

戦略的創造研究推進事業 CREST
研究領域「マルチスケール・マルチフィジックス現象
の統合シミュレーション」
研究課題「観測・計算を融合した階層連結地震・
津波災害予測システム」

研究終了報告書

研究期間 平成17年10月～平成23年3月

研究代表者：松浦 充宏
(大学共同利用機関法人情報・システム研究機構
統計数理研究所、特任教授)

§1 研究実施の概要

本研究の目的は、プレート沈み込み帯に位置する我が国の地震・津波災害の軽減に資するため、プレート運動による地殻応力の蓄積を経て大地震が発生し、地震波が構造物を揺らし、津波が海岸部を襲うまでの一連の過程を再現・予測する観測・計算融合の階層連結型高精度シミュレーション・システムを世界に先駆けて開発することにある。

この目的を達成するため、第1フェーズ(平成17～19年度)では、相互に関連する要素モデル及び基本プログラムを結合することで地震発生、強震動/津波、及び人工構造物振動の予測シミュレーション・サブシステムを構築した。また、これと並行して、大規模連成シミュレーションのための階層連結プラットフォームの開発を進めた。第2フェーズ(平成20～22年度)では、上記の3つのサブシステムを階層連結した全体システムを構築し、観測データとモデル計算を融合した地震・津波災害予測シミュレーションの実現を目指した。先ず、平成20年度には、第1フェーズで開発した地震発生予測、強震動/津波予測及び人工構造物振動予測のサブシステムの実効性を現実に即したシミュレーションを通じて検証すると共に、観測データとモデル計算の融合に向けた広域GPS/地震観測データ逆解析手法の開発を行った。平成21年度には、南海トラフ沿いのプレート境界地震を対象に、これらのサブシステムを階層連結した地震・津波災害予測シミュレーションの準備を進めた。また、ペタスケール大規模並列シミュレーション用ミドルウェアの開発を進め、東京大学情報基盤センターT2K オープンスパコン上での実装を試みた。本研究計画最終年度の平成22年度には、観測・計算を融合した階層連結地震・津波災害予測システムのプロトタイプを完成させ、南海トラフ地震の発生とそれに伴う地震動/津波災害の定量的予測を行った。また、10月には、JST 国際強化支援の下に国際ワークショップ(第7回 ACES 国際ワークショップ)を開催し、本プロジェクトの研究成果を世界に向けて発信した。

本研究で得られた成果は多岐にわたる。先ず、松浦・福山・橋本グループは、プレート運動、応力蓄積、破壊伝播、及び地震波動伝播の4つの要素モデルを結合することで、プレート境界での準静的応力蓄積-動的破壊伝播-地震波動伝播の連成シミュレーション・システムを構築した。また、広域地震観測網や GPS 観測網からの膨大なデータからプレート境界の固着-すべり状態や地殻の応力パターン及び弾性/非弾性歪み速度を推定する逆解析手法を開発した。更に、観測と計算を融合した大規模シミュレーションにより、日本列島域のプレート境界地震の発生予測が定量的に可能であることを示した。これらは世界に先駆けた研究成果であり、その科学的・技術的インパクトは非常に大きい。古村グループは、新たに開発した Navier-Stokes 方程式の直接解法による津波シミュレーションコードを地震動シミュレーションコードと結合して地震-津波連成シミュレーション・システムを構築し、海溝型巨大地震による強い揺れと地殻変動そして津波の発生伝播の高精度同時評価を世界に先駆けて実現した。また、本コードを地球シミュレータや T2K オープンスパコン(東京大学)に実装し、1944 年東南海地震や 2004 年紀伊半島南東沖地震のシミュレーションを通じて、海底津波計記録や強震計記録との比較からモデルの有効性を確認した。市村・長嶋グループは、大地震による人工構造物の応答を地震波と構造物の動的相互作用を考慮した連成シミュレーションにより再現・予測する研究を進め、浮き屋根式石油貯蔵タンクに仮想南海地震の地震波が入力した場合の動的応答を高精度でシミュレーションすることに成功した。また、都市デジタルデータを用いて計算機上に仮想現実都市を構築し、マイクロ解析とマクロ解析を階層結合した手法による都市震災評価シミュレーション・システムを世界に先駆けて開発した。奥田・中島グループは、大規模階層連結シミュレーションを実現するためのソフトウェア基盤として、M×N 通信による連成計算用カプラーを開発した。これは、計算機資源の効率的活用という点で、世界に先駆けた成果である。また、メッセージパッシングとマルチスレッドを組み合わせた Hybrid 並列プログラミングモデルによる前処理付反復法アルゴリズムの研究を実施し、CPU-GPU 複合環境における混合精度アルゴリズム、悪条件問題向け前処理手法、ハイブリッド多重格子法等の研究開発へ発展させ、世界をリードした。以上の研究成果に基づき、観測・計算融合の階層連結地震・津波災害予測システムを構築し、将来の南海トラフ巨大地震の発生と地震・津波災害の予測を目的とした統合シミュレーションを実施した。

§ 2. 研究構想

(1) 当初の研究構想

本研究で開発する地震・津波災害予測システムは、プレート運動、地殻応力蓄積、地震破壊伝播、地震波動伝播、津波発生伝播、及び人工構造物振動の6つの要素モデルと地殻変動データ解析、地震活動データ解析、及び強震動データ解析の3つの基本プログラム、そしてそれらを連結するシミュレーション・プラットフォームから構成される(図 2-1)。全体システムを構成する要素モデル及び基本プログラムは、津波発生伝播モデルを除き、既にそのプロトタイプが開発されている。従って、本研究の第1フェーズ(平成17～19年度)では、先ず津波発生伝播モデルを新に開発すると共に、相互に関連する要素モデル及び基本プログラムを結合して3つのサブシステムを構築し、地震発生予測シミュレーション、強震動/津波予測シミュレーション、及び人工構造物振動予測シミュレーションを実施する。また、これと並行して、大規模連成シミュレーションのための階層連結プラットフォームを開発する。第2フェーズ(平成20～22年度)では、これらの3つのサブシステムを更に階層連結した全体システムを構築し、実シナリオに近い形での地震・津波災害予測シミュレーションを実施する。

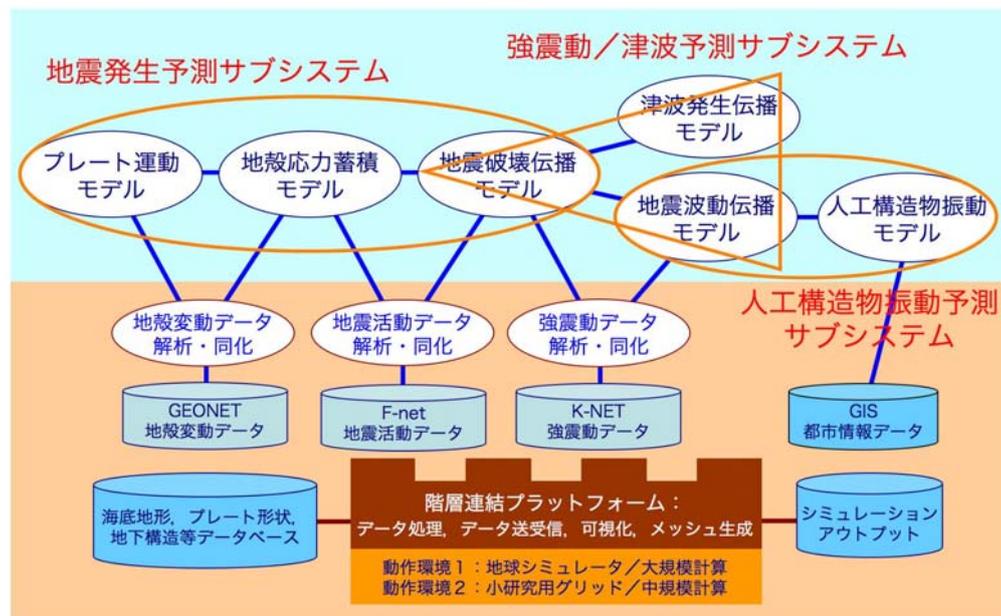


図 2-1. 観測・計算融合の階層連結地震・津波災害予測システムの構成

(2) 新たに追加・修正など変更した研究構想

- ・ 津波発生伝播に関しては、当初、線形長波近似モデルの開発を試みたが、より高精度なシミュレーションを目指し、三次元 Navier-Stokes 方程式の直接解法に切り替えた。
- ・ 地球シミュレータを想定した階層連結プラットフォームの開発は、計算科学技術の急速な発展を考慮し、ペタスケール次世代計算機を想定した大規模階層連結シミュレーションのための基盤ソフトウェア開発に方針変更した。
- ・ 地震発生予測、強震動/津波予測及び人工構造物振動予測のサブシステムの実効性を検証した後、実シナリオに近い形での地震・津波災害予測統合シミュレーションの対象領域を西南日本に定め、南海トラフ地震の発生予測とそれに伴う地震動及び津波災害の定量的評価を行うことにした。
- ・ 本プロジェクトの研究成果を世界に向けて発信するため、最終年度に国際ワークショップ(第7回 ACES 国際ワークショップ)を開催することにした。

§3 研究実施体制

(1)「松浦」グループ

① 研究参加者

氏名	所属	役職	参加時期
松浦 充宏	統計数理研究所	特任教授	H17.10 - H21.3 東京大学退職
濱野 洋三	東京大学理学系研究科	教授	H17.10 - H19.3 東京大学退職
中島 研吾	東京大学理学系研究科	特任准教授	H17.10 - H20.3 東京大学基盤情報センターへ
橋本 千尋	東京大学理学系研究科	特任助教	H17.10 - H21.3 名古屋大学環境学研究科へ
寺川 寿子	東京大学理学系研究科	PD研究員	H18.4 - H21.3 ボン大学(独)へ
小沢 慎三郎	国土地理院地理地殻活動研究センター	主任研究員	H17.10 - H21.3 東京大学との共同研究終了
水藤 尚	国土地理院地理地殻活動研究センター	研究員	H17.10 - H21.3 東京大学との共同研究終了
尾形 良彦	統計数理研究所	教授	H21.4 -
寺川 寿子	名古屋大学環境学研究科	助教	H21.4 -
Stephen A. Miller	ボン大学(ドイツ)	教授	H21.4 -
本間 美潮	統計数理研究所	技術補佐員	H21.10 -

② 研究項目

平成 17～20 年度:日本列島域を対象として、プレート運動に依る地殻応力の蓄積から破壊核の形成を経て大地震に至るまでの一連の過程を、観測データと理論モデルを融合した大規模シミュレーションにより再現・予測する。

平成 21～22 年度:観測データとモデル計算の融合に向けて、GPS 及び地震観測データの逆解析手法を開発し、日本列島域の地殻応力統合モニタリングシステムを構築する。

(2)「古村」グループ

① 研究参加者

氏名	所属	役職	参加時期
古村 孝志	東京大学情報学環/ 地震研究所(兼務)	教授	H17.10 -
本多 了	東京大学地震研究所	教授	H17.10 -
堀 宗朗	東京大学地震研究所	教授	H17.10 - H22.3 市村グループへ
齊藤 竜彦	東京大学情報学環	特任研究員	H18.4 - H21.3 防災科研へ
野口 科子	東京大学情報学環	特任研究員	H21.4 -
谷岡 勇市郎	北海道大学理学研究院	教授	H22.4 -

② 研究項目

大地震の断層から放射された地震波が不均質な地下を伝播して地表に強い揺れをもたらす過程と海底面の隆起/沈降が津波を引き起こす過程を、「地震波動伝播」と「津波発生伝播」の2つのシミュレーションの連成解析により、正確に再現・予測する。

(3)「奥田」グループ

① 研究参加者

氏名	所属	役職	参加時期
奥田 洋司	東京大学人工物工学研究センター	教授	H17.10 -
鈴木 正昭	東京大学人工物工学研究センター	特任助教(寄付研究部門)	H20.04 - H22.3 東京大学退職
篠原 主勲	東京大学インテリジェント・モデリング・ラボラトリー	研究機関研究員	H20.4 - H21.3 神奈川科学技術アカデミーへ
Serban Georgescu	東京大学大学院工学系研究科システム量子工学専攻	D3	H20.4 - H21.9 ETH Zurich へ
佐藤 陽平	東京大学大学院工学系研究科システム量子工学専攻	D3	H20.4 - H22.3 博士課程修了
渡邊 起	東京大学大学院工学系研究科システム創成学専攻	M2	H21.4 -
林 雅江	東京大学人工物工学研究センター	特任研究員	H22.4 -

② 研究項目

観測データとモデル計算を融合した大規模連成計算を地球シミュレータ上で効率良く実施し、プログラム間のデータ交換、大規模データ可視化処理を行うための階層連結プラットフォームを構築する。

(4)「市村」グループ

① 研究参加者

氏名	所属	役職	参加時期
市村 強	東京大学地震研究所	准教授	H17.10 - H21.10 東工大から異動
堀 宗朗	東京大学地震研究所	教授	H22.4 - 古村グループから

② 研究項目

強震動に人工構造物が応答して地震動災害が起きる最終局面を、地震波動伝播と構造物応答の動的相互作用を考慮した連成シミュレーションにより再現・予測する。

(5)「長嶋」グループ

① 研究参加者

氏名	所属	役職	参加時期
長嶋 利夫	上智大学理工学部	教授	H17.10 -
末益 博志	上智大学理工学部	教授	H17.10 -
曾我部 潔	上智大学理工学部	教授	H17.10 -
岡内 聡史	上智大学理工学研究科	M2	H21.4 - H22.3
佃 建成	上智大学理工学研究科	M2	H21.4 -

② 研究項目

配管構造や石油貯蔵タンクなど湾岸地帯に設置されているプラント機器構造物に地震波が入力した場合の動的応答を高精度かつ高速にシミュレーションする計算コード開発を行う。

(6)「福山」グループ

① 研究参加者

氏名	所属	役職	参加時期
福山 英一	防災科学技術研究所・地震研究部	総括主任研究員	H17.10 -
山下 太	防災科学技術研究所・地震研究部	主任研究員	H17.10 -
青井 真	防災科学技術研究所・地震研究部	主任研究員	H17.10 -
安藤 亮輔	防災科学技術研究所・地震研究部	契約研究員(研究員型)	H.19.4 - H20.3 産業技術総合研究所へ
Hok Sebastien	防災科学技術研究所・地震研究部	契約研究員(研究員型)	H20.10 -
齋藤 竜彦	防災科学技術研究所・地震研究部	任期付き研究員	H21.4 - 東大地震研から

② 研究項目

境界積分方程式法による動的破壊シミュレーションコードと差分法による地震波動伝播コードを開発し、地震発生の物理過程を考慮した定量的な地震動シミュレーションを行う。

(7)「中島」グループ

① 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	H20.4 - 東大理学系研究科から

② 研究項目

「次世代スーパーコンピュータ」等のペタフロップス級超大規模並列計算機に於いて本システムの稼働を円滑に実現するためのミドルウェアの研究開発を実施する。

(8)「橋本」グループ

① 研究参加者

氏名	所属	役職	参加時期
橋本 千尋	名古屋大学環境学研究科	准教授	H21.4 - 東大理学系研究科から
鷺谷 威	名古屋大学環境学研究科	教授	H21.4 -
清水 裕貴	名古屋大学環境学研究科	M1	H22.4 -
野村 有紀	名古屋大学環境学研究科	M1	H22.4 -

② 研究項目

日本列島域を対象に、プレート運動に依る地殻応力の蓄積から大地震に至までの一連の過程のシミュレーションを実施する。

§ 4 研究実施内容及び成果

4.1 地震発生予測サブシステム(松浦・福山・橋本グループ)

(1)研究実施内容及び成果

松浦・福山・橋本グループは、プレート運動、応力蓄積、破壊伝播、及び地震波動伝播の4つの要素モデルを結合することで、プレート境界での準静的応力蓄積-動的破壊伝播-地震波動伝播の連成シミュレーション・システムを構築した。また、広域地震観測網やGPS観測網からの膨大なデータからプレート境界の固着-すべり状態や地殻の応力パターン及び弾性/非弾性歪み速度を推定する逆解析手法を開発した。更に、観測と計算を融合した大規模シミュレーションにより、日本列島域のプレート境界地震の発生予測が定量的

に可能であることを示した。これらは世界に先駆けた研究成果であり、その科学的・技術的インパクトは非常に大きい。

① 地震発生サイクルのモデリング

地震は応力解放過程である。しかし、地震の発生を予測するには、応力の解放だけでなく、その蓄積も含めた全過程を理解する必要がある。プレート境界地震の発生サイクルは、プレート間の力学的相互作用に起因する震源域での準静的な応力の蓄積、急激な応力解放を伴う動的破壊の伝播とそれに伴う地震波の放射、そして地震後のアセノスフェアの応力緩和による地殻応力の再配分と断層の固着に伴う強度回復の諸過程から成る。こうした地震発生全過程を支配する基礎方程式は、図 4.1-1 に示すように、断層すべりに伴う応力の変化を記述する「すべり応答関数」とすべりと固着時間に依存する断層強度の変化を記述する「断層構成則」を応力が断層強度に達したら構成則に従ってすべりが進行するという「境界条件」で結びつけた非線形システムとして表現される。「すべり応答関数」は連続体の運動方程式（準静的な場合は平衡方程式）の解であり、「断層構成則」は破壊の進展に伴うシステム全体のエネルギー収支を断層すべり（或はすべり速度）と剪断応力の巨視的關係として記述した方程式である。このシステムはプレート相対運動によって駆動される。

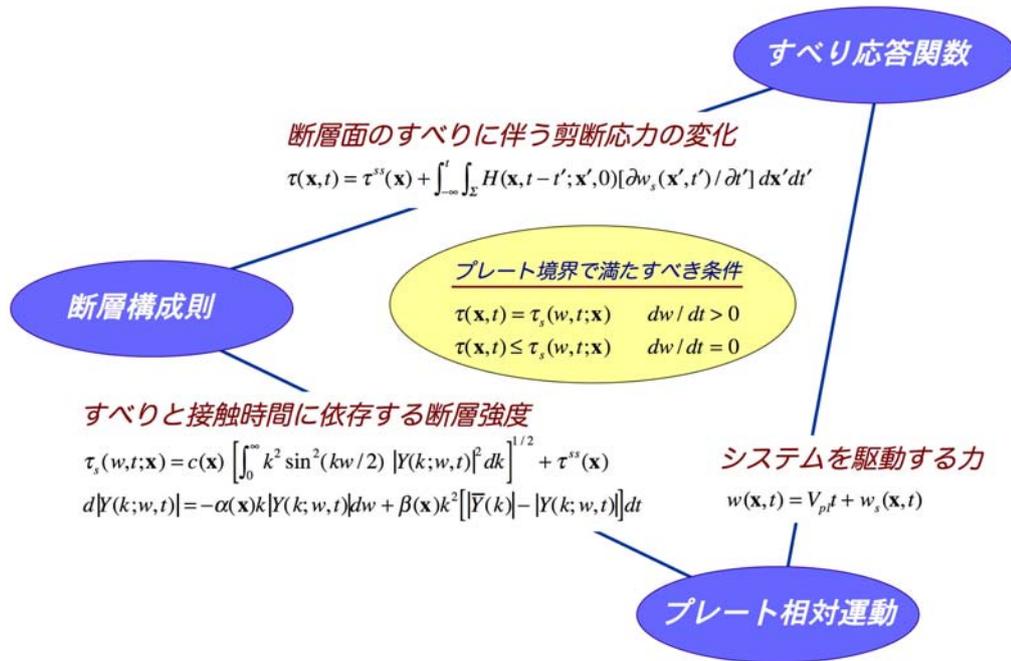


図 4.1-1. プレート境界での地震発生サイクルを支配する基礎方程式。

上で述べたように、地震発生サイクルを支配する基礎方程式は、概念的には非常に単純である。しかし、この基礎方程式に基づいて予測のためのシミュレーションモデルを構築するのは容易ではない。それは、現実の地球が大変複雑な構造をしているからである。実際、プレート境界面は三次元的に複雑に屈曲しているし、弾性的な地殻の下には百年の時間スケールでも流動的に振る舞う領域（アセノスフェア）が広がっている。従って、地震間の応力蓄積や地震後の応力再配分を扱う際には、アセノスフェアの粘弾性を考慮した準静的すべり応答関数を用いる必要がある。一方、動的な破壊伝播を扱う際には、アセノスフェアの粘性緩和の効果は無視できるがプレート境界面の屈曲は無視できないので、断層面の屈曲を考慮した弾性体の動的すべり応答関数を用いる必要がある。また、地震発

生間隔の規模依存性を説明するためには、すべりによる強度低下と固着による強度回復がスケールに依存した断層構成則を用いる必要がある。

② 日本列島域の三次元プレート境界モデルとプレート相対運動

日本列島域を1つのシステムとしてモデル化するには、その基盤となる構造モデルが必要である。そこで、我々の研究グループは、海底地形や地震の震源分布に基づいて、図 4.1-2 に示す日本列島域の三次元プレート境界モデル(CAMP Standard Model)を構築した。このモデルでは、約 30,000 個の双三次 B スプライン関数の重ね合わせにより、長期のシミュレーションでも計算不安定が生じない滑らかなプレート境界面が実現されている。

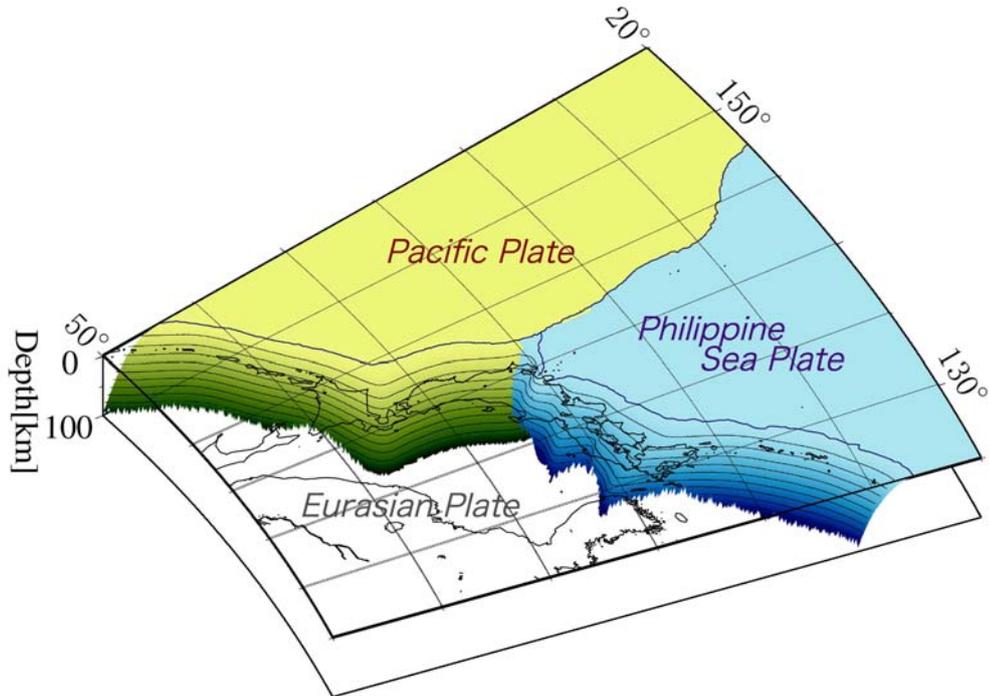


図 4.1-2. 日本列島域の三次元プレート境界モデル [Hashimoto, Fukui & Matsu'ura, PAGEOPH, 2004]。プレート境界面の形状は約 30,000 個の双三次 B スプライン関数の重ね合わせで表現されている。

プレート沈み込み帯では、サン・アンドレアス断層のような横ずれプレート境界とは異なり、プレート境界面がどこも固着していなくても、定常的な地殻の変形や応力蓄積が進行する。実際、図 4.1-2 のプレート境界面にグローバルプレート運動モデル NUVEL1-A に基づく相対すべり速度ベクトル(図 4.1-3 左パネル)を与えると、海洋プレートの定常沈み込みによる日本列島域の地殻変形運動が、右パネルのように計算される。

現実のプレート境界面は、強く固着している部分があれば、ゆっくりとすべっている部分もある。強く固着している部分(アスペリティー)では、すべり遅れに伴う応力蓄積が徐々に進行するが、やがて限界に達すると急激な応力解放を伴う断層運動(地震)が発生し、それまでのすべり遅れを解消する。従って、過去に発生した地震を詳細に解析すれば、プレート境界面の何処にどのようなアスペリティーが存在しているか直接知ることができる。また最近では、地震時の記録が無くても、地震間のアスペリティーのすべり遅れが引き起こす微かな地殻変動を GPS 観測網で捉えてインバージョン解析することにより、プレート境界面の現在の固着-すべり状態を推定できるようになった。こうして推定したプレート境界面の特性の違いを、断層構成則を規定するパラメータの違いとして表現し、駆動力としてのプレート相対運動を与えてやれば、地震発生サイクルのシミュレーションが可能となる。

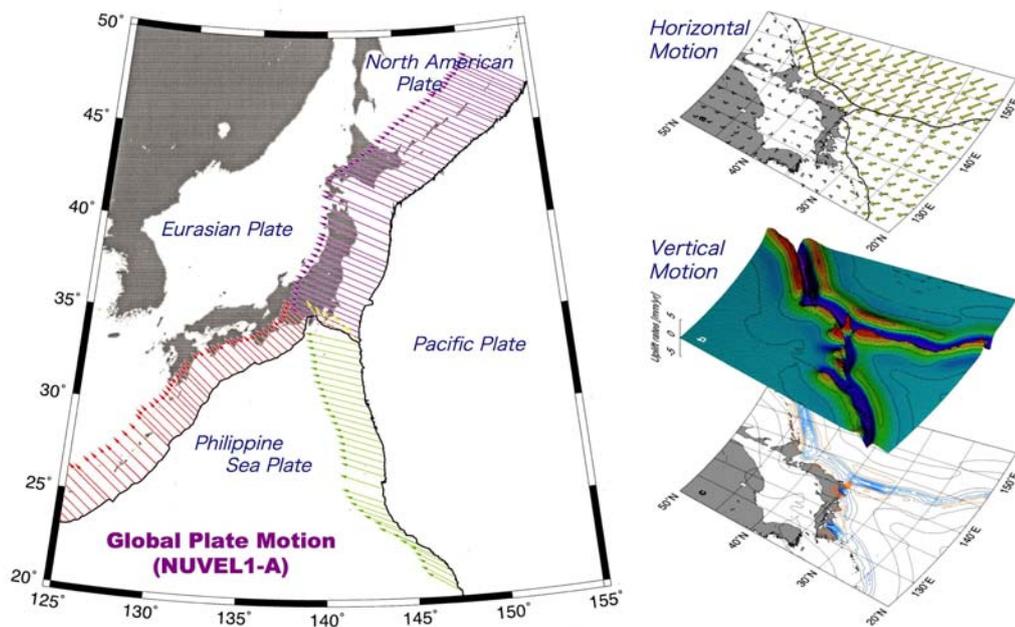


図 4.1-3. 日本列島域のプレート収束運動とそれが引き起こす定常的地殻変形運動 [Hashimoto, Fukui & Matsu'ura, PAGEOPH, 2004]。左:グローバルプレート運動モデル NUVEL1-A から計算した4つのプレート境界での相対運動ベクトル。右:海洋プレートの定常沈み込みによる日本列島域の水平ブロック運動(上)と隆起・沈降運動(中及び下)。この計算では、フィリピン海プレートが伊豆半島の付け根で本州に衝突しているとしている。

③ 千島-日本海溝沿いプレート境界地震の発生シミュレーション

北海道・東北地域では、太平洋プレートが千島-日本海溝に沿って北米プレートの下に沈み込んでいる。我々の研究グループは、直接的先験情報(プレート相対運動)及び間接的先験情報(すべり分布の滑らかさ)を観測データと結合した統合逆化公式に基づく測地データ解析手法 [12] を開発し、それを北海道・東北地域の GPS 水平速度データ(1996-2000)に適用することで、北米-太平洋プレート境界面の詳細なすべり遅れ速度分布を推定することに成功した [49]。この解析では、ブロック回転による系統誤差を除去するため、図 4.1-4 左パネルに示した GPS 水平速度そのものではなく、GPS 観測点を作るドローネー最適三角網の辺長変化をデータとしている。図 4.1-4 右パネルに示した解析結果は、千島-日本海溝に沿って分布する5つの顕著なすべり遅れ領域が 20 世紀の 100 年間に発生したマグニチュード 7.5 以上のプレート境界地震の震源域とほぼ完全に一致することを示している。

図 4.1-4 右パネルの襟裳岬沖の顕著なすべり遅れ領域は、1952 年の十勝沖地震 (M8.0) の震源域に対応している。この領域では、約 50 年後の 2003 年に、同じ規模の地震が発生した。そこで、襟裳岬沖の領域の摩擦特性を GPS データから推定したすべり遅れ速度分布に基づいて設定し、2003 年十勝沖地震 (M8.0) の準静的応力蓄積-動的破壊-地震波動伝播の連成シミュレーションを行った [50]。図 4.1-5 の左パネルに 2003 年十勝沖地震の震源域と観測点の配置、中央パネルに動的破壊の伝播、右パネルに観測点での地震波形を示す。理論的に計算された最大地動速度と観測された最大地動速度の良好な一致は、現実的なプレート境界面形状、摩擦特性、地殻構造を設定すれば、将来のプレート境界地震による地震動の定量的な予測が充分可能であることを示している。

図 4.1-4 の三陸沖の顕著なすべり遅れ領域は、1968 年の十勝沖地震 (M7.9) の震源域に対応している。この地震は、波形データの解析から、大小2つのアスペリティーが連動して破壊したと理解されている。そこで、三陸沖の領域に大小2つのアスペリティーを設定

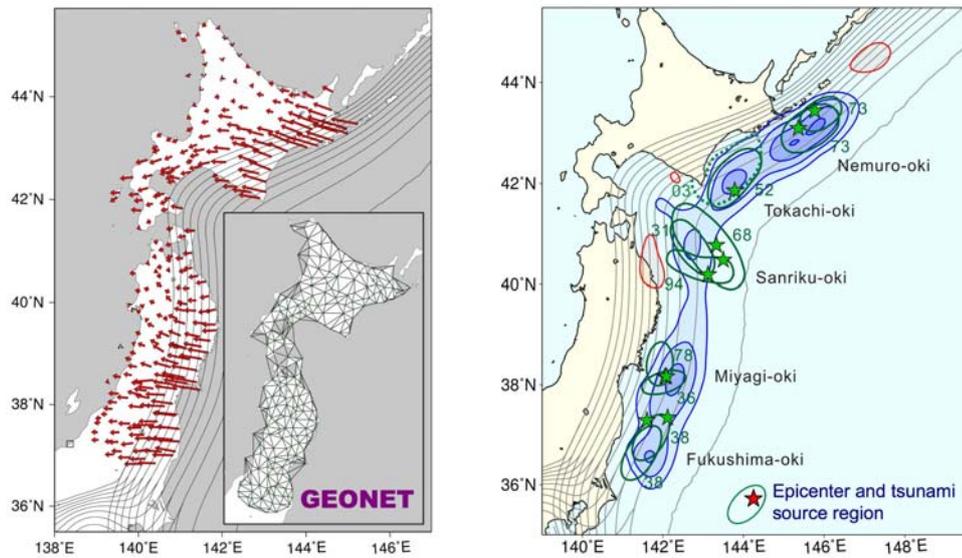


図 4.1-4. GPS データのインバージョン解析で推定した北米-太平洋プレート境界のすべり遅れ速度分布 [49]。左: GPS 水平速度ベクトル(1996-2000)。差込図はドロネー三角形分割による最適 GPS 観測点網。右: すべり遅れ速度分布 (3 cm/yr 間隔) と 20 世紀の 100 年間にプレート境界で発生した大地震 ($M > 7.5$) の津波波源域。

