

月の地下構造探査に向けた 超小型弾性波探査システム

月の三次元地下構造の可視化へ

辻 健

東京大学工学系研究科

辻 研究室の研究内容

地下のイメージング技術

- ・ メタンハイドレート、石油/ガス、地熱
- ・ 地震・火山
- ・ 宇宙（月・火星）

動きを捉えるモニタリング技術

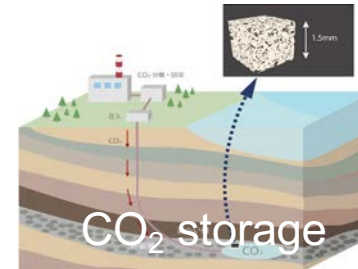
- 地震・火山
- 貯留CO₂(CCS)
- 人間の社会活動

将来を予測するモデリング技術

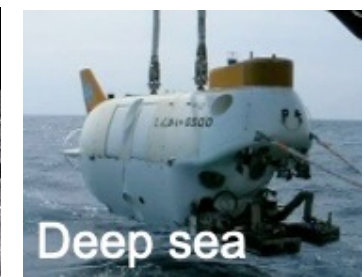
- 地震・火山噴火の予測
- CO2の挙動シミュレーション（世界最高サイズのモデルに2相流挙動を計算）

➤ 地下の構造を調べたり、地下の動きをモニタリング・モデリングするための解析手法や、探査装置の開発

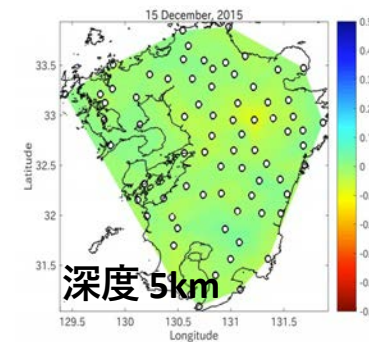
1. カーボンニュートラル



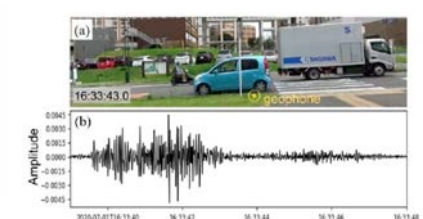
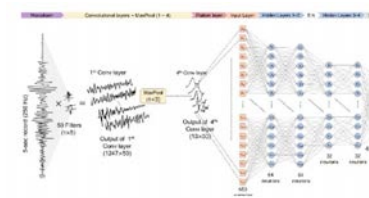
2. フロンティア資源



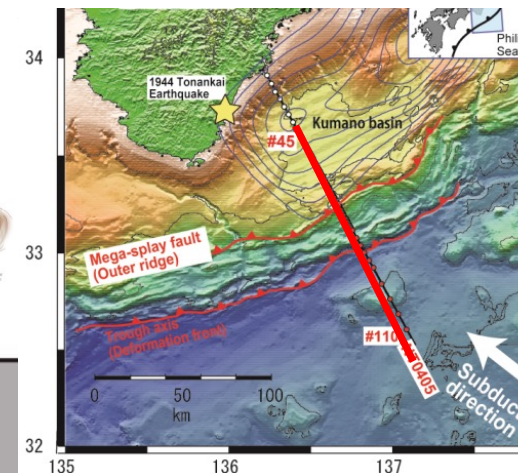
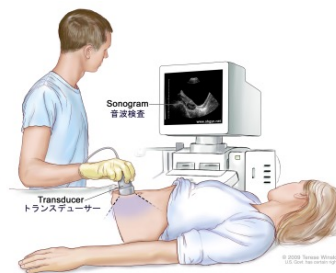
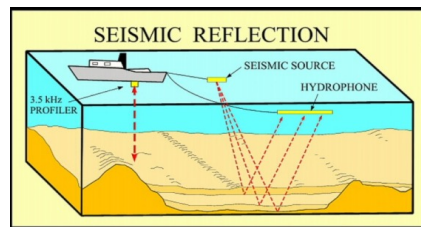
3. 地震や火山



