

研究課題別事後評価結果

1. 研究課題名：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
2. 研究代表者名及び主たる研究参加者名（研究機関名・職名は研究参加期間終了時点）：
研究代表者

松浦 充宏（統計数理研究所予測発見戦略研究センター 特任教授）

主たる共同研究者

古村 孝志（東京大学情報学環／地震研究所（兼務） 教授）

奥田 洋司（東京大学人工物工学研究センター 教授）

市村 強（東京大学地震研究所 准教授）

長嶋 利夫（上智大学理工学部 教授）

福山 英一（（独）防災科学技術研究所地震研究部 総括主任研究員）

中島 研吾（東京大学情報基盤センター 教授）

橋本 千尋（名古屋大学大学院環境学研究科 准教授）

3. 研究実施概要

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。

4. 事後評価結果

4-1. 研究の達成状況及び得られた研究成果(論文・口頭発表等の外部発表、特許の取得状況等を含む)

地殻応力の蓄積をGPS地表変位データから逆解析する手法を開発し、日本列島周辺域のプレート境界のひずみエネルギー分布を求める手法を確立し、エネルギー蓄積地点に応力擾乱を与えて地震破壊の発生と伝播を解析するシミュレーションコードを完成した。また、それに伴う地震波動の伝播を解析するシミュレーションコードを完成し、更に、津波の生成・伝播シミュレーションコードとの連成にも成功した。このように、当初計画した主要なサブシステム、(1)地震発生予測サブシステム、(2)強振動／津波予測サブシステム、及び(3)人工構造物振動予測サブシステム、の構築と検証という目標は十分達成したと評価できる。

サブシステム毎には、(1)地震発生予測においては、GPSデータや地震データから地殻応力や歪み速度などを推測する逆解析手法を開発し、それらのデータを基に過去の事例とモデル計算結果を比較することにより、精度良くシミュレーションできることを示したこと、(2)強振動／津波予測においては、新たに開発したナビエ・ストークス方程式の厳密解法による津波シミュレーションと地震シミュレーションコードとを結合して、地震－津波連成シミュレーションシステムを構築して、巨大地震による強震動と津波の高精度同時評価を実施し、過去の事例と比較し、モデルの有効性を確認したこと、(3)人工構造物振動予測においては、地震波と構造物の相互作用を考慮した連成シミュレーションにより、石油貯蔵タンクの動的応答を高精度でシミュレーションできたこと及び都市震災評価シミュレーションシステムを開発したこと、などが大きな成果であった。

但し、上記サブシステム間の横断的な基盤である階層連結プラットフォームの構築のテーマにおいては、連成カプラーの開発やハイブリッド並列プログラミングモデルの評価等、単独のテーマとしては、幾つかの成果は見られるものの、前記サブモデルとの連携・関連が不明である。

津波伝播シミュレーションを、当初案の線形長波近似モデルより現実的なナビエ・ストークス厳密解法モデルにより実現し、プレート境界地震に対する統合シミュレーションシステムを完成させた。これを用いて南海トラフ地震の発生予測とそれに伴う地震動・津波災害予測の定量的評価を実施したことは新たな展開であり、一定の成果が得られている。また、当初は地球シミュレータ(ベクトル並列機)用のコード開発を目指したが、地球シミュレータのリプレースに伴い、スカラー並列コンピュータを想定したコードを開発した。

地震研究は日本がリードすべき分野であり、本研究はプレート運動による応力蓄積、地震破壊、地震波伝播、津波伝播というマルチフィジックス・マルチスケールの課題として世界をリードする事業と評価できる。論文の質、発表の質においても優れている。多くの論文をNature Geoscience等の国際誌に発表するとともに、第7回ACES国際ワークショップの主催など多くの国際ワークショップ、シンポジウム等を開催している。国際会議招待講演(32件)も多くて良い。口頭発表は226件と多く評価できる。

地震、津波、構造物のシミュレーション分野と、異なる分野のチームをよく統率し、優れた成果を出したと評価する。但し、本研究の主旨から見て、統合プラットフォームチームとの連携をもっと密にすべきであったと考える。

設備費が当初計画のほぼ2倍であるが、研究のために有効に使用されたと評価する。

4-2. 研究成果の科学技術や社会へのインパクト、戦略目標への貢献

本研究分野は、地震大国である我が国の環境から、科学的な観点よりは、成果の技術的な側面が社会に与えるインパクトが極めて大きい。また、海外と比較してもこのようなレベルの研究は恐らく無いものと思われる。しかし、地震や津波の予測が従来以上に精度が高まったとは言え、この成果が実際の現場で使われない限り、実地的な社会へのインパクトは無いことを心に銘記すべきである。

GPSによる地殻変動観測から地震エネルギーの蓄積状態を求め、その蓄積状態から地震破壊の広がりを求め、それに伴った地震波の伝播と津波の発生・伝播を同時に連成させるという本事業の成果は、地震国日本にとって大いに評価できる。

この研究計画で開発された地震発生予測サブシステムは、世界に類を見ないモデルシステムである。このシミュレーションモデルにおいては、観測データとの融合が図られており、モデルの信頼性が常に担保されている。地震発生予測サブシステムを用いた研究においては、十勝沖地震等の東北日本における地震発生サイクルのシミュレーション結果と、南海トラフ等における地震発生サイクルのシミュレーション結果等とを比較検討することによって、今後の地震予知研究に貢献することが期待される。例えば、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、本システムを用いて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が可能になるかもしれない。

今後の展開として、内陸地震への適用を検討しているようであるが、現在のプレート沈み込みによる太平洋沿岸モデルを更に進化させ、実際の予測や防災への適用を検討する必要があると思われる。本研究の真の成果は、それが実際の現場で使われ、防災に役立つことである。そのための努力が無ければ、結局は単に知見を得たとか、実証できたという段階で終わってしまうことになる可能性がある。勿論、成果の適用には、制度上や場合によっては法整備という問題もあるかと思うが、より精度を高めたり、実際の例との比較を行ったりすることにより、実際に適用できるということを一般に説明できるようにすることが重要と考える。

本研究領域における自然災害予測・防災関係の戦略目標は、「地震による被害の予測、ハザードマップの作成などの自然災害・防災シミュレーションを創出」と言うものであり、この観点から見ると、本研究は手法の開発及びそれによる成果創出と言う点で、既に戦略目標を達成しているとともに、今後の展開にも大いに期待できる。

4-3. 総合的評価

これまで、地震の発生から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は開発されていなかったが、プレート運動、地殻応力蓄積、地震破壊伝播、地震波動伝播、人工構造物振動の要素モデルに、新たに津波発生・伝播の要素モデルを結合してシステムを構築することで、地震・津波連成シミュレーションに成功し、世界に先駆けて「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」を完成させ、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ことは高く評価できる。今後は、シミュレーション結果がどの程度実際と合致しているかの検証が重要となるので、システムの正確な信頼性評価法の確立も必要と思われる。

このように、個々のサブシステムは当初目標を達成し、本研究は十分な成果が得られていると高く評価するが、既に述べたように本研究の分野では、ここで開発されたモデルや手法が実際の予報や防災の現場で使われて初めて成果となるものである。実際の適用には、社会制度面からの色々な問題があるかもしれないが、研究としては、更に精度を高めることや実際の適用を想定したシステム化などを進めることが必要であろう。

社会的に関心が持たれるテーマであるが、各論は夫々の専門家からは議論を呼ぶものであり、真に信頼性のある成果を短期日に出すことは容易ではなかったのではないかとと思われる。その困難さを承知でリーダーシップを発揮され、一つのストーリーに沿って各分野を取り纏められたことに敬意を表する。