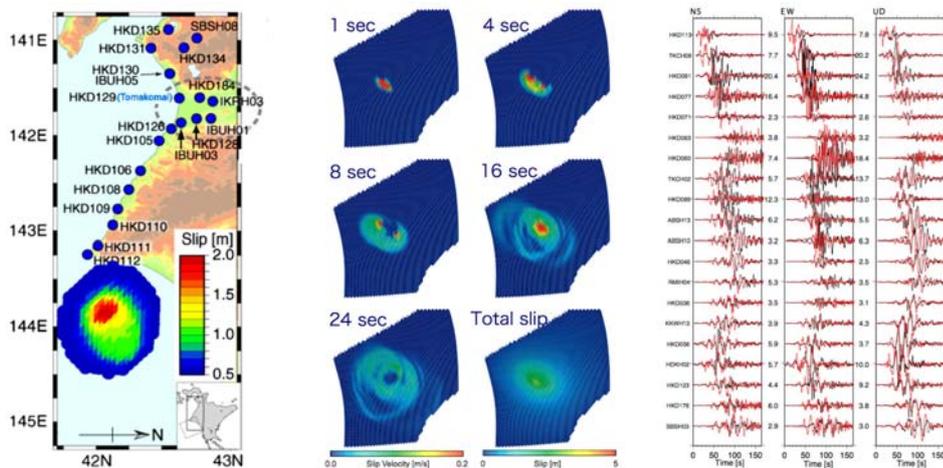


図 4.1-5. 2003 年十勝沖地震の準静的応力蓄積-動的破壊-地震波動伝播の連成シミュレーション [50]。左: 地震時のすべり分布と観測点配置。中央: 動的破壊伝播(すべり速度の時空間変化で表示)と地震波の放射。右: 観測点における計算波形(赤)と観測波形(黒)の比較。

し、1968 年十勝沖地震の準静的応力蓄積-動的破壊伝播の連成シミュレーションを行った。図 4.1-6 の左パネルには、太平洋プレートの沈み込みによる震源域での応力蓄積過程が 30 年毎のスナップショットで示されている。このシミュレーション(簡単のため過去の地震による影響を無視している)では、1968 年の地震から 120 年後に小さい方のアスペリティーの応力状態が臨界レベルに達する。中央パネルには、その後の動的破壊伝播が 6 秒毎のスナップショットで示されている。小さい方のアスペリティーで開始した動的破壊は大きい方のアスペリティーへと拡大し、120 年かけて蓄積した応力を 40 秒程度でほぼ完全に解放してしまう。試みに、応力が未だ十分に蓄積していない 60 年後の時点で強制的に動的

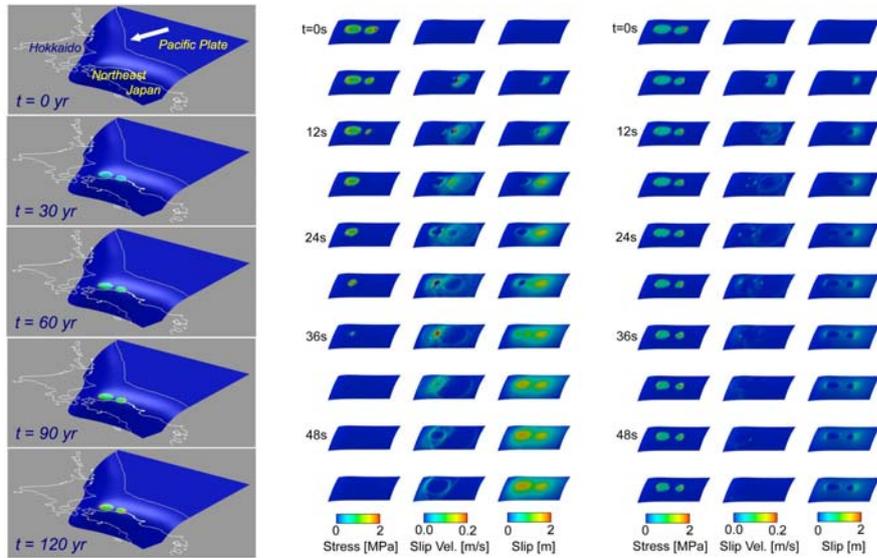


図 4.1-6. 1968 年十勝沖地震の準静的応力蓄積—動的破壊伝播の連成シミュレーション [Hashimoto, Fukuyama & Matsu'ura, GJI, 2011]。左: 太平洋プレートの沈み込みによる震源域での準静的な応力蓄積過程。南側の小アスペリティーの応力は時刻 $t=120$ yr で臨界レベルに達する。中央: 応力が臨界レベルに達した後 ($t=120$ yr) の動的破壊伝播。右: 応力が臨界レベルに達する前 ($t=60$ yr) の動的破壊伝播。

破壊を起こしてやると、右パネルに示すように、開始した動的破壊は加速されることなく直ぐに停止してしまう。つまり、震源域の応力状態が臨界レベルに充分近ければ、自然界の何らかの擾乱でトリガーされた動的破壊は急速に加速され、大地震に発展する。しかし、震源域の応力状態が臨界レベルから程遠ければ、何らかの擾乱で動的破壊がトリガーされたとしても、それは殆ど加速されることなく直ぐに停止してしまい、大地震に発展することはない。従って、大地震の発生を予測するためには、震源域の応力状態をリアルタイムでモニターする必要がある。

④ 南海トラフ地震の発生予測シミュレーション

フィリピン海プレートが南海トラフに沿ってユーラシアプレートの下に斜めに沈み込む西南日本は、これまで見てきた東北日本とは異なった様相を呈する。前述の統合逆化公式に基づく測地データ解析手法を図 4.1-7 の西南日本の GPS 水平速度データに適用して得られた、ユーラシア—フィリピン海プレート境界のすべり遅れ分布を図 4.1-8 に示す。この解析に於いても、ブロック回転による系統誤差を除去するため、GPS 水平速度そのものではなく、GPS 観測点を作る最適三角網の辺長変化をデータとしている。図 4.1-8 の解析結果は、顕著なすべり遅れ領域が駿河湾から豊後水道にかけて帯状に分布すること、日向灘以南にはすべり遅れ領域が存在しないことを示している。これは、千島—日本海溝に沿って分布する顕著なすべり遅れ領域が離散的であるのと対照的である。すべり遅れ領域が離散的に分布する場合は、それぞれに対応するアスペリティーの破壊は孤立的であり、連動する可能性は低い。一方、西南日本のように顕著なすべり遅れ領域が連続的に分布する場合は、すべり遅れに伴う応力も連続的に分布するので、隣接するアスペリティーの破壊が連動する可能性は高い。実際、南海トラフ沿いのプレート境界地震の発生は、2年の間が空いた昭和の東南海—南海地震を例外として、1854 年の安政地震や 1707 年の宝永地震など、殆どの場合、隣接するアスペリティーの破壊が連動すると考えられる。

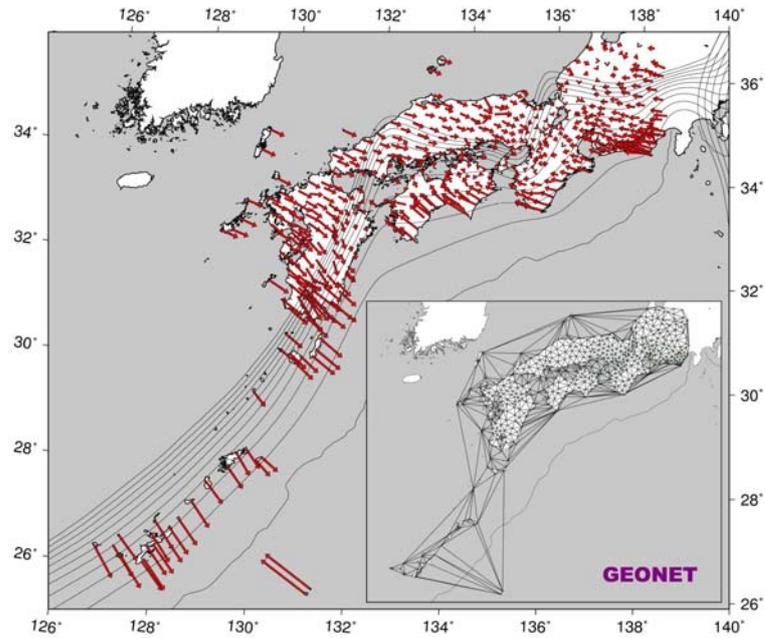


図 4.1-7. 西南日本における地震間(1996-2000)の GPS 水平速度データ [橋本・鷺谷・松浦, 日本地震学会 2009 年秋季大会]。差込図はドロネー三角形分割による観測点網。

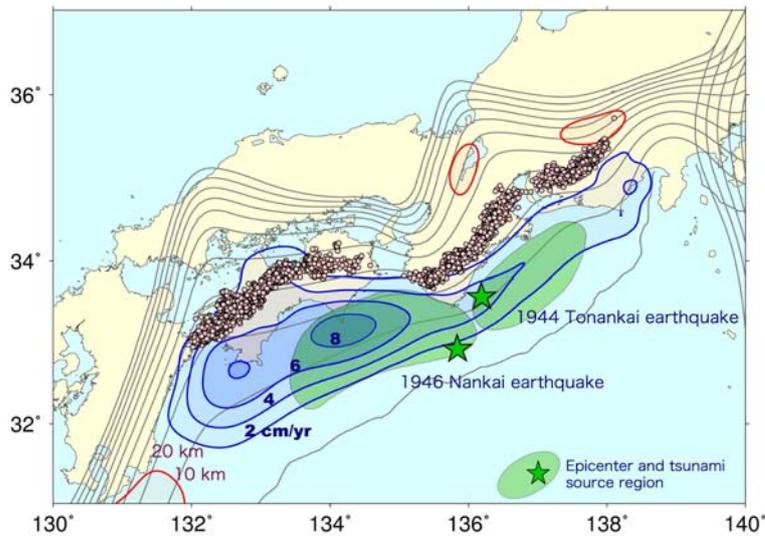


図 4.1-8. GPS データのインバージョン解析で推定したユーラシア-フィリピン海プレート境界のすべり遅れ速度分布と 1944 年東南海及び 1946 年南海地震の津波波源域 [橋本・鷺谷・松浦, 日本地震学会 2009 年秋季大会]。グレーのコンターはプレート境界面の等深度線を, オレンジの小さな丸は深部低周波微動の震源を示す。

図 4.1-8 に示したプレート境界のすべり遅れ速度分布に基づいて震源域の応力分布を計算し, 境界積分方程式法による仮想南海トラフ地震の動的破壊伝播シミュレーションを試行したところ, 図 4.1-9 のような結果を得た。このシミュレーションでは, 震源域で一様な断層摩擦特性を仮定しているため, 室戸岬沖で開始した動的破壊は豊後水道付近まで高速で伝播する。図 4.1-8 に緑色で印した津波の波源域は, 1946 年の南海地震(M8.0)の高速破壊が足摺岬よりかなり手前で停止したことを示している。1854 年の安政地震の高速破壊も, 豊後水道までは達しなかったようである。動的破壊の伝播は, 一般に, 震源域

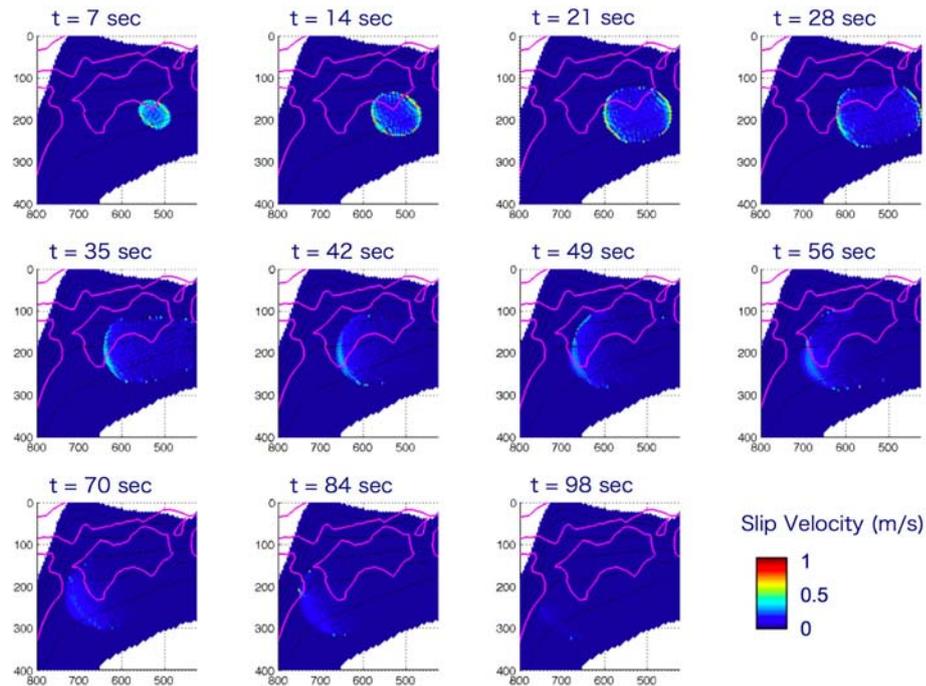


図 4.1-9. 仮想南海トラフ地震の動的破壊伝播シミュレーション [Hok・福山・橋本, 日本地震学会 2009 年秋季大会]。断層すべり速度の時空間変化をスナップショットで表示。

の応力分布(すべり遅れによる応力とバックグラウンドの応力の和)と強度分布に依存する。従って、仮想南海トラフ地震の動的破壊がどこで開始してどこまで高速で伝播するか予測するには、プレートの定常沈み込みに起因するバックグラウンドの応力分布とプレート境界面の強度分布を特定する必要がある。

我々の研究グループは、最近、地震の CMT データから地殻応力場を推定するインバージョン解析手法を開発した [29]。この CMT データインバージョン解析手法を防災科学技術研究所の 12,500 の地震モーメントテンソルデータ (NIED, Seismic Moment Tensor Catalogue) に適用し、太平洋プレートとフィリピン海プレートが沈み込む日本列島全域の地殻応力の詳細な三次元パターンを得た [72]。その西南日本についての結果を図 4.1-10 に示す。興味深いのは、四国の西端部(足摺岬から豊後水道にかけての地域)のバックグラウンド応力場のパターンが東西伸張となっている点である。これは、四国西端部のプレート境界面の強度が低いことを示唆している。もしそうだとすると、すべり遅れが作る応力は、非地震性すべりによって間欠的に解放され、長期間に亘って蓄積されることはないので、南海トラフ地震の高速破壊が足摺岬を超えて更に西へ伝播することはないかもしれない。いずれにしても、CMT データインバージョンの結果は、現実の地殻応力場のパターンを表しているので、プレート境界の絶対強度分布を推定する際の重要な情報を与えてくれる。

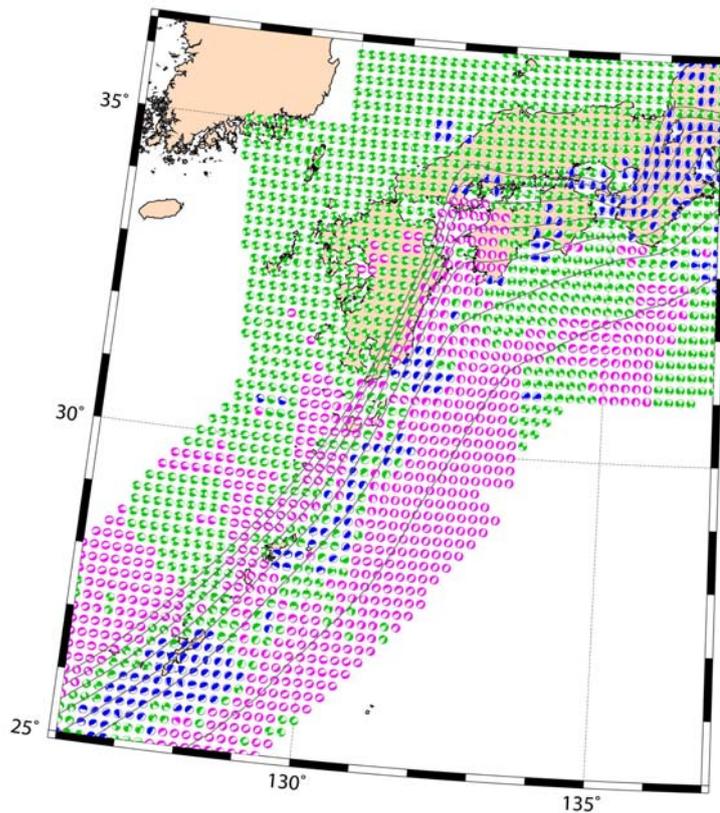


図 4.1-10. 地震の CMT データから推定した西南日本の深さ 10 km の地殻応力パターン [72]。震源球の青、緑、桃色は、それぞれ、逆断層、横ずれ断層、正断層型の地震を引き起こす応力パターンに対応している。

(2)研究成果の今後期待される効果

松浦・福山・橋本グループの研究は、日本列島域のプレート境界地震発生の定量予測が、地震観測網や GPS 観測網からの膨大なデータと高度な理論モデル計算を融合した大規模シミュレーションにより、充分可能であることを示した。このことは、我が国の今後の地震予知研究の進め方に大きな指針を与える。一方、内陸地震の発生に関しては地殻応力の蓄積過程そのものが謎であったが、本研究で、日本列島全域の地殻応力パターン [72] が解明されると共に、GPS データから地殻歪みを弾性部分と非弾性部分に分けて推定する物理的歪み解析手法 [71] が確立され、ようやく観測と計算を融合した内陸地震発生のシミュレーションが可能になりつつある。

4. 2 強震動／津波予測サブシステム(古村グループ)

(1)研究実施内容及び成果

古村グループは、新たに開発した Navier-Stokes 方程式の直接解法による津波シミュレーションコードを地震動シミュレーションコードと結合して地震—津波連成シミュレーション・システムを構築し、海溝型巨大地震による強い揺れと地殻変動そして津波の発生伝播の高精度同時評価を世界に先駆けて実現した。また、本コードを地球シミュレータや T2K オープンスパコン(東京大学)に実装し、1944 年東南海地震や 2004 年紀伊半島南東沖地震のシミュレーションを通じて、海底津波計記録や強震計記録との比較からモデルの有効性を確認した。これらの研究は世界的にも高く評価され、その科学的・技術的インパクトは非常に大きい。

① 大規模シミュレーションのための FDM 並列計算コードの開発および高度化

大規模なモデルを用いて地震波動伝播および津波のシミュレーションを行うには、地球シミュレータ(JAMSTEC)、次世代スパコン「京」(理化学研究所、開発中)、T2K オープンスパコン(東京大学)のような大規模なスーパーコンピュータを用いる必要がある。こうした場合には、計算を効率的に行うため、用いるスーパーコンピュータの CPU 内部構造やメモリアクセス性能、ネットワーク特性を考慮した並列計算コードを開発する必要がある。

本研究では、地震波計算コード(Seism3D3)と津波計算コード(SOLA3D)の高速化チューニングをベクトル計算機(地球シミュレータ;ES)とスカラー計算機(T2K スパコン-東大)を用いて実施し、それぞれのコンピュータへの適合性をはかり、例えば Flat MPI による並列計算の Strong Scaling テストにおいて、地震波コードでは最大 10,000CPU 程度まで、また津波コードでは 2,000CPU 程度までの並列計算でスケーラビリティを確認した。このときの地震波計算コードの実効性能(CPU の理論性能に対する割合)は、ES で 60%, T2K で 8%, また津波計算コードに関しては ES で 20%, T2K で 4%であった[66]。

地球シミュレータは 2009 年 4 月にリプレイスされた(ES2)が、それ以前に比べ CPU-メモリ間のデータ転送速度が低下している他、これを補うために、ベクトル型計算機としては初のキャッシュメモリ(ADB)が新たに装備されている。こういった特徴はスカラー型計算機の次世代機(次世代スパコン「京」)でも同様であるため、ES2 に向けたコードチューニングを行うことで、次世代機のためのコードチューニングの指針も得ることができる。具体的には、ES 向けに開発した Seism3D3 や SOLA3D コードの計算順序を変更して、CPU へのデータロード回数の節約や、ADB にロードされたデータの再利用などの修正を加え、ES2 上での Seism3D3 の実行性能を 22.7%から 31.1%にまで高めることに成功した。こうした CPU チューニング並行して MPI 通信の効率化を高めるために、通信前後に必要なバッファリング操作を MPI に予め装備されている機能を使う代わりに、自ら明示的に記述し、さらにバッファサイズを大きくして通信効率を高めるなどのコード修正も進め、並列化率を 99.947%から 99.995%に高めることができた。こうして、10,000 CPU 以上を用いた大規模な地震、津波並列シミュレーションの実現の目処を得た(図 4.2-1)[古村孝志, スーパーコンピューティングニュース, 東大情報基盤センター, 2009]。

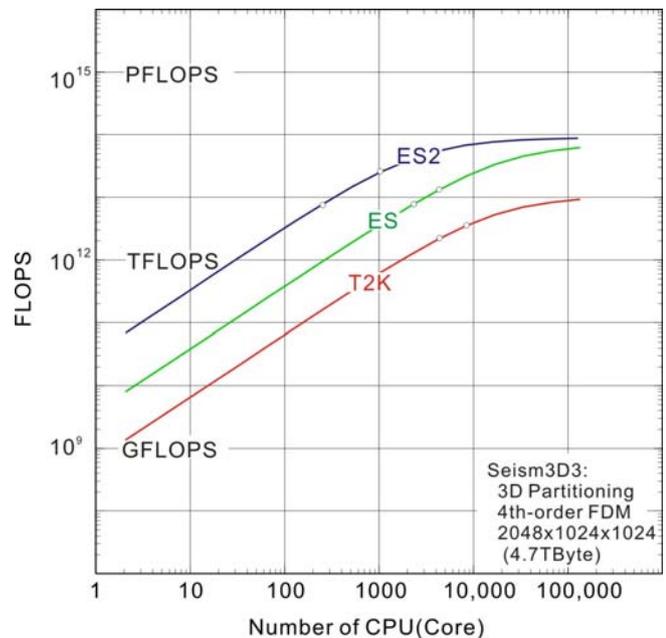


図 4.2-1. 地震動シミュレーション(Seism3D3)の並列計算性能。地球シミュレータ(ES, ES2)および T2K の比較。白丸の実測値をもとに、並列計算性能を予測して外挿。

② 地震—津波連成シミュレーションコードの開発

大地震が海域で起きると、震源断層から放射された地震動は、不均質な地下を伝播して陸上に大きな揺れをもたらす。一方、断層の変形により震源断層直上の海底面の隆起／沈降を引き起こし、津波を発生させる。そして津波は重力を復元力として海洋を伝播し沿岸地域に被害をもたらす。地震によってもたらされる津波は、地震の断層運動のメカニズムや津波伝播経路の水深(海底地形)によって大きく変動する。こうした津波と地震動を正確に再現・予測するために、地震波動伝播と津波発生伝播を連結して一度に評価する「地震—津波連成シミュレーション」コードを開発した[57]。連成シミュレーションでは、まず、複雑な地下構造下で発生した大地震が作り出す海底地殻変動の動的変化を地震動コードで評価し、次に、本計算結果を用いて津波コードにより海面変動(初期津波)の生成と複雑な海底地形を伝播する津波を評価するものである。2つの計算の連成は、海底面における速度場の境界条件を結合することにより実現する。地震—津波連成シミュレーションの有効性を確認するために、まず平坦な海底面を仮定して得られる津波波形の理論解との比較を行い、手法の検証・改良を行った。その上で、過去の被害地震や想定地震についての強震動・津波評価を進めた(図 4.2-2)。

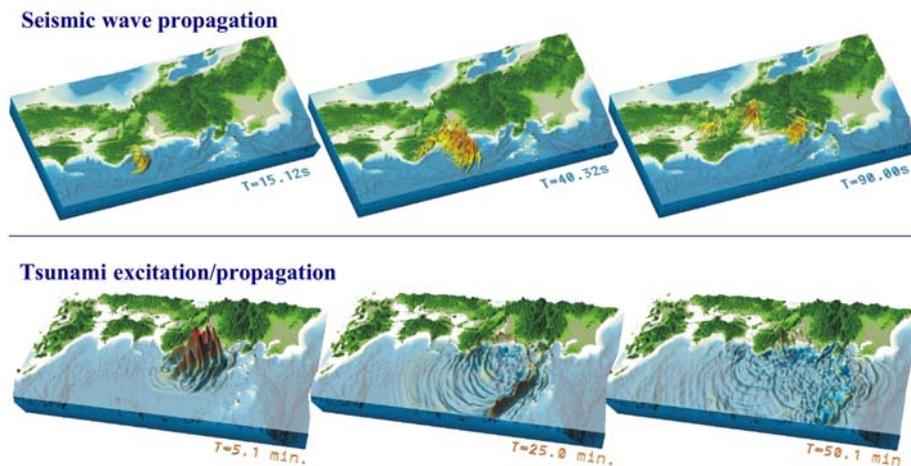


図 4.2-2. 1944 年東南海地震 (Mw8.1) の地震発生—津波生成・伝播シミュレーション。上段:地震波動伝播。地震発生後 15 秒, 40 秒, 90 秒のスナップショット。下段:津波生成伝播。地震発生後 5.1 分, 25.0 分, 50.1 分のスナップショット。

2006 年 11 月および 2007 年 1 月に千島列島沖で M8 クラスの巨大地震が相次いで発生し、北海道から東北沿岸に微弱な津波が観測されたことから、まずこれらの地震について、地震—津波の連成シミュレーションを先行して行った。十勝沖のケーブル津波計や宮城県沖の津波計記録との比較から、従来の均一(半無限)媒質を仮定した海底地殻変動と初期津波の評価や、線形長波近似を用いた津波伝播計算の限界が示された。そして、水深が数千メートルを超える深海で発生したプレート内地震(アウターライズの地震)では、多くのプレート境界型の地震に比べて相対的に断層面積が小さく津波の生成効率が低いこと、また津波の分散性が大きいことから、従来の地殻変動計算や津波計算の限界が明らかになった[56]。そこで、更に計画を進め、三次元ナビエ—ストークス方程式に基づく高精度の津波計算コードの開発を地震津波予測の実用計算に先行して行った[54]。

こうして開発した三次元津波シミュレーション法を用いて、2004 年紀伊半島南東沖の地震について地震—津波連成シミュレーションを行い、海底ケーブル津波計による津波の観測記録とシミュレーション結果を比較することによって、新しい津波シミュレーション方法の有効性を確認した。連成シミュレーションでの津波計算には、三次元ナビエ—ストークス方程式の差分法による直接解法を導入した。これによる結果と従来の線形長波近似式による計算および観測記録との比較から、深海を伝わる津波に現れる分散波形が津波の波高

と継続時間を正しく見積もるために重要であることを示し、津波計算の高度化にはナビエーストックス式に基づく評価が不可欠であることを明らかにした(図 4.2-3) [75]。新しい津波コードでは、地震に伴う海底地殻変動の動的変動による海面上昇(津波発生)や、複雑な海底地形での津波伝播とその非線形効果(分散, 散逸)などを正確に評価できることが確認できた。そして、研究当初は想定していなかった、大津波を引き起こす地震や非津波性地震のメカニズム解明と発生予測を含めたモデルへと発展した。また、シミュレーション結果から、津波の分散波にみられる特徴が、スラブ内地震の震源断層の走向や傾斜に強く依存することも示された。このことにより、これまでの地震観測波形を用いた震源モデル推定結果に対して、さらに津波の観測波形の特徴を用いることにより震源モデルを検証し、さらにモデルを精緻化できることが明らかになった。

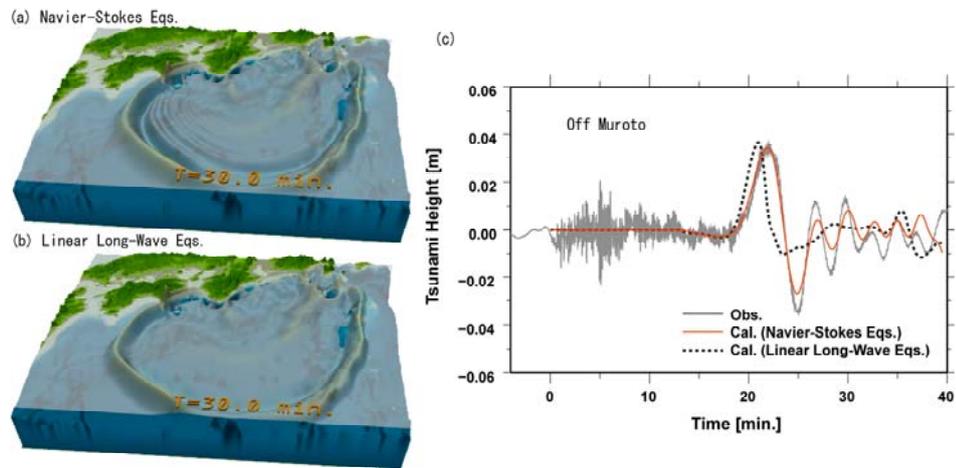


図 4.2-3. 2004 年紀伊半島南東沖の地震による津波発生伝播シミュレーション[75]。左: 地震発生 30 分後のスナップショット。(a) ナビエーストックス式による計算, (b) 線形長波近似式による計算。右: 室戸沖で観測された津波波形(灰色)と計算波形(赤:ナビエーストックス式, 黒:線形長波近似式)の比較。

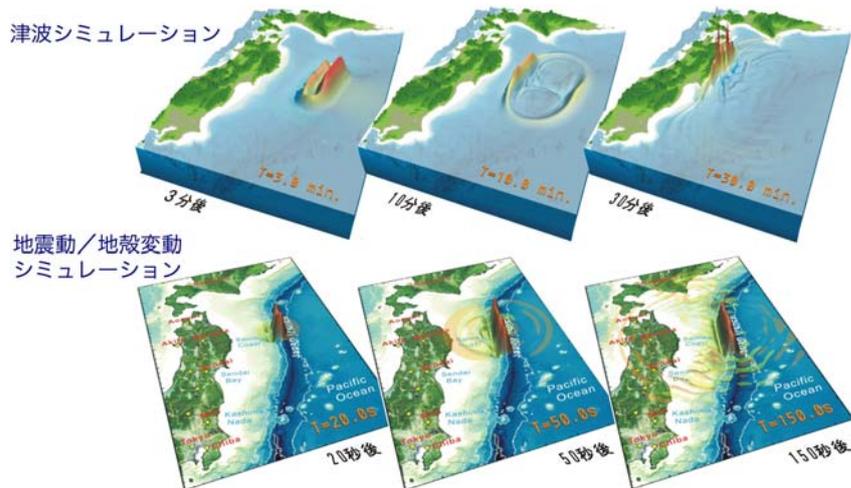


図 4.2-4. 海底堆積層を考慮したモデルによる 1896 年明治三陸地震の地震一津波連成シミュレーション[古村孝志, スーパーコンピューティングニュース, 東大情報基盤センター, 2009]。下段:地震発生から 20 秒, 50 秒, 150 秒後の地震波伝播と海底地殻変動。上段: 地震発生から 3 分, 10 分, 30 分後の津波伝播。

