

i地震を用いた10層RC造建物ヘルスマニタリング実験

Structure Health Monitoring Experiment of 10-stories RC building applying i-Jishin

*東 宏樹¹、内藤 昌平¹、藤原 広行¹*Hiroki Azuma¹, Shohei Naito¹, Hiroyuki Fujiwara¹

1.国立研究開発法人防災科学技術研究所

1.National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention

i地震クラウドシステムは無償のiOSアプリ『i地震』とクラウドシステム『Geonavi / icomi』からなる防災センサークラウドシステムである。本システムのSHMへの適用可能性を評価するため、2015年11月から12月に実大三次元震動破壊実験施設 (E-Defense) にて10層RC造構造物の加振実験を行った。

本実験は「スマホ等の加速度センサで中高層マンションの地震被災の判定が可能か？」という問いに答えるものであり、もし可能ならば被災時の迅速な安全確保等に資する安価で強力な防災ツールとなる。本稿では同システムによる地震被災度判定手法の詳細までは扱わず、診断前までのデータ取得と建物応答スペクトルによる状態推定までを述べる。

実験の方法：

本実験の手法は以下のとおりである。

- ・10層RC造建物（主実験名：現行耐震設計基準に基づく10層RC造骨組の崩壊メカニズムと普及型高耐震技術に関する実験）の試験体10,6,5,1の各層壁面にi地震インストール済みiOS端末を2台ずつ設置、無線LAN経由でicominiにデータをアップロードした。
- ・加振は2015年11月25日・27日、12月9日・11日の計4日間行い、各加振の前にはi地震設置階の同一箇所において微動計により常時微動を測定した。
- ・i地震の計測パラメータ設定は（トリガ設定30 gal、トリガ継続時間2s、プレトリガ20s、ポストトリガ60s）とした。
- ・端末内蔵のMEMS加速度センサにより取得されたデータの解析を行い、震度と応答スペクトル（加速度、速度、変位）をそれぞれ計算した。

実験の結果：

実験結果は以下のとおりである。

- ・i地震を用いても加振毎に入力地震動に相応の応答スペクトル固有周期の長周期化（1次モード固有周波数の低減）が見られた。
- ・上記は加振前後の常時微動による計測結果とも調和的な結果となり、固有振動数の推移も概ね一致した。
- ・一般モバイル回線によるデータアップロードのテストでは成功率は93%だった。

加速度センサを用いた構造ヘルスマニタリング (SHM) システムは高層ビルを中心に商用ベースの導入・運用が始まっているが、そのプライベートな性質上、得られた貴重なデータが防災研究用に共有され難い。また、ユーザからすれば信頼性を求めれば求めるほど難易度が上がりコストもかさむ、といった課題もある。これに対し本システムは環境さえあれば端末代のみで設置が可能な安価かつ簡便な計測法であるにもかかわらず、図の通り十分な精度での応答スペクトル周期による建物の状態推定が可能であることが示された（漸次強くなる加振においてJMA神戸波の25%までは卓越周期の変化が見られない一方で、構造物に不可逆なダメージをもたらした50%以降は明確な長周期化と塑性化がみられる）。本システムのSHMへの適用可能性を現段階で述べるとすれば、構造物の状態推定は即時に可能ではあるが、被災の判定を可能とするにはどの程度のスペクトルの変化をもって使用不可とするかの基準の問題があり、今後さらなる継続的な取り組みが必要である。

参考文献：

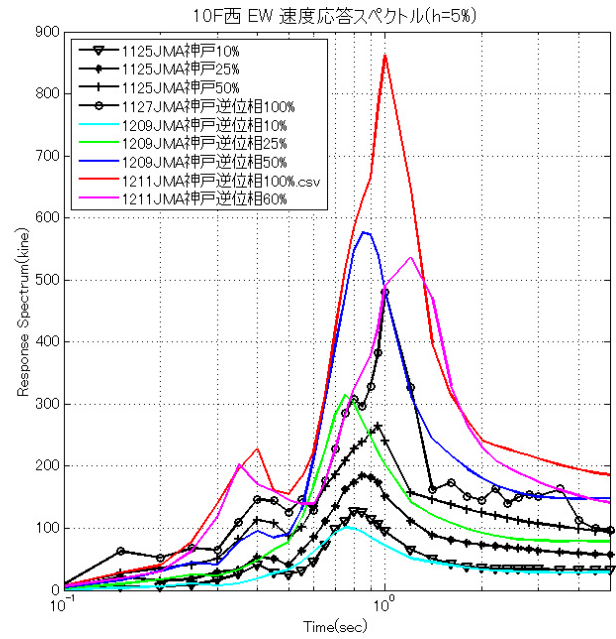
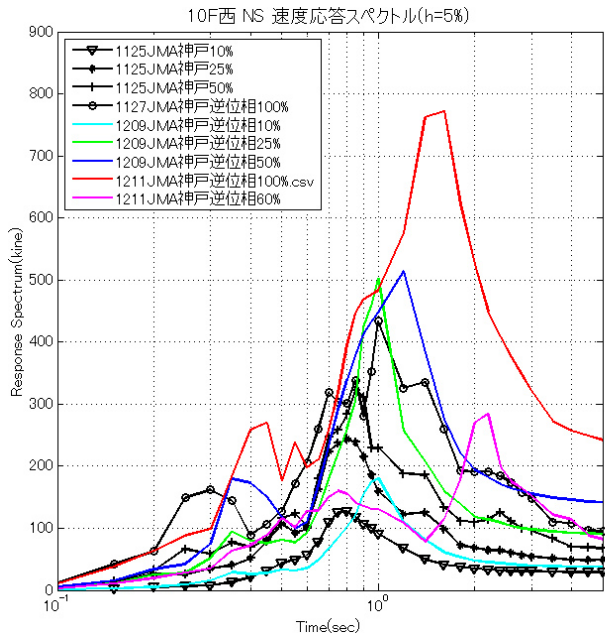
多世代利用住宅の維持管理・流通を支える構造ヘルスマニタリング技術の利用ガイドライン（案）、国土技術政策総合研究所（多世代利用総プロ管理技術WG）、平成23年12月
 携帯情報端末を利用した地震計の実大三次元震動破壊実験施設による振動実験、内藤ほか、JpGU2012
 藤原広行・東宏樹・内藤昌平・先名重樹・中村洋光・はお憲生・吉田稔・結城昇・平山義治、2013、センサークラウド技術を用いた建物の地震応答情報共有システム、日本地震工学会論文集、第13巻、第5号、

44-61.

