

C会場 | 一般セッション：S02. 地震計測・処理システム

2022年10月26日(水) 13:30 ~ 14:45 | C会場 8階 (820研修室)

[S02] PM-1

座長:吉見 雅行(産業技術総合研究所)、大林 政行(国立研究開発法人海洋研究開発機構)

13:30 ~ 13:45

[S02-01] MERMAIDハイドロフォンアレイで捉えたフンガ・トンガ噴火

*大林 政行¹、吉光 淳子¹、杉岡 裕子²、Joel Simon³、Yu Yong⁴ (1. 海洋研究開発機構 海域地震火山部門、
2. 神戸大学、3. Princeton University、4. Southern University of Science and Technology)

13:45 ~ 14:00

[S02-02] S-net海底地震計により検出した福德岡ノ場噴火に伴う水中音響信号についての考察

*岩瀬 良一¹ (1. 国立研究開発法人海洋研究開発機構)

14:00 ~ 14:15

[S02-03] 国道4号線におけるDAS，ビデオカメラ，広帯域地震計による通過車両の同時観測

*矢武 克啓¹、中原 恒¹、江本 賢太郎²、西村 太志¹ (1. 東北大学大学院理学研究科 地球物理学専攻 固体地球物理学講座、2. 九州大学大学院理学研究院 附属地震火山観測研究センター)

14:15 ~ 14:30

[S02-04] 三陸沖海底光ケーブルを用いた分散型音響センシング計測による制御震源と地震記録の特性

*篠原 雅尚¹、山田 知朗¹、高野 洋輝²、蔵下 英司¹、仲田 理映¹、望月 公廣¹、悪原 岳¹、酒井 慎一³ (1. 東京大学地震研究所、2. 東京大学地震研究所、現在(株)INPEX、3. 東京大学情報学環)

14:30 ~ 14:45

[S02-05] 新幹線布設光ファイバーにおける駿河湾周辺の長期間DAS観測と自然地震観測への応用

*吉見 雅行¹、井出 哲²、江成 徹平³、田屋 大輝³、岩田 秀治⁴ (1. 産業技術総合研究所 活断層・火山研究部門、
2. 東京大学大学院理学研究科、3. 東京大学地震研究所、4. 東海旅客鉄道株式会社)

MERMAIDハイドロフォンアレイで捉えたフンガ・トンガ噴火

The Explosive Hunga Tonga Eruption observed by an Array of Hydroacoustic MERMAID Floats

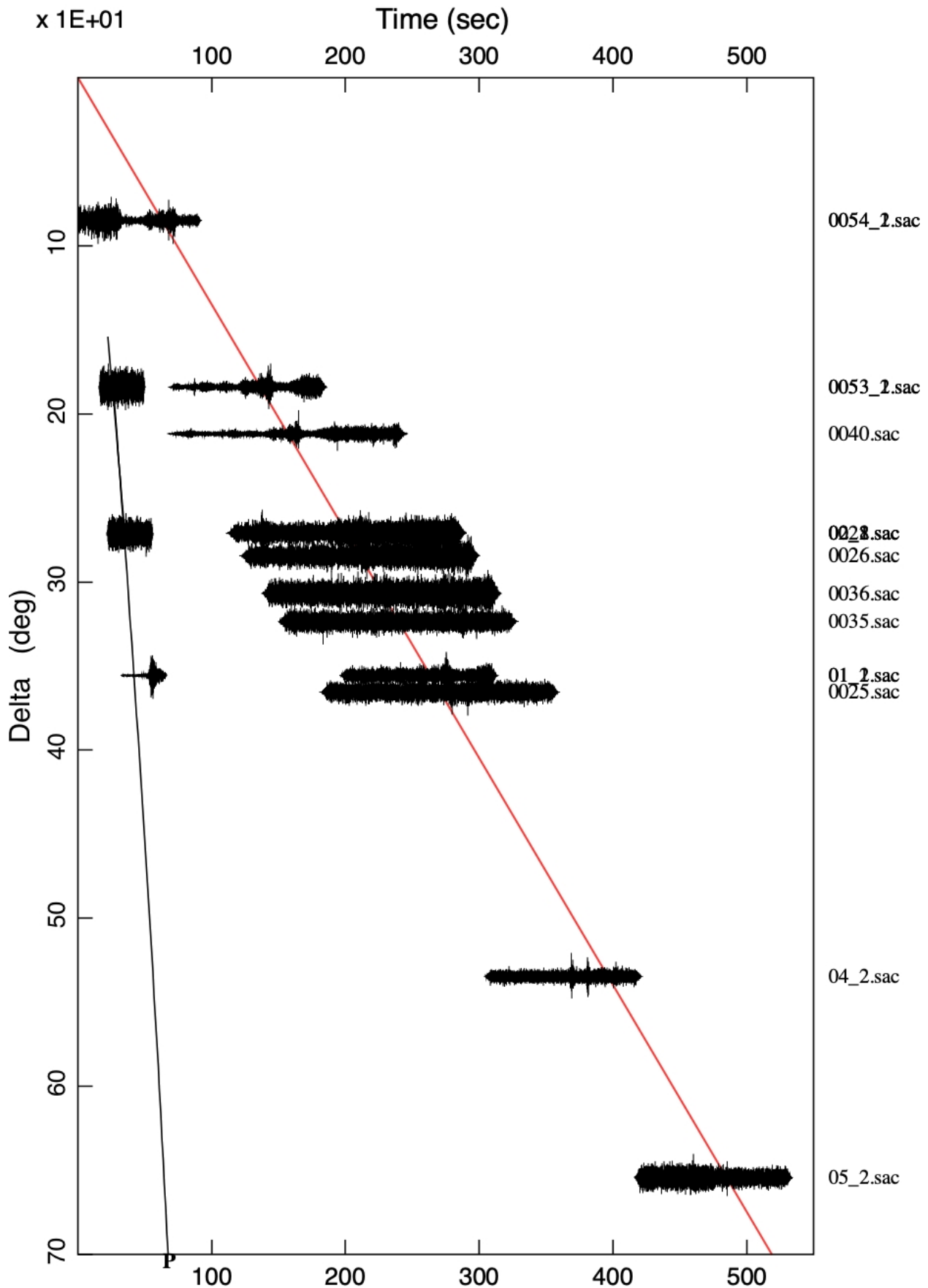
*大林 政行¹、吉光 淳子¹、杉岡 裕子²、Joel Simon³、Yu Yong⁴

