

DAS及びスピーカー型振源を用いた 地下モニタリング実証結果

辻 健

東京大学大学院工学系研究科

Onshore



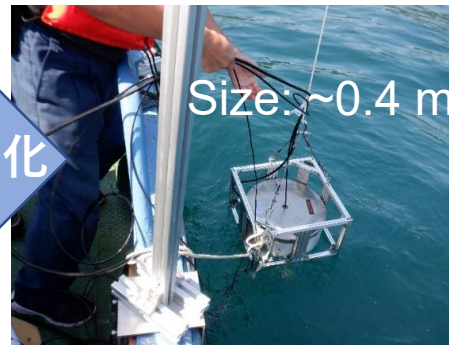
小型化



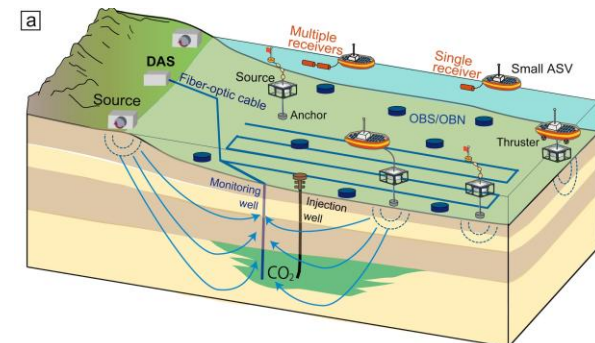
Offshore



小型化



無人探査船による自動化

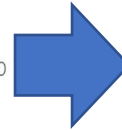
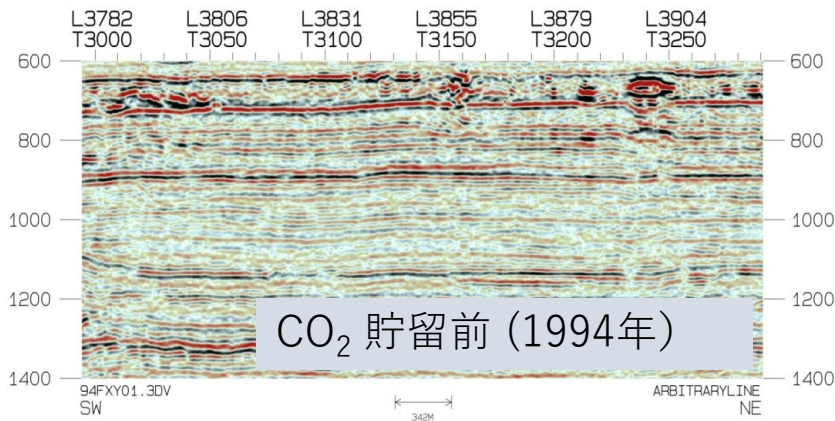


これまでの人工震源を用いた モニタリング方法

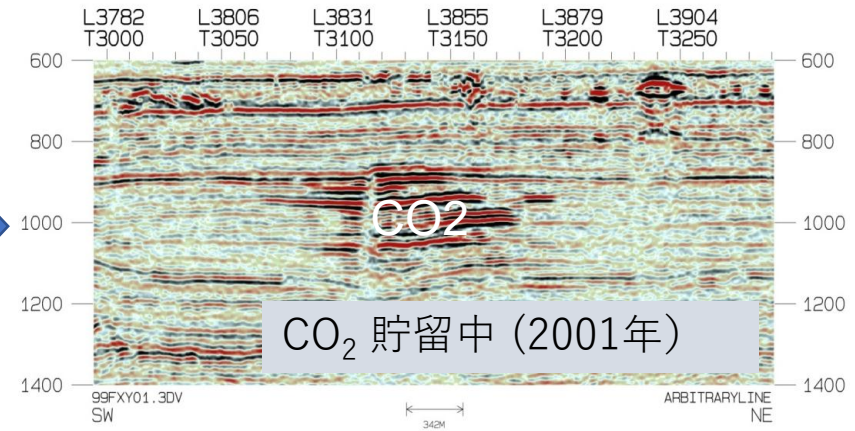
一般的なモニタリング方法：
繰り返し地震探査



深度



Sleipner CCS project (Arts et al. 2008)



非常に有効な手法であるが、次の課題も

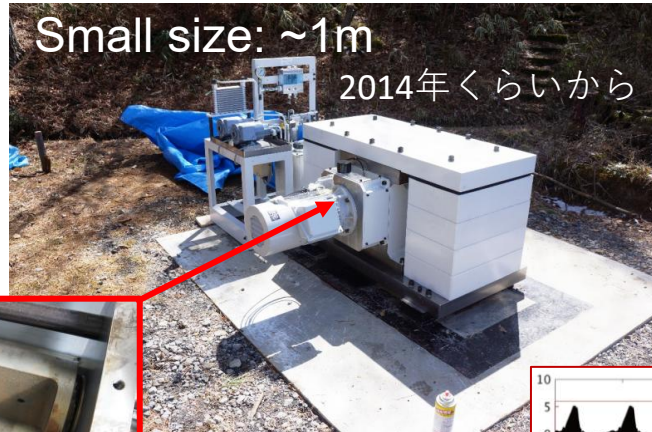
- 高価（1回の探査に億円単位の費用）
- 不連続的に実施（急な漏洩に対応できない可能性）

本研究では、
連続的にモニタリングできる手法を開発

- 低コスト
- 連続的

連続モニタリングシステム

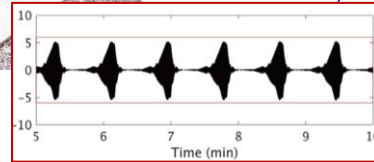
小型連続震源装置



Small size: ~1m

2014年くらいから

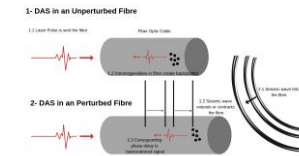
CO₂貯留層を
伝わる振動



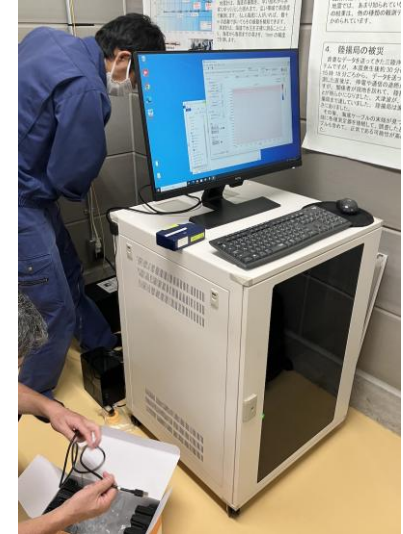
発振波形

オモリ (~10 kg)を回転
8000N at 20Hz

光ファイバー型地震計
Distributed Acoustic Sensing (DAS)



光ファイバー
ケーブル



我々が開発したDAS
計測装置

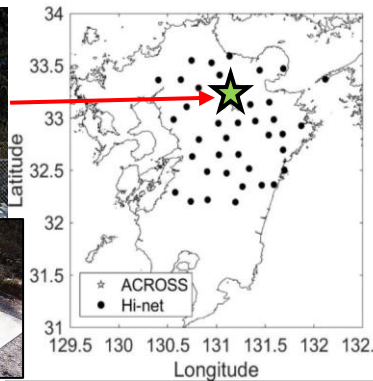
- 小さいサイズであるが、連続的に発振
- 長期間発振したシグナルを足し合わせることで、S/Nを向上させ、長い距離を信号が伝播

- 光ファイバーケーブル自体を地震計する
- 長大で超密な地震計アレイ
 - ・ 本研究では60 kmのケーブルに10m間隔に地震計が並ぶのと同等のデータを取得
 - ・ 地震計6000個に相当

