

「地震調査研究推進本部(本部長:文部科学大臣)」(地震本部)は、政府の特別の機関で、我が国の地震調査研究を一元的に推進しています。

The Headquarters for Earthquake Research Promotion News

地震本部 ニュース

2020 冬

令和3年1月18日発行(年4回発行) 第13巻 第3号

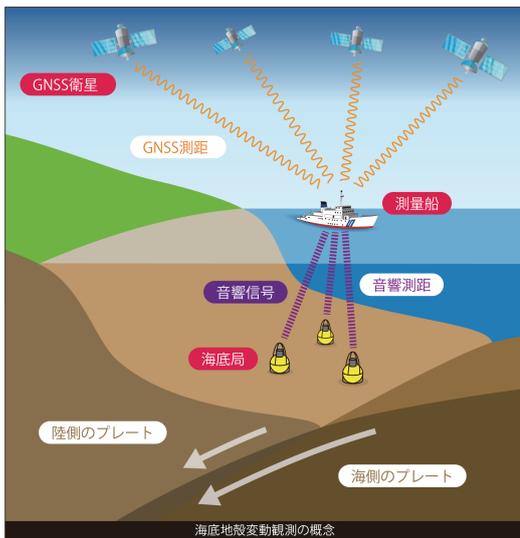


図1 GNSS-音響測距結合方式(GNSS-A)による海底地殻変動観測



地震本部ホームページ <https://www.jishin.go.jp/>

P2

地震調査研究推進本部

次世代地震計測と最先端ベイズ統計学との融合によるインテリジェント地震波動解析(iSeisBayes)の取り組み

東京大学地震研究所

P4

地震調査研究推進本部

災害軽減へ向けて理学・工学をつなぐ計算科学

東京大学地震研究所

P6

地震調査研究プロジェクト

防災対策に資する南海トラフ地震調査研究プロジェクト(その2)

防災科学技術研究所・京都大学・名古屋大学・東京大学

P8

調査研究機関の取り組み

GNSS-A海底地殻変動観測の新解析手法の開発とプログラムコードの公開

海上保安庁

P10

地震調査研究推進本部

地震本部のホームページについて

次世代地震計測と最先端ベイズ統計学との融合によるインテリジェント地震波動解析 (iSeisBayes) の取り組み

— 東京大学地震研究所 —

1 はじめに

1995年兵庫県南部地震（阪神・淡路大震災）以降、わが国には1,000点を超える地震計からなる高感度地震観測網（Hi-net）をはじめとする地震観測網が整備され、日本周辺における地震活動を24時間365日絶え間なく観測しています。しかし観測点の間隔は数十キロメートルもある上、人工ノイズが大きい都市部には、ほとんど観測点が設置されていませんでした。1923年大正関東地震（関東大震災）のような首都直下型地震がいずれ再来する可能性が高いことから、文部科学省の委託研究「首都直下地震防災・減災特別プロジェクト」（2007～2011年度）の一環として約300点の地震計からなる首都圏地震観測網（通称：MeSO-net）が整備されました。MeSO-netの観測点の間隔は数キロメートルですので、世界的に見ても極めて空間解像度の高い地震観測ができるようになったと言えます。これに加え、2017年度には「データ利活用協議会」が発足し、電気・ガス・水道会社などの民間会社が持つ振動計やスマートフォンに内蔵されている加速度計のデータを、地震研究に有

効に活かすための議論が始まっています。これが実現すれば、事実上、地震観測点が数千万ないし数億点に達することになり、「地震超ビッグデータ」が得られることとなります。しかしながら、従来の地震データ解析手法は、このような地震超ビッグデータに適したものはなっていません。計算時間を短縮するために高性能な計算機を使うだけでは不十分で、解析アルゴリズムから根本的に作り変えていく必要があります。近い将来、必ず到来する地震超ビッグデータ時代に向けて、今からこれに着手していかなければなりません。そのためには、もはや地震学の専門家だけでなく、近年進展著しい機械学習やベイズ統計学を導入するために、情報科学や数理科学の専門家の協力が必要不可欠です。

2

次世代地震計測と最先端ベイズ統計学との融合によるインテリジェント地震波動解析 (iSeisBayes)

2017年度に、科学技術振興機構 戦略的創造研究推進事業 CREST の研究課題として「次世代地震計測と最先端ベイズ統計学との融合によるインテリジェント地震波動解析」（通称：iSeisBayes、研究代表者：平田直

