

30

地震調査研究推進本部

周年 特別シンポジウム

地震に挑む、30年の歩みとこれから

講演

「光ファイバーセンシング計測が拓く超高密度海底地震観測」

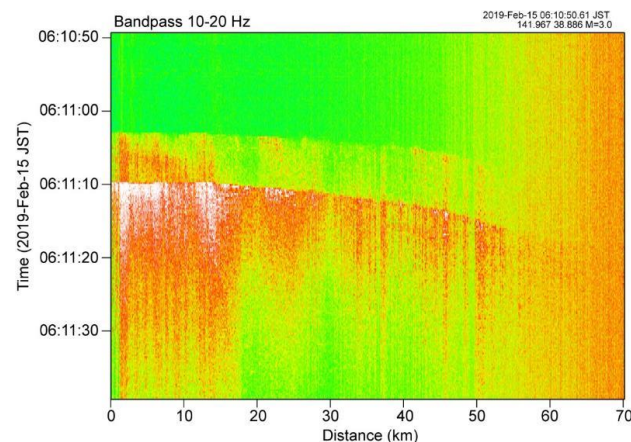
篠原 雅尚

東京大学地震研究所教授

地震調査研究推進本部専門委員



光ファイバーセンシング計測が拓く 超高密度海底地震観測



篠原 雅尚

東京大学地震研究所
地震調査研究推進本部専門委員

地震調査研究推進本部 30周年 特別シンポジウム
文部科学省 講堂
2025年10月14日(火) 15:45 – 16:05



光ファイバーセンシング技術を用いた地震観測

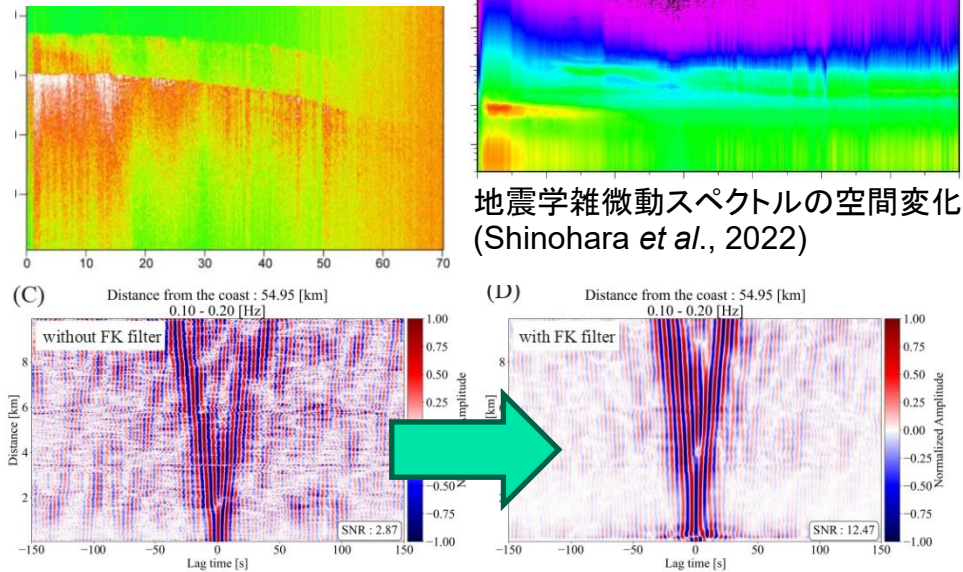
1. 光ファイバー自身を用いて地震動検知し、通常地震計は不要

- 既設の光ファイバーを観測に利用できる
- 光ファイバーは陸上および海底に通信(インターネットなど)のために多数敷設されており、地震観測に適用することにより、観測網を拡大可能



「海しる」より
<https://www.msil.go.jp/msil/htm/main.html?Lang=0>

波動場の把握(Shinohara *et al.*, 2019)



地震学雑微動スペクトルの空間変化(Shinohara *et al.*, 2022)

空間フィルター(FKフィルター)の適用例(Fukushima, 2023)

2. ファイバーに沿って数m間隔で、数十km以上の長距離にわたってデータが取得できる

- 通常地震計による観測網は、時間としては連続的に観測可能だが、空間としては離散的(とびとび)である
- 一次元的ではあるが、地震動を空間的に(ほぼ)連続に観測できる(伝播する地震波の波面を観測できる)
- 従来のデータには適用が難しかった(画像処理を含む)空間領域のデータ処理手法が使用可能(ノイズ除去や特定の地震波の抽出)

3. 「歪(ひずみ)」を直接観測しており、従来の地震計が観測する地震動の変位とは異なる

- 歪は変位の空間微分であるが、多くの従来の解析手法が適用できることが実証されている
- 従来の地震計とは異なるデータであり、新しい現象の発見に繋がる可能性がある

光ファイバーセンシング技術と光海底ケーブル

分布型音響センシング (Distributed Acoustic Sensing: DAS) を地震観測に利用

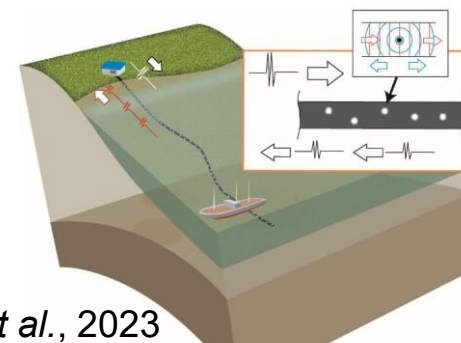
DAS計測

- コヒーレントなレーザ光パルスを繰り返し放射
- ファイバー内からの後方散乱光の位相変化を観測
- ファイバー方向に沿う歪みを計測

長距離通信用の光ファイバーをセンサとして利用可能

当初のDAS観測の目的

- セキュリティー調査
- パイプラインの監視
- 地震波による資源探査



Shinohara et al., 2023

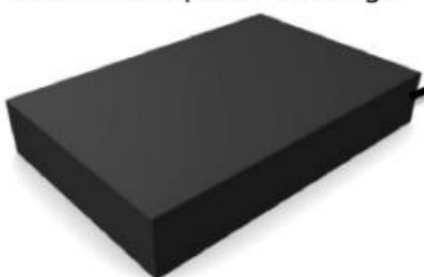
現在、光ファイバーを用いて、データ通信を行っており、通信用ケーブルには光ファイバーが使用されている