さらに、1896 年明治三陸津波地震の地震動および津波について大規模シミュレーションを行った(図 4.2-4)。シミュレーションの結果から、日本海溝に厚くたまった堆積物(付加体)が海底の地殻変動に大きく影響し、大津波と長周期地震動を発生させるという、津波地震の発生メカニズムが明らかになった。

また、2008 年中国四川大地震(M7.9)の発生を受け、これまでに開発した地震波動伝播シミュレーションコードを活用して長周期地震動の発生と伝播メカニズムを検討した。この地震の際には、震源から 1500km 離れた北京、上海、台北で長周期地震動が発生し、超高層ビルが大きく揺れて避難騒ぎが起きた。全地球地殻モデル(CRUST2.0)と世界標準標高モデル(GTOPO30)を用いた三次元シミュレーション結果から、北京では卓越周期 10~20 秒で最大地動振幅 5 cm、振幅 1 cm 以上の揺れが 10~20 分以上長く続いたことを明らかにした。また、長周期地震動の生成には、地震規模(M 7.9)に加え、長周期の表面波を伝えやすい上述の大陸地殻構造が原因していることが分かった(図 4.2-5)。

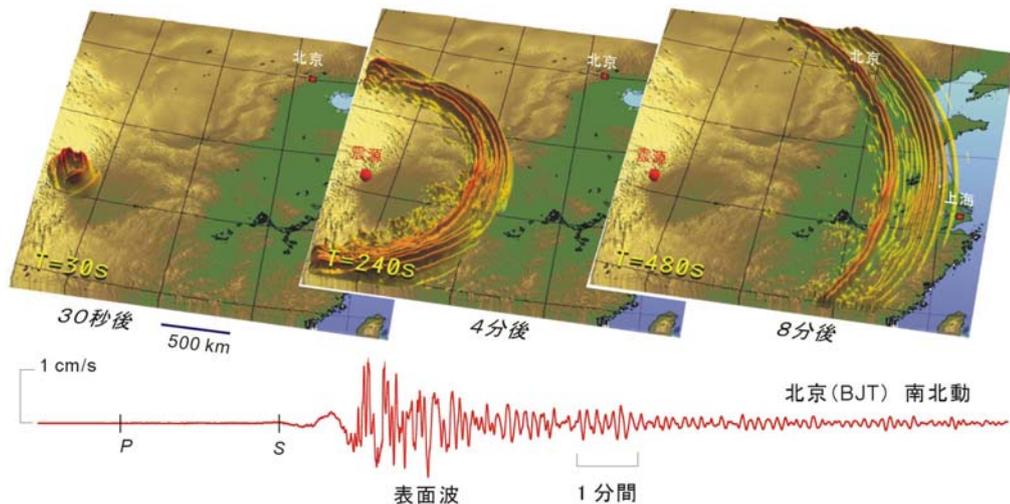


図 4.2-5. 四川大地震の長周期地震動シミュレーション。地震後 30 秒、4 分、8 分後の揺れ。下図は、北京の IRIS 観測点で記録された地震動(速度波形、南北動成分)。

③ 高精度シミュレーションのための日本付近の高分解能地下構造モデルの構築
地震の震源から地表までの地震波動伝播は、伝播経路の不均質な構造に強く影響を受ける。また、海洋を伝播する津波は、伝播経路である海洋の水深すなわち海底地形の影響を強く受ける。したがって、本研究で開発した高精度地震—津波連成シミュレーション法を生かし、地震波動伝播と津波伝播をより正確にシミュレートするためには、十分に高い分解能を持つ地形・地下構造モデルが不可欠である。

モデルの海底地形については、世界標準モデル(ETOPO2)をベースに、日本近海は国土数値情報に基づく 50 m 分解能の高精度モデルを作成した。地下構造については、日本列島の高精度地下構造モデル(分解能 0.25~1 km)を作成し、これを用いて 2004 年新潟県中越地震について地震波動伝播シミュレーションを行った。その結果と強震観測ネットワーク K-NET や KiK-net(防災科学技術研究所)による地震波形記録と比較することによって(図 4.2-6)、地下構造モデルの正しさを検証し、さらに波形の一致を高めることができるようにモデルの物性値(剛性率、密度、減衰定数)の微調整を行った。また、2007 年能登半島地震等による強震動と長周期地震動シミュレーションを実施し、強震波形記録との比較を通じて、その再現性を検証した。その検証結果に基づいて関東平野の堆積層モデルの高精度化を進め、関東周辺域の M 7 クラスの内陸地震による周期 2 秒以上の長周期地震動の高精度予測を可能にした。さらに、南海トラフ地震による長周期地震動の予測の高度化に向けて、1944 年東南海地震(Mw 8.1)時の強震計記録が東京大手町、本郷、横浜、千葉県東金市で発見されたことから、その復元波形と地震波動伝播シミュレーション結

果とを比較することにより(図 4.2-7), 長周期地震動を生成する関東平野の地下構造の微調整を行った。また, 大阪, 名古屋などでも, 長周期地震動をシミュレーションにより予測した [75]。

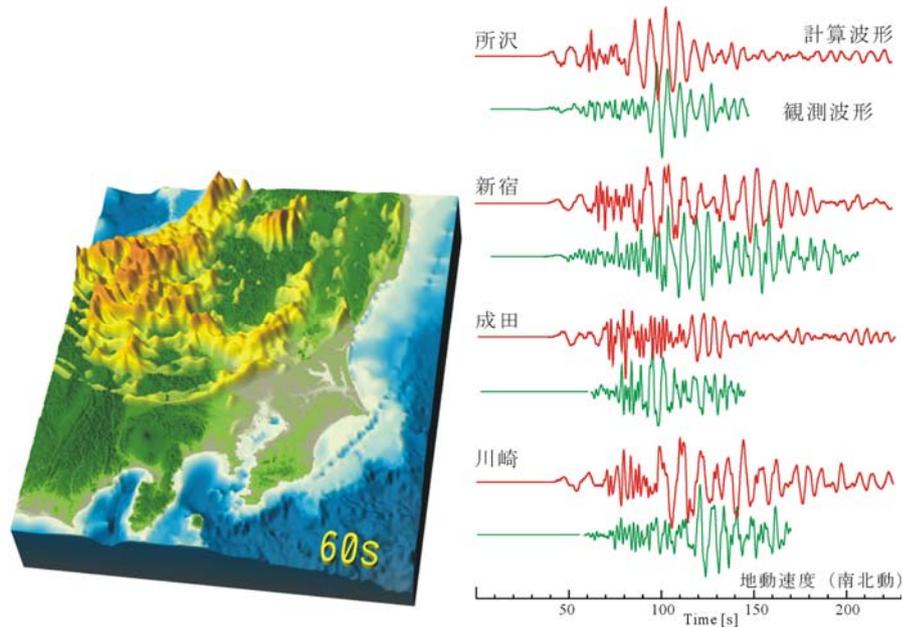


図 4.2-6. 日本列島の高精度地下構造モデルを用いた 2004 年新潟県中越地震による強震動シミュレーション。左図は地震発生後 60 秒の揺れ。右図は, 計算波形(オレンジ)と観測波形(緑)の比較(所沢, 新宿, 成田, 川崎地点)。

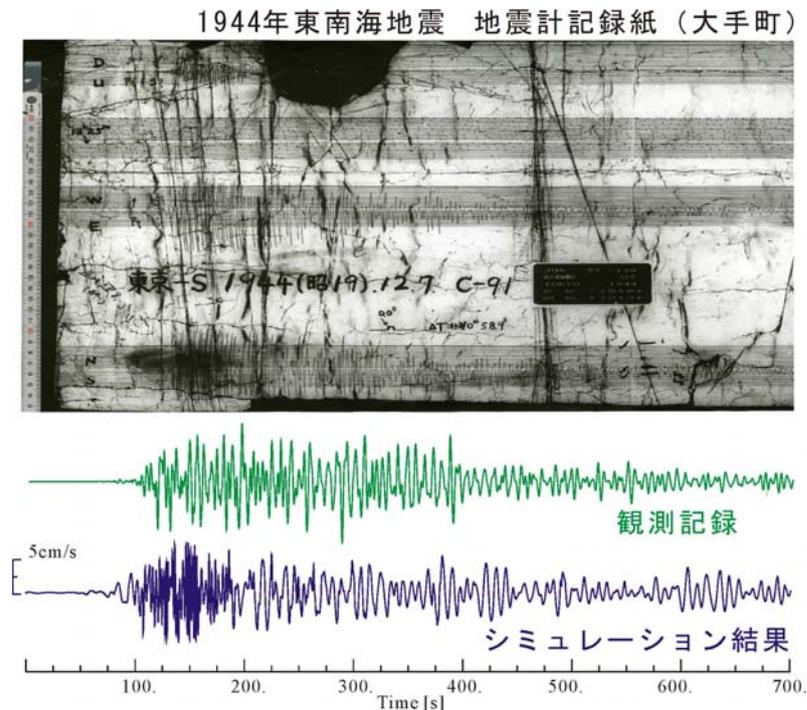


図 4.2-7. 1944 年東南海地震における, 東京大手町での強震計記録(上)。下は, 地震計の計器特性を補正して得られた地面の東西方向の動き(緑)とシミュレーション結果(紫)の比較。

こうして得られた関東平野の高分解能地下構造モデルにより、周期1秒以下の短周期地震動の評価が可能になった。これにより、たとえば震度や被害分布との地震シミュレーションとの詳細な比較により、江戸・明治に発生した関東直下の大地震の震源モデル(深さ、発生メカニズム)の推定を行うなど、災害予測への新たな展開があった[24]。

④ 仮想南海トラフ地震による強震動と津波の連成シミュレーション

松浦・福山・橋本グループと連携して、仮想南海トラフ地震の発生予測シミュレーションの結果を入力とし、仮想南海トラフ地震に伴う地震波動伝播-海底地殻変動-津波発生伝播のシミュレーションを行った。そして、現実的なシナリオに基づく中部日本-九州地域の強震動と津波の予測を行った(図 4.2-8)。その結果、震源断層の破壊の進行方向にあたる四国~九州にかけて、揺れの周期が数秒以上の長周期地震動が強く生成することが示された。また、足摺岬から日向灘の沿岸では最大7mの津波が発達するほか、土佐湾では海岸地形により津波が湾内部に閉じ込められ、1時間以上にわたって数mの津波が続くことが確認できた。

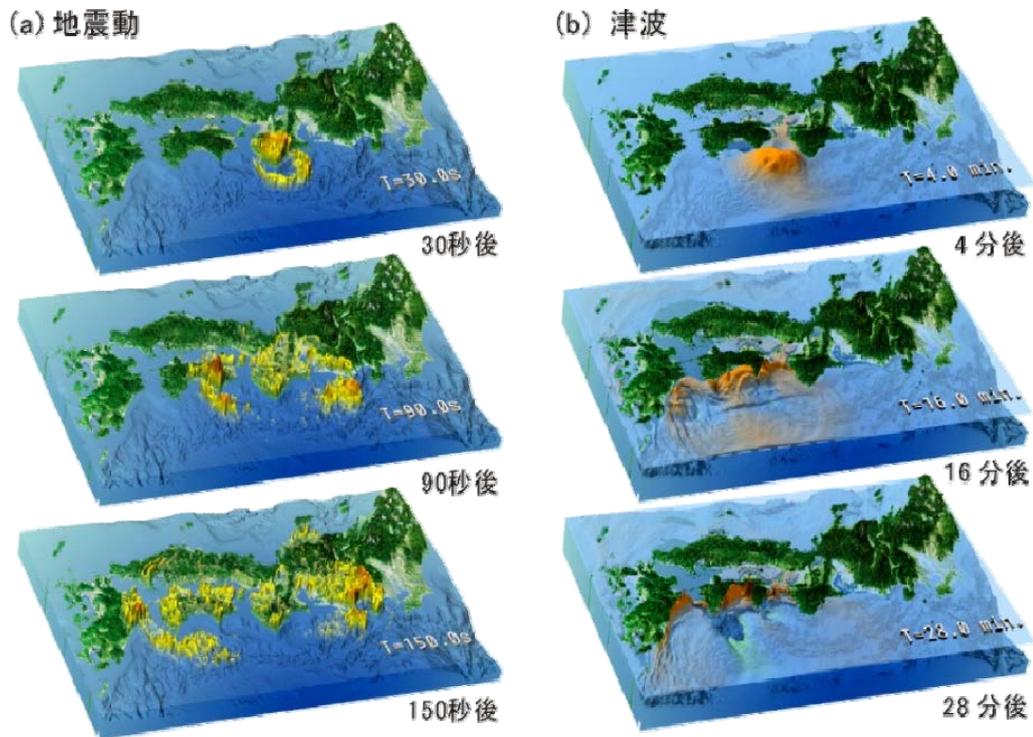


図 4.2-8. 仮想南海トラフ地震による地震動と津波発生伝播の連成シミュレーション。

(2)研究成果の今後期待される効果

南海・東南海・東海地震は今後 30 年以内に発生すると考えられており、国の中央防災会議によると3つの地震の同時発生により死者2万5千人、経済被害総額は 81 兆円に上るとの被害想定がある。地震発生は避けられないが、想定される強震動と津波を正しく評価し、地震による構造物の被害を予測して耐震対策に生かすことで被害を半減させることは十分可能である。

地震-津波連成シミュレーションコードの開発により、海溝型巨大地震による強い揺れと地殻変動そして津波発生伝播の高精度同時評価がようやく可能になった。また、本コードを地球シミュレータやT2K オープンスパコン(東京大学)に実装し、本研究で整備した高分解能地下構造モデルを用いて 1944 年東南海地震や 2004 年紀伊半島南東沖地震のシミュレーションを実施し、海底津波計記録や強震計記録との比較からモデルの有効性を確認した。地震破壊伝播モデルや人工構造物振動モデルと連結して、将来の南海トラフ巨

大地震の災害予測と軽減に向けた、観測・計算融合の階層連結地震・津波災害予測システム統合シミュレーションの目処も立った。

しかし、南海トラフ巨大地震の実用的な地震・津波被害予測の実現には、現在可能な計算周波数(1 Hz 程度まで)を周波数 5 Hz 以上の短周期地震動にまで拡張することが急がれる。これは、現在開発中の次世代スパコン「京」により十分実現可能である。実用計算の実現に向け、同様の内部構造を持つ CPU で校正される T2K オープンスパコン(東京大学)を用いて、スカラー型 CPU 向けチューニングの高度化を一層進め、キャッシュメモリの活用や MPI 通信の効率化により数万 CPU(数十万コア)を用いた超並列計算の準備を継続して進める必要がある。

4.3 人工構造物振動予測サブシステム(市村・長嶋グループ)

(1)研究実施内容及び成果

市村・長嶋グループは、大地震による人工構造物の応答を地震波と構造物の動的相互作用を考慮した連成シミュレーションにより再現・予測する研究を進め、浮き屋根式石油貯蔵タンクに仮想南海地震の地震波が入力した場合の動的応答を高精度でシミュレーションすることに成功した。また、都市デジタルデータを用いて計算機上に仮想現実都市を構築し、マイクロ解析とマクロ解析を階層的に結合した手法による都市震災評価シミュレーション・システムを世界に先駆けて開発した。いずれも計算技術的にインパクトのある研究である。

① 石油貯蔵タンクの動的応答解析手法の開発

石油貯蔵タンクの動的挙動は、タンク構造(固体)と石油(流体)との流体-構造連成(Fluid Structure Interaction : FSI)問題として扱う必要がある。ラグランジュ的に記述された固体の支配方程式を、有限要素法(Finite Element Method: FEM)により離散化すると次式のように表される。

$$\mathbf{M}_s \ddot{\mathbf{U}}_s + \mathbf{C}_s \dot{\mathbf{U}}_s + \mathbf{K}_s \mathbf{U}_s = \mathbf{F}(t) - \mathbf{M}_s \mathbf{1}\alpha(t)$$

ここに \mathbf{M}_s , \mathbf{C}_s , \mathbf{K}_s はタンク構造の質量マトリクス, 減衰マトリクス, 剛性マトリクス, \mathbf{F} は外力ベクトル, α , $\mathbf{1}$ は地盤の運動の加速度およびその方向, \mathbf{U}_s は節点変位ベクトルである

一方、流体の支配方程式は通常オイラー的に記述される。解析対象とするタンク内の流体は、移動境界、表面波の砕波など物理的に複雑な問題を含んでおり、このような物理現象を厳密に扱うためには流体の粘性や表面張力などを考慮する必要がある。しかしながら、石油貯蔵タンク内の流体の運動に対して非圧縮、非回転、非粘性を仮定し、さらに自由表面の微小波高を想定して、線形ポテンシャル問題として簡略化して扱っても、設計解析上実用上十分な精度で結果が得られる。ポテンシャル流れの支配方程式を FEM により離散化すると次式のように表される。

$$\mathbf{M}_f \ddot{\boldsymbol{\phi}} + \mathbf{C}_f \dot{\boldsymbol{\phi}} + \mathbf{K}_f \boldsymbol{\phi} = \mathbf{S}^T [\ddot{\mathbf{U}}_s + \mathbf{1}\alpha(t)]$$

ここに \mathbf{M}_f , \mathbf{C}_f , \mathbf{K}_f は内部流体の質量マトリクス, 減衰マトリクス, 剛性マトリクス, \mathbf{S} は流体の圧力と構造物へ作用する外力を関連づけるマトリクス, $\boldsymbol{\phi}$ は節点での速度ポテンシャルである。

構造物へ作用する流体力は、速度ポテンシャルを用いて次式のように表わされる。

$$\mathbf{F}(t) = -\rho_f \mathbf{S}\dot{\boldsymbol{\phi}}$$

ここに ρ_f は流体の質量密度である。

従って、固体と流体に関する空間変数について離散化された運動方程式は次式のように記述される。

$$\begin{bmatrix} \mathbf{M}_f & -\mathbf{S}^T \\ \mathbf{O} & \mathbf{M}_s \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \ddot{\boldsymbol{\phi}} \\ \ddot{\mathbf{U}} \end{pmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{C}_f & \mathbf{O} \\ \mathbf{O} & \mathbf{C}_s \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \dot{\boldsymbol{\phi}} \\ \dot{\mathbf{U}} \end{pmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{K}_f & \mathbf{O} \\ \rho_f \mathbf{S} & \mathbf{K}_s \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \boldsymbol{\phi} \\ \mathbf{U} \end{pmatrix} = \alpha(t) \begin{pmatrix} \mathbf{S}^T \mathbf{1} \\ -\mathbf{M}_s \mathbf{1} \end{pmatrix}$$

ここで、左辺第 2 項は減衰項、右辺は地震動による項を表す。

上記式で表されるシステムを時間に関してニューマーク β 法を用いて陰的に積分することによって、固体と流体とが連成した応答を計算することができる。このような方法を、強連成解析手法と呼ぶ。強連成解析手法の長所として、流体と固体の応答を反復計算なしに直接求められることがあげられる。一方、短所としてシステム方程式の係数マトリクスが非対称となり、数値的に取り扱い難くなることがあげられる。たとえば、システム方程式の非減衰固有振動数を求める際に、非対称マトリクスの一般固有値問題を解く必要が生じる。

流体のモデル化手法として、ラグランジュ型流体要素を用いることも可能である。この場合、流体は体積弾性率のみを有する線形弾性体としてモデル化される。三次元問題において 8 節点六面体一次要素を用いる場合、体積ロッキングを回避するために 1 点積分法による要素剛性マトリクスが導出され用いられる。また、流体の運動の非回転条件を満足させるためのペナルティ剛性を付加し、さらに 1 点積分の代償として現れるアワーグラスモードを抑制するためにアワーグラスモードに抵抗する剛性を付加する。すなわち、流体要素の剛性マトリクスを次式のように定義する。

$$\mathbf{k}_F^e = \mathbf{k}_0^e + \alpha_{RP} \mathbf{k}_{RP}^e + \alpha_{HC} \mathbf{k}_{HC}^e$$

ここに α_{RP} は回転抑制係数 α_{HC} はアワーグラス制御係数である。また \mathbf{k}_0^e は 1 点積分を用いて求めた体積変形に対する剛性マトリクス、 \mathbf{k}_{RP}^e は 1 点積分を用いて求めた回転を抑制するペナルティ剛性マトリクス、 \mathbf{k}_{HC}^e は完全積分を用いて求めたアワーグラス剛性マトリクスである。なお、さらに安定化させるために、質量射影法により要素質量マトリクスを修正する。

このように定義される流体要素を通常の構造解析用の FEM 解析プログラムに組み込むことにより固体と流体とが連成した応答を計算することができる。流体要素を用いる手法の長所として、既存の変位法 FEM に基づく構造解析プログラムに容易に組み込めること、システム方程式の係数マトリクスが対称となることなどがあげられる。一方、短所としてシステム方程式の総自由度が強連成解析手法と比べて大きくなること、固体と流体との間のすべり条件を与えるために多点拘束条件式の処理が必要になることがあげられる。

② 浮き屋根式石油貯蔵タンクの地震応答解析

10 万キロリットル級の国家石油備蓄タンクをモデル化して過渡応答解析を行った [60]。タンク壁の物性値はヤング率 200 (Gpa)、ポアソン比 0.3、密度 8,000 (kg/m³) とし、タンク内容液の物性値は体積弾性率 1.962 (Gpa)、密度 1,000 (kg/m³)、重力加速度 9.8 (m/s²) とする。解析対象および、その有限要素モデルを図 4.3-1 及び 4.3-2 に示す。

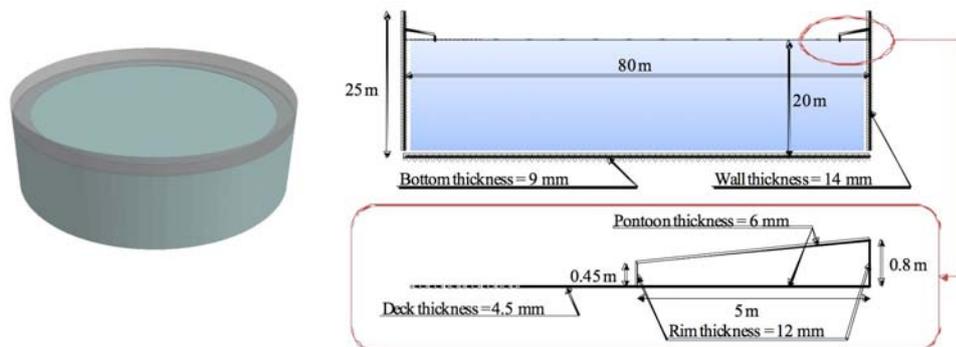


図 4.3-1. 10 万キロリットル級の国家石油備蓄タンク。

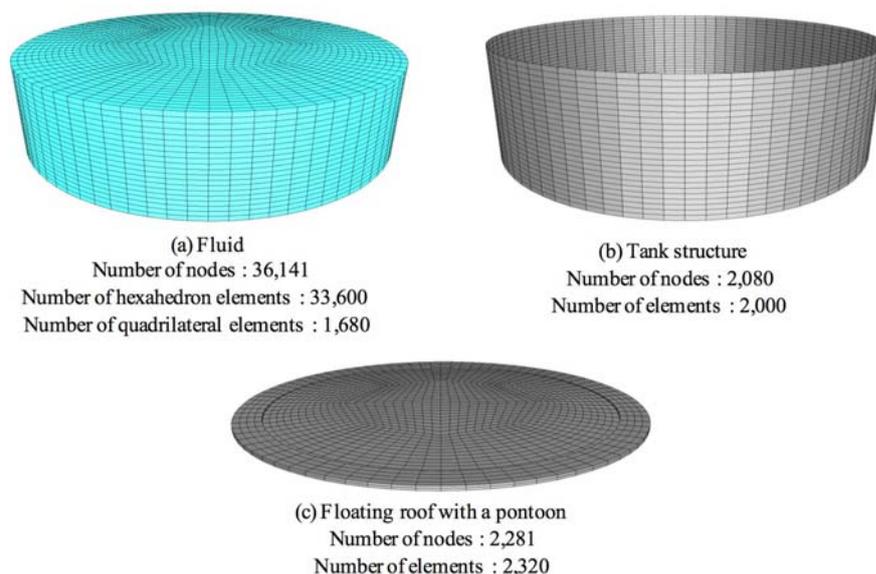


図 4.3-2. タンク内流体, タンク構造, 浮き屋根構造の有限要素モデル。

仮想南海トラフ地震の階層連結地震・津波シミュレーション結果として古村グループから提供された, 鹿児島県志布志国家石油備蓄基地における地震動の加速度データを図 4.3-3 に示す。

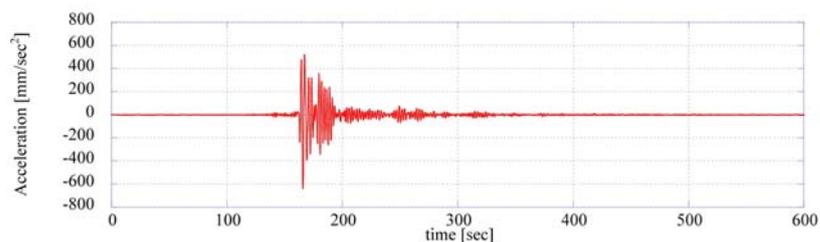


図 4.3-3. 地震動シミュレーションによって得られた入力地震動。

図 4.3-3 に示す入力地震動を解析モデルの水平方向に入力し, 貯蔵タンクの動的応答解析を実施した。強連成解析手法と流体要素解析手法を用い, 時間間隔を 0.096 秒として 600 秒間の 6,250 ステップの計算を行った。減衰に関してタンク内流体の一次のスロッピングモードに対応するレーリー減衰を 0.5%とした。流体要素を用いる解析においては, パラメータスタディを実施して, $\alpha_{RP} = 1.0 \times 10^{-3}$, $\alpha_{HC} = 1.0 \times 10^{-6}$ と定めた。

浮き屋根上の中心軸から水平方向に向かって最も離れた円周上の 1 点を評価点とし, 評価点の鉛直方向変位の時刻歴を図 4.3-4 に示す。強連成解析結果および弱連成解析結果はほとんど同じ結果を与えることがわかる。

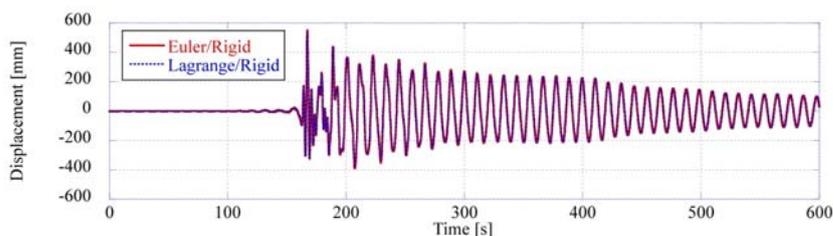


図 4.3-4. 強連成及び流体要素を用いた解析手法による浮き屋根の上下動の時刻歴。

さらに、浮き屋根に生じる水平方向の垂直応力の時刻歴を調べ、当該応力成分の絶対値が最大となるときの分布を図 4.3-5 に示す。鉛直方向変位と同様に、強連成解析結果および弱連成解析結果はほとんど同じ結果を与える。

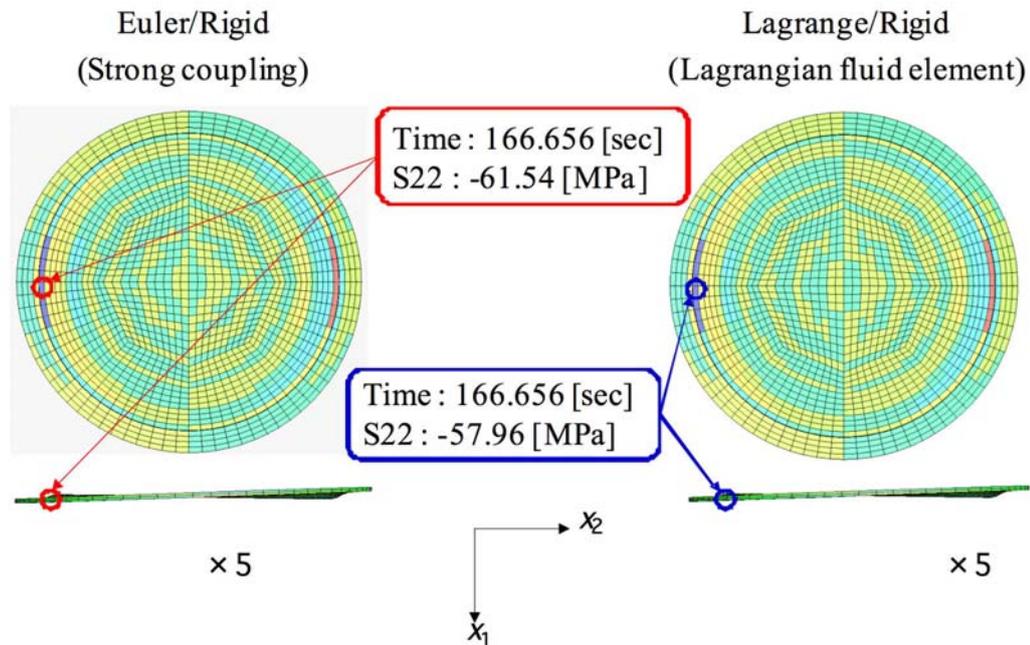


図 4.3-5. 強連成および流体要素を用いた解析手法による浮き屋根の応力分布。

以上示したように、地震動シミュレーションの結果として得られる加速度履歴を、浮屋根式石油タンクモデルに入力することにより、浮き屋根部分の上下動および浮き屋根の応力分布の時刻歴を得ることができる。これらの結果は、浮き屋根式石油貯蔵タンクの強度評価に資することができる。

③ GIS/CAD データを用いた震災シミュレーション用仮想電子都市の構築

強震動に人工構造物が応答して地震動災害が起きる最終局面を、地震波動伝播と構造物応答の動的相互作用の連成計算で評価するための都市モデルを計算機上に構築する。ここでは、この仮想現実の都市モデルを仮想現実都市と呼ぶ。三次元 CAD データ、航空レーザースキャンデータ、ボーリングデータ等を用いて都市の街並みを計算機上に再現し、各種構造物動的解析を重ね合わせ都市の地震時挙動をシミュレーションし、街が大地震で揺れる様子をビジュアルな形で再現するためには、効率的に震災シミュレーションが実行可能となるように、仮想現実都市は震災シミュレーションに適したデータ構造を持つ必要がある。そこで、既存 GIS/CAD データ及び震災シミュレーションで必要となるデータを分析し、自動的に都市デジタルデータを震災シミュレーション用入力データに変換する翻訳プログラム (mediator) のプロトタイプを開発した [3, 4]。更に、このプログラムを用いて震災シミュレーション用仮想現実都市を構築した。その結果、図 4.3-6 に示すような震災シミュレーションに適用可能な仮想現実都市が、日本全国の政令指定都市のいずれにおいても自動生成可能となった。今後、mediator の高度化により、より高度なシミュレーションの実施、また、地震以外の災害シミュレーションの実施が可能である。