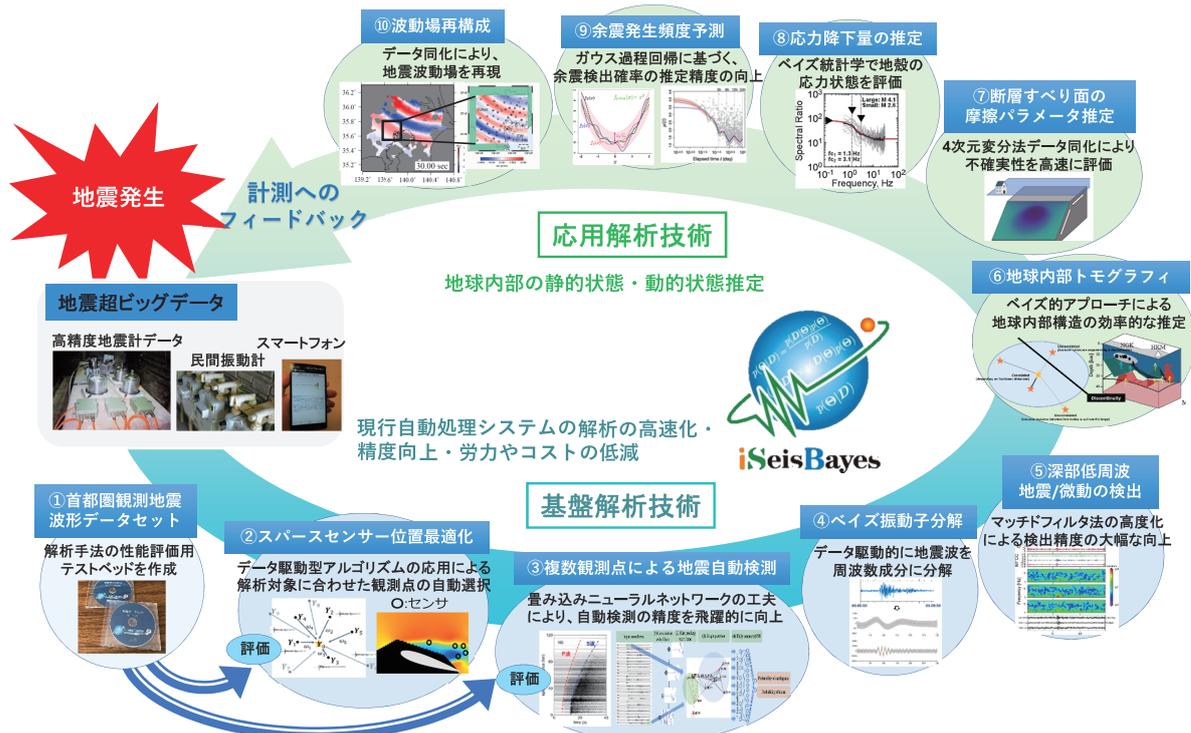


図1 地震超ビッグデータ時代に向けたインテリジェント地震波動解析システム

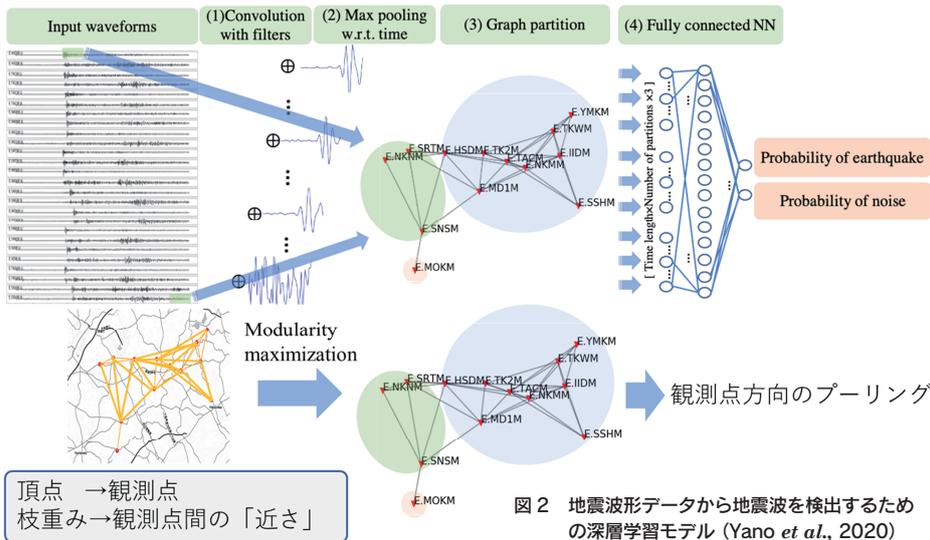


図2 地震波形データから地震波を検出するための深層学習モデル (Yano et al., 2020)

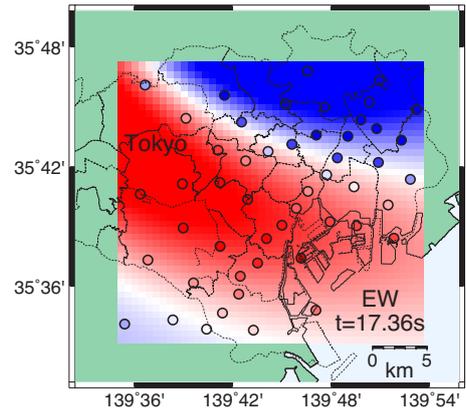


図3 データ同化に基づく首都圏における地震波動場の再現 (Kano et al., 2017)

東京大学名誉教授)が採択されました。本研究課題では、東京大学地震研究所を中心とする地震学の専門家と、東京大学大学院情報理工学系研究科を中心とする統計学の専門家の協働により、地震超ビッグデータ時代に向けたデータ解析アルゴリズムの抜本的革新を目指しています。2020年度からは、東北大学大学院工学研究科を中心とする応用数理学に強い研究者が加わって約30名の研究者が集結する大きなプロジェクトに発展し、毎月開催する月例会を通して若手研究者を中心に積極的な異分野交流を進めています。

iSeisBayesで開発するアルゴリズム群は、「基盤解析技術」と「応用解析技術」に大別されます(図1)。基盤解析技術では、多種多様かつ膨大な数のセンサーによって構成される地震観測点から、目的に合わせた観測点を選択する「観測点選択アルゴリズム」や、地震波形データから地震や微動といった地球内部起源の振動現象を抽出するための、深層学習をはじめとする情報科学的手法を開発しています(図2)。地震の初動であるP波の検出は、小さな地震の場合には既存手法では見逃しや誤検知が10%程度起こりますが、我々はそれを1%程度にまで抑えることを目標としており、ある条件の下ではその目標を達成しつつあります。また、応用解析技術では、地震発生域における地下の状態を示すバロメータである応力降下量を「マルコフ連鎖モンテカルロ法」によって推定する手法や、「ガウス過程回帰」に基づき、本震直後の極めて雑音の多い時間帯の余震検知確率を高精度に推定する手法、さらには気象予報でも用いられているシミュレーションとデータを融合する計算技術「データ同化」を導入し、プレート境界における摩擦パラメータ推定や、緊急地震速報の改良に繋がる可能性を秘めた地震波動場を再現するための手法開発が進められています(図3)。

