

## 微動アレイによるS波速度構造探査システムの構築

## CONSTRUCTING A SYSTEM TO EXPLORE VELOCITY STRUCTURES USING A MICROTREMOR OBSERVATION

\*先名 重樹<sup>1</sup>、東 宏樹<sup>1</sup>、浅香 雄太<sup>2</sup>、藤原 広行<sup>1</sup>

\*Shigeki Senna<sup>1</sup>, Hiroki Azuma<sup>1</sup>, Yuta Asaka<sup>2</sup>, Hiroyuki Fujiwara<sup>1</sup>

1.防災科学技術研究所、2.三菱スペース・ソフトウェア（株）

1.National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention, 2.MSS Corp

### 1. はじめに

我々は、これまでに扱いやすい微動探査機の開発や、微動観測結果を閲覧し機材をコントロールおよびデータ送信するためのスマートフォン用「i微動」、微動データベース等を構築してきた。本研究では、さらに開発をすすめて、微動観測から解析結果を得るまでの一連の流れを短時間かつ現場で実施可能な新システムの構築を検討した。なお、ここでは特に100m未満の浅部構造探査を対象とした比較的小さい半径の微動アレイについて、観測・解析を徹底的に簡易化した探査システム（以下新システム）を構築している。

### 2. 新システムの構成

新システムでは、半径10m程度以下のアレイを用いる。このアレイで15分間程度微動を観測することで深さ数mから数十mまでの浅部地盤S波速度構造を推定することが可能である。また、観測者として地下構造探査の専門家ではない一般のユーザーを想定し、ワンタッチで使える観測機材を用いる。観測後は、得られた微動データは無線でサーバー計算機に転送され、位相速度とS波速度構造が自動解析される。ユーザーの手元には、「i微動」に解析結果が配信され、サーバー側では、観測データおよび解析結果がデータベース化される。この一連の流れを包括的に提供することが、現時点でほぼ可能となった。なお、新システムで用いるアレイは、2点アレイや不規則アレイ(20m程度以下)と極小アレイ(60cmの三角形のアレイ)を主としている。

### 3. 今後の目標と展開

我々の目標は、地震防災をはじめとする地質・地盤に関連するさまざまな社会的ニーズに対応して、できる限り高密度・高分解能で定量的な地下S波速度構造の情報を提供することである。そのためには膨大な量の微動データを取得・解析・蓄積する必要があるため、本研究で作成しているような新システムの構築を実施した。ここで展開する極小アレイ等の観測は非常に簡易なので、観測点位置を変えながら多数の観測を繰り返すことにより、S波速度構造の空間変化を容易にイメージングできる。現状では分解能の観点から、ボーリングデータや微地形区分等から推定せざるを得ない表層地盤の揺れやすさを、S波速度構造や地盤振動特性の実データから評価できるようになるため、構築される地盤モデルの精度が良くなり、地震の揺れに関する予測精度が飛躍的に向上する。また、液状化等の地盤災害の評価や、建築・土木建造物の立地条件の検討にも寄与でき、幅広い社会的な価値と波及効果が期待される。

### <謝辞>

本研究は、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」（管理人：JST）によって実施されました。また、産総研の長郁夫氏よりBIDOプログラムの提供を受けた。ここに謝意を表します。

キーワード：微動観測システム、地下構造モデル、極小アレイ

Keywords: microtremor observation system, underground structure models, miniature array

## 機動観測とHi-net記録のオンライン統合処理による即時自動震源決定システムの構築

Automated hypocenter detection system using both Hi-net and online temporal observation data

\*齊藤 竜彦<sup>1</sup>、上野 友岳<sup>1</sup>、行竹 洋平<sup>2</sup>、針生 義勝<sup>3</sup>、浅野 陽一<sup>1</sup>、汐見 勝彦<sup>1</sup>

\*Tatsuhiko Saito<sup>1</sup>, Tomotake Ueno<sup>1</sup>, Yohei Yukutake<sup>2</sup>, Yoshikatsu Haryu<sup>3</sup>, Youichi Asano<sup>1</sup>, Katsuhiko Shiomi<sup>1</sup>