- 光海底ケーブルにDAS計測を適用することにより、海底地震観測が実施可能

DAS計測の特徴

- 空間的に短い計測間隔(1-20 m)
- 長距離の計測可能 (最長120 km)
- 2点の散乱点間の距離(ゲージ長)変化(歪変化)を計測

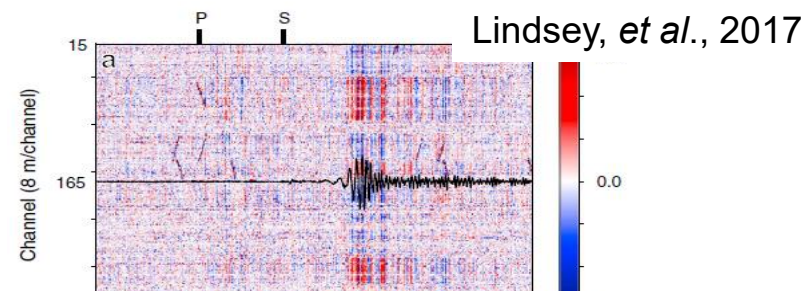
Laser + Computer + Storage



Backscatter

Incident

Optical fiber

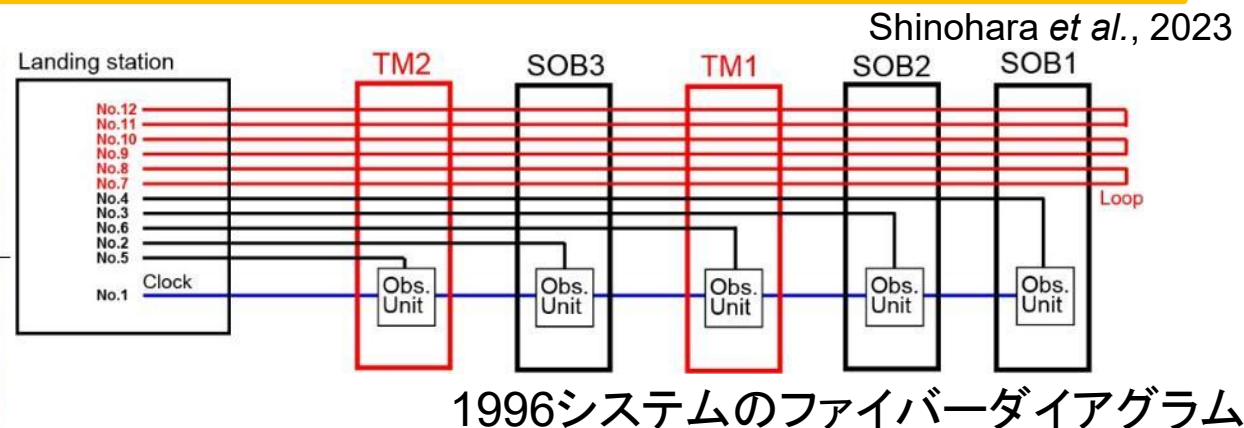
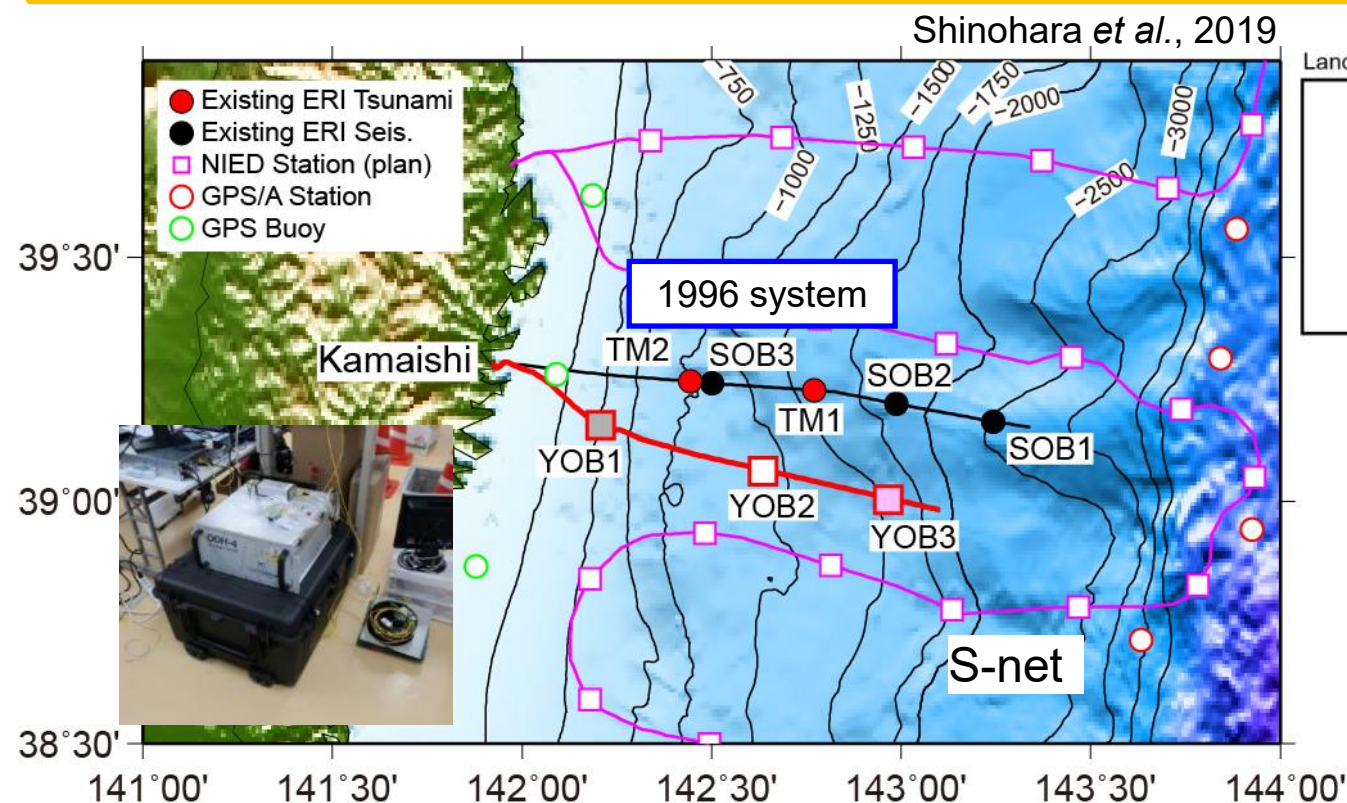


先駆的DAS観測例(スタンフォード大学構内)
(290 ch、8m/ch)
2016 9月13日 M=5.8, $\Delta > 2000$ km
広帯域地震計での記録(黒)

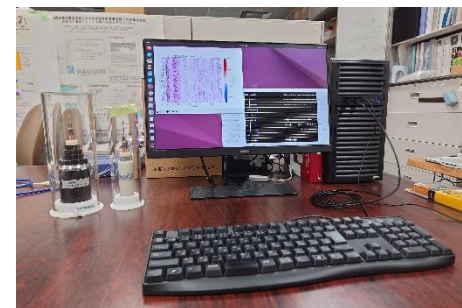
不均質はファイバー内のいたるところにあるので、散乱もあらゆる場所で発生する。すなわち、ファイバー上の短い間隔で振動が計測できる

三陸沖ケーブルにおける海底DAS観測

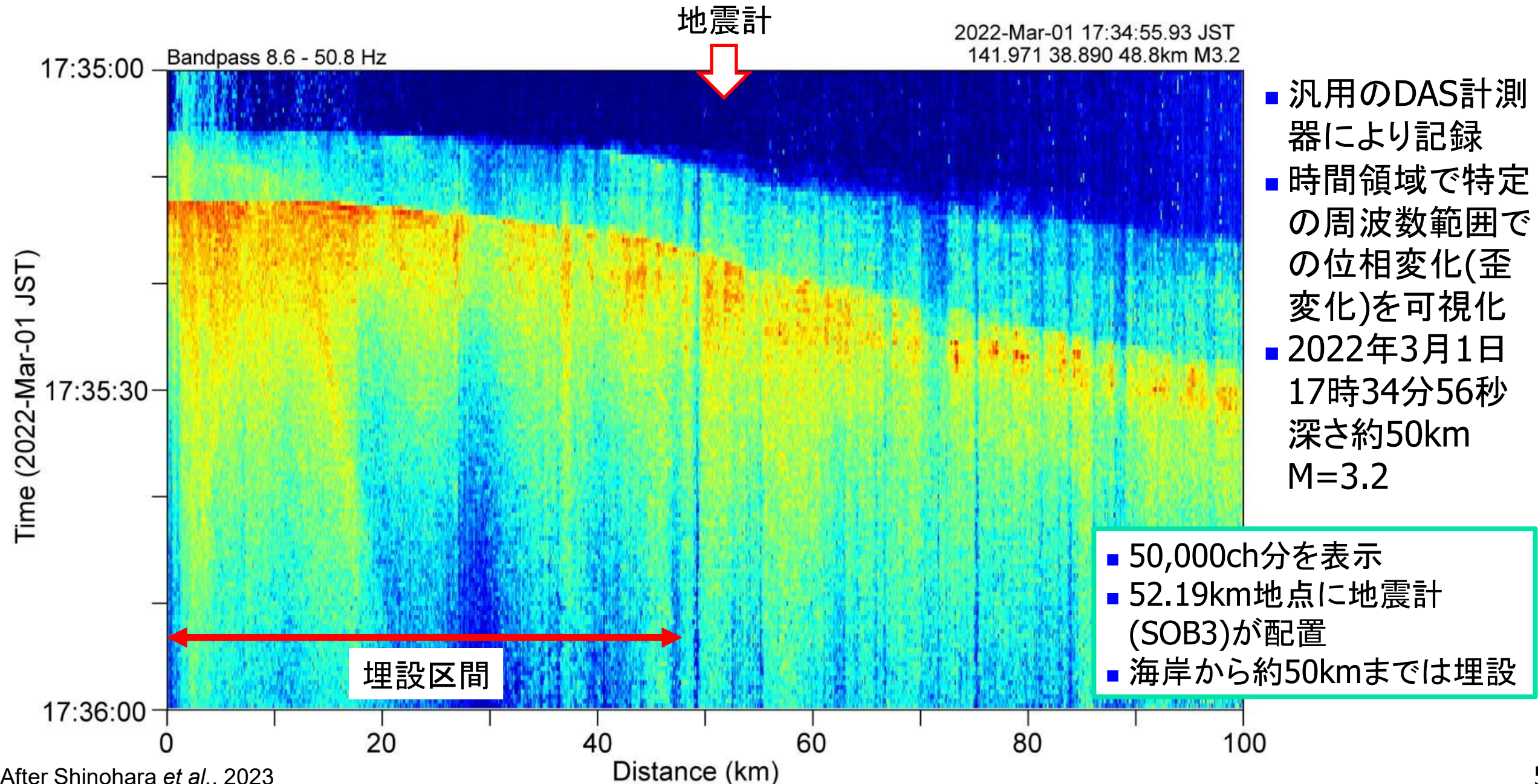
- シングルモードの光ファイバーを利用した2つの海底地震津波観測システム
- 光ファイバーはケーブル外皮と固定されている(Tight-buffered cable)
- 旧(1996)ケーブルは、先端まで中継器が入っていないスペアのファイバー(Dark fiber)がある
- 地震計が配置されており、計測の比較が可能である
- 2019年から、1996システムのスペアファイバーを用いたDAS計測を開始
- データ量が膨大であり、2025年までは数日から数ヶ月の連続観測を繰り返し実施
- 2025年3月からは一部データのテレメトリーを含め、常時観測を実施中