地震データ解析のための深層学習の適用研究は、iSeisBayesだけでなく、世界中で多数の研究者が精力的に進めています。しかしながら、多数存在する深層学習のネットワークモデルの良し悪しを比較し、より良いモデルの開発に繋げていくためには、同一のデータセットを使ってモデルの性能を評価する必要があります。そこでiSeisBayesでは、MeSO-netの観測データの一部を

「首都圏観測地震波形データセット」という手法性能評価用の標準データセットとしてまとめ、世界に向けて公開する準備を進めています(図4)。これは、空間的に極めて高密度な地震観測網であるMeSO-netのデータだからこそ構築可能です。



図4 手法性能評価用標準データセット「首都圏地震観測波形データセット」

3

地震学と情報科学・数理学の協働

地震学への情報科学・数理学の導入は、決して今に始まったことではありません。例えば、現在、気象庁で行われているP波の自動検出には、統計学的手法が使われています。しかしながら、地震超ビッグデータが持つ潤沢な情報を最大限に抽出し、地震防災・減災に活かしていくためには、急速な進展を遂げている現代の情報科学を採り入れ、地震データ解析手法を大幅に刷新していく必要があります。これは決して少人数の研究者で実現できるものではなく、国レベルで進めていかなくてはなりません。情報科学や数理学は、地震から国民の生活を守る力を秘めています。

iSeisBayesホームページ

<http://www.eri.u-tokyo.ac.jp/project/iSeisBayes/>

著者プロフィール

長尾 大道 (ながお ひろみち)

東京大学地震研究所 准教授。専門は数理地球科学。京都大学大学院理学研究科地球惑星科学専攻で博士(理学)を取得。核燃料サイクル開発機構(現在の日本原子力研究開発機構)、海洋研究開発機構、統計数理研究所を経て、2013年より現職。東京大学大学院情報理工学系研究科 数理情報学専攻を兼務し、固体地球科学に資する数理学に関する研究を進めており、「次世代地震計測と最先端ベイズ統計学との融合によるインテリジェント地震波動解析」プロジェクトでは事務局長を務めている。



災害軽減へ向けて 理学・工学をつなぐ計算科学

— 東京大学地震研究所 —

1 はじめに

先端的な観測が継続され、さまざまな観測データの蓄積が進められてきています。また、5G & ポスト 5G 及び IoT の進展に伴い、この蓄積がさらに加速されると期待されることから、多数の観測機器から得られたデータを蓄積し、大規模共通解析基盤を用いて多種多様なシミュレーションを駆使して過去・現在・未来を評価可能なデジタルツインを観測データとの融合により構築することで、理学から工学をシームレスに接続し、地震・火山に関する諸現象の科学的研究と直接又は間接に地震・火山に起因する災害の予防並に軽減策を従来よりもさらに深く探究することが出来るようになるものと期待されます。

2 計算科学によるひとつのブレイクスルー

地震現象は複雑であり多種多様な現象を含んでいます。しかしながら、レングスケールや分解能は異なるものの、数理問題の観点からみると地震現象の多くの挙動は、静的 / 動的・非線形 / 線形の応答としてモデル化されるという共通項があり見通しが良くなります。対象とする現象によって「構成則」や「感覚」などは異なりますが、このような観点からは理と工をそこまで区別する必要はなく、多くの現象がこれらの順・逆解析をする問題に帰着されることになります。そのため、理学から工学までをシームレスに接続し俯瞰的な観点から災害軽減を目指すための共通解析基盤の構築が出来るのではと考えられます。

一方で、このような共通解析基盤の構築には難題があります。(応力フリーの)境界条件や幾何形状が解に強く影響を及ぼす数理問題なので、非構造要素に基づく有限要素法を用いることとなりますが、対象としている問題のサイズが大きいかつ解の信頼性(収束性)を担保するための分解能が高いため、モノづくり分野等での従来の有限要素法で扱っている問題規模(100万自由度程度)よりも格段に大きな規模の問題(1億~1兆自由度)を解く必要があります。

超大規模問題を有限要素法で解くためには、超大規模

有限要素モデルの生成手法とこれを用いた解析手法が必要となり、計算科学の出番となります。三次元の複雑なモデルに対してロバストに、高精度な超大規模有限要素モデルを構築することは難題ですが、例えば、地殻変動、地震動、地盤震動解析で頻出する成層構造に対しては[1]の方法により1兆自由度を超える超大規模有限要素モデルの構築が可能となりました。一方で、この超大規模有限要素法を用いた解析はさらに難題です。超大規模問題であっても、京や富岳のような超大規模計算機を用いれば簡単に計算できると思われそうですが、実は有限要素法自体が最近の計算機機構と相性が悪い手法であり、超大規模計算機を用いたとしても超大規模問題を解くことは容易ではないのです。具体的には、有限要素法の計算の核となる部分がランダムメモリアクセス卓越型であることから生じるボトルネックの解決を図るとともに、超大規模計算機の超多数の計算機を効率的に連成させながら解く新たな手法の開発が必要となりました。

ここ最近5年ほどのうちに上記を解決するひとつの計算科学的なブレイクスルーがなされ、数百億自由度以上(最大2兆自由度)を扱うことが可能な超大規模高速有限要素法解析が実現されました(例えば[2]など)。これにより、理学から工学までのレングスケール、要求分解能、構成則が異なる、列島スケールの応力蓄積過程、M9クラスの震源過程、都市の揺れ、地盤・構造物の連成などの静的 / 動的・非線形 / 線形の挙動をこの単一の共通解析基盤により解析することが可能となりました(例えば、図1)。もちろん現時点では、ようやく解析できるようになったばかりであり、この精度・信頼性向上のために研究開発が必要なことは言うまでもありません。しかし、この共通大規模解析基盤開発により、理学から工学までの現象をシームレスに解析し、俯瞰的に理解できることの可能性が示されました。