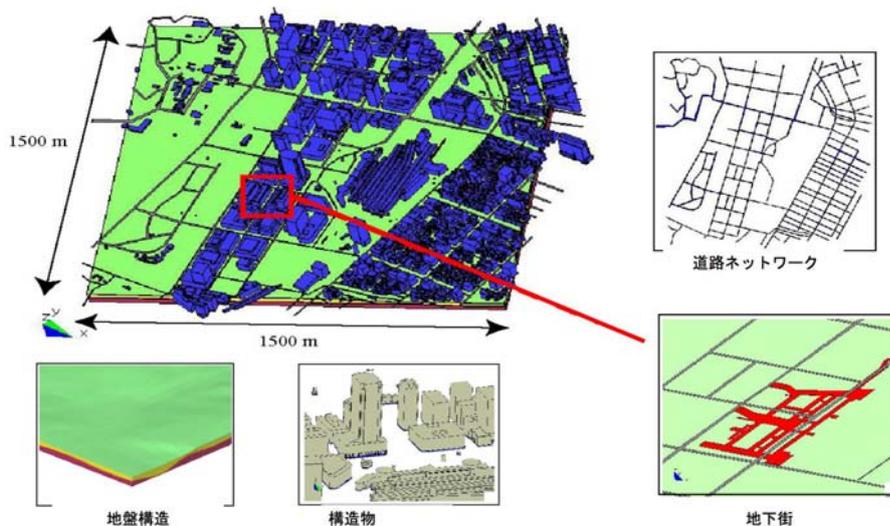


図 4.3-6. GIS/CAD データを用いて構築した仮想電子都市の例。

④ 仮想電子都市の震災シミュレーションへの応用

前項③で構築した仮想現実都市, mediator のプロトタイプ, 各種構造物のシミュレーションツールを組み合わせ, 都市震災シミュレーション用システムのフレームワークを構築した。このフレームワークを用い, 実際の都市の都市デジタルデータから構築した仮想現実都市を用いた都市全域の震災シミュレーションを行い, フィージビリティスタディを行った。図 4.3-7 に, 適用例(ある地震に対する対象仮想現実都市における地表面震度分布, 構造物被害状況, 道路閉塞状況(緑部分が破断), 地下街からの避難行動)を示す。前項③で構築した仮想現実都市を用いることができるので, 図 4.3-7 に示したものと同様の地震災害シミュレーションは, 日本全国の政令指定都市のいずれにおいても可能である。また, 都市デジタルデータ及び使用するシミュレーションツールの組み合わせを変えることにより, シミュレーションの高精度化及び高分解能化を行える仕組みとしている。

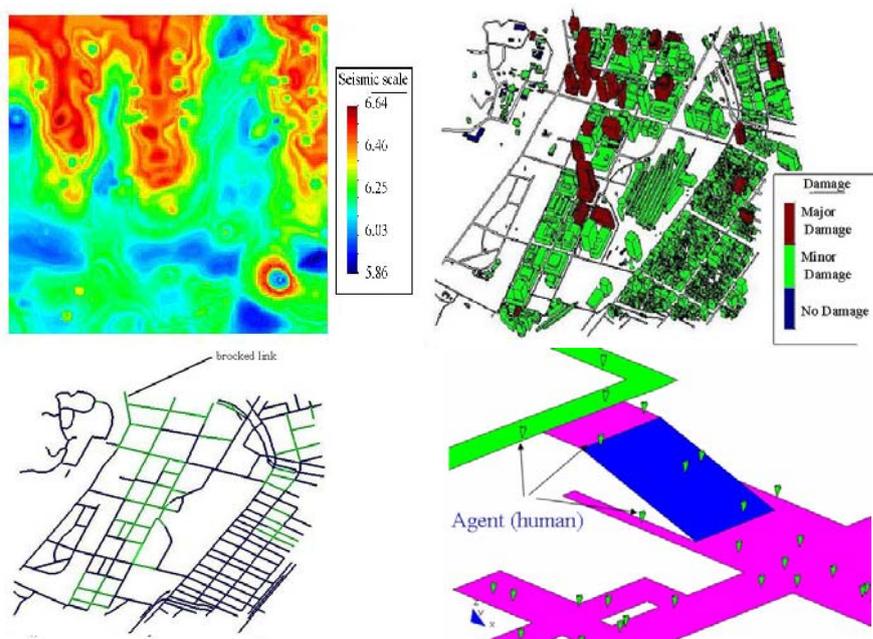


図 4.3-7. 仮想現実都市の震災シミュレーション。左上:地表面震度分布。右上:構造物被害状況。左下:道路閉塞状況。右下:地下街からの避難行動。

⑤ 地震波動計算と都市構造物連成シミュレーションの高度化

本研究課題で対象とする現象、「地震時の断層破壊、地殻内地震波伝播、地表近傍の地盤による増幅、人工構造物の応答」の長さのスケールは、100,000 m から 0.01 m の広範囲に渡る。従来、地震時の断層破壊、地殻内地震波伝播(スケールは 100,000 m ~ 100 m 程度)と地表近傍の地盤による増幅・人工構造物の応答(スケールは 100 m ~ 0.01 m 程度)は、それぞれ、理学分野の地震学、工学分野の地震工学で主に研究されてきた。そのため、上記現象のより高精度・高分解能な統合的連成シミュレーションを行うためには、両者をつなぐ適切な工夫が必要となる。断層破壊過程、地殻内波動伝播、地表面近傍での増幅及び構造物の動的挙動の一連のプロセスを高精度かつ高分解能な三次元数値解析モデルを構築し、動的数値解析することが考えられるが、膨大な計算量のためその実現は難しいとされている。そのため、上記の数値解析モデルを、断層から地表面近傍までのモデルと構造物を含む地表面近傍のモデルに階層型解析により分割して解析し、計算量軽減を可能とした手法を構築した [18, 59] (図 4.3-8)。

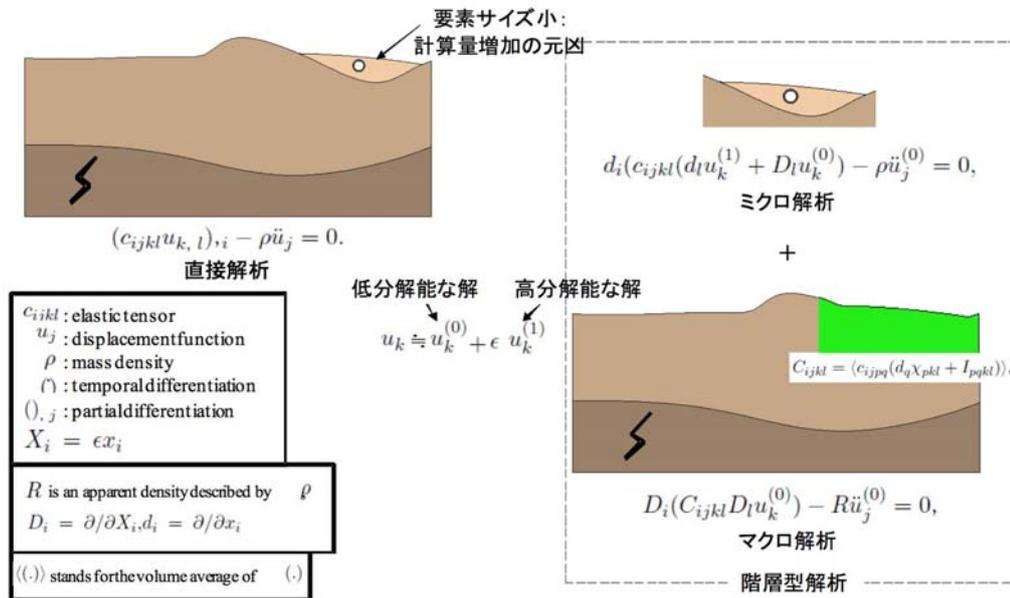


図 4.3-8. 階層型解析のイメージ。左上の断層、地殻、構造物を含む三次元数値解析モデルを用いた直接解析は膨大な計算量を必要とする。階層型解析により、これと等価なマクロ解析とマイクロ解析を導出し、計算量を軽減することができる。これにより、断層から構造物までを高分解能かつ高精度にシミュレーションすることができるように期待される。

この手法によるシミュレーションの精度を検証するため、全体システムを直接三次元解析し得た解と階層型解析による解を比較し、良好な結果を得た(図 4.3-9)。さらに、このシミュレーション手法を実地盤構造/実構造物に適用できるように拡張し、シナリオ地震を対象として大規模重要構造物の地震時挙動想定を行った(図 4.3-10)。また、他グループと連携して、理学的地震波動場シミュレーションと工学的構造物解析を本手法により結合し、断層から構造物までの全体システムの一括解析を試みた。この手法によれば、理学分野の地震動シミュレーションと工学分野の構造物動的解析を適切に結びつけることが出来るため、従来に比べ、より高精度かつ高分解能な震災予測が可能になると考えられる。

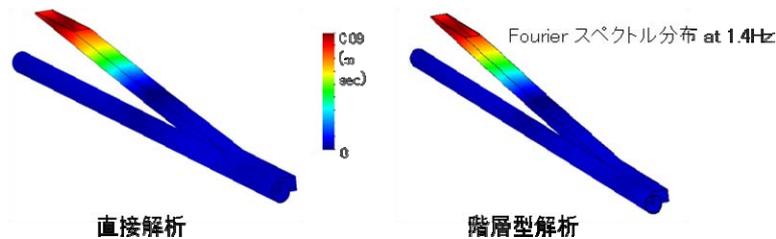
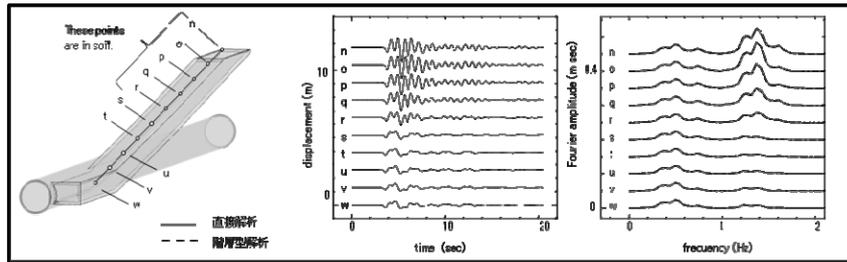


図 4.3-9. 直接解析と階層型解析の比較。対象構造物(地下高速道路トンネル)を含む三次元数値解析モデルの直接解析の解と階層型解析による解の比較。時刻歴波形、フーリエスペクトルともに良好に一致しているのがわかる。

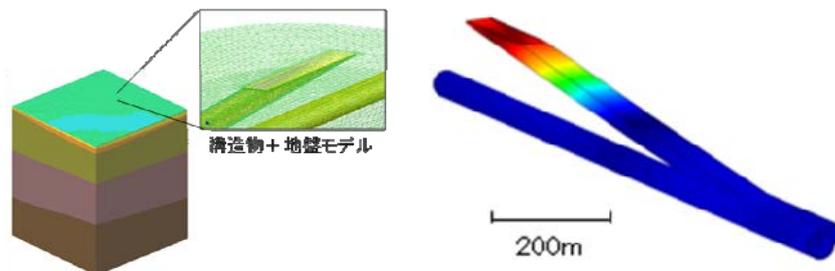


図 4.3-10 シナリオ地震時の大規模構造物の挙動予測。断層から構造物までを含む関東地方における統合三次元数値解析モデル(左図)。中央防災会議による想定首都直下地震時の対象構造物(高速道路トンネル)の地震時挙動(右図)。

(2)研究成果の今後期待される効果

①及び②で開発したラグランジュ型流体要素を用いた石油貯蔵タンクモデルを地盤運動モデルに組み込むことによって、地盤と石油貯蔵タンクとの連成運動を考慮した動的解析が実施可能となる。この結果を評価することにより、これまで明らかになっていなかった地盤の運動が石油貯蔵タンクの振動に与える影響が評価可能となる。

まだ信頼性向上の必要はあるが、③及び④で開発された都市デジタルデータを用いた汎用的な仮想現実都市構築手法及びその震災シミュレーションにより、都市全域での震災想定高度化が期待される。また⑤の研究成果は、地震学の地震動シミュレーションと地震工学の構造物シミュレーションを従来よりも高分解能・高精度で結びつけることが可能であり、構造物の地震時挙動予測の高度化につながると期待される。

4. 4 階層連結プラットフォーム(奥田・中島グループ)

(1)研究実施内容及び成果

奥田・中島グループは、大規模階層連結シミュレーションを実現するためのソフトウェア基盤として、M×N 通信による連成計算用カプラーを開発した。これは、計算機資源の効率的活用という点で、世界に先駆けた成果である。また、メッセージパッシングとマルチスレッドを組み合わせた Hybrid 並列プログラミングモデルによる前処理付反復法アルゴリズムの研究を実施し、CPU-GPU 複合環境における混合精度アルゴリズム、悪条件問題向け前

処理手法、ハイブリッド多重格子法等の研究開発へ発展させ、世界をリードした。

① ボクセル型背景格子を使用した大規模並列可視化手法

並列計算機による大規模シミュレーションにおいて結果の可視化処理は大きな技術的課題である。これまで、様々な手法が研究、開発されているが、並列処理における計算効率と対話的処理における利便性の両立は困難であった。本研究では、1,000 を超えるようなプロセッサを有する並列計算機上で 10^8 メッシュ以上の大規模問題のシミュレーションで得られた計算結果について100分の1以下にデータ量を削減することにより、MicroAVSなど単一プロセッサ上で稼動する可視化ソフトウェアを使用して描画するための、効率的なデータ処理手法、簡略化手法を開発した。本手法では、有限要素法等非構造格子による分散データを、局所細分化を含むボクセル型背景格子上にマッピングした情報と、簡略化された境界面形状の情報をもとに全体領域を四面体要素に分割することによって、PC 上のアプリケーションで処理可能な精度の高い容量の少ないデータファイルを生成する。細分化レベルを変化させることによって、データ量を変えることができ、利用可能なリソースに応じた柔軟な処理が可能となる [11]。西南日本領域(997,422 節点, 960,509 要素)における非定常熱伝導解析を実施し、計算結果の可視化を実施した。図 4.4-1 に局所細分化を含むボクセルメッシュを使用した可視化例を示す。

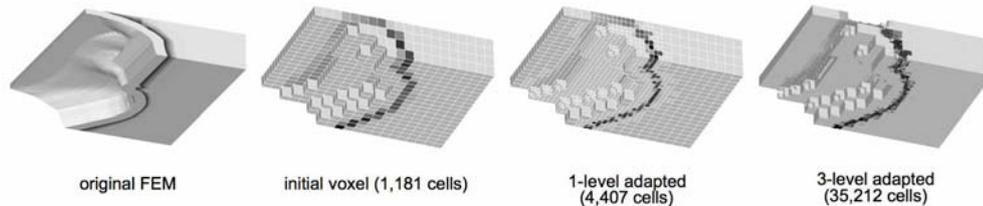


図 4.4-1. ボクセル型背景格子を使用した大規模並列可視化手法による処理事例。

② M×N 通信による大規模連成シミュレーション

大規模弱連成シミュレーションのために、SPMD 環境における M×N 通信に基づく、フレームワークを開発した。FORTRAN のモジュール、構造体の特性に基づき、連成シミュレーションに関連した処理を FORTRAN 環境で実施することにより、簡明なインタフェースにより、M×N 通信の機能を利用可能である [27]。

M×N 通信 (M×N parallel data redistribution) とは、M 個と N 個のプロセッサ数を有する (M と N は異なる数である必要はない) 複数の並列アプリケーション間のデータ転送に関連した分野であり、計算機リソースを効率的に利用する手法として注目されている。図 4.4-2 は流体解析 (4 プロセッサ) と構造解析 (9 プロセッサ) のための並列アプリケーションを連成させた場合である。アプリケーション間での通信が各プロセッサにおいて必要になる。

ここでは、有限要素法による三次元波動伝搬解析 (地盤, 陽解法)、三次元スロッピング解析 (石油タンク群, 陰解法) の連成解析 (一方向弱連成) を実施した。地盤振動解析では 16~32 個のプロセッサを使用した並列有限要素法による計算を実施し、石油タンク群については各タンクを 1 プロセッサで担当し、地盤振動解析から得られた石油タンク底面の変位量を境界条件として与えている。地盤振動解析を陽解法で実施するため、両プロセッサの計算を同時実行可能である (図 4.4-3 参照)。図 4.4-4 は計算結果の可視化事例である。

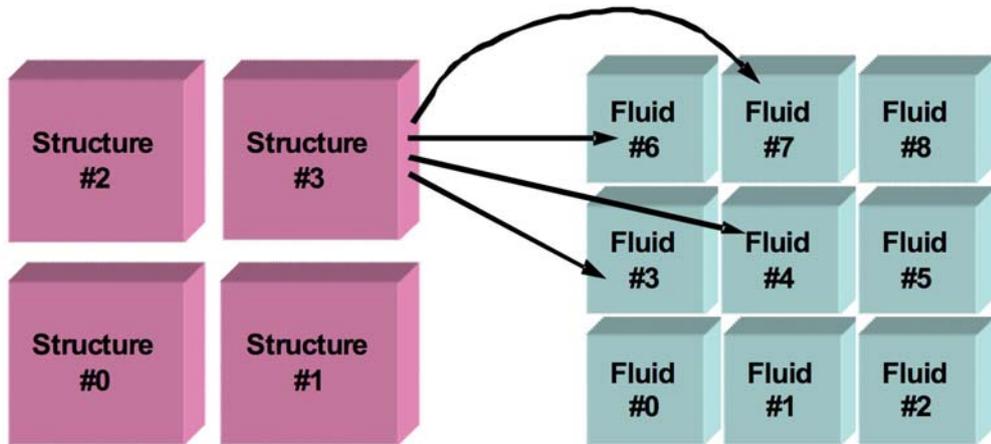


図 4.4-2. M×N 通信の例(流体～構造連成解析)。

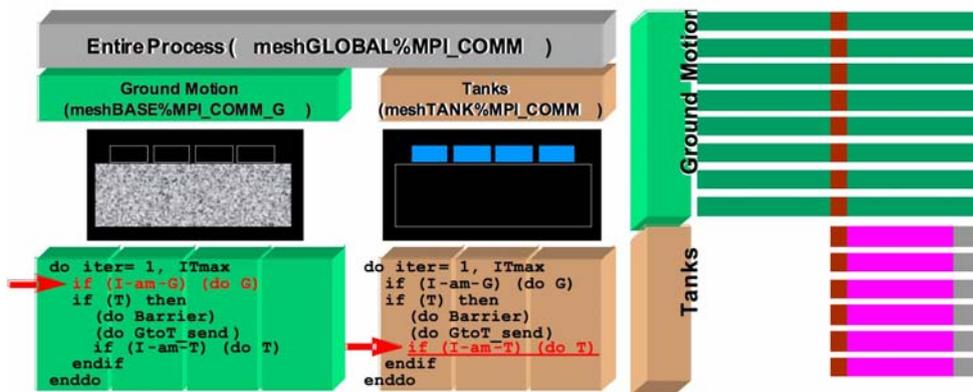


図 4.4-3. M×N 通信による連成カップラーの稼働イメージ(地盤振動・石油タンクスロッシング連成解析)。

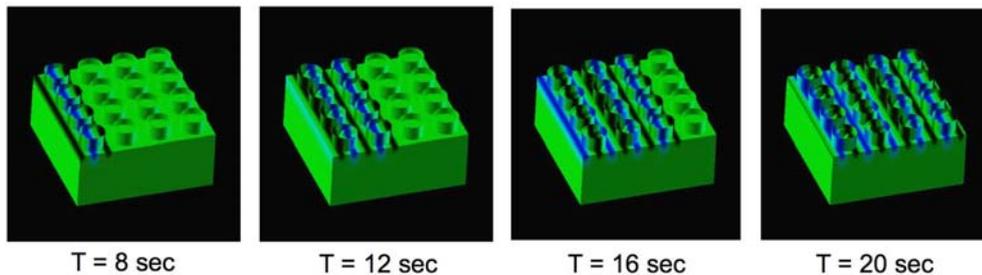


図 4.4-4. M×N 通信による連成カップラーを使用した, 地盤振動と石油タンクスロッシングの有限要素法による並列一方向弱連成シミュレーション [27]。

③ 六面体メッシュの適合型並列局所細分化と負荷分散

六面体要素を使用した並列有限要素法による, 不均質複雑断層面における単位すべり応答関数計算コードを対象として, 適合型局所細分化のためのフレームワークのプロトタイプを開発し, 負荷分散におけるデータマイグレーション部分の性能に注目した評価を実施した。T2K オープンスパコン(東大)32 ノード(512 コア)を使用して, 良好なスケーラビリティを得ることができた [46]。有限要素法による三次元シミュレーションでは, 複雑な形状を扱うのに適した四面体要素が用いられる場合が多い。断層における応力蓄積過程のシミュレ

ーションでは伝統的に六面体要素(8節点, 一次内挿関数)が使用されている。これは六面体要素が四面体要素(一次内挿関数)と比較して精度が良く, 特に断層面付近等において辺と断面が直交した要素が好まれるためである。局所細分化手法としては細分化レベルの境界で Hanging Node の生じない適合型(conforming)分割を適用した。図 4.4-5 にその例を示す。

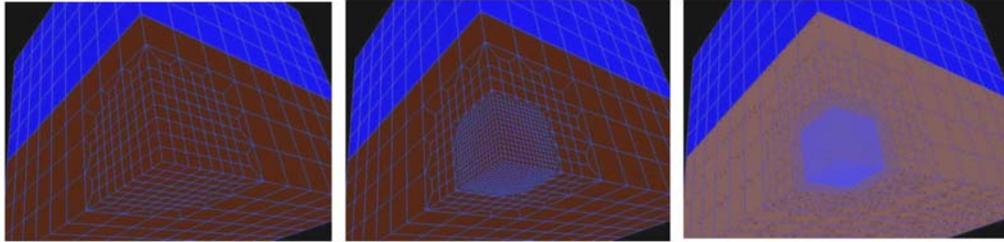


図 4.4-5. 多段階適合型(conforming)局所細分化の例。

④ Hybrid 並列プログラミングモデル

近年, マルチコアプロセッサの普及, 大規模システムにおけるコア数の増加を背景として, ハイブリッド(Hybrid)並列プログラミングモデルが脚光を浴びるようになり, Flat MPI(または Pure MPI)との優劣に関する議論が盛んとなっている。Hybrid 並列プログラミングモデルはメッセージパッシングによる「coarse-grain parallelism」と, ディレクティブによる「fine-grain parallelism」の融合であり, 一般的には MPI と OpenMP を組み合わせたスタイルである。本研究では, 有限要素法に基づく三次元弾性静力学問題向けシミュレーションで使用されている前処理つき反復法に OpenMP/MPI ハイブリッド並列プログラミングモデルを適用し, T2K オープンスパコン(東大)(以下「T2K(東大)」)の 512 コアを使用した評価を実施した [42, 62]。OpenMP/MPI ハイブリッド並列プログラミングモデルは適切な NUMA control の組み合わせにより, OpenMP/MPI ハイブリッド並列プログラミングモデルが Flat MPI と同等かそれを上回る性能を発揮することがわかった。更に, First Touch Data Placement, 連続メモリアクセスのためのデータ再配置を適用することにより, 特にコア当たり問題規模が小さい場合の性能が改善されることが明らかとなった。また, OpenMP/MPI ハイブリッド並列プログラミングモデルを, [10] で開発された, 並列多重格子前処理付き反復法を使用した, 三次元有限体積法に基づく不均質場における地下水流れ問題シミュレーションに適用した [84, 86]。多重格子法(multigrid)は大規模問題におけるスケーラブルな手法として注目されているが, T2K(東大)のようなマルチコア・マルチソケットクラスタにおいて, OpenMP/MPI ハイブリッド並列プログラミングを適用し, 評価した例は無い。本研究では T2K(東大)の他, 米国ローレンスバークレイ国立研究所 National Energy Research Scientific Computing Center(NERSC)の有する「Cray-XT4」の 8,192 コアまでを使用して Flat MPI と OpenMP/MPI ハイブリッド並列プログラミングモデルの評価を実施した。コア当たりの問題規模を固定した Weak Scaling によって評価を実施した。コア当たり問題サイズ(セル数)は $262,144(=64^3)$ であり, 最大問題規模は 2,147,483,648 セルである。図 4.4-6 は, 16 コア~8,192 コアを利用した場合の MGCG 法(多重格子法(MG)前処理付共役勾配法(Conjugate Gradient, CG))の計算性能である。図 4.4-6 左は収束までの反復回数である。完全にスケーラブルな場合は問題規模によって, 反復回数は変化しないが, 本研究で扱っているような悪条件問題では, 問題規模が大きくなるに従って, 反復回数が若干増加している。増加の傾向については並列プログラミングモデルによる差異はほとんど無い。計算時間については, ノード数が増加すると, 特に T2K(東大)については, HB 4×4(1ソケットに 1 つの MPI プロセス, ソケット内に 4 つの OpenMP thread を適用するハイブリッド並列プログラミングモデル)が, メモリを最も効率良く利用できるため, 計算性能が最も高い。T2K(東大)と Cray XT4 を比較すると, Cray XT4 の方がメモリの性能が高い分だけ性能がよく, T2K(東大)の 1.5~1.8 倍程度である。First Touch Data Placement, 連続メモリアクセ

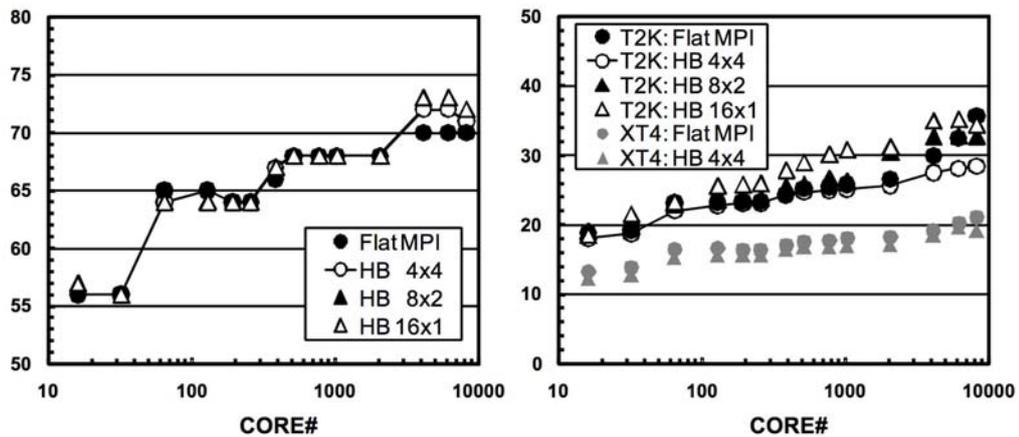


図 4.4-6. MGCG 法の計算性能。左)反復回数。右)MGCG ソルバー計算時間(最適化されたソルバーを適用, CM-RCM(2), 16~8,192 コア)。Weak Scaling, 2,147,483,648 セル/コア, 最大問題規模:268,435,456 セル。不均質多孔質媒体中の三次元地下水流れ。

スのためのデータ再配置, 適切な NUMA control の組み合わせにより, OpenMP/MPI ハイブリッド並列プログラミングモデルが Flat MPI と同等かそれを上回る性能を発揮することがわかった。特に問題規模が大きくなり, コア数が増加すると, OpenMP/MPI ハイブリッド並列プログラミングモデルの優位性が高まると考えられる [42, 62, 84, 86]。

⑤ 悪条件問題向け並列前処理手法の開発

Block Jacobi 型局所前処理は並列反復法において広く使用されており, 条件の良い問題では安定であり高い並列性能を示すが, 前処理時に領域外の影響を考慮しないため, 悪条件問題では, 領域数の増加とともに反復回数が著しく増加する場合がある [63]。一般に用いられる対策は領域間のオーバーラップ深さを拡張することである [63]。また [21] では, 三次元接触問題における有限要素モデルの特性を利用して得られた新しい解決方法として「選択的オーバーラップ (Selective Overlapping)」が提案されている。本手法では, 接触に関連した要素にのみオーバーラップ領域拡張を適用する。更に, 論文 [63] では「階層型領域間境界分割 (Hierarchical Interface Decomposition, HID)」の安定性と効率について検討されている。HID は不完全 LU 分解 (ILU), 不完全コレスキー分解 (IC) に基づく並列前処理手法を, 安定に収束させ, 高い並列性能を得ることができる領域分割手法である。選択的オーバーラップと HID に基づく並列前処理手法の性能 (安定性, スケーラビリティ) は拮抗しているが, HID は領域外の節点からの高レベルのフィルイン (fill-in) を考慮することができず, 悪条件問題では必ずしも安定ではない。論文 [84, 87] では, 領域外節点からの高レベルのフィルインの影響を HID に基づく並列 ILU/IC 前処理手法に導入可能な手法, すなわち領域間オーバーラップ領域の拡張とセパレータ拡張を考慮して, 悪条件問題のために改良した領域間境界分割法 (HID) を提案, 開発した。提案手法を要素の局所的振れを考慮した有限要素法による三次元静的弾性力学問題に適用し, T2K オープンスパコン (東大), Cray XT4 による評価を実施した。提案手法は従来手法と比較して安定で効率もよいことが示された。特にセパレータ領域の拡張の効果は大きく, 悪条件問題において, Block Jacobi 型局所前処理, オリジナルの HID と比較して領域数が増加しても収束までの反復回数がほぼ一様に留まり, 大規模問題において安定で効率的な手法であることを示した (図 4.4-7)。大規模な実用的悪条件問題を解くための手法として注目される。論文 [84, 87] では, 更に, T2K オープンスパコン (東大), Cray XT4 の通信性能の分析を実アプリケーションに基づく簡易ベンチマーク (MPI ベンチマーク) により実施した。Cray XT4 は T2K (東大) と比較して通信レイテンシが大きく, 特に HID 法では高いレベルにおいてメッセージサイズの小さい通信が多数発生するため, その影響を受けやすい。

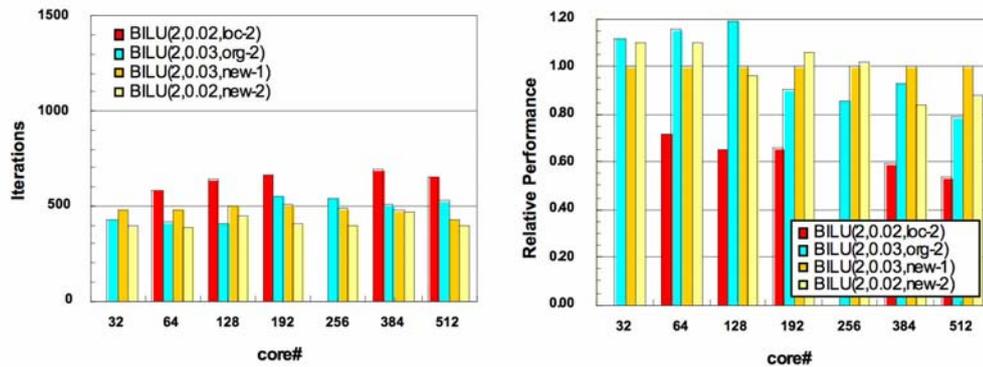


図 4.4-7. BILU(2,t,m-d)/GPBi-CG 法の計算性能 (T2K (東大), 三次元弾性問題, 2,097,152 要素, 6,440,067 自由度, 512 コア)。左)収束までの反復回数。右)相対性能 (提案手法[BILU(2,0.03,new-1)]の性能を 1 とする)。