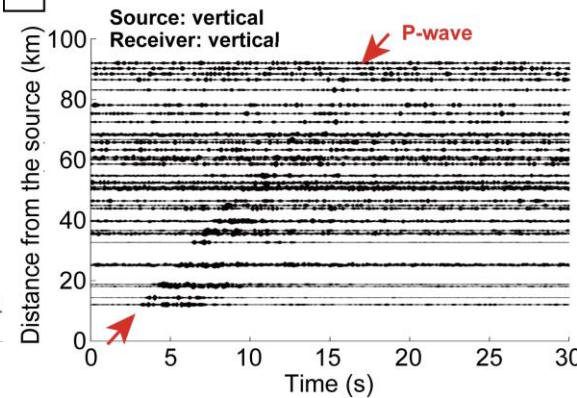
小型連続震源装置からの信号伝達（水平伝達距離80km）

九州大学・九重地熱
ステーション

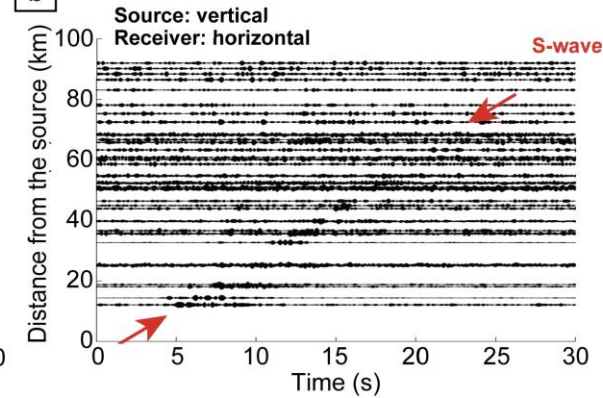
一般的な地震計を利用



a Hi-net seismometers



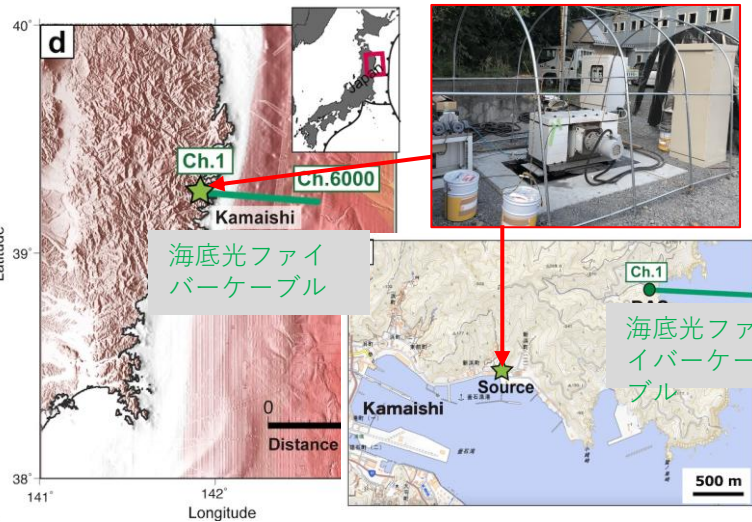
b



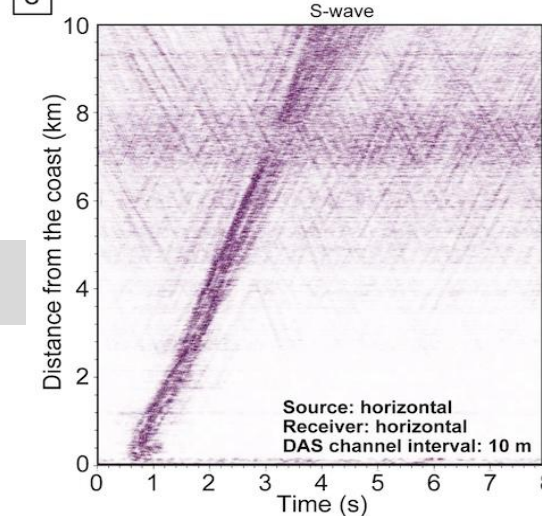
Tsuji et al., 2021 Sci Rept.

東京大学・釜石観測所

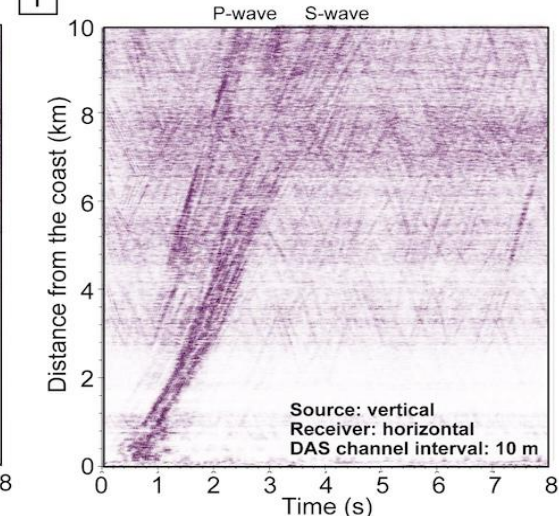
海底光ファイバー（DAS）を利用



e DAS for seafloor cable



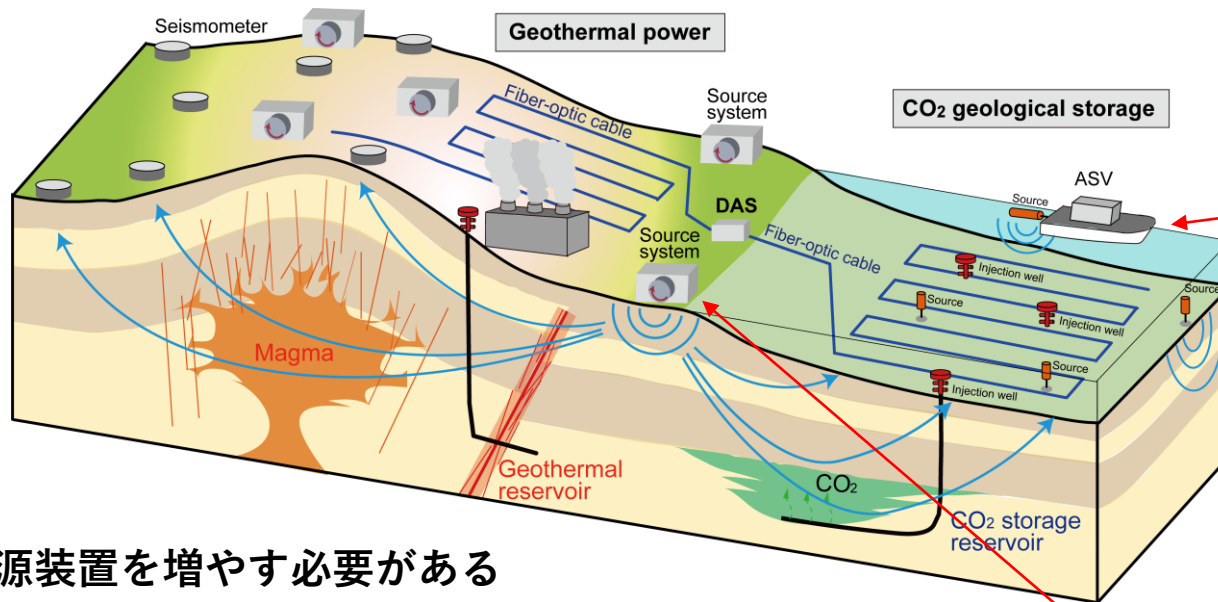
f



1.5ヶ月間のデータの足し合わせることで、10km以上、海底光ファイバーケーブルに信号が伝播

➤ 安価に海底下の貯留層のモニタリングが可能

しかし、CCSに向けた空間解像度をもっと高くしたい！



無人探査船の利用



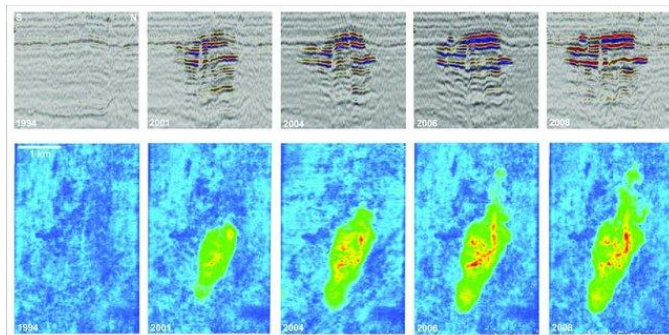
海域型（スピーカー）小型震源装置
環境配慮型（低エネルギー）

震源装置を増やす必要がある

➤ 海域・陸域で利用できる小型震源装置を開発

➤ 陸域：100個近い震源装置を設置し、多点で発振

➤ 海域：無人探査船に震源装置を搭載し、多点で発振



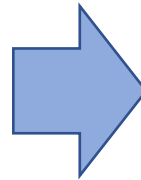
時間解像度に加えて、空間解像度の向上



陸域型小型震源装置

陸域小型震源装置

Portable Active Seismic Source (PASS)