4. 社会活動をモニタリング

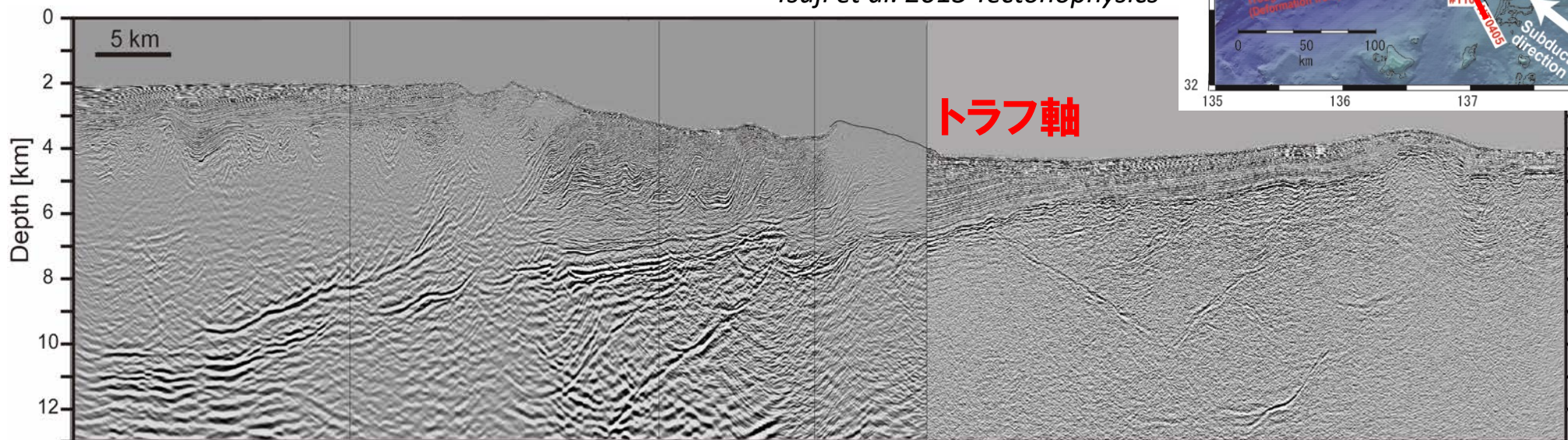


地球で実施した 地下探査の結果

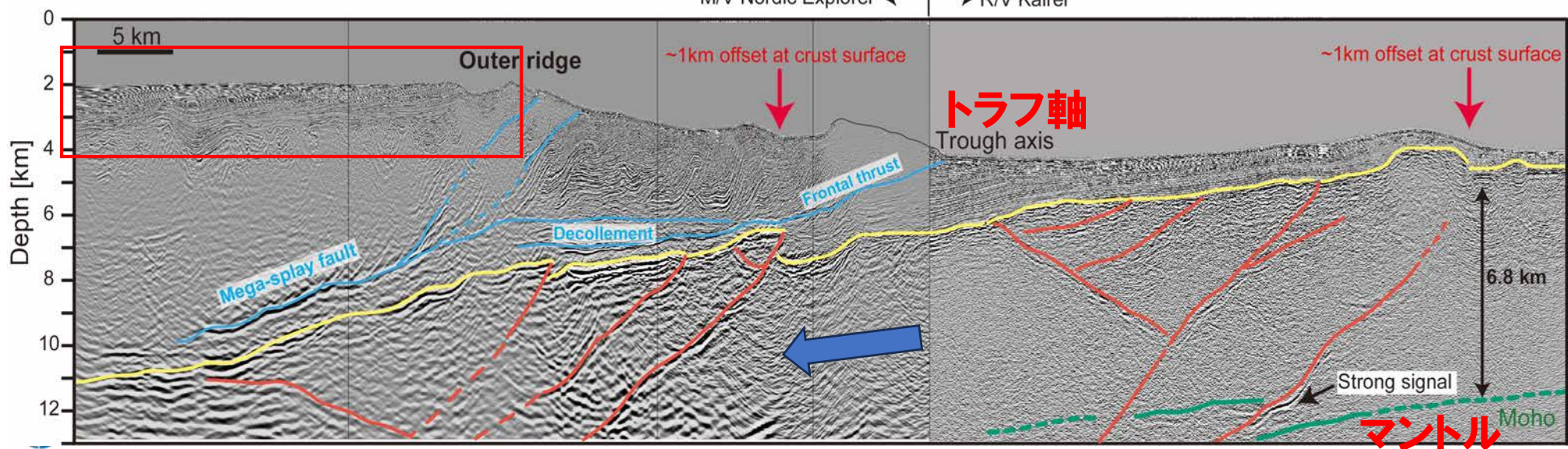


Tsuji et al. 2013 Tectonophysics