上記の計算科学による超大規模物理シミュレーションの実現だけでなく、計算科学と情報科学の融合による新たな可能性も解析能力向上を図る上で見逃せません。例えば、超大規模物理シミュレーションにより未経験の大地震をシミュレーションし、疑似的な超大規模稠密観測データを計算機上で観測し、これにより構築した人工知能(サロゲートモデル)により被害予測を行った事例も

あります。また、対象とする微分方程式を学習した人工知能を用いることで大規模物理シミュレーション自体を高速化できる可能性（例えば、[3]）など新たなアプローチも模索されています。

3 おわりに

ここ最近5年ほどの計算科学によるブレークスルーにより、災害軽減へ向けて理学から工学までをシームレスにつなぐことを目的とした大規模共通解析基盤の開発が進みました。貴重な観測データをより活用できる解析能力向上がさらに進められることで、観測の意義がより明確化されつつ更なる先端的な観測がなされるとともに、Society5.0時代におけるBig Data & Extreme Computingを用いた都市・社会・地球の次世代デジタルツインによる理工連携の進展により災害軽減がさらに進むと期待されます。

謝辞) 本研究の一部は、ポスト「京」重点課題3「地震・津波による複合災害の統合的予測システムの構築」、「『富岳』成果創出加速プログラム:大規模数値シミュレーションによる地震発生から地震動・地盤増幅評価までの統合的予測システムの構築とその社会実装」、JSPS 科研費 JP18H05239、JP18K18873の助成を受けたものです。

引用)

[1] Tsuyoshi Ichimura, Ryoichiro Agata, Takane Hori, Kazuro Hirahara, Chihiro Hashimoto, Muneo Hori, Yukitoshi Fukahata, An elastic/viscoelastic finite element analysis method for crustal deformation using a 3-D island-scale high-fidelity model, *Geophysical Journal International*, 206, 114-129, 2016.

[2] Tsuyoshi Ichimura, Kohei Fujita, Pher Errol Balde Quinay, Lalith Maddeggedara, Muneo Hori, Seizo Tanaka, Yoshihisa Shizawa, Hiroshi Kobayashi and Kazuo Minami, Implicit Nonlinear Wave Simulation with 1.08T DOF and 0.270T Unstructured Finite Elements to Enhance Comprehensive Earthquake Simulation, *SC15: International Conference for High Performance Computing, Networking, Storage and Analysis*, Article No. 4, 2015.

[3] Tsuyoshi Ichimura, Kohei Fujita, Muneo Hori, Lalith Maddeggedara, Naonori Ueda, Yuma Kikuchi, A Fast Scalable Iterative Implicit Solver with Green's function-based Neural Networks, *2020 IEEE/ACM 11th Workshop on Latest Advances in Scalable Algorithms for Large-Scale Systems (ScalA)*, 61-68, 2020.

著者プロフィール

市村 強 (いちむら つよし)

東京大学地震研究所計算地球科学研究センター長 教授。専門は、計算科学、応用力学、地震シミュレーション。2001年東京大学大学院工学系研究科社会基盤工学専攻博士課程修了 博士(工学)。2001年東北大学大学院工学研究科土木工学専攻助手、2005年東京工業大学大学院理工学研究科土木工学専攻助教授を経て、2009年東京大学地震研究所 現在に至る。京コンピュータ・富岳コンピュータプロジェクトなどに従事しつつ、新たな計算科学・応用力学的アプローチの創成とこれらを用いた防災減災に資する地震シミュレーションの高度化に取り組んでいる。