謝辞：本実験にご協力いただいた兵庫耐震工学研究センターの皆様には深く感謝の意を表す。

キーワード：構造ヘルスマモニタリング、センサークラウド、携帯情報端末、i地震、E-Defense

Keywords: SHM, Sensor Cloud, mobile terminal, i-Jishin, E-Defense



光ファイバー網とDASテクノロジーを使った地球活動観測の可能性

Potential for Monitoring Earth Activities using Optical Fiber Network and DAS (Distributed Acoustic Sensing) Technology

*木村 恒久¹、リーズ ガレス¹、ハートグ アーサー¹

*Tsunehisa KIMURA¹, Gareth LEES¹, Arthur HARTOG¹

1.シュルンベルジェ ファイバーオプティック テクノロジー センター

1.Schlumberger Fiber-Optic Technology Center

DASテクノロジーは、パイプラインのモニタリングや侵入者を感知するために、5年以上前から石油・ガス産業で使われている。最新の光ファイバーセンシング技術によって、近年、DASシステムを使って、VSPを含むサイズミックデータを記録することができるようになった。我々はこのシステムのことを、パイプラインモニタリング装置と区別するため、'hDVS'と呼んでいる。

hDVSは、通常用いられるジオフォン等の電気・磁気的なセンサーでなく、光ファイバーを振動計測のセンサーとして使う。実際には、光ファイバーの振動に対するダイナミックストレインを計測しており、シングルモードファイバー、マルチモードファイバーの両者に使うことができ、つなげたファイバーの全長、もしくはパラメータで決めた長さだけをセンサーとして使うことができる。光ファイバー内での光の減衰や、光データのサンプリング周波数にも依るが、シングルモードファイバーの場合、現状のシステムでは、最大50km程度の長さまで対応することができ、マルチモードファイバーの場合、その長さが10km程度までとなる。

通常の電気・磁気的なセンサーは、特に2011年の東日本大震災後、日本各地に設置されてきた。しかし、通常のセンサーは、点としてのデータしか収集することができなく、しかも設置にかかるコストや、センサーの設置環境の制限により、設置される数と場所に限りがある。

hDVS/DASシステムの場合、既存の、主にデータ通信用の目的で設置してある光ファイバーを、瞬くうちに線状の地震波測定用のセンサーとして扱うことができ、センサーの設置コストと設置にかかる時間を低く抑える事ができる。ここ20年間のIT革命の一環として、日本国内の陸上を初め、米国、アジア諸国との間に光ファイバー網が張り巡らされている。特に、国際海底光ファイバーケーブルは、地震が起きやすいプレートとプレートが重なる領域をまたいで設置してある。そのような海底光ケーブルが、たちまち地震観測用のセンサーと化した場合、あなたはどのようにそのデータを利用しますか？

光ファイバーは、コア部が石英ガラスでできており、通常のセンサーを設置できない200℃以上の環境下でも、問題なく使える光ファイバーが多く存在する。中には、特殊なコーティングが施してある、500℃またはそれ以上の高温環境下に耐える光ファイバーも存在する。このことは、光ファイバーセンサーは、地震が発生しやすい地層近くに掘られた深い井戸に設置することが可能で、地震発生地点近くで捉えられた地震波を、光のスピードで地上局に伝達するリアルタイムモニタリングが可能になるということである。

hDVS/DASテクノロジーを使えば、地上、海底、地下を網羅した日本の地殻活動を光の速さでモニタリングする、包括的なネットワークを時間と費用を大きくかけずに築くことができるであろう。そうすれば、これから起きるであろう地殻活動由来の大災害から、少しでも多くの人命、そして我々の愛する日本を守ることができると思じている。

発表の際、hDVS/DASの概観の説明、過去数年の間にフィールド試験として記録したサイズミックデータの一部の公表に加え、日本における地球活動の包括的なモニタリングシステムに関するビジョンを話したいと思えます。

キーワード：DAS、hDVS、光ファイバー網、地震活動観測、Seismic

Keywords: DAS, hDVS, Optical Fiber Network, Earthquake Monitoring, Seismic

海陸統合データによる震源決定のための簡易的な地震波速度構造

A simple velocity model for hypocenter determinations using data from land and ocean observation networks

*中野 優¹、堀内 茂木²

*Masaru Nakano¹, Shigeki Horiuchi²

1.独立行政法人海洋研究開発機構、2.株式会社ホームサイスマメータ

1.Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, 2.Home Seismometer Corporation

はじめに：

近年、海洋研究開発機構によるDONETや、防災科学技術研究所によるS-netなど、沈み込み帯における地震・津波観測を目的とした多点高密度な海底観測網の構築が進められている。これらと陸上観測のデータを統合することで、海域における地震の検出率と震源決定精度の向上が期待される。一方震源決定において、沈み込み帯では深さ方向だけでなく水平方向にも顕著な構造の不均質があり、水平成層構造では不十分である。Nakano et al. (2015)では沈み込むプレート形状モデルを用いた3D地震波速度構造を用いているが、計算処理の負荷が大きく、特にリアルタイムやルーチン作業での震源決定には適さない。

本研究では、海陸統合データによる震源決定のために、海および陸の1D構造に基づく簡易的な2D構造を提案する。

簡易的な速度構造の提案：

本研究では、次の様な2D速度構造を提案する。すなわち、海および陸の1D構造がプレート境界を境に斜めの面（線）で接する構造である。これにより、陸域では陸の、海域では海の構造を反映したモデルとなる。観測点と震源が海陸にまたがる場合、波線がプレート境界と交わる所で構造が変化する。波線は水平方向には屈曲せず、観測点と震央を結び直線とする。走時表を震源深さと震央距離、そして波線がプレート境界を通過する深さの三パラメータについて作成し、震源決定を行う。プレート境界面は気象庁による震源分布を基に設定した。この時プレートの屈曲に応じて、いくつかの地域に分けて境界面を設定した。