ベンチマーク結果に基づき改良 HID 法の性能評価を行い, 実測値に近い値を得ることができた。大規模な計算機を使用して, 複雑なアルゴリズムに基づくマルチレベル解法によって問題を解く場合には, 簡易的なベンチマークテストを実施し, 通信レイテンシ等の特性を十分に把握しておく必要がある。

⑥ 並列反復法ソルバーにおける反復改良 (Iterative Refinement) 解法の開発 [82]

ソルバーを単精度で実行すると, ほとんどの場合, 必要な精度の解を得られない。その対策として混合精度や擬似倍精度演算, もしくはそれらの組み合わせを用いることができる。

混合精度では, ほとんどの演算を精度の低い演算で行い, 一部のみを高い精度の演算で行うことで, 全体を高い精度の演算で行った場合とほぼ同じ精度の解を得ることができる。多くの CPU で単精度演算は倍精度演算の 2 倍速く, CELL のようなプロセッサでは単精度の方が 10 倍速いため, スピードアップが期待される。疎な線形代数演算のようなメモリ律速な問題では, 半分のデータ転送しか必要ない上に, キャッシュヒット率の向上が見込めるために, 同様の結果が期待される。

反復法ソルバーでは, 混合精度は反復改良 (Iterative Refinement) として実装することができる。ここでの反復改良とは, 低い精度でのソルバーを高い精度での修正ループの内側にラップする内外反復ソルバーであり, 外側のループが, 低い精度での前処理を施した反復法ソルバーとして働く。図 4.4-8 にそのアルゴリズムを示す。

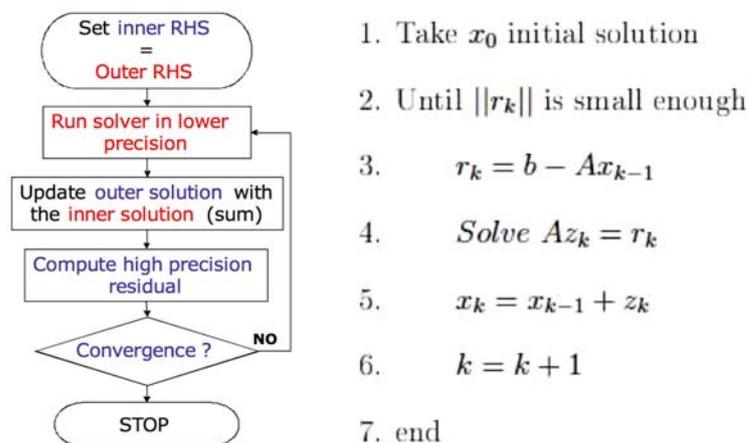


図 4.4-8. 反復改良 (Iterative Refinement) のアルゴリズム。ステップ 4 において低い精度 (例えば単精度), ステップ 3 と 5 において高い精度 (例えば倍精度) で計算する。

ソルバーを GPU 上で単精度で実行し、修正のための倍精度での反復を CPU で実行するという反復改良を行った場合の収束性を調査した。反復改良は、行列の条件がひどく悪くない限り、倍精度の正確さで収束することが証明されているが、ここでの実験では、前処理を施した後の行列の条件数が 10^8 のオーダーより小さい場合にうまく動いた。これは事前の予測と一致する。というのは、条件数は丸め誤差の増幅器として働き、単精度の場合には 10^8 以上の精度は保証されないためである。このことは図 4.4-9 から確かめられる。行列の条件数ごとに収束したかどうかをプロットしている。

さらに、反復改良においてこれまであまり重要視されていなかった「内側反復の精度」について検討した。反復改良(図 4.4-8)では、外側の修正ループと内側のソルバーの間のつながりは、右辺ベクトル r_k のみである。また、外側の反復は内側のソルバーをリスタートさせ、その結果として CG ソルバーの修正方向ベクトルの情報を失ってしまうため、毎回修正しなければならない。これは、反復回数の増加につながる。それに加え、内側のソルバーの精度が正しく選択されていない場合には更なる反復回数の増加をもたらす。そのため、内側のソルバーの収束判定条件を正しく選択する基準が必要である。図 4.4-10 では、行列の条件数に対して、最も反復回数が少なくなった場合の内側ソルバーの収束判定残差を示した。すべての場合について最良の結果が得られたものはなかったが、ある傾向が観察される。行列の条件数が大きいほど、内側ソルバーの収束残差も大きく(緩く)なる。行列の条件数は収束のしにくさと丸め誤差の増幅度を表しており、条件のいい行列は単精度での解が倍精度での解により一致するために、内側ループのターゲットもより狭く設定することができるが、条件の悪い行列の場合には内側ループでの解は倍精度での解からは遠く離れており、正しい解を見つけれないのである。観察されたこうした傾向を用いて、内側ソルバーの収束条件に関する次の実験的な基準を提案した。

- 条件数 10^0 から 10^2 については 10^{-5}
- 条件数 10^3 から 10^5 については 10^{-3}
- 条件数 10^6 から 10^8 については 10^{-1}

なお、条件数が 10^8 より大きな行列に対して反復改良はうまく働かない。また、このアルゴリズムは条件数の見積りを必要とする。提案基準を用いた場合の反復回数の(最も少ない場合に対する)増加を図 4.4-11 に示す。すべての場合について増加が小さいことが分かる。

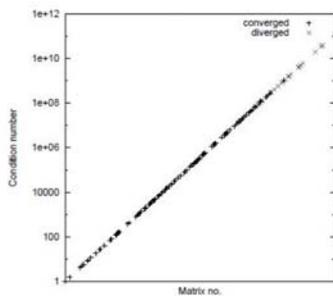


図 4.4-9. 反復改良アルゴリズムの収束状況。

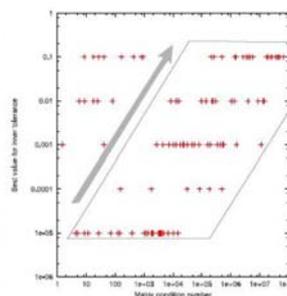


図 4.4-10. 最も反復が少ない場合の内側ソルバーの収束判定残差。

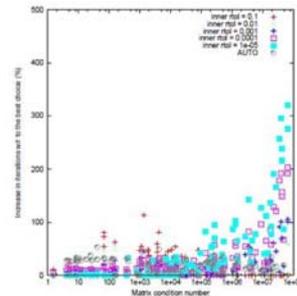


図 4.4-11. 提案基準を用いた場合の反復回数の増加。

⑦ 並列反復法ソルバーにおける混合精度解法の開発 [79]

混合精度による手法は、それが速いという以外にも、単精度演算しか得られない GPU など、様々な場合に使用される。多くの計算コストを支払うことにより、高い精度での演算を模擬することができる。このようなテクニックは長く使われ、単精度演算しか行えない場合に倍精度を模擬することができており、更に最近では、4 倍精度の模擬にも使われている。この手法は GPU に反復改良を実装する上でとても有力な手法である。このことは、他の精度やメ

ニーコアアーキテクチャに、単純な性能モデルを用いて理論的に拡張することができる。

倍精度浮動小数点数は 2 個の単精浮動小数点数により擬似的に実装されている。このような数を、通常の倍精度に比べて精度が少し低い(仮数部が 53bit に対して 48bit)ために、以下では擬似倍精度と呼ぶ。後に示す性能テストでは、擬似倍精度を用いた反復法ソルバーにおいて通常の倍精度を用いた実装とほとんど変わらない性能を得られることを示す。これは、ソルバーの疎行列ベクトル積演算がメモリ律速であることと、GPU の強力な単精度演算性能の、双方の理由による。

ここでは、クリロフ部分空間法に出てくる以下の3つの基本的な演算を採り上げる:内積(DOT), ベクトル加算 (AXPY), そして疎行列ベクトル積 (SPMV) である。DOT では、メモリから2ワードのデータをロードし、1度の加算と掛け算が行われるため、演算とデータ量の比は 1:1 である。280GTX GPU は、141GB/s のバンド幅と 615GFlop/s の単精度演算性能(加算と演算を 1 クロックの間に実行できると考える)を持っている。バンド幅による制限により、内積演算は擬似倍精度で $141/8 = 17\text{GFlop/s}$, 単精度で $141/4 = 35\text{GFlop/s}$ の性能まで得ることができる。倍精度のデータをロードする間、GPU は $615/17 = 36$ 命令を実行することができるが、これは必要な演算数である 21.5 命令より多い。そのため理論的には、擬似倍精度の内積演算は倍精度での実行より速いはずである。しかし実際には、GPU のアーキテクチャの制限から、合計を求める際にすべてのスレッドを使えないリダクションを行う必要がある。そのために、ベクトルのサイズが大きくなると少し性能が低下する。

全く同じ考え方で、倍精度 AXPY のために必要なデータを読み書きする間に GPU は 52 命令を実行することができるが、必要な命令数は 21.5 である。AXPY カーネルにはリダクションは不要で余計なオーバーヘッドも無いので、実際の擬似倍精度の速度は倍精度と同じである。

擬似倍精度では倍精度に比べて 1.5 桁分精度で劣るため、倍精度の仮数部が短い(48bit と 53bit)ことによる 1 から 2 桁の精度劣化による解の精度への影響を調査する。図 4.4-12 に、CPU での倍精度演算により得られた解と GPU での擬似倍精度から得られた解の違いを示す。この違いは、丸め誤差の増大を引き起こす行列の条件数に影響される。そのため、図は条件数の予測値に対してプロットしてある。予測されるとおり、15 桁目以降の丸め誤差の増大により、擬似倍精度と倍精度の参照実装で共通する桁数は $15 - \log_{10} \text{cond}$ (cond は行列の条件数)となっている。これは倍精度実装より 1 桁少ない。ここで、参照した倍精度実装は CPU での実装だが、図中の倍精度は GPU 上での実装である。これらは同じ精度だが、演算の順番が違うために 17 桁目以降の結果が異なる。この誤差に条件数を掛けたものが結果の違いとして現れる。

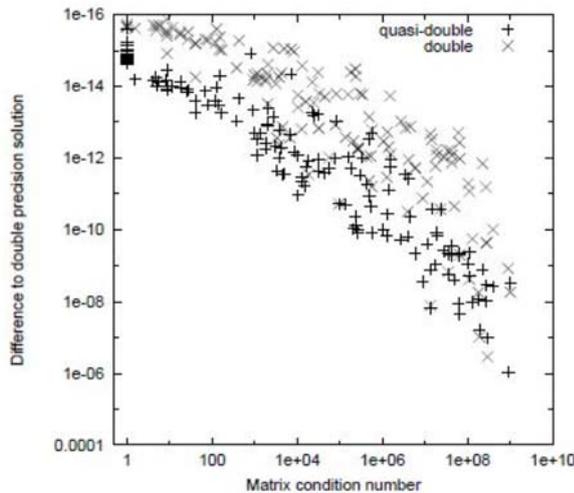


図 4.4-12. CPU での倍精度演算により得られた解と GPU での擬似倍精度から得られた解の違い。

⑧ 混合精度ソルバーのパフォーマンス評価 [81]

本研究においては、CG 法を構成する基本的なカーネル性能をボトムアップに検討し、その後、複数の CPU コアや複数の GPU にスケールアップし、更に複数ノードまでスケールアウトした。続けて、ソルバー全体についてボードレベルからノードレベル、クラスタレベルまで評価を実施した。性能評価のためのベンチマーク用行列は、フロリダ大学行列コレクション (University of Florida's Sparse Matrix Collection, UFS-PARSE) から選択した。行列は3つのカテゴリに分類した。

- small: 非ゼロ要素数 10^5 以下
- medium: 非ゼロ要素数 $10^5 \sim 10^7$. (倍精度でも 1 個の GPU に収まる大きさ)
- large: 非ゼロ要素数 10^7 以上. (3 個の GPU (1 ノード) に倍精度でも収まる大きさ)

BLAS1 として、CPU については Intel MKL 11, GPU については NVIDIA CUBLAS を用い、SPMV については独自の実装を用いた。

内積演算についての例を述べる。内積演算では、長さ n の2つのベクトルに対し、双方の要素1つずつ 2 ワードをロードし、2 回の浮動小数点演算を行う。演算・データ量の比は 1flop/word であり、この演算はメモリ転送速度にほとんど依存することがわかる。実行性能は、全体の浮動小数点演算数 ($2n$) を、全体の実行時間で割ることで求める。CPU での実行性能を図 4.4-13 に示す。データ量が大きくなるに連れてキャッシュヒットするデータ量が減少し、性能はメモリの速度から求められる性能まで落ちていくことが分かる。図 4.4-14 は、GPU でのテスト結果を示している。ベクトルサイズが大きくなると、その豊富なバンド幅により GPU 上での性能はオーダー単位で CPU より大きくなる。内積演算のカーネルは、規則的なメモリアクセス(ストライド 1)のために GPU のメモリ性能をフルに使うことができる。また、ここ以外の GPU 性能データでも見られるように、問題が大きくなるにつれて性能が向上することがわかる。このことはキャッシュベースのアーキテクチャの場合と真逆である。GPU のグローバルメモリへの遅いアクセスを隠蔽し、多くの演算を行えるおかげである。

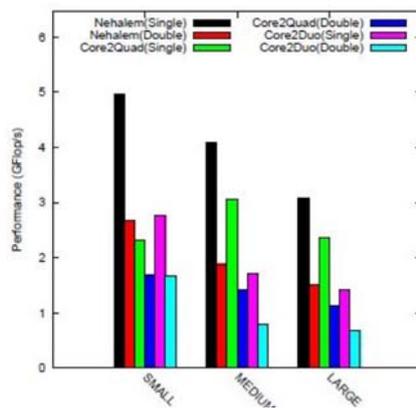


図 4.4-13. CPU での実行性能、内積演算。

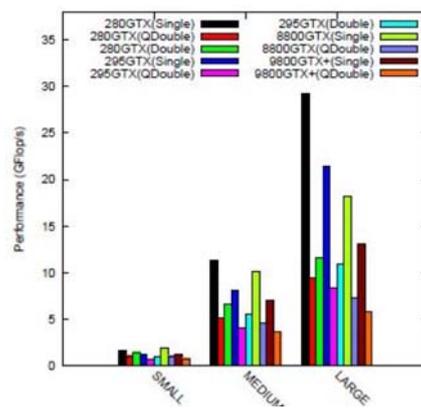


図 4.4-14. GPU での実行性能、内積演算。

同じハードウェアでも、疎行列ベクトル積(SPMV)の性能は疎行列の格納形式に強く依存する。この傾向は、GPU のような広いバンド幅を持つアーキテクチャの場合には更に強くなる。単純な CSR, padded CSR, hybrid ELL-CSR の格納形式を図 4.4-15 に示す。

GPU についての SPMV の性能差を図 4.4-16 に示す。padded CSR は、単純な CSR よりかなり高い性能を示すが、ELL-CSR hybrid には遠く及ばない。全ての GPU 上での hybrid

format での性能を図 4.4-17 に示す。このグラフの目的は性能の傾向を示すためであり、全ての GPU でサポートされている単精度演算に絞っている。

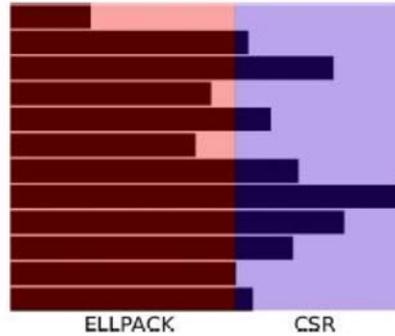


図 4.4-15. 疎行列の格納形式。hybrid ELL-CSR では規則的な部分が ELL フォーマット、残りの部分が padded CSR で格納される。

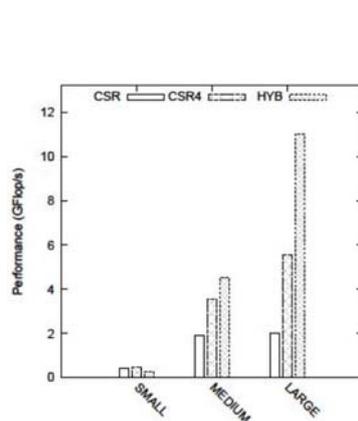


図 4.4-16. 様々な格納形式での、GPU での実行性能。

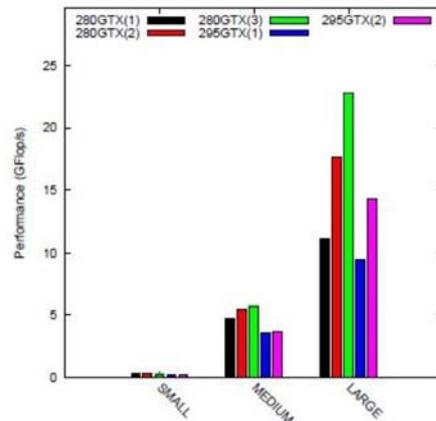


図 4.4-17. 様々な GPU での SPMV 実行性能。

テストした全ての CPU, GPU について、CG 法全体の性能を図 4.4-18 に示す。単精度の性能に加えて、サポートされているものについては倍精度の性能を、そうでないものについては擬似倍精度の性能を載せている。295GTX で2つの GPU を使ったものが最も高い性能を示している。注意すべきは、使用中で最も安い GPU である 9800GTX+でさえ、擬似倍精度の性能が、現状最も高性能な Intel の CPU である Nehalem で全コア使用したものより速いという点である。Nehalemと Core2Quadでそれぞれ4コアずつ使った場合の比較と、280GTX と 295GTX の比較とを図 4.4-19 に示す。大きなサイズの問題に対しては、295GTX は Nehalem の 7 倍、Core2Quad の 16 倍の性能を見せている。

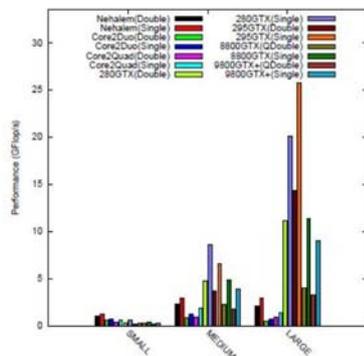


図 4.4-18. 全ての CPU, GPU における CG 法の性能。

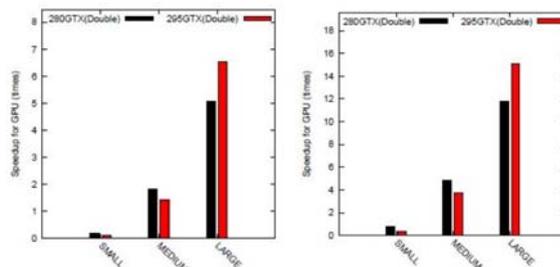


図 4.4-19. CPU(左:Nehalem, 右:Core2Quad) に対する GPU の CG 法のスピードアップ。

(2)研究成果の今後期待される効果

奥田・中島グループが開発したライブラリ、ツール群は、有限要素法、差分法等にもとづく科学技術計算手法に直接適用可能である。特に、数値計算ライブラリは、メッセージパッシングとマルチスレッドを組み合わせたハイブリッド並列プログラミングモデル向けに開発されたアルゴリズムに基づいている。したがって、ペタスケールの計算環境は言うまでも無く、特にエクサスケールに向けてのポスト・ペタスケール環境で主流となっていくと見られる、マルチコア+メニーコア、GPU の複合型並列環境においても適用可能である。ハイブリッド並列プログラミングモデルを使用し、悪条件問題に対応した並列反復法ライブラリは、まだ世界にも例が無く様々な大規模アプリケーションへの適用が期待される。

§ 5 成果発表等

(1)原著論文発表 (国内(和文)誌25件, 国際(欧文)誌64件)

- [1] Fukahata, Y. and M. Matsu'ura, Quasi-static internal deformation due to a dislocation source in a multilayered elastic/viscoelastic half-space and an equivalence theorem, *Geophys. J. Int.* 166, 418-434, 2006.
- [2] Hashimoto, C. and M. Matsu'ura, 3-D simulation of tectonic loading at convergent plate boundary zones: Internal stress fields in northeast Japan, *Pure appl. geophys.*, 163, 1803-1817, 2006.
- [3] Hori, M., T. Ichimura, H. Nakamura, A. Wakai, T. Ebisawa, and N. Yamaguchi, Integrated earthquake simulator for seismic response analysis of structure set in city, *Structural Eng./Earthquake Eng.*, 23, No.2, 297-306, doi:10.2208/jscesee.23.297s, 2006.
- [4] Hori, M., T. Ichimura, and K. Oguni, Development of integrated earthquake simulation for estimation of strong ground motion, structural responses and human actions in urban areas, *Asian Journal of Civil Engineering (Building and Housing)*, 7, No.4, 381-392, 2006.
- [5] Ichimura, T. and M. Hori, Macro-micro analysis method for wave propagation in stochastic media, *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 35, 419-432, doi:10.1002/eqe.533, 2006.
- [6] Ichimura, T. and M. Hori, Strong ground motion prediction using macro-micro analysis method, *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 35, 395-417, doi:10.1002/eqe.532, 2006.
- [7] 古村孝志, 関東平野での長周期地震動の生成メカニズム, *日本鋼造協会誌*, 60, 16-18, 2006.
- [8] 古村孝志・早川俊彦・瀬瀬一起・馬場俊孝・中村操, 1944年東南海地震の強震動シミュレーションと関東平野の長周期地震動, *月刊地球*, 55, 130-137, 2006.
- [9] 中島研吾, GeoFEM ベンチマークによる Hitachi SR11000/J1 および IBM p5-595 のノード性能評価, *情報処理学会研究報告 2006-HPC-105-11*, 61-66, 2006.
- [10] 中島研吾, 不均質場におけるマルチレベル解法, *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 HPCS2006 予稿集*, 95-102, 2006.
- [11] 中島研吾・陳莉, ボクセル型背景格子を使用した大規模並列可視化手法, *情報処理学会研究報告 (HPC-107)*, 91-96, 2006.
- [12] Matsu'ura, M., A. Noda, and Y. Fukahata, Geodetic data inversion based on Bayesian formulation with direct and indirect prior information, *Geophys. J. Int.*, 171, 1342-1351, 2007.
- [13] Takada, Y. and M. Matsu'ura, Geometric evolution of a plate interface-branch fault system: Its effects on tectonic development in Himalaya, *J. Asian Earth Sciences* 29, 490-503, 2007.
- [14] Takada, Y., Y. Fukahata, A. Hashima, T. Terakawa, K. Fukui, T. Yanagisawa, Y. Ikeda, G. Kimura, and M. Matsu'ura, Development of 3-D basement structure in Taiwan deduced from past plate motion: Consistency with the present seismicity, *Tectonics*, 26, doi:10.1029/2006TC001957, 2007.
- [15] Ozawa, S., T. Imakiire, and M. Murakami, Spatiotemporal evolution of aseismic

- interplate slip between 1996 and 1998 and between 2002 and 2004, in Bungo channel, southwest Japan, *J. Geophys. Res.*, 112, B05409, doi: 10.1029/2006JB004643, 2007.
- [16] Fukuyama, E., Fault structure, stress, friction and rupture dynamics of earthquakes, *Advances in Earth Sciences: From Earthquakes to Global Warming*, Imperial College Press, London, 109-132, 2007.
- [17] Furumura, T. and T. Hayakawa, Anomalous propagation of long-period ground motions recorded in Tokyo during the 23 October 2004 Mw6.6 Niitgata-ken Chuetsu, Japan earthquake, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 97, 3, 863-880, doi: 10.1785/0120060166, 2007.
- [18] Ichimura, T., M. Hori, and H. Kuwamoto, Earthquake motion simulation with multi-scale finite element analysis on hybrid grid, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 97, 4, 1133-1143, 2007.
- [19] Nakajima, K., The impact of parallel programming models on the linear algebra performance for finite element simulations, *Lecture Notes in Computer Science* 4395, 334-348, 2007.
- [20] Nakajima, K., Parallel preconditioning methods with selective fill-ins and selective overlapping for ill-conditioned problems in finite-element methods, *Lecture Notes in Computer Science* 4489, 1085-1092, 2007.
- [21] Nakajima, K., Parallel multistage preconditioners based on a hierarchical graph decomposition for SMP cluster architectures with a hybrid parallel programming model, *Lecture Notes in Computer Science* 4782, 384-395, 2007.
- [22] Nakajima, K., Strategies for automatic selection of parameters in parallel preconditioning methods for ill-conditioned problems in finite-element applications, *Proceedings of The Second International Workshop on Automatic Performance Tuning (iWAPT2007)*, 53-62, 2007.
- [23] 福山英一, 地震の動的破壊とアスペリティ, 月刊地球, 29, No.6, 392-396, 2007.
- [24] 古村孝志・竹内宏之, 首都圏直下の地震と強震動—安政江戸地震と明治東京地震, 地学雑誌, 116, 3, 431-450, 2007.
- [25] 古村孝志・武村俊介・早川俊彦, 2007年新潟県中越沖地震(M6.8)による首都圏の長周期地震動, 地学雑誌, 116, 3, 576-587, 2007.
- [26] 村岡雅江・奥田洋司, Cluster-of-Clusters 環境における有限要素解析の実用性評価, 日本機械学会論文集(A編), Vol.73, No.733, 981-988, 2007.
- [27] 中島研吾・長嶋利夫・江連真一・市村強・奥田洋司, M×N 通信による大規模連成シミュレーション, 情報処理学会研究報告 (HPC-109), 215-220, 2007.
- [28] 中島研吾, 階層領域分割によるマルチステージ並列前処理手法へのハイブリッド並列プログラミングモデルの適用, 情報処理学会研究報告 (HPC-110), 25-30, 2007.
- [29] Terakawa, T. and M. Matsu'ura, CMT data inversion using a Bayesian information criterion to estimate seismogenic stress fields, *Geophys. J. Int.*, 172, 674-685, 2008.
- [30] Hashima, A., Y. Takada, Y. Fukahata, and M. Matsu'ura, General expressions for internal deformation due to a moment tensor in an elastic/viscoelastic multilayered half-space, *Geophys. J. Int.*, 175, 992-1012, 2008.
- [31] Hashima, A., Y. Fukahata, and M. Matsu'ura, 3-D simulation of tectonic evolution of the Mariana arc-back-arc system with a coupled model of plate subduction and back-arc spreading, *Tectonophysics*, 458, 127-136, 2008.
- [32] Hashimoto, C. and M. Matsu'ura, 3-D simulation of steady plate subduction with tectonic erosion: Current crustal uplift and free-air gravity anomaly, *Pure appl. geophys.*, 165, 567-583, 2008.
- [33] Furumura, T., Hayakawa, M., Nakamura, K. Koketsu, and T. Baba, Development of long-period ground motions from the Nankai Trough, Japan, earthquakes: Observations and computer simulation of the 1944 Tonankai (Mw8.1) and the 2004 SE Off-Kii Peninsula (Mw7.4) Earthquakes, *Pure appl. geophys.*, 165, 585-607, doi:10.1007/s00024-008-0318-8, 2008.
- [34] Saito, T. and T. Furumura, Scattering of linear long-wave tsunamis due to randomly fluctuating sea-bottom topography: Coda excitation and scattering attenuation, *Geophys. J. Int.*, 177, 958-965, doi: 10.1111/j.1365-246X.2009.03988.x, 2008.
- [35] Hori, M. and T. Ichimura, Current state of integrated earthquake simulation for

- earthquake hazard and disaster, *J. Seismology*, 12, No.2, 307-321, doi:10.1007/s10950-007-9083-x, 2008.
- [36] Kushida, N. and H. Okuda, Optimization of the parallel finite element method for the Earth Simulator, *Journal of Computational Science and Technology*, 2, No.1, 81-91, 2008.
- [37] Shinohara, K., H. Okuda, S. Ito, N. Nakajima, and M. Ida, Shape optimization using adjoint variable method for reducing drag in stokes flow, *International Journal for Numerical Methods in Fluids* 2008, 58, 119-159, 2008.
- [38] Suzuki, M. and H. Okuda, Fragment replica-exchange method for efficient protein conformation sampling, *Molecular Simulation*, 34, No.3, 267-275, 2008.
- [39] Li Chen and H. Okuda, High-performance parallel visualization library for carious simulation environments, *International Journal of Computational Methods*, 5, No.2, 273-287, 2008.
- [40] Suzuki, M. and H. Okuda, Acceleration of biomolecular dynamics simulations on the Earth Simulator, *International Journal of Computational Methods*, 5, No.2, 319-327, 2008.
- [41] Nakajima, K., Sparse approximate inverse preconditioner for contact problems on the Earth Simulator using OpenMP, *International Journal of Computational Methods* 5, No.2, 255-272, 2008.
- [42] Nakajima, K., Parallel multistage preconditioners by hierarchical interface decomposition on “T2K Open Super Computer (Todai Combined Cluster)” with hybrid parallel programming models, *Proceedings of the 2008 IEEE International Conference on Cluster Computing (Cluster 2008)*, 298-303, 2008.
- [43] 中島研吾, GeoFEM ベンチマークによる Hitachi SR11000/J2 の性能評価, *情報処理学会研究報告 (HPC-114)*, 205-210, 2008.
- [44] 市村強・山木洋平・堀宗朗, 階層型解析による断層-構造物系を考慮した構造物の地震時挙動予測手法, *応用力学論文集 JSCE*, 11, 641-646, 2008.
- [45] 中島研吾, 階層型領域分割による並列多重格子法, 「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 HPCS2008」論文集, 115-122, 2008.
- [46] 中島研吾, 六面体メッシュの適合型並列局所細分化と負荷分散, *情報処理学会研究報告 (HPC-116)*, 163-168, 2008.
- [47] Terakawa, T. and M. Matsu'ura, Strength of the San Andreas Fault inferred from tectonic loading simulation and CMT data inversion, *Geophys. J. Int.*, 178, 1663-1676, doi:10.1111/j.1365-246X.2009.04207.x, 2009.
- [48] Llenos, A.L., J.J. McGuire, and Y. Ogata, Modeling seismic swarms triggered by aseismic transients, *Earth & Planetary Sci. Lett.*, 281, 59-69, 2009.
- [49] Hashimoto, C., A. Noda, T. Sagiya, and M. Matsu'ura, Interplate seismogenic zones along the Kuril-Japan trench inferred from GPS data inversion, *Nature Geoscience*, 2, 141-144, doi:10.1038/ngeo421, 2009.
- [50] Fukuyama, E., R. Ando, C. Hashimoto, S. Aoi, and M. Matsu'ura, A physics-based simulation of the 2003 Tokachi-oki, Japan, earthquake to predict strong ground motions, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 99, 3150-3171, doi:10.1785/0120080040, 2009.
- [51] Fukuyama, E., Introduction: Fault-zone properties and earthquake rupture dynamics, in *Fault-zone Properties and Earthquake Rupture Dynamics*, International Geophysics Series Vol. 94, Elsevier Co. Ltd., 1-13, 2009.
- [52] Fukuyama, E., Dynamic rupture propagation of the 1995 Kobe, Japan, earthquake, in *Fault-zone Properties and Earthquake Rupture Dynamics*, International Geophysics Series Vol. 94, Elsevier Co. Ltd., 269-283, 2009.
- [53] Furumura, T. and B.L.N. Kennett, A scattering waveguide in the heterogeneous subducting plate, *Advances in Geophysics*, Scattering of Short-Period Seismic Waves in Earth Heterogeneity, eds. H. Sato and M. Fehler, Elsevier, 195-217, 2009.
- [54] Furumura, T. and T. Saito, Integrated ground motion and tsunami simulation for the 1944 Tonankai earthquake using high-performance super computers, *J. Disaster Res.*, 4, 118-126, 2009.