1.独立行政法人 防災科学技術研究所、2.神奈川県温泉地学研究所、3.財団法人 地震予知総合研究振興会  
1.National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention, 2.Hot Springs Research Institute of Kanagawa Prefecture, 3.Association for The Development of Earthquake Prediction

日本列島を覆う基盤的地震観測網（基盤観測網）の構築によって陸域部の地震活動を網羅的かつ連続的に監視することが可能となった。大地震が発生した場合には、即座にその震源位置・規模・メカニズム解が推定され、解析結果や地震波形記録はインターネットを通じて公開されている。大地震発生後においては、引き続き発生する可能性のある地震に対する準備のために、進行している余震活動の推移を正確に把握することが重要である。しかし、微小地震を含めた余震活動や群発地震活動状況を詳細かつ正確に把握するためには、観測点数及び設置密度ともに、必ずしも十分でない。本研究では、余震活動など限られた領域で発生する活発な地震活動の詳細把握を目的とし、オンライン機動地震観測データを活用した基盤観測網自動震源決定システムの構築を行うとともに、その有効性を調査した。機動観測によって得られる連続地震波形データは、安価な携帯電話回線を用いて、防災科学技術研究所（つくば市）へと準リアルタイムで転送し（遅延時間数分程度）、Hi-net基盤地震観測網データ等と統合処理を行うシステムを作成した。2015年春の箱根周辺の群発地震活動を例として、同システムによる自動震源決定のパフォーマンスを調査した。Hi-net基盤地震観測網データに、群発地震活動域付近に設置した機動観測点データを加えた処理を実施することで、震源域直上の読み取りデータが増え、震源決定数が増加した。さらに、群発地震活動の震源位置がより正確に拘束され、地震活動の深さが数km程度浅く決定されることを確認した。

キーワード：基盤地震観測網、機動観測、自動震源決定

Keywords: fundamental seismic observation network, mobile observation, automated hypocenter detection

## S-net観測点を用いた仮想震源の震源決定シミュレーション

## Simulation of hypocenter determination of assumed hypocenters by using S-net stations

\*眞保 敬<sup>1</sup>、植平 賢司<sup>1</sup>、金沢 敏彦<sup>1</sup>、望月 将志<sup>1</sup>、藤本 博己<sup>1</sup>、野口 伸一<sup>1</sup>、功刀 卓<sup>1</sup>、汐見 勝彦<sup>1</sup>、青井 真<sup>1</sup>、関口 渉次<sup>1</sup>、松本 拓己<sup>1</sup>、岡田 義光<sup>1</sup>、篠原 雅尚<sup>2</sup>、山田 知朗<sup>2</sup>

\*Takashi Shimbo<sup>1</sup>, Kenji Uehira<sup>1</sup>, Toshihiko Kanazawa<sup>1</sup>, Masashi Mochizuki<sup>1</sup>, Hiromi Fujimoto<sup>1</sup>, Shin-ichi Noguchi<sup>1</sup>, Takashi Kunugi<sup>1</sup>, Katsuhiko Shiomi<sup>1</sup>, Shin Aoi<sup>1</sup>, Shoji Sekiguchi<sup>1</sup>, Takumi Matsumoto<sup>1</sup>, Yoshimitsu Okada<sup>1</sup>, Masanao Shinohara<sup>2</sup>, Tomoaki Yamada<sup>2</sup>

1.防災科学技術研究所、2.東大地震研

1.National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention, 2.ERI

海底下で発生する地震や津波を観測するために、日本海溝海底地震津波観測網（S-net）の整備事業を2011年から開始した。S-netは房総沖から北海道沖まで150の観測点を設置し、その設置間隔は東西方向（海溝軸に直交方向）約30km、南北方向（海溝軸に平行方向）約50-60kmである。S-netの整備により、津波警報や緊急地震速報をこれまでよりも早く発表することが可能になる。海底下で発生する地震を解明するためには、海底下における震源分布、発震機構解、地震波速度構造や応力場等を高精度で求め、沈み込むプレートと地震発生域との関係や、プレート間におけるひずみの蓄積過程等を調べる必要がある。これらを詳細に調べるためには、海底下で発生する地震を精度よく決定することが必須である。我々は、これまで自己浮上式海底地震計で決定された2011年太平洋沖地震の余震[Shinohara et al. (2011, 2012)]からS-net観測点までの走時を計算することで震源決定を行い、S-netの震源決定精度を調べてきた。S-net観測点の震源決定精度の見積もりには、2011年太平洋沖地震の震源域よりも広範囲で同様の解析を行うことも重要である。