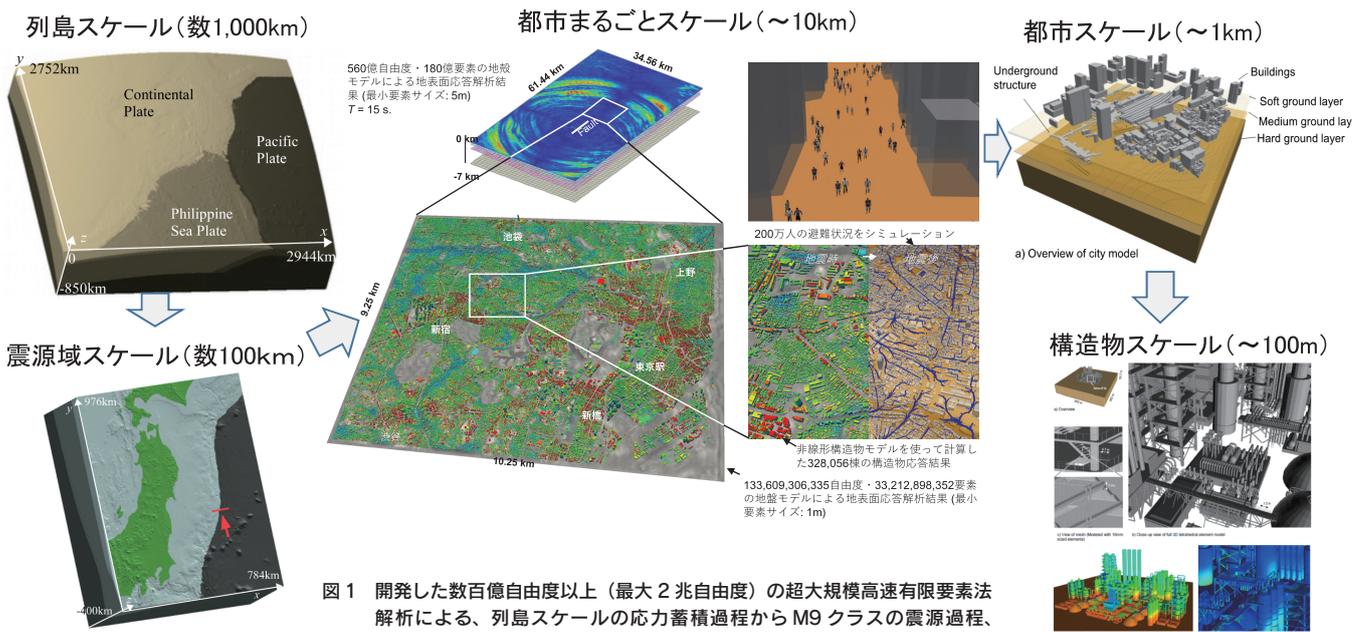


図1 開発した数百億自由度以上（最大2兆自由度）の超大規模高速有限要素法解析による、列島スケールの応力蓄積過程からM9クラスの震源過程、都市の揺れから地盤・構造物の解析例。これらを連成することで理学～工学までのシームレスなシミュレーションが可能となる。

防災対策に資する 南海トラフ地震調査研究プロジェクト (その2)

— 防災科学技術研究所・京都大学・名古屋大学・東京大学 —

1

サブテーマ2 地震防災情報創生研究

藤原 広行

本研究課題では、地震発生の時空間的な多様性を持つとされている南海トラフ沿いの巨大地震に対して、「通常と異なる現象」発生後の時間推移についてもその多様性の一例としてとらえることにより、地震や津波のハザード・リスクの防災情報基盤を創生し、「命を守る」「地域産業活動を守る」「大都市機能を守る」の3つの目標を立て研究を推進します(図1)。

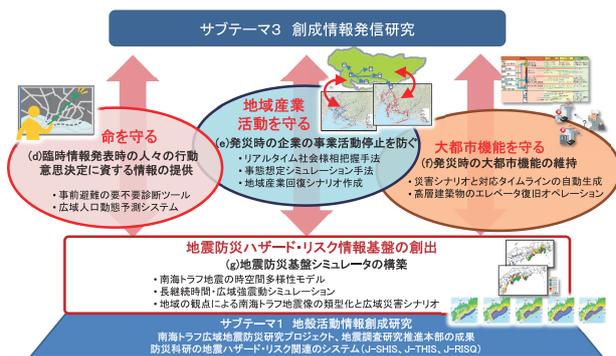


図1 サブテーマ2：地震防災情報創生研究の概要

2

サブテーマ2-(d) 臨時情報発表時の人々の行動意思決定に資する情報の提供

矢守 克也

事前避難など絶大な減災効力をもつと期待される一方で、大きな不確実性を有する南海トラフ地震に関する「臨時情報」の効力を引き出すために、どの範囲の、どのような人々が事前避難すべきか—この点に関する客観的基準、および、適切な避難先・避難方法を同定するための手法を開発し実装します。具体的には、第1に、津波避難訓練支援アプリとして開発した「逃げトレ」の成果と津波防災まちづくりのためのツール「逃げ地図」を再編し、訓練実施のたびに住民の空間移動データが標準化された形式でビッグデータとして蓄積されるシステムを構築し、事前避難の要不要を診断(避難困難地域を同定)可能なシステムとして再編し社会に実装します。第2に、空間モバイルデータを活用して、人や車の移動に伴った大規模な空間移動動態を予測・実測し、「臨時情報」の発表時に、どの地域でどのような人口移動が生じ、どこにどの程度の避

難所が必要となるかについてシミュレーションするための広域人口動態分析システムを開発し社会に実装します。

3

サブテーマ2-(e) 発災時の企業の事業活動停止を防ぐ

平山 修久

現在、多くの企業の事前防災対策に使われている被害想定は、発災時の人・物の流れなど地域を俯瞰した事態を考慮しきれていません。そのため、南海トラフ地震臨時情報発表時において、社会が萎縮することで、事業継続に対する障害生起や企業の事業活動停止への影響波及に至る恐れがあります。すなわち、臨時情報発表時の状況に即応した地域の企業活動を守ることが重要となります。本サブテーマでは、臨時情報を活かした被害軽減のため、社会のモニタリングデータを活用したリアルタイムな社会様相の把握を可能とし、様々な階層における事態想定シミュレーション手法の開発に取り組みます。地域社会と連携した産業構造把握と最適な行動計画策定手法、ダイナミックに妥容する社会の非定常状態や社会様相の把握・共有手法、特徴的時間断面での地域を俯瞰した被災シナリオと事態想定手法を開発し、相互連携技法を社会実装することで、南海トラフ地震臨時情報発表時の社会の萎縮を回避し、命を守ると同時に社会機能を維持し、後発地震での被害の最小化を目指します。そして、社会動態を反映した被害予測による事前対策、企業の災害対応計画の立案支援、積極的な事前防災投資の促進が期待できます。

4

サブテーマ2-(f) 発災時の大都市機能の維持

廣井 悠

高次かつ複雑に構成された大都市では様々な要素が関係し、巨大災害後に思いもよらない現象が発生することも少なくありません。災害直後にこれから発生する事象を定性的にリアルタイムで推測し、次々と連鎖して起こる事象を提示することができれば、副次的な災害事象を未然に防ぐことも可能と考えられます。本研究は、災害の連鎖構造を表す災害連鎖図をリアルタイムで自動的に作成し、対策に生かそうとするものです。具体的には、過去の震災関連の新聞記事やニュース原稿、インターネットの記事などあらゆる文章を教師データとして機械学習にかけると、「原因」と「結果」の膨大なデータベースが作成でき

