釈を提案した。それに基づき、Scaled-BDD 法を新たに開発し、ヤング率の比が 100 倍以上となる複数部材で構成された構造物のシミュレーションにおいて、オリジナルの BDD 法に比べて反復回数・計算時間を 1/2 以下にすることに成功した(図 9)。

また、電磁場解析向けに、BDD 前処理の統一的構築方法の開発と実装を行った。さらに、電磁場解析等 BDD 法が未確立分野に向けて、LexADV_TryDDM に BDD 法研究開発フレームワーク機能を追加開発した。これにより、静磁場問題に対する BDD 前処理アルゴリズム適用実験に成功した。さらにこの成果を応用して、構造解析において世界的にも事例が少なかった ILU(0)、SSOR、BDD の収束性比較が可能となり、BDD 法によってどれだけ反復回数を削減できるかを定量的に示すことに成功した(図 10)。

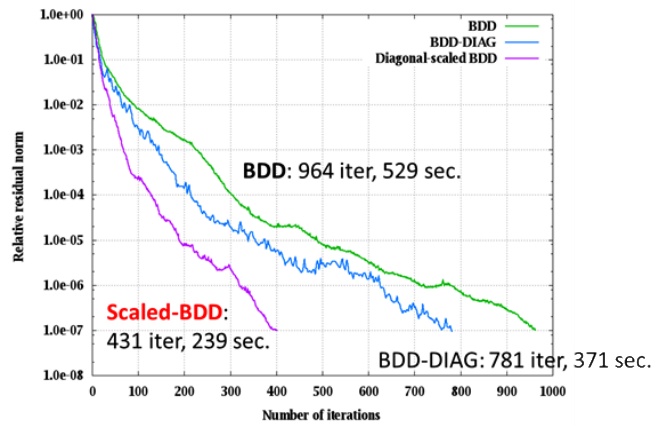


図 9 Scaled-BDD 法を用いた複数材料モデル($E_{\max}/E_{\min} > 10^2$)における収束性改善

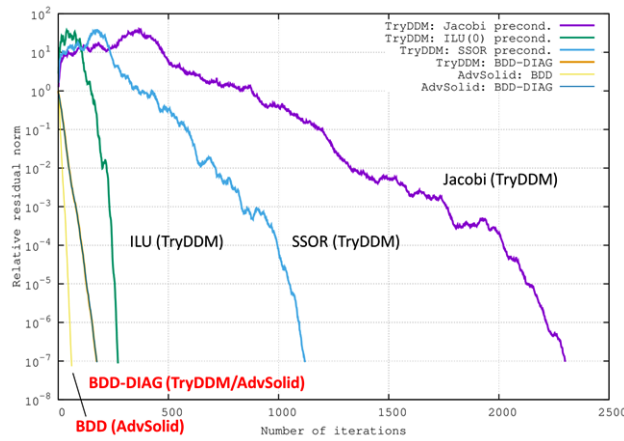


図 10 LexADV_TryDDM による BDD 前処理の収束性評価

3. 2. 3 DDM 数値解析技術 (名大グループ・東大グループ)

(1) 研究実施内容及び成果

有限要素法向けに DDM 数値解析技術として、ヘテロジニアスコンピューティング向け負荷分散アルゴリズムの開発を行った。CPU と GPU のヘテロジニアス環境において、計算ノードに割り当てられた部分領域群を OpenMP の動的スケジューリング機能を用いて CPU コアや GPU に動的負荷分散を行う機能を開発した。また、DDM 反復法の主要な演算を含むミニコードを開発し、DDM 反復法の実装最適化に向けた研究開発環境として利用可能とした。さらに、領域分割メッシュ並びに関連する疎行列データのデータベース構築ソフトウェアを開発し、構造・熱の DDM 行列データベースを構築した。これら DDM のミニコードと DDM 行列データベースを用いて、性能評価を行った。これより、CPU と GPU では最適な領域分割数が異なることが分かり、CPU-GPU ヘテロ計算によって領域分割数に対してロバストな性能を得ることに成功した(図 11)。また、メニーコアを用いて、領域分割数によって適切な並列化方法が異なることが分かった(図 12)。これらは、ベンチマークテストとして整備しており、新しい計算機アーキテクチャがでた場合の性能評価試験は低コストに実施できる。

MPS 陽解法(粒子法)向け数値解析技術としては、東京大学 FX10 の 4,800 計算ノード上において 200 億粒子のベンチマーク計算に成功した。並列性能では、25 億粒子の 60 計算ノードから 4,800 計算ノードのストロングスケールで 99.33 %を達成した。実証例題として、石巻市街地に津波が侵入して、直径 9 m の 2 つのタンクが地上構造物に衝突しながら漂流する解析に成功した。本解析は、東京大学 FX10 の 600 計算ノードや九州大学 CX400 の 32 計算ノードを用いた最大 3.8

億粒子の解析である。「京」を用いて、RIST の協力により LexADV_EMPS のノード内とノード間のチューニングを行った。ノード内のチューニングでは、キャッシュスラッシングが低い確率ではあるが発生することが判明したため、データを格納している配列をマージしたりパディングしたりすることで、キャッシュスラッシングが発生する確率を大幅に低下させることに成功した。ノード間のチューニングでは、隣接間通信にノンブロッキング型の 1 対 1 通信 Isend-Irecv を用いると 24,576 ノード以上では“Unexpected Message”が多発してメモリを消費しすぎてデッドロックが発生する問題があったが、集団通信 Alltoallv を用いることで回避できることが分かり、72,000 ノードまでの高並列計算が可能となった。さらに、粒子探索の効率化として、バケット内でソートした粒子を配列に格納する方法を開発し、一般的なリンクリストを用いる場合と比べて、キャッシュ再利用が改善し(図 13)、高速化に成功した。また、粒子型解法の基礎となる近似作用素に関して、数学的な打ち切り誤差評価や、より高精度な近似手法の提案を行った。

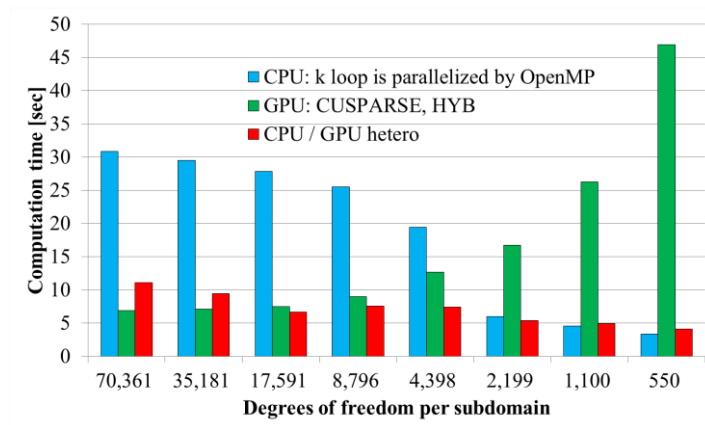


図 11 CPU(Core i7-2700K)とGPU(GeForce GTX 980)併用における DDM 性能評価

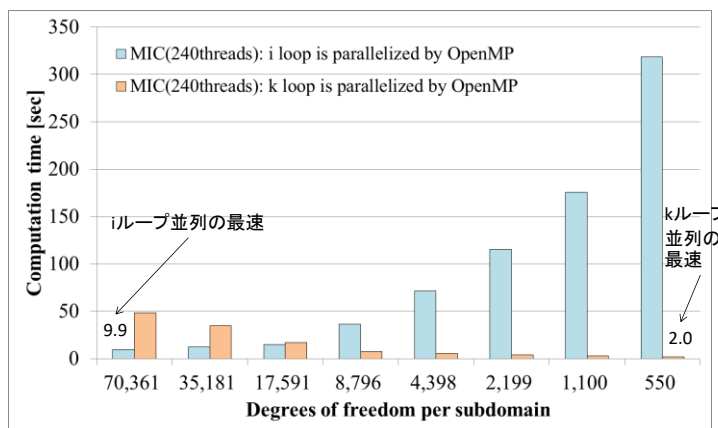


図 12 メニーコア (Xeon Phi 5110P) における DDM 性能評価

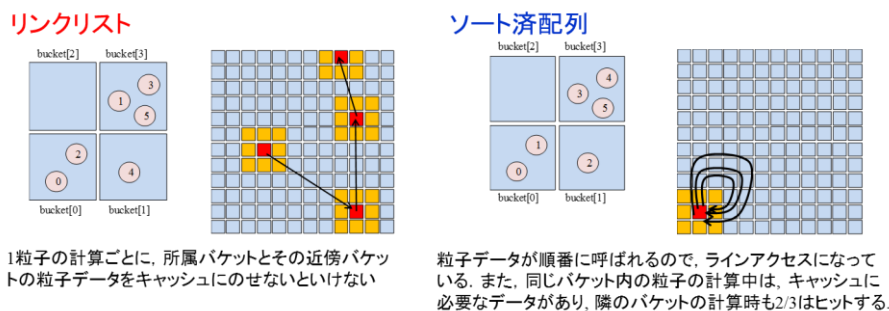


図 13 ソート済配列による粒子探索の効率化

3.3 連続体力学向け DSL

本研究項目は、連続体力学向け DSL の開発と、それに対応した多様なアクセラレータ向け最適化コード自動生成の開発を行うものである。ポストペタスケールシステムのアーキテクチャでは、計算ノード間の並列性だけでなく計算ノード内での効率も重視される。各計算ノードはメニーコアや GPU, SIMD 拡張命令といった多種多様なアクセラレータを有し、これらを有効利用することが望まれる。従来のプログラミング言語やコンパイラ最適化技術での対処は不十分であり、現状ではそれぞれのアクセラレータごとに人手で最適化された個別の実装が必要とされている。一方、数値シミュレーションコードの場合、特に連続体力学分野においては、そのアプリケーションロジックは物理現象や数値解析スキームであり、これは数学表現、特に行列やテンソルで表記されることが多い。よって、連続体物理モデルを DSL 化して、数学記述（例えば、行列、テンソルの式を tex 形式で記述）から各アクセラレータタイプ向けに最適化されたライブラリを call するコードを生成するコードジェネレータあるいはトランスレータアプローチが有効であると考えられ、これを実現するシステムの開発を行った。