*Masayuki OBAYASHI¹, Junko Yoshimitsu¹, Hiroko Sugioka², Joel D Simon³, Yu Yong⁴

1. 海洋研究開発機構 海域地震火山部門、2. 神戸大学、3. Princeton University、4. Southern University of Science and Technology

1. JAMSTEC, 2. Kobe University, 3. Princeton University, 4. SUSTech

現在約50 台のMERMAID (Mobile Earthquake Recording in Marine Areas by Independent Divers) フロートが南太平洋の海中を漂流しており、地球深部内部構造を求めることを目的に高周波 (~1 Hz) P 波から海底で変換された水中音波をハイドロフォンで観測し、その波形データを衛星通信を利用して準リアルタイムで送信している。このMERMAIDフロートアレイは国際プロジェクトSPPIM (South Pacific Plume Imaging and Modeling) の下2018 年の展開以来、ホットスポットとプルームに富む南太平洋下マントルを通る新しい波線経路のグローバルな地震の高品質P波波形データを何千も記録してきた。MERMAIDフロートはP波から変換された水中音波を観測する自律型フロートであるが、漂流深度(通常1500 m)で周囲の音響場から地震特有の信号を検出するアルゴリズムを備え、地震が検出されると海面に浮上しその波形を送信する。さらに、MERMAIDフロートには双方向イリジウム通信を介して1年間取得可能なデータバッファが装備されている。従って、MERMAIDフロートは、地震P波を準リアルタイムに自動的に送信するシステムを有する一方で、自動的に送信されなかった期間でも陸上からのリクエストにより関心のある期間のデータを切り出すための連続データも保存している。MERMAIDフロートは海洋島の地震計、海底地震計、係留型ハイドロフォンのいずれでもなく、MERMAIDフロート特有のデータであり、発表では、2022 年 1 月の爆発的な Hunga Tonga噴火に焦点を当てたリクエストにより得られたSPPIM MERMAIDフロートアレイのデータを紹介する。

2022 01 15 04:14:45 [-20.5453 -175.394] Hunga Tonga

MERMAIDで捉えたフンガ・トンガ噴火によるT-phase。横軸、縦軸はそれぞれ噴火時刻からの時間、火山からの距離。赤線は水中音波速度1.5 km/sを仮定した時の走時を表す。

S-net海底地震計により検出した福德岡ノ場噴火に伴う水中音響信号についての考察

Study on the underwater acoustic signals associated with the eruption at Fukutoku-Oka-No-Ba observed with the OBSs of S-net