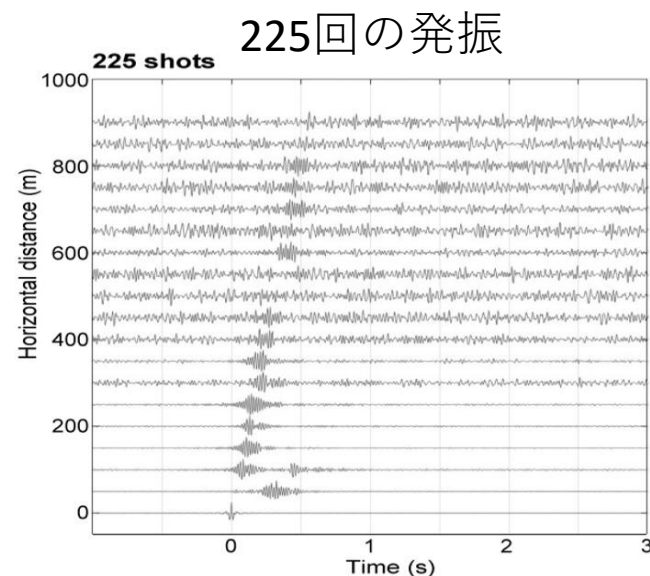
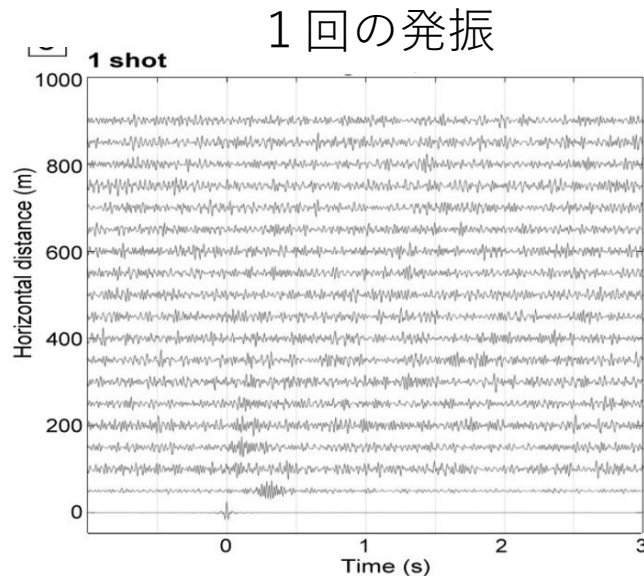


Downsize



Tsuji et al., 2021 Sci Rept
Doi: [10.1038/s41598-021-97881-5](https://doi.org/10.1038/s41598-021-97881-5)

Tsuji et al., 2023 SRL
Doi: [10.1785/0220220049](https://doi.org/10.1785/0220220049)



PASSで発振 DASで受振

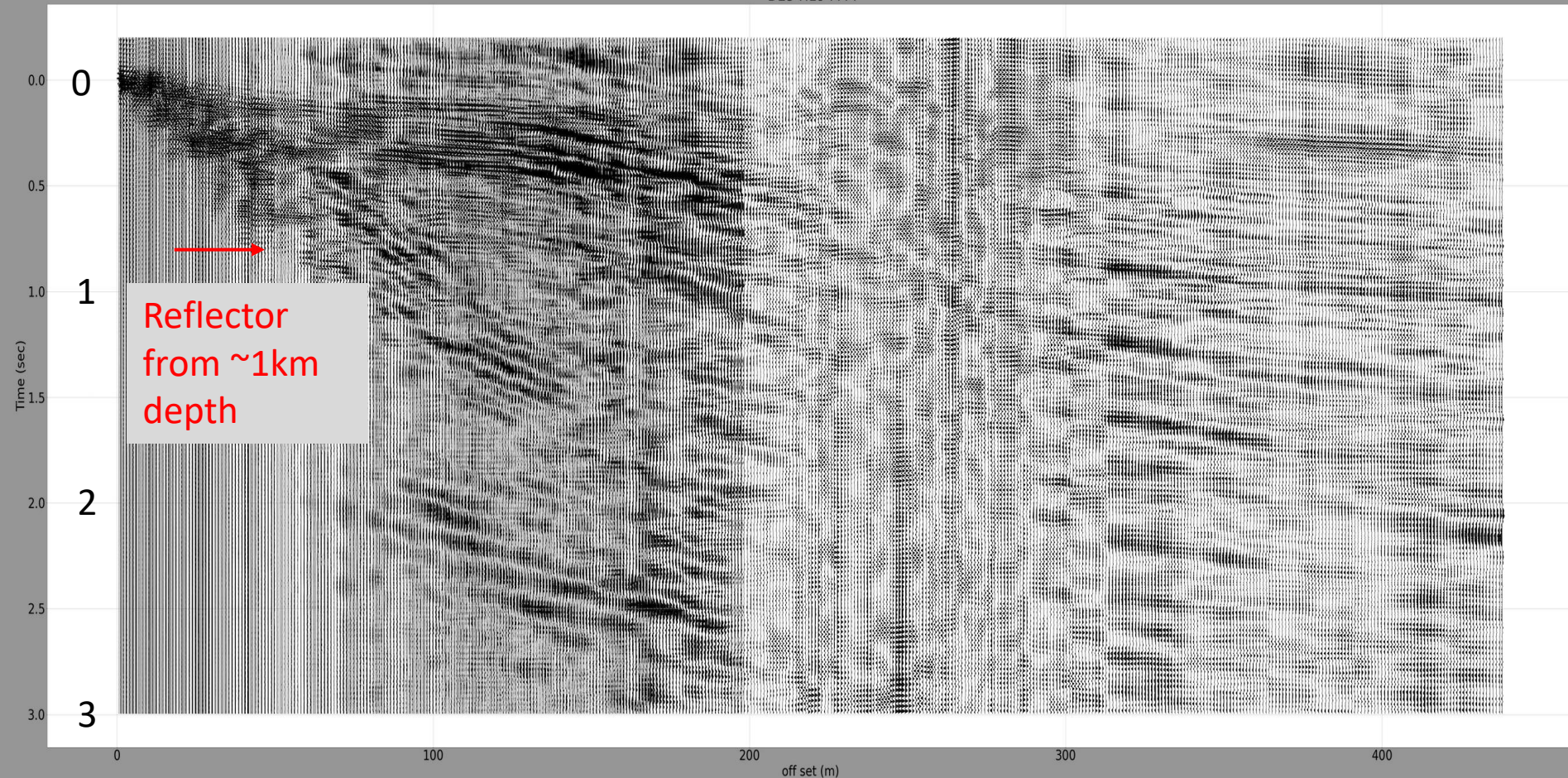
深度 1 km付近からの反射波
も確認



Use PASS (300 N)



TF with 295 shots stacked for
(Jogmec_DAS)
without BP filter using Correlate
D25 H19 M44