ます。このデータベースを様々な災害現象について事前に作りこむことで、作成した学習モデルと合わせ、発災初日のニュース原稿や記事などを手掛かりに、いまでのような現象が発生して、その現象 A が発生した時に、どのような条件で望ましくない結果 B1、B2、B3…が発生するのかを、つまり巨大災害の連鎖構造をリアルタイムで予測することができます。過去の経験やデータの蓄積を利活用し、災害が社会に与える様々な悪循環を未然に防止するこの研究は、スマートシティ時代の新しい防災対策になるのではないかと考えています。

5 サブテーマ 2-(g) 地震防災基盤シミュレータの構築

中村 洋光

時空間的な地震発生の多様性を持つ南海トラフ地震を対象に、地震や津波のハザード・リスク情報を創出することを目的とした地震防災基盤シミュレータを開発します。具体的には、「通常と異なる現象」を地震発生の多様性の一例としてとらえ、それが起こった後の時間推移を考慮した条件付きリスク評価手法を開発します。また、「地殻活動情報創成研究」や地震本部の知見を採り入れつつ、地震発生の多様性を表現するために構築された時空間的に膨大な組み合わせからなる断層モデル群に対して、長継続時間・広帯域強震動や津波遡上を安定的かつ効率的にシミュレーションできる手法を開発し、事前避難、産業活動、大都市機能維持のそれぞれの地域性の観点から南海トラフの地震像を類型化する手法の開発を行い、類型化毎の代表的な広域災害シナリオを構築します。このように創出したハザード・リスク情報を格納する情報基盤を、防災科研の地震ハザードステーション (J-SHIS)、津波ハザードステーション (J-THIS)、リアルタイム地震被害推定システム (J-RISQ) と連携できる形で地震防災基盤シミュレータとして構築し、他の研究テーマと連携して利活用を進めることで防災対策に活かします。

6 サブテーマ 3 創成情報発信研究

高橋 成実

本研究課題では、秋号で紹介したサブテーマ 1 からの理学研究、サブテーマ 2 からの工学・社会科学研究成果を取り込み、地域や企業と連携して、それらの情報を利活用する手法を検討して情報の水平展開を行います。下記の 3 つのアクションを開始します。

一つ目は、これまでの理学・工学・社会科学の成果を地域や企業に展開した例を共有し、各地域と共有するための情報発信検討会の開催です。津波、複合災害、支援・内陸地震、産業の 4 つのテーマに絞り、各地域の防災上の課題としている地域や企業と共有します。参加組織としては、地域の拠点大学、自治体、基礎自治体、インフラ事業者、地域に貢献する企業を念頭に置いています。

二つ目は、地域の防災上の課題を研究成果に基づき評価する取り組みです。2011 年東日本大震災では、巨大津波により、多くの瓦礫が発生し、集積場所では津波火災が発生しました。浅い津波浸水深評価が安心材料になり得る

ため、推定される強震動と地盤データを用いた海岸構造物の変形、津波浸水深から瓦礫発生量と集積地、さらに、津波火災の評価へとつなげます。これにより、避難場所の潜在的なリスクの可視化が可能になります。被害軽減化と復興迅速化に向けて、自治体とその対策の議論につなげます。

最後に、これらの情報を受け取った各人が適切に判断し、行動につなげるために、情報リテラシーの向上を図ります。知識、経験、判断力、行動力、未来志向の 5 つの項目の向上を計測する仕組みを検討しています。これは、研究成果がいかに地域防災に貢献しているか、地域からの評価を受けることを意味します。自治体や基礎自治体と連携し、理学・工学・社会科学の成果の地域実装を図るとともに、その着実な進捗をモニターします。

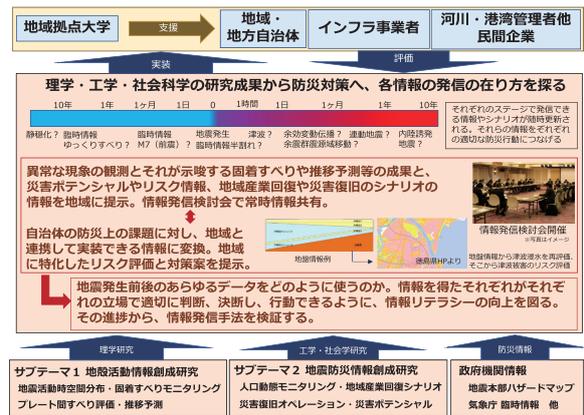


図2 サブテーマ3：創成情報発信研究の概要

著者プロフィール

藤原 広行 (ふじわら ひろゆき)
 防災科学技術研究所マルチハザードリスク評価研究部門長。1989年京都大学大学院理学研究科中退。科学技術庁国立防災科学技術センター(現:防災科学技術研究所)入所。博士(理学)。全国強震観測網 K-NET の整備、全国地震動予測地図の作成、リアルタイム地震被害推定システムの開発などに従事。

矢守 克也 (やもり かつや)
 京都大学防災研究所教授。大阪大学大学院人間科学研究科単位取得退学。博士(人間科学)。専門は社会心理学、防災心理学。経済産業省グッドデザイン賞(2018年)、国際総合防災学会実践科学賞(2018年)、日本自然災害学会「学術賞」(2015年)などを受賞。主著に、「Disaster Risk Communication: A Challenge from a Social Psychological Perspective」(Springer)、「防災人間科学」(東京大学出版会)など。

平山 修久 (ひらやま ながひさ)
 東海国立大学機構名古屋大学減災連携研究センター准教授。専門は災害環境工学。京都大学大学院工学研究科で博士(工学)を取得。人と防災未来センター、京都大学大学院工学研究科、国立環境研究所を経て2016年より現職。上水道システムの災害対策、災害廃棄物対策に関する研究を進めている。

