

D会場 | 特別セッション：S23. 観測地震学のフロンティア～稠密地震観測の未来像～

2020年10月30日(金) 13:00～14:15 | D会場

[S23]PM-1

座長:高木 涼太(東北大学大学院理学研究科)

13:00～13:30

[S23-05] [招待講演] 分散型音響センシング技術を用いた三陸沖光ケーブル観測システムにおける高密度海底地震観測

○篠原 雅尚¹、山田 知朗¹、悪原 岳¹、望月 公廣¹、酒井 慎一¹ (1.東京大学地震研究所)

13:30～13:45

[S23-06] 吾妻山の浅部地盤増幅特性の推定—光ファイバーとDASの記録の解析—

○西村 太志¹、江本 賢太郎¹、中原 恒¹、三浦 哲¹、山本 希¹、杉村 俊輔¹、石川 歩¹、木村 恒久² (1.東北大学大学院理学研究科、2.シュルンベルジェ)

13:45～14:00

[S23-07] 市街地における光ファイバーケーブルを用いたDAS観測による高密度データの解析

○江本 賢太郎¹、中原 恒¹、西村 太志¹、山本 希¹、寒河江 皓大¹、Ganefianto Gugi¹、矢武 克啓¹ (1.東北大学大学院理学研究科)

14:00～14:15

[S23-08] 人工的振動によるDAS記録の特徴

○田中 昌之¹、小林 昭夫¹、勝間田 明男¹、溜淵 功史¹、木村 恒久²、久保田 俊輔³、依田 幸英⁴ (1.気象研究所、2.シュルンベルジェ、3.有限会社ワイケー技研、4.日本電気株式会社)

[招待講演] 分散型音響センシング技術を用いた三陸沖光ケーブル観測システムにおける高密度海底地震観測

[Invited] Dense seismic observation using seafloor optical fiber cable system off Sanriku by Distributed Acoustic Sensing

*篠原 雅尚¹、山田 知朗¹、悪原 岳¹、望月 公廣¹、酒井 慎一¹

*Masanao Shinohara¹, Tomoaki Yamada¹, Takeshi Akuhara¹, Kimihiro Mochizuki¹, Shin'ichi Sakai¹

1. 東京大学地震研究所

1. Earthquake Research Institute, The University of Tokyo

光ファイバをセンサとして用いるDistributed Acoustic Sensing(DAS)計測は、空間的に高密度なデータが取得可能であることから自然地震観測に応用されており、海底ケーブルによる先駆的な観測例もある。DAS計測は、光ファイバセンシング技術の一つで、コヒーレントなレーザー光の短いパルスを送信し、シングルモードファイバに連続して送信し、後方散乱を観測する。ファイバ近傍で発生した振動により発生したファイバの微小な変形が後方散乱波のパターンを変化させることから、振動を検出する。パルスを送出してから時間が観測点までの距離に対応する。また、後方散乱波のパターン変化検出には干渉測位を用いており、散乱源の距離変化（歪変化）を計測する。干渉させる散乱波の散乱源の距離（ゲージ長）が空間的な分解能に相当し、地震観測の場合はゲージ長は数十mに設定することが多い。すなわち、地震計を数十m間隔で、長さが敷設されているファイバに対応するアレイ観測が行うことができる。

地震研究所は、1996年に三陸沖光ケーブル式海底地震・津波観測システムを設置し、2011年東北地方太平洋沖地震の被災による中断を経て、現在も観測に用いている。このシステムは将来の拡張用として、6本（3組）のファイバが用意されている。このファイバは、分散シフト・シングルモードファイバであり、DAS計測が適用可能なファイバである。そこで、次期海底ケーブル式観測システムの新技術として、三陸沖光ケーブル観測システムを用いてDAS技術を用いた地震観測を行うこととした。DAS技術による海底観測は、これまで「点」であった観測を、「線」での観測に変化させる画期的なものである。