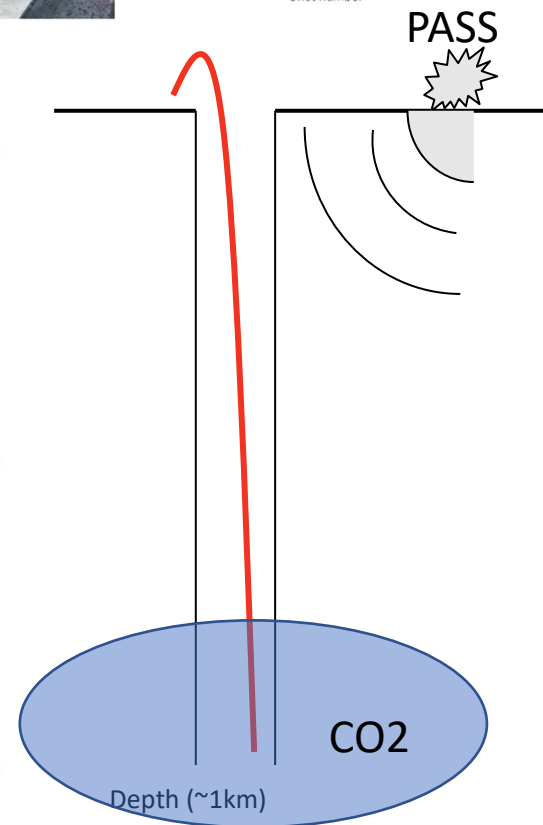
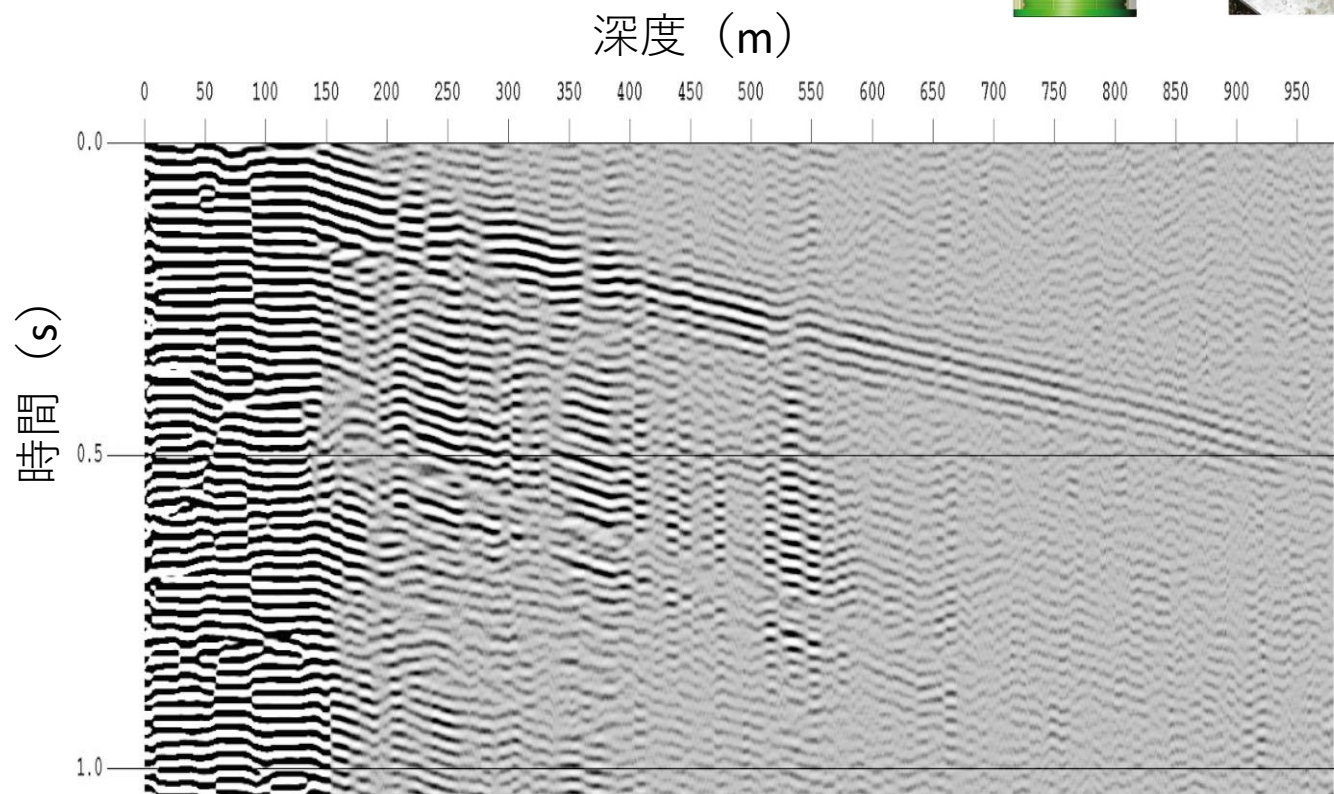
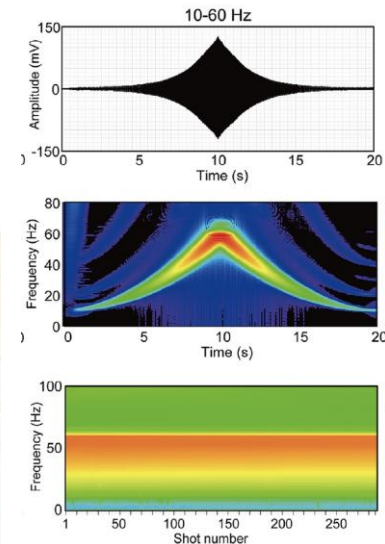
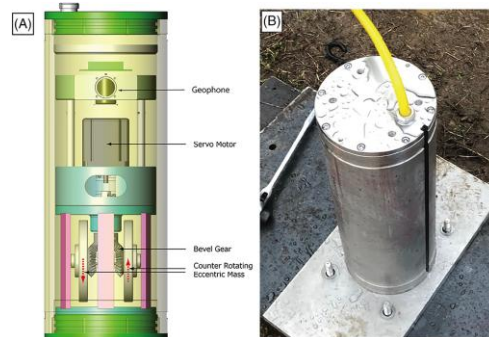


庄内平野のフィールドでの試験

光ファイバケーブルを1km孔井に挿入し、PASSのモニタリング信号をDASで記録

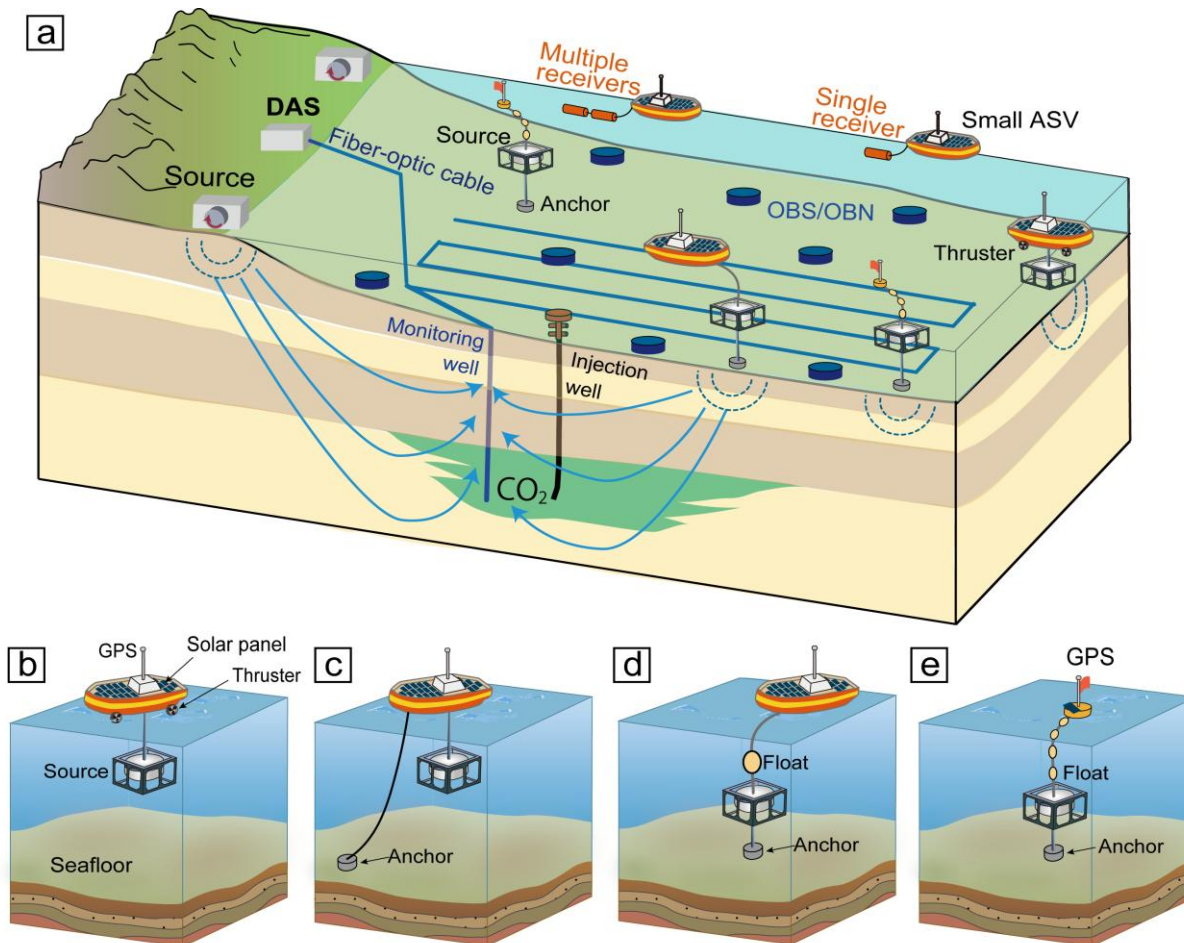
- 深度1 kmまで信号が伝播していることを確認
- 圧入井周辺をモニタリングできる

サーボ型モータ利用



海域での小型震源装置

- 無人探査船に小型震源装置を搭載し、光ファイバー上でモニタリング信号を発振することで、連続的に反射断面図を得る
- 震源装置は環境に配慮して小型化し、同じ箇所を複数回発振することで、S/Nの向上を目指す