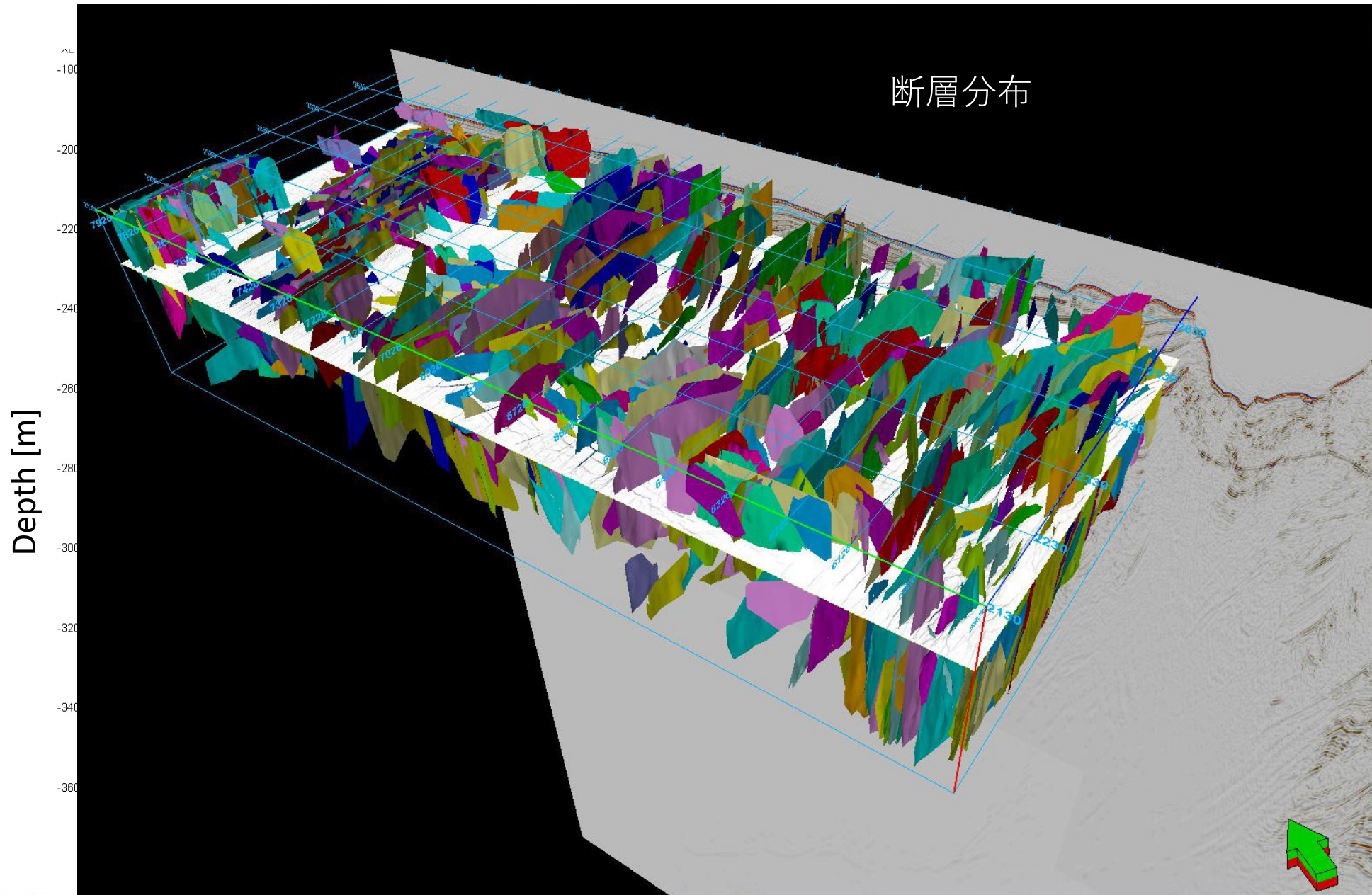
← 紀伊半島側 南海トラフ



M/V Nordic Explorer ← → R/V Kaiei



海底下の断層を抽出

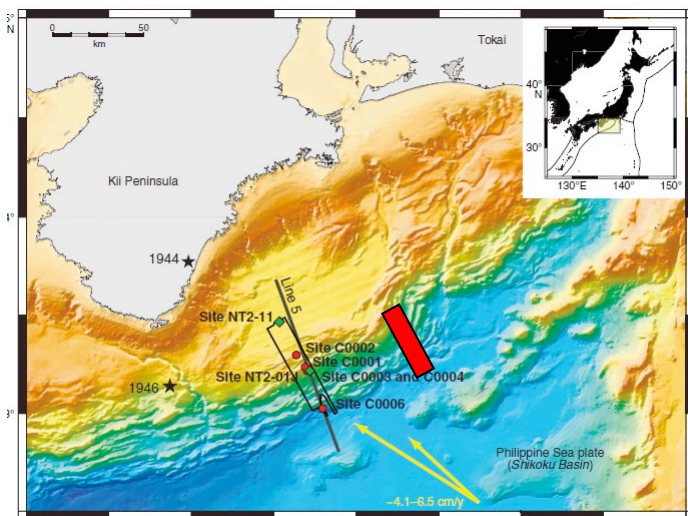