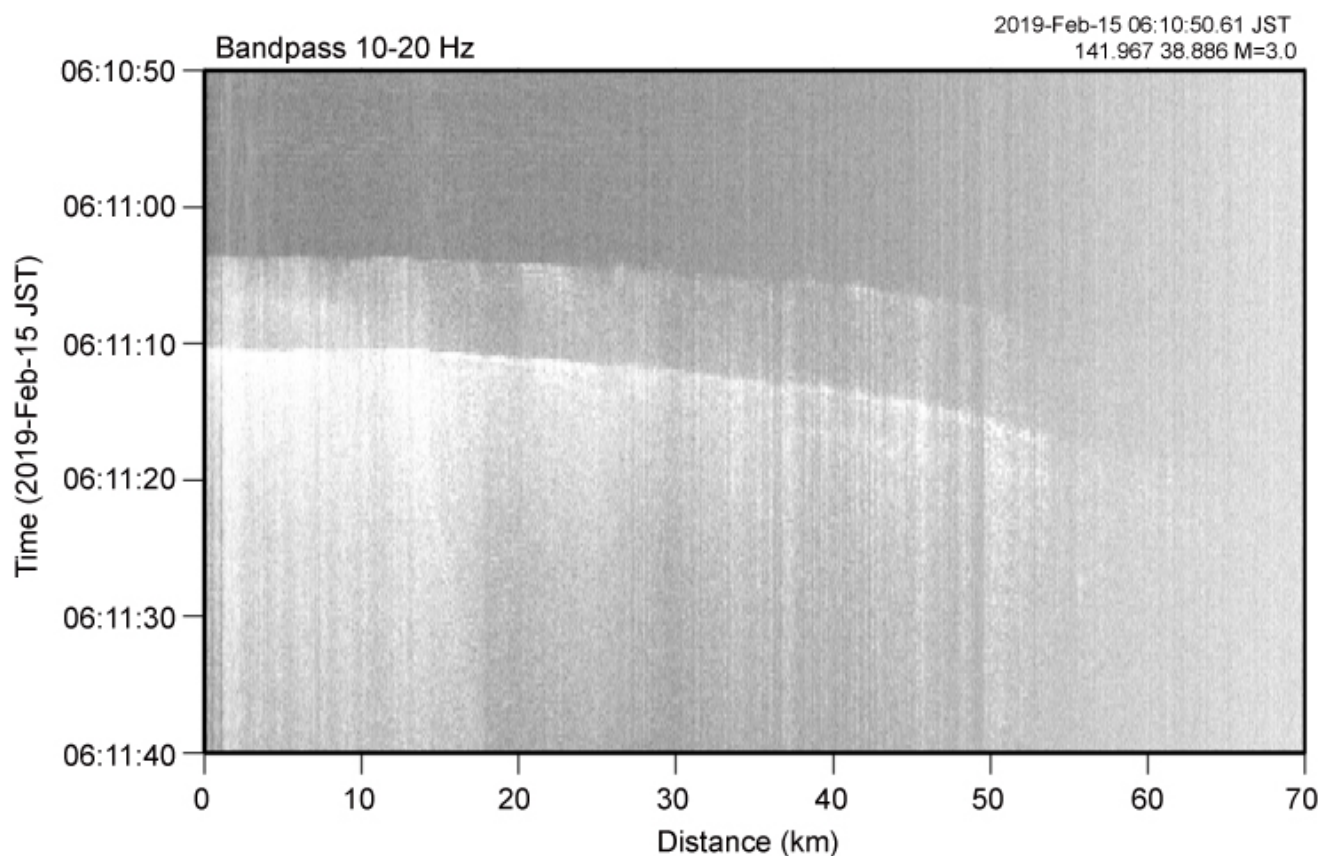
パイロット観測として最初のDAS計測を、2019年2月13日から15日までに実施した。DAS計測の計測器を陸上局に設置し、陸上局から100kmまでの区間において、サンプリング周波数500Hz、ゲージ長(空間分解能)10mまたは40mで連続収録した。収録チャンネル間隔は5mとしたので、全20,000チャンネルのデータとなった。収録期間は約46時間である。その結果、マグニチュード1クラスの微小地震を始め観測システム近傍で発生した小さな地震や深発地震など多数の地震が観測された(図)。また、陸上局から70km程度までの区間において地震波の到達を確認することができた。また、雑微動のノイズスペクトルを求めたところ、陸上の歪計に比較可能なレベルであることもわかった。