廣井 悠 (ひろい ゆう)
 東京大学大学院准教授。東京大学大学院工学系研究科博士課程を2年次に中退後、同特任助教、名古屋大学減災連携研究センター准教授を経て、2016年より現職。博士(工学)。専門は都市防災、都市計画。平成28年度東京大学卓越研究員、JST さきがけ研究員(2016～2020年、兼任)。主な受賞に平成24年度文部科学大臣表彰若手科学者賞など。主な著書に「知られざる地下街」など。

中村 洋光 (なかむら ひろみつ)
 防災科学技術研究所マルチハザードリスク評価研究部門副部門長。専門はリアルタイム地震防災。東京大学大学院理学系研究科にて博士(理学)を取得。財団法人鉄道総合技術研究所研究員を経て、2006年に防災科学技術研究所に籍任。2019年より現職。リアルタイム地震被害推定システムの開発や地震や津波のハザード・リスク評価研究を進めている。

高橋 成実 (たかはし なるみ)
 防災科学技術研究所南海トラフ海底地震津波観測網整備推進本部副部長。専門は海洋地震学。千葉大学大学院自然科学研究科にて博士(理学)を取得。東京大学大気海洋研究所を経て、海洋研究開発機構に籍任。2016年より、防災科学技術研究所に移籍。2020年より現職。地殻構造から地震活動モニタリング研究、津波予測システムの開発、高度化研究を進めている。

GNSS-A 海底地殻変動観測の新解析手法の開発とプログラムコードの公開

— 海上保安庁 —

1 はじめに

地震大国である日本は、歴史的に多くの地震災害に見舞われてきました。特に、2011年東北地方太平洋沖地震のような海域で発生する巨大地震が繰り返し日本列島を襲ってきました。日本の太平洋側にある日本海溝や南海トラフなどの海溝では、海側のプレートが陸側のプレートの下に年間数 cm の速さで沈み込んでいます。このとき、両者が接する境界面が強く固着していると、陸側のプレートが海側のプレートによって引きずりこまれ、陸側のプレートが変形し内部にひずみが蓄積されていきます。そのひずみが限界に達すると、元に戻ろうとして破壊が起き、地震が発生すると考えられています。日本の太平洋側には、北海道から沖縄までの全域に海溝が存在するため、海溝で発生する地震に対する備えが防災上の重要課題となっています。地震調査研究推進本部では、こうしたタイプの地震を海溝型地震と分類し、その規模や発生確率等の評価を行っています。

海溝型地震の発生メカニズムの理解のためには、地下のプレート境界の状態を詳細に調べる必要があります。そのための強力な道具のひとつが地殻変動観測です。人工衛星等を利用した宇宙測地技術の進展による高精度測位は、詳細な地殻変動の把握を可能としました。しかしながら、海溝型地震の震源の大部分は海底下であり、陸上の観測網で震源域の詳細を把握するには限界があります。そのため、海域において地殻変動を観測するための技術が必要となります。

2 GNSS-音響測距結合方式による海底地殻変動観測

海中では、電波が著しく減衰するため、電波を利用する宇宙測地技術によって海底の地殻変動を観測することはできません。そこで、海水中でも遠距離を伝えることが可能な音波を組み合わせて、海底における精密な位置測位を可能とする GNSS-音響測距結合方式 (GNSS-A) による海底地殻変動観測 (図 1) のアイデアが、1980 年代に米国スクリップス海洋研究所のフレッド・スピースによっ

て提案されました。

海上保安庁では、海図作製のために培ってきた海域における測位技術を活かして、GNSS-A 海底地殻変動観測の技術開発に取り組んできました。2000 年に熊野灘に第 1 号の観測点を設置し、以降南海トラフおよび日本海溝沿いに順次観測点を増やしなが観測を続けています。

GNSS-A による海底地殻変動観測の有用性が実証されたことで、2001 年に地震調査研究推進本部が行った基盤的調査観測計画の見直しの際には、「基盤的調査観測の実施状況を踏まえつつ、調査観測の実施に努めるもの」として海底地殻変動観測が政策的に位置づけられることになりました。現在、海上保安庁では定期的に観測結果を地震調査委員会に報告しており、地震・地殻活動の現状評価の資料として役立てられています。

3 精度向上のための技術開発

地震学で必要とされる地殻変動現象を捉えるためには、深海底の位置をセンチメートルの精度で測定することが求められますが、これはメートルオーダーで位置が分かれば十分である通常の海洋調査とは桁違いに高い精度です。そのため、専用に設計された観測機器を市販の機器と組み合わせ使用しています。また観測では、図 1 に示すように、海上における観測プラットフォーム (海上保安庁では有人の船舶を使用していますが、近年大学等の研究機関では無人機の開発も進められています) の運用が必須です。こうしたことから、GNSS-A 観測は実施のための技術的・コスト的なハードルが高く、現在においても、広域に観測網を展開し定期的に観測を行っているのは日本のみです。

センチメートルの精度を達成するためには、様々な誤差要因を補正する必要があります。特に、最大の誤差要因と考えられる海水温の変動等による音波の伝播速度の変動をいかに補正するかが鍵になります。そのため、各研究機関で研究が進められており、解析手法・ソフトウェアの開発は各機関が独自に行っています。

海上保安庁では、2018 年から 2019 年にかけて、新たに海中の深部における音速の傾斜構造を補正する手法を開発しました。この新手法の結果は、地震調査委員会

に報告している業務的なルーティン解析の結果よりも良い結果が得られることを確認しています。しかしながら、2000年代初頭に作成した初期の解析ソフトウェアに、様々な研究成果を随時盛り込んでいったため、プログラムコードが複雑化し、これ以上の開発やルーティンの業務に組み込むことが困難な状況になってきました。