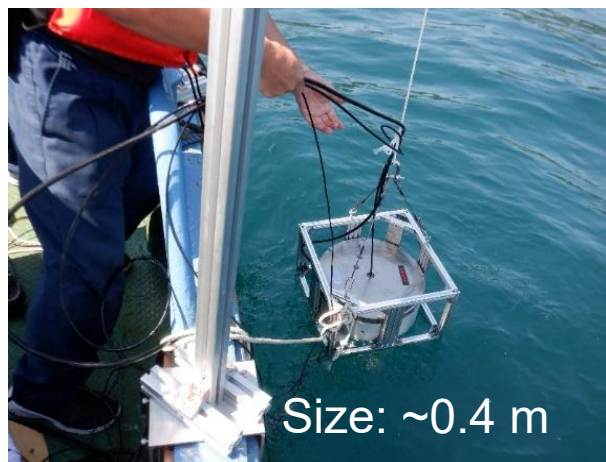
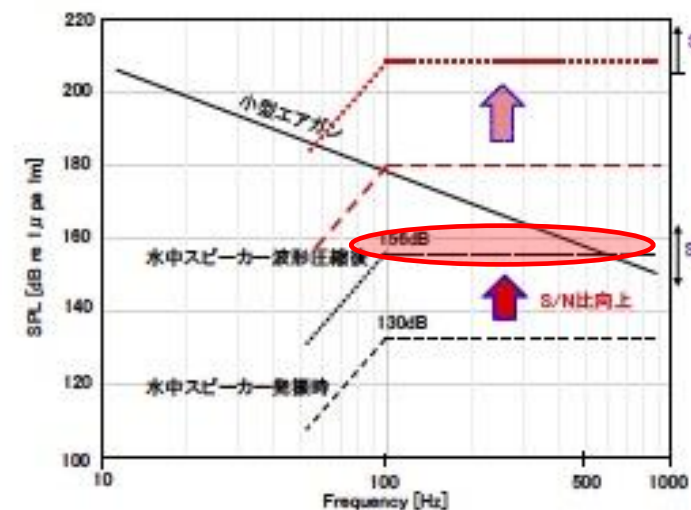
無人探査船の利用



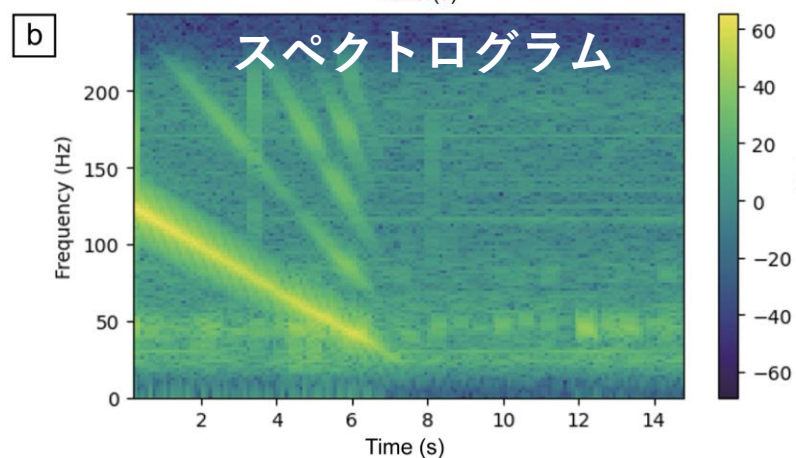
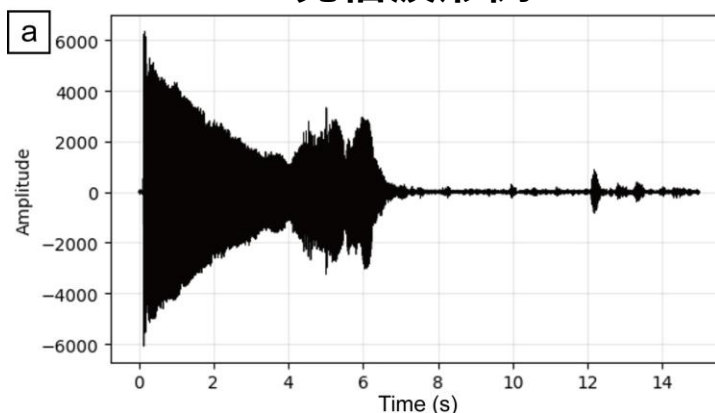
海域型小型震源装置
環境配慮型（低エネルギー）

海域型小型震源装置の開発

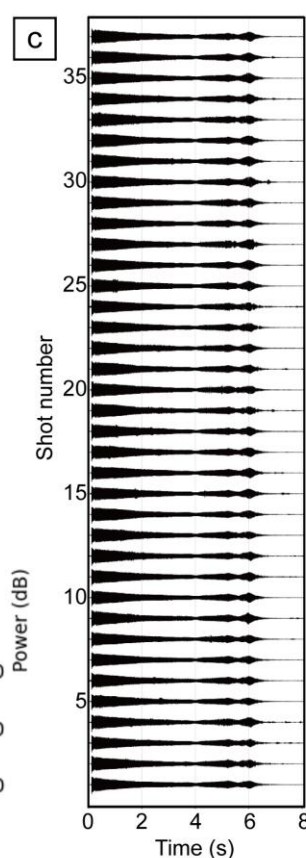
- 日本でのCCSサイトは、海域が一般的である
- 発信を繰り返し、重合することで、貯留層に信号が伝達する能力を持つ震源装置の設計・製作



発信波形例



繰り返し発信



海域小型震源の性能評価

柏崎フィールドのエアガンピットを利用して、エアガンと水中スピーカーの振幅を比較し、スピーカーの有効性・優位性を調べた

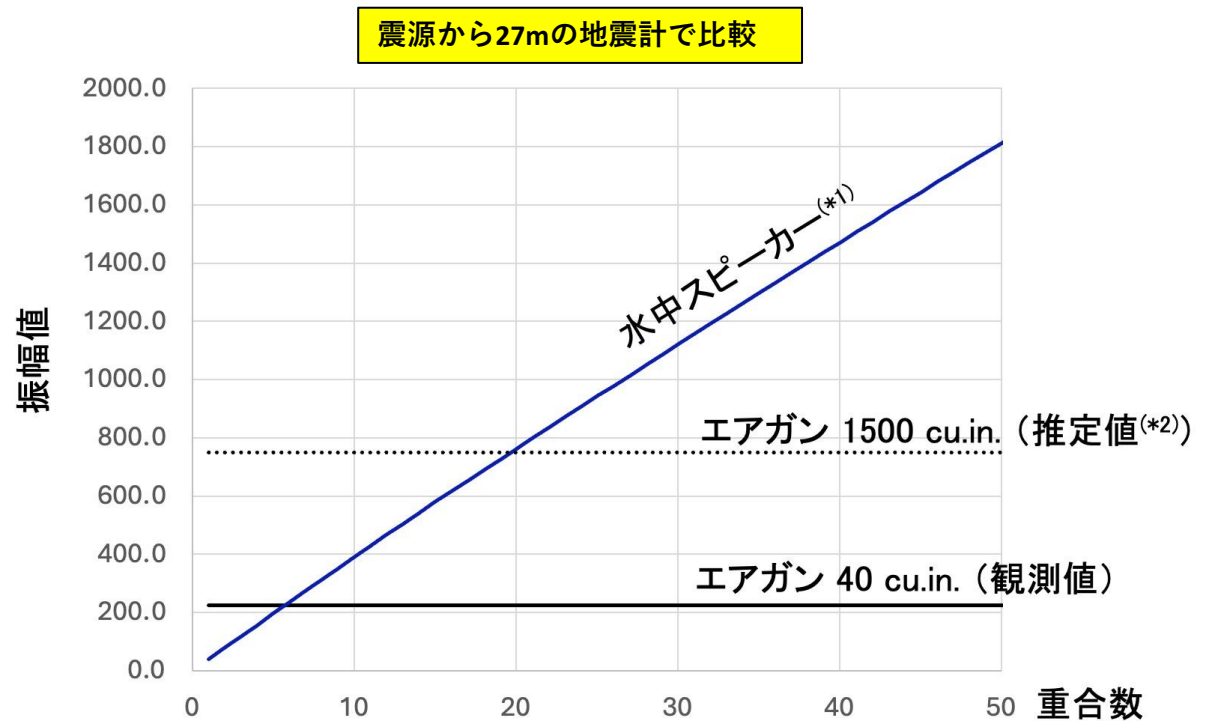
- 4～7回の重合で、40 cu.in.エアガンと同等の振幅、13～24回の重合で1500 cu.in.と同等の振幅が得られる



VS



海域小型震源
(水中スピーカー)