DAS計測技術は発展中の技術であり、計測装置についても、各社からそれぞれの特徴がある装置が提案されている。そこで、複数の会社の装置をもって試験観測を実施し、開発を進めることとした。2019年6月25日から28日にかけては、1回目とは異なる計測器により、約72時間の観測を行った。計測装置の特徴により、6月の測定では、計測全長は5kmと短くなったが、チャンネル間隔1m、ゲージ長は7mから32mとして高精度の観測とした。この観測においても、観測システム近傍で発生した比較的規模の小さな地震や、深発地震など多数の地震が観測され、検出性能としては二つの計測装置にほぼ違いがないこと、また、ノイズスペクトルの比較からも異なる計測装置間でもノイズレベルは同等であることがわかった。

2回のパイロット観測により、海底ケーブルを用いたDAS計測による地震観測は有用であることが明らかと

なった。海底におけるモニタリング観測のためには、さらに長期の収録期間が必要となる。また、DAS計測データの評価には、より長期間のデータが必要である。そこで、モニタリング観測を意識して、できる限り長期間で連続したDAS計測を、2019年11月18日から12月2日にかけて実施した。記録期間は記録装置の容量に依存しており、現状は2週間が最長となった。収録パラメータの多くは、2月の実験と同じとした。ただし、収録容量を削減するために、全計測長を18日は約48kmとし、2日目からは70kmとした。データの総容量は15テラバイトとなった。同じく、深発地震を含む多くの地震が収録され、良好な記録が得られた。今後は、このデータを用いて、DAS計測データの評価を進めるとともに、長期モニタリングのためのデータ処理・収録システムの開発を検討する。

図 2019年2月に実施した三陸沖光ケーブル観測システムにおけるDAS計測により収録された地震記録例。横軸は陸上局からの距離、縦軸は時間である。



吾妻山の浅部地盤増幅特性の推定—光ファイバーとDASの記録の解析— Estimation of Site Amplification of Azuma volcano: Analyses of Seismic Signals Recorded by Fiber Optic Cable and DAS

*西村 太志¹、江本 賢太郎¹、中原 恒¹、三浦 哲¹、山本 希¹、杉村 俊輔¹、石川 歩¹、木村 恒久²

*Takeshi Nishimura¹, Kentaro Emoto¹, Hisashi Nakahara¹, Satoshi Miura¹, Mare Yamamoto¹,
Shunsuke Sugimura¹, Ayumu Ishikawa¹, Tsunehisa Kimura²

1. 東北大学大学院理学研究科、2. シュルンベルジェ

1. Graduate School of Science, Tohoku University, 2. Schlumberger

通信用に開発された光ファイバー内を伝播する光は、ファイバーコア内の欠陥や不純物などにより後方散乱される。その散乱波を利用したDistributed Acoustic Sensing(DAS)systemを用いることで、ファイバーに生じた歪みの時間変化を数メートルから数十メートル間隔で測定することができる。今回、このシステムを利用して地盤増幅特性を推定したので報告する。

解析に用いたデータは、2019年秋季大会、2020年JpGUで報告した、磐梯吾妻スカイラインの道路に沿った光ファイバーケーブルとDASによるものである。土湯温泉ゲートから浄土平までの総長14.2kmにわたり、間隔10m、ゲージ長40mで歪み速度を記録している。道路はほぼ南北方向に伸びているが、その中程と南側でつづら折りとなっている箇所もある。光ファイバーケーブルは、深さ50cmほどに埋設された管内に設置されている。2019年7月4日から、南端にある土湯温泉ゲートに、シュルンベルジェ社のheterodyne Distributed Vibration Sensing (hDVS)を設置し、サンプリング周波数1000Hzで約3週間の連続観測を行った。