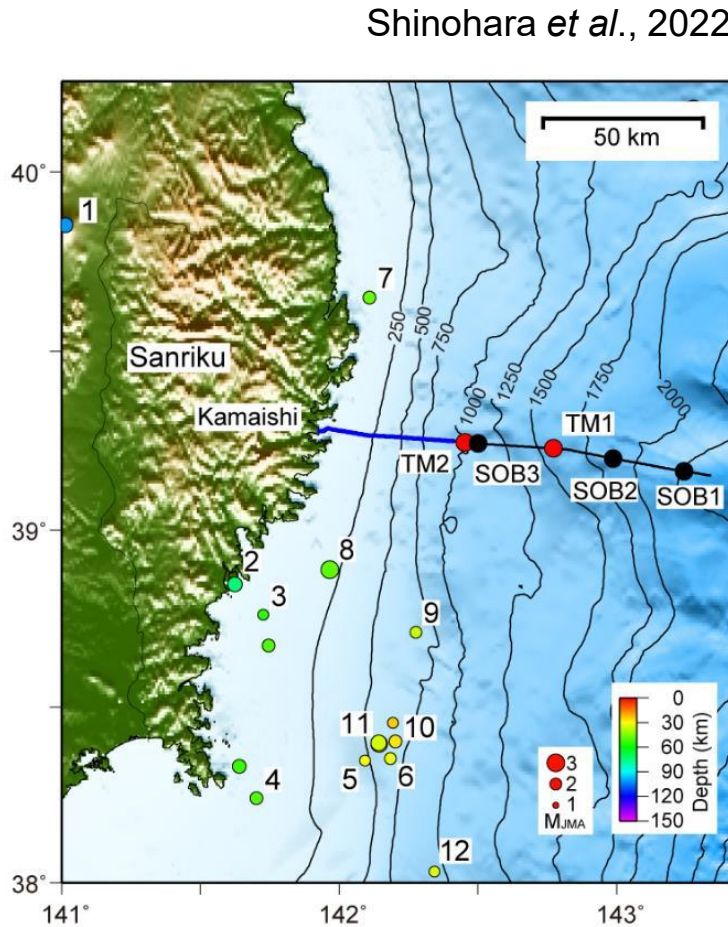
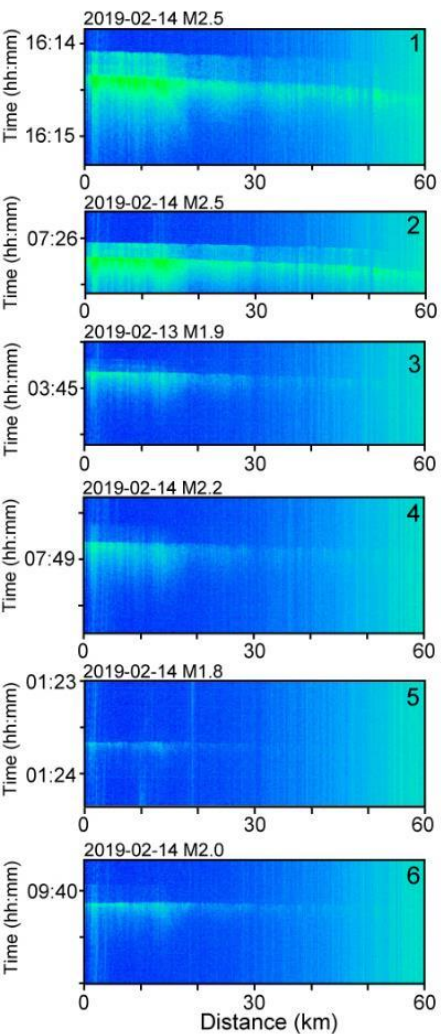
釜石局舎にて、データをwin
フォーマットに変換し、ほぼ
リアルタイムで地震研究所
に伝送実験中



DAS計測による画像データ(三陸沖ケーブル観測システム)

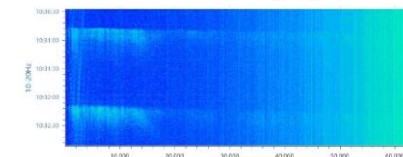
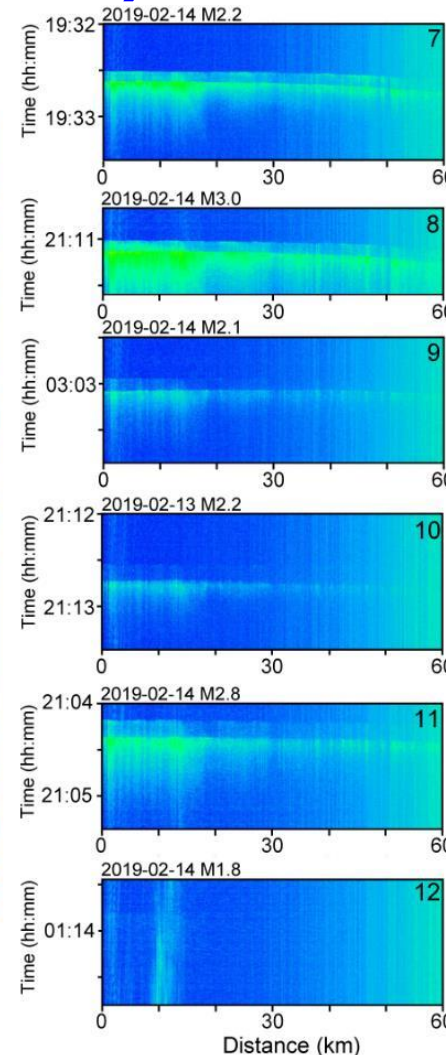


DAS観測の検知能力 (三陸システム)

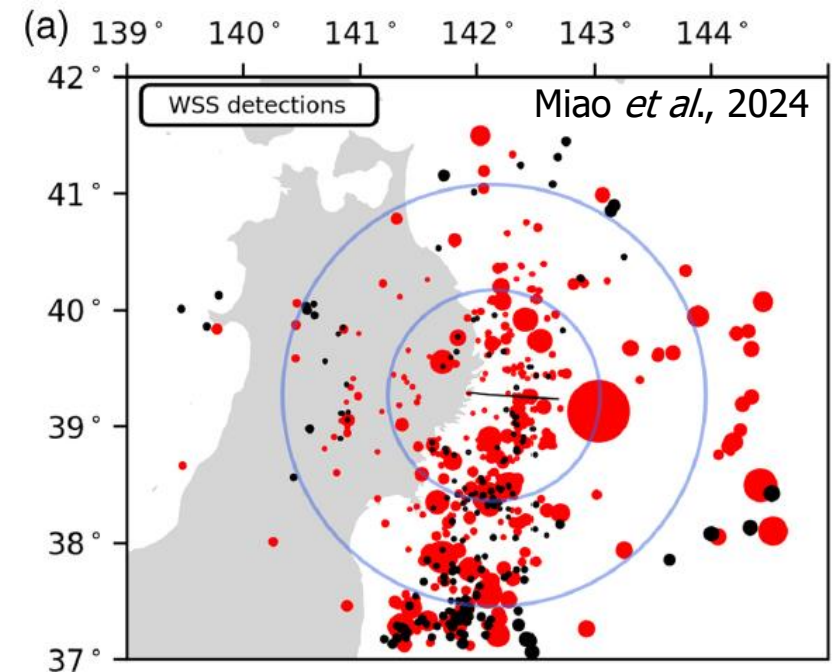


Feb. 2019

- 2日間のDAS観測において、記録と気象庁の震源リストを比較
- 近傍で発生するM1.8以上の地震は、ほぼ確認できる
- 深発地震も記録



日本海北部で発生した深発地震D=490 km, M=3.8



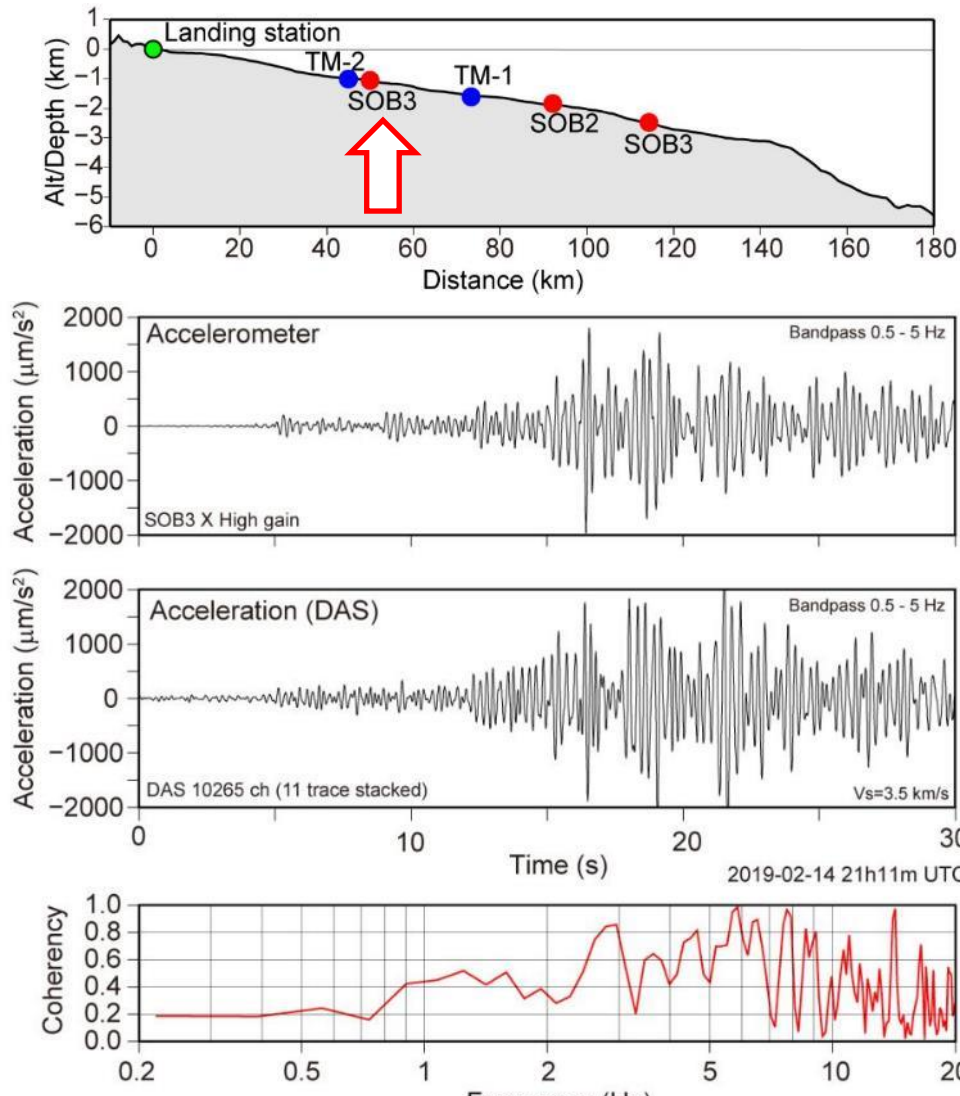
- 12日間のDAS観測において、地震計とDASの波形類似を検索するWaveform Similarity Searchにより検出能力を推定
- 震源決定されていない多数の地震を検出

距離(km)	M<2	2-3	3-4	M>4
0-100	80%	100%	100%	100%
100-200	58%	97%	100%	NA
200-500	34%	68%	86%	100%
500-1000	NA	49%	54%	91%