- [55] Saito, T. and T. Furumura, Scattering of linear long-wave tsunamis due to randomly fluctuating sea-bottom topography: Coda excitation and scattering attenuation, *Geophys. J. Int.*, 177, 958-965, doi:10.1111/j.1365-246X.2009.03988.x, 2009.
- [56] Saito, T. and T. Furumura, Three-dimensional tsunami generation simulation due to sea-bottom deformation and its interpretation based on the linear theory, *Geophys. J. Int.*, 178, 877-888, doi:10.1111/j.1365-246X.2009.04206.x, 2009.
- [57] Saito, T. and T. Furumura, Three-dimensional simulation of tsunami generation and propagation: Application to intraplate events, *J. Geophys. Res.*, 114, B02307, doi:10.1029/2007JB005523, 2009.
- [58] Ichimura, T., M. Hori, and J. Bielak, A hybrid multiresolution meshing technique for finite element three-dimensional earthquake ground motion modeling in basins including topography, *Geophys. J. Int.*, 177, 1221-1232, doi: 10.1111/j.1365-246X.2009.04154.x, 2009.
- [59] Ichimura, T. and M. Hori, Structural seismic response analysis based on multiscale approach of computing fault-structure system, *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 38, 439-455, doi: 10.1002/eqe.861, 2009.
- [60] Nagashima, T., Sloshing analysis of a liquid storage container using the level set X-FEM, *Communications in Numerical Methods in Engineering*, 25, 357-379, doi:10.1002/cnm.1122, 2009.
- [61] Muraoka, M. and H. Okuda, Feasibility study of parallel finite element analysis on cluster-of-clusters, *Journal of Computational Science and Technology*, 3, 77-88, 2009.
- [62] Nakajima, K., Flat MPI vs. Hybrid: Evaluation of parallel programming models for preconditioned iterative solvers on "T2K Open Supercomputer", *IEEE Proceedings of the 38th International Conference on Parallel Processing (ICPP-09)*, 73-80, doi:10.1109/ICPPW.2009.68, 2009.
- [63] Nakajima, K., Strategies for preconditioning methods of parallel iterative solvers in finite-element applications on geophysics, *Advances in Geocomputing, Lecture Notes in Earth Science*, 119, 65-118, 2009.
- [64] 寺川寿子・松浦充宏, 地震学における応力インバージョンの新展開:CMT データインバージョン法による応力場の推定, *地震第2輯*, 61, S339-S346, 2009.
- [65] 福山英一, 地震の動的破壊パラメータ, *地震第2輯*, 61, S309-S314, 2009.
- [66] 古村孝志, 差分法による3次元不均質場での地震波伝播の大規模計算, *地震第2輯*, 61, S83-S92, 2009.
- [67] 今井健太郎・佐竹健治・古村孝志, 南海トラフで発生する地震による四国南部沿岸での津波継続時間, *土木学会論文集 B2*, 65, 281-285, 2009.
- [68] 佐藤陽平・奥田洋司, Seed Methods による確率有限要素法の効率化, *日本応用数理学会論文誌*, 19, 39-55, 2009.
- [69] 中島研吾, マルチコアクラスタにおける有限要素法アプリケーションのための階層型領域間境界分割に基づく並列前処理手法, *情報処理学会研究報告 (HPC-119-18)*, 103-108, 2009.
- [70] 中島研吾・片桐孝洋, マルチコアプロセッサにおけるリオーダーリング付き非構造格子向け前処理付反復法の性能, *情報処理学会研究報告*, 2009-HPC-120, 2009.
- [71] Noda, A. and M. Matsu'ura, Physics-based GPS data inversion to estimate 3-D elastic and inelastic strain fields, *Geophys. J. Int.*, 182, 513-530, doi:10.1111/j.1365-246X.2010.04611.x, 2010.
- [72] Terakawa, T. and M. Matsu'ura, 3-D tectonic stress fields in and around Japan inverted from CMT data of seismic events, *Tectonics*, doi:10.1029/2009TC002626, 2010.
- [73] Terakawa, T., A. Zoporowski, B. Glavan, and S. Miller, High-pressure fluid at hypocentral depths in the L'Aquila region inferred from earthquake focal mechanisms, *Geology*, 38, 995-998, doi:10.1130/G31457.1, 2010.
- [74] Ogata, Y. and S. Toda, Bridging great earthquake doublets through silent slip: On- and off-fault aftershocks of the 2006 Kuril Island subduction earthquake toggled by a slow slip on the outer-rise normal fault the 2007 great earthquake, *J. Geophys. Res.*, doi:10.1029/2009JB006777, 2010.

- [75] Saito, T., K. Satake, and T. Furumura, Tsunami waveform inversion including dispersive waves: The 2004 off Kii Peninsula earthquake, *J. Geophys. Res.*, 115, doi:10.1029/2009JB006884, 2010.
- [76] Kennett, B.L.N. and T. Furumura, Tears or thinning? Subduction structures in the Pacific plate beneath the Japanese Island, *Phys. Earth Planet. Inter.*, doi:10.1016/j.pepi.2010.03.001, 2010.
- [77] Imai, K., K. Satake and T. Furumura, Amplification of tsunami heights by delayed rupture of great earthquakes along the Nankai trough, *Earth Planet. Sci.*, 62, 427-432, 2010.
- [78] Quinay, P.E., S. Noguchi, M.L.L. Wijerathne, T. Ichimura, and M. Hori, An inversion scheme to improve the accuracy of earthquake source parameters for predicting responses in higher frequencies, *J. Appl. Mech.*, No.6-14, JSCE, 13, 2010.
- [79] Georgescu, S. and H. Okuda, Automatically tuned mixed-precision conjugate gradient solver, software automatic tuning: From concepts to the state-of-the-art results, eds. K. Naono, K. Teranishi, J. Cavazos and R. Suda, 103-119, Springer, 2010.
- [80] Hayashi, M. and H. Okuda, Communication cost reduction by hierarchical communication pattern for FE computation on cluster-of-clusters, Special Issue on Computational Mechanics Conference 2009, *Journal of Computational Science and Technology*, 4, No.2, 136-146, 2010.
- [81] Georgescu, S. and H. Okuda, Conjugate gradients on multiple GPUs, *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, 64, 1254-1273, 2010.
- [82] Georgescu, S. and H. Okuda, Conjugate gradients on graphic hardware: Performance & feasibility, *Lecture Notes in Computer Science*, 2010 (in press).
- [83] Nakajima, K., Parallel multistage preconditioners by extended hierarchical interface decomposition for ill-conditioned problems, *Advances in Parallel Computing*, Vol.19 "From Multicores and GPU's to Petascale", 99-106, IOS press, 2010.
- [84] Nakajima, K., Parallel multigrid solvers using OpenMP/MPI hybrid programming models on multi-core/multi-socket clusters, 9th International Meeting High Performance Computing for Computational Science (VECPAR 2010), 2010 (accepted as a paper for post-conference special issue by *Lecture Notes in Computer Science*, Springer).
- [85] Hosoi, A., T. Washio, J. Okada, J. Kadooka, K. Nakajima, and T. Hisada, A multi-scale heart simulation on massively parallel computers, *ACM/IEEE Proceedings of SC10*, 2010 (in press).
- [86] 中島研吾, OpenMP/MPI ハイブリッド並列プログラミングモデルの多重格子法への適用, *情報処理学会研究報告*, 2009-HPC-124-7, 2010.
- [87] 中島研吾, 拡張階層型領域間境界分割に基づく悪条件問題向け並列前処理手法, 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(HPCS2010)論文集, 91-98, 2010.
- [88] Hok, S. and E. Fukuyama, A new BIEM for rupture dynamics in half-space and its application to the 2008 Iwate-Miyagi Nairiku earthquake, *Geophysical Journal International*, 184, 301-324, doi:10.1111/j.1365-246X.2010.04835.x, 2011.
- [89] 中島研吾, マルチコア時代の並列前処理手法, 京都大学数理解析研究所講究録 1733 「科学技術計算アルゴリズムの数理的基盤と展開」, 1-10, 2011 (in press).

(2) その他の著作物(総説, 書籍など)

- [1] Takashi Furumura, Visualization of seismic wavefields and strong ground motions using data from a nationwide strong-motion network and large-scale computer simulation, eds. L.A. Mendes-Victor et al., *The 1755 Lisbon Earthquake: Revisited*, Geotechnical, Geological, and Earthquake Engineering, Vol.7, 257-272, Springer, 2008.
- [2] 古村孝志, 地球シミュレータによる地震の強い揺れと津波の予測・災害軽減, *計算工学*, Vol.13, No.2, 14-17, 2008.
- [3] 古村孝志, 関東平野で成長する長周期地震動, *Japan Geoscience Letters*, Vol.4, No.2, 5-7, 2008.
- [4] 古村孝志, 大地震により生まれる長周期地震動のコンピュータシミュレーション, *岩波科*

- 学, Vol.78, No.10, 1-7, 2008.
- [5] 古村孝志, 大地震の強震動シミュレーション, 自然災害科学, Vol.27, No.3, 265-272, 2008.
- [6] 古村孝志, 地震波伝播と強震動の大規模並列 FDM シミュレーション, スーパーコンピューティングニュース, 東京大学情報基盤センター, Vol.10, 2009.
- [8] 古村孝志・齊藤竜彦, 地震一津波連成シミュレーション, 日本計算工学会編, 計算工学シミュレーションハンドブック, 1.5 節, 丸善出版, 2009.
- [9] 古村孝志・今井健太郎・齊藤竜彦, 南海トラフ連動型巨大地震による地震動と津波の予測, 月刊地球, 2009.
- [10] 古村孝志, 津波発生伝播の大規模3次元シミュレーション, スーパーコンピューティングニュース, 東京大学情報基盤センター, Vol.12, 2010.

(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21件, 国際会議33件)
- [1] 市村強・堀宗朗・佐茂隆洋, 高度震災情報生成を目指した統合地震シミュレータの開発, 第 19 回数値流体力学シンポジウム, 京都, 2005.12.
- [2] Matsu'ura, M., ACES-related research in Japan: Reproducing core-mantle dynamics and predicting crustal activities through advanced computing, 5th ACES International Workshop, Maui, USA, 2006.04.
- [3] Nakajima, K., Scalability of GeoFEM on BG/L prototype, The 3rd BG/L Systems Software and Applications Workshop, CBRC/AIST, Tokyo, Japan, 2006.04.
- [4] Noda, A. and M. Matsu'ura, Interplate coupling beneath the Kanto region, central Japan, inferred from geodetic data inversion, Kanto Asperity Workshop, Hayama, Japan, 2006.08.
- [5] 中島研吾, 並列プログラミングモデルと有限要素法向け反復法ソルバーの性能, 先駆的科学的計算に関するフォーラム 2006, 福岡, 2006.08.
- [6] 中島研吾, Opteron クラスタにおける並列有限要素法コードの性能評価とマルチコアプロセッサへの期待, 第 45 回超並列計算研究会, 東京, 2006.09.
- [7] 古村孝志・早川俊彦・瀬戸一樹・馬場俊孝・金田義行・中村操, 南海トラフ地震と長周期地震動, 日本地震学会秋季大会, 名古屋, 2006.10.
- [8] Nakajima, K., An integrated predictive simulation system for earthquake and tsunami disasters, NERSC Scientific Computing Seminar, Lawrence Berkeley National Laboratory, Berkeley, USA, 2006.12.
- [9] Nakajima, K., The GeoFEM benchmarks for the parallel finite element method on NERSC computers, NERSC Scientific Computing Seminar, Lawrence Berkeley National Laboratory, Berkeley, USA, 2006.12.
- [10] 松浦充宏・野田朱美・橋本千尋, 関東地域の測地データインバージョン解析の結果とその地震発生論的意味, シンポジウム: 房総半島周辺のテクトニクス—最近の成果からの新展開—, 千葉, 2007.02.
- [11] 中島研吾・古村高志・市村強・齊藤竜彦・堀宗朗, 地震, 津波シミュレーションと大規模可視化, 第 56 回理論応用力講演会 PD2「大規模シミュレーションと大規模可視化」, 東京, 2007.03.
- [12] Fukuyama, E., C. Hashimoto, S. Aoi, and M. Matsu'ura, Integrated simulation of plate subduction, earthquake dynamic rupture and wave propagation, European Geosciences Union General Assembly 2007, Vienna, Austria, 2007.04.
- [13] 松浦充宏・野田朱美・橋本千尋・深畑幸俊, 関東地域の測地データインバージョン解析: 基本概念, 結果, 及び解釈, 日本地球惑星科学連合 2007 年大会, 幕張メッセ, 2007.05.
- [14] 古村孝志, 首都圏の地震と強震動シミュレーション, 日本地球惑星科学連合 2007 年大会, 幕張メッセ, 2007.05.
- [15] Nakajima, K., Integrated predictive simulation system for earthquake and tsunami

- disaster: Contributions from the HPC community, 2007 Workshop on Community Finite Element Models for Fault Systems and Tectonic Studies, Golden, USA, 2007.06.
- [16] Nakajima, K., Parallel programming models for finite-element applications on SMP cluster architectures, Fourth International Conference of Applied Mathematics and Computing, Plovdiv, Bulgaria, 2007.08.
 - [17] Nakajima, K., Hybrid vs. Flat MPI: Parallel programming models in multi-core era, Second Korea-Japan Workshop on Computational Engineering, Seoul, Korea, 2007.09.
 - [18] Saito, T. and T. Furumura, An integrated simulation of seismic wave and tsunami propagation, SIAM 13th Conference on Parallel Processing for Scientific Computing (PP08): Multi-Physics Frameworks and Applications Part-I, Atlanta, USA, 2008.03.
 - [19] Nagashima, T., K. Nakajima, S. Ezure, M. Matsumoto, T. Ichimura, and H. Okuda, Large scale coupling simulations through MXN parallel data redistribution, SIAM 13th Conference on Parallel Processing for Scientific Computing (PP08): Multi-Physics Frameworks and Applications Part-I, Atlanta, USA, 2008.03.
 - [20] Nakajima, K., Automatic selection of parameters in parallel preconditioners for ill-conditioned problems, SIAM 13th Conference on Parallel Processing for Scientific Computing (PP08): A Auto-tuning on Numerical Libraries and Advanced Computer Systems Part-II, Atlanta, USA, 2008.03.
 - [21] Nakajima, K., Hybrid vs. Flat MPI?: Experiences in preconditioned iterative linear solvers for unstructured grids, SIAM 13th Conference on Parallel Processing for Scientific Computing (PP08): Algorithms and Optimizations Targeting Multi-Core Architectures Part-II, Atlanta, USA, 2008.03.
 - [22] Matsu'ura, M., ACES ISB Member Report: Japan, 6th ACES International Workshop, Cairns, Australia, 2008.05.
 - [23] Nakajima, K., Early experiences in "T2K Open Super Computer (Todai Combined Cluster)" with AMD Quad-Core Opteron processors, NERSC Scientific Computing Seminar, Lawrence Berkeley National Laboratory, Berkeley, USA, 2008.06.
 - [24] Furumura, T., Large scale computer simulation of Kobe earthquake using the Earth Simulator, International Symposium on Structures under Earthquake, Impact, and Blast Loading, Osaka, Japan, 2008.10.
 - [25] 松浦充宏, 応力蓄積-解放過程としての地震発生サイクル, 京大防災研共同利用研究集会「地震発生前の物理: 先行現象に迫る」, 京都大学防災研究所, 宇治, 2008.10.
 - [26] Matsu'ura, M., Integrated predictive simulation system for earthquake generation in and around Japan, 7th General Assembly of Asian Seismological Commission, Tsukuba, Japan, 2008.11.
 - [27] Matsu'ura, M., A. Noda, T. Terakawa, C. Hashimoto, and E. Fukuyama, Modeling and monitoring for predictive simulation of earthquake generation in the Japan region, AGU 2008 Fall Meeting, San Francisco, USA, 2008.12.
 - [28] Nakajima, K., Strategy of domain partitioning for parallel preconditioned iterative solvers in the multi-core era, 5th GSIC International Symposium (Leading Studies on Computational Mechanics), Tokyo, Japan, 2008.12.
 - [29] 中島研吾, 人材育成も視野に: スーパーコンピューティング・ミドルウェアの開発, IBM 天城 HPC セミナー2008「Expect Unexpected - 大規模アプリケーションと大規模システムの Collaboration」, 天城, 2008.12.
 - [30] Fukuyama, E., and K. Mizoguchi, Constitutive parameters for earthquake rupture dynamics, IUTAM Symposium: Dynamic Fracture and Fragmentation, Austin, USA, 2009.03.
 - [31] Nakajima, K., T. Furumura, T. Ichimura, T. Nagashima, H. Okuda, and T. Saito, Coupled simulations in integrated predictive simulation system for earthquake and tsunami disaster, SIAM Conference on Computational Science and Engineering (CSE09): Multiphysics Modeling: Frameworks and Applications Part-I, Miami, USA, 2009.03.
 - [32] Nakajima, K., Robust and efficient parallel preconditioning methods with hierarchical interface decomposition for multicore architectures, SIAM Conference on Computational Science and Engineering (CSE09): Current Auto-tuning Challenges:

- Multicore Architecture and Crucial Algorithms Part-II, Miami, USA, 2009.03.
- [33] Nakajima, K., Optimization of preconditioned parallel iterative solvers for finite-element applications using hybrid parallel programming models on “T2K Open Supercomputer (Tokyo)”, The 11th International Specialist Meeting on Next Generation Models on Climate Change and Sustainability for High Performance Computing Facilities, Oak Ridge, USA, 2009.03.
 - [34] 中島研吾, 並列前処理手法と領域分割, マルチコア時代の戦略, 分野横断型研究会「アルゴリズムによる計算科学の融合と発展」, 筑波大学計算科学研究センター, 筑波, 2009.04.
 - [35] Furumura, T., Large-scale parallel simulation of strong ground motion using the Earth Simulator, 1999 Chi-Chi, Taiwan, Earthquake Symposium, Taipei, Taiwan, 2009.05.
 - [36] 松浦充宏, 地球物理データの逆解析: 最小自乗法からベイジアンアプローチまで, 日本地球惑星科学連合 2009 年大会, 幕張メッセ, 2009.05.
 - [37] 古村孝志, 地震と津波の大規模数値シミュレーション, T2K シンポジウム 09 in Tsukuba, 筑波, 2009.05.
 - [38] 古村孝志, 東海地震による強震動と津波の予測, 2009 年震災対策技術展セミナー, 静岡, 2009.06.
 - [39] Matsu'ura, M., C. Hashimoto, and E. Fukuyama, Integrated predictive simulation system for earthquake generation in japan, International Symposium on Earthquake Seismology and Earthquake Predictability, Beijing, China, 2009.07.
 - [40] 中島研吾, 大学におけるスーパーコンピューティング「共同利用・共同研究拠点」時代を迎えて, 日本 IBM 科学技術計算ソリューションセミナー, 天城, 2009.08.
 - [41] Furumura, T., Strong ground motion and tsunami simulation for the Nankai-trough mega-thrust earthquake using supercomputers, 10th Memorial Chi-Chi, Taiwan, Earthquake, Taipei, Taiwan, 2009.09.
 - [42] Furumura, T., Large-scale parallel simulation of strong ground motion and tsunami due to the Nankai-trough megathrust earthquakes using the Earth Simulator, Tera FLOP Workshop, Sendai, Japan, 2009.10.
 - [43] Okuda, H., GPGPU cluster computing for Krylov solvers, BICTAM International Symposium on Meshless/Meshfree and Generalized/Extended Finite Element Methods, Nanjing, China, 2009.10.
 - [44] 古村孝志, 東南海・南海地震の連動発生による地震と津波の評価, 日本機械学会関西支部フォーラム, 大阪, 2009.10.
 - [45] 古村孝志, 東海・東南海・南海地震の連動発生による地震と津波の予測, 損害保険算出機構 2009 年災害研究フォーラム, 東京, 2009.10.
 - [46] 福山英一, 地震の動的破壊伝播と断層強度不均質, ワークショップ「地震波によらない地震学」, 京都大学防災研究所, 2009.11.
 - [47] 古村孝志, 地球シミュレータで予測する東海・東南海・南海地震の強い揺れと津波, 第 7 回地球シミュレータシンポジウム, 東京, 2009.11.
 - [48] Nakajima, K., Framework for development of parallel codes in “Integrated Predictive Simulation System for Earthquake and Tsunami Disaster”, SIAM 14th Conference on Parallel Processing for Scientific Computing (PP10): Coupling and Re gridding Tools for Supporting Parallel Multi-physics Modeling Part-I of II, Seattle, USA, 2010.02.
 - [49] Nakajima, K., Parallel multigrid solvers using OpenMP/MPI hybrid programming models on multi-core/multi-socket clusters, SIAM 14th Conference on Parallel Processing for Scientific Computing (PP10): Joint JSIAM-SIAM Minisymposium: Parallel Programming Models and Algorithms for Multicore Clusters and GPGPUs Part-II of III, Seattle, USA, 2010.02.
 - [50] 古村孝志, 次世代スパコンが切り拓く可能性～地震と津波の高精度予測・災害軽減～, 次世代スパコンについて知る集い, 仙台, 2010.03.
 - [51] Nakajima, K., Parallel multigrid solvers using OpenMP/MPI hybrid programming models on multi-core/multi-socket clusters, 11th Copper Mountain Conference on Iterative Methods, Copper Mountain, USA, 2010.04.

- [52] Nakajima, K., Infrastructure for development of codes in scientific computing on Post-Peta-Scale systems, IPAB (Initiative for Parallel Bioinformatics) Open Workshop in Okinawa 2010: "Seeds and Needs for Large Scale Computing 2010" -Next Generation Sequencer : Uniting IT and Biotechnology -, Naha, Japan, 2010.10.
- [53] Nakajima, K., Infrastructure for application development on heterogeneous parallel computers, Fujitsu Open Petascale Libraries Workshop, New Orleans, USA, 2010.11.
- [54] 松浦充宏・橋本千尋・福山英一・古村孝志, 観測・計算融合の地震発生-強震動-津波予測シミュレーション, 海底地殻変動と津波に関するシンポジウム「海の先端技術で測る-海底地殻変動・津波-」, 東大山上会館, 東京, 2011.01.

② 口頭発表 (国内会議128件, 国際会議101件)

- [1] Hashimoto, C., and M. Matsu'ur, Crustal deformation and tectonic stress build-up caused by mechanical interaction at convergent plate boundaries, IASPEI 2005 General Assembly, Santiago, Chile, 2005.10.
- [2] Noda, A., C. Hashimoto, and M. Matsu'ura, Geodetic data inversion of the 1923 Kanto earthquake: Relationship between coseismic slip and interseismic slip-deficit, IASPEI 2005 General Assembly, Santiago, Chile, 2005.10.
- [3] 松浦充宏, 古典的地震放射エネルギーの現代的解釈, 日本地震学会 2005 年秋季大会, 札幌, 2005.10.
- [4] 野田朱美・橋本千尋・松浦充宏, 関東地域のテクトニクスと大地震の発生: 地震間のすべり遅れ分布, 2005 年地震学会秋季大会, 札幌, 2005.10.
- [5] 深畑幸俊・松浦充宏, 半無限多層構造弾性媒質中の点食い違い源による内部変形場: 安定解とその導出の歴史, 2005 年地震学会秋季大会, 札幌, 2005.10.
- [6] 橋本千尋・佐藤利典・松浦充宏, 造構造的浸食を伴うプレート沈み込みのシミュレーション: 東北日本の現在の隆起・沈降, 2005 年地震学会秋季大会, 札幌, 2005.10.
- [7] 伊丹洋人・市村強・大保直人, シールドトンネル・立坑接合部の三次元有限要素解析による動的応答評価, 第 4 回日本地震工学会年次学術講演会, 京都, 2005.11.
- [8] 桑本寛之・市村強・片岡俊一, 大規模波動場シミュレーションによる震度計設置環境の評価の試み, 第 4 回日本地震工学会年次学術講演会, 京都, 2005.11.
- [9] 佐茂隆洋・市村強・堀宗朗, 統合地震シミュレータによるネットワーク解析の試み, 第 4 回日本地震工学会年次学術講演会, 京都, 2005.11.
- [10] Fukuyama, E., Dynamic rupture propagation of the1995 Kobe earthquake, AGU 2005 Fall Meeting, San Francisco, USA, 2005.12.
- [11] 古村孝志, 観測と数値シミュレーションで見る首都圏を襲う大地震の揺れ, 物理探査学会第2回地震防災シンポジウム, 東京, 2006.01.
- [12] 佐茂隆洋・市村強・堀宗朗, 統合地震シミュレータを用いた地震時ネットワーク解析に関する研究, 第 55 回理論応用力学講演会, 京都, 2006.01.
- [13] 堀宗朗・小国健二・犬飼洋平・市村強, 緊急避難行動予測のためのマルチエージェントシミュレーション, 第 55 回理論応用力学講演会, 京都, 2006.01.
- [14] 中島研吾, 不均質場におけるマルチレベル解法, 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 HPCS2006, 東京, 2006.01.
- [15] 中島研吾, GeoFEM ベンチマークによる Hitachi SR11000/J1 および IBM p5-595 のノード性能評価, 第 13 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 (HOKKE-2006), 札幌, 2006.02.
- [16] Ichimura, T., T. Samo and M. Hori, On integrated earthquake simulator to generate advanced earthquake disaster information, The International Symposium on Management System for Disaster Prevention (ISMD 2006), Kochi, Japan, 2006.03.
- [17] Yamada, T., N. Ohbo, H. Itami, T. Ichimura, M. Hori, and K. Ikeda, Application of the large-scale three-dimensional analysis technique to seismic resistant construction of complex underground structures and its countermeasure, The International Symposium on Management System for Disaster Prevention (ISMD 2006), Kochi, Japan, 2006.03.

- [18] Ichimura, T., M. Hori, and T. Samo, Development of earthquake motion simulator with high resolution and its application, Third International Conference on Urban Earthquake Engineering, Tokyo, Japan, 2006.03.
- [19] 市村強・佐茂隆洋・篠竹英介・堀宗朗, 次世代型高度地震シミュレータの開発, 首都圏大震災軽減のための実践的都市地震工学研究の展開, 平成 17 年度成果報告シンポジウム, 東京, 2006.03
- [20] 佐藤陽平・奥田洋司, グリッド援用による改良型確率有限要素法, 日本機械学会関東支部第 12 期総会講演会, 埼玉, 2006.03.
- [21] Terakawa, T. and M. Matsu'ura, An inversion method to estimate internal stress fields from centroid moment tensors of seismic events, 5th ACES International Workshop, Maui, USA, 2006. 04.
- [22] Hashimoto, C. and M. Matsu'ura, 3-D simulation of long-term stress build-up caused by mechanical interaction at convergent plate boundaries, 5th ACES International Workshop, Maui, USA, 2006. 04.
- [23] Noda, A. and M. Matsu'ura, Diversity of stress release mode at plate interfaces beneath the Kanto region, central Japan, inferred from geodetic data inversion, 5th ACES International Workshop, Maui, USA, 2006. 04.
- [24] Furumura, T., Long-period ground motion developing in Tokyo during large, nearby earthquakes, 5th ACES International Workshop, Maui, USA, 2006. 04.
- [25] Nakajima, K., Integrated predictive simulation system for earthquake and tsunami disaster, 5th ACES International Workshop, Maui, USA, 2006. 04.
- [26] 佐藤利典・樋口春隆・松浦充宏・橋本千尋, 地震サイクルモデルを用いた海成段丘面からの震源断層の推定, 日本地球惑星科学連合 2006 年大会, 幕張メッセ, 2006.05.
- [27] 深畑幸俊・松浦充宏, 線形粘弾性体の等価定理: 弾性解と時間無限大粘弾性解の関係, 日本地球惑星科学連合 2006 年大会, 幕張メッセ, 2006.05.
- [28] 寺川寿子・松浦充宏, 応力蓄積シミュレーションと CMT データインバージョンに基づくサン・アンドレアス断層の絶対強度の推定, 日本地球惑星科学連合 2006 年大会, 幕張メッセ, 2006.05.
- [29] 寺川寿子・橋本千尋・松浦充宏, 地震の CMT データから地殻内応力場を推定するインバージョン手法の開発, 日本地球惑星科学連合 2006 年大会, 幕張メッセ, 2006.05.
- [30] 橋間昭徳・松浦充宏, 背弧海盆拡大の3次元力学的モデル, 日本地球惑星科学連合 2006 年大会, 幕張メッセ, 2006.05.
- [31] 松浦充宏, Recent development of earthquake generation physics toward earthquake prediction, 日本地球惑星科学連合 2006 年大会, 幕張メッセ, 2006.05.
- [32] 野田朱美・橋本千尋・松浦充宏, 3次元プレート境界モデルを用いた関東地域の地殻変動データのインバージョン解析: 応力解放形態の多様性, 日本地球惑星科学連合 2006 年大会, 幕張メッセ, 2006.05.
- [33] 市村強・佐茂隆洋・堀宗朗・篠竹英介, 仮想現実都市空間と数値シミュレーションを用いた高度地震シミュレータの開発, 計算工学講演会, 大阪, 2006.06.
- [34] Nakajima, K., The impact of parallel programming models on the linear algebra performance for finite element simulations, VECPAR 2006 (7th International Meeting High Performance Computing for Computational Science), Rio de Janeiro, Brazil, 2006.07.
- [35] 中島研吾・陳莉, ボクセル型背景格子を使用した大規模並列可視化手法, 2006 年並列/分散/協調処理に関する「高知」サマー・ワークショップ (SWoP 高知 2006), 高知, 2006.08
- [36] Matsu'ura, M., Y. Fukahata, C. Hashimoto, T. Terakawa, A. Hahima, Y. Shikakura, and A. Noda, Representation of mechanical interaction at plate interfaces: 3-D simulation of plate boundary processes, International Workshop on Tectonics of Plate Convergence Zones, Tokyo, Japan, 2006.09.
- [37] 中島研吾, アセンブリ構造における接触問題の並列前処理付き反復法, 日本応用数理学会 2006 年年会, 筑波, 2006.09.

