

## レーザーひずみ偏差計の開発～温度依存ノイズの低減 Development of a laser strain gradiometer and reduction in its thermal noise.

出口 雄大<sup>1\*</sup>; 新谷 昌人<sup>1</sup>  
DEGUCHI, Takehiro<sup>1\*</sup>; ARAYA, Akito<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 東京大学地震研究所

<sup>1</sup> Earthquake Research Institute, University of Tokyo

### 1. スロー地震

地震は断層のせん断すべりであり、破壊伝播速度がおよそ一定なため、断層面の縦方向、横方向、およびすべり量がそれぞれ破壊の継続時間に比例し、地震モーメントが時間の3乗に比例するスケールリング則に従う。このような通常の地震の他に、近年スロー地震が見つかった。これは、長期的スロースリップや短期的スロースリップ、深部低周波微動や超低周波地震といった現象の総称であり、これらは通常の地震と同様にせん断すべりであるが、よりゆっくりとしたすべりであることがわかっている（詳しくはレビュー論文 [Beroza et al, 2011] を参照）。これらは地震モーメントが時間に比例する ( $M_0=CT$ ) スケールリング則をもつ同一のメカニズムの現象であるという仮説が立てられている [Ide et al, 2007]。

### 2. スロー地震の観測における問題点

スロー地震が発見されているが、スケールリング則から予想される継続時間が200秒～1日のスロー地震は観測の報告がない。その理由を調べるため、スロー地震のシグナルと背景地面振動の理論計算を行ったところ、加速度計や、ひずみ計・傾斜計の一点の観測では、背景地面振動の影響で観測できないことが分かった。

### 3. スロー地震の観測の取り組み例

背景地面振動や機器のノイズの影響を減らす一つの方法として、多点での観測を組み合わせることが考えられる。この方法で継続時間が1日未満のスロースリップの観測に迫っている先行研究として、産総研歪傾斜地下水圧統合解析 [Itaba et al, 2009] が挙げられる。

### 4. ひずみ偏差の計測

変位の空間二階微分（これをひずみ偏差と呼ぶことにする）を直接測定できれば、一点の観測でも継続時間1日未満のスロー地震の信号が検出されると計算された。観測の障害となっている背景地面振動の波長は、スロー地震の震源までの距離（例えば50km）や震源域の大きさ（数km～数10km）よりもだいぶ大きいため、空間スケールの小さい現象を強調するとスロー地震を観測しやすくなる。そして、空間微分は空間スケールの小さい現象を強調する効果があるので、変位の空間二階微分であるひずみ偏差を直接測定できればスロー地震が観測できるという計算結果が得られた。

### 5. レーザーひずみ偏差計の開発状況

レーザー干渉計を用いてひずみ偏差を直接測定する装置を試作した。数十メートル規模の機器を、観測所の地面に設置する前に、地震研究所鋸山観測坑内の大気圧下で機器のノイズを測定したところ、周期10秒以上では、 $10^{-5}$  Hzでおよそ  $10^{-12}$  [m<sup>2</sup>s] でパワーが  $1/f^2$  となるスペクトルを持つノイズが見られた。これは、気圧変化により、干渉計の非対称性によって生じる基線の光路差が変化したことが原因だと分かった。次に、実験室で干渉計の部分真空装置に入れたところ、周期10s～10000sの帯域でノイズが1/10程度に減少したが、今度は  $1/f$  のスペクトルを持つノイズが卓越していた。光路差をなくす調整をすることによってこのノイズは低減され、このノイズの原因は、使用している2縦モード安定化型レーザーの周波数の揺らぎであると推定した。周期が5000秒以上では、 $1/f^0$  のスペクトルの大きなノイズが残っていて、このノイズの大きさは周期20000s以上では以前と変わらない大きさだった。このノイズは、時間領域と周波数領域で、光学定盤の温度変化と概形としては同じ波形であった。そのため、このノイズは温度変化による光学素子や光学定盤の熱膨張が原因となっていると推定した。このノイズがひずみ偏差としては基線長の二乗に反比例して減少すると仮定した場合、継続時間10000秒のスロー地震の信号をノイズに埋もれずに捉えるのに必要な基線長は300m以上と試算された。今回は、このノイズを低減するため光学定盤を支える支柱をセラミック製にし、熱伝導を抑えて温度変化を少なくした場合の、干渉計のノイズについて解析し、今後の機器開発について説明する。