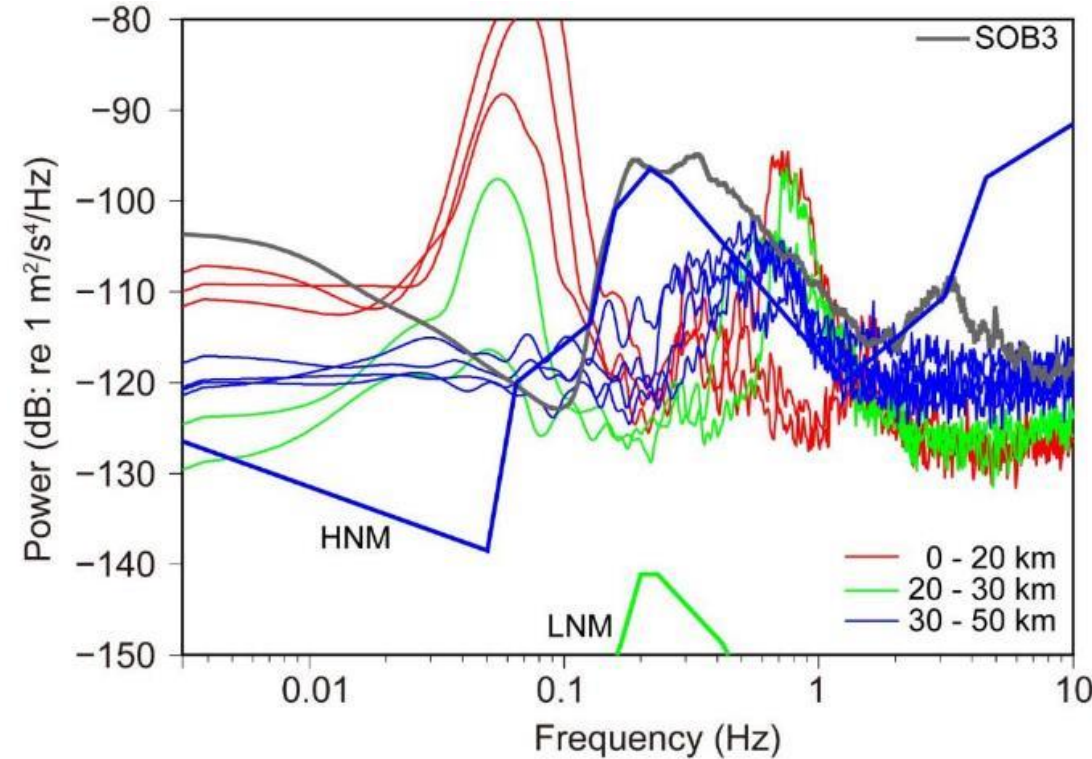
DAS は十分な検知能力を持っている

地震計記録との比較

- 地震計SOB3の水平動成分記録とDAS記録を比較した
- 単純な仮定により加速度に変換したDAS記録と、加速度計記録は類似性が見られる



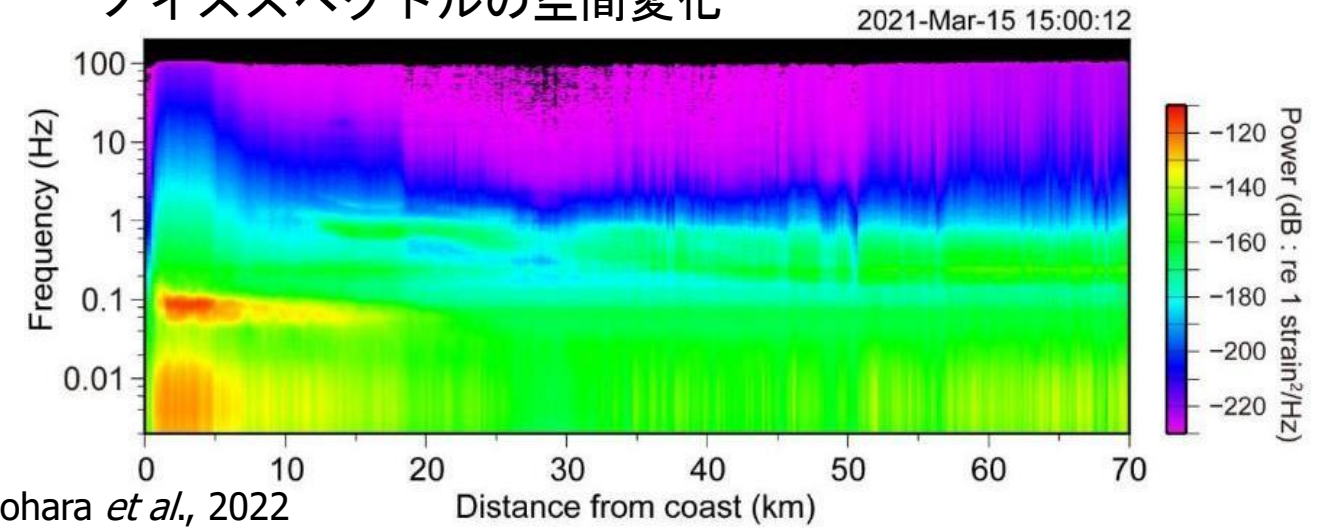
DAS記録の地震ノイズスペクトル



DAS記録のノイズスペクトルは、観測システムに接続されている従来の加速度計によるノイズスペクトルとほぼ同じ

高密度なDAS記録により、海岸から沖合にかけて、ノイズスペクトルの空間変化が捉えられた。

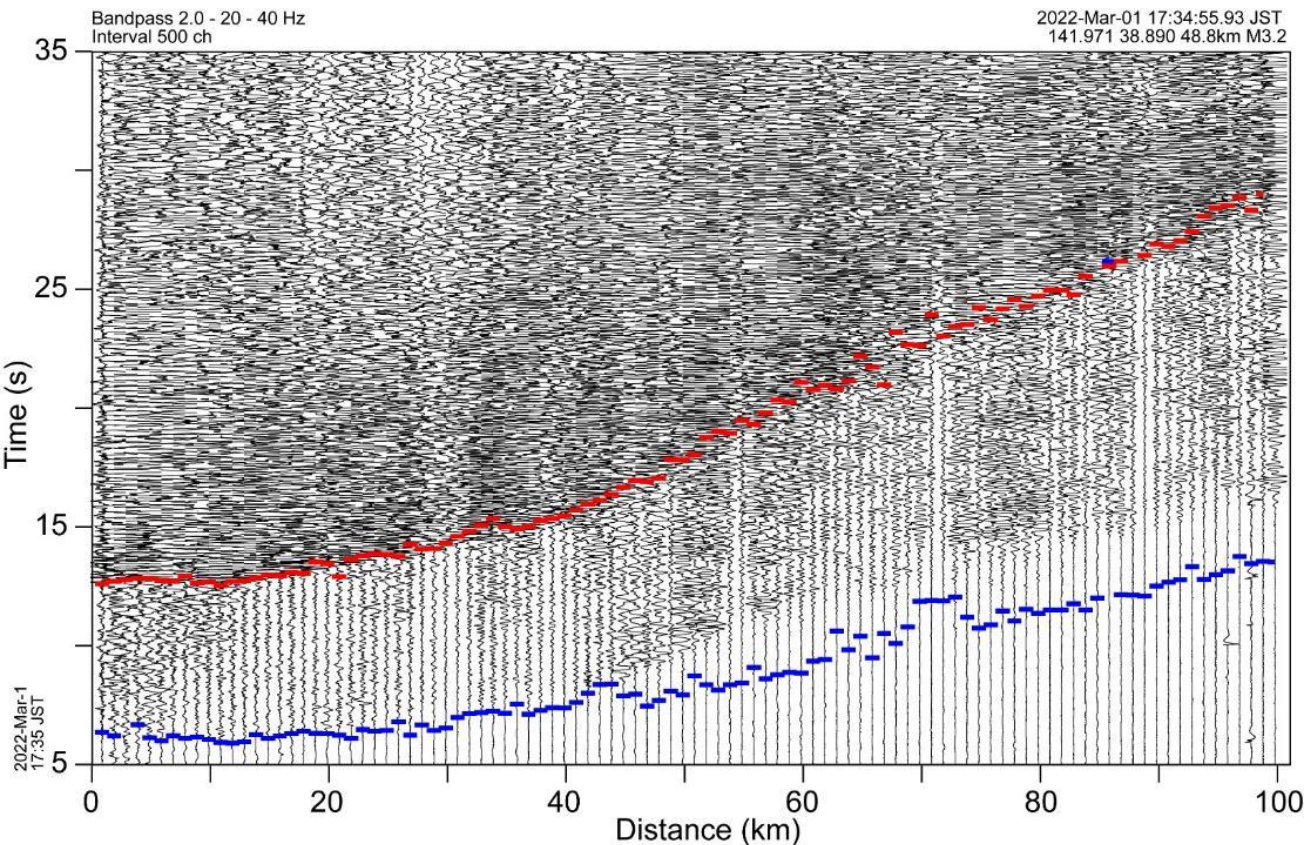
ノイズスペクトルの空間変化



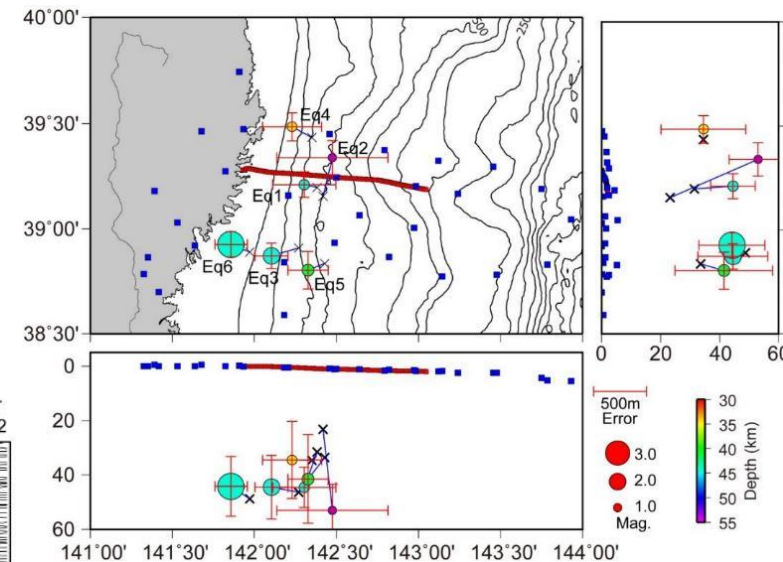
DAS記録による震源決定試行

2022年3月に実施したDAS計測のデータと、周辺の地震観測点データを用いて、震源決定の試行を行った

- 2022年2月28日から3月1日にかけてのデータを利用した
- 観測点は、DAS観測点の他は、既設観測点
- 6個の地震について、100ch毎に、到着時を目視読み取り



