

光ファイバーを用いるDASテクノロジーを使った地震波観測システム
Seismic Monitoring System using Optical Fiber 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。位相データを用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。我々は現在、新しいシステムを開発中であるが、その新しいシステムを使えば、50kmの長さを超えるシングルモードファイバーにも対応することができると期待している（hDVS/DASを使うことのできる理論的な光ファイバーの最大長は100km）。

hDVS/DASを用いたシステムは、現状の地震波観測システムと比較して、次のような特長がある。

- a) 既に設置してある光ファイバーを、瞬時に、地震波観測のセンサーとして用いることができる。
- b) 一つのシステムで、点ではなく、最大50kmの長さの線状のセンサーとして観測することができる。
- c) 既に張り巡らされている光ファイバー網を利用することによって、観測装置を容易に観測ネットワークとして構築できる。
- d) 空間分解能やゲージ長をパラメータとして設定できる。
- e) 光ファイバーのコア部は、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。
- f) 光ファイバーセンサーは、受動センサーなので、故障を起こしにくい。

その他にも特長として認識される性質が見つけれられるだろう。

発表の際、hDVS/DASのしくみの説明に加え、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を公表します。

キーワード：DAS、hDVS、光ファイバー、レーザー、地震活動観測

Keywords: DAS, hDVS, Optical Fiber, Laser, Seismic Monitoring

森町アクロスを用いた東海地方下における地震波速度変動の観測

Seismic velocity change in Tokai region detected by Morimachi ACROSS

*辻 修平¹、山岡 耕春²、生田 領野¹、渡辺 俊樹³、勝間田 明男⁴、國友 孝洋²*Shuheji Tsuji¹, Koshun Yamaoka², Ryoya Ikuta¹, Toshiki Watanabe³, Akio Katsumata⁴, Takahiro Kunitomo²

1.静岡大学理学部、2.名古屋大学大学院環境学研究科、3.東京大学地震研究所、4.気象庁気象研究所

1.Faculty of Science, Sizuoka University, 2.Graduate school of Environmental Studies, Nagoya University, 3.ERI, University of Tokyo, 4.Meteorological Research Institute, JMA

本研究では、静岡県周智郡森町に設置されている弾性波アクロスという人工震源装置を用いて、東海地方下の地震波速度の経年変化と東北地方太平洋沖地震に伴う変化を検出した。さらに、この変化を説明するクラックの開閉方向を考え、GNSSによるひずみ場と比較して解釈を与えた。

弾性波アクロスとは、鉛直に設置されたモーターの回転軸に対して偏心した錘を精密制御して回転させることで、弾性波を精密かつ定期的送信するシステムのことである。東海地方はユーラシアプレートの下に北西方向に向かってフィリピン海プレートが沈み込んでいる。本研究は沈み込みに伴う圧縮場による地震波速度の変化を検出することを目的としている。

本研究では、2007年から2014年までの期間で、静岡県中部に設置されているアクロス送信所の信号を東海地方に配置されている名古屋大学観測点、及びHi-net観測点で受信して東海地方下の直達S波の到達時刻を観測した。この際、S波到達時刻の変化を正確に検出できるように、S/N比が十分に高く、時刻が正確な観測点のみを用いた。また、本研究では、求めた到達時刻の中で、Radial方向に揺らし、Radial方向で観測された成分(Rr成分)及び、Transverse方向に揺らし、Transverse方向で観測された成分(Tt成分)の2つの成分に注目した。

得られた到達時刻の時間変化にはRr,Tt成分共に、時間の経過と共に到達時刻が早まる傾向や、東北地方太平洋沖地震に伴って遅まる傾向が見られたため、直線的な変化(経年変化)と年周・半年周変動、及び東北地方太平洋沖地震に伴うステップ(地震に伴うステップ)を仮定してフィッティングを行った。

その結果、経年変化としては、使用した観測点の全てにおいて、到達時刻が早まっていく傾向が見られた。また、地震に伴うステップは全観測点で到達時刻の遅れが検出できた。Hi-net掛川観測点での結果を例として示す(図1)。

また、経年変化・地震に伴うステップの両者でRr成分とTt成分の間に違い(偏向異方性)がみられた(図2)。経年変化・地震に伴うステップのそれぞれについて、その異方性を説明するクラックの方向・開閉を推定し、GNSS観測によって得られた歪み場と比較した。