本手法の構造は2Dであるが、プレートの屈曲を考慮しているので疑似的に3D構造を模擬した震源決定となっている。また波線追跡は1Dで行う事ができるので実装が容易であるという特長がある。

震源決定：

上記で提案する2D構造、陸および海を仮定した1Dモデルを用いて震源決定を行い、比較を行った。この時、各観測点における走時残差の平均からサイト補正値を計算し、観測走時を補正して震源の再決定を行った。この作業を40回行い、走時残差RMSが最小となる場合について、震源の分布とサイト補正値の比較を行った。観測データとして、Nakano et al. (2015)で用いたDONET1および陸上におけるP, S読み取り値を用いた。

震央の分布はどのモデルでも大差ないが、震源深さの分布については大きな違いが見られた。Nakano et al. (2015)の3D構造による震源分布と比較すると、1D陸および海モデルではそれぞれ、速度構造が異なる海域および陸域での深さ分布が10km程度以上異なる。一方2Dモデルでは全体として3Dモデルと同様の深さ分布となった。

サイト補正値については、海域ではどのモデルにおいても、堆積盆地の厚さの違いに応じた補正量が求められた。陸域においては、1D海モデルでは特にS波の補正が大きく、1秒以上の補正を必要とした。1D陸および2Dモデルでは大きな補正は必要としなかった。

走時残差RMSについては、1D陸、1D海、2Dモデルがそれぞれ0.45s, 0.52s, 0.46sとなり、1D陸モデルは2Dモデルと同程度であった。

議論：

走時残差RMSからは、1D陸構造は海域においても2Dモデルと同程度に観測走時を説明していると考えられる。一方で震源深さは大きく異なる。この点について、次のような検討を行った。すなわち、海底（DONET1）観測点だけのデータを用い、海域下で起きた地震について同様の評価を行った。

震源分布は深さを含めほぼ同じ結果となった。RMS残差も0.25s程度とほぼ同じであった。一方サイト補正値については、1D海では海陸統合データの場合と同様であったのに対し、1D陸の場合はP波およびS波についてそれ

ぞれ、ほぼ全点で正（観測走時から遅らせる）もしくは負（観測走時から早める）の補正となった。すなわち、全観測点で一様な補正をすることで、速度構造のミスマッチを補償している。

この結果から、海陸統合データを用いた場合にRMS残差が同程度となった理由として以下の原因が考えられる。走時のばらつきは同程度であるが、海域の震源については深さを過大にすることで、一様な遅い走時を補償している。この時陸域の走時への影響は小さいので、RMS残差への影響は小さい。

結論：

震源の、特に深さを正確に推定するためには実際の構造に近い速度構造を使う必要がある。海域の地震の深さは地震活動の議論や津波予測において重要であるため、特にリアルタイム解析においては今回提案する2Dモデルを用いた解析が有効であると考えられる。

キーワード：DONET、S-net、沈み込み帯

Keywords: DONET, S-net, Subduction zone

地震波動場のリアルタイム把握を目指した強震アレー観測

Array observation of strong ground motion for the estimation of current wavefield in real time

*小木曾 仁¹、林元 直樹¹、干場 充之¹

*Masashi Ogiso¹, Naoki Hayashimoto¹, Mitsuyuki Hoshiba¹

1. 気象庁気象研究所

1. Meteorological Research Institute, Japan Meteorological Agency

我々は次世代の緊急地震速報として、(a)波動場の実況を把握したのち、その実況値を初期値として(b)波動伝播シミュレーションをリアルタイムに行い、未来の波動場を予測するという“Numerical Shake Prediction” (Hoshiba and Aoki, 2015)の考えに基づいたシステムの研究開発を行っている。

Hoshiba and Aoki (2015)では、波動場の観測値として、稠密な強震観測網における振幅分布を用い、この結果と(b)のシミュレーション結果を組み合わせるデータ同化のテクニックを用いて、逐次(a)の波動場の実況値を推定した(ここでは、「実況値」とは気象の数値予報における「解析値」と同義の言葉として用い、「観測値」とは区別する)。実況値の推定にあたって使用可能な観測値は振幅分布に限られているわけではなく、例えばアレー観測を行うことによりその場における波動の伝播方向と見かけ速度が得られたならば、これらは振幅分布と並んで実況値の推定に活用可能と考えられる。そのような考えのもと、我々は現在6観測点からなる強震アレー観測網を設置し、次世代の緊急地震速報への活用に向けた検討を行っている。

つくば市の気象研究所構内に設置している我々のアレー観測網はその口径が小さいため、500Hzサンプリングで観測を実施している。リアルタイム演算という点に関しては、センブランス(Neidell and Taner, 1971)の解析にあたり効率的なグリッドサーチ(Oct-tree search: Lomax et al., 2009)を採用することで計算時間に関する目途がついた。また、推定された波動場の伝播方向を震源カタログの値と比較すると、その残差に方位依存性がみられたが、近隣の強震観測点におけるP波初動の粒子軌跡の解析結果と比較したところ、原因は地下構造、特に堆積層の傾斜によるものと推定され、傾斜層の補正(Niazi, 1966; 牧・他, 1987)を適用することによってカタログの値と調和的な値が得られることがわかった。

アレー観測網の設置・運用とともに、得られた伝播方向・見かけ速度の有効性についても考察を行っている。簡単な2次元の場合を考えると、特に観測データが少ない場合(例えば離島部や、半島部の先端のみに波動が到来している場合)に、その伝播方向のみに観測波動場を外挿することによって、予測初期の過小評価が多少とも改善されることがわかる。今後、方位と見かけ速度の仮想データを利用したシミュレーションを行うことにより、よりさまざまな場合における効果を検証していく予定である。