*岩瀬 良一¹

*Ryoichi IWASE¹

1. 国立研究開発法人海洋研究開発機構

1. JAMSTEC

岩瀬(2022)では、2021年8月13日に福德岡ノ場において発生した海底火山噴火、及び2022年1月15日にフンガ・トンガ-フンガ・ハアパイ（フンガ火山）で発生した海底火山噴火について、防災科学技術研究所の「日本海溝海底地震津波観測網」(S-net)を構成する海底地震計の観測波形を用い、深海サウンドチャンネル（Sound Fixing and Ranging, SOFARチャンネル）を伝搬した噴火に伴う水中音響信号を検出した。具体的には、噴火地点からS-net各観測点までの音波の伝搬時間を考慮して、時間軸を観測点毎にずらして描画したスペクトログラムを比較することにより、視覚的に噴火に伴う水中音響信号を識別した。今回、この識別結果をもとにして、福德岡ノ場噴火に伴う水中音響信号について考察を加えた。使用したデータは岩瀬(2022)と同じく、S-netの各観測点を構成する2種類の地震計のうち速度計を使用し、もう一方の地震計である加速度計で計測される重力の方向をもとに鉛直成分を算出した波形データであり、サンプリング周波数は100 Hzである。元の波形データには地震に伴う信号や船舶ノイズ等が多数含まれているが、スペクトログラムを参照すると、噴火に伴う信号が有する周波数成分の検出下限は、観測点によって相違があるものの、およそ5 Hz程度と判断される。一方、ノイズ状況も観測点によって相違があるものの、10Hz以下ではノイズレベルが比較的低い状況となっている。そこで今回5Hzから10 Hzまでの周波数帯域を透過するバンドパス・フィルタの適用を試みた。当該フィルタ適用後の波形に対して観測点毎に時間軸を伝搬時間分ずらし、更にそれを伝搬距離順に並べた結果をFig.1に示す。なお伝搬時間は伝搬距離(大円距離)を音速(1500 m/s)で割って求めた。横軸は各観測点で検出した信号の音源での発出時刻に相当する。縦軸は伝搬距離(km)である。なお波形を表示した観測点は噴火に伴う信号を検出した44観測点のみを選択している。SOFARチャンネルを音速で伝搬した噴火に伴う信号は横軸の同じ位置に出現するので、噴火イベントとして識別可能となる。Fig. 1は2021年8月13日05:00 JSTから1時間の記録である。下向き三角印で示した05:57頃にパルス形状の波形が存在するが、それに先立つ05:55頃からのイベント発生が確認できる。Fig. 2は、05:56 JSTからの2分間の波形を拡大したものであるが、イベント波形の出現位置がやや傾いていることがわかる。そこで、音速を1472 m/sとして描画したものをFig. 3に示す。Fig. 2に比べ、イベント波形の出現位置が揃っていることがわかる。そこで音速を同じく1472 m/sとして、05:54 JSTからの5分間の波形をFig. 4に示す。05:55 JSTの少し前からの噴火活動の開始が推定される。今後フンガ火山の噴火に伴う信号についても同様な解析を行う予定である。

謝辞

本研究の実施に際し防災科学技術研究所の公開データ(<https://doi.org/10.17598/NIED.0007>)を利用しました。伝搬距離の計算には国土地理院のサイト(<https://vldb.gsi.go.jp/sokuchi/surveycalc/surveycalc/bl2stf.html>)を利用しました。

参考文献

岩瀬(2022), JpGU2022, SVC31-21.