経年変化には北西-南東方向がより早まる傾向があり、北東方向に走向を持つクラックの選択的な閉塞として説明できる。これはGNSSによる歪み場が北西-南東方向に圧縮であることと調和的である。

一方、地震に伴うステップは、経年変化と同じ方向で遅まる傾向があった。これは経年変化で閉じたクラックの開口と解釈されるが、GNSSによる歪み場は北東-南西方向に伸張場を示しているため、調和的ではない。このことは地震に伴うステップが準静的な歪み場によるものではないことを示唆している。

そこで、地震に伴うステップの解釈として、地震時の揺れにより何らかの原因で間隙圧が上昇しともとも北東方向に選択配向していたクラックが開いたという解釈を考えた。東海地方の地質は伊豆弧の衝突に依って北東方向の走向を持っていることから、この地域に存在しているクラックは北東方向を向いているものが多い可能性があり、これはこの解釈と調和的であろう。

謝辞

本研究では、防災科学技術研究所の運用しているHi-netの連続波形記録を利用させていただきました。

引用文献

生田領野 ほか, 2014, ACROSS による東海地方下の地震波速度変動の観測, 日本地震学会秋季大会, S19-P07

國友孝洋, 2014, Hi-netデータによる走時変化計測の高精度化, 地震, 第2輯, 第66巻, 第4号, 97-112頁

吉田康宏, 2011, 精密制御震源(アクロス)を用いた地殻活動モニタリング, 気象研究所技術報告, 第63号, 88-114頁

図の説明

図1：Hi-net掛川観測点における、2007年2月28日に対する地震波到達時刻の早まり

青丸は観測値。上下方向にエラーバーを描いている。赤丸はフィッティングした点。縦の赤い直線は地震に伴うステップ状の変化の大きさを表している。

図2：地震に伴うステップ(左)と経年変化(右)それぞれの T_t, R_r 成分の地震波速度変化の大きさと異方性

星は震源の位置。十字は中心が観測点の位置にあり、 R_r 成分の地震波速度の変化を震源と観測点を結ぶ向きの直線で、 T_t 成分を R_r と直交する直線で表した。長さは地震に伴うステップ状の変化の場合は変化量を、経年変化では年間の変化量をそれぞれ表す。色は、青色が遅れ、赤色が早まりを示している。十字を囲む楕円形のグラデーションは誤差範囲を表す。

キーワード：弾性波アクロス、地震波速度変化、走時変化、Hi-net、東海地方

Keywords: seismic ACROSS, seismic velocity change, travel time change, Hi-net, Tokai region