キーワード: レーザー干渉計, ひずみ計, ひずみ偏差計

Keywords: laser interferometer, strainmeter, strain gradiometer

## ICTを用いたケーブル式小型地震津波観測システムと設置計画 Compact Ocean Bottom Cabled Seismic and Tsunami Observation System Using ICT and Installation Plan

篠原 雅尚<sup>1\*</sup>; 山田 知朗<sup>1</sup>; 酒井 慎一<sup>1</sup>; 塩原 肇<sup>1</sup>; 金沢 敏彦<sup>2</sup>

SHINOHARA, Masanao<sup>1\*</sup>; YAMADA, Tomoaki<sup>1</sup>; SAKAI, Shin'ichi<sup>1</sup>; SHIOBARA, Hajime<sup>1</sup>; KANAZAWA, Toshihiko<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 東京大学地震研究所, <sup>2</sup> 防災科学技術研究所

<sup>1</sup>Earthquake Research Institute, University of Tokyo, <sup>2</sup>National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention

The Pacific plate is subducting below the northeastern Japan islands arc. The 2011 Tohoku earthquake occurred at the plate boundary between the Pacific plate and the landward plate below landward slope of the Japan Trench. In 1996, Earthquake Research Institute (ERI), University of Tokyo had installed seismic and tsunami observation system using seafloor optical fiber in the off-Sanriku area. The continuous real-time observation has been carried out since the installation. The system observed seismic waves and tsunamis generated by the 2011 Tohoku earthquake, and the data from the system are indispensable to estimate accurate position of the source faults and the source process of the 2011 event. However, the landing station of the system was damaged by huge tsunami 30 minutes after the mainshock, and the observation is discontinued. Because the data from the real-time system on seafloor are important, we decide to restore the existing system and install newly developed Ocean Bottom Cabled Seismic and Tsunami (OBCST) observation system off Sanriku for additional observation and/or replacement of the existing system. In this paper, we present a system of the new OBCST in detail, and installation plan.

Until 2010, we had already developed and installed the new compact Ocean Bottom Cabled Seismometer (OBCS) system near Awashima-island in the Japan Sea. After the installation, the OBCS system is being operated continuously and we have continuous seismic data for more than 3 years at the present. The new OBCST system for off-Sanriku area is based on this system, and is characterized by system reliability using TCP/IP technology and down-sizing of an observation node using up-to-date electronics. The new OBCST has three accelerometers as seismic sensors. Signals from accelerometers are 24-bit digitized with a sampling rate of 1 kHz and sent to a landing station using standard TCP/IP data transmission. A precise pressure gauge is also equipped as a tsunami sensor. The tsunami data with a sampling rate of 1ms are also transmitted by TCP/IP protocol. In addition, an observation node can be equipped with an external port for additional observation sensor instead of a pressure gauge. Additional sensors on seafloor are supplied the power using Power over Ethernet technology. Clock is delivered from the GPS receiver on a landing station using simple dedicated lines. In addition, clocks in observation nodes can be synchronized through TCP/IP protocol with an accuracy of 200 ns (IEEE 1588). The data will be stored on the landing station and sent to ERI in the real-time. A simple canister for tele-communication seafloor cable is adopted for the observation node, and has diameter of 26cm and length of about 1.3m. This small size of the canister has an advantage for burying the system below seafloor.