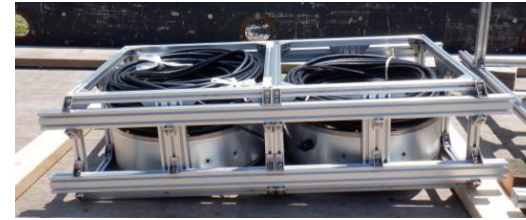
台湾のCCS予定サイトでの実証試験

場所：台湾・桃園沖

実施時期：2025年8月12日（1日）

探査機器

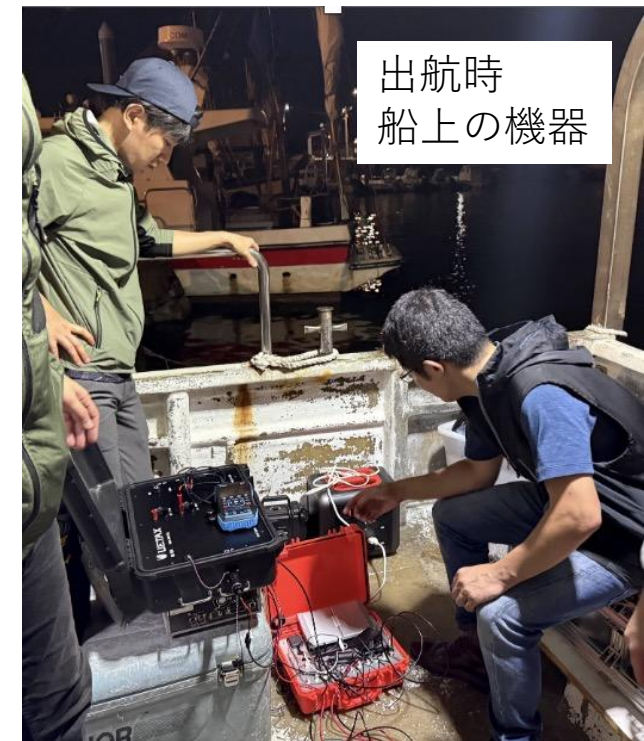
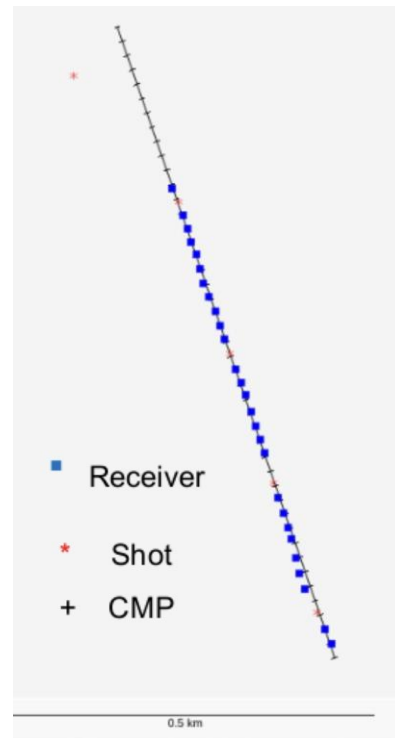
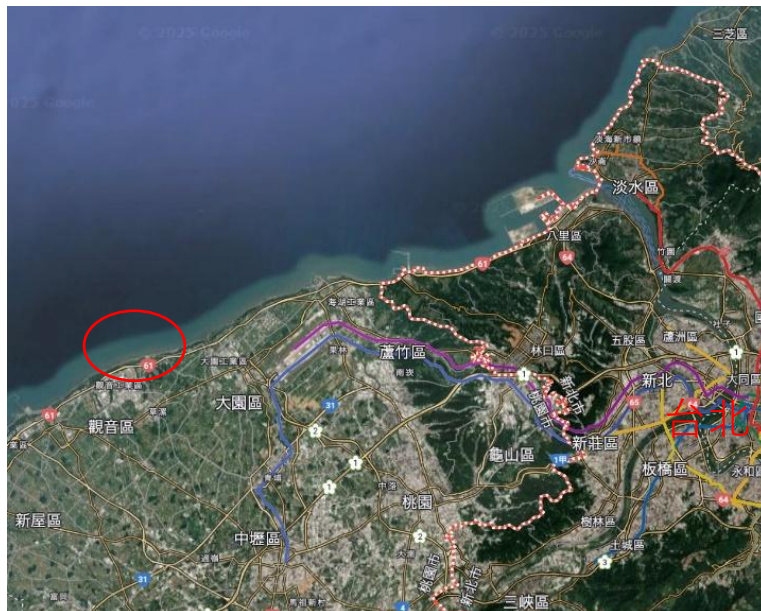
- 震源：震源装置2台を同時発振、5点で発振
- 地震計：海底地震計34台



利用した震源装置



海底地震計

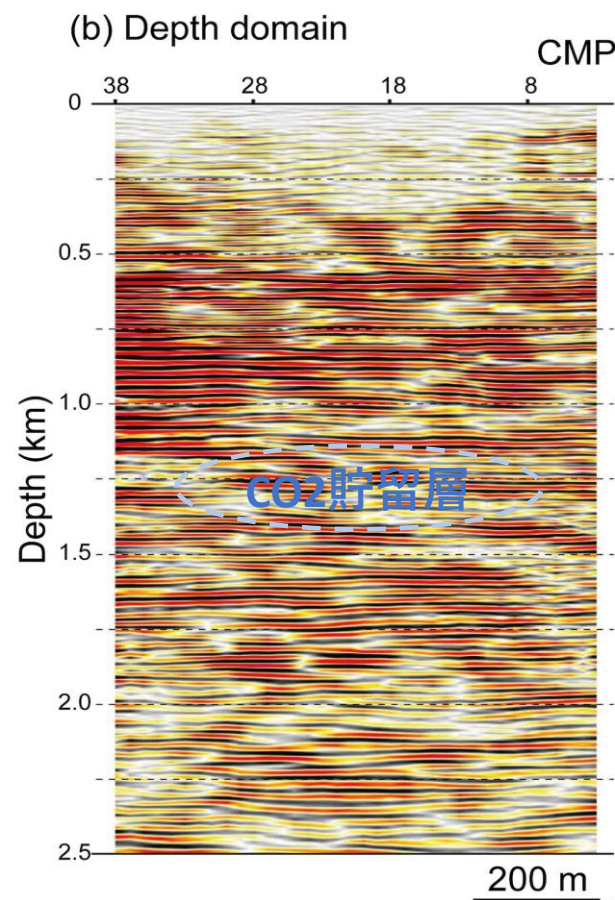
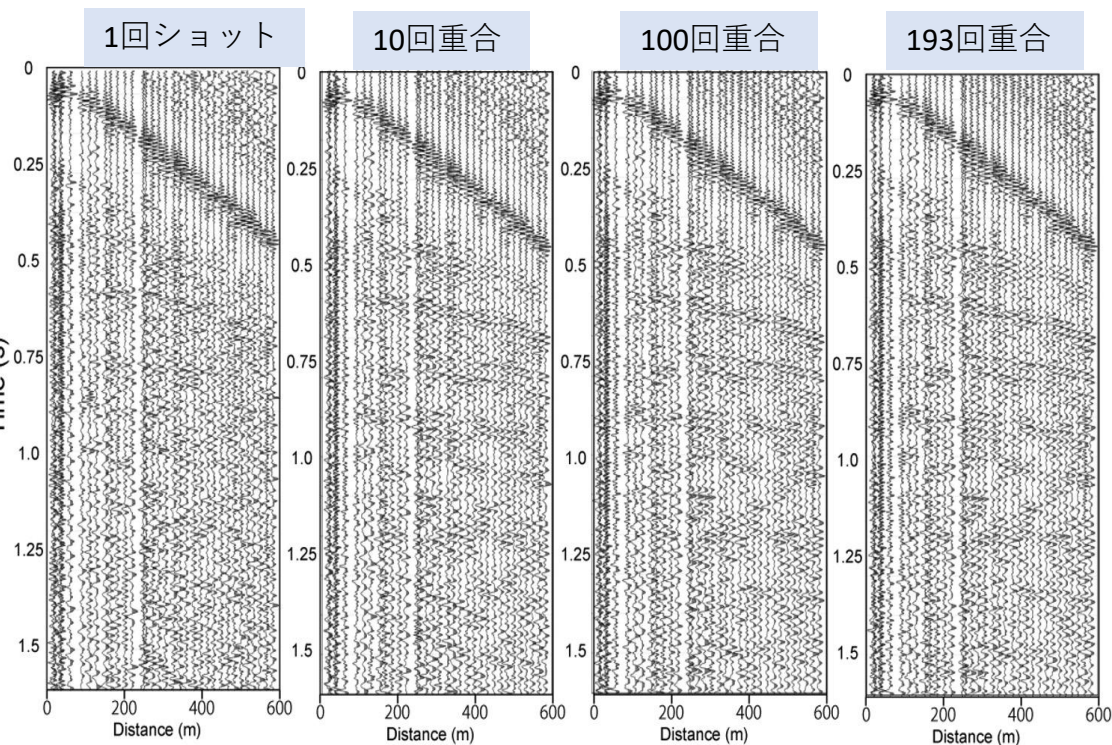