3.3.1 DSL 基本機能(東洋大グループ・東大グループ)

(1)研究実施内容及び成果

連続体力学向け DSL である LexADV_AutoMT(「おてもと」), およびその C 言語および Fortran へのトランスレータ開発を行った。DSL の文法構造としては、基本的に科学技術分野、特に数学分野で広く使われている TeX/LaTeX を参考とした。本研究が主な対象とする連続体力学分野、特に非線形固体・構造力学分野においては、その物理現象や材料構成則を記述するために、テンソルあるいは行列・ベクトル演算に基づく数式が多用されている。特にテンソル演算として、連続体力学分野への応用を念頭に、3次元空間におけるスカラー、ベクトル、2階テンソルおよび4階テンソルに関する加減算および積演算などの各種演算子群に対応させる必要がある。ここではまず、こういった数式を記述可能な LaTeX のサブセットを設定し、またコード生成に必要な変数の型情報など補助的なデータをアノテーションとして追加する構造を採用した。なお言語仕様や文法などの詳細については、開発初期段階から研究グループ外の β テスターを獲得し、グループ内外のユーザーからのフィードバック情報を元にさまざまな検討を行った。

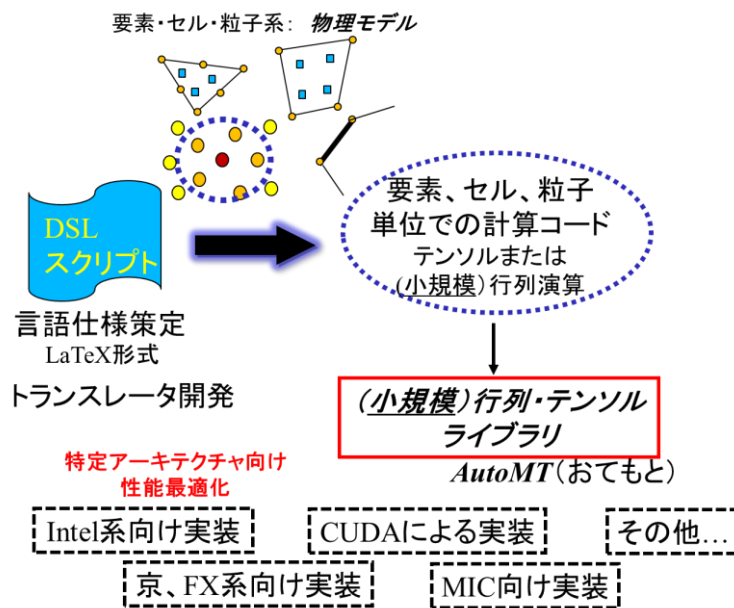


図 14 連続体力学分野向け DSL および行列・テンソル演算ライブラリ LexADV_AutoMT

DSLとしてのAutoMTをユーザーが利用する際には、前述のLaTeXサブセットのコードがコメントとしてCまたはFortranのソースコード内に挿入される形式をとる。そして、トランスレータによってそのコメント部分が、対応するCあるいはFortranのコードに置き換えられる。このとき自動生成されるコード内において、同名のテンソルおよび小規模行列・ベクトル演算向けライブラリAutoMTが備える各種ライブラリ関数がコールされる。さらに、ライブラリ実装内部について、各種HPCプラットフォームごとに、特にCPUベンダーごとの特殊命令やGPU、メニーコア等アクセラレータ向けに最適化することが可能である。DSLおよび行列・テンソル演算ライブラリとしてのAutoMTのシステム構成を図14に、またDSL利用の流れを図15に示す。

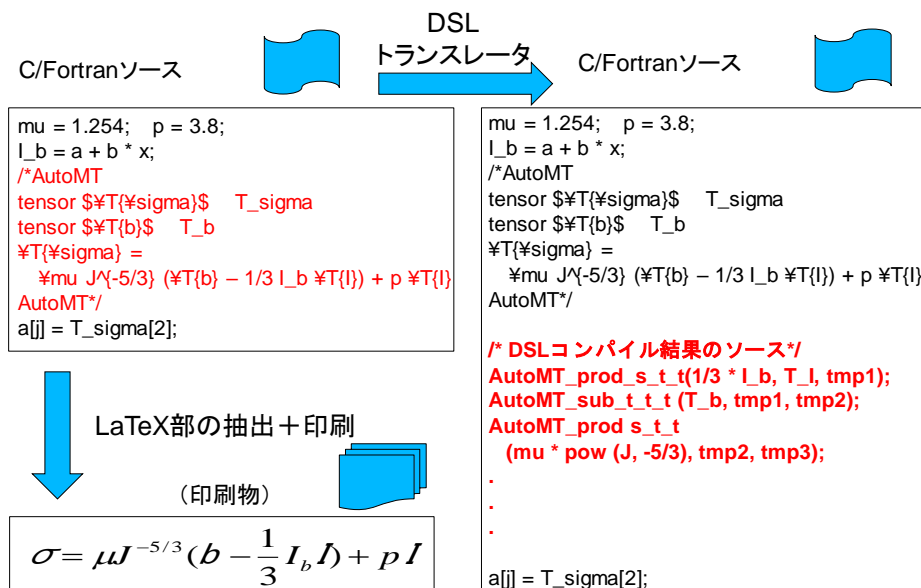


図 15 連続体力学向け DSL 利用の流れ

3. 3. 2 アクセラレータ対応コード自動生成 (東洋大グループ・東大グループ)

(1) 研究実施内容及び成果

前述のように連続体力学分野向けDSL, LexADV_AutoMTでは、その低レベル層に行列・テンソル演算向けライブラリ(同名のAutoMT)を配置している。このLaTeXをベースとするDSLは前記のトランスレータによりCやFortranコードに変換されるが、このときトランスレータにより自動生成されたコード部分は主にこのAutoMTライブラリ関数・サブルーチンをコールする。よって、この部分を各種HPCプラットフォームや特にアクセラレータ向けに最適化することで、結果としてユーザープログラムが高速に動作することになる。

ここでは、アクセラレータ対応コード自動生成として、近年のスカラCPUの多くが装備するSIMD命令セットおよびGPU向けに性能最適化されたAutoMTライブラリの高速度バージョンを開発した。Intelおよび富士通CPUのマルチコア及びSIMD命令セット向け実装、CUDAによるGPU向け実装、メニーコアXeon Phi向け実装などを行った。

これらの実装に関して特に、主要な各種HPCプラットフォームにおけるベンチマークテストを通して、SIMD機構を用いたコードはこれに対応しないコードに比べ実効性能で数倍程度の違いを有することがわかったため、SIMD命令およびGPU向け最適化としてSIMD機構に対応するAutoMTライブラリ実装を用意した。これは、あるテンソル式または小規模な行列・ベクトル式に対し、コンパイラによるベクトル化やGPUのスレッドを介し、同時に複数のデータを作用させるものである。通常これは連続体力学ベースの数値解析コードにおいて、複数の要素やセル、粒子データなどについて同じ一連の数式群を評価していくことに対応する。例えば、有限要素解析においてそのモデルデータは大量の有限要素から構成されるが、これら要素単位の演算はelement-by-element (EBE) 演算と呼ばれる。シミュレーションプログラムのEBE演算を行うコード部分のループ構成に関して、

必ず要素ごとループをある多重ループの最内側に配置するようにしておく。その最内側ループボディにおいて、テンソルや小規模行列演算ごとに AutoMT ライブラリコールがなされる。このとき、これらのライブラリコールが実際にはプリプロセッサマクロで実装されている、あるいはコンパイラによって確実にインライン展開されることが保障されることにより、最終的にこの要素ループに関してコンパイラを通したベクトル化がなされることになる。

さらに、こういった最適コードが共通に有する特徴やパターンをまとめ、これをハイパフォーマンス・デザインパターンとして提案した。ハイパフォーマンス・デザインパターンでは、まずテンソルや小規模行列、ベクトルなどの数値計算分野向け抽象データ型について、それぞれの変数を1つの配列や構造体ではなく、複数のスカラー変数の束として表現する。また、抽象データ型が備える各種演算・操作について、これら関数やサブルーチンの代わりにプリプロセッサマクロで実装する。このとき、C プリプロセッサマクロのシンボル連結演算子##を利用している。ハイパフォーマンス・デザインパターンについてこれを図 16 に示す。

```

<3-Dベクトル>
Cプリプロセッサマクロ
  による変数宣言
  オリジナルコード
Cプリプロセッサ出力
      #define declare_vector(a)Y
      double a##_0, a##_1, a##_2;
      declare_vector(u);
      double u_0, u_1, u_2;

<対称テンソル>
Cプリプロセッサマクロ
  による変数宣言
  オリジナルコード
Cプリプロセッサ出力
      #define declare_tensor(a)Y
      double a##_xx, a##_yy, a##_zz;Y
      double a##_xy, a##_yz, a##_zx;
      declare_tensor(B);
      double B_xx, B_yy, B_zz;
      double B_xy, B_yz, B_zx;
  
```

図 16 ハイパフォーマンス・デザインパターンによるベクトルとテンソルの実装

これらの成果をまとめ、行列およびテンソル演算ライブラリ LexADV_AutoMT として整備した。開発ライブラリを用いた有限要素解析で現れる特徴的な計算パターンに対する性能評価結果を表 1 に示す。

表 1 有限要素解析向けベンチマーク結果

	Intel x86 (Sandy Bridge) + Intel コンパイラ		Fujitsu SPARC64 IXfx + 富士通コンパイラ	
	オリジナル	チューニング	オリジナル	チューニング
構造解析・要素剛性	21 %	70 %	8 %	44 %
非線形材料構成則	16 %	31 %	6 %	40 %
熱伝導解析・要素剛性	24 %	50 %	12 %	38 %

3. 4 連続体力学系シミュレータ

本研究項目は、3. 1から3. 3で開発された基盤技術の性能評価を行うために、連続体力学系シミュレータの開発を行うものである。

3. 4. 1 シミュレータ実装(東洋大グループ・東大グループ)

(1)研究実施内容及び成果

DDM 反復法ライブラリの応用例として、構造 FEM ソフトウェア AdvSolid への組み込みを行った。「京」、名大 FX10・FX100, 名大 CX400, 名大 UV 2000, Xeon Phi マシン, GPU マシンなど様々なアーキテクチャにおいて性能評価を行った。特に、メニーコア環境においてスレッド並列効率が低下する傾向が観察され、DDM アルゴリズム見直しについて DDM 反復法ライブラリ開発側にフィー