キーワード：緊急地震速報、アレー観測、リアルタイム計算

Keywords: Earthquake Early Warning, Array observation, real-time calculation

P波極性解析による震央方位の推定法の改良に向けた検討

Improvement of Epicentral Direction Estimation by P-wave Polarization Analysis

*大島 光貴¹*Mitsutaka Oshima¹

1.清水建設

1.Shimizu Corporation

極性解析(Polarization analysis)は、波の振動特性を分析するものであり、電磁気学や光学、地震学などで発展してきた。地震学では、振動特性の異なるP波、S波、表面波などの区別や、地震波形中の注目する波の強調(例えば、Flinn, 1965)などに用いられてきた。また、緊急地震速報や鉄道の早期地震警報システムでは、P波の振動方向に基づく震央方位の推定(例えば、Smart and Sproules(1981)、気象研究所(1985)、野田・他(2011))に用いられている。

極性解析による震央方位推定の精度や即時性の向上は、震源過程解析や緊急地震速報等の高度化につながる可能性があり、重要である。本研究では、2003年から2015年までに日本およびその周辺で発生した54個の地震のデータを用いて、P波初動部分の極性解析による震央方位の推定法の改良に向けた検討を行った。その結果、速度波形を用いた場合、変位波形を用いた場合と比べて、推定誤差が約15%少ないことが分かった。

しかしながら、現段階では変位波形、速度波形ともに、加速度波形から積分する際に格子型フィルタ(木下, 1986)を用いたのみで、バンドパスフィルタは適用していない。このため、変位波形に関しては長周期ノイズの除去が不十分で推定誤差が速度波形を用いた場合と比較して大きくなっている可能性もある。

このため、推定誤差が最小となるようなフィルタの種類や、フィルタを適用する周波数帯域の最適な設定について検討する必要がある。

発表では、最適なフィルタリングについて行った検討の結果について報告する。

[1] Flinn, E. A. (1965), Signal analysis using rectilinearity and direction of particle motion. Proceedings of the IEEE, 53(12), 1874-1876.

[2] Smart, E., & Sproules, H. (1981), Regional phase processors (No. SDAC-TR-81-1). TELEDYNE GEOTECH ALEXANDRIA VA SEISMIC DATA ANALYSIS CENTER.

[3] Noda, S., Yamamoto, S., Sato, S., Iwata, N., Korenaga, M., & Ashiya, K. (2012). Improvement of back-azimuth estimation in real-time by using a single station record. Earth, planets and space, 64(3), 305-308.

[4] Vidale, J. E. (1986). Complex polarization analysis of particle motion. Bulletin of the Seismological society of America, 76(5), 1393-1405.

[5] Montalbetti, J. F., & Kanasevich, E. R. (1970). Enhancement of teleseismic body phases with a polarization filter. Geophysical Journal International, 21(2), 119-129.

キーワード：極性解析、震央方位の推定、緊急地震速報

Keywords: polarization analysis, estimation of epicentral direction, earthquake early warning

高周波地震波エンベロープ解析に基づく早期余震検出 -エネルギー輻射位置推定法の改善-

Rapid detection of early aftershocks using high-frequency seismogram envelope: improvement of location estimation of energy radiation point

*澤崎 郁¹*Kaoru Sawazaki¹

1. 防災科学技術研究所

1. National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention

大地震の直後には地震波形記録上で多くの余震からの波が重なり合うため、P波やS波到達時刻の検測に基づく通常の震源決定が困難となる。一方で、余震活動の推移を早期に予測するためには、早い段階での余震カタログの充実が不可欠である。Sawazaki and Enescu (2014)は、1Hz以上の高周波帯域の地震波エネルギーの伝播が輻射伝達理論に従うと考え、観測された地震波形エンベロープをエネルギー輻射とエネルギー伝播過程の畳み込みで表現し、本震直後に発生した余震からのエネルギー輻射の推移を迅速に検出する手法を開発した。彼らの手法では、時間・空間グリッドごとにエンベロープの理論ピーク振幅と観測された振幅との残差2乗和を計算し、それが最小となる空間グリッドを各時間グリッドにおけるエネルギー輻射位置としている。しかし、輻射伝達理論に基づき合成されたエンベロープはピーク到達時刻、ピーク振幅共に現実のエンベロープとの対応が悪く、そのためにエネルギー輻射位置の推定誤差が大きいことが課題となっていた。今回、ピーク到達時刻とピーク振幅を共に適切に表現できる前方散乱近似に基づく理論エンベロープを用い、これを従来の輻射伝達理論に基づくエンベロープと組み合わせることにより、エネルギー輻射位置推定の改善を試みた。また、従来の手法ではS波のエンベロープのみを合成して使用していたが、観測点によってはP波の振幅も無視できないほど大きいことを考慮し、今回、P波とS波の両方を組み入れたエンベロープを使用した。2008年岩手・宮城内陸地震($M_{JMA} 7.2$)を対象に、本震の震源から70km以内に位置する13点のHi-netおよびKiK-net観測点で取得された8-16Hz帯域の地震波エンベロープ記録を解析に用いた。この地震については、本震発生後半日間に気象庁一元化震源で $M_{JMA} 3.5$ 以上の余震が91個検出されている。まず、従来の輻射伝達理論に基づく理論エンベロープのみを用いた検出法を適用した場合、上記の91個の余震のうち、エネルギー輻射源の位置が気象庁一元化震源の位置と20km以上食い違う余震が10個検出された。次に、前方散乱近似と輻射伝達理論を組み合わせた理論エンベロープを用いた検出法を適用した結果、その余震の数は1個まで減少し、エネルギー輻射位置推定の改善を確認できた。

キーワード：早期余震検出、高周波エンベロープ解析

Keywords: detection of early aftershocks, analysis of high-frequency envelope

GNSSリアルタイム解析による地殻変動の即時把握：GEONETリアルタイム解析システム（REGARD）の開発

Real-time Earthquake Magnitude Estimation by Real-time GNSS positioning: the development of GEONET real-time processing system, REGARD

*川元 智司¹、檜山 洋平¹、佐藤 雄大¹、古屋 智秋¹、太田 雄策²、西村 卓也³、等々力 賢⁴

*Satoshi Kawamoto¹, Yohei Hiyama¹, Yudai Sato¹, Tomoaki Furuya¹, Yusaku Ohta², Takuya NISHIMURA³, Masaru Todoriki⁴