出航時
船上の機器

台湾のCCS予定サイトでの実証試験

- 100回程度重合すれば、今回のCCSフィールドの環境では貯留層のモニタリングには十分である
 - 一点あたり25分（=100回x15秒）程度の発信で十分

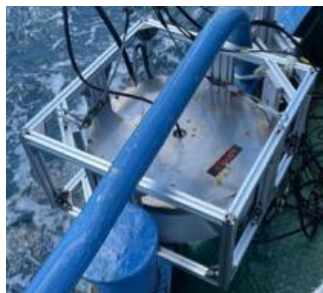
- データ解析の結果、小型海域震源装置による5点での発信、地震計34台という限られた装置であるにも関わらず、深度2 km程度までイメージング（モニタリング）できた



海域PASS+DASの実証試験（釜石沖）

- 海底に設置した光ファイバの上で、開発した小型震源装置でモニタリング信号を発振し、信号の伝達距離を評価
 - 海底下からの反射イベントを検出。堆積物の下に固結した地層（釜石の探査地域では約100～300m以深に分布）があり、それより深部の信号の伝達評価は困難であるが、信号が水平距離1.5km以上伝達（海底下1000m伝播）

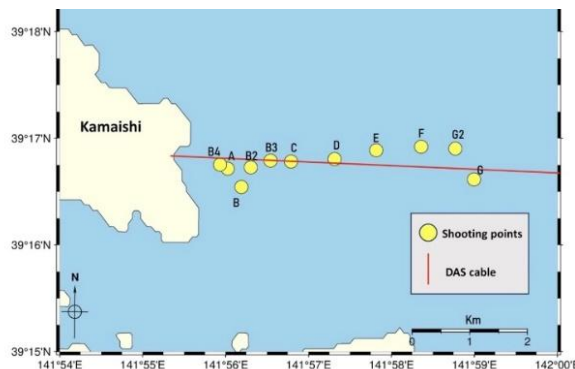
➤ 海底に敷設された光ファイバを利用しても良好な結果が得られる



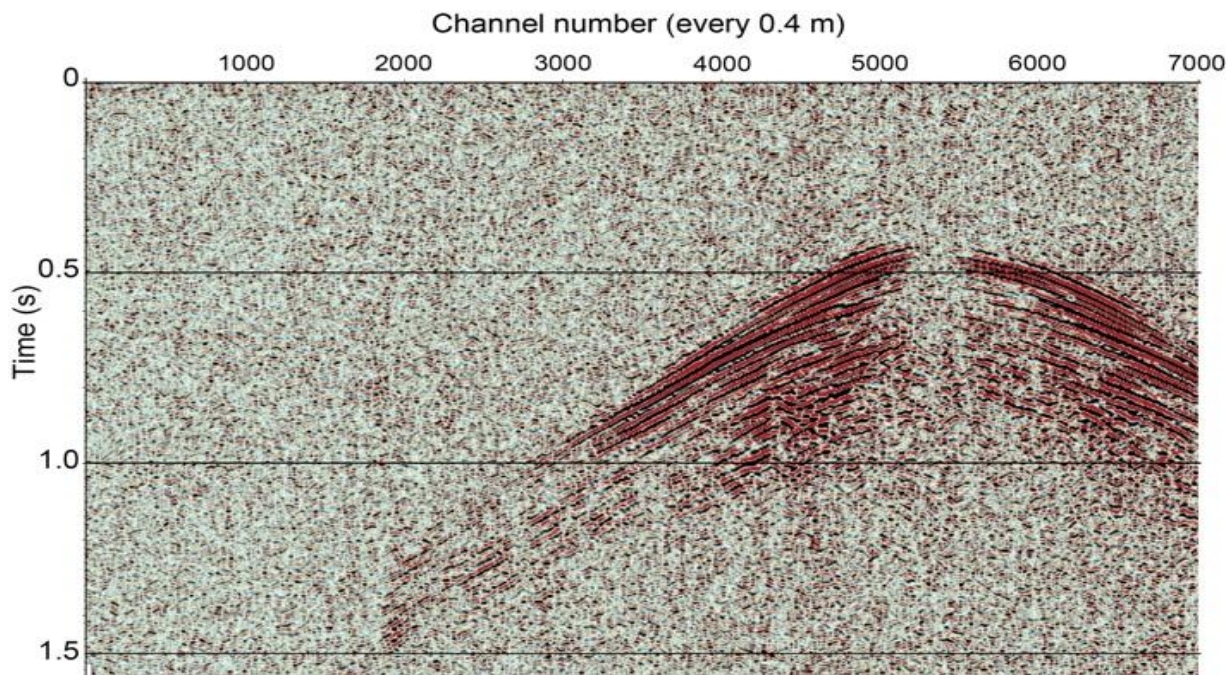
開発した海域震源装置



開発したDAS



光ファイバの位置（赤い線）と加振地点

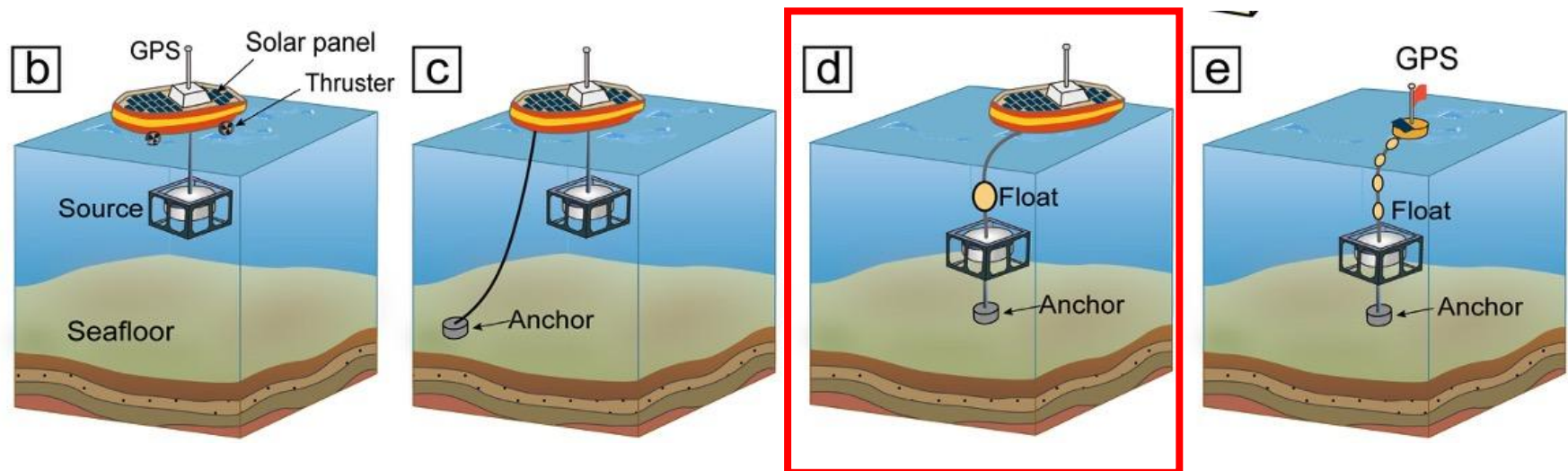


釜石沖で取得されたShotギャザー（辻ほか, 2024）

海域でモニタリングするコンセプトの構築

アンカー付きPASSの場合

1. 海域型PASS震源を搭載した無人船が、事前に設定した発振地点へ自律航行する。
2. その地点で位置を微調整し、アンカー付きの海域型PASS震源を所定位置に設置する。
3. 設置後、無人船はアンカーで停船し、太陽光パネルで給電して省電力運用する（動力による定点保持は不要）。
4. 同一地点で、スピーカー型震源を所定回数発振する。発振は船上のGPS時計に同期して高精度な時刻で実施する。
5. 発振信号は、海底の光ファイバ（DAS）および海底地震計で受信する。
6. 発振終了後、震源を回収して次の発振地点へ移動し、同様の作業を繰り返す。