自然地震のコーダ波は、十分時間が経過すると空間的にほぼ一様に分布すると考えられる。そこで、コーダ波の相対振幅を測定することで、観測箇所の地盤増幅特性を評価する。用いたデータは、観測期間中に観測された、太平洋沖や内陸で発生した震央距離50-100km、深さ100km以浅の自然地震11個である。コーダ波による解析ではS波走時の2倍以降のデータを利用することが一般的であるが、観測箇所の分布範囲に比べて震源距離が十分大きい。そこで、S波の着信時から50秒後までの波形に対して、10秒間の解析窓を10秒ずつずらしながらRMS振幅を読み取り、測線の中央付近に設定した基準点に対する相対振幅を読み取った。解析周波数は2-6Hzである。解析に用いた地震波は、S波着信時から50秒後までのコーダ波であるが、解析窓の位置の違いによる地盤増幅特性の顕著な違いは認められなかった。

解析の結果、S波増幅特性は、全体として、敷設されている光ケーブルの北側の地域で大きく、南側の地域で小さいことが明らかとなった。地盤増幅特性の大きい北側の光ファイバーが敷設されている場所は、吾妻小富士、一切経山、東吾妻山、高山などの山麓に位置し、比較的平坦な地形の上である。過去の溶岩流や火砕堆積物が積もっていると考えられることから、浅部表層は軟弱地盤で構成されており、増幅特性が大きくなったと推察される。一方、小さい地盤増幅特性が推定された南側の地域は、深い谷地形や尾根筋に光ケーブルが敷設されている。火砕堆積物が浸食されるなど、浅部に軟弱地盤がないと想定される。北側の小河川沿いも、地盤増幅特性が周辺に比べてやや小さい箇所が認められる。

光ファイバーケーブルとDASを利用して自然地震を記録することにより、数10m間隔で容易に地震動が記録できることから、長基線にわたって詳細な地盤増幅特性を調べることが可能であることがわかった。

謝辞

国土交通省の光ファイバーを借用した。観測に当たって、国土交通省東北地方整備局福島河川国道事務所の

方々に便宜を図っていただいた。

市街地における光ファイバーケーブルを用いたDAS観測による高密度データの解析

Analysis of dense records of the DAS observation using fiber optic cable in the urban area

*江本 賢太郎¹、中原 恒¹、西村 太志¹、山本 希¹、寒河江 皓大¹、Ganefianto Gugi¹、矢武 克啓¹

*Kentaro Emoto¹, Hisashi Nakahara¹, Takeshi Nishimura¹, Mare Yamamoto¹, Kodai Sagae¹, Gugi Ganefianto¹, Katsuhiro Yabu¹

1. 東北大学大学院理学研究科

1. Graduate School of Science, Tohoku University

近年、光ファイバーケーブルを用いたDAS（Distributed Acoustic Sensing）が地震学において用いられるようになってきた。これは、光ファイバーケーブルを伝わる光パルスの後方散乱波の変化から、ケーブルが変形した位置とその地点におけるひずみを検出するものである。一つの計測装置と一本のケーブルで、数十kmを数m間隔で計測できることが最大の利点である。既存のケーブルを用いる際の地面とケーブルのカップリングや、計測される物理量がひずみテンソルの1成分のみといった制約があるものの、地震学での利用を目的とした手法開発や、観測事例の蓄積が行われてきている。我々は、宮城県内を通る国道4号線沿いに敷設されている通信用の光ファイバーケーブルを利用し、DAS観測を行った。得られた波形記録や、雑微動に地震波干渉法を適用した結果等を紹介する。

計測装置は国土交通省古川国道維持出張所内に設置し、光ファイバーケーブルは、そこから南方向に国道4号線に沿って約50km伸びている。ケーブルは途中で長町利府断層を横切る。ゲージ長・チャンネル間隔は共に5mとし、合計約1万箇所において、500Hzサンプリングで、ケーブルに沿った方向のひずみ速度を記録した。計測は2020年1月から2月にかけての1ヶ月間行った。国道4号線は昼夜を問わず交通量が多いため、全ての時間帯で交通ノイズの影響が見られた。孤立した車の走行ではなく、何台もの車がまとまって通過するため、交通ノイズの波形は複雑で、単純に分離することはできない。期間中に発生したいくつかの地震も記録されたが、交通ノイズの影響は避けられないものであった。また、橋梁部分では、車の通行により橋全体が揺れる振動が見て取れた。長町利府断層の北側で行われていた工事の影響で、光信号の減衰が生じ、長町利府断層付近を含めてその南側ではノイズが大きい記録となった。