- [38] 篠竹英介・佐茂隆洋・市村強・堀宗朗, 統合地震シミュレータを用いた地下街からの避難解析の基礎検討, 第 60 回土木学会年次学術講演会, 東京, 2006.09.
- [39] Matsu'ura, M., Integrated predictive simulation system for earthquake and tsunami disaster, First International Symposium on Integrated Predictive Simulation System for Earthquake and Tsunami Disaster, Tokyo, Japan, 2006.10.
- [40] Okuda, H., Grid Meta-Computing on cluster of PC-clusters, First International Symposium on Integrated Predictive Simulation System for Earthquake and Tsunami Disaster, Tokyo, Japan, 2006.10.
- [41] Hashimoto, C., E. Fukuyama, and M. Matsu'ura, Joint simulation of quasi-static stress accumulation and earthquake dynamic rupture, First International Symposium on Integrated Predictive Simulation System for Earthquake and Tsunami Disaster, Tokyo, Japan, 2006.10.
- [42] Terakawa, T., C. Hashimoto, and M. Matsu'ra, 3-D seismogenic stress field in the northeastern part of Japan, inferred from CMT data inversion, First International Symposium on Integrated Predictive Simulation System for Earthquake and Tsunami Disaster, Tokyo, Japan, 2006.10.
- [43] Fukuyama E., S. Aoi, C. Hashimoto, and M. Matsu'ura, Joint simulation of earthquake dynamic rupture and seismic wave propagation, First International Symposium on Integrated Predictive Simulation System for Earthquake and Tsunami Disaster, Tokyo, Japan, 2006.10.
- [44] Furumura, T., Computer simulation of long-period ground motions for the Nankai trough earthquakes, First International Symposium on Integrated Predictive Simulation System for Earthquake and Tsunami Disaster, Tokyo, Japan, 2006.10.
- [45] Saito, T. and T. Furumura, An integrated simulation of strong ground motion and tsunami propagation for the Nankai trough earthquakes, First International Symposium on Integrated Predictive Simulation System for Earthquake and Tsunami Disaster, Tokyo, Japan, 2006.10.
- [46] Hori, M. and T. Ichimura, Integrated earthquake simulation of strong ground motion, structural responses and evacuation processes in urban area, First International Symposium on Integrated Predictive Simulation System for Earthquake and Tsunami Disaster, Tokyo, Japan, 2006.10.
- [47] Nagashima, T., Numerical simulation of the seismic response of a thin-walled cylindrical liquid storage tank, First International Symposium on Integrated Predictive Simulation System for Earthquake and Tsunami Disaster, Tokyo, Japan, 2006.10.
- [48] Nakajima, K., Performance of parallel FEM applications on various architectures, First International Symposium for Integrated Predictive Simulation System for Earthquake and Tsunami Disaster, Tokyo, Japan, 2006.10.
- [49] Nakajima, K., Parallel preconditioning methods for contact problems with FEM, International Workshop on Collaboration between Numerical Methods and Large-Scale Scientific Computation 2006 (iWNMSC'06), Tokyo, Japan, 2006.10.
- [50] Terakawa, T., K. Nakajima, and M. Matsu'ura, Parallel computing with ScaLAPACK for large-scale stress inversion analysis, International Workshop on Collaboration between Numerical Methods and Large-Scale Scientific Computation 2006 (iWNMSC'06), Tokyo, Japan, 2006.10.
- [51] 市村強・堀宗朗・篠竹英介, 統合地震シミュレーションと地域防災への応用, 第1回防災計画研究発表会, 京都, 2006.10.
- [52] 橋本千尋・福山英一・松浦充宏, プレート運動による準静的応力蓄積と地震の動的破壊の連成シミュレーション, 日本地震学会 2006 年秋季大会, 名古屋, 2006.10/11.
- [53] 福山英一・青井真・橋本千尋・松浦充宏, 地震の動的破壊と波動伝播の連成シミュレーション, 日本地震学会 2006 年秋季大会, 名古屋, 2006.10/11.
- [54] 寺川寿子・橋本千尋・中島研吾・松浦充宏, CMT データインバージョン法による東北地方の3次元地震発生応力場の推定, 日本地震学会 2006 年秋季大会, 名古屋, 2006.10/11.
- [55] 福山英一・青井真・橋本千尋・松浦充宏, 地震の動的破壊と波動伝播の連成シミュ

- ーション, 日本地震学会 2006 年秋季大会, 名古屋, 2006.10/11.
- [56] Hori, M., T. Ichimura, and K. Oguni, Integral earthquake simulation and its application to long-period ground motion simulation, International Workshop on Long-Period Ground Motion Simulation and Velocity Structures, Tokyo, 2006.11.
- [57] 福山英一・橋本千尋・青井真・松浦充宏, 動的破壊のシミュレーション:プレートの沈み込から強震動の発生まで, 京都大学防災研究所地震火山グループ研究会, 宇治, 2006.11.
- [58] 中島研吾, 局所細分化メッシュに基づく並列有限要素法における前処理付き反復法, 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 2 回研究会, 東京, 2006.11.
- [59] Nakajima, K., The impact of parallel programming models on the performance for GeoFEM benchmarks based on finite element applications in geophysics, AGU 2006 Fall Meeting, San Francisco, USA, 2006.12.
- [60] 中島研吾, 「地球シミュレータ」における並列マルチグリッド前処理付共役勾配法, 第 20 回数値流体力学シンポジウム, 名古屋, 2006.12.
- [61] Yamada, T., T. Ichimura, N. Ohbo, Y. Yamaki, H. Itami, and M. Hori, Three dimensional numerical simulations for seismic response of large-scale underground infrastructure, Fourth International Conference on Urban Earthquake Engineering, Tokyo, Japan, 2007.03.
- [62] 中島研吾・長嶋利夫・江連真一・市村強・奥田洋司, M×N 通信による大規模連成シミュレーション, 第 13 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 (HOKKE-2007), 札幌, 2007.03.
- [63] 寺川寿子・松浦充宏, CMT データインバージョン法による地震発生応力場の推定, 地殻応力の絶対計量に関する研究集会, 東京, 2007.03.
- [64] Nakajima, K., Conforming parallel adaptive mesh refinement for hexahedral meshes in geophysics applications, OW91: Innovative Computational Strategies for Parallel/Grid Environments, ICCM 2007 (International Conference on Computational Methods), Hiroshima, Japan, 2007.04.
- [65] Furumura, T. and T. Saito, An integrated simulation of seismic wave and tsunami propagation, International Workshop for Large-Scale Coupled Simulations: Computation and Physics, Tokyo, Japan, 2007.04.
- [66] Nakajima, K., Large-scale coupling simulations through MxN parallel data redistribution, International Workshop for Large-Scale Coupled Simulations: Computation and Physics, Tokyo, Japan, 2007.04.
- [67] Nakajima, K., Parallel preconditioning methods with selective fill-ins and selective overlapping for ill-conditioned problems in finite-element methods, International Conference on Computational Science (ICCS 2007), Beijing, China, 2007.05.
- [68] 寺川寿子・松浦充宏, CMT データインバージョンと断層すべりインバージョンとの違い, 日本地球惑星科学連合 2007 年大会, 幕張メッセ, 2007.05.
- [69] 野田朱美・橋本千尋, 深畑幸俊・松浦充宏, 直接的及び間接的先験情報を併用したベイズモデルに基づく測地データインバージョン:大正関東地震への適用, 日本地球惑星科学連合 2007 年大会, 幕張メッセ, 2007.05.
- [70] 松浦充宏・橋本千尋・橋間昭徳・深畑幸俊, プレート収束帯の地殻変形を引き起こす力, 日本地球惑星科学連合 2007 年大会, 幕張メッセ, 2007.05.
- [71] 古村孝志, 首都圏直下の地震と強震動シミュレーション, 日本地球惑星科学連合 2007 年大会, 幕張メッセ, 2007.05.
- [72] 古村孝志・ケネット ブライアン, 不均質なプレート内の地震波散乱により生まれる Waveguide/Antiwaveguide 効果, 日本地球惑星科学連合 2007 年大会, 幕張メッセ, 2007.05.
- [73] 山下太・溝口一生・福山英一・小村健太郎, 水圧破碎法による地殻応力推定の信頼性向上のための引っ張り強度測定, 日本地球惑星科学連合 2007 年大会, 幕張メッセ, 2007.05.

- [74] 森野耕平・奥田洋司, 階層連結地震・津波災害予測シミュレーションのためのグリッド利用複数研究機関共同研究支援グループウェアの開発, 日本計算工学会第 12 回計算工学講演会, 東京, 2007.05.
- [75] 村岡雅江・奥田洋司, 大規模非対称行列に対する GMRES (m) 法のリスタート周期に関する検討, 日本計算工学会第 12 回計算工学講演会, 東京, 2007.05.
- [76] 長嶋利夫・末益博志, 貯蔵タンクの地震応答解析のための流体構造連成解析, 日本計算工学会第 12 回計算工学講演会, 東京, 2007.05.
- [77] 中島研吾, 大規模数値シミュレーションと並列前処理手法, 日本計算工学会第 12 回計算工学講演会, 東京, 2007.05.
- [78] 佐藤陽平・奥田洋司, グリッド援用による改良型確率有限要素法, 日本計算工学会第 12 回計算工学講演会, 東京, 2007.05.
- [79] 山木洋平・市村強・堀宗朗, 階層型解析手法による大規模地下構造物地震時挙動想定の高度化に関する基礎研究, 日本計算工学会第 12 回計算工学講演会, 東京, 2007.05.
- [80] 中島研吾, 階層領域分割によるマルチステージ並列前処理手法へのハイブリッド並列プログラミングモデルの適用, 情報処理学会第 110 回ハイパフォーマンスコンピューティング研究会, 横浜, 2007.06.
- [81] Terakawa, T. and M. Matsu'ura, CMT data inversion using a Bayesian information criterion to estimate seismogenic stress fields, IUGG XXIV General Assembly, Perugia, Italy, 2007.07.
- [82] Matsu'ura, M., A. Noda, T. Terakawa, and C. Hashimoto, Modeling and monitoring the entire processes of earthquake generation in and around Japan, IUGG XXIV General Assembly, Perugia, Italy, 2007.07.
- [83] Hashimoto, C. and M. Matsu'ura, Joint simulation of quasi-static stress accumulation and earthquake dynamic rupture, IUGG XXIV General Assembly, Perugia, Italy, 2007.07.
- [84] Sato, T., H. Higuchi, N. Tsumura, T. Ito, C. Hashimoto, and M. Matsu'ura, Estimation of seismic fault slip distribution from marine terrace data using an earthquake cycle model, IUGG XXIV General Assembly, Perugia, Italy, 2007.07.
- [85] Furumura, T. and B.L.N. Kennett, Anomalously large intensity associated by subduction zone earthquakes: A scattering waveguide in the heterogeneous subducting plate, IUGG XXIV General Assembly, Perugia, Italy, 2007.07.
- [86] 中島研吾, 階層型領域分割によるマルチステージ並列前処理手法を使用した並列有限要素法向け反復解法, 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 3 回研究会, 旭川, 2007.07.
- [87] Ando, R., E. Fukuyama, S. Aoi, C. Hashimoto, and M. Matsu'ura, Predictability of ground motions: Simulations for the 2003 Tokachi-oki-like earthquake, Workshop on Numerical Modeling of Earthquake Source Dynamics, Smolenice, Slovakia, 2007.09.
- [88] Fukuyama, E., S. Aoi, C. Hashimoto, R. Ando, and M. Matsu'ura, Simulation of earthquake dynamic rupture and ground motions for the 2003 Tokachi-oki earthquake, Workshop on Numerical Modeling of Earthquake Source Dynamics, Smolenice, Slovakia, 2007.09.
- [89] Nakajima, K., Strategies for automatic selection of parameters in parallel preconditioning methods for ill-conditioned problems in finite-element applications, The Second International Workshop on Automatic Performance Tuning (iWAPT2007), Tokyo, Japan, 2007.09.
- [90] Nakajima, K., Parallel multistage preconditioners based on a hierarchical graph decomposition for SMP cluster architectures with a hybrid parallel programming model, HPCC'07 (High-Performance Computation Conference 2007), Houston, USA, 2007.09.
- [91] 中島研吾, 選択的フィルイン, 選択的オーバーラップに基づく並列前処理付き反復法, 日本応用数学会 2007 年年会, 札幌, 2007.09.
- [92] 野田朱美・深畑幸俊・松浦充宏, インバース問題における系統誤差の除去: 関東地震の測地データ解析, 日本地震学会 2007 年秋季大会, 仙台, 2007.10.

- [93] 寺川寿子・松浦充宏, CMT データインバージョン法による日本列島域の3次元地震発生応力場の推定, 日本地震学会 2007 年秋季大会, 仙台, 2007.10.
- [94] 鹿倉洋介・中島研吾・深畑幸俊・松浦充宏, 沈み込み帯における内部変形運動の有限要素シミュレーション, 日本地震学会 2007 年秋季大会, 仙台, 2007.10.
- [95] 松浦充宏・野田朱美・寺川寿子・橋本千尋, 日本列島域の地殻応力状態モニタリングに向けた観測・解析・シミュレーション融合システム, 日本地震学会 2007 年秋季大会, 仙台, 2007.10.
- [96] 古村孝志・齊藤竜彦, 地震-津波連成シミュレーションによる津波の高精度評価, 日本地震学会 2007 年秋季大会, 仙台, 2007.10.
- [97] 古村孝志・地震研究所強震動グループ, 2007 年新潟県中越沖地震による関東平野の長周期地震動, 日本地震学会 2007 年秋季大会, 仙台, 2007.10.
- [98] 齊藤竜彦・古村孝志, 2007 年千島列島地震による津波発生・伝播: Navier-Stokes 方程式と線形長波方程式による計算結果の比較, 日本地震学会 2007 年秋季大会, 仙台, 2007.10.
- [99] Furumura, T. and T. Saito, Integrated simulation of long-period ground motions and tsunami generating from subduction zone earthquakes, 2nd International Workshop on Long-Period Ground Motion Simulation and Velocity Structure, Tokyo, Japan, 2007.11.
- [100] 中島研吾, SPAI 法の可能性, 日本応用数理学会「行列・固有値問題の解法とその応用」研究部会第 4 回研究会, 東京, 2007.11.
- [101] 森野耕平・奥田洋司, 協調フィルタリングを用いた複数研究機関共同研究支援グループウェアの開発, 日本機械学会第 20 回計算力学講演会, 京都, 2007.11.
- [102] 長嶋利夫, レベルセット X-FEM による液体の入った容器のスロッシング解析, 日本機械学会第 20 回計算力学講演会, 京都, 2007.11.
- [103] Muraoka, M. and H. Okuda, Utilization of cluster-of-clusters for GMRES method with long restart cycle, Third Asian-Pacific Congress on Computational Mechanics in conjunction with Eleventh International Conference on Enhancement and Promotion of Computational Methods in Engineering and Science, Kyoto, Japan, 2007.12.
- [104] Sato, Y. and H. Okuda, Distributed SFEM using Ninf-G, Third Asian-Pacific Congress on Computational Mechanics in conjunction with Eleventh International Conference on Enhancement and Promotion of Computational Methods in Engineering and Science, Kyoto, Japan, 2007.12.
- [105] Nakajima, K., A framework of parallel finite-element method for large-scale simulations of quasi-static crustal deformation, The 3rd Asian-Pacific Congress on Computational Mechanics (APCOM'07): "Future Directions of Large-Scale Scientific Computing and Parallel Linear Solvers", Kyoto, Japan, 2007.12.
- [106] Nagashima, T., Application of the extended finite element method to sloshing problems of a liquid storage tank, APCOM07 in Conjunction with EPMESC XI, Kyoto, Japan, 2007.12.
- [107] 中島研吾, 並列有限要素法向け前処理付き反復法, 第 21 回数値流体力学シンポジウム, 東京, 2007.12.
- [108] 佐藤陽平・奥田洋司, 改良型確率有限要素法のグリッド実装, 情報処理学会, 2008 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 (HPCS 2008), 東京, 2008.01.
- [109] 篠原主勲・奥田洋司, 流れ場に置かれた物体の随伴変数法による形状最適化 (非定常流れ場における表面力の低減化), 第 8 回最適化シンポジウム, 東京, 2008.01.
- [110] 中島研吾, 並列有限要素法と前処理手法, クリロフ (Krylov) 部分空間法フォーラム, 別府, 2008.01.
- [111] 中島研吾, 階層型領域分割による並列多重格子法, 「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 HPCS2008」, 東京, 2008.01.
- [112] 中島研吾, GeoFEM ベンチマークによる Hitachi SR11000/J2 の性能評価, 第 14 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

- クシヨップ (HOKKE-2008), 札幌, 2008.03.
- [113] Matsu'ura, M., A. Noda, T. Terakawa, and C. Hashimoto, Modeling and monitoring the entire processes of earthquake generation in and around Japan, 6th ACES International Workshop, Cairns, Australia, 2008.05.
- [114] Terakawa, T. and M. Matsu'ura, 3D tectonic stress fields in and around Japan, inferred from CMT data inversion, 6th ACES International Workshop, Cairns, Australia, 2008.05.
- [115] Fukuyama, E., R. Ando, C. Hashimoto, and M. Matsu'ura, Modeling of the 2003 Tokachi-oki, Japan, earthquake: Stress accumulation, dynamic rupture and ground motions, 6th ACES International Workshop, Cairns, Australia, 2008.05.
- [116] Mizoguchi, K. and E. Fukuyama, Scaling of fracture energy: Laboratory measurements by high-velocity rotary shear apparatus, 6th ACES International Workshop, Cairns, Australia, 2008.05.
- [117] Furumura, T. and T. Saito, An integrated simulation of seismic wave propagation and tsunami generation and propagation, 6th ACES International Workshop, Cairns, Australia, 2008.05.
- [118] Saito, T. and T. Furumura, Three-dimensional tsunami generation due to the sea-bottom deformation, 6th ACES International Workshop, Cairns, Australia, 2008.05.
- [119] 松浦充宏・野田朱美・深畑幸俊, 島弧地殻の変形と応力場に関する理論的考察, 日本地球惑星科学連合 2008 年大会, 幕張メッセ, 2008.05.
- [120] 野田朱美・松浦充宏, GPS データの逆解析による地殻内弾性-非弾性歪み場の推定: 基本的考え方と数学的定式化, 日本地球惑星科学連合 2008 年大会, 幕張メッセ, 2008.05.
- [121] 寺川寿子・松浦充宏, CMT データインバージョンによる日本列島域の3次元テクトニック応力場, 日本地球惑星科学連合 2008 年大会, 幕張メッセ, 2008.05.
- [122] 鹿倉洋介・中島研吾・深畑幸俊・松浦充宏, 沈み込み帯における力学的-熱的構造発達の有限要素シミュレーション, 日本地球惑星科学連合 2008 年大会, 幕張メッセ, 2008.05.
- [123] 古村孝志, 北海道の深発地震記録に見られる海洋性地殻トラップ波, 日本地球惑星科学連合 2008 年大会, 幕張メッセ, 2008.05.
- [124] 古村孝志, 日本海溝の大地震による長周期地震動, 日本地球惑星科学連合 2008 年大会, 幕張メッセ, 2008.05.
- [125] 齊藤竜彦・古村孝志, 複雑な海底地形による津波の散乱: 散乱減衰とコーダ励起, 日本地球惑星科学連合 2008 年大会, 幕張メッセ, 2008.05.
- [126] 齊藤竜彦・古村孝志, 海底隆起による津波波源形成過程: 3次元数値シミュレーションと解析解に基づく解釈, 日本地球惑星科学連合 2008 年大会, 幕張メッセ, 2008.05.
- [127] 市村強・山木洋平・堀宗朗, 階層型解析による断層-構造物系を考慮した大規模複雑構造物の地震時挙動解析, 日本計算工学会第 13 回計算工学講演会, 仙台, 2008.05.
- [128] 長嶋利夫・岡内聡史, レベルセット X-FEM のスロッシング解析への適用, 日本計算工学会第 13 回計算工学講演会, 仙台, 2008.05.
- [129] Georgescu, S. and H. Okuda, Feasibility Study of GPU-Accelerated Conjugate Gradient Solver, 日本計算工学会第 13 回計算工学講演会, 仙台, 2008.05.
- [130] 中島研吾, 並列有限要素法のための新しい領域分割手法, 日本計算工学会第 13 回計算工学講演会, 仙台, 2008.05.
- [131] Nagashima, T., Application of the level set X-FEM to sloshing problems of a liquid storage container, 8th World Congress on Computational Mechanics/5th European Congress on Computational Methods in Applied Science and Engineering, Venetia, Italy, 2008.07.
- [132] Sato Y. and H. Okuda, Grid-Aided Stochastic Finite Element Using Ninf-G, 8th. World Congress on Computational Mechanics (WCCM8) 5th European Congress on Computational Methods in Applied Sciences and Engineering (ECCOMAS 2008), Venetia, Italy, 2008.07.
- [133] Furumura, T., An integrated simulation of seismic wave propagation and tsunami

- generation and propagation, APRU Research Symposium 2008 Earthquake Hazards around the Pacific Rim, Davis, USA, 2008.08.
- [134] Shinohara, K. and H. Okuda, Shape optimization using adjoint variable method in incompressible viscous flow, 8th International Conference on HydroScience and Engineering, Nagoya, Japan, 2008.09.
- [135] Okuda, H. and S. Georgescu, Conjugate gradients on a Multi-GPU system, JSIAM-SAIF, Chiba, Japan, 2008.09.
- [136] Nakajima, K., Parallel Multistage Preconditioners by extended hierarchical interface decomposition for ill-conditioned problems, International Kyoto Forum 2008 on Krylov Subspace Methods, Kyoto, 2008.09.
- [137] 篠竹英介・遠藤剛・市村強・堀宗朗, 地盤構造モデルに対する地震動特性の感度に関する基礎的研究, 第 62 回土木学会年次学術講演会, 仙台, 2008.09.
- [138] 市村強・山木洋平・堀宗朗, 断層-構造物系を考慮した大規模複雑構造物の地震時挙動想定に関する基礎研究, 第 62 回土木学会年次学術講演会, 仙台, 2008.09.
- [139] 中島研吾, 悪条件問題における並列前処理・領域分割手法, 日本応用数理学会 2008 年年会, 柏, 2008.09.
- [140] Matsu'ura, M., Integrated predictive simulation system for earthquake and tsunami disaster, 2nd International Symposium for Integrated Predictive Simulation for Earthquake and Tsunami Disaster, Tokyo, Japan, 2008.10.
- [141] Terakawa, T, C. Hashimoto, and M. Matsu'ura, Integrated monitoring system for interplate coupling and crustal stress states: Geodetic and seismic data inversion, 2nd International Symposium for Integrated Predictive Simulation for Earthquake and Tsunami Disaster, Tokyo, Japan, 2008.10.
- [142] Hashimoto, C., E. Fukuyama, and M. Matsu'ra, Joint simulation of quasi-static tectonic loading due to plate subduction and earthquake dynamic rupture, 2nd International Symposium for Integrated Predictive Simulation for Earthquake and Tsunami Disaster, Tokyo, Japan, 2008.10.
- [143] Fukuyama, E., Dynamic earthquake rupture propagation for integrated simulations, 2nd International Symposium for Integrated Predictive Simulation for Earthquake and Tsunami Disaster, Tokyo, Japan, 2008.10.
- [144] Furumura, T. and T. Saito, Large-scale parallel 3D FDM simulation of seismic wave propagation using high-performance computers, 2nd International Symposium for Integrated Predictive Simulation for Earthquake and Tsunami Disaster, Tokyo, Japan, 2008.10.
- [145] Saito, T. and T. Furumura, 3-D simulation of tsunami generation and propagation, 2nd International Symposium for Integrated Predictive Simulation for Earthquake and Tsunami Disaster, Tokyo, Japan, 2008.10.
- [146] Nagashima, T. and T. Ichimura, Numerical simulation of the seismic response of an oil storage tank considering coupling with ground motion, 2nd International Symposium for Integrated Predictive Simulation for Earthquake and Tsunami Disaster, Tokyo, Japan, 2008.10.
- [147] Okuda, H. and S. Georgescu, Conjugate gradients on a Multi-GPU system, 2nd International Symposium for Integrated Predictive Simulation for Earthquake and Tsunami Disaster, Tokyo, Japan, 2008.10.
- [148] Nakajima, K., Middleware for Petascale coupled simulations, 2nd International Symposium for Integrated Predictive Simulation for Earthquake and Tsunami Disaster, Tokyo, Japan, 2008.10.
- [149] Hashimoto, C., A. Noda, T. Sagiya, and M. Matsu'ura, Potential interplate earthquakes along the Kuril-Japan trench, inferred from GPS data inversion, 7th General Assembly of Asian Seismological Commission, Tsukuba, Japan, 2008.11.
- [150] Terakawa, T., M. Matsu'ura, A. Kato, T. Iidaka, and T. Iwasaki, Effects of pore-pressure on the aftershock activity of the 2004 Mid-Niigata prefecture earthquake, Japan, 7th General Assembly of Asian Seismological Commission, Tsukuba, Japan, 2008.11.
- [151] Shikakura, Y., K. Nakajima, Y. Fukahata, and M. Matsu'ura, A mechanical-thermal

- coupled FEM model and its application to deformation pattern near the Chile triple junction, 7th General Assembly of Asian Seismological Commission, Tsukuba, Japan, 2008.11.
- [152] Furumura, T., New research project for the next Nankai trough mega thrust earthquakes: Disaster mitigation research, 7th General assembly of Asian Seismological Commission, Tsukuba, Japan, 2008.11.
- [153] 山下太・溝口一・福山英一・小村健太郎, 信頼性の高い地殻応力データから推定された阿寺断層の最近の活動, 日本地震学会 2008 秋季大会, つくば, 2008.11.
- [154] 長嶋利夫, X-FEM による石油貯蔵タンクのスロッシング解析, 日本機械学会第 21 回計算力学講演会, 那覇, 2008.11.
- [155] Fukuyama, E. and K. Mizoguchi, Estimation of fracture energy in the laboratory, AGU 2008 Fall Meeting, San Francisco, USA, 2008.12.
- [156] 中島研吾, 並列適応格子とその応用, 第 22 回数値流体力学シンポジウム, 東京, 2008.12.
- [157] Ichimura T. and M. Hori, Seismic structural response and strong ground motion simulation based on multi-scale analysis, 6th International Conference on Urban Earthquake Engineering, Tokyo, Japan, 2009.03.
- [158] Sato, Y. and H. Okuda, Distributed stochastic finite element on a desktop grid, 4th International Conference on High Performance Scientific Computing, Hanoi, Vietnam, 2009.03.
- [159] 村岡雅江・奥田洋司, WAN 上のクラスタ間における大規模有限要素解析の性能予測と実性評価, 日本応用数学会 2008 年度研究部会連合発表会, 京都, 2009.03.
- [160] 佐藤陽平・奥田洋司, デスクトップグリッドにおける改良型確率有限要素法, 日本応用数学会 2008 年度研究部会連合発表会, 京都, 2009.03.
- [161] Georgescu, S. and H. Okuda, CG and GMRES on a GPU cluster, 15th International Conference on Finite Elements in Flow Problems (FEF09), Tokyo, Japan, 2009.04.
- [162] Nakajima, K., Parallel multistage preconditioners by hierarchical interface decomposition on “T2K Open Super Computer (Todai Combined Cluster)” with hybrid parallel programming models, The 15th International Conference on Finite Elements in Flow Problems (FEF09): Parallel and Hierarchical Algorithms for Accelerating System Matrix Solvers, Tokyo, Japan, 2009.04.
- [163] Nakajima, K., Evaluation of hybrid parallel programming models for finite-element applications on T2K Open Supercomputer (Todai Combined Cluster), Third French-Japanese Workshop Petascale Applications, Algorithms and Programming (PAAP), Kyoto, Japan, 2009.04.
- [164] 橋本千尋・野田朱美・鷺谷威・松浦充宏, 北海道・東北地域に於けるプレート間カップリングによる弾性変形とプレート内非弾性変形, 日本地球惑星科学連合 2009 年大会, 幕張メッセ, 2009.05.
- [165] 野田朱美・松浦充宏, GPS データの逆解析による島弧地殻の3次元弾性-非弾性歪み場の推定:新潟-神戸変形集中帯, 日本地球惑星科学連合 2009 年大会, 幕張メッセ, 2009.05.
- [166] Hok, S. and E. Fukuyama, Dynamic rupture simulation of reverse fault using BIEM with free surface: From rupture dynamics to near-fault ground motions, 日本地球惑星科学連合 2009 年大会, 幕張メッセ, 2009.05.
- [167] 古村孝志・今井健太郎・齊藤竜彦, 南海トラフ地震連動発生による地震と津波の高精度評価, 日本地球惑星科学連合 2009 年大会, 幕張メッセ, 2009.05.
- [168] 齊藤竜彦・佐竹健治・古村孝志, 2004 年紀伊半島沖地震の津波波源の推定:分散波理論に基づく津波波形インバージョン解析, 日本地球惑星科学連合 2009 年大会, 幕張メッセ, 2009.05.
- [169] 佃建成・長嶋利夫, 構造解析プログラムを利用したスロッシング解析, 日本計算工学会第 14 回計算工学講演会, 東京, 2009.05.
- [170] 奥田洋司・志賀淳二, アセンブル構造解析のための多点拘束前処理付き並列反復

- 解法, 日本計算工学会第 14 回計算工学講演会, 東京, 2009.05.
- [171] Georgescu, S. and H. Okuda, Mixed precision in Krylov solvers on GPU, 日本計算工学会第 14 回計算工学講演会, 東京, 2009.05.
- [172] 渡邊起・奥田洋司, メニーコア環境における共役勾配法の高速化, 日本計算工学会第 14 回計算工学講演会, 東京, 2009.05.
- [173] 中島研吾, T2K オープンスパコン(東大)におけるハイブリッド並列プログラミングモデルの最適化, 日本計算工学会第 14 回計算工学講演会, 東京, 2009.05.
- [174] 野口智史・市村強・堀宗朗, マルチグリッド構造/非構造格子を用いた有限要素法による観測地震動の再現とシナリオ地震の強震動予測, 第 58 回理論応用力学講演会, 東京, 2009.06.
- [175] 中島研吾・片桐孝洋, マルチコアプロセッサにおけるリオーダーリング付き非構造格子向け前処理反復法の性能, 情報処理学会研究報告(HPC-120-6), 情報処理学会第 120 回ハイパフォーマンスコンピューティング研究会, 東京, 2009.06.
- [176] Hashimoto, C., A. Noda, T. Sagiya, and M. Matsu'ura, Interplate seismogenic zones along the Kuril-Japan trench inferred from GPS data inversion, 6th Annual Meeting of the Asia Oceania Geosciences Society, Singapore, 2009.08.
- [177] Fukuyama, E., C. Hashimoto, R. Ando, S. Aoi, and M. Matsu'ura, Simulation of earthquake dynamic rupture and seismic wave generation under appropriate initial and boundary conditions, 6th Annual Meeting of the Asia Oceania Geosciences Society, Singapore, 2009.08.
- [178] Hok, S. and E. Fukuyama, Rupture dynamics using 3D BIEM including the free surface: Validation and application to the 2008 Iwate-Miyagi (Japan) earthquake, 6th Annual Meeting of the Asia Oceania Geosciences Society, Singapore, 2009.08.
- [179] 中島研吾, 拡張階層型領域間境界分割に基づく並列前処理手法, 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), 2009 年並列/分散/協調処理に関する「仙台」サマー・ワークショップ(SWoPP 仙台 2009), 仙台, 2009.08.
- [180] 市村強・鈴木孝・堀宗朗, 断層-構造物系を考慮したシナリオ地震時の構造物の動的応答解析, 第 63 回土木学会年次学術講演会, 福岡, 2009.09.
- [181] 中島研吾, マルチコア時代の前処理付き反復法と性能チューニング, 日本応用数理学会 2009 年年会, 大阪, 2009.09.
- [182] Matsu'ura, M., A. Noda, T. Terakawa, and C. Hashimoto, Modelling and monitoring the entire process of earthquake generation cycles, French-Japanese Workshop on Earthquake Source, Paris & Orleans, France, 2009.10.
- [183] Terakawa, T. and S.A. Miller, Mechanisms driving aftershock sequences inferred from statistical analysis of focal mechanisms, French-Japanese Workshop on Earthquake Source, Paris & Orleans, France, 2009.10.
- [184] Hok, S. and E. Fukuyama, Dipping fault dynamics in a half-space using BIEM: Validation and application to the 2008 Iwate-Miyagi, Japan, earthquake, French-Japanese Workshop on Earthquake Source, Paris & Orleans, France, 2009.10.
- [185] Nakajima, K., Flat MPI vs. Hybrid: Evaluation of parallel programming models for preconditioned iterative solvers on multicore clusters, The Fourth International Workshop on Automatic Performance Tuning (iWAPT2009), Tokyo, 2009.10.
- [186] 寺川寿子・松浦充宏, 3-D tectonic stress fields in and around Japan inverted from CMT data of seismic events, 日本地震学会 2009 年秋季大会, 京都, 2009.10.
- [187] 橋本千尋・鷺谷威・松浦充宏, GPS データインバージョンによる西南日本のプレート間カップリングの推定, 日本地震学会 2009 年秋季大会, 京都, 2009.10.
- [188] Hok, S., E. Fukuyama, and C. Hashimoto, Dynamic rupture modeling of anticipated Nankai earthquake, 日本地震学会 2009 年秋季大会, 京都, 2009.10.
- [189] 古村孝志・今井健太郎, 南海東南海東海地震の連動発生による強震動と津波-1707 年宝永地震の震源モデルの再評価-, 日本地震学会 2009 年秋季大会, 京都, 2009.10.