ドバックした。また、電磁場解析を重要アプリケーションの1つと位置づけ、計画を一部前倒して、電磁場シミュレータの実装を行った。また、実証問題例である数値人体モデルによる医療向け電磁場解析において、メッシュ形状が解析精度に与える影響について調査し、その結果を DDM 入出力ライブラリ側へフィードバックした。さらに、移動体を含む対象の並列計算を効率的に行うため、階層型領域分割法をベースに新たなアルゴリズムを開発した。移動体を含む対象の解析ではタイムステップごとに移動体の位置が変化し、移動体とそれ以外の固定部との間でメッシュの接続関係が変化する。そのため固定部と移動体の接合部が1タイムステップ分ずれても要素面が一致するようにメッシュを生成することでこれに対応するといったことが広く行われている。本研究でもこの手法を踏襲するとともに、領域分割後の小領域表面に接合部の自由度が位置するよう固定部と移動体のメッシュを個別に領域分割することとした。個別に領域分割することで小領域表面に位置した接合部の自由度を part 間で共有されるインターフェース自由度として扱うことで、移動体の移動に伴うメッシュの接続関係の変化は、固定部側の part と移動体側の part の通信関係の変化へと置き換えられる。これにより、時間発展とともに変化する接合部の通信テーブルを事前に用意し、それぞれの時間ステップで使用する通信テーブルを替えることで効率的な手法を構築できた。この手法の利点は、時間ステップごとに異なる通信テーブルを使用する以外には従来の階層型領域分割法とアルゴリズムとして差異がないことである。そのため実装が非常に簡便であるとともに、これまで階層型領域分割法で積み上げられてきた効率化・高速化の成果がそのまま適用できる。さらに階層型領域分割法が適用できればこの手法も適用可能であり、高い汎用性を有する手法となっている。

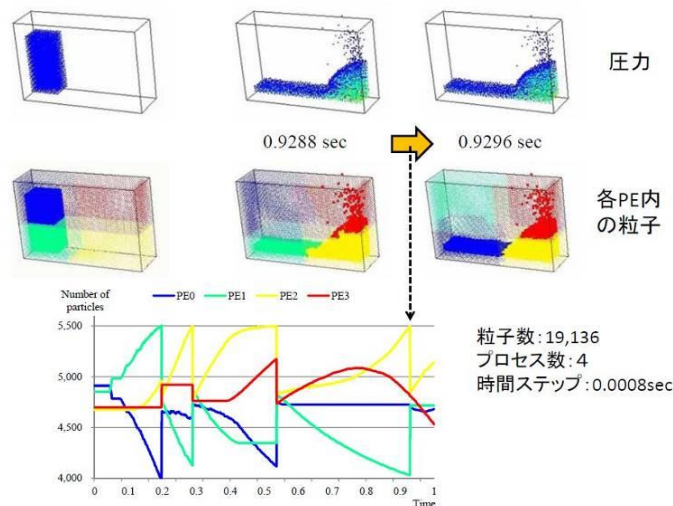


図 17 粒子の分散メモリ並列処理向け動的負荷分散

粒子法向けライブラリは実問題解析に適用可能かが重要な評価指針であるため、当初計画を前倒して、開発中の粒子法向けライブラリを用いたシミュレータ実装並び評価を並行して実施することとした。粒子法向けライブラリでは、関数ポインタを用いて利用者が粒子の物理量計算の関数を定義することができるので、解きたい物理モデルを自由に組み込むことができる仕様となっている。粒子の動的負荷分散機能(図 17)や大規模流体剛体連成解析機能(図 18)の実装を行った。これにより、多数の浮遊物(剛体)が津波で流される様子を計算することが可能となった(図 19)。また、直ぐに社会に役立つアプリケーションの構築を目指すために、3 段階の津波計算を行える機能を開発した。第 1 の解析では震源で発生する波源から沿岸部までの津波伝播計算(数十～数百キロ四方位程度)、第 2 の解析では沿岸部に押し寄せた津波が地上へ遡上する解析(数 km～10km 四方位程度)、第 3 の解析では、市街地に浮遊物が衝突しながら浮遊する市街地浸水解析(500m 四方位程度)である。この 3 段階の津波解析機能により、従来からある波源から沿岸部までの津波伝播計算を利用して津波の市街地解析を行うことが可能となった。

また、有限要素法による構造解析機能と粒子法による流体解析機能を持った「連続体力学系シミュレータ」の開発を行った。ファイルベースの片方向連成機能のみの開発が完了している。

LexADV_EMPS を用いて津波遡上解析を行った後、流れ解析で出力されたファイルから地上構造物に与える流体圧力を求め、構造解析の入力ファイルを作成する。この構造解析用の入力ファイルを用いて、AdvSolidが応力解析を行う。このようにしてLexADV_EMPSの片方向連成機能の開発により、大規模分散メモリ環境で、粒子法による流体解析と有限要素法による構造解析の連成解析が可能となった。

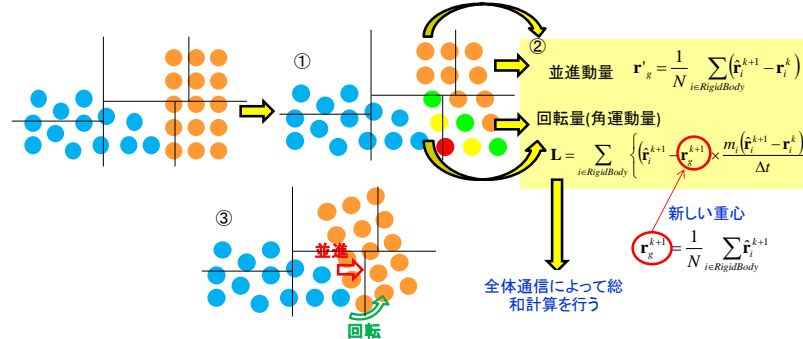


図 18 LexADV_EMPS における剛体の計算手順

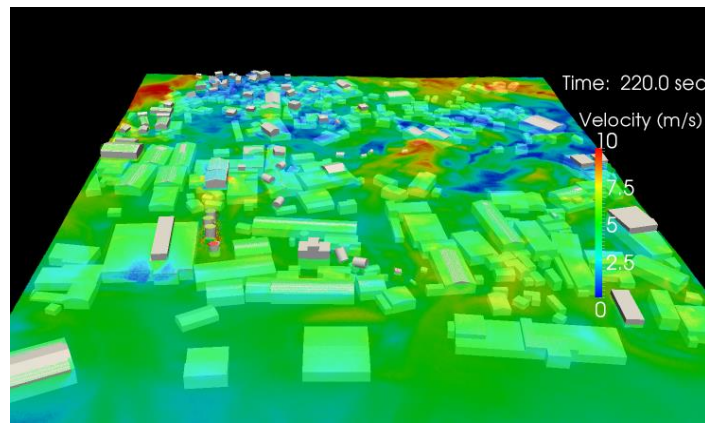


図 19 LexADV_EMPS を用いた多数の剛体を含む計算の様子

同時に粒子法に対する数値解析も行った。従来の MPS や SPH といった粒子法を包含する一般化粒子法を提案し、Poisson 方程式、熱方程式、および移流拡散方程式に対して適用した際の誤差評価を行った。この際、一般化粒子法で求めた近似解が収束するための、影響半径、粒子配置、粒子体積、および重み関数の選択に関する十分条件を明らかにした。さらに流れ問題に対する粒子法の改良を行い、数値実験を通してその効果を確認した。打ち切り誤差に関する十分条件を満足する、従来は用いられていなかった重み関数を適用し、時間積分の途中で解の振動を補正する圧力補間を追加することで、従来手法よりも圧力振動が抑えられることが数値的に観測された(図 20)。

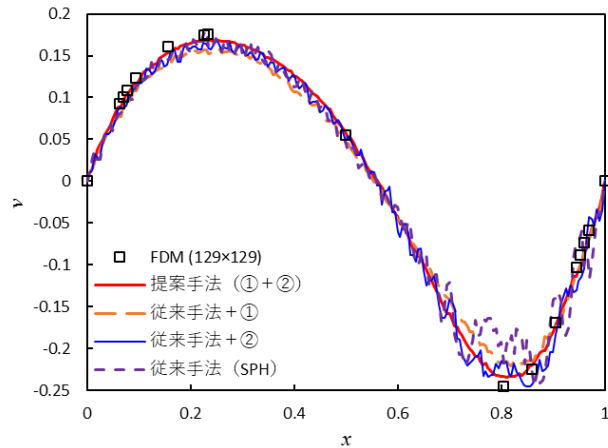


図 20 キャビティ流れ(x=0.5)における流速分布

3. 4. 2 シミュレータ評価(東大グループ)

(1)研究実施内容及び成果

有限要素法によるシミュレータとして、構造 FEM ソフトウェア AdvSolid に DDM 反復法ライブラリを組み込み、400 万自由度から 1,134 億自由度規模までのサイズの問題に対し、「京」の 12 ノードから 24,578 ノードを用いて、強スケーリングと弱スケーリングによる並列効率評価を行った。両指標において高い並列効率が示されたが、2 万ノード規模では効率の低下がみられ、ポストペタスケールシステムに向けての課題を見つけることができた。

また、電磁場 FEM ソフトウェア AdvMagnetic にライブラリを組み込んだ。時間調和渦電流問題において反復解法の収束性を大幅に改善し、東京大学 FX10 の 720 ノードで 35 億自由度の渦電流解析精度検証問題を 9 時間弱で求解することに成功した。また、移動体を含む対象の階層型領域分割法による並列計算手法を回転機の電磁界解析に適用し、FX10 上でストロングスケーリング評価を行った。6 ノードから最大 384 ノードまで使用し、96 ノードまで並列化効率 90%以上という良好な結果を得た。96 ノードを超えるとノードあたりの割り当て演算量が著しく低下するため並列化効率が低下するが、それでも 384 ノードで 60%程度であった。また、従来の有限要素法による逐次計算で 1 ヶ月以上かかっていた計算が、48 ノードで 8.39 時間、384 ノードで 1.60 時間と、大幅な高速化を達成した。さらに、高周波電磁波問題において境界平滑化による計算精度の向上に取り組み、2 億自由度の人体モデルにおいて電界の精度を大幅に向上させることに成功した(図 21)。