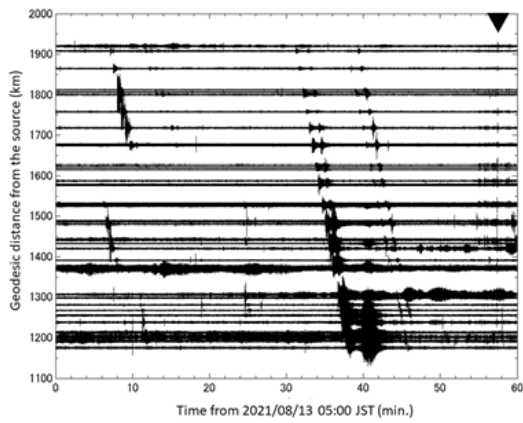


Fig. 1

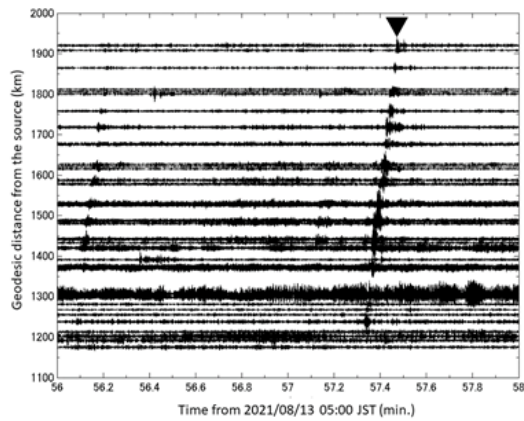


Fig. 2

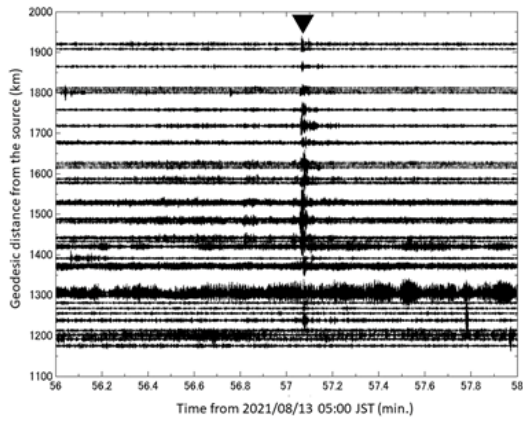


Fig. 3

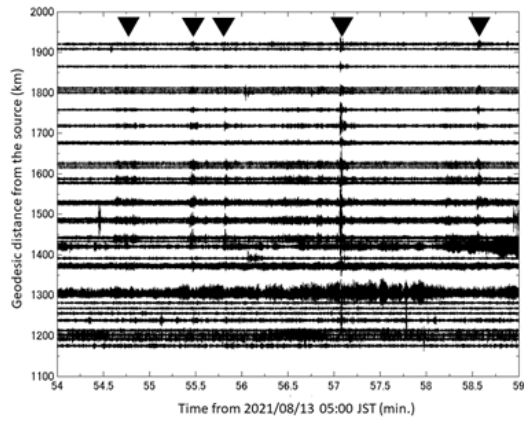


Fig. 4

国道4号線におけるDAS、ビデオカメラ、広帯域地震計による通過車両の同時観測

Simultaneous observation of passing vehicles using DAS, a video camera, and a broadband seismometer on National Route 4

*矢武 克啓¹、中原 恒¹、江本 賢太郎²、西村 太志¹

*Katsuhiko YABU¹, Hisashi NAKAHARA¹, Kentaro EMOTO², Takeshi NISHIMURA¹

1. 東北大学大学院理学研究科 地球物理学専攻 固体地球物理学講座、2. 九州大学大学院理学研究院 附属地震火山観測研究センター

1. Solid Earth Physics Lab., Geophysics, Science, Tohoku University, 2. Institute of Seismology and Volcanology, Faculty of Science, Kyushu University.

DAS (Distributed Acoustic Sensing) は既存の光ファイバーケーブルに計測装置を接続するだけで、数m間隔で数十kmにわたるケーブル軸方向の歪みまたは歪み速度を計測できることから、近年地震学において導入が進んでいる。我々のグループは、2020年に宮城県内を通る国道4号線沿いに埋設されている通信用の光ファイバーケーブルを利用してDAS観測を行った（江本・他、2020、地震学会）。矢武・他（2021、地震学会）では車両が励起する表面波の分散曲線を用いて浅部S波速度構造を推定した。しかし、位相だけではなく振幅も含めたDASの歪み波形を解釈するためには、車両が振動を励起する過程を詳しく理解する必要性を痛感した。そこで今回、DASの観測を再び行うにあたり、測線の間地点近くの大衡村の1か所において、ビデオカメラ、広帯域地震計を用いた観測も並行して実施した。本発表では、その観測の概要と、映像から得られる通過する車両の特徴とDAS歪み波形記録、広帯域地震計記録との関係についてこれまでに分かったことを紹介する。

Sintela社のDASの計測装置（ONYX）を国土交通省古川国道維持出張所内に2022年3月から4月の約1ヶ月間設置し、そこから南の仙台方向に国道4号線に沿って伸びている約 50 kmの光ファイバーケーブルに接続した。ゲージ長は 9.57 m、チャンネル間隔は 6.38 m、サンプリング周波数は 200 Hzとした。本観測機器の出力信号は歪みである。ビデオカメラと広帯域地震計は、大衡村の国道4号線沿道の民家の敷地内に設置した。近傍の車道は片側1車線ずつの計2車線であり、観測場所と車道中央までの距離は約 9 m、光ファイバーケーブルは観測場所から遠い方の車線の深さ約 2.3 m に埋設されている。広帯域地震計はナノメトリクス社の広帯域3成分速度計 Trillium Compact を使用し、計測技研の HKS-9700でデータを連続収録した。ビデオカメラはパナソニック社 HC-VZX990M-W を使用し、観測期間中の数日間において断続的に車道方向の映像を記録した。