本研究では、S-netによる震源決定精度を理解するために、仮想的に配置した震源（仮想震源）からS-net観測点までの理論走時を用いることにより、震源決定のシミュレーションを行った。その震源は、北緯35.5°から北緯40.0°まで0.25°間隔、経度140.5°から経度143.0°の範囲に0.25°間隔、深さ5-50kmの範囲に2.5km間隔で仮定した。その地震数は3971個である。仮想震源から各観測点までの理論走時を計算した。その理論走時から各観測点のP波とS波の到達時刻データを作成した。そして、その到達時刻からhypomh [Hirata and Matu'ura (1987)]を用いて震源決定した。この時、S-net観測点の速度構造は、S-net敷設ルート上で行われた地下構造調査、および過去の構造調査の結果を参考に、観測点毎に仮定した。その結果、決定された震源は3914個であった。決定された震源と仮想震源を比較すると、196個の震源は仮想震源に対し震央もしくは震源深さの差異が3km以上であった。特に、海岸線から100km以上内陸に仮定した震源を精度良く決めることができなかった。観測網から距離が離れると震源決定精度が悪くなるため、S-netで精度良く決定できる範囲を調べることは重要である。

## 下北半島周辺における微小地震観測網の構築（その4）

## Construction of the seismic observation network around Shimokita Peninsula (4)

\*野口 科子<sup>1</sup>、澤田 義博<sup>1</sup>、笠原 敬司<sup>1</sup>、関根 秀太郎<sup>1</sup>、田澤 芳博<sup>1</sup>、矢島 浩<sup>1</sup>、佐々木 俊二<sup>1</sup>

\*Shinako Noguchi<sup>1</sup>, Yoshihiro Sawada<sup>1</sup>, Keiji Kasahara<sup>1</sup>, Shutaro Sekine<sup>1</sup>, Yoshihiro Tazawa<sup>1</sup>, Hiroshi Yajima<sup>1</sup>, Shunji Sasaki<sup>1</sup>

1.公益財団法人 地震予知総合研究振興会

1.Association for the Development of Earthquake Prediction

日本国内では、防災科学技術研究所による高感度地震観測網Hi-netをはじめとする稠密な微小地震観測網が整備されている。しかしながら、東北北部から北海道南西部にかけての地域では、他地域に比べて観測点密度が低く、地震活動などを他地域と同様の精度で捉えることは難しい状態であった。そこで、下北半島、津軽半島、北海道南西部に高密度の微小地震観測網（AS-net）を整備し、地震活動の常時モニタリングを開始した（関根・他（2014）など）。本発表では、AS-netの観測データを用いた手動震源決定結果と、観測データを用いた解析の結果について報告する。

震源決定は青森県から北海道南西部にかけての領域に限って行う。震源決定にはAS-netの36観測点の他、気象庁、防災科学技術研究所、弘前大学、東北大学、北海道大学、青森県による観測点を含め、周辺の134観測点のデータを使用する。AS-netが全点運用開始した後の2014年9月から2015年12月末までの16ヶ月間について、新堀内システムを用いた自動震源決定を行ったところ、領域内で5726イベントが決定された。これら自動震源について、手動による精査と震源再決定を行ったところ、2880個の自然地震が決定された。自動震源については、4割強が自然地震、約4割が発破等の人工地震、残りは誤検知であった。また、自然地震2880個のうち1割弱は自動震源で検知されず、気象庁の一元化震源に基づいて手動で決定した。なお、同期間、同領域の一元化震源カタログには1404イベントが記載されており、イベント数で見るとAS-netによって検知能力が2倍以上に向上したといえる。特に、AS-net整備領域の中心にあたる下北半島南部の脇野沢周辺では、手動で決定されたイベント数は一元化カタログの約5倍となった。