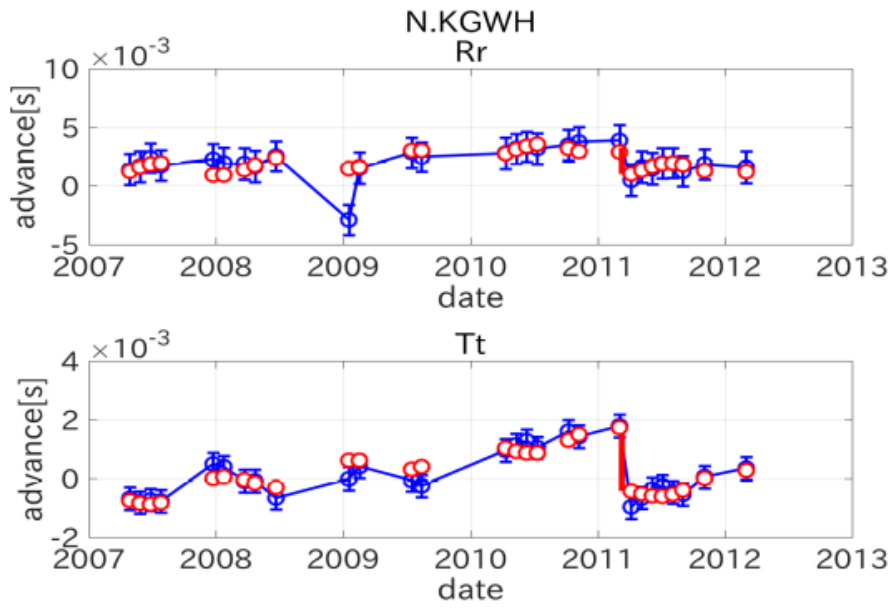


Fig.1 Travel time advances at Kakegawa Hi-net station

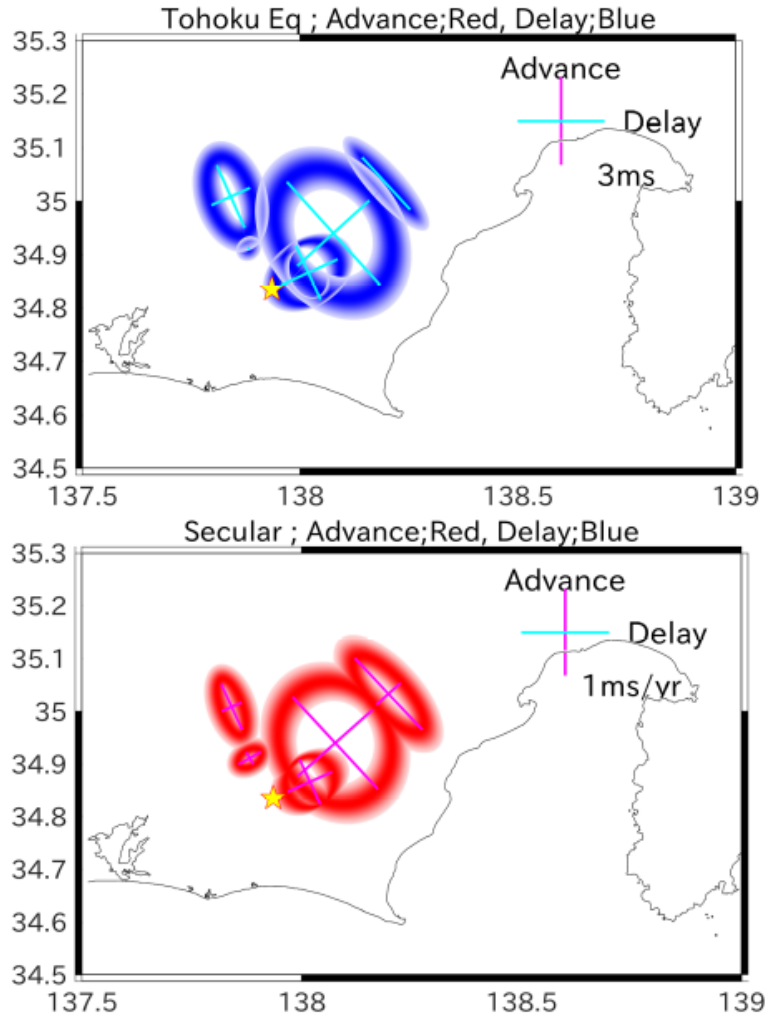


Fig.2 Co-seismic (top) and Secular (bottom) travel time changes

日本海溝海底地震津波観測網 (S-net) - 海洋部工事の進捗 -

Seafloor Observation Network for Earthquakes and Tsunamis along the Japan Trench (S-net) -
Construction of subsea part of the S-net -

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

*Masashi Mochizuki¹, Toshihiko Kanazawa¹, Kenji Uehira¹, Hiromi Fujimoto¹, Shin-ichi Noguchi¹,
Takashi Shimbo¹, Katsuhiko Shiomi¹, Takashi Kunugi¹, Shin Aoi¹, Takumi Matsumoto¹, Shoji Sekiguchi¹,
Yoshimitsu Okada¹, Masanao Shinohara², Tomoaki Yamada²

1.国立研究開発法人防災科学技術研究所、2.東京大学地震研究所

1.National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention, 2.Earthquake Research
Institute, University of Tokyo

NIED (National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention) has launched the project of constructing an observatory network for tsunami and earthquake on the seafloor, after the occurrence of the 2011 off the Pacific coast of Tohoku earthquake by the reflection that we could not monitor the expanse of the earthquake and the tsunami outbreak on site and in real time due to poor coverage of observation in ocean area. The project has been financially supported by MEXT (Ministry of Education, Culture, Sports, Science and Technology - Japan).

The observatory network was named "S-net". S-net consists of 150 seafloor observatories which are connected in line with optical cables. The total length of submarine optical cable is about 5,700km. S-net system extends along Kuril and Japan trenches around Japan islands from north to south covering the area between southeast off island of Hokkaido and off the Boso Peninsula, Chiba Prefecture. Each observatory equips two sets of quartz type pressure gauge and four sets of three-component seismometers. Digitized data from those sensors are transmitted to land and used for early warning and precise measurement for earthquakes and tsunamis.