スピーカー型震源の設置模式図

連続モニタリングシステムの自動解析ツールを構築

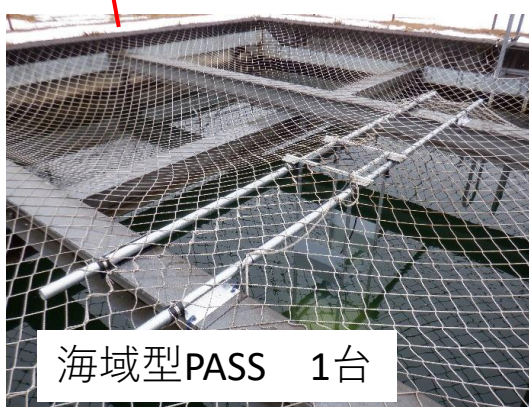
- **JOGMEC柏崎フィールド**において、海域震源（海域PASS）1台と陸域震源（陸域PASS）3台で連続的にモニタリング信号を発振し、それを地表に設置されている光ファイバ（DAS）で観測することで、リアルタイムモニタリングシステム構築に向けた試験を実施
- 機械学習なども取り入れて、スパースな震源データから空間解像度の高いモニタリング結果を出すための解析技術の検討



現地でモニタリングデータ解析を行う計算機とHDD



圧縮した解析済みデータを東京大学へ



海域型PASS 1台



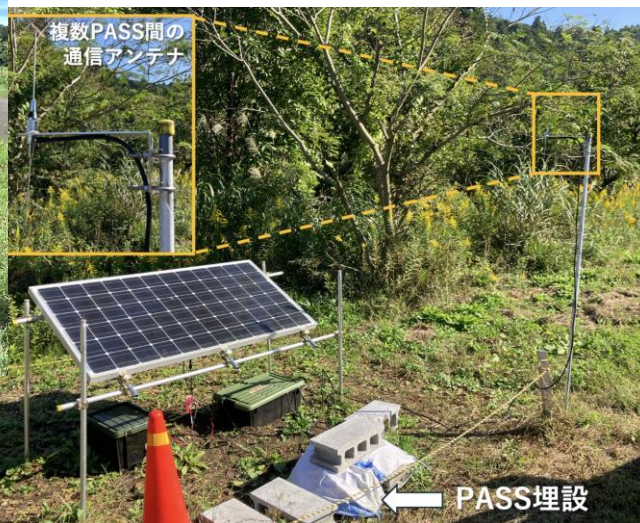
陸域型PASS 3台



独自に開発しているDASインテロゲータ

連続CO2地下モニタリングシステムの構築

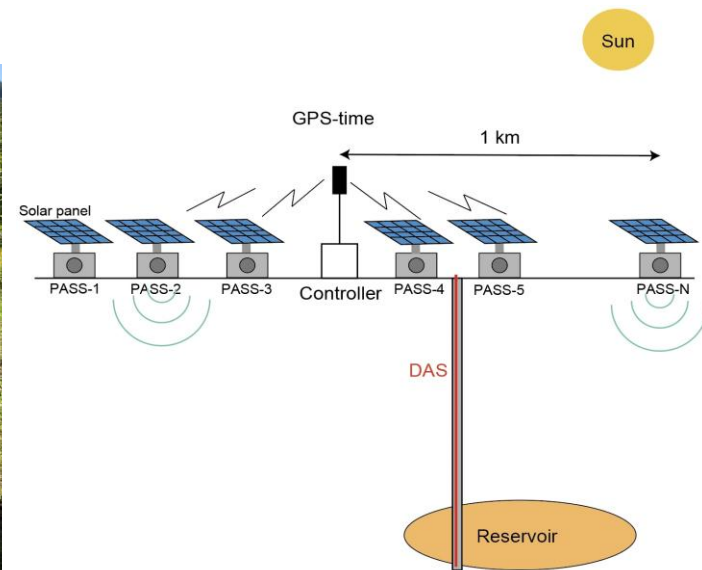
- 太陽光パネルだけで（電力供給なしで）、連続的に発信を繰り返すことのできるスタンドアローン型システム
- 複数のPASSが無線で連携して発信することで、多点での発信をスムーズに実施することに成功



給電なしで連続的に発信を繰り返すことのできるスタンドアローン型の震源システム



サーボ型モータを搭載した震源装置

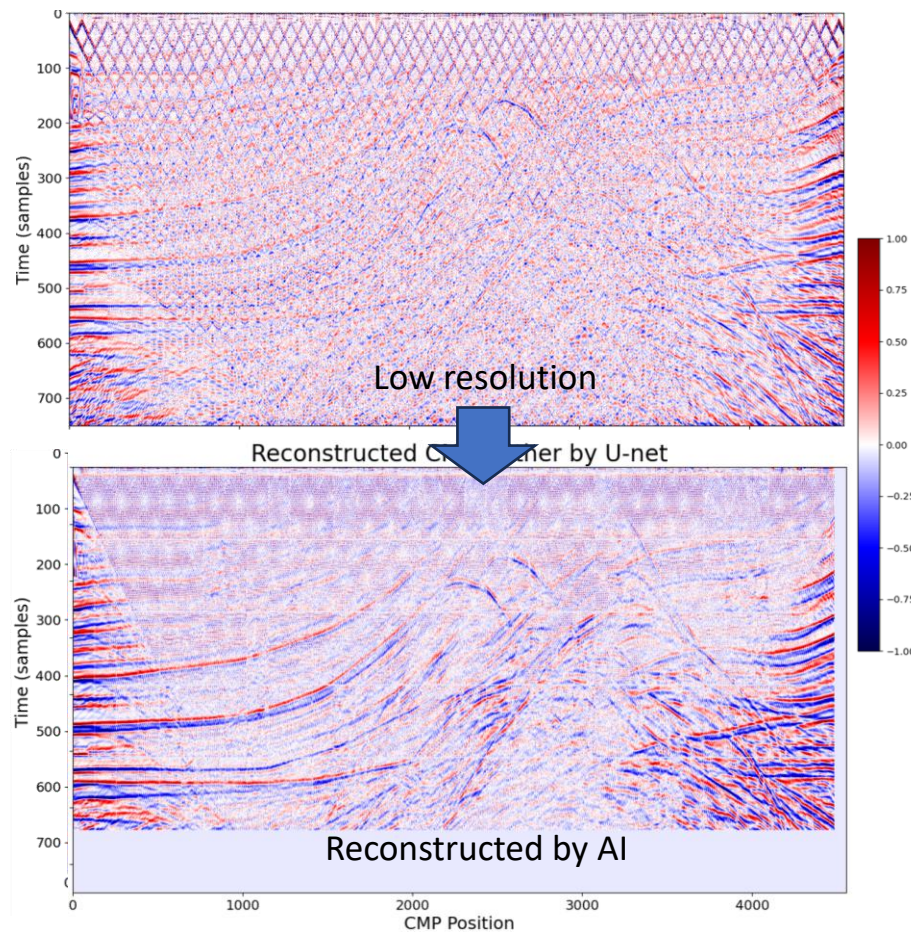
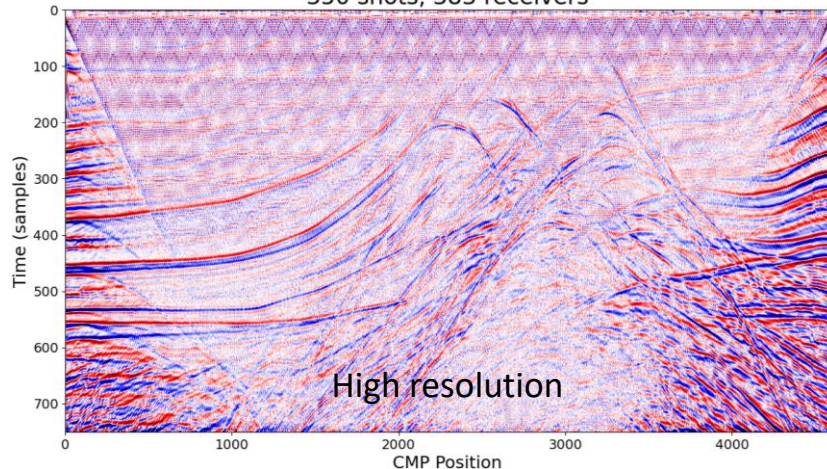


複数の震源装置PASSが連携して稼働する模式図

時間差解析に向けた AIによるスパースデータのデータ密度の増加

- ベースラインデータ：高解像度データ
 - モニタリングデータ：PASSなどによる低解像度データ
- モニタリングデータをベースラインデータと同等の空間解像度にして、差解析に用いる
- モニタリングデータのShot pointを減らすことができる

NMO Corrected CMP Gathers (AGC Applied)
350 shots, 383 receivers



プロジェクト終了までに・・・
館山沖での無人探査船を利用した実証試験を予定

3月に千葉県館山沖で無人探査船と海域小型震源
を利用した探査の準備を進めている

- 無人探査船で発振、受振
- 海底地震計**70**台で受振

- 反射断面図の構築（AIによる高解像度化）
- 自動データ解析のテストを海域でも実施