At the present, we are producing the observation nodes of the new OBCST. The new system has three observation nodes; two have three-component seismometer and a pressure gauge, one has seismometers and an external port by using the PoE technology. We have a plan to connect a pressure gauge and hydrophone via the PoE external port of the third observation node. Total length of the practical system is approximately 100 km and an interval of the observation node is about 30 km. We have a plan to install the practical system in 2015.

Keywords: Cabled ocean bottom seismometer and tsunami gauge, Sanriku, Japan Trench, seafloor observation

## 昭和基地から国際地震センターへの験震データ：1967年以降の長期変動 Long-period duration of the teleseismic events reported to ISC from Syowa Station since 1967

金尾 政紀<sup>1\*</sup>  
KANAO, Masaki<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> 国立極地研究所  
<sup>1</sup> National Institute of Polar Research

南極昭和基地で記録された遠地地震の空間分布と時間推移をもとに、震源パラメータの深さ依存性やマグニチュード検知レベルの推移の原因について考察した。その結果、マグニチュード下限の時間推移（特に季節変化）に対して、気象データ等の環境パラメータとの関連性が指摘できた。特に、南極大陸周辺を覆う海氷の面積・厚さの年周変化が、南大洋起源の波浪ノイズを軽減する効果の増減に寄与するため、地震検知率の年周変動に密接に関係していると推測される。さらに、国際地震センター（ISC）に集積された1967年以降の長期間データからは、過去半世紀のグローバルな地震活動や、基地の観測システム向上による影響が含まれている可能性が高い。南極大陸の他のデジタル地震観測網（FDSN）の観測点と比較しても、昭和基地における長期間の験震数の漸次的増加は有意なものと思われる。

キーワード: 昭和基地, 遠地地震, 検知率, モニタリング観測, グローバル網  
Keywords: Syowa Station, teleseismic events, detection capability, monitoring observation, global network

## GLISN 日本隊によるグリーンランド氷床上での地震観測 (2011-2013), および 2014 年の観測計画 Seismic observation on Greenland Ice Sheet by the Japanese GLISN team (2011-2013), and a plan for the 2014 season

豊国 源知<sup>1\*</sup>; 金尾 政紀<sup>2</sup>; 東野 陽子<sup>3</sup>; 姫野 哲人<sup>4</sup>; 坪井 誠司<sup>3</sup>  
TOYOKUNI, Genti<sup>1\*</sup>; KANAO, Masaki<sup>2</sup>; TONO, Yoko<sup>3</sup>; HIMENO, Tetsuto<sup>4</sup>; TSUBOI, Seiji<sup>3</sup>

<sup>1</sup> 東北大学・理・予知セ, <sup>2</sup> 国立極地研究所, <sup>3</sup> 海洋研究開発機構, <sup>4</sup> 成蹊大学  
<sup>1</sup>RCPEVE, Tohoku Univ., <sup>2</sup>NIPR, <sup>3</sup>JAMSTEC, <sup>4</sup>Seikei Univ.

グリーンランド氷床は地球規模の気候変動に伴って融解が進行している。近年、氷床融解の過程で末端部の氷河が移動する際に、「氷河地震」と呼ばれる地震動が発生することが知られるようになり、地震観測による氷床モニタリングに関心が集まっている。2009年に発足した「グリーンランド氷床の地震モニタリング観測網 (Greenland Ice Sheet Monitoring Network, GLISN)」は、氷床モニタリングを目的として、11ヶ国の国際共同で広帯域地震観測網を展開するプロジェクトである。観測網は氷床上や露岩域に新設された観測点と、既存の定常観測点を合わせて成り立っており、現在33点が運営されている。

日本は GLISN 発足時からの参加国として、毎年観測隊を派遣している。2011年には、米国と共同で氷床上に観測点「ICESG」(北緯 69° 5'32.05", 西経 39° 38'50.89", 標高 2900 m) を新設した。2012年には、ICESGに加えて、氷床上の観測点1点 (DY2G) と露岩の観測点1点 (NUUK) のメンテナンスを行った。2013年には、氷床上に11泊してICESGとDY2Gのメンテナンスを行ったほか、氷床上最北端の観測点 NEEM の観測支援にも従事した。本発表では、日本隊の3年間の活動と、これらの観測点から得られた地震波形データの初期的な解析結果を報告したのち、2014年の観測計画を紹介する。