Two Japanese cable layer ships, which are specially designed for installation and repairing of submarine telecommunication cables, have been used for installation of the S-net submarine cable system. The S-net submarine cable system including the observatories is buried 1m beneath the seafloor to prevent from interference with fishing industry in the area shallower than 1,500m water depth. Those cable layer ships have capabilities of burying submarine cables. The S-net submarine cable system was originally designed to be deployed with the cable layer ships.

Three of authors are now board on C/S SUBARU, which is one of two cable layer ships described above, and in charge of installation of a subset of the S-net submarine observatory network which covers the area between east off Aomori Prefecture and south off island of Hokkaido. Installations of 23 observatories and about 800km length optical cable on the seafloor will be completed shortly after.

We will report the progress of the construction of S-net submarine cable system in this presentation.

キーワード：海底観測網、津波、海底地震

Keywords: Seafloor Observatory Network, Tsunami, Submarine Earthquake

日本海溝海底地震津波観測網 (S-net) ～陸上局システムについて～

Seafloor Observation Network for Earthquakes and Tsunamis along the Japan Trench (S-net) -
System of landing station part -

*植平 賢司¹、金沢 敏彦¹、望月 将志¹、藤本 博己¹、野口 伸一¹、眞保 敬¹、汐見 勝彦¹、功刀 卓¹、青井 真¹、
松本 拓己¹、関口 涉次¹、篠原 雅尚²、山田 知朗²

*Kenji Uehira¹, Toshihiko Kanazawa¹, Masashi Mochizuki¹, Hiromi Fujimoto¹, Shin-ichi Noguchi¹,
Takashi Shimbo¹, Katsuhiko Shiomi¹, Takashi Kunugi¹, Shin Aoi¹, Takumi Matsumoto¹, Shoji Sekiguchi¹,
Masanao Shinohara², Tomoaki Yamada²

1.防災科学技術研究所、2.東京大学地震研究所

1.National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention, 2.Earthquake Research
Institute, University of Tokyo

Seafloor Observation Network for Earthquakes and Tsunamis along the Japan Trench (S-net) project to construct a large-scale seafloor network of cable-linked observatories is in progress around Japan Trench and Kuril Trench in Japan. The S-net consists of 150 ocean bottom earthquake and tsunami observation stations, ocean bottom fiber optic cables which are about 5,700 km in total length, landing stations, IP-VPN network which delivers data to data centers, and data centers. The ocean bottom fiber optic cables connect the observation stations to land, and they are drawn inside landing stations.

We have constructed five landing stations; Minamiboso station in Minamiboso City, Chiba Pref., Kashima station in Kashima City, Ibaraki Pref., Watari station in Watari Town, Miyagi Pref., Miyako station in Miyako City, Iwate Pref., and Hachinohe station in Hachinohe City, Aomori Pref.. The Watari station is located on the third floor of reinforced concrete building, and other stations are container-type data centers.

In the landing station, there are a high voltage receiving transformer equipment, an emergency diesel generator with a tank which can store fuel for one week, uninterruptible power supplies (UPSs), a power feed equipment (PFE) that supplies constant DC current (1.1 A) to a submarine cable and observation units, optical receiver transmission equipment, optical wavelength division multiplexing equipment (WDM), GPS clocks, data conversion servers, data transmission servers, supervisory equipment, and so on.

In each earthquake and tsunami observatory under sea water, there installed two sets of three component servo accelerometers, a set of three component velocity seismometers (analog outputs), and two quartz type depth sensors and a set of three-component quartz type accelerometers (frequency outputs). These data are transmitted to the landing stations as the digital data which synchronized to a GPS clock signal supplied from the landing station. The data of frequency outputs are frequency count values at sampling frequency of 8 kHz, and these of analog outputs are digitized values by 24 bits AD converter at sampling frequency of 1 kHz. Data conversion servers at the landing station receive these data. The 8 kHz frequency count data are converted into physical value data of 100 Hz (acceleration) or 10 Hz (water pressure and temperature), and these physical data are delivered to data transmission servers. The 1 kHz digitized analog data are converted into 100 Hz data by decimation filter, and delivered to data transmission servers.

The data received by data transmission servers will be transmit to Tsukuba data center, Tokyo backup data center, Japan Metrological Agency (JMA), and related institutions via two control

center using an IP-VPN network.