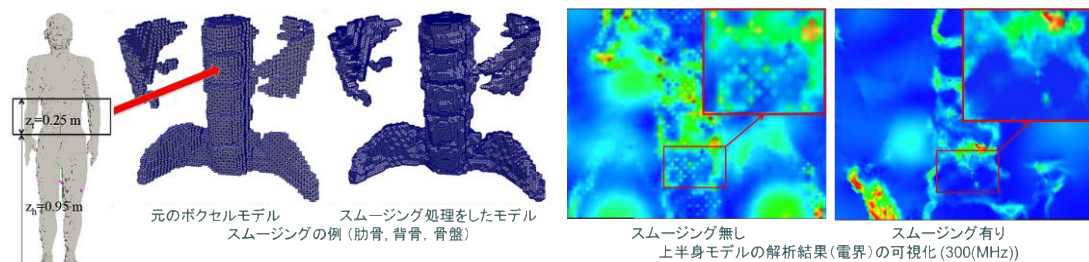


図 21 AdvMetis2 と AdvMagneticHF による高精度な温熱療法シミュレーション

さらに、開発ライブラリを用いた粒子法シミュレーションソフトウェアの評価を行った。評価環境として「京」、東京大学 FX10、東京工業大学 TSUBAME2.5 (GPU)、名古屋大学 FX100、名古屋大学 CX400 (MIC) を主な開発計算機としてそれぞれのソルバーの性能向上をおこなった。東大 T2K では、64 計算ノード 1,800 万粒子から 1,024 計算ノード 2.6 億粒子へのウィークスケーリング性能評価で 94%の並列効率が得られ、6,900 万粒子の 64 計算ノードから 1,024 計算ノードの強スケーリング性能評価において 93%の並列効率が得られた。10 億粒子モデルを用いて、「京」の 48 ノードから 12,288 ノードのスピードアップ値 225.8(理想値 256)を達成することができた。FX100 では、12 ノー

ドから 864 ノードのスピードアップ値 65 (理想値 72) を達成することができた(図 22). LexADV_EMPS を用いて, 3 段階の津波解析をシステム化した. その結果, 福島第一原子力発電所 1 号機タービン建屋内浸水解析と気仙沼での第 18 共徳丸の遡上解析を行うことができた. 昨年度までは 1 ヶ月程度掛かっていた解析を, 「京」を用いることで 3 日程度に短縮することができた. 観測データ等を用いて津波遡上シミュレーション結果の妥当性確認を行い, 十分な精度で現象を再現できていることが示された(図 23).

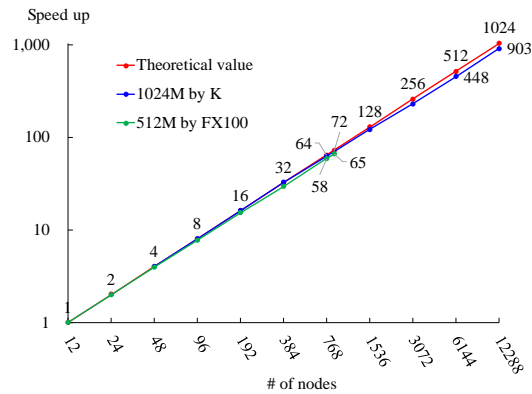
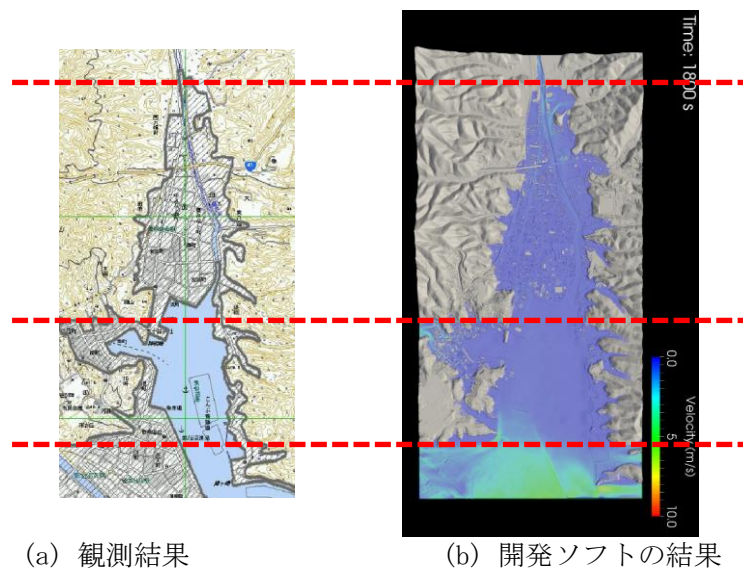


図 22 LexADV_EMPS を用いた非圧縮流れ解析コードの強スケーリング

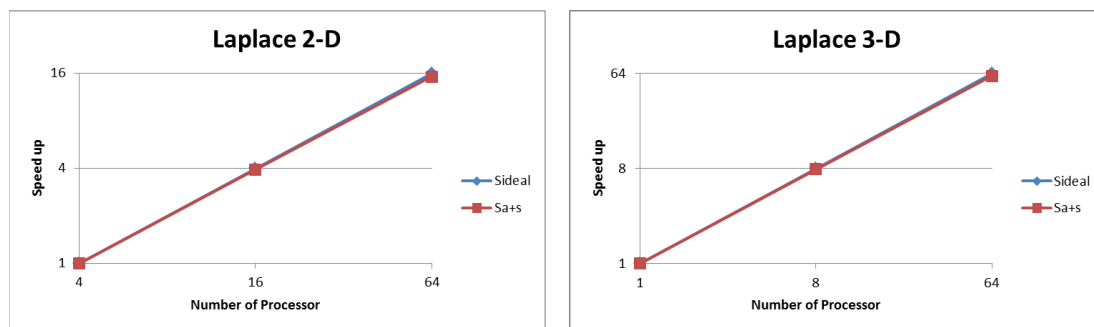


(a) 観測結果 (b) 開発ソフトの結果
図 23 LexADV_EMPS を用いた津波遡上解析結果の妥当性確認

3.5 SPPEXA 共同研究

本研究項目は, SPPEXA (CREST) プロジェクトに採択されたため, 平成 28 年 1 月より追加された項目であり, SPPEXA 側 EXASOLVERS チームの UG ソルバーと本チームの HDDM ソルバーについて, ソフトウェアの相互利用や技術交流を行い, エクサスケールに向けて相互のソルバー性能向上を目指すものである.

マルチグリッド法による偏微分方程式ソルバーフレームワークである UG4 を東洋大学計算力学研究センターが保有する PC クラスタに移植し, ラプラス方程式ソルバーによる強スケーリング性能評価(図 24), ポアソン方程式ソルバーによる HDDM ソルバーとの計算精度比較の実施などを通じて, UG ソルバーと HDDM ソルバーの相互評価を行う環境を整備した. また, 富士通社製 C++コンパイラでは Boost ライブラリを利用する UG4 の翻訳・結合に困難があることが分かり, ポストペタスケールに向けたシステムソフトウェアに関する課題も明らかになった.



(a) 2次元ラプラス方程式

(b) 3次元ラプラス方程式

図 24 UG4 ソルバーによる PC クラスターの強スケーリング性能

§ 4 成果発表等

(1) 原著論文発表 (国内(和文)誌 10 件, 国際(欧文)誌 32 件)

- [1] 松永 拓也, 柴田 和也, 室谷 浩平, 越塚 誠一, “ミラー粒子境界表現を用いた MPS 法による流体シミュレーション”, Transactions of Japan Society for Computational Engineering and Science, Paper No.20160002, 2016 年 1 月. (DOI: 10.11421/jscs.2016.20160002)
- [2] 荻野正雄, “対角スケーリング前処理を伴ったバランシング領域分割法による複数材料モデルの有限要素解析”, 日本機械学会論文集, Vol. 82, No. 833, p. 15-00325, 2016 年 1 月. (DOI: 10.1299/transjsme.15-00325)
- [3] Tasuku Tamai, Kouhei Murotani, and Seiichi Koshizuka, “On the consistency and convergence of particle-based meshfree discretization schemes for the Laplace operator”, Computers & Fluids, February 2016. (DOI: 10.1016/j.compfluid.2016.02.012)
- [4] 河合浩志, 荻野正雄, 塩谷隆二, 山田知典, 吉村忍, “領域分割法におけるローカル Schur 補元アプローチの性能評価”, Transaction of JSCES, Vol. 2016, 20160006, 2016 年 2 月. (DOI: 10.11421/jscs.2016.20160006)
- [5] Lijun Liu and Masao Ogino, “Performance evaluation of efficient data compression JHPCN-DF for large-scale structural analysis”, Mechanical Engineering Letters, Vol. 2, p. 16-00119, March 2016. (DOI: 10.1299/mel.16-00119)
- [6] Amane Takei, Kohei Murotani, Shin-ichiro Sugimoto, Masao Ogino, and Hiroshi Kawai, “High-accuracy electromagnetic field simulation using numerical human body models”, IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 52, No. 3, March 2016. (DOI: 10.1109/TMAG.2015.2479467)
- [7] Ogino, M., Takei, A., Sugimoto, S. and Yoshimura, S., “A numerical study of iterative substructuring method for finite element analysis of high frequency electromagnetic fields”, Comput. Mathe. Appl., Vol.72, No.8, pp.2020-2027, 2016.
- [8] Wada, Y., Murotani, K., Ogino, M., Kawai, H. and Shioya, R., “High resolution visualization library for exa-scale supercomputer”, Mathe. Prog. Expressive Image Synth. III, Springer, pp.83-94, 2016.
- [9] Masao Ogino, Hongjie Zheng, Kohei Murotani, Seiichi Koshizuka, Ryuji Shioya, Liu Lijun, “Tsunami Run-Up and Inundation Simulations Using LexADV_EMPS Solver Framework on Fujitsu FX100”, SC16 Research Poster (Peer-reviewed International Conference), Salt Lake City, Nov. 13 - 18, 2016.
- [10] Ogino, M., Takei, A. and Sugimoto, S., “A Domain Decomposition Method Based on an Algorithm of the MINRES method for High-Frequency Electromagnetic Field Analysis”, CEFC2016 (Peer-reviewed International Conference), Miami, 2016.
- [11] Daisuke Tagami, “A Multigrid-Balancing Preconditioner of Domain Decomposition Methods for Magnetic Field Problems”, CEFC2016 (Peer-reviewed International Conference), Miami, Nov. 13 - 16, 2016.