- ネットワーク下で発生した6個の地震
- DASデータを含む震源決定では、位置は大きく変わらないが、決定誤差は、およそ半分となった

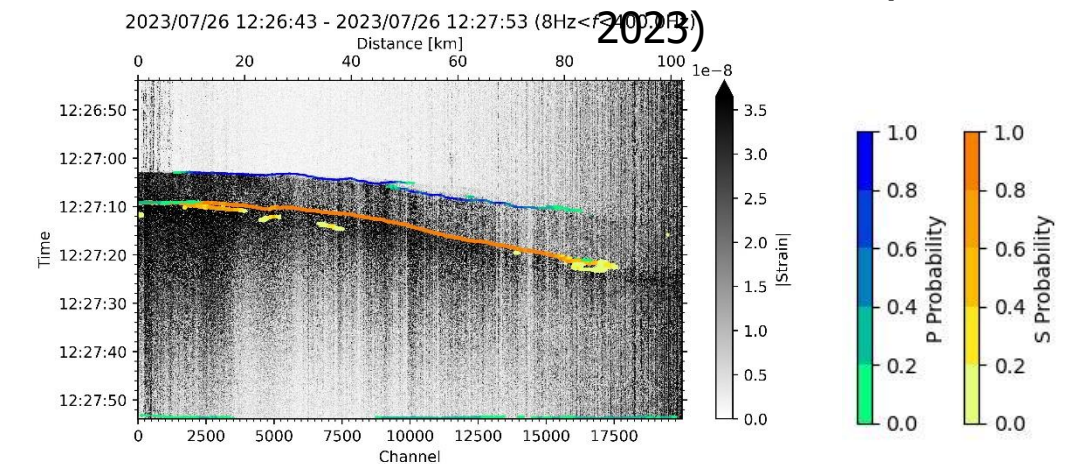


震源決定誤差の平均値

	DAS	no DAS
x(km)	0.49	0.67
y(km)	0.28	0.42
z(km)	0.67	1.36

深層学習による自動読み取りの試行

PhaseNet-DAS (Zhu *et al.*,



- P波直後のPS変換波と推測される後続波が、P波として読み取られることがある
- S波はほぼ整合的な読み取り

DAS記録の振幅評価とマグニチュードの決定

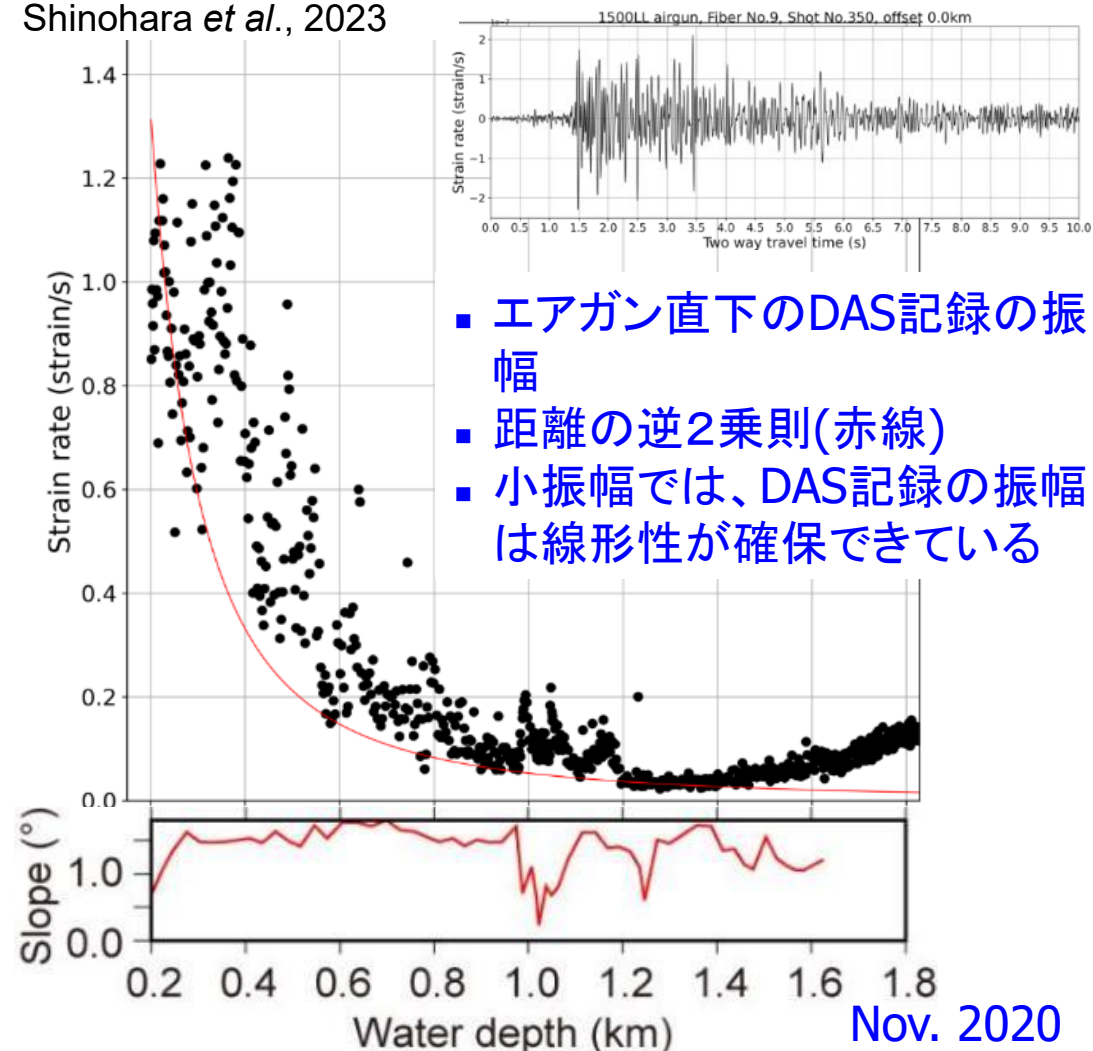
Nov. 2019

DAS記録の振幅特性把握は、地震規模の決定に重要

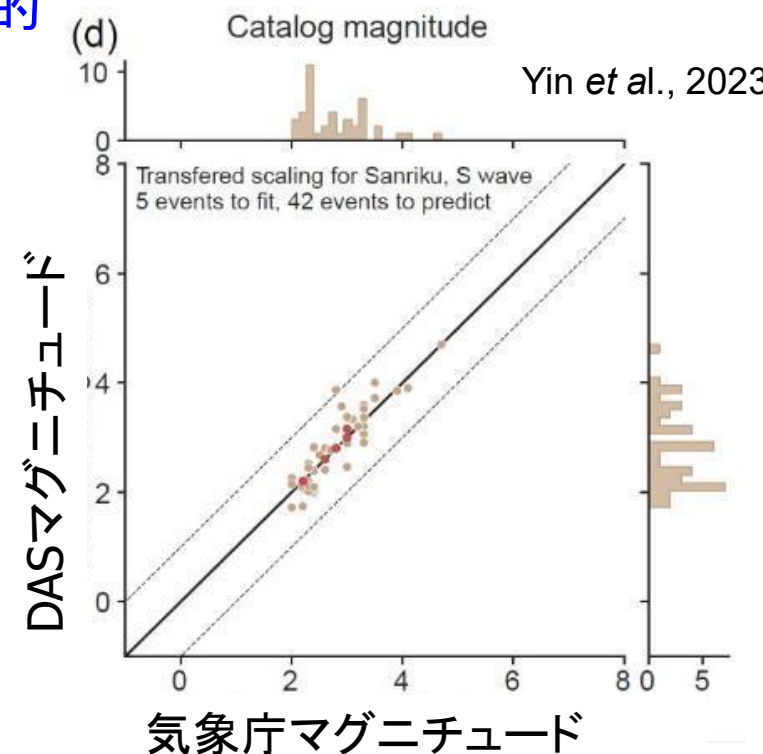
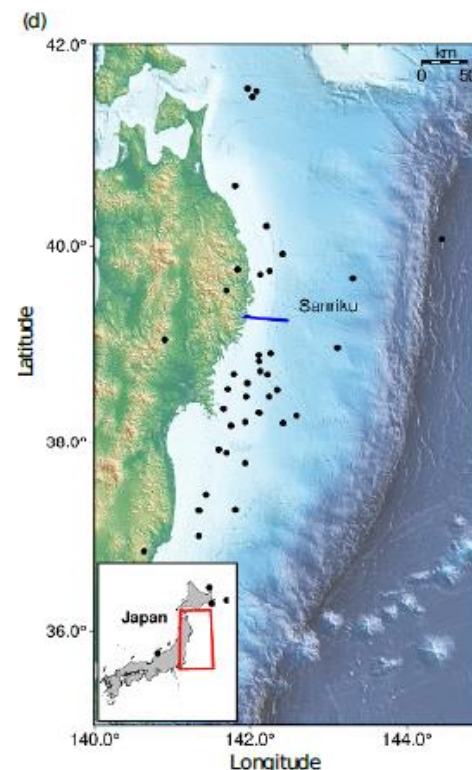
- 制御震源のDAS記録の振幅
- 最大振幅マグニチュード