キーワード：日本海溝海底地震津波観測網 (S-net)

Keywords: Seafloor Observation Network for Earthquakes and Tsunamis along the Japan Trench (S-net)

新規開発したICT光海底ケーブル式地震津波観測システムの設置

Installation of compact seafloor cabled seismic and tsunami observation system using ICT

*篠原 雅尚¹、山田 知朗¹、酒井 慎一¹、塩原 肇¹、金沢 敏彦²*Masanao Shinohara¹, Tomoaki Yamada¹, Shin'ichi Sakai¹, Hajime Shiobara¹, Toshihiko Kanazawa²

1.東京大学地震研究所、2.防災科学技術研究所

1.Earthquake Research Institute, the University of Tokyo, 2.National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention

岩手県釜石市沖の光ケーブル式海底地震・津波観測システムは、1996年に設置され、連続したリアルタイム観測が実施されてきた（以下、既設システム）。既設システムは、従来の海底通信電信電話技術を利用している。2011年東北地方太平洋沖地震の地震動および津波を観測し、東北沖地震の正確な震源域の位置および震源過程の推定に寄与した。しかし、本震の約30分後に海岸に到達した津波により、陸上局が流失し、観測が中断した。この観測システムから得られるデータは貴重であり、東京大学地震研究所では、システムの復旧として、既設システムでの観測を再開すると共に、既設システムへの追加/更新として、新規に開発したケーブル観測システムを設置することとした。

地震研究所は、ICTを用いた小型の海底ケーブル式地震観測システムの開発を継続して行ってきた。我々のシステムは、インターネット技術を用いた通信回線の冗長化による観測の信頼性の向上、最新半導体技術を用いたソフトウェアベースの小型化などが特徴である。2010年には日本海に一号機を設置した。今回開発したケーブル式海底地震・津波観測システムは、2号機にあたり、ギガビットのイーサネット技術をデータ伝送、制御・監視に用いている。また、海底ケーブルのファイバー数を減らすために、WDM（波長分割多重）を用いた。観測装置は、2種類を製作した。3成分加速度計の搭載は共通であるが、1つは、津波計として、高精度水圧計を組み込んでおり、もう一つは、外部センサーのための、PoEi/Fを搭載した。通信バックアップ回線を兼ねたクロックラインにより、正確な時刻情報を配送するが、EEE1588によるイーサネット時刻同期技術により、各観測装置の時計を約300nsの精度で同期させることも可能である。耐圧容器には、通信ケーブルで用いられている中継器の最小サイズ（直径約26cm、長さ約1.3m）を用いた。

システムの設置位置は、2013年に行ったルート調査結果に加えて、既設システムおよびS-netの位置を考慮して、決定した。設置計画案に従い、海底ケーブルの全長は105kmとなり、観測装置は0 kmまたは40kmの間隔で3台となった。2台の観測装置は津波計内蔵型であり、最も沖合の1台は、外部ポート搭載型とした。設置時には、外部ポートには、デジタル出力型高精度水圧計を接続した。

設置は、通信用海底ケーブル設置に用いられている海底ケーブル敷設船を利用して、2015年9月に行った。ケーブル敷設船は、まず、設置ルート上の障害物を除去するために、ケーブルルートの掃海を行い、その後、釜石市の陸上局に、海底ケーブルの一端を直接陸揚げした。その後、沖に向かって、ケーブルを敷設した。水深1,000m以浅では、埋設機による敷設同時埋設を実施した。水深1,000mより深いところでは、海底に直接設置した。その後、埋設機で埋設できなかった陸揚げ地点付近をROVにより後埋設し、設置を完了した（図2）。設置完了直後から、観測を開始した。

設置した観測システムで取得された地震データからは、更新システムのノイズレベルは、既設システムとほぼ同等であることが確認された。さらに、埋設した観測装置については、ノイズレベルが他の観測装置に比べて低く、地震計の埋設が観測に有効であることが改めて確認された。水圧データについても、1hPa以下の分解能で観測されていることが確認され、埋設された水圧計を含めて、既設システム、今回設置したシステムのすべての水圧計について、整合的な記録が得られている。

キーワード：ケーブル式海底観測システム、海底地震計・津波計、リアルタイム観測

Keywords: Cabled seafloor observation system, Ocean bottom seismometer and tsunami meter, Real-time observation