映像において車両を確認できた際には、広帯域地震計やDASに車両の通過に伴う地面の振動が記録されている。図は、大型トラックが通過した際の各記録の例である。DASの波形記録と映像とを比較すると、車両が最も光ケーブルに近づいたと考えられる時刻に歪み記録は伸びのピークを示し、その前後では縮みを示した。また、表面波の伝播によると考えられるより高周波の振動も捉えられた。コーナー周波数 5 Hz のローパスフィルタをかけた地震計記録には、同時刻の上下動成分にランプ状の波形が見られることが多かった。一方、水平成分は常に脈動と思われる周期状の波形が見られることが多かった。

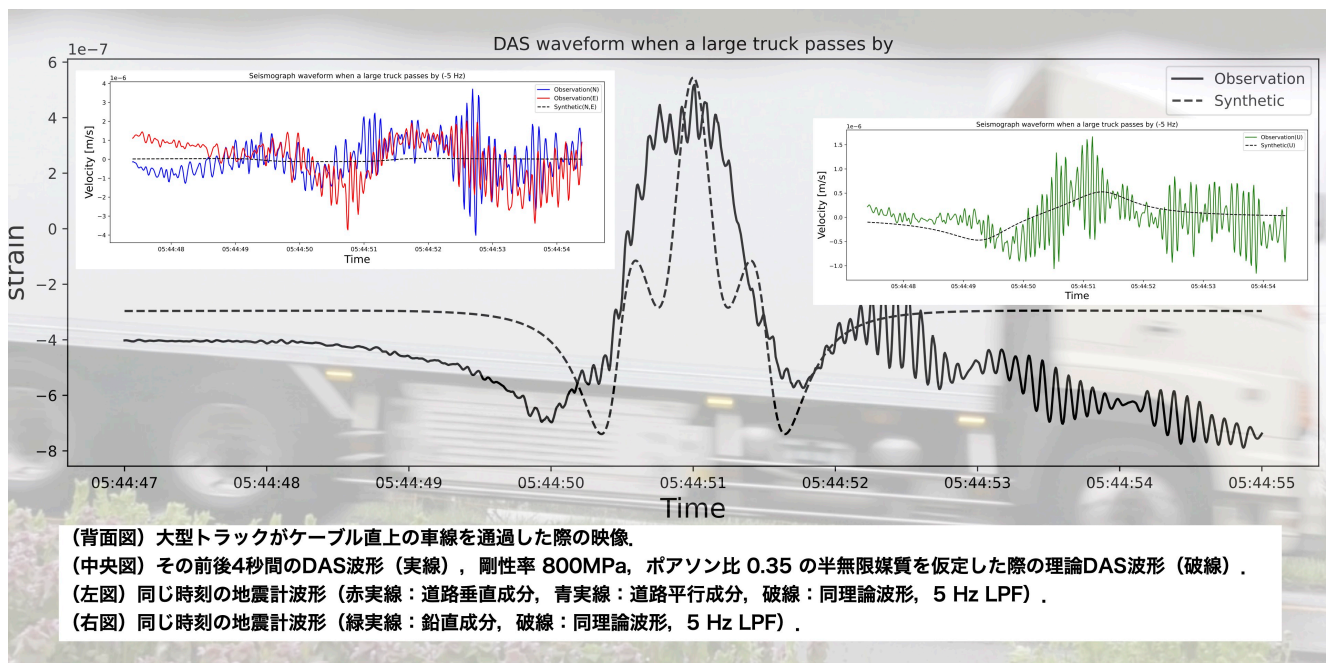
映像記録から、軽自動車、普通自動車、普通貨物自動車・マイクロバス、大型貨物自動車・バス、超大型貨物、の5つに分類することができる。そこで、それぞれの車両通過に伴う最大ひずみ量を車両種別ごとに算出した。

その結果、最大ひずみ量の平均値は、各車種カテゴリーの代表的な荷重の大きさにほぼ比例し、また、光ケーブルの直上の車線を走行する場合の方が、より大きいことがわかった。パルス幅については、大型の車両ほど長くなる傾向にあるが、同じ車両種別でもそのばらつきは大きいことがわかった。

これらの結果を定量的に解釈するため、半無限媒質表面の鉛直荷重に対する変位応答を計算する Boussinesq 問題の解を利用した。車両が一定速度で観測点を通過すると仮定すると、理論DAS波形を水平方向にゲージ長分離れた観測点間の Boussinesq 解による変位の水平成分の差と走行速度を用いて表すことができる (Jousset et al., 2018)。この時、荷重は映像を基に求めたタイヤの位置に等しく分配されているとした。観測波形は、理論波形の形状に類似していることから、各車種カテゴリーの代表的な荷重と最大ひずみ量の平均値を基に、観測地点付近の地盤の弾性パラメータは、剛性率 800 MPa 程度、ポアソン比 0.35 程度と推定された。また、パルス幅が同じ車両種別でもばらつくのは、走行速度が異なるためであると解釈できる。さらに、このパラメータを用いて地震計の理論波形を同様に求めた。水平動成分は他のノイズが乗っていることが多かったものの、上下動成分の速度は複数の車両に対して観測値をよく説明することができた。