GLISN 日本隊の活動は、科研費 (課題番号 24403006) により運営されている。

キーワード: グリーンランド, 氷河地震, GLISN 観測網  
Keywords: Greenland, glacial earthquake, GLISN network

## 広域観測網監視システムの構築と運用 Development and Operation of Wide-area Observation Monitoring (WONM) System

村田 健史<sup>1\*</sup>; 長妻 努<sup>1</sup>; 山本 和憲<sup>1</sup>; 渡邊 英伸<sup>1</sup>; 鶴川 健太郎<sup>2</sup>; 村永 和哉<sup>2</sup>; 鈴木 豊<sup>2</sup>  
MURATA, Ken T.<sup>1\*</sup>; NAGATSUMA, Tsutomu<sup>1</sup>; YAMAMOTO, Kazunori<sup>1</sup>; WATANABE, Hidenobu<sup>1</sup>; UKAWA, Kentaro<sup>2</sup>;  
MURANAGA, Kazuya<sup>2</sup>; YUTAKA, Suzuki<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 情報通信研究機構, <sup>2</sup> 株式会社 セック

<sup>1</sup>National Institute of Information and Communications Technology, <sup>2</sup>Systems Engineering Consultants Co., LTD.

NICTサイエンスクラウドは、情報通信研究機構が2010年より構築を進めている科学研究専用のクラウドシステムである。NICTサイエンスクラウドは地球規模での地球環境観測および宇宙環境観測データ収集機能およびインターネット公開データ収集機能を有している。特に、地球規模の観測拠点の一元的な監視とデータ伝送のために、広域観測網監視(WONM)システムを開発した。WONMシステムでは、北極域(アラスカ)、赤道域、南極域(昭和基地)など全17観測拠点を本システムで運用している。また、本システムをクラウド監視にも利用し、約200台のNICTサイエンスクラウド上のサーバとスイッチの等の機器の監視も行っている。したがって、世界中に設置されている100を超える観測拠点にも利用できると思われる。(筆者らは、1000を超える観測拠点でも運用が可能であると考えている。)

WONMは、利便性向上のために小型サーバ(アプライアンス)を準備している。小型サーバには必要なアプリケーションが事前に設定しており、観測拠点に設置・パラメータ設定を行った後に観測装置からデータが保存されるストレージをマウントするだけで、NICTサイエンスクラウドにより監視およびデータ伝送が始まる。この仕組みはデータの種類の依存しないため、様々な地球観測網への応用が期待できる。本発表では、WONMシステムの基本機能について紹介する。さらにこれをNICTサイエンスクラウド上で実装し、地球環境および宇宙環境観測データを収集した実績とその有効性について議論する。



## エンベロープ波形を利用した火山性地震の震源決定法の開発—三宅島B型地震への適用—

### Development of hypocenter location method using envelopes: Application to B-type earthquakes at Miyakejima volcano

内田 東<sup>1\*</sup>; 西村 太志<sup>2</sup>; 中原 恒<sup>2</sup>; 山里 平<sup>1</sup>; 藤田 英輔<sup>3</sup>

UCHIDA, Higashi<sup>1\*</sup>; NISHIMURA, Takeshi<sup>2</sup>; NAKAHARA, Hisashi<sup>2</sup>; YAMASATO, Hitoshi<sup>1</sup>; FUJITA, Eisuke<sup>3</sup>

<sup>1</sup> 気象庁, <sup>2</sup> 東北大院・理・地球物理, <sup>3</sup> 防災科学技術研究所

<sup>1</sup>Japan Meteorological Agency, <sup>2</sup>Geophysics, Science, Tohoku University, <sup>3</sup>NIED