- [12] Amane Takei, Shin-ichiro Sugimoto, Masao Ogino, “High-frequency electromagnetic field analysis using anatomical human body models”, CEFC2016 (Peer-reviewed International Conference), Miami, Nov. 13 - 16, 2016.
- [13] Zhang, T., Koshizuka, S., Murotani, K., Shibata, K., Ishii, E., Ishikawa, M., “Improvement of Boundary Conditions for Non-planar Boundaries Represented by Polygon with an Initial Arrangement Technique”, *Int. J. Computational Fluid Dynamics*, 30(2), 155-175 (2016).
- [14] 松永拓也, 柴田和也, 室谷浩平, 越塚誠一, “代数的マルチグリッド法を用いた粒子法における圧力ポアソン方程式の解法”, *Transactions of JSCES*, Paper No.20160012 (2016).
- [15] 室谷浩平, 玉井佑, 越塚誠一, “流体シミュレーションにおける粒子法:MPS法とLSMPS法の数値解析精度の比較”, *応用数理* 26, 50-61 (2016).
- [16] Y. Imoto and D. Tagami., “A truncation error estimate of the interpolant of a particle method based on the Voronoi decomposition”, *JSIAM Letters*, 8 (2016), pp. 29-32.
- [17] K. Tazoe, M. Oka and G. Yagawa, “Loading frequencies effects on the oxide induced crack closure in extremely low stress intensity factor range”, *International Journal of Fracture Fatigue & Wear*, Vol. 4, 2016, 153-157.
- [18] Shin-ichiro Sugimoto., “Analysis of Rotary Machines with Hierarchical Domain Decomposition Method”, The 35th JSST Annual Conference, International Conference on Simulation Technology (Peer-reviewed International Conference), Kyoto, Japan, October 27-29, 2016, 6page, online.
- [19] T. Mizuma and A. Takei, “Improvement of Convergence Properties of an Interface Problem in Iterative Domain Decomposition Method Using Double-Double Precision”, The 35th JSST Annual Conference, International Conference on Simulation Technology (Peer-reviewed International Conference), Kyoto, Japan, October 27-29, 2016, 4page, online.
- [20] Masao Yokoyama, Genki Yagawa, “Relation between violin timbre and harmony overtone”, *Proceedings of Meetings on Acoustics (POMA)*, Honolulu, Hawaii, 28 Nov. - 2 Dec. 2016.
- [21] Yong-Ming GUO, Genki YAGAWA, “A meshless method with conforming and nonconforming sub-domains”, *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 2016 to appear.
- [22] H. Kanayama, “An industrial application of thermal convection analysis, *International Journal of Computational Methods*”, Vol.13, No.2:15 pages 2016
- [23] H. Zhu, Q. Yao, H. Kanayama, “Large-scale computations of flow around two cylinders by a domain decomposition method”, *Mathematical Problems in Engineering*, Vol.2016: 8 pages 2016, Article ID 4126123
- [24] Masato Masuda, Yasushi Nakabayashi, Ryuji Shioya, Hiroki Nishi, Shinichiro Takahashi and Fumihiko Hakuno, Study of Effects of Blood Amino Acid and Hormone Level for Controlling Triglyceride Accumulation in the Liver of Rats using Self-Organizing Map, *International Journal of Intelligent Information Systems*, Vol.5, No.6, pp.82-87, 2016.
- [25] 水間健仁, 赤塚元軌, 武居周, “大規模静電界シミュレーションによる着氷が正しいの放電路予測”, *日本シミュレーション学会論文誌*, Vol.8, No.2(2016), pp.9-18.
- [26] L. Liu, M. Ogino, K. Hagita, “Efficient compression of scientific floating-point data and an application in structural analysis”, *Transaction on JSCES*, Vol.2017, p.201700002, 2017.
- [27] S. Sugimoto, A. Takei, M. Ogino, “Finite element analysis with tens of billions of degrees of freedom in a high-frequency electromagnetic field”, *Mechanical Engineering Letters*, Vol.3, p.16-00667, 2017.
- [28] 杉本振一郎, 荻野正雄, 金山寛, “階層型領域分割法による回転機の解析”, *電気学会論文誌B*, Vol.137, No.3, pp.195-201, 2017.
- [29] H. Kanayama, M. Ogino, S. Sugimoto, K. Yodo, H. Zheng, “On the Coarse Matrix Solver of Preconditioners for Magnetostatic Domain Decomposition Analysis”, *電気学会論文誌B*, Vol.137, No.3, pp.179-185, 2017.
- [30] T. Tamai, K. Murotani and S. Koshizuka, “On the Consistency and Convergence of

- Particle-based Meshfree Discretization Schemes for the Laplacian Operator”, *Computers & Fluids* Vol.142, pp.79–85, 2017.
- [31] A.M.M.Mukaddes, Ryuji Shioya, Masao Ogino, Hiroshi Kanayama, Treatment of Block-Based Sparse Matrices in Domain Decomposition Method, *International Journal of System Modeling and Simulation* (ISSN Online: 2518-0959), Vol 2(1), pp.1-6, 2017.
- [32] 水間健仁, 上田茂太, 武居周, “擬似4倍精度を用いた反復型領域分割法による時間調和渦電流解析”, *日本シミュレーション学会論文誌*, Vol.9, No.2, pp.9-16, 2017.
- [33] 山本広太, 工藤彰洋, 武居周, “並列有限要素法に基づく大規模音響解析”, *日本シミュレーション学会論文誌*, Vol.9, No.2, pp. 27-37, 2017.
- [34] 武居周, 水間健仁, 杉本振一郎, 梶井晃基, 荻野正雄, “部分領域反復解法に擬似4倍精度を用いたfull-wave電磁界解析,” *電子情報通信学会論文誌C*, Vol.J100-C, No.5, pp.182-191,2017.
- [35] Amane Takei, “Large-scale Analyses of Electromagnetic Fields using Numerical Human Body Models”, 2017 IEEE International Conference on Computational Electromagnetics (ICCEM2017) (Peer-reviewed International Conference), Kumamoto, Japan, Mar. 8 - 10, 2017.
- [36] Amane Takei, Masao Ogino and Shin-ichiro Sugimoto, “High-frequency electromagnetic field analysis by COCR method using anatomical human body models”, The 21th International Conference on the Computation of Electromagnetic Fields (COMPUMAG2017) (Peer-reviewed International Conference), Daejeon, Korea, June 18 - 22, 2017.
- [37] Shin-ichiro Sugimoto, Masao Ogino, Hiroshi Kanayama and Amane Takei, “Efficient Parallel Numerical Analysis of Rotating Bodies based on Hierarchical Domain Decomposition Method”, The 21th International Conference on the Computation of Electromagnetic Fields (COMPUMAG2017) (Peer-reviewed International Conference), Daejeon, Korea, June 18 - 22, 2017.
- [38] Hiroshi Kanayama, Masao Ogino and Shin-ichiro Sugimoto, “A Coarse Matrix Iterative Solver for Magnetostatic Domain Decomposition Analysis”, The 21st International Conference on the Computation of Electromagnetic Fields (COMPUMAG2017) (Peer-reviewed International Conference), Daejeon, Korea, June 18 - 22, 2017.
- [39] Hongjie Zheng, Ryuji Shioya, “Verifications For Large-Scale Parallel Simulations of 3-D Fluid-Structure Interaction using Moving Particle Simulation (MPS) and Finite Element method (FEM)”, *International Journal of Computational Methods (IJCM)*, was accepted on August 19, 2017 and will be published.
- [40] Imoto, Y. and Tagami, D., Truncation error estimates of approximate differential operators of a particle method based on the Voronoi decomposition, *JSIAM Letters* (to appear).
- [41] Yong-Ming GUO, Genki YAGAWA, A meshless method with conforming and nonconforming sub-domains, *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, Volume 110, Issue 9, Page 826-841, 2017.
- [42] A. Oishi, G. Yagawa, Computational Mechanics Enhanced by Deep Learning, *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering* (to be published).

(2)その他の著作物(総説, 書籍など)

- [1] Seiichi Koshizuka, Moving Particle Semi-implicit (MPS) Method - Application to Free Surface Flow, *iacm expressions* No.39, 2-5 (2016).
- [2] 日本応用数理学会編, 分担執筆: 矢川元基, 応用数理の散歩道, 岩波書店, pp.238-253, 2016.
- [3] 矢川元基, 酒井讓, 粒子法, 岩波書店, 2016.
- [4] H.Kanayama, H. Dan, Tsunami Propagation from the Open Sea to the Coast, Tsunami, edited

(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 2件, 国際会議 13件)

〈国内〉

- [1] 田上大助, 数値解析学から見た計算手法の高精度化・高効率化の取組み, および物質・材料との連携へ向けた展開, MI² (情報統合型物質・材料開発) と数学連携による新展開ワークショップ, JST 東京本部, 2016年2月26日.
- [2] 井元佑介. メッシュフリー法の数学解析. 数学と現象 in 奥多摩, 奥多摩福祉会館, 2016年7月30日.

〈国際〉

- [1] Genki Yagawa, Reflection on Fukushima Daiichi Nuclear Accident, ASINCO 2016, Nagasaki, 2016.4.12.
- [2] * Liu, L., Ogino, M., Improvements of a parallel finite element code for efficient data compression and visualization (Keynote Lecture), WCCM & APCOM 2016, Seoul, Korea, 24 - 29 July 2016.
- [3] * Koshizuka, S., Moving Particle Semi-implicit Method in Computational Fluid Dynamics: Basic Studies and Application to Industry (Plenary Lecture), 12th World Congress on Computational Mechanics (WCCM XII), 6th Asia-Pacific Conference on Computational Mechanics (APCOM VI), Seoul, July 24-29, 2016, 152445.
- [4] Kanayama, H., Zheng, H., Sugimoto, S., Ogino, M., The BDD-DIAG Preconditioner in Domain Decomposition Analysis for Magnetostatic Problems (Keynote Lecture), ICCM2016, Berkeley, USA, 1 - 4 August 2016.
- [5] Ogino, M., An Efficient Implementation of Parallel Scaled-BDD Method for Large-scale Structural Analysis (Keynote Lecture), ICCM2016, Berkeley, USA, 1 - 4 August 2016.
- [6] Koshizuka, S., Numerical Analysis of Flooding Using Explicit Moving Particle Simulation (Keynote Lecture), 7th Int. Conf. on Computational Mechanics (ICCM2016), Berkeley, August 1-4, 2016, ID 1511.
- [7] Tagami, D., An application of characteristic methods into a generalized particle method for convection-diffusion equations, Mathematical Analysis of Continuum Mechanics and Industrial Applications, Fukuoka, Japan, 22-24 October 2016.
- [8] * Masao Ogino, Takuya Iwama, Mitsuteru Asai, Development of a Partitioned Coupling Analysis System for Fluid-structure Interactions using an ISPH Code and the ADVENTURE System, ICCM2017, Guilin, China, July 25-29, 2017.
- [9] * Hiroshi Kanayama, Masao Ogino, Shin-ichiro Sugimoto, A Coarse Matrix Incomplete Iterative Approach for Magnetostatic Domain Decomposition Analysis, ICCM2017, Guilin, China, July 25-29, 2017.
- [10] H. Kawai, A Domain Specific Language in Solid Mechanics Field for the Description of Material Behaviour for Structural Analysis, Computational Science and Engineering with High Performance Computers Workshop KAUST, ECRC, CEMSE 30 April to 6 May 2017.
- [11] R. Shioya, Development of a Numerical Library based on Hierarchical Domain Decomposition for Post Petascale Simulation, Computational Science and Engineering with High Performance Computers Workshop KAUST, ECRC, CEMSE 30 April to 6 May 2017.
- [12] D. Tagami, A Reduced Iterative Domain Decomposition Method for Magnetic Field Problems with the Gauge Condition, Computational Science and Engineering with High Performance Computers Workshop KAUST, ECRC, CEMSE 30 April to 6 May 2017.