1.国土交通省国土地理院、2.東北大学大学院理学研究科附属地震・火山噴火予知研究観測センター、3.京都大学防災研究所、4.東京大学地震研究所

1.Geospatial Information Authority of Japan, 2.Research Center for Prediction of Earthquakes and Volcanic Eruptions, Graduate School of Science, Tohoku University, 3.Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University, 4.Earthquake Research Institute, The University of Tokyo

GNSS観測によって得られる変位は、地震計データと異なり飽和することがなく、特にリアルタイムでの解析が巨大地震の規模の把握や、得られる震源断層モデルによる津波波源の推定などにより、津波予測の高精度化に有効であることが指摘されている (Blewitt et al., 2009; Ohta et al., 2012)。このことから、東北地方太平洋沖地震後、GNSSリアルタイム解析の防災への利用が進んでいる。例えば、米国では津波予測の高精度化のため複数機関によるGNSSリアルタイム観測網を用いたREADIプロジェクトが発足した他、IUGG2015総会でも世界規模でGNSSリアルタイム解析網を用いた津波予測を推進することが決議された。国土地理院においても、東北大学と共同で、日本全国に約20km間隔、約1300点からなるGNSS連続観測網GEONETのリアルタイム解析により、即時に震源断層を推定するシステム (REGARD: the Real-time GEONET Analysis system for Rapid Deformation monitoring) の開発を開始した。

本稿では、現在開発を行っているREGARDの概要と、過去の地震時のデータを用いたREGARDプロトタイプシステムの動作検証結果について報告する。今回、太平洋側のプレート境界で発生した過去の海溝型地震2003年十勝沖地震、2011年東北地方太平洋沖地震とその最大余震である茨城県沖の地震、1707年宝永型南海トラフ地震について、リアルタイム動作を想定した実証実験を行った。ここで、1707年宝永型南海トラフ地震の検証はシミュレーションによる変位データ (Todoriki et al., 2013) を使用した。その結果、これらの地震すべてについて、地震発生から3分以内で、Variance Reduction (VR) 90%を越える高い精度で断層モデルが推定可能であった。特に東北地方太平洋沖地震では3分時点でMw8.83を算出することができた。この結果が示すように、M8を越える海溝型地震のMwをリアルタイムで推定するには、リアルタイムGNSS解析は非常に効果的である。現在、世界各地でリアルタイムGNSS解析の津波警報への組み込みが検討されている。国土地理院においても、今後もより安定性の高い解を提供できるよう、マルチGNSSやPPP等の導入も検討しつつ、REGARDの調整を進めていく予定である。

キーワード：リアルタイムキネマティックGNSS、即時的断層モデル推定、GNSS地震学

Keywords: RTK GNSS, Real-time fault model estimation, GNSS seismology

GEONETリアルタイム解析を用いた地震規模即時推定システム (REGARD) の改良

Improvement of Real-time GEONET Analysis System for Rapid Deformation Monitoring, REGARD

*檜山 洋平¹、川元 智司¹、佐藤 雄大¹、古屋 智秋¹、太田 雄策²、西村 卓也³*Yohei Hiyama¹, Satoshi Kawamoto¹, Yudai Sato¹, Tomoaki Furuya¹, Yusaku Ohta², Takuya NISHIMURA³

1.国土交通省国土地理院、2.東北大学大学院理学研究科、3.京都大学防災研究所

1.Geospatial Information Authority of Japan, 2.Graduate School of Science, Tohoku University,

3.Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University

国土地理院は全国約1,300ヶ所に設置されたGNSS連続観測施設（電子基準点）から構成されるGNSS連続観測網（GEONET）を運用している。GEONETでは、国土地理院（茨城県つくば市）の解析センターにおいて電子基準点で観測されたGNSSデータを収集し、解析を行い、その結果を観測データとともに一般に提供している。ほとんどの電子基準点でのGNSS観測は1秒サンプリングで行われ、そのデータはリアルタイムに解析センターへ転送されている。このリアルタイムデータは、ネットワークRTKのための補正情報の生成や、リアルタイム解析技術の研究等のために利用されている。

GEONETリアルタイム解析の重要性は平成23年（2011）東北地方太平洋沖地震（Mw 9.0）の発生により大きく高まった。この地震に伴って発生が予測された津波に対し、気象庁は地震発生後約3分で津波警報第1報を発表したが、実際に観測された津波はその予測を大きく上回るものであった。この原因として、津波警報第1報では主に短周期地震計データから推定された地震規模を基に津波高が予測されており、地震規模がM8を超えるような巨大地震においてはそれが飽和することが指摘されている（Ozaki, 2011）。一方で、地震規模は地殻変動量に基づいて推定することもでき、それは飽和の恐れがないため、特に大きな地殻変動が生じるような巨大地震の地震規模についてはこの方法によってより信頼度の高い結果を得ることができると考えられる。このことから、短時間で地震時地殻変動を得ることが可能なGNSS観測データのリアルタイム解析を用いた地震規模の即時推定技術については、現在大きな期待が寄せられている。

このような背景のもと、国土地理院では国土地理院、大学等の研究成果であるGNSSリアルタイム解析技術、地殻変動検知技術、矩形断層モデル及びすべり分布モデル推定技術等を組み合わせた地震規模即時推定システム（REGARD）の開発を平成23年度から開始し、実運用に向けて改造を進めてきた。REGARDは大きく分けて以下の3つのサブシステムから構成されている。

1. リアルタイム解析サブシステム

RTKLIB 2.4.2 p10 (Takasu, 2013) 及びGSILIB (国土地理院, 2015) をベースとした解析エンジンで、主として日本海側に固定点をとる相対測位を行う。

2. 変動検知サブシステム

REGARDの開発に当たって共同研究を実施している東北大学の研究成果であるRAPiDアルゴリズム (Ohta et al., 2012) 又は緊急地震速報 (Kamigaichi et al., 2009) を用いて地震の発生を検知し、各電子基準点の変位量を計算する。

3. 矩形断層モデル及びすべり分布モデル推定サブシステム

変動検知サブシステムで計算された電子基準点の変位量を入力値として即時自動断層モデル計算 (西村ほか, 2010; Kawamoto et al., 2015) を実行することで、地震発生の検知から3分以内で地震規模が推定される。REGARDにより出力された地震規模及びその他の解析結果は、最終的に電子メールで指定した対象に送信される。