震源決定のための観測点補正值を得るため、領域内のプレート間・プレート内で起こった深い地震（ $H > 60$  km）のうち、規模の比較的大きなものについて、PおよびS相の手動検測値と理論走時の差（ $O-C$ ）の平均値を計算した。観測点ごとの $O-C$ 平均値は地域的に偏って分布しており、P相とS相で同様の傾向を示した。また、各観測点のバックグラウンドノイズ記録から計算したノイズレベルの低い点ほど $O-C$ 平均値が小さく、負になる場合が多い、という関係がみられた。ノイズレベルの低い点は基盤が浅く、サイト特性による増幅が小さいことを示していると考えられる。また、サイト特性による地震波の到達の遅延幅が小さい観測点では、 $O-C$ 平均値が小さくなることが予想される。以上より、 $O-C$ 平均値は各観測点のサイト特性を反映していることが裏付けられる。これにより、得られた $O-C$ 平均値に基づいて観測点補正值を決定することの妥当性が示される。

## 参考

関根 秀太郎・澤田 義博・笠原 敬司・佐々木 俊二・田澤 芳博・矢島 浩、下北半島周辺における微小地震観測網の構築、日本地球惑星科学連合2014年大会、横浜、STT57-P09、2014年4月。

## 謝辞

本研究では、気象庁、防災科研、北海道大学、東北大学、弘前大学、青森県により観測・提供された地震観測データを使用しています。また、気象庁による一元化地震カタログのデータを使用しています。記して感謝いたします。

キーワード：地震観測網、下北半島、地震検知

Keywords: Seismic observation network, Shimokita peninsula, Earthquake detection

## ニューラルネットワークを用いた低SN比条件下における地震波検出手法の開発

Development of the seismic signal detection method under low SNR condition using an artificial neural network

\*高橋 馨子<sup>1</sup>、松本 裕也<sup>1</sup>、孫 哲<sup>1</sup>、小泉 和之<sup>1</sup>、竹内 達哉<sup>2</sup>、上松 大輝<sup>3</sup>、金 亜伊<sup>1</sup>

\*Kahoko Takahashi<sup>1</sup>, Yuya Matsumoto<sup>1</sup>, Zhe Sun<sup>1</sup>, Kazuyuki Koizumi<sup>1</sup>, Tatsuya Takeuchi<sup>2</sup>, Hiroki Uematsu<sup>3</sup>, Ahyi KIM<sup>1</sup>

1.横浜市立大学、2.横浜国立大学、3.専修大学

1.Yokohama City University, 2.Yokohama National University, 3.Senshu University

We have developed a community based MEMS sensor network, Citizen Seismic Network (CSN) to obtain the detailed strong motion data which closely linked to community's life. In this project, we developed a sensor unit which detects strong motion and process the data. The unit is composed of 12 bit MEMS sensor and Raspberry pi. Since we expect the unit is set under the high noise environment (e.g. inside of house), it is important to discriminate between the earthquake signal and the others. However, under the such environment, the conventional method, ratio of short time average and long time average (STA/LTA) which depends on the amplitude of the signal often mislead to pick noise as the signal. To overcome this problem, we developed a method to detect and identify a seismic signal using an artificial neural network (ANN) which utilize a pattern recognition. In the initial test, we used waveform data recorded at our sensor network as the training data to detect the other observed data. We found the discrimination was successful. However, at the moment, since we only have five earthquakes detected in our network, the amount of training data is not enough. So as the next step, we use the seismic data obtained at the Yokohama strong motion network and loaded noise obtained by our sensor to the seismic waves. Using the waveforms as training data we will show the synthetic test to check the ability of our ANN detection algorithm.