[13] Y. Nakabayashi, Efficient Strategy of Finite Element Analysis for Fluid-Structure Interaction, Computational Science and Engineering with High Performance Computers Workshop KAUST, ECRC, CEMSE 30 April to 6 May 2017.

② 口頭発表 (国内会議 66 件, 国際会議 34 件)

〈国内〉

- [1] 金山寛, 鄭宏杰, 杉本振一郎, 荻野正雄, Considerations of Preconditioners for Magnetostatic Domain Decomposition Analysis, 静止器/回転機合同研究会「電磁界数値計算技術とその応用」, 富士通株式会社本社事務所, 2016 年 1 月 20-21 日
- [2] 田上大助, Fundamental Technologies of Numerical Analysis in Computational Fluid Dynamics, 化学工学会 第 81 年会, 関西大学, 2016 年 3 月 13-15 日
- [3] Wang, Z., Zhang, T., Murotani, K., Shibata, K., Koshizuka, S., Water Spreading on Floor by Explicit Moving Particle Simulation Method, 日本原子力学会 2016 年春の年会, 仙台, March 26-28, 2016, 1B14
- [4] 南日泰俊, 室谷浩平, 越塚誠一, 永井英一, 藤澤智光, 安重晃, 粒子法を用いた東日本大震災の津波による福島第一原子力発電所 1 号機タービン建屋内の 3 次元浸水解析, 日本原子力学会 2016 年春の年会, 仙台, March 26-28, 2016, 1B15
- [5] 杉本振一郎, 荻野正雄, 電磁場解析向け階層分割型数値計算フレームワークの高速化検討, 第 28 回「電磁力関連のダイナミクス」シンポジウム, 慶應義塾大学, 2016 年 5 月 18 日～20 日
- [6] 荻野正雄, 梶井晃基, 倍々精度演算を用いた電磁界シミュレーションにおける COCG 法の収束性改善, 第 28 回「電磁力関連のダイナミクス」シンポジウム, 慶應義塾大学, 2016 年 5 月 18 日～20 日
- [7] 金山寛, 鄭宏杰, 杉本振一郎, 荻野正雄, 静磁場領域分割解析におけるインターフェイス問題, 第 28 回「電磁力関連のダイナミクス」シンポジウム, 慶應義塾大学, 2016 年 5 月 18 日～20 日
- [8] 武居周, 杉本振一郎, ボクセルメッシュモデルを用いる並列高周波電磁界解析, 第 28 回「電磁力関連のダイナミクス」シンポジウム, 慶應義塾大学, 2016 年 5 月 18 日～20 日
- [9] 河合浩志, 荻野正雄, 塩谷隆二, 山田知典, 吉村忍, 領域分割法における反復法に基づくローカルソルバーの性能評価, 第 21 回計算工学講演会, 朱鷺メッセ:新潟コンベンションセンター, 2016 年 5 月 31 日～6 月 2 日
- [10] 杉本振一郎, 階層型領域分割法での移動体の効率的な解析, 第 21 回計算工学講演会, 朱鷺メッセ:新潟コンベンションセンター, 2016 年 5 月 31 日～6 月 2 日
- [11] 和田義孝, 荻野正雄, 室谷浩平, 河合浩志, 塩谷隆二, 高精細可視化ライブラリ LexADV_VSCG のビューア対応機能の実装, 第 21 回計算工学講演会, 朱鷺メッセ:新潟コンベンションセンター, 2016 年 5 月 31 日～6 月 2 日
- [12] 荻野正雄, 矢田一馬, 高精細可視化処理時における並列 Z バッファ画像合成の効率化に関する検討, 第 21 回計算工学講演会, 朱鷺メッセ:新潟コンベンションセンター, 2016 年 5 月 31 日～6 月 2 日
- [13] Masao Ogino, Lijun Liu, Performance evaluation of compression technique JHPCN-DF for large-scale structural analysis, 第 21 回計算工学講演会, 朱鷺メッセ:新潟コンベンションセンター, 2016 年 5 月 31 日～6 月 2 日
- [14] 劉麗君, 荻野正雄, 李雅坤, 領域分割型反復解法による並列疎行列ベクトル積の性能評価, 第 21 回計算工学講演会, 朱鷺メッセ:新潟コンベンションセンター, 2016 年 5 月 31 日～6 月 2 日
- [15] 淀薫, 塩谷隆二, 荻野正雄, 大規模解析のための多階層領域分割法によるデータ圧縮効果, 第 21 回計算工学講演会, 朱鷺メッセ:新潟コンベンションセンター, 2016 年 5 月 31 日～6 月 2 日

- [16] 鄭宏杰, 塩谷隆二, Mukaddes Abul Mukid Mohammad, 「京」を用いた ADVENTURE_Thermal による大規模熱伝導解析, 第 21 回計算工学講演会, 朱鷺メッセ:新潟コンベンションセンター, 2016 年 5 月 31 日~6 月 2 日.
- [17] 杉本振一郎, 階層分割型数値計算フレームワークを用いた 3 次元電磁界解析の高速化研究, 学際大規模情報基盤共同利用・共同研究拠点第 8 回シンポジウム, THE GRAND HALL, 2016 年 7 月 14 日.
- [18] 武居周, 杉本振一郎, 荻野正雄, 反復型領域分割法に基づく高周波電磁界解析のインターフェイス問題の収束性改善, 静止器/回転機合同研究会, 石垣市商工会館, 2016 年 9 月 8 日~9 日
- [19] 荻野正雄, 武居周, 杉本振一郎, MINRES-like_CS 法を用いた高周波電磁界有限要素解析の収束性評価, 静止器/回転機合同研究会, 石垣市商工会館, 2016 年 9 月 8 日~9 日
- [20] 金山寛, 荻野正雄, 杉本振一郎, 淀薫, 鄭宏杰, 静磁場の領域分割解析におけるコース問題の解法について, 静止器/回転機合同研究会, 石垣市商工会館, 2016 年 9 月 8 日~9 日
- [21] 杉本振一郎, 階層型領域分割法を用いた回転機の解析, 静止器/回転機合同研究会, 石垣市商工会館, 2016 年 9 月 8 日~9 日
- [22] 田上大助, 材料科学に対する応用数学からの貢献, 日本応用数理学会 2016 年度年会, 北九州国際会議場, 2016 年 9 月 12~14 日
- [23] 金山寛, 淀薫, 鄭宏杰, 杉本振一郎, 荻野正雄, 部分領域を直接法で解く場合のインターフェイス問題の反復法について, 第 29 回計算力学講演会, 名古屋大学, 2016 年 9 月 22 日~24 日
- [24] 鄭宏杰, 塩谷隆二, スーパーコンピュータ京を用いた 3 次元大規模並列 MPS-FEM 流体構造連成解析, 第 29 回計算力学講演会, 名古屋大学, 2016 年 9 月 22 日~24 日.
- [25] 岩間拓也, 荻野正雄, 浅井光輝, 粒子法コードと汎用有限要素法コードによる片方向 FSI 解析に関する検討, 第 29 回計算力学講演会, 名古屋大学, 2016 年 9 月 22 日~24 日
- [26] 劉麗君, 荻野正雄, 萩田克美, 大規模有限要素解析における DDM 圧縮及び適応 JHPCN-DF 圧縮の開発, 第 29 回計算力学講演会, 名古屋大学, 2016 年 9 月 22 日~24 日
- [27] 和田義孝, 荻野正雄, 室谷浩平, 河合浩志, 塩谷隆二, 高精細可視化ライブラリ LexADV_VSCG のインタラクティブ可視化ビューア対応, 第 29 回計算力学講演会, 名古屋大学, 2016 年 9 月 22 日~24 日
- [28] 田上大助, 杉本振一郎, 静磁場問題に対するマルチグリッド BDD 法の数値解析, 第 29 回計算力学講演会, 名古屋大学, 2016 年 9 月 22 日~24 日
- [29] 杉本振一郎, 階層型領域分割法での移動体の考慮, 第 29 回計算力学講演会, 名古屋大学, 2016 年 9 月 22 日~24 日
- [30] 榎井晃基, 荻野正雄, 大規模電磁場解析における反復法への高精度計算の適用, 第 29 回計算力学講演会, 名古屋大学, 2016 年 9 月 22 日~24 日
- [31] 井元佑介, 三目直登. 非斉次 Neumann 境界条件を含む Poisson 方程式に対する粒子法の誤差評価とその応用. 第 29 回計算力学講演会, 名古屋大学, 2016 年 9 月 22 日~24 日
- [32] 瀬田陽平, 横山真男, 牧野光則, 矢川元基, 界面張力を考慮した粒子法による容器口から流れる液垂れの数値シミュレーション, 日本機械学会計算力学講演会, 名古屋, 2016.9.22
- [33] 小林陽介, 村上恭子, 稲葉正和, 矢川元基, フリーメッシュ法を用いた計測データからの高精度 3D モデリングアプリケーション, 日本機械学会計算力学講演会, 名古屋, 2016.9.22
- [34] 田添広喜, 岡正徳, 矢川元基, 酸化物誘起き裂閉口が無視できる場合の疲労き裂進展下限界特性の板厚依存性, 日本機械学会材料力学カンファレンス, 神戸, 2016.10.8
- [35] 矢地謙太郎, 荻野正雄, 西脇眞二, 藤田喜久雄, 流体問題を対象とした大規模トポロジー最適化, 第 26 回設計工学・システム部門講演会, 慶應義塾大学, 2016 年 10 月 8 日~10 日
- [36] Hongjie ZHENG, Ryuji SHIOYA, Large-scale analysis of ADVENTURE system on the K computer, オープン CAE シンポジウム 2016@東京, 2016 年 11 月 24 日~26 日.
- [37] 金山寛, 荻野正雄, 杉本振一郎, On the Coarse Matrix Solver of Preconditioners for