近年の開発では、システムの信頼性及び安定性の向上並びに解析結果の閲覧機能の充実を目的として改良を行った。主な改良点は、マルチGNSS解析に対応したこと、解析の冗長性の確保のため解析の固定点を北海道、北陸及び九州の3つの地域に設定したこと、それぞれの地域の固定点が欠測した場合には他の点へ自動で振り替える機能を追加したこと、IGSの超速報暦と放送暦の異なる暦による基線解析とPPPへ対応したことであり、そのほかにも様々な改良を施すことで実運用を目指したシステムの構築を図った。これにより巨大地震に伴う地殻変動を即時に捉えるとともに、信頼性の高い地震規模を速やかに関係機関へ伝達することができ、津波予測の高度化への貢献や地盤沈下が発生した地域の迅速な把握等が期待できる。

本発表では、REGARD改良の最新の状況、試験的な運用結果、及び運用を踏まえた今後の課題について報告する。

キーワード：GEONET、リアルタイムキネマティックGPS、リアルタイム

Keywords: GEONET, RTK-GPS, real-time

噴火速報 - 迅速な待避行動のために -

Eruption Notice - information urging people to take swift and appropriate protective action

Koizumi Takeshi¹, *宮村 淳一¹, 菅野 智之¹, 橋口 祥治¹

Takeshi Koizumi¹, *Junichi Miyamura¹, Tomoyuki Kanno¹, Shoji Hashiguchi¹

1. 気象庁

1. Japan Meteorological Agency

気象庁は、噴火災害軽減のため、全国110の活火山を対象として、観測・監視・評価の結果に基づき、噴火警報を発表している。噴火警報は、噴火に伴って発生し生命に危険を及ぼす大きな噴石、火砕流などの火山現象の発生や、危険が及ぶ範囲の拡大が予想される場合に、「警戒が必要な範囲」を明示して発表される。噴火警戒レベルが運用されている火山では、気象庁は、あらかじめ地元の火山防災協議会で合意された、防災行動とリンクした噴火警戒レベルを付して噴火警報を発表する。これらの噴火警報は、報道機関、都道府県等の関係機関に通知されるとともに、直ちに住民等に周知される。地元の市町村等の防災機関は、噴火警報に基づき、入山規制や避難勧告等の防災対応を実施する。

平成26年（2014年）9月27日に発生した御嶽山噴火では、11時52分の噴火発生から8分後の12時00分、気象庁は「噴火に関する火山観測報」を発信し関係者に噴火発生の事実を伝えるとともに、警戒が必要な範囲を評価した上で、12時36分に噴火警報（噴火警戒レベル3）を発表した。しかしながら、噴火は登山中の人々を巻き込み、多くの人命が失われる結果を招いた。火山噴火予知連絡会の火山情報の提供に関する検討会は、登山者等火山に立ち入っている人々に、迅速、端的かつ的確に伝えて、命を守るための行動を取れるよう、「噴火速報」を新たに発表することを提言、気象庁は平成27年（2015年）8月からその運用を開始した。

噴火速報は、登山者や周辺の居住者に噴火後速やかに身を守る行動を取ってもらうため、噴火の規模の評価等を行う前に、噴火の発生事実のみを発表する情報である。噴火速報は、観測体制の整っている常時観測火山を対象とし、その火山が初めて噴火した場合、また、継続的に噴火している火山では、それまでの規模を上回る噴火を確認した場合に発表される。視界不良により遠望カメラでの確認ができない場合でも、地震計や空振計のデータで推定できる場合は、気象庁は「噴火したもよう」として噴火速報を発表する。

噴火速報は、気象庁ホームページ、テレビ、ラジオなどで知ることができるほか、平成28年1月現在、ヤフー株式会社、日本気象株式会社、株式会社ウエザーニューズによって、スマートフォンアプリ、メール等による情報提供サービスが行われている。

キーワード：噴火、速報、避難

Keywords: eruption, notice, protective action

実測データを用いたリアルタイム津波予測アルゴリズムtFISH/RAPiDの性能評価

Retrospective evaluation of tFISH/RAPiD performance: tsunami forecasting based on offshore tsunami and GNSS data

*堀内 明子¹、日野 亮太¹、太田 雄策¹、久保田 達矢¹、対馬 弘晃²

*Akiko Horiuchi¹, Ryota Hino¹, Yusaku Ohta¹, Tatsuya Kubota¹, Hiroaki Tsushima²

1.東北大学大学院理学研究科、2.気象庁気象研究所

1.Graduate School of Science, Tohoku University, 2.Meteorological Research Institute, Japan
Meteorological Agency

沖合津波観測波形データの逆解析による初期海面波高分布推定とこれに基づく沿岸での津波波形予測を行うアルゴリズムtFISHの性能評価の一環として、我々は、2011年3月9日に三陸沖で発生した地震（Mw7.3、2011年東北地方太平洋沖地震の最大前震）に伴う津波の予測実験を行ってきた。tFISHにより予測された津波波形を実際に沿岸で観測された津波波形と比較したところ、地震発生の6分後、沿岸に津波が到達する25分前には、精度の良い津波波形の予測ができることが示された。一方で、地震発生直後の沖合の観測点に津波が到達しない時間帯では、正しい初期波高分布が得られないため、沿岸での津波の予測波高が過小になってしまうという問題があった。

そこで、本研究では、リアルタイムGNSS解析アルゴリズムRAPiD (Ohta et al., 2012) をtFISHと組み合わせたtFISH/RAPiD (Tsushima et al., 2014) を同じ地震時の地殻変動と沖合津波データに適用し、特に、地震直後の予測性能の改善がみられるかについて評価した。

国土地理院のGEONET観測点におけるGNSSデータは、リアルタイムで入手・解析可能である。また、RAPiDアルゴリズムで計算される初期波高分布（RAPiD解）は本研究で対象としているM7級の地震の場合、地震発生3分以内に得ることができる。tFISH/RAPiDでは、このRAPiD解による波高分布を初期モデルとし、時間経過に伴って入手できる沖合津波観測データを用いてモデルを逐次改善していく。