本研究では動画を併用したことで車両の特定を行うことが可能となり、多様な荷重源を基に弾性パラメータの推定精度を高めることができた。また、DASの解析結果を地震波形を用いて検証することもできた。さらに今後、この地点で求めた各車両の荷重を基に、車両が移動した先の映像記録がない地点においてもDAS記録を用いて弾性パラメータを求める予定である。

(謝辞) 国土交通省所有の光ファイバーを使用させていただいた。観測に当たって、仙台河川国道事務所の方々に便宜を図っていただいた。また、地震計とカメラの設置については、大衡村の石川敏氏様に多大なご協力をいただいた。



三陸沖海底光ケーブルを用いた分散型音響センシング計測による制御震源と地震記録の特性

Characteristics of DAS records for earthquakes and controlled sources on off-Sanriku seafloor optical fiber cable

*篠原 雅尚¹、山田 知朗¹、高野 洋輝²、蔵下 英司¹、仲田 理映¹、望月 公廣¹、悪原 岳¹、酒井 慎一³

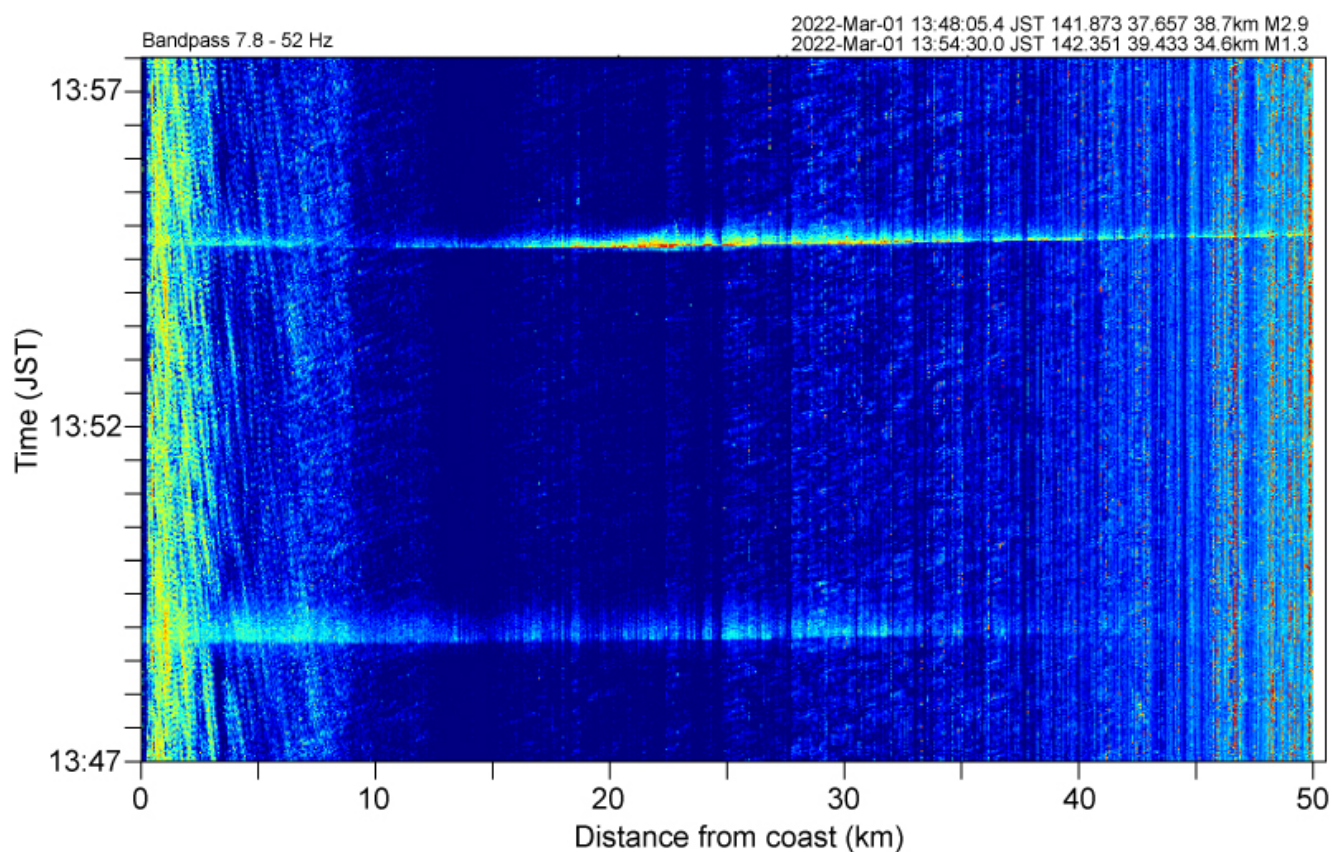
*Masanao SHINOHARA¹, Tomoaki Yamada¹, Hiroki Takano², Eiji Kurashimo¹, Rie Nakata¹, Kimihiro Mochizuki¹, Takeshi Akuhara¹, Shin'ichi Sakai³