- DAS記録の最大振幅を用いて、地震のマグニチュードを決定した
- 決定されたマグニチュードは、M2からM4の範囲で、気象庁マグニチュードと調和的

Shinohara *et al.*, 2023



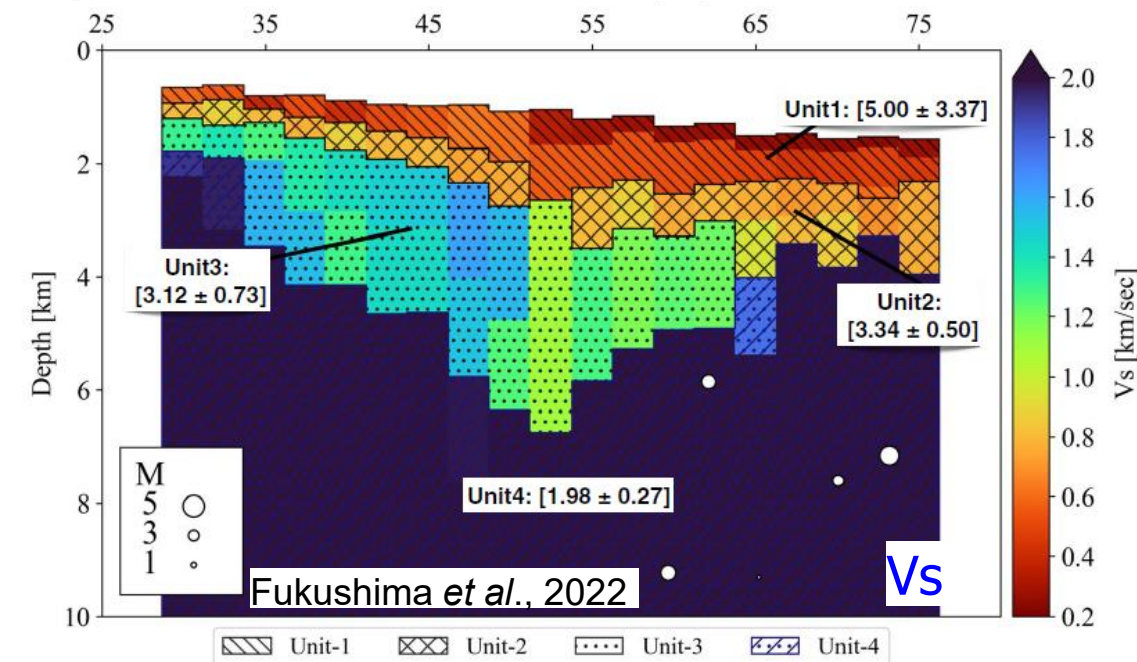
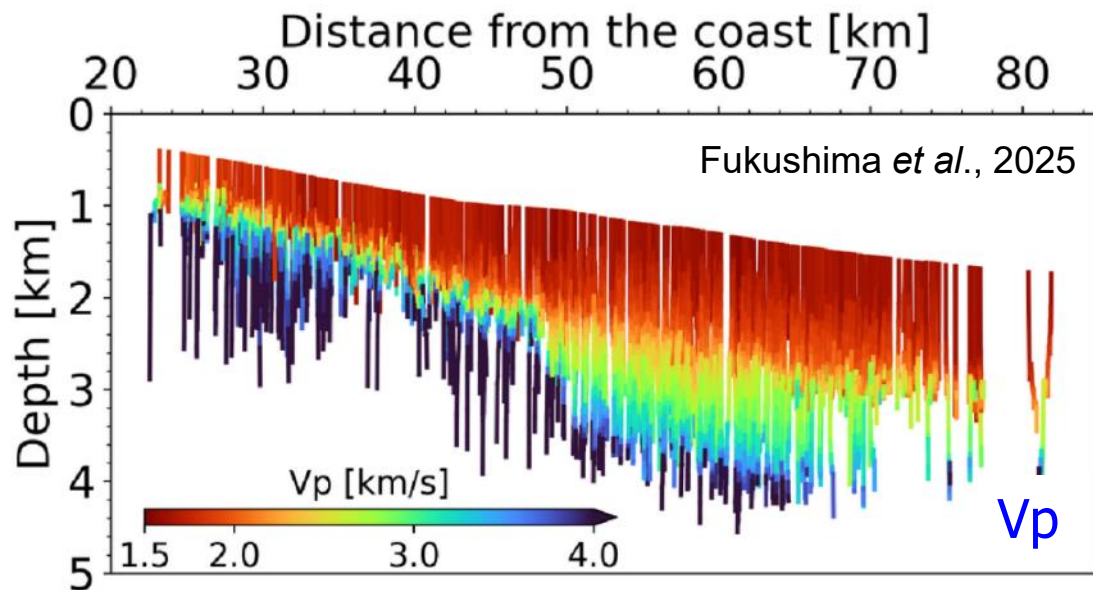
Nov. 2020



津軽海峡でのDAS観測において微小地震のマグニチュードを決定 (Baba *et al.*, 2024)

M4クラスまでの近地地震のマグニチュードをDAS記録の最大振幅から決定可能

制御震源と地震波干渉法によるDAS記録を用いたP波およびS波速度構造



- 制御震源とDAS記録を用いて、 τ -sumインバージョン解析を行い、P波速度構造を求めた。
- τ -sumインバージョン法により、観測点直下の鉛直方向に高分解能な速度構造を得ることができる。水平方向の分解能は、観測点の分布密度に依存している

τ -sumインバージョン法をDASデータに適用する利点

- 多数の一次元構造から、水平方向にも高分解能な構造を得ることができる

- 従来から使われている地震波干渉法は、微動雑音から表面波の波動場を求める
- S波速度は、表面波の分散曲線から求める
- 鉛直方向には、高分解能な構造が得られる
- 水平方向にも分解能数kmの詳細なS波構造を求めることができる
- S波構造を構造探査で求めることは一般に困難である