その結果、沖合観測点における津波の情報が少ない地震発生直後の初期波高分布をRAPiD解により補うことで、地震発生から3分後において、沿岸における最大波高では1~3倍、到達時刻では3分以内の誤差で、予測波形を得ることができた。今回取りあげた地震では、震源域の直上に津波計が設置されており、tFISHによる予測を行う上で好適な条件が整っている。その一方で水圧計に津波が到達する前の地震発生後6分以内の沿岸津波の予測精度が低いことは、津波データのみを用いた予測手法の限界を示すと考えられるが、リアルタイムで推定された地殻変動を加えたtFISH/RAPiDが、より早い沿岸津波波形予測を可能とすることを、実データにより実証することができた。また、今回の実証実験から、tFISH/RAPiDはM7級の地震に伴う津波予測にも適用可能であるといえる。また、RAPiD解による津波予測波形が、tFISHによる予測波形と大きく変わらないことから、震源付近に海底観測点がなく、tFISHで迅速な津波予測が困難な場合には、RAPiD解のみによる津波予測が有用な代替予測手法となりうることを示された。

キーワード：近地津波予測、海底圧力計、津波波形インバージョン

Keywords: Near-field tsunami forecasting, ocean-bottom pressure gauge, tsunami waveform inversion

沖合水圧記録の順解析による津波即時予測手法の開発

A forward analysis approach using ocean-bottom pressure data for real-time tsunami forecast

*山本 直孝¹、青井 真¹、平田 賢治¹、鈴木 亘¹、功刀 卓¹、中村 洋光¹

*Naotaka YAMAMOTO¹, Shin Aoi¹, Kenji Hirata¹, Wataru Suzuki¹, Takashi Kunugi¹, Hiromitsu Nakamura¹

1. 防災科学技術研究所

1. National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention

近地地震に伴って発生する津波を即時に予測するために、その目的や用いる観測データの種類に応じて多種多様な手法が提案されている（例えば、平田、2005、月間地球；Tsushima and Ohta, 2014, JDR）。ここでの即時予測とは、地震が発生してから津波が沿岸に到達する前までの間に避難に必要な情報を導き出すこととする。我が国では、「量的津波予報」として陸域の観測網による地震観測から求められた震源情報（震源位置とマグニチュード）を用いた津波即時予測が1999年から運用されている（舘畑、1998、月刊海洋）。この手法は地震観測情報を用いて非常に高速に予測できるため、第1報として用いられている。また、全球航行衛星システム（Global Navigation Satellite System; GNSS）によって求められた断層モデルを用いたより精度の高い津波の即時予測手法がBlewitt et al. (2009, Journal of Geodesy) によって提案されている。GNSSによる断層モデルはおおよそ数十秒から数分で求められるため、第1報をより確からしい情報で更新することが出来る。しかし、これらの手法はあくまでも地震動や地殻変動といった津波に対しては間接的な観測結果

(indirect measurement) に基づいて津波の予測をしている。一方で、沖合のGPSブイや海底水圧計を用いて直接観測 (direct measurement) された津波の情報を逆解析 (inversion analysis) することで津波波源を推定 (Tsushima et al., 2009, JGR) し、順計算により沿岸津波高や浸水を予測する手法 (forward simulation approach; 例えば、辰巳・富田、2013、土木学会論文集 B2 (海岸工学) ; Koshimura et al., 2014, AGU; Oishi et al., 2015, GRL) やデータベースに登録された津波シナリオを選別する手法 (database selection approach; 例えば、Gusman et al., 2014, JGR) が提案されている。これらの手法は、逆解析 (inversion analysis) によって地震の震源や津波波源を即時に推定した後に予測を行っている。しかし逆解析 (inversion analysis) では、意図しない解を選択してしまった場合に予測と実際が大きく乖離してしまう可能性を排除することが出来ない。

そこで我々は、防災科研が日本海溝沿いに構築している大規模かつ稠密なリアルタイム沖合津波観測網である日本海溝海底地震津波観測網 (S-net; 金沢・他、2012、連合大会; 植平・他、2015、地震学会) を用いて津波遡上の即時予測を逆解析 (inversion analysis) することなしに行う手法の開発を行っている (青井・他、2015、連合大会)。さらに、我々の手法では地震観測情報 (indirect measurement) を経由せず、沖合の海底水圧計で観測される津波の観測データ (direct measurement) のみから津波を即時に予測する。これにより、地震観測情報によって予測される震源位置やマグニチュードの推定精度に左右されることなく、かつ、逆解析で生じる可能性のある誤判定の影響を受けることなく津波の即時予測を行うことが可能となる。逆解析 (inversion analysis) を用いない手法としては、震源域近傍の海底水圧計記録 (direct measurement) から観測波形の時間変化を求め、津波数値計算の入力条件に用いて順計算する手法 (forward simulation approach) が提案されている (谷岡、2015、連合大会)。しかしこの手法では、順計算が必要であるため、津波の即時予測時に計算コストが高いというデメリットがある。一方で、Baba et al. (2014, Mar Geophys Res) は、津波観測記録 (direct measurement) を用いて水圧変動の絶対値の平均値を求め、さらにモンテカルロシミュレーションによって求めた沖合と沿岸の津波高の相関関係により、沿岸の津波高を沖合の津波の規模から直接求める手法 (forward analysis approach) を提案している。この手法では、観測データの平均値を求め、予め決定されている相関関係から沿岸の津波高を予測するため計算コストが低い。そこで我々は、第1報で用いられているもう一つの情報である津波の位置を津波観測記録 (direct measurement) のみから順解析的に推定する手法 (forward analysis approach) を提案する。本提案手法では、沖合の水圧変動の絶対値の最大値を重みとした重心位置 (Tsunami Centroid Location; TCL) を求めることで、津波波源の位置を推定する。本手法の妥当性を検証するため、確率論的津波ハザード評価のために設定された日本海溝に沿

いの津波波源（平田・他、2014、連合大会）のうち、一定以上の初期波高が生じている約1,000通りの津波波源から計算した沖合のS-net観測点における波形から計算したTCLと津波波源の位置（初期水位の絶対値を重みとした重心位置）の比較を行った。これにより、地震（津波）発生から数分程度で津波波源の位置を数十kmの範囲で推定可能であることが明らかとなった。