- [190] 野口科子・笹谷努, 表層地盤の非線形応答度合いと地震動増幅率の定量的関係, 日本地震学会 2009 年秋季大会, 京都, 2009.10.
- [191] 長嶋利夫・佃建成, 強連成解析手法による液体の入った容器の動的応答解析, 第 22 回計算力学講演会, 金沢, 2009.10.
- [192] 中島研吾, Flat MPI vs. Hybrid:T2K オープンスパコン(東大)における前処理付反復法向け並列プログラミングモデルの評価, 加速法ワークショップ, 東京, 2009.11.
- [193] Terakawa, T., A. Zaporowsky, B. Galvan, and S.A. Miller, Identification of the high pressure source driving the 2009 L'Aquila earthquake sequences, AGU 2009 Fall Meeting, San Francisco, 2009.12.
- [194] 渡邊起・奥田洋司, マルチコア環境における CG 法の性能モデルと高速化, 2010 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(HPCS 2010), 東京, 2010.01.
- [195] 清水正廣・奥田洋司, 並列有限要素解析におけるマルチグリッド型解法, 2010 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(HPCS 2010), 東京, 2010.01.
- [196] Okuda, H., Parallel finite element analysis for assembly structures under hierarchical gridding, SIAM Conference on Parallel Processing for Scientific Computing 2010, Seattle, USA, 2010.02.
- [197] Quinay, P.E., T. Ichimura, and M. Hori, Development of a forward-inversion crust modeling scheme for accurate strong ground motion prediction, 7th International Conference on Urban Earthquake Engineering & 5th International Conference on Earthquake Engineering, Tokyo, Japan, 2010.03.
- [198] Okuda, H., Parallel FE structural analysis system utilizing hierarchical data structure, 4th Korea-Japan COSEIK-JSCES Workshop on Computational Engineering, Fukuoka, Japan, 2010.05.
- [199] 松浦充宏・橋本千尋・寺川寿子・福山英一・Hok, S., 観測・計算を融合した階層連結地震・津波災害予測システム:南海トラフ地震, 日本地球惑星科学連合 2010 年大会, 幕張メッセ, 2010.05.
- [200] 寺川寿子・Zaporowski, A.・Galvan, B.・Miller S., 地震メカニズムトモグラフィーによる 2009 年ラクイラ地震震源域の 3次元流体圧分布, 日本地球惑星科学連合 2010 年大会, 幕張メッセ, 2010.05.
- [201] Hok, S., E. Fukuyama, and C. Hashimoto, Dynamic rupture of anticipated Nankai-Tonankai earthquakes using plate coupling rates on the subduction interface, 日本地球惑星科学連合 2010 年大会, 幕張メッセ, 2010.05.
- [202] 尾形良彦, 時空間余震活動の不均質性について, 日本地球惑星科学連合 2010 年大会, 幕張メッセ, 2010.05.
- [203] 熊澤貴雄・尾形良彦・遠田晋次, 岩手宮城内陸地震前の地震活動異常と短期的地殻変動の解析, 日本地球惑星科学連合 2010 年大会, 幕張メッセ, 2010.05.
- [204] 野村有紀・橋本千尋, すべり依存の断層構成則を用いた二次元剪断破壊のシミュレーション:スロースリップイベントの研究, 日本地球惑星科学連合 2010 年大会, 幕張メッセ, 2010.05.
- [205] 古村孝志, 南海・東南海・東海地震の連動発生による強震動と津波-3連動発生による「最悪」シナリオ, 日本地球惑星科学連合 2010 年大会, 幕張メッセ, 2010.05.
- [206] 野口科子・前田拓人・古村孝志, 海溝に沿って伝播する地震波に見られる顕著な位相の特徴とその解釈, 日本地球惑星科学連合 2010 年大会, 幕張メッセ, 2010.05.
- [207] 渡邊起・林雅江・奥田洋司, マルチコア分散環境向けの疎行列直接解法のハイブリッド並列化, 日本計算工学会第 15 回計算工学講演会, 福岡, 2010.05.
- [208] 中島研吾, OpenMP/MPI ハイブリッド並列プログラミングモデルの多重格子法への適用, 日本計算工学会第 15 回計算工学講演会, 福岡, 2010.05
- [209] 中島研吾, 並列前処理付き反復法と領域分割, 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), 2009 年並列/分散/協調処理に関する

- 『金沢』サマー・ワークショップ (SWoPP 金沢 2010), 金沢, 2010.08
- [210] Noguchi, S., P.E. Quinay, T. Ichimura, and M. Hori, Simultaneous multi-scale inversion method for estimating source location and crust structure, The 64th JSCE Annual Conference, Sapporo, 2010.09.
- [211] 佃建成・長嶋利夫, 流体要素を用いた液体貯蔵容器の流体構造連成解析, 日本機械学会第 23 回計算力学講演会, 北見, 2010.09.
- [212] Matsu'ura, M., Integrated predictive simulation system for earthquake and tsunami disaster, 7-th ACES International Workshop, Otaru, Japan, 2010.10.
- [213] Hashimoto, C., E. Fukuyama, and M. Matsu'ura, Physics-based simulation for potential interplate earthquakes in and around Japan, 7-th ACES International Workshop, Otaru, Japan, 2010.10.
- [214] Hok, S., E. Fukuyama, and C. Hashimoto, Dynamic rupture scenarios of anticipated Nankai-Tonankai earthquakes, using the subduction interface coupling rates inferred from GPS data, 7-th ACES International Workshop, Otaru, Japan, 2010.10.
- [215] Terakawa, T., S. Miller, and M. Matsu'ura, Roles of tectonic stress and pore fluid pressure for earthquake generation, 7-th ACES International Workshop, Otaru, Japan, 2010.10.
- [216] Matsu'ura, M., C. Hashimoto, T. Terakawa, and A. Noda, Interplate Coupling, Crustal Stress Pattern, and Present-day Tectonic Motion in Japan, 7-th ACES International Workshop, Otaru, Japan, 2010.10.
- [217] Furumura, T., K. Imai and T. Maeda, Tsunami simulation for the 1707 Hiei earthquake: a revised source model and tsunami inundation to onshore lakes, 7th ACES International Workshop, Otaru, Japan, 2010.10.
- [218] Noguchi, S., T. Maeda and T. Furumura, FDM simulation of trench trapped Rayleigh wave, 7th ACES International Workshop, Otaru, Japan, 2010.10.
- [219] Nakajima, K., Parallel scalable solvers using hybrid programming models on multicore clusters, 7th ACES International Workshop, Otaru, Japan, 2010.10.
- [220] Quinay, P.E., T. Ichimura, T. Nagashima, Spatial temporal multiscale approach for three-dimensional crust layer estimation, 7th ACES International Workshop, Otaru, Japan, 2010.10.
- [221] Nagashima, T., T. Tsukuda, Seismic response analysis of an oil storage tank using Lagrangian fluid finite elements, 7th ACES International Workshop, Otaru, Japan, 2010.10.
- [222] Quinay, P.E., T. Ichimura, M. Hori, and M. Lalith, Three-dimensional layer interface modeling using spatial-temporal multi-resolution inversion and hybrid-grid FEM, The 13th Japan Earthquake Engineering Symposium, Tsukuba, Japan, 2010.11.
- [223] 松浦充宏・橋本千尋・寺川寿子・野田朱美, 日本列島域のプレート間カップリング, 地殻応力, 及び造構造運動, 日本地震学会 2010 年秋季大会, 広島, 2010.10.
- [224] 野田朱美・松浦充宏, GPS 歪みデータの逆解析によるプレート境界のすべり遅れ分布の推定: 関東・東海地域への摘要, 日本地震学会 2010 年秋季大会, 広島, 2010.10.
- [225] 寺川寿子・Miller, S.・松浦充宏, 日本列島域のプレート間カップリング, 地震の発生に果たすテクトニック応力場と間隙水圧の役割, 日本地震学会 2010 年秋季大会, 広島, 2010.10.
- [226] 橋本千尋・福山英一・松浦充宏, プレート沈み込み帯の地震発生サイクル: すべり履歴と応力蓄積レート, 日本地震学会 2010 年秋季大会, 広島, 2010.10.
- [227] 古村孝志・前田拓人・今井健太郎, 1605 慶長地震による大津波生成メカニズム, 日本地震学会 2010 年秋季大会, 広島, 2010.10.
- [228] 野口科子・笹谷努, 表層地盤の非線形応答特性と地盤パラメタとの関係, 日本地震学会 2010 年秋季大会, 広島, 2010.10.
- [229] Nakajima, K., P Parallel Preconditioning Methods for Ill-Conditioned Problems on Multicore Clusters, 2011 SIAM Conference on Computational Science and Engineering (CSE11): Parallel Programming Models and Algorithms for Scalable Manycore Systems Part-II of III, Reno, NV, USA, 2011.03.

③ ポスター発表 (国内会議18件, 国際会議29件)

- [1] Yamashita, F., K. Kubo, R. Yamada, and K. Omura, Electrical structure of the shallow part of the Atotsugawa fault, central Japan: Detecting an echelon structure in the fault zone, AGU 2005 Fall Meeting, San Francisco, USA, 2005.12.
- [2] 長嶋利夫, IBM eSERVER p5 上での大規模 X-FEM 構造解析, 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(HPCS2006), 東京, 2006.01.
- [3] 村岡雅江・奥田洋司, グリッドメタコンピューティングによる有限要素流れ解析と負荷分散, 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(HPCS2006), 東京, 2006.01.
- [4] 中島研吾, SMP クラスタ型並列計算機における有限要素法アプリケーションの性能比較(その 2), 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(HPCS2006), 東京, 2006.01.
- [5] Matsu'ura, M., T. Furumura, H. Okuda, T. Ichimura, T. Nagashima, E. Fukuyama, S. Ozawa, and K. Nakajima, Integrated predictive simulation system for earthquake and tsunami disaster, SIAM 12th Conference on Parallel Processing for Scientific Computing, San Francisco, USA, 2006.02.
- [6] Muraoka, M. and H. OKUDA, Finite element fluid metacomputing using remote PC-cluster sets with load balance, SIAM 12th Conference on Parallel Processing for Scientific Computing, San Francisco, USA, 2006.02.
- [7] 樋口春隆・佐藤利典・松浦充宏・橋本千尋・野田朱美, 地震サイクルモデルを用いた房総半島海成段丘面からの元禄関東地震震源の推定, 日本地球惑星科学連合 2006 年大会, 幕張メッセ, 2006.05.
- [8] 太田雄介・佐藤利典・橋本千尋・松浦充宏, 活断層データを用いた中部日本の応力分布とシミュレーション結果との比較, 日本地球惑星科学連合 2006 年大会, 幕張メッセ, 2006.05.
- [9] 鹿倉洋介・中島研吾・松浦充宏, 有限要素法によるプレート沈み込み帯の変形解析, 日本地球惑星科学連合 2006 年大会, 幕張メッセ, 2006.05.
- [10] 小沢慎三郎・水藤尚, 豊後水道ゆっくり地震におけるプレート間滑りの時空間変化, 日本地球惑星科学連合 2006 年大会, 幕張メッセ, 2006.05.
- [11] 水藤尚・小沢慎三郎・今給黎哲郎, 東海スロースリップイベントは終わったのか, 日本地球惑星科学連合 2006 年大会, 幕張メッセ, 2006.05.
- [12] Terakawa, T. and M. Matsu'ura, CMT data inversion using a Bayesian information criterion to estimate seismogenic stress fields, International Workshop on Tectonics of Plate Convergence Zones, Tokyo, Japan, 2006.09.
- [13] Hashimoto, C. and M. Matsu'ura, 3-D simulation of long-term stress build-up caused by mechanical interaction at convergent plate boundaries, International Workshop on Tectonics of Plate Convergence Zones, Tokyo, Japan, 2006.09.
- [14] 齊藤竜彦・古村孝志, 3次元地震動シミュレーションを利用した津波波源モデルの高精度化, 日本地震学会 2006 年秋季大会, 名古屋, 2006.10/11.
- [15] 小沢慎三郎・水藤尚・今給黎哲郎, 2003 年以降に見られる岩手付近のプレート間カップリングの回復の可能性, 日本地震学会 2006 年秋季大会, 名古屋, 2006.10/11.
- [16] 水藤尚・小沢慎三郎, 東海スロースリップの新たな展開の可能, 日本地震学会 2006 年秋季大会, 名古屋, 2006.10/11.
- [17] Terakawa, T. and M. Matsu'ura, Absolute strength of the San Andreas Fault inferred from tectonic loading simulation and CMT data inversion, AGU 2006 Fall Meeting, San Francisco, USA, 2006.12.
- [18] Hashima, A. and M. Matsu'ura, 3-D simulation of tectonic evolution in Mariana with a coupled model of plate subduction and back-arc spreading, AGU 2006 Fall Meeting, San Francisco, USA, 2006.12.
- [19] Sato, T., H. Higuchi, C. Hashimoto, and M. Matsu'ura, Estimation of seismic fault slip distribution from marine terrace data using an earthquake cycle model, AGU 2006 Fall Meeting, San Francisco, USA, 2006.12.

- [20] Nakajima, K., T. Nagashima, M. Matsumoto, T. Ichimura, T. Furumura, and H. Okuda, Large-scale coupled simulations for seismic response of multiple oil-storage tanks, SIAM Conference on Computational Science and Engineering (CSE07), Costa Mesa, USA, 2007.02.
- [21] Nakajima, K., Parallel iterative solvers for ill-conditioned problems with reordering, SIAM Workshop on Combinatorial Scientific Computing (CSC07), Costa Mesa, USA, 2007.02.
- [22] 橋間昭徳・深畑幸俊・松浦充宏, 弾性-粘弾性層構造媒質中の等方膨張による内部変形場, 日本地球惑星科学連合 2007 年大会, 幕張メッセ, 2007.05.
- [23] 齊藤竜彦・古村孝志, 2006 年と 2007 年に千島列島東方で発生した2つの地震による津波, 日本地球惑星科学連合 2007 年大会, 幕張メッセ, 2007.05.
- [24] Saito, T., and T. Furumura, An integrated numerical simulation for tsunami and seismic wave propagation generated by subduction-zone large earthquakes, IUGG XXIV General Assembly, Perugia, Italy, 2007.07.
- [25] 齊藤竜彦・古村孝志, 地震-津波の連成シミュレーション, 次世代スーパーコンピューティング・シンポジウム, 東京, 2007.10.
- [26] Terakawa, T. and M. Matsu'ura, 3-D seismogenic stress fields in and around Japan, inferred from CMT data inversion, AGU 2007 Fall Meeting, San Francisco, USA, 2007.12.
- [27] Ichimura, T., M. Hori, J. Bielak, and E. Shinotake, Multiresolution structured and unstructured finite element method for three-dimensional attenuated earthquake ground motion modeling in basins including topography, AGU 2007 Fall Meeting, San Francisco, USA, 2007.12.
- [28] 佐藤陽平・奥田洋司, 改良型確率有限要素法のグリッド実装, 2008 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(HPCS2008), 東京, 2008.01.
- [29] Nakajima, K., Intelligent domain partitioner for parallel finite-element applications, SIAM 13th Conference on Parallel Processing for Scientific Computing (PP08), Atlanta, USA, 2008.03.
- [30] 市村強・篠竹英介・堀宗朗, 地殻構造のモデル化及び推定精度が構造物の動的応答に及ぼす影響に関する基礎検討, 日本地球惑星科学連合 2008 年大会, 幕張メッセ, 2008.05.
- [31] Fukuyama, E., S. Aoi, and H. Hirose, Coseismic ground tilt during the 2008 Iwate-Miyagi earthquake, 7th General Assembly of Asian Seismological Commission, Tsukuba, Japan, 2008.11.
- [32] Furumura, T. and T. Saito, Large-scale parallel 3D FDM simulation of seismic wave propagation using high-performance computers, 7th General Assembly of Asian Seismological Commission, Tsukuba, Japan, 2008.11.
- [33] Saito, T., T. Furumura, and K. Satake, Dispersive tsunami excited by the 2004 off Kii earthquake, 7th General Assembly of Asian Seismological Commission, Tsukuba, Japan, 2008.11.
- [34] Georgescu, S., Y. Sato, and H. Okuda, CUKr-Krylov solvers on GPU clusters, Supercomputing 2008 (SC08), Austin, USA, 2008.11.
- [35] Shikakura, Y., K. Nakajima, Y. Fukahata, and M. Matsu'ura, A mechanical-thermal coupled FEM model for tectonic deformation in subduction zones, AGU 2008 Fall Meeting, San Francisco, USA, 2008.12.
- [36] Yamashita, F., K. Mizoguchi, E. Fukuyama, and K. Omura, Re-examination of the present stress state of the Atera Fault, central Japan, based on the calibrated crustal stress data of hydraulic fracturing test by measuring the tensile strength of rocks, AGU 2008 Fall Meeting, San Francisco, USA, 2008.12.
- [37] Mizoguchi, K. and E. Fukuyama, Friction of granite and gabbro at subseismic sliprate, AGU 2008 Fall Meeting, San Francisco, USA, 2008.12.
- [38] 佐藤陽平・奥田洋司, デスクトップグリッド利用による分散型確率有限要素法, 情報処理学会 2008 年ハイパフォーマンスコンピューティングと計算科学シンポジウム, 東京, 2009.01.

- [39] 福山英一・Hok, S., すべり分布を用いた動力学的地震破壊モデルの構築, 日本地球惑星科学連合 2009 年大会, 幕張メッセ, 2009.05.
- [40] Hok, S. and E. Fukuyama, Dynamic rupture of shallow 3D dipping fault earthquakes using a new BIEM technique for half-space medium, AGU 2009 Fall Meeting, San Francisco, USA, 2009.12.
- [41] Noguchi, S., T. Furumura and T. Sasatani, Nonlinear site response due to large ground acceleration: Observation and computer simulation, AGU 2009 Fall Meeting, San Francisco, USA, 2009.12.
- [42] Matsu'ura, M., E. Fukuyama, and C. Hashimoto, Integrated predictive simulation system for earthquake and tsunami disaster (1) Predictive simulation for earthquake generation, 7th ACES International Workshop, Otaru, Japan, 2010.10.
- [43] Furumura, T., T. Saito, and S. Noguchi, Integrated predictive simulation system for earthquake and tsunami disaster (2) Strong motion and tsunami generation, 7th ACES International Workshop, Otaru, Japan, 2010.10.
- [44] Ichimura, T. and T. Nagashima, Integrated predictive simulation system for earthquake and tsunami disaster (3) Combined simulation system for ground motion/structure oscillation, 7th ACES International Workshop, Otaru, Japan, 2010.10.
- [45] Okuda, H. and K. Nakajima, Integrated predictive simulation system for earthquake and tsunami disaster (4) Framework for Development of Parallel Codes, 7th ACES International Workshop, Otaru, Japan, 2010.10.
- [46] Furumura, T., K. Imai, and T. Maeda, Tsunami simulation for the great 1707 Hoei, Japan, earthquake, AGU 2010 Fall Meeting, San Francisco, USA, 2010.12.
- [47] Noguchi, S., T. Maeda and T. Furumura, Computer simulation of trench trapped Rayleigh wave, AGU 2010 Fall Meeting, San Francisco, USA, 2010.12.

(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
 - 市村 強, 土木学会論文奨励賞(2006年5月)
 - 市村 強, 文部科学大臣表彰・若手科学者賞(2007年4月)
 - 齊藤竜彦・古村孝志, 次世代スーパーコンピューティング・シンポジウム最優秀ポスター賞(2007年10月)
 - 市村 強, SSMS Outstanding Paper Award (Society for Social Management Systems, 2009年3月)
 - 中島研吾, 平成20年度山下記念研究賞(情報処理学会, 2009年7月)
- ② マスコミ(新聞・TV等)報道(プレス発表をした場合にはその概要もお書き下さい。)
 - 日経新聞 2006年11月2日「東南海地震, 首都圏の超高層ビル30分超揺れも」
 - 朝日新聞 2006年10月27日「津波20分で三浦半島に。東南海地震の影響を画像化」
 - 朝日新聞 2007年2月21日「シンポ『関東平野の地震』最前線の研究紹介」
 - 読売新聞 2007年4月15日「関東平野揺れやすい一震源遠くても堆積層で地震波増幅」
 - 産経新聞 2007年9月4日「複合災害の時代:長周期地震動」
 - 読売新聞 2008年4月15日「堆積層で津波巨大化, 地震で変形, 東大が明治三陸地震を解析」
 - 東京大学新聞 2008年6月3日「巨大津波の原因解明/明治三陸地震-津波連成シミュレーションに関して」

- 読売新聞 2009 年 1 月 25 日「大都市の長周期地震動／東海・東南海地震発生を想定した、長周期地震動のコンピュータシミュレーションに関して」
- 朝日新聞 2009 年 5 月 21 日「東海・東南海・南海 15～30 分差で地震、津波の高さ2倍／南海トラフ地震の時間差発生による津波増幅に関して」
- 日本経済新聞 2009 年 5 月 23 日「遠隔地で発生、長周期地震動／首都圏の長周期地震動の観測とシミュレーションに関して」
- 読売新聞 2009 年 10 月 17 日「東海・東南海・南海3地震連動なら日向灘まで震源域／南海トラフ地震の連動発生による地震動と津波に関して」
- 東海テレビ 2006 年 10 月 2 日「ニュース特集／東南海地震の長周期地震動シミュレーションに関して」
- 読売テレビ 2006 年 10 月 17 日「ニュース特集／地震-津波シミュレーションに関して」
- フジテレビ 2006 年 10 月 27 日「News スピーク／高層難民地震の死角／長周期地震動シミュレーションに関して」
- TBS 2006 年 11 月 5 日「イブニングニュース／東南海地震の津波シミュレーションに関する学会発表」
- 中部日本放送 2006 年 11 月 1 日「CBS いっぽう／東南海地震の津波シミュレーションに関する学会発表」
- フジテレビ 2007 年 4 月 3 日「トクだね／東南海地震の長周期地震動に関して」
- 山陽放送 2007 年 9 月 20 日「イブニング DonDon／緊急地震速報に関して南海地震のシミュレーションの紹介」
- NHK 2007 年 10 月 20 日「ニュース7, BS ニュース／明治三陸津波地震シミュレーションに関して」
- 静岡朝日放送 2007 年 12 月 24 日「宝永地震の強震動シミュレーションに関して」
- TBS 2008 年 6 月 11 日「News I／中国四川の地震と長周期地震動のシミュレーションに関して」
- NHK 2008 年 8 月 28 日「首都圏ニュース／長周期地震動のシミュレーションに関して」
- 中部日本放送 2008 年 8 月 30 日「南海トラフ巨大地震特番放送／南海トラフ巨大地震、津波シミュレーションに関して」
- NHK 2009 年 5 月 19 日「ニュース／時間差地震で津波増幅も／南海トラフ地震の時間差発生による津波増幅に関して」
- 中部名古屋放送 2009 年 9 月 26 日「迫り来る天変地異／東南海地震の時間差発生による伊勢湾での津波増幅に関して」
- NHK 2009 年 10 月 7 日「ニュース7／宝永地震の震源域見直し／新しい 1707 年宝永地震の震源モデルを用いた地震と津波シミュレーションに関して」
- 東京 MXTV 2009 年 10 月 17 日「ガリレオチャンネル／迫り来る首都直下地震／首都直下地震の長周期地震動シミュレーションに関して」
- 静岡放送 2009 年 10 月 18 日「大地が揺れるM8 の恐怖／想定東海地震の地震動と津波シミュレーションに関して」
- NHK 2010 年 1 月 7 日「NHK スペシャル／MEGAQUAKE 巨大地震次の巨大地震をつかめ 人類の果てしなき闘い／宝永地震の地震動、津波シミュレーションに関して」
- NHK 2010 年 1 月 14 日「NHK スペシャル／MEGAQUAKE 巨大地震 KOBE 15 秒の真実 そのとき地下で何が／地球シミュレータによる兵庫県南部地震のシミュレーションに関して」
- TBS 2010 年 8 月 14 日「報道特集／戦争に隠された地震東南海地震／1944 年東南海地震の再現シミュレーションに関して」
- 日本テレビ 2010 年 7 月 10 日「世界一受けたい授業／未知の揺れ新型地震が日本を襲う／東海・東南海・南海地震による長周期地震動に関して」

- NHK 2010 年 10 月 8 日「ニュースウオッチ 9／400 年前の大津波原因分析／1605 年慶長地震の発生メカニズムとシミュレーションについて」

③ その他

- ニュートン 2008 年 7 月号「巨大津波の原因は「やわらかい海底」だった／明治三陸地震－津波連成シミュレーションに関して」
- ニュートン 2010 年 11 月号「日本をくり返し襲う巨大地震の震源に新説，日本最大級の「宝永地震」の震源域は，九州沖まで伸びていた／宝永地震の地震津波シミュレーションに関して」

(6) 成果展開事例

① 実用化に向けての展開

プロトタイプ の完成をみた「階層連結地震・津波災害予測システム」は，地震の発生から強震動と津波の予測，そして構造物の揺れと被害の予測・災害軽減シミュレーションとして，次世代スパコンの戦略分野3「防災・減災に資する地球変動予測」における1つのサイエンスターゲットに指定され，2年の実施可能性調査研究(FS)を経て，2011 年4月から5カ年計画で本格実施されることになった。

また，本プロジェクトで完成した，「地震－津波連成シミュレーション法」は，現在文科省が進める東海・東南海・南海地震の連動性評価研究において，1707 年宝永地震や 1605 年慶長地震の津波・強震動予測手法に採用された。

② 社会還元的な展開活動

特になし。

§ 6 研究期間中の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
2006 年 10 月 23 日 －24 日	The First International Symposium for Integrated Predictive Simulation for Earthquake and Tsunami Disaster	東京大学 理学部1 号館 小 柴ホール	90 名	地震・地殻ダイナミクス分野及び計算科学分野の海外の指導的研究者を招聘し，地震・津波・強震動の大規模シミュレーションに関する現状と将来について議論した。
2006 年 10 月 25 日	International Workshop on Collaboration between Numerical Methods and Large-Scale Scientific Computation 2006	東京大学 理学部1 号館 336 号室	50 名	大規模実アプリケーションにおける行列解法(疎行列，密行列)に関連した様々な問題において，数値計算分野の研究者，アプリケーション分野の研究者・技術者が最新の研究成果の発表を実施し，今後の研究の方向性について議論した。
2007 年 4 月 9 日	International Workshop for Large-Scale Coupled Simulations: Computation and Physics	東京大学 地震研究 所セミナ ー室 A	30 名	計算科学分野の海外の指導的研究者を招聘し，地震・津波・強震動の大規模連成シミュレーションに関する現状と将来について議論した。

2007年 12月3日 -4日	The 3rd Asian-Pacific Congress on Computational Mechanics (APCOM'07): "Future Directions of Large-Scale Scientific Computing and Parallel Linear Solvers"	国立京都 国際会館	50名	大規模実アプリケーションにおける行列解法(疎行列, 密行列)に関連した様々な問題において, 数値計算分野の研究者, アプリケーション分野の研究者・技術者が最新の研究成果の発表を実施し, 今後の研究の方向性について議論した (The 3rd Asian-Pacific Congress on Computational Mechanics (APCOM'07)のミニシンポジウムとして実施, Lawrence Berkeley National Laboratory, NEC Europe と共催)。
2008年 3月13日 -14日	13th SIAM Conference on Parallel Processing for Scientific Computing (PP08), MS28, 35, 43: "Multi-Physics Frameworks and Applications"	Renaissance Atlanta Hotel Downtown, Atlanta, Georgia	30名	Multi-Physics シミュレーションのためのフレームワーク分野において先端的な研究を実施している研究者を招聘し, 講演, 議論を実施した (13th SIAM Conference on Parallel Processing for Scientific Computing (PP08)のミニシンポジウムとして実施, Lawrence Berkeley National Laboratory, 地球シミュレータセンターと共催)。
2008年 10月21日 -22日	The Second International Symposium for Integrated Predictive Simulation for Earthquake and Tsunami Disaster	東京大学 地震研究所第1会議室	60名	地震・地殻ダイナミクス分野及び計算科学分野の海外の指導的研究者を招聘し, 地震・津波・強震動の大規模シミュレーションに関する現状と将来について議論した。
2010年 10月3日 -8日	7th ACES International Workshop	グランドパーク小樽	100名	JST の支援を受けて本プロジェクトチームが主催する国際会議。地震や津波の大規模シミュレーション及びその基礎となる計算情報科学の第一線で活躍する研究者達により, 最新の研究成果の発表, 議論及び情報交換が行われた。本ワークショップは, 今後の世界の地震・津波シミュレーション研究の方向を定め, アジア太平洋地域の諸国との国際連携を一層強化する上で極めて重要な意義があった。

§7 結び

プレート運動による地殻応力の蓄積を経て大地震が発生し, 地震波が構造物を揺らし, 津波が海岸部を襲うまでの一連の過程を再現・予測する観測・計算融合の階層連結型高精度シミュレーション・システムを世界に先駆けて開発するという当初の目標は, 充分達成できたと自負しています。このプロジェクトを通じて得られた研究成果(本文参照)は多岐にわたりますが, いずれも世界に先駆けた独創的なものと自己評価しています。これらの素晴らしい研究成果を今後につなげていくためには, 本プロジェクトチームの主要メンバーが, 次世代スパコンの戦略分野3「防災・減災に資する

地球変動予測」において、中心的役割を担っていく必要があると考えています。

本プロジェクトチームは、当初6つのグループでスタートしましたが、途中でメンバーが東京大学と名古屋大学のしかるべきポストに着いたので、最終的には8つのグループで構成されることになりました。しかし、研究上は各グループが密接に連携・協力し、全体として大変まとまりのあるチームでした。こうした良い環境の中で次の時代を担う何人もの優秀な若手研究者が育ちました。本年10月の国際ワークショップ(第7回 ACES 国際ワークショップ)は、本プロジェクトチームが、5年間の総決算として、全員一丸で主催したものです。その時の集合写真を以下に添付いたします。



The 7th ACES International Workshop October 3-8, 2010 Otaru, Japan