1. 東京大学地震研究所、2. 東京大学地震研究所、現在(株)INPEX、3. 東京大学情報学環

1. Earthquake Research Institute, the University of Tokyo, 2. ERI, now at INPEX Co., 3. Interfaculty Initiative in Information Studies, the University of Tokyo

散乱波の干渉計測による分散型音響センシング(DAS)は光ファイバセンシングの一つであり、ファイバに沿って短い計測間隔で、長距離に渡って記録が得られることから、地震観測にも適用されている。干渉計測を用いたDAS計測は徐々に正確さが向上しており、現在は、質の高い記録が得られるようになってきている。現在海域において地震観測を行っている観測点はまだ数が少ないが、海底ケーブルを用いたDAS計測は線状ではあるが、海底観測点数を大幅に増加させることが可能で、今後が期待されている。1996年に東京大学地震研究所により設置された三陸沖海底光ケーブル地震津波観測システムは、拡張用に6本の予備ファイバがあり、この予備ファイバをDAS計測に使うことができる。そこで、2019年2月以降、予備ファイバを用いて、計8回の臨時観測を行っている。それぞれの観測期間は2日から2ヶ月である。収録チャンネル間隔が10m以下で、収録距離は長いときで100kmに達する。計測精度を示すゲージ長は10mから100mである。それぞれの観測において、微小地震を含む多数の地震が記録された。2019年2月の第1回の観測では、気象庁が決定したマグニチュード1.8以上のケーブルシステムから震央距離200km程度までの地震はすべて確認することができた。また、震央距離が約2,300kmであるマグニチュード6.6の遠地地震も記録された。三陸沖海底光ケーブル観測システムには、3地点において3成分加速度計が接続されており、DASデータとの比較が可能である。DASはファイバ方向の歪を計測しているが、単純な仮定の基で加速度に変換できる。その結果、現在の干渉計測によるDAS観測のノイズレベルは、ケーブルシステムに接続されている加速度計とほぼ同程度であることが確かめられた。DAS計測は陸上局から約100km沖合までを空間的に高密度で観測していることから、海岸線から沖合に至るノイズスペクトルの空間変化を求めることもできた。2020年11月に三陸沖海底光ケーブルのDAS計測と制御震源による構造探査実験を行った。使用した制御震源はBolt社1500LLエアガン（1台あたり容量1500cu.in.）4台とSercel社GIガン（1台あたり容量355 cu.in.）2台の2種類である。陸上局舎において、2本のファイバ末端にそれぞれ計測器を接続し、2台による同時DAS観測を行った。DASの収録はサンプリング500Hz、チャンネル間隔5m、ゲージ長40m、観測総距離100km（一部80km）である。1500LLエアガンの測線は、海底ケーブル敷設ルートとその延長の全長約200kmである。発震間隔は約100mとした。GIガンの測線は、海底ケーブル敷設ルートのみ約100kmであり、この測線上を2回発震した。発震間隔は約50mである。エアガン発震中はDAS計測を実施すると共に、発震を行う観測船から、ストリーマケーブルを曳航して、記録を収録した。収録されたデータは、2つの計測器間に大きな差はないことが確認された。また、DAS計測による制御震源の記録とケーブルシステムの加速度計による記録を比較したところ、DAS記録ではP波振幅が小さいことが確認された。構造探査実験では、海底において5mの間隔で全長80km以上の収録が行われており、高分解能な反射断面が得られることが期待される。そのため、得られたDASデータに対して基本的な反射処理を施し評価を行った。まず、DAS計測により記録された制御震源の水中直接波の走時を用いて、ケーブル位置の再決定を行った。その後、CMPソート、bandpass処理、単純なdeconvolution処理を行った後に、定速度重合により反射断面を作成した。DASデータは反射波の連続性が高くないために、定速度