火山では、実体波読み取りによる震源決定が困難な地震がしばしば多数観測される。2000年噴火後のガス放出期の三宅島においても、構造性地震(A型地震)やP波S波が読み取れるB型地震も少数ながら観測されるものの、およそ9割はP波S波の立ち上がりが不明瞭なB型地震に分類される。これらの実体波到達時の読み取りができない場合には、複数の観測点での地震波の相関を利用する方法や、地震波振幅の大きさの空間分布を利用する方法などがあるが、定常観測網への適用や精度に課題がある。近年、Obara(2002)は、プレート境界面付近で発生する初動の不明瞭な深部低周波微動の震源を推定するために、エンベロープ相関法を提案した。この手法では、観測点ごとに地震波形のエンベロープを合成し、それらの相互相関によって観測点間のS波到達時刻差を見積ることで震源を推定する。この手法を、三宅島の火山性地震に適用した結果、実体波到達時刻読み取りによる結果と比べると、エンベロープ相関法では震源分布が全体的に南東へ約0.5-1kmずれた(Uchida et al., 2013 IAVCEI)。これは、エンベロープ相関法では、すべての観測点でエンベロープ形状が同じだと仮定していること、散乱など地震波伝播にともなうエンベロープ拡大を考慮していないこと、さらにエンベロープ形状のサイト特性を考慮していないことに問題がある。そこで本研究では、目視によるS波到達時刻の読みとりが可能な一部の地震を利用して、この問題点を解決する改良エンベロープ相関法を開発した。この手法は、S波到達時刻の不明な地震波形のエンベロープとS波到達時刻が対応付けられた参照イベントのエンベロープの相互相関を計算することで、不明なS波到達時刻を推定し、震源を推定するものである。参照イベントは、それぞれの観測点のエンベロープ形状が、震源決定するイベントとできるだけ相似になるよう選択されることが望ましい。そこで、目視によるS波到達時刻の読みとりが可能な一部の地震(参照イベント候補)と震源決定するイベントそれぞれで連結エンベロープを作成し、その連結エンベロープの相関係数が高い順に参照イベントを選択する。ここで連結エンベロープとは、各観測点のエンベロープ波形を、開始時刻を揃えて等しい時間窓長で切り出し、それらをあらかじめ決めた観測点順で並べて時間軸方向に連結したものである。連結エンベロープ波形の相似性が高いことは、観測点間のエンベロープ波形の立ち上がり時間差や相対的な振幅比がほぼ同じで、震源決定するイベントと参照イベントで震源が近接していることを意味する。三宅島でP波、S波の読み取りが行えた114個のA型地震および31個のB型地震を参照イベントの候補とし、1049個のB型地震にこの手法を適用した。連結エンベロープの相関係数が0.9以上となる最大で8個の参照イベントを選び、それぞれの参照イベント毎に各観測点のS波到達時刻を推定しデータとした。複数の参照イベントを使うのは、多数のS波到達時を使うことによって震源パラメータの推定誤差を小さくするためである。その結果、三宅島で観測されたB型地震の71%の震源を推定できた。震源は、主火口の位置に近い山頂カルデラ内部南側の深さ約0-2kmに推定された。A型地震は、カルデラ南側から西側にかけて分布し、一部、B型地震の発生域と重なることが分かった。さらに、実体波読み取りによる結果と比較することでその精度を検証した結果、改良エンベロープ相関法では、従来のエンベロープ相関法(Obara, 2002)の場合に比べると水平偏差の大きさが10分の1に減少し、系統的な震源位置のずれがほぼ解消された。この改良エンベロープ相関法は、標準的な火山観測網に適用できるので、より多くのB型地震の震源の推定が可能となり、火山活動の監視や火山性地震の発生過程の解明に役立つことが期待される。

キーワード: 震源決定, エンベロープ相関, 三宅島

Keywords: hypocenter determination, envelope correlation, Miyakejima volcano