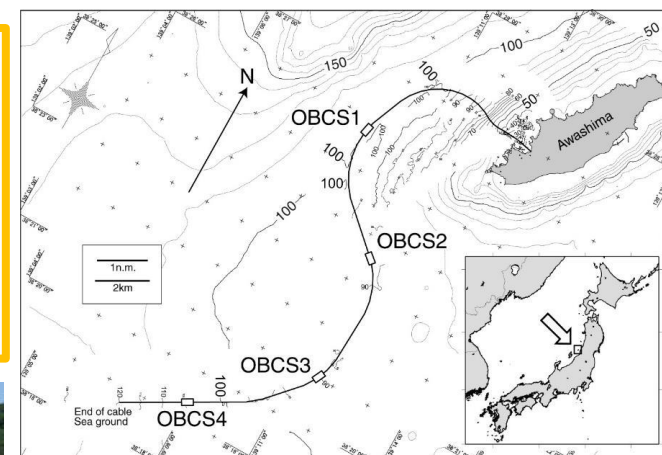
地震波干渉法をDASデータに適用する利点

- 解析に必要なデータの期間が短くてすむ
- 高密度データにより、高分解能な構造を求めることができる

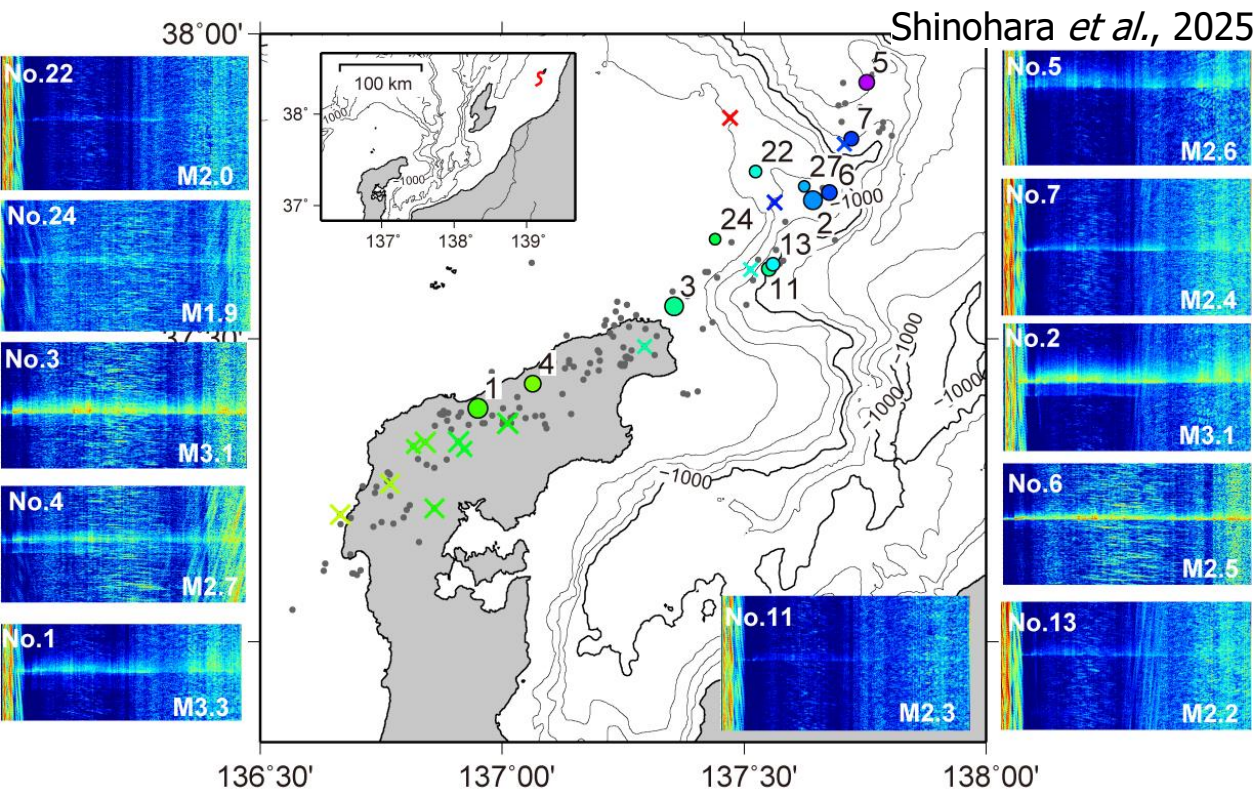
日本海ケーブル観測システムによるDAS観測

Shinohara *et al.*, 2014

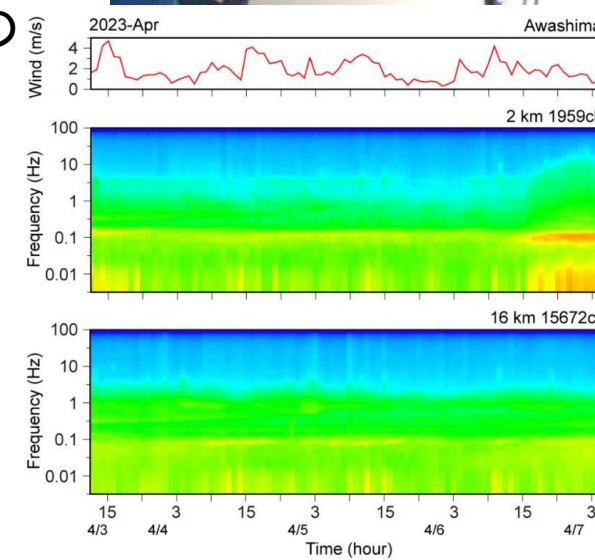
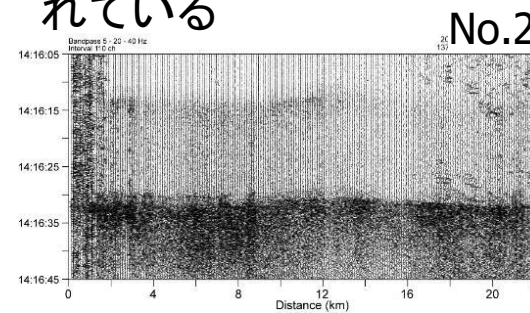
- インターネット技術を利用した最初の海底ケーブル観測システム
- Tight-buffered cableを用いた全長22.5 kmのシステム であり、2010年に設置
- 浅海域に全区間埋設設置されており、現在、地震計を用いた観測は休止
- シングルモードファイバが先端の観測点まで、中継器なしで接続されている
- 全体として、S字の形をしており、2023年から臨時DAS計測を数回実施



- 令和6年能登半島地震(M7.6)が、2024年1月1日に発生し、2月8日から3月16日まで余震DAS観測を実施した
- マグニチュード2.0より大きい余震はほぼ観測された。



- 水深が100m程度の浅海域に設置されているが、海象の影響は比較的小さい。
- P波初動の後に多数の変換波と思われる波群が観測されている



南海トラフ海底地震津波観測網(N-net)とDAS計測

- 南海トラフ西部域にリアルタイム海底ケーブル地震津波観測網(N-net)が2025年に完成した
- N-netは2つのケーブルシステムからなっており、それぞれ18の観測点がある
- In-lineシステムとPlug-inシステムのハイブリッドであり、将来の拡張性も担保されている

2023年に設置された沖合システムを用いて、DAS試験観測を実施

- N-netの陸上局に近い領域の海底ケーブルのファイバを使用
- 串間局からDAS観測を試行した
- DAS観測時に、日向灘で大きな地震(M7.1)が発生した

測定パラメータ

- ゼリー充填海底ケーブル(loose tube cable)
- 観測期間: 2024年、8/1 - 10/10
- 測定全長: 54.8 km
- 発光周波数: 800 Hz
- 時間サンプリング: 200 Hz
- 観測点間隔: 10.21 m
- ゲージ長: 102.1 m



GPS for timing



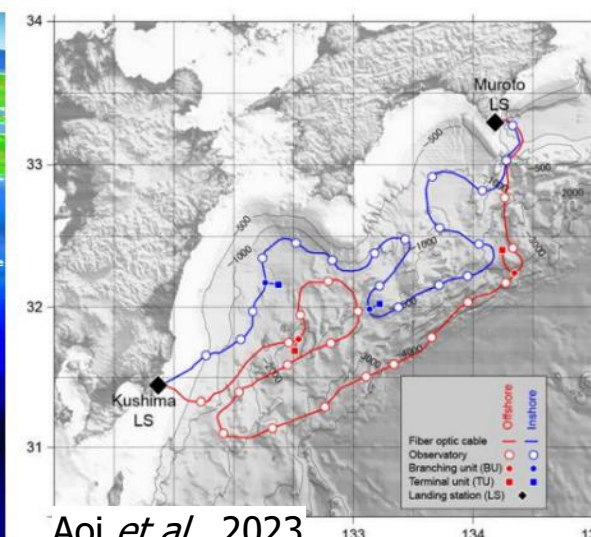
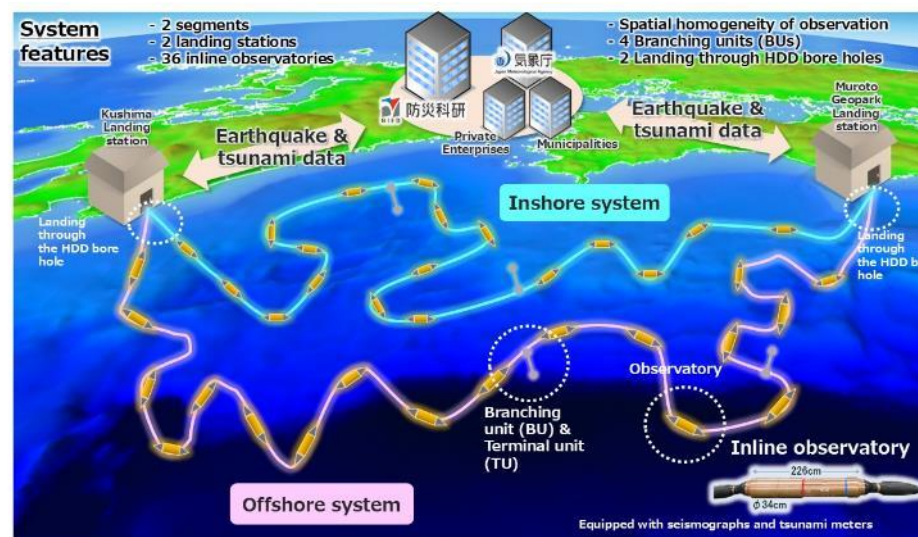
Linux for data recording



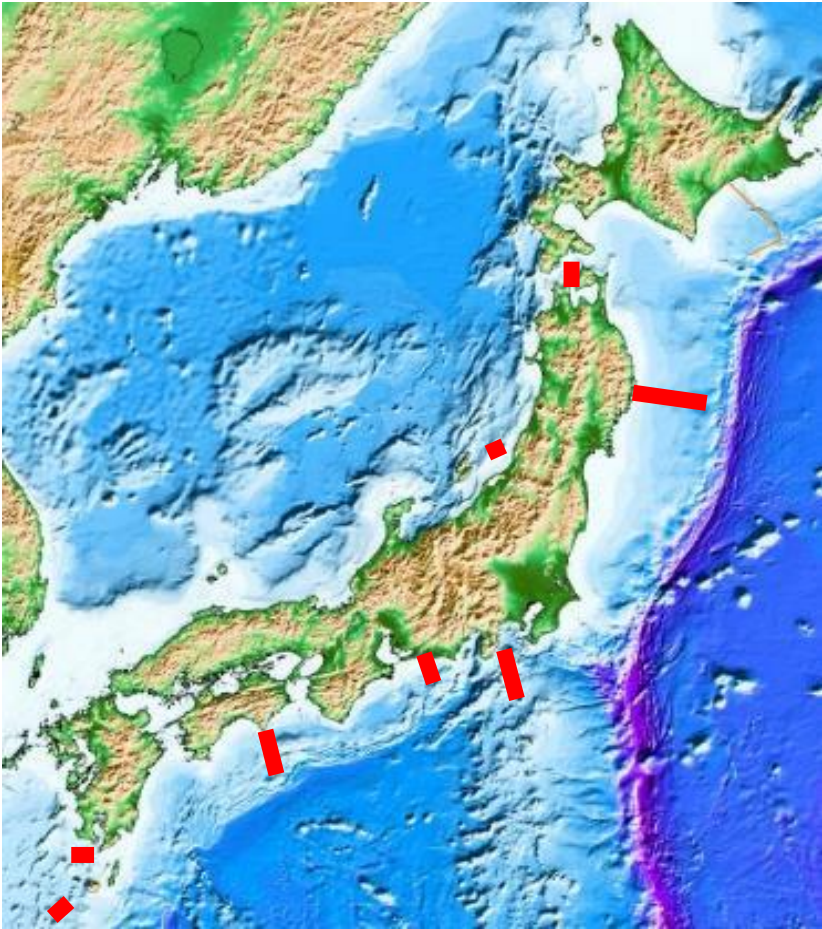
DAS interrogator



Cable terminal



国内外のDAS観測



- 喜界カルデラやトカラ群発地震活動域でも観測が実施されている
- 伊豆諸島域の海底火山の監視への利用

- 津軽海峡 (Baba *et al.*, 2024)
- 民間会社所有の海底ケーブルを用いた観測
 - 津軽海峡下で発生する地震の再決定およびマグニチュード決定