重合法による速度解析を行った。震央距離が3km以内のCMP gatherにおいて、1500LLエアガン記録に対しては1.0km/s、GIガン記録に対しては0.8km/sとして、定速度重合により反射断面図を作成した。DAS計測による反射断面図をストリーマケーブルによる反射断面と比較したところ、反射面の走時は異なるが、基本的に同じ反射面を示していると解釈された。DAS計測による反射断面における反射面の海底面からの往復走時は、ストリーマケーブルによる反射断面における同じと思われる反射面の海底面からの往復走時の約2~5倍となっている。反射面まで比較的長い往復走時やCMP重合の遅い重合速度などから、得られたDAS計測による反射断面は変換されたS波による反射波が卓越していると考えられる。



新幹線布設光ファイバーにおける駿河湾周辺の長期間DAS観測と自然地震観測への応用

Earthquake observation by Distributed Acoustic Sensing on optical fiber along a Shinkansen track around Suruga Bay

*吉見 雅行¹、井出 哲²、江成 徹平³、田屋 大輝³、岩田 秀治⁴

*Masayuki YOSHIMI¹, Satoshi IDE², Teppei ENARI³, Daiki TAYA³, Shuji IWATA⁴

1. 産業技術総合研究所 活断層・火山研究部門、2. 東京大学大学院理学研究科、3. 東京大学地震研究所、4. 東海旅客鉄道株式会社

1. Geological Survey of Japan/AIST, 2. Graduate School of Science, Tokyo Univ., 3. Earthquake Research Institute, Tokyo Univ., 4. Central Japan Rail Company

東海道新幹線の軌道沿いに布設された通信用光ケーブルを用いて、約三ヶ月間（2021年8月30日から11月23日）にわたるDAS観測（AP sensing製 N5226A）を実施した。新幹線や交通車両等による振動に加え、複数の地震記録が取得された。本発表では、計測の概要、光ケーブル設置条件と観測記録の特性、地震計記録との比較、テンプレートマッチングによる火山性低周波地震の検出試行結果を報告する。測定対象は小田原―掛川区間であり、このうち熱海―静岡区間（約75km）で74日間、熱海―小田原区間、静岡―掛川区間でそれぞれ2日間および3日間程度の連続観測を実施した。DAS観測に並行して、新丹那トンネル内の3箇所、富士川橋梁上、および、沿線の3箇所に広帯域地震計もしくは加速度計による観測を行った。DASの計測パラメータは、機器が設定を許す最大のサンプリングレートおよびゲージ長（空間サンプリング5.1m、ゲージ長40.8m、サンプリング周波数は熱海―静岡区間では1000Hz、それ以外では2000Hz）とした。1分間のデータ量は、熱海―静岡区間（約75km：約15000ch）で1.72GB、静岡―掛川区間（約45km：約9000ch）で2.1GB、熱海―小田原間（約19km：約3800ch）で0.87GBであり、観測期間全体で200TBあまりのデータ量となった。測定区間の新幹線軌道は、トンネル、橋梁、高架橋、盛土、掘割、自然地盤など様々な地盤・構造物上に設置されている。光ケーブルは、トンネルでは壁面に架けられ、それ以外の場所では線路脇等の配線箱もしくは配線棚に格納されている。新幹線通過時には位相跳びによる振幅の頭打ちが生じるものの、新幹線による振動が記録され、設置環境による振動特性の違いが明瞭であった。トンネル区間では、新幹線の突入に伴う微気圧波による振動が音速で伝搬する様子も観測された。観測期間中には房総沖、千葉中部、静岡県中部等を震源とする地震（有感）が発生し、これらのDAS計測波形が取得された。P波、S波のオンセットは概ね明瞭であった。後続波群は地震に関わらず場所ごとにほぼ同一の周波数帯域に収斂し、構造物―地盤系の振動特性を反映しているものと推察される。計測区間北方には富士山の火山性低周波地震の震源域がある。低周波地震のシグナルが明瞭に認識できるDAS計測波形のうち10秒区間をテンプレートにして、Matched Filter解析を実施した。約360万個の相互相関値のうち6 σ 以上のもの（112個）の中に、富士山の火山性低周波地震は21個（テンプレート地震含む）含まれていた。同じ期間の気象庁カタログに含まれるものの23個のうち12個、含まれないものも9個検出された。M0.5を超える低周波地震は概ね検出でき、また約5分間続く低周波地震活動も検出できていた。構造物設置の光ケーブルを用いたDAS観測は、当該構造物の振動特性把握など工学的に有用であるばかりでなく、地震検知など理学目的の自然地震観測にも有用である。