さらに我々は、沖合の津波観測記録（direct measurement）と予め計算してデータベースに登録した津波シナリオを直接比較して、一定の範囲内で一致しているシナリオを選別する手法（database selection approach）の開発も進めている（山本・他、2014、地震学会）。この手法では、観測波形 O と計算波形 C のそれぞれで規格化した2種類のVariance reduction ($VRO=1-\Sigma(O-C)^2/\Sigma O^2$ と $VRC=1-\Sigma(O-C)^2/\Sigma C^2$)と相関係数 R を比較用の指標として用いている。この時、指標を計算する前に O と C は水圧変化の絶対値の最大値に変換している。観測値 O で正規化した VRO はシナリオの値が観測値より大きい、すなわち予測値が過大評価である場合に対して感度が高く、反対にシナリオの値 C で正規化した VRC は予測値の過小評価に対して感度が高いため、2種類のVariance reductionを併用することにより津波の規模の予測精度を向上できることを明らかにした（鈴木・他、2015、連合大会；Yamaomto et al., 2015, AGU）。本発表では、我々の提案手法を用いて常時運用が可能な津波即時予測システムの設計について述べる。

本研究の一部は、総合科学技術・イノベーション会議のSIP（戦略的イノベーション創造プログラム）「レジリエントな防災・減災機能の強化」（管理法人：JST）によって実施されました。ここに記して感謝申し上げます。

キーワード：津波、即時予測、日本海溝地震津波観測網（S-net）

Keywords: Tsunami, Real-time prediction, S-net

海底圧力観測波形から直接津波数値計算を実施し即時予測を行う手法開発

– 2011年東北地方太平洋沖地震により発生した津波への適応 –

Tsunami simulation method initiated from waveforms observed by ocean bottom pressure sensors for real-time tsunami forecast; Applied for 2011 Tohoku-oki Tsunami

*谷岡 勇市郎¹、Gusman Aditya²

*Yuichiro Tanioka¹, Aditya Gusman²

1.北海道大学大学院理学研究科地震火山研究観測センター、2.東京大学地震研究所

1.Hokkaido University, Institute of Seismology and Volcanology, 2.University of Tokyo, Earthquake Research Institute

2011年東北地方太平洋沖巨大地震による津波被害を受けて、津波予測の精度向上が緊急の課題になっている。防災科学技術研究所は日本海溝・千島海溝沿いに地震・津波観測網（S-NET）を現在設置している。このケーブルには約30km間隔に海底圧力計（津波計）と地震計が接続されている。さらに以前より南海トラフ沿いには海洋研究開発機構（JAMSTEC）により地震津波観測網（DONET・DONET2）が設置され、すでに運用されている。これらは海溝型巨大地震発生域の直上に配備された世界一密な海底津波観測網である。

一方、現在津波の即時予測は地震波観測により地震の震源・深さ・マグニチュードを推定することで実施されている。最近では海底津波計での観測波形から波源を推定することで津波予測を行う手法の開発も盛んに行われてきた。しかし、震源域直上近傍に30km間隔の海底圧力観測網があれば、地震の震源過程や波源を推定せずとも、直接観測波形データから津波数値計算を開始することができると考えられる。筆者は2015年地震学会（S17-05）にて、観測点間隔15分（約30km）に配置した海底圧力計により観測された波形の時間変化をデータとして用いることで、観測波形データから直接津波数値計算を実施する手法を開発し、数値実験によりその有効性を確かめた。

本研究では、上記で開発された手法を改善し、2011年東北地方太平洋沖巨大地震で発生した津波に対しても有効であることを確かめる。2011年東北地方太平洋沖巨大地震の波源モデルとして観測津波波形、GPSによる地殻変動データ、及び海底地殻変動データから推定されたすべり量分布と海底の変形（Gusman et al. 2012）を用いた。その波源モデルから海面変動を計算し、それを初期値として線形長波近似を用いて津波数値計算を実施した。計算格子間隔は1分とした。図左に地震発生後10分での津波波高分布（計算結果）を示す。この計算津波を実際の津波であると仮定し、海底圧力計による観測波形データから直接津波を計算する上記手法により津波数値計算を実施した。観測波形として波源モデルより計算された津波波高分布を実験的に用いた観測点の分布（観測点間隔約30km）は図右の赤点で示す。地震発生後40秒後、80秒後、120秒後の津波波高分布を上記の手法により推定し、それらの津波波高分布を1分格子間隔に内挿して津波数値計算を実施した。さて、波源モデルから計算された津波波高分布には海溝近傍で形成されたと考えられている大きな短波長成分が含まれている（図左参照）。これは2011年東北地方太平洋沖津波の特徴とも言われている。しかし、約30kmの観測点配置で観測された波形を用いるとこの短波長を表現できず、それらは誤差となって津波波高分布の推定全体に影響を及ぼす。また、この手法は波高の時間差をデータとして用いているため、長波長の波の解像度も少ない。そこで本研究では観測点での波形から得られた津波波高分布に空間フィルターをかけることで、ある程度安定した波高分布を得られるよう改善した。得られた津波波高分布から計算された地震発生後10分での津波波高分布を図右に示す。図右を図左と比較すると津波波高分布がおおよそうまく再現できていることが分かる。しかし、やはり図右の東に伝播していく短波長の波高は再現できていない。陸近くと同じ場所の津波波高分布を比較すると比較的良く再現できていることが分かった。本研究の手法は津波の観測波形を用いた津波即時予測に非常に有効であることが確かめられた。今後、津波遡上計算を実施し2011年東北地方太平洋沖津波による津波浸水高との比較を行い、津波浸水予測精度を確かめる。

文献

Gusman, A. R., Y. Tanioka, S. Sakai, and H. Tsushima (2012), Source model of the great 2011 Tohoku earthquake estimated from tsunami waveforms and crustal deformation data, *Earth Planet. Sci. Lett.*, 341-344, 234-242

キーワード：津波即時予測、津波数値計算手法、2011年東北地方太平洋津波

Keywords: Real time tsunami forecast, Tsunami simulation method, The 2011 Tohoku-oki Tsunami