4 新解析手法の開発と プログラムコードの公開

そこで、海上保安庁の研究グループでは、全く新しい解析ソフトウェア GARPOS (GNSS-Acoustic Ranging combined POsitioning Solver) を開発し、ソースコードをオープンソースソフトウェアとして公開しました (doi.org/10.5281/zenodo.3992688)。GARPOS では、これまで様々な提案されてきた解析手法を包含するように方程式系を整理することで、特に音波の伝播速度の補正についての研究が進めやすいように設計されています。

今後は、GARPOS による解析を業務的なルーティン解析に用いるための検討を進め、地震調査委員会等においてより精度の高い成果を報告できることを目指します。

陸上の GNSS 観測では、RINEX と呼ばれるデータの共通フォーマットによって、どのメーカーの受信機で取得したデータであっても、同じフォーマットで扱うことができます。データ解析用のソフトウェアも、学術用から商用のものまで多数存在し、世界中の多数の研究者によって研究開発が進められています。

今回 GARPOS では、解析用のデータを GNSS における RINEX のような互換性のある共通フォーマットとすることで、他機関とのデータ交換や検証が容易になるように設計しました。GARPOS の公開と、データの共通フォーマット化によって、GNSS-A の研究の裾野が広がり、さらなる観測の高度化につながることを期待されます。GNSS-A の高度化・高精度化により、海域における地球物理学的現象をより確実に捉えることで、地震・地殻活動を評価するために必要な情報を提供することを目指していきます。

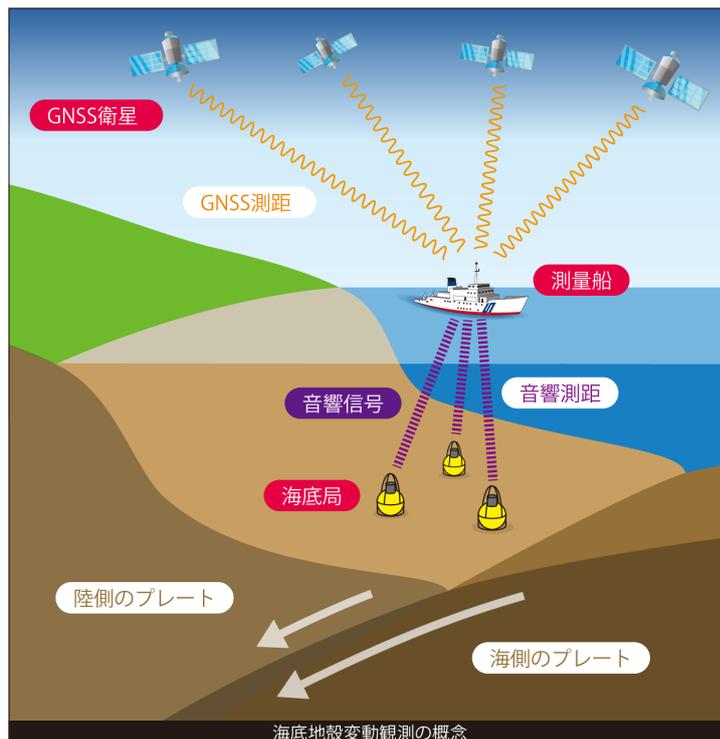


図1 GNSS-音響測距結合方式 (GNSS-A) による海底地殻変動観測

地震本部のホームページについて

前号（地震本部ニュース令和2年秋号）では、地震本部の発行する「パンフレット」を紹介しました。「地震本部ホームページ」は、地震調査研究の成果等を皆さまにお伝えするため、さまざまなコンテンツを掲載し、ご利用いただいております。



地震本部ニュース

毎号、皆さまにご覧いただいている「地震本部ニュース」は、平成20年5月に創刊号を発行しました。「地震本部ニュース」では、これまでに「地震本部の取り組みの紹介」、「地震調査研究を実施している各機関の最新の研究」、大きな地震が発生した際の「地震調査委員会の評価」など、さまざまなトピックを取り上げてきました。

地震本部ホームページには、刊行号のバックナンバー及びコラムを掲載しております（<https://www.jishin.go.jp/herpnews/>）。我が国の地震調査研究が、どのように進展してきているのか、その様子をうかがい知ることができます。



キッズページ

子供向けのポータルサイト（<https://www.kids.jishin.go.jp/>）です。

6つの項目から構成され「地震発生の仕組み」から「基礎的な調査研究の内容」を学習できるようになっています。

- ①地震発生！ ②どうして地震は起こるの？
- ③日本に地震が多いのはなぜ？ ④地震が起きる前に
- ⑤どんな調査・研究が行われているのかな？
- ⑥チャレンジ地震博士

防災授業の教材や自由研究などに活用してみたいかがでしょうか？



地震による被害を軽減するためには、地震がどのようなものかを理解し、地震発生時にとるべき最適な行動を判断する力を養うことが大切です。このため、地震本部ホームページでは、「地震についての基礎知識の普及」、「長期的な地震発生の可能性の評価」、「発生した地震についての情報の迅速な広報」について、「各種コンテンツ」や「会議・報告書、主要活断層や海溝型地震の長期評価の結果」など、地震被害の軽減に向け重要な情報を随時掲載・更新しています。

今後も引き続き、広報検討部会における議論や、関係機関との意見交換等を通して、更なるコンテンツの充実等を図ってまいります。

編集・発行

地震調査研究推進本部事務局
 (文部科学省研究開発局地震・防災研究課)
 東京都千代田区霞が関 3-2-2

地震本部ホームページ
<https://www.jishin.go.jp>



※本誌を無断で転載することを禁じます。

※本誌で掲載した論文等で、意見にわたる部分は、筆者の個人的意見であることをお断りします。

※地震調査研究推進本部が公表した資料の詳細は、地震本部のホームページで見ることができます。