キーワード：地震波検出、ニューラルネットワーク、ANN、MEMS

Keywords: Seismic signal detection, Neural network, ANN, MEMS

## 超磁歪素子による精密弾性波計測システムの抜本的改良

Fundamental improvement of precise and longterm monitoring system of seismic wave with giant magnetostrictive seismic source

\*國友 孝洋<sup>1</sup>、石井 紘<sup>1</sup>、浅井 康広<sup>1</sup>、佐野 修<sup>1</sup>、大久保 慎人<sup>2</sup>

\*Takahiro Kunitomo<sup>1</sup>, Hiroshi Ishii<sup>1</sup>, Yasuhiro Asai<sup>1</sup>, Osam Sano<sup>1</sup>, Makoto OKUBO<sup>2</sup>

1. (公財) 地震予知総合研究振興会 東濃地震科学研究所、2. 高知大学 教育研究部自然科学系理学部門

1.Tono Research Institute of Earthquake Science, ADEP, 2.Natural Science Cluster, Kochi University

超磁歪素子を利用したアクチュエータは、動電加振機などと比べて、変位は小さいが発生応力が大きく、扱いが簡便なため、高周波用の人工震源装置への応用が期待される。東濃地震科学研究所（以下TRIES）では、2011年から超磁歪素子を用いた震源装置（以下、超磁歪震源）の開発がすすめられてきた [石井・他（2011）、佐野・他（2011）、大久保・佐野（2011）]。2014年度には、GPS同期型の矩形波信号源（500Hz）が開発され、超磁歪震源の設置場所である瑞浪観測壕内のみならず、遠方にあるTRIESのボアホール観測網での検出も視野に入れた実験が行われてきた [公益財団法人 地震予知総合研究振興会(2015)]。しかし、今年度になって、観測データや機器構成を精査したところ、記録計や震源装置に種々の問題があることが判明したため、実用化を目指して抜本的な改良を進めている。

10kHz連続サンプリング用記録計のデータには、1Hz毎（特に1000Hz毎および10Hz毎）にサンプリングクロックに由来するラインスペクトルノイズが含まれている。これらはスタッキングしても消えないため、500Hzの基本波とその奇数次高調波から構成される矩形波による発震信号を遠方で観測するのは非常に困難である。このクロック由来のノイズは多くの地震観測装置に共通にみられる問題であるため、送信信号の周波数が整数を含まないようにするために、GPS時計、信号発生器、電力増幅器、信号設計法を刷新して、実験を行った。

超磁歪震源は、装置やその固定、超磁歪素子の固有振動が原因で、800Hzと2500Hzで強く共振する。500.5Hzの矩形波信号で発震し、2.5日間のスタッキングを行ったところ、震源のほぼ直下にある戸狩350mボアホール地震計（以下、TGR350）の3成分すべてで5倍高調波（2502.5Hz）が明瞭に観測された。振幅は上下動成分が最も大きく、3倍高調波（1501.5Hz）も見えている。なお、これまで瑞浪観測壕内で観測された加速度波形では、500Hz～25kHzまでこのような共振はみられず、矩形加速度波形を観測したとされてきた。数十～数百波長分もの距離を伝播したはずにもかかわらず位相の乱れがなく、全周波数の位相が滑らかに繋がることから、これまでの観測波形は、トリガー信号として用いられてきた500Hz矩形波の電氣的な混入である可能性が疑われる。

100.5～200.5Hz（1Hz間隔）の101個の等振幅の正弦波を合成した波形を送信信号として発震し、TGR350の約10日間のスタッキングしたところ、100～130Hzで明瞭な信号が観測された。超磁歪震源の駆動電流を震源スペクトルとしたグリーン関数に相当する時間波形を計算すると、走時0.1sから始まる明瞭なP波波形が得られた。このようにオフラインによるGPS同期弾性波の観測は可能になったが、遠方での観測には長いスタッキング期間が必要であり、短時間の地震波速度変化は観測できない。現状の超磁歪震源の設置は、地盤を超磁歪アクチュエータが押すときに、その周辺では固定フレームによって引きの力が加わるようになっており、放射効率が極めて悪いと考えられる。今後、震源装置の設置治具を改良し、シングルフォースで発震する実験を行う予定である。