- Magnetostatic Domain Decomposition Analysis (The 2nd Report), 電気学会 静止器・回転機合同研究会資料 SA-17-20, RM-17-20, 法政大学, 2017 年 1 月 18 日～19 日.
- [38] 杉本振一郎, 階層型領域分割法を用いた回転機の解析(第 2 報), 電気学会 静止器・回転機合同研究会資料 SA-17-31, RM-17-31, 法政大学, 2017 年 1 月 18 日～19 日.
- [39] 池田朋哉, 伊藤伸一, 長尾大道, 片桐孝洋, 永井亨, 荻野正雄, アジョイント法における Forward model への階層ブロッキング適用による高性能化, 第 157 回ハイパフォーマンスコンピューティング研究会, 沖縄産業支援センター, 2016 年 12 月 21 日～22 日.
- [40] 山田賢也, 片桐孝洋, 永井亨, 荻野正雄, ディープラーニングを用いた数値計算ライブラリの最適実装選択の検, 情報処理学会第 79 回全国大会, 名古屋大学, 2017 年 3 月 16 日～18 日.
- [41] 藤川隼人, 池田朋哉, 片桐孝洋, 永井亨, 荻野正雄, データ同化処理における時空間ブロッキングの異機種性能評, 情報処理学会第 79 回全国大会, 名古屋大学, 2017 年 3 月 16 日～18 日.
- [42] 関谷和明, 荻野正雄, 片桐孝洋, 永井亨, 高精度計算ライブラリを利用した多倍長精度行列ベクトル演算の性能評価, 情報処理学会第 79 回全国大会, 名古屋大学, 2017 年 3 月 16 日～18 日.
- [43] 井元佑介, 粒子法による CFD と誤差解析. 数学連携セミナー, 東北大学, 2017 年 3 月 23 日.
- [44] 花岡司, 杉本振一郎, 河合浩志, GUI による多孔質材料の空孔形状再現の効率化, 日本機械学会関東支部第 23 期総会・講演会, 東京理科大学, 2017 年 3 月 16 日～17 日.
- [45] 宮尾竜海, 須賀一博, 河合浩志, 矯正治療における歯の初期動揺予測モデルの検討, 日本機械学会関東支部第 23 期総会・講演会, 東京理科大学, 2017 年 3 月 16 日～17 日.
- [46] 松原孝宜, 須賀一博, 河合浩志, 光学印象を用いた歯根の 3 次元姿勢の推定, 日本機械学会関東支部第 23 期総会・講演会, 東京理科大学, 2017 年 3 月 16 日～17 日.
- [47] 宮本欣弥, 須賀一博, 河合浩志, 弾性ワイヤーの設置方法が矯正モーメントに及ぼす影響の数値解析による評価, 日本機械学会関東支部第 23 期総会・講演会, 東京理科大学, 2017 年 3 月 16 日～17 日.
- [48] 田中真ノ介, 河合浩志, 杉本振一郎, 建造物の地震動解析の性能評価, 日本機械学会関東支部第 23 期総会・講演会, 東京理科大学, 2017 年 3 月 16 日～17 日.
- [49] 淀薫, 塩谷隆二, 荻野正雄, 多階層領域分割法における境界自由度の扱い, 日本機械学会関東支部第 23 期総会・講演会, 東京理科大学, 2017 年 3 月 16 日～17 日.
- [50] 織茂勝利, 宮内彰太, 遊佐泰紀, 岡田裕, 領域分割法を用いた熱弾塑性問題の大規模並列有限要素解析, 日本機械学会関東支部第 23 期総会・講演会, 東京理科大学, 2017 年 3 月 16 日～17 日.
- [51] 山本広太, 工藤彰洋, 武居周, 並列有限要素法に基づく大規模音響解析手法の研究・開発, 日本機械学会関東支部第 23 期総会・講演会, 東京理科大学, 2017 年 3 月 16 日～17 日.
- [52] 金山寛, 荻野正雄, 杉本振一郎, 静磁場領域分割解析におけるコース問題の不完全反復解, 第 29 回「電磁力関連のダイナミクス」シンポジウム(SEAD29), 倉敷アイビースクエア, 2017 年 5 月 18 日～19 日.
- [53] 杉本振一郎, 荻野正雄, 電磁場解析向け階層分割型数値計算フレームワークの高速化検討, 第 29 回「電磁力関連のダイナミクス」シンポジウム(SEAD29), 倉敷アイビースクエア, 2017 年 5 月 18 日～19 日.
- [54] 杉本振一郎, 階層型領域分割法を用いた回転機の並列解析, 第 29 回「電磁力関連のダイナミクス」シンポジウム(SEAD29), 倉敷アイビースクエア, 2017 年 5 月 18 日～19 日.
- [55] 村上裕哉, 武居周, 電気機器解析に向けた電磁界解析手法の基礎検討, 第 29 回「電磁力関連のダイナミクス」シンポジウム(SEAD29), 倉敷アイビースクエア, 2017 年 5 月 18 日～19 日.
- [56] 野村政宗, 太良尾浩生, 武居周, 解剖学的人体データを用いた感電時の電流解析手法の高速化検討, 第 29 回「電磁力関連のダイナミクス」シンポジウム(SEAD29), 倉敷アイビースクエア, 2017 年 5 月 18 日～19 日.

- [57] 水間健仁, 武居周, 領域分割法に基づく電磁界解析のインターフェース問題の収束性改善, 第29回「電磁力関連のダイナミクス」シンポジウム(SEAD29), 倉敷アイビースクエア, 2017年5月18日～19日.
- [58] 杉本振一郎, 武居周, 荻野正雄, 数百億自由度の高周波電磁界解析, 第22回計算工学講演会, ソニックシティ大宮, 2017年5月31日-6月2日.
- [59] 杉本振一郎, 花岡司, 河合浩志, 竹増光家, GUIを用いた多孔質材料の空孔形状再現の効率化, 第22回計算工学講演会, ソニックシティ大宮, 2017年5月31日-6月2日.
- [60] 鄭 宏杰, 塩谷 隆二, 三目 直登, MPS-FEM 流体構造連成解析を用いた津波波力による沿岸構造物の安全評価に関する研究, 第22回計算工学講演会, ソニックシティ大宮, 2017年5月31日～6月2日.
- [61] Lijun Liu, Masao Ogino, A Study on A DDM-based Data Compression System for the Large-scale Finite Element Analysis, 第22回計算工学講演会, ソニックシティ大宮, 2017年5月31日～6月2日.
- [62] 岩間拓也, 荻野正雄, 浅井光輝, 鍋倉昌博, SPH粒子法コードとADVENTUREによる並列流体構造連成解析システムに関する検討, 第22回計算工学講演会, ソニックシティ大宮, 2017年5月31日～6月2日.
- [63] 榎井晃基, 荻野正雄, 混合精度演算を用いた電磁界シミュレーションにおけるCOCG法の収束性改善, 第22回計算工学講演会, ソニックシティ大宮, 2017年5月31日～6月2日.
- [64] 淀薫, 塩谷隆二, 荻野正雄, 多階層領域分割法による非定常熱解析ソルバの開発, 第22回計算工学講演会, ソニックシティ大宮, 2017年5月31日～6月2日.
- [65] 杉本振一郎, 階層分割型数値計算フレームワークを用いた3次元電磁界解析の高速化研究, 学際大規模情報基盤共同利用・共同研究拠点第9回シンポジウム, THE GRAND HALL, 2017年7月14日.
- [66] 荻野正雄, 岩間拓也, 浅井光輝, 3次元粒子法と有限要素法の組み合わせによる流体構造連成解析システムの開発, 第64回理論応用力学講演会, 機械振興会館, 2017年8月22日～24日.

〈国際〉

- [1] D. Tagami, An Iterative Domain Decomposition Method for Eddy Current Problems Adapted to the Gauge Condition, The Fifth Chilean Workshop on Numerical Analysis of Partial Differential Equations (WONAPDE2016), Concepcion, Chile, 11-15, January 2016.
- [2] Zhang, T., Koshizuka, S., Murotani, K., Shibata, K., Ishii, E., Ishikawa, M., Improvement of Wall Weight Function near Non-planar Wall Boundaries in Polygon Boundary Condition with a Boundary Particle Arrangement Technique, 3rd Int. Conf. on Violent Flows (VF-2016), Osaka, March 9-11, 2016.
- [3] Kawai, H., Ogino, M., Shioya, R., Yamada, T., Yoshimura, S., Performance tuning of subdomain local FE solver in domain decomposition method, ECCOMAS2016, Crete Island, Greece, 5 - 10 June 2016.
- [4] Tagami, D., Some investigations of a generalized particle method for convection-diffusion equations, ECCOMAS2016, Crete Island, Greece, 5 - 10 June 2016.
- [5] Tagami, D., Mathematical analysis of generalized particle methods for Poisson equations and heat equations, The 11th International SPHERIC Workshop, Garching, Germany, 13-16 June 2016.
- [6] Tagami, D., A generalized particle method for convection-diffusion equations, EASIAM 2016, Macau, China, 20-22 June 2016.
- [7] Matsunaga, T., Shibata, K., Murotani, K., Koshizuka, S., Mirror Particle Boundary Representation for MPS Simulation, 12th World Congress on Computational Mechanics (WCCM XII), 6th Asia-Pacific Conference on Computational Mechanics (APCOM VI), Seoul, July 24-29, 2016, 150951.