得られた1ヶ月間の連続記録に対し、地震波干渉法を適用した。約1万チャンネルを200チャンネルごとのセグメントに分け、各セグメント内のペアで相互相関関数を計算した。計算の際には、時間領域での1bit化と、周波数領域でのホワイトニングを行った。相互相関関数の収束はセグメントによって異なるものの、S/Nのよいセグメントでは、2Hzから8Hzの周波数帯で対称性のよい相互相関関数が得られ、550m/sから600m/s程度で伝播する波が検出された。この周波数帯は、交通ノイズによるシグナルのパワーが強いため、ケーブルのほぼ真上を通る車によるノイズにより、伝播する波が検出されているのだと考えられる。今後、セグメントごとの伝播速度の違いや、相互相関関数の収束性に関する議論を行う予定である。

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。

人工的振動によるDAS記録の特徴

Characteristics of DAS data by Artificial Vibration

*田中 昌之¹、小林 昭夫¹、勝間田 明男¹、溜淵 功史¹、木村 恒久²、久保田 俊輔³、依田 幸英⁴

*Masayuki Tanaka¹, Akio Kobayashi¹, Akio Katsumata¹, Koji Tamaribuchi¹, Tsunehisa Kimura², Shunsuke Kubota³, Yukihide Yoda⁴

1. 気象研究所、2. シュルンベルジェ、3. 有限会社ワイケー技研、4. 日本電気株式会社

1. Meteorological Research Institute, 2. Schlumberger, 3. YK Giken Co., 4. NEC Corporation

近年、分布型音響センシング（DAS; Distributed Acoustic Sensing）の技術を用いた地震観測について多数報告されている。DASは、光ファイバ（コア部分）の一端から非常にコヒーレントな短波長の光パルスを入射し、コア内に存在する多くの分子レベルの不純物や欠陥に衝突して発生する後方散乱光が入射端に戻るまでの時間を計測する。光ファイバは振動や温度等の外乱で変形し、変形した場所で光パルスに位相差が生じる。光パルスの波長変化はひずみ変化速度に対応し、光パルスを等間隔で連続的に入射することにより、ピコストレインレベルのひずみの時間変化が観測できる。しかも、一回のパルスでファイバ全域を細かい間隔で観測できる。

2020年3月、静岡県浜松市天竜区船明地区にある延長約900mの船明トンネル内にて、シングルモード4芯1kmの光ファイバケーブルを敷設し、アダプタで芯同士を接続して総延長4kmのファイバケーブルでDASの試験観測を実施した。これまでの調査で、DASと地震計の双方で観測された近地自然地震の波形記録を比較したところ、地震計記録で見られるP相、S相の実体波はDAS記録でも見られる。また、DASの波形記録はファイバに沿う方向と同じ南北方向の地震計記録と相関が強い。ファイバ近傍で稼働中の真空ポンプのモーター振動及びその高調波などが明瞭に観測された。

しかしながら、DASのデータは、①ゲージ長で区間平均された値である、②不純物や欠陥に当たり発生する散乱光は非常に微弱で、入射する光パルスの強度には上限があり、かつファイバには伝送損失があるため、より遠方の散乱光の信号強度は装置近傍よりも弱くなり、そして、より遠方ほど測定精度は劣るため、S/N比を上げるため加算平均等の処理が行われている、③DASで観測されるデータの物理量はひずみ速度である、など、地震計とは異なる点がある。地震観測で規模推定にDAS記録を用いるには、少なくとも同じ地点で入力振動に対して観測値が線形性を有していることが必要である。また、通常地震波動解析を行う上で再現性が重要である。

船明トンネル内に敷設したファイバは、約30mを2往復半折返している箇所があり、固有周期1秒の三成分速度型地震計が1台設置されている。そこで、敷かれているファイバと直角に

30、60、100、130、160、200cm離れた場所で、ハンマーで地面を叩いて振動を起こし、DASの記録に、地震計のように振動源からの距離に応じて振動の減衰が見られるか、同じ設置環境にある同じ場所の異なるファイバで観測される記録と大きく変わらないかなどについて調べたので紹介する。