キーワード：超磁歪素子、GPS同期、シングルフォース

Keywords: giant magnetostrictive actuator, GPS time synchronization, single force

## 地震研究情報データ提供システム(J-SEIS)の開発

## Development of JAMSTEC Ocean-bottom Seismology Database (J-SEIS) to download DONET Event Data and Borehole Continuous Data

\*堀川 博紀<sup>1</sup>、高江洲 盛史<sup>2</sup>、末木 健太郎<sup>1</sup>、荒木 英一郎<sup>1</sup>、園田 朗<sup>1</sup>、高橋 成実<sup>1</sup>、坪井 誠司<sup>1</sup>

\*HIROKI HORIKAWA<sup>1</sup>, Morifumi Takaesu<sup>2</sup>, Kentaro Sueki<sup>1</sup>, Eiichiro Araki<sup>1</sup>, Akira Sonoda<sup>1</sup>, Narumi Takahashi<sup>1</sup>, Seiji Tsuboi<sup>1</sup>

1.国立研究開発法人海洋研究開発機構、2.日本海洋事業株式会社

1.Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, 2.Nippon Marine Enterprises, Ltd.

国立研究開発法人海洋研究開発機構 地球情報基盤センター (CEIST) では、今後、大地震の発生が予想されている東南海地震震源域の各種地震活動データを収集・統合した、地震研究情報データベースを構築した。地震・地殻変動現象の速やかな解析を促進するため、CEISTでは、海底地震観測データを広く一般に公開する、DONETイベントデータ提供システムと長期孔内観測データ提供システムの運用を行ってきた。

DONETイベントデータ提供システムは、紀伊半島熊野灘沖に設置された、地震・津波観測監視システム (DONET1) の観測データの提供システムとして、2014年11月から運用を開始した。DONETイベントデータ提供システムでは、DONET1の20観測点における強震計と広帯域地震計観測データの内、USGSカタログのマグニチュード6以上、気象庁カタログのマグニチュード4以上を対象として、地震イベント毎に切り出したデータ (イベントデータ) を提供してきた。

また、長期孔内観測データ提供システムは、長期孔内観測システムの観測データ提供システムとして、2015年7月から運用を開始した。長期孔内観測システムは、2010年に国際深海科学掘削計画 (IODP) により、地球深部探査船「ちきゅう」によって、紀伊半島熊野灘沖に設置された。長期孔内観測システムには複数のセンサー (広帯域地震計、傾斜計、間隙水圧計、歪計、温度計など) を備えており、DONET観測網を通してリアルタイムでデータが横浜研究所へ送信される。長期孔内観測データ提供システムでは、システム利用者が任意の時間長で切り出した、長期孔内観測システムの観測データ (連続データ) を準リアルタイムで提供してきた。

DONETイベントデータ提供システムと長期孔内観測データ提供システムには、共にmini-seed形式の観測データを取り扱うなど、システムの仕様に共通性があり、システム統合の可能性について検討を行った。システムを統合することにより、同一のWebアプリケーションから、連続データとイベントデータのダウンロードが容易となる。さらに、Webインターフェース一元化によるユーザビリティの向上や、システム運用管理の効率化が期待される。これらのシステム統合によるメリットを踏まえ、2015年度より、長期孔内観測データ提供システムをベースシステムとして両システムを統合し、地震研究情報データ提供システム (J-SEIS : JAMSTEC Ocean-bottom Seismology Database) を構築した。

また、システムの統合と併せて、IRISが提供する「Web Services」を参考にしたデータダウンロード機能の新規実装や、ユーザ認証環境の整備、技術情報などの掲載コンテンツの拡充も実施している。

地震研究情報データ提供システムは、2016年度に運用を開始し、今後、潮岬沖から室戸岬沖の南海地震震源域に設置されたDONET2や、長期孔内観測システムの新規観測点における、観測データの追加も予定している。

キーワード：地震波形データ、長期孔内観測システム、DONET、ちきゅう

Keywords: Seismic Waveform Data, Long-Term Borehole Monitoring System, DONET, D/V Chikyu