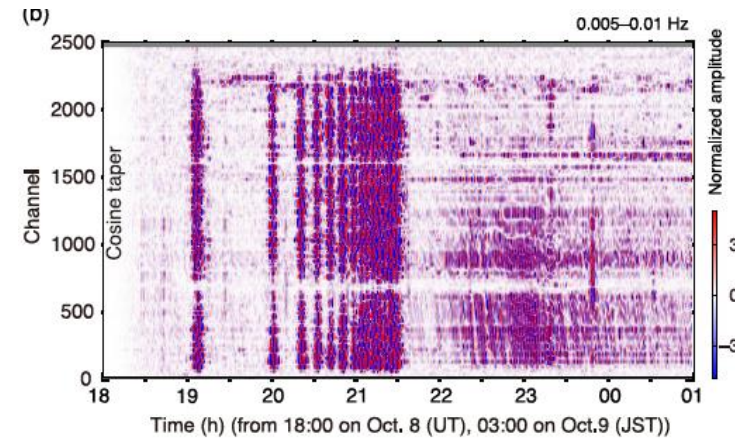
- 南海トラフ室戸岬沖(Tonegawa *et al.*, 2022)
- JAMSTEC所有の室戸ケーブルを用いた観測
 - 観測された雑微動からケーブル下の浅部S波構造を決定

- 南海トラフ室戸岬沖(Tonegawa *et al.*, 2024)
- JAMSTEC所有の室戸ケーブルを用いた観測
 - 鳥島付近で発生した津波の津波の高周波成分をDAS観測により検出

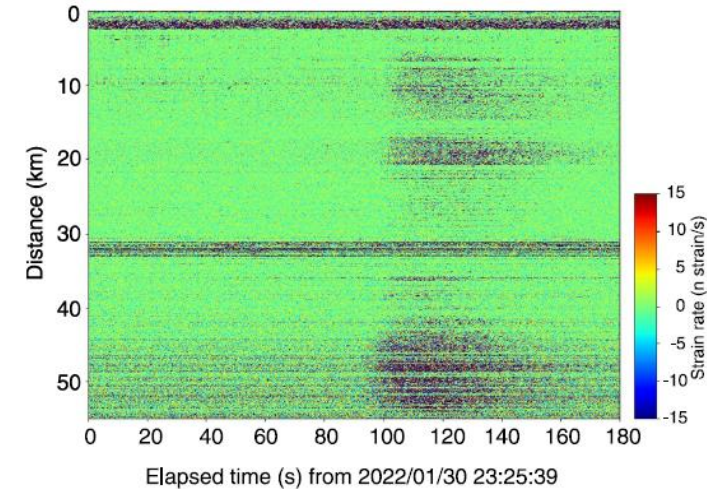
- 南海トラフ室戸岬沖(Baba *et al.*, 2023)
- JAMSTEC所有の室戸ケーブルを用いた観測
 - プレート境界で発生した低周波微動をDAS計測により観測

- トンガ フンガ・トンガ-フンガ・ハアパイ火山(Nakano *et al.*, 2024)
- 通信会社所有の国内通信ケーブル(当時障害中)を用いた観測
- 現在、波長多重技術を使って、データ通信を維持したまま、DAS観測を実施
- STREPS

- トルコ アナトリア断層(Zhang *et al.*, 2025)
- 通信会社所有の国内通信ケーブルを用いた観測
 - マルマラ海での最初のDAS観測で、近地及び遠地地震の記録が得られた
- STREPS



津波(Tonegawa *et al.*, 2024)



低周波微動(Baba *et al.*, 2023)

今後の光ファイバーセンシング海底観測

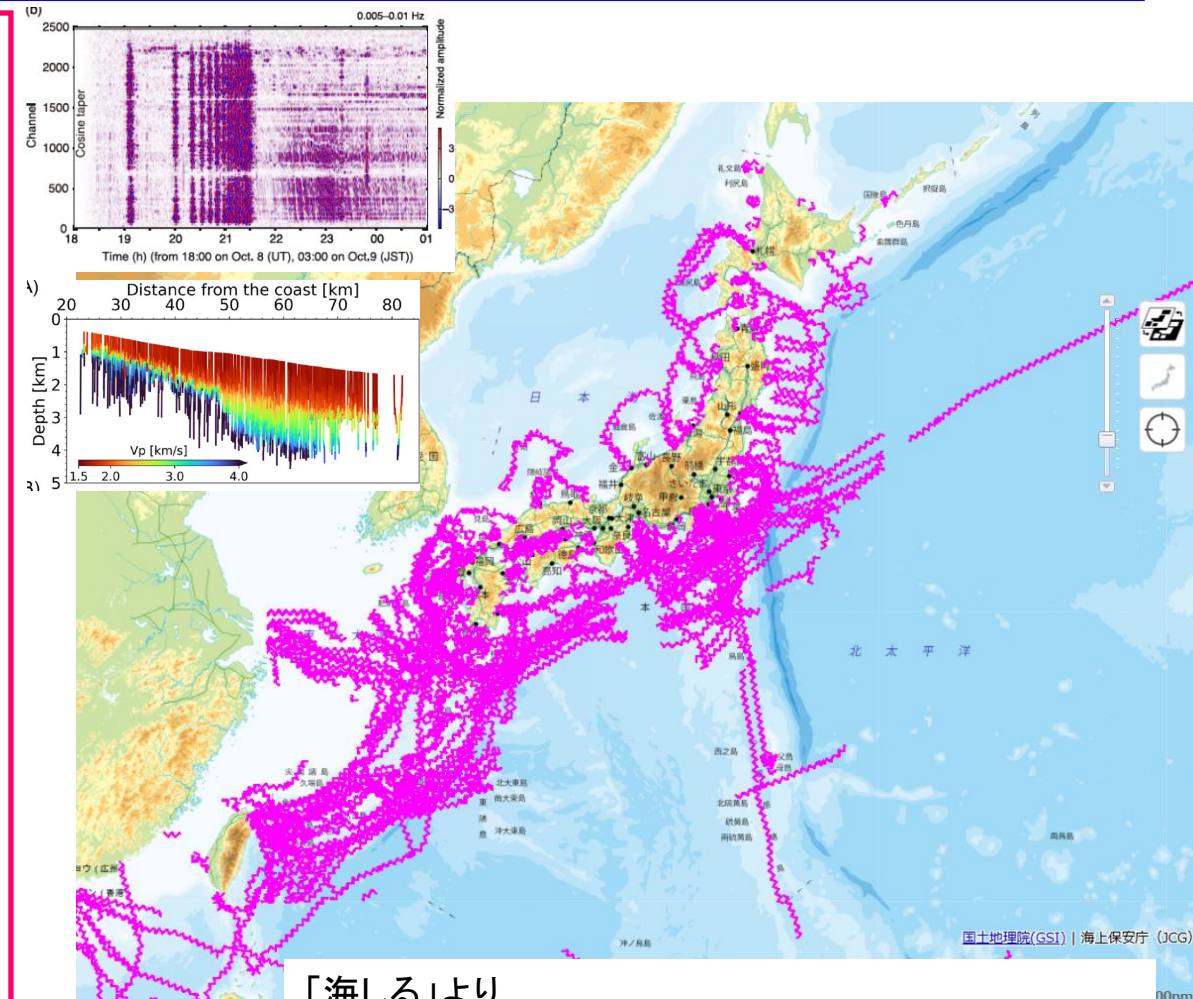
- 分布型音響センシング(DAS)技術は光ファイバー自身を振動センサーとして用いる
- DAS計測を光海底ケーブルに適用することにより、海底地震津波観測が可能
- 海底で数m間隔の空間的超高密度観測データを長距離にわたって取得できることが特長

■ 既設海底ケーブルの利用による低コストでの海底観測の拡大

- 島嶼近傍を含めた現在観測点が少ない海域で地震観測が可能となり、現状把握の高度化が加速
- 波長多重技術を用いた通常の通信と共存する地震津波観測技術により適用可能ケーブルが増加

■ 海底高密度地震津波データによる時空間モニタリングの高度化や新しい現象の把握

- 海域において空間的高密度データから震源や速度構造を高精度で決定できることから、震源位置や構造の時間変化を検出
- 津波伝播のより正確なリアルタイム把握
- まだ知られていない現象の海底高密度歪データによる発見の可能性



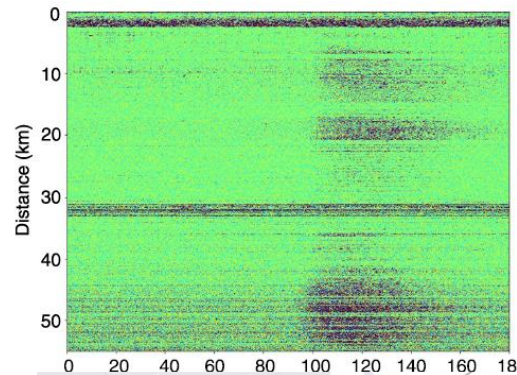
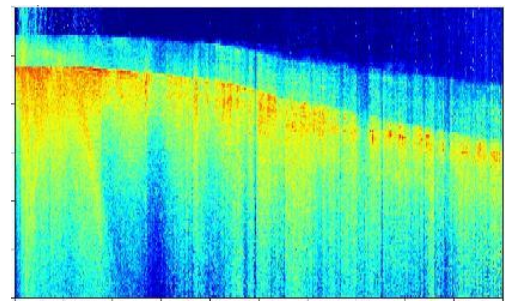
「海しる」より

<https://www.msil.go.jp/msil/htm/main.html?Lang=0> 16

まとめ

- 近年、国内外で光海底ケーブルを用いた光ファイバーセンシング技術、特に分布型音響センシング(DAS)技術による超高密度海底地震観測が行われている。
- DAS観測は、海底ケーブルの種類によらず、十分な感度を有しており、現在の測器ノイズレベルは、通常地震計とほぼ匹敵している。
- 歪をほぼ正確に記録しており、マグニチュード決定など波形を利用した解析を行うことができる。
- 震源や構造の決定では、空間的高密度が大きく貢献して、高分解能な結果が得られる。
- 通常地震だけでなく、高周波津波や低周波微動の観測も可能である。

- 既設の海底ケーブルを利用することで低コストで海底観測拡大
- 海底における時空間モニタリングや新現象の把握の可能性
- 海底地震津波観測により適したシステムおよび解析手法の技術開発



<https://www.submarinecablemap.com/>