- [8] Ogino, M., Performance Evaluation of a Scaled-BDD on Distributed-Memory Parallel Computers, WCCM & APCOM 2016, Seoul, Korea, 24 - 29 July 2016.
- [9] Kanayama, H., Ogino, M., Sugimoto, S., Zheng, H., Yodo, K., Application of the BDD-DIAG Preconditioner to Domain Decomposition Analysis for Magnetostatic Problems, WCCM & APCOM 2016, Seoul, Korea, 24 - 29 July 2016.
- [10] Mukaddes, A.M.M., Shioya, R., Kanayama, H., Ogino, M., Storing Techniques for Sparse Matrices-A Study on Thermal-Convection Problems, WCCM & APCOM 2016, Seoul, Korea, 24 - 29 July 2016.
- [11] Kawai, H., Ogino, M., Shioya, R., Yamada, T., Yoshimura, S., Mixed Precision Implementation of Coarse Inverse Approach in BDD Pre-conditioner, WCCM & APCOM 2016, Seoul, Korea, 24 - 29 July 2016.
- [12] Zheng, H., Mukaddes, A.M.M., Shioya, R., Ogino, M., Performance Evaluation of ADVENTURE_Solid and ADVENTURE_Thermal on the K computer, WCCM & APCOM 2016, Seoul, Korea, 24 - 29 July 2016.
- [13] Shin-ichiro SUGIMOTO, Hierarchical Domain Decomposition Method with the Moving Bodies, The 12th World Congress on Computational Mechanics and The 6th Asia-Pacific Congress on Computational Mechanics (WCCM XII & APCOM VI), online, 2016/07/24-29, Seoul, Korea.
- [14] Hiroshi KANAYAMA, Masao OGINO, Shin-ichiro SUGIMOTO, Hongjie ZHENG and Kaworu YODO, Application of the BDD-DIAG Preconditioner to Domain Decomposition Analysis for Magnetostatic Problems, The 12th World Congress on Computational Mechanics and The 6th Asia-Pacific Congress on Computational Mechanics (WCCM XII & APCOM VI), online, 2016/07/24-29, Seoul, Korea.
- [15] Shinsuke NAGAOKA, Yasushi NAKABAYASHI, Yoshiaki TAMURA and Genki YAGAWA (Toyo University), Parallelization of Enriched Free Mesh Method for Large Scale Fluid-Structure Interaction Analysis, WCCM/APCOM 2016, 2016.7.26.
- [16] Youhei SETA (Chuo University), Masao YOKOYAMA (Meisei University), Mitsunori MAKINO (Chuo University), Genki YAGAWA (Toyo University), Application of Particle Method to Liquid Dripping, WCCM/APCOM 2016, 2016.7.28.
- [17] Mukaddes, A.M.M., Shioya, R., Ogino, M., Finite Element Approach with Unsteady Bioheat Equation for Human Skin Injury, ICCM2016, Berkeley, USA, 1 - 4 August 2016.
- [18] Liu, L, Ogino, M., Performance Evaluation of Data Compression Methods in Linear Static and Dynamic Finite Element Analysis, ICCM2016, Berkeley, USA, 1 - 4 August 2016.
- [19] Hongjie ZHENG, Ryuji SHIOYA, Large-Scale Fluid-Structure Analysis for Tsunami Inundation into the Interior of a Building using MPS-FEM Coupling Method, International Conference on Computational Methods (ICCM 2016), 1585, August, 2016.
- [20] Kawai, H., Ogino, M., Shioya, R., Yamada, T., Yoshimura, S., Subdomain local FE solver implementation using iterative solver in domain decomposition method, ICTAM2016, Montreal, Canada, 21 - 26 August, 2016.
- [21] K. Tazoe, M. Oka and G. Yagawa, LOADING FREQUENCIES EFFECTS ON THE OXIDE-INDUCED CRACK CLOSURE IN EXTREMELY LOW STRESS INTENSITY FACTOR RANGE, 5th International Conference on Fracture Fatigue and Wear FFW 2016, Kitakyushu, Japan, 24 August 2016
- [22] Tagami, D., Error estimates of a generalized particle method for convection-diffusion equations, Czech-Japanese-Polish Seminar in Applied Mathematics 2016, Krakow, Poland, 5-9 September 2016.
- [23] Koshizuka, S., Murotani, K., Nannichi, Y., Shibata, K., Nagai, E., Fujisawa, T., Anju, A., Three-dimensional Flooding Analysis in the Turbine Building of Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Plant by the Tsunami of Great East Japan Earthquake Using Particle Method, 11th Int. Topical Meeting on Nuclear Reactor Thermal Hydraulics, Operation and Safety, Gyeongju,

October 9–13, 2016, N11P0057.

- [24] Y. Imoto. Recent study and possibility of applications of particle methods for interface problems. Workshop on interface motions and free boundary problems, Karuizawa (Japan), July 2016.
- [25] M. Yokoyama, G.Yagawa, Relation between violin timbre and harmony overtone, 5th Joint Meeting Acoustical Society of America and Acoustical Society of Japan, Honolulu, Hawaii, 28 Nov. – 2 Dec. 2016.
- [26] H.Kanayama, Balancing domain decomposition (BDD) related preconditioners in engineering including magnetostatic problems, CoMFoS16:Mathematical Analysis of Continuum Mechanics and Industrial Applications II, Kyushu University, October 22–24, 2016
- [27] Kawai, H., Ogino, M., Shioya, R., Yamada, T., Yoshimura, S., ADVENTURE: Scalable Solvers for Industrial Applications, SIAM Coference on Computational Science and Engineerig 2017, Atlanta, Georgia, Feb 27 - March 3, 2017.
- [28] Y. Imoto and D. Tagami, Error estimates of a generalized particle method for the Poisson equation with Neumann boundary conditions. A3 Workshop on Computational Fluid Dynamics and Numerical Analysis, Pusan (Koria), February 19–21, 2017.
- [29] Hongjie Zheng, Ryuji Shioya, Naoto Mitsume, “Force Analysis of Coastal Buildings Damaged by Tsunami Wave Impact Load using Fluid–Structure Coupling Method”, International Conference on Computational Methods (ICCM 2017), Guilin, China, 25th–29th July, 2017.
- [30] Masao Ogino, Lijun Liu, Kouki Masui, Performance Evaluation of Multiple Precision Iterative Methods for the Solution of Complex Symmetric Systems of Electromagnetic Analysis, FEF2017, Rome, Italy, April 5–7, 2017.
- [31] Lijun Liu, Masao Ogino, Performance Evaluation of Large–scale High–frequency Electromagnetic Field Simulations using Iterative Substructuring Methods, ICCM2017, Guilin, China, July 25–29, 2017.
- [32] Koki Masui, Masao Ogino, Study on the precision and the type of implementation of iterative methods for solving complex symmetric linear systems, DPMAT2017, Nagoya, Japan, August 28–31, 2017.
- [33] H. Kawai, M. Ogino, R. Shioya, T. Yamada and S. Yoshimura, ADVENTURE : Scalable Solvers for Industrial Applications, SIAM–CSE 2017, Atlanta, USA, Feb. 27–Mar.3, 2017 2017.
- [34] D. Tagami, Mathematical analysis of characteristic generalized particle methods for convection–diffusion equations, The 12th International SPHERIC Workshop, Ourense, Spain, June 2017.

③ ポスター発表（国内会議 6, 国際会議 3 件）

〈国内〉

- [1] 杉本振一郎, 階層分割型数値計算フレームワークを用いた 3 次元電磁界解析の高速化研究, 学際大規模情報基盤共同利用・共同研究拠点第 8 回シンポジウム, THE GRAND HALL, 2016 年 7 月 14 日.
- [2] 劉麗君, JHPCN-DF を用いた大規模有限要素解析におけるデータ圧縮の性能評価, 学際大規模情報基盤共同利用・共同研究拠点第 8 回シンポジウム, THE GRAND HALL, 2016 年 7 月 14 日.
- [3] 塩谷隆二, 東日本大震災の津波を模擬した福島第一原子力発電所1号機タービン建屋浸水解析, 第 3 回 HPCI 成果報告会, コクヨホール, 2016 年 10 月 21 日.
- [4] 武居周, 解剖学的人体データを用いる電磁界解析の性能評価, 第 3 回 HPCI 成果報告会, コクヨホール, 2016 年 10 月 21 日.
- [5] 荻野正雄, SPH-FEM 連成解析による沿岸構造物の災害影響評価, 第 3 回 HPCI 成果報告会, コクヨホール, 2016 年 10 月 21 日.

- [6] 井元佑介, 田上大助, 浅井光輝, 渡部善隆, 小野健二, 三目直登, 西浦泰介, 野中丈士, 粒子法の高精度化と大規模流体シミュレータへの応用粒子法の高精度化と大規模流体シミュレータへの応用, 学際大規模情報基盤共同利用・共同研究拠点 第 9 回シンポジウム, jh170051-NAH, 2017 年 7 月, 品川グランドセトラルタワー, 品川区.

〈国際〉

- [1] Tagami, D., Numerical analysis of generalized particle methods for convection diffusion problems, International Conference “Patterns and Waves 2016”, Sapporo, Japan, 1-5 August 2016.
- [2] Hongjie Zheng, Masao Ogino, Kohei Murotani, Seiichi Koshizuka, Ryuji Shioya, Large-scale Tsunami Run-up and Inundation Simulation Using an Explicit Moving Particle Simulation Solver Framework, Women in HPC workshop at SC16, Salt Lake City, Nov. 13, 2016.
- [3] Masao Ogino, Hongjie Zheng, Kohei Murotani, Seiichi Koshizuka, Ryuji Shioya, Lijun Liu, Tsunami run-up and inundation simulations using LexADV_EMPS solver framework on Fujitsu FX100, SC16 Research Poster (Peer-reviewed International Conference), Salt Lake City, Nov. 13-18, 2016.

(4)知財出願

①国内出願 (0件)

②海外出願 (0件)

③その他の知的財産権

特になし.

(5)受賞・報道等

①受賞

- [1] 平成 27 年度九州大学学生表彰(学術研究活動), 井元佑介, 2016 年 3 月 25 日.
- [2] 第 13 回日本原子力学会計算科学技術部会 CG 賞, 室谷浩平, 越塚誠一, 永井 英一, 藤澤 智光, 安重 晃, 2016 年 3 月 26 日.
- [3] * Computational Mechanics Award, Asia-Pacific Association for Computational Mechanics (APACM), Seiichi Koshizuka, 2016 年 7 月 25 日.
- [4] 第 14 回日本原子力学会計算科学技術部会 CG 賞, 南日泰俊, 室谷浩平, 越塚誠一, 永井 英一, 藤澤智光, 安重晃, 2017 年 3 月 27 日.
- [5] 平成 29 年春の叙勲 瑞宝中綬章, 矢川元基, 2017 年 4 月 29 日.
- [6] *日本計算工学会表彰(2016 年度川井メダル), 塩谷隆二, 2017 年 5 月 19 日.
- [7] 日本計算工学会表彰 (2016 年度論文賞), 松永拓也, 柴田和也, 室谷浩平, 越塚誠一, 2017 年 5 月 19 日.
- [8] 日本計算工学会表彰 (2016 年度論文奨励賞), 荻野正雄, 2017 年 5 月 19 日.
- [9] *第 6 回日本応用数理学会業績賞, 金山寛, 2017 年 6 月 30 日.
- [10] 2017 The JACM Fellows Award, 河合浩志, 2017 年 7 月 19 日.

②マスコミ(新聞・TV等)報道

特になし.

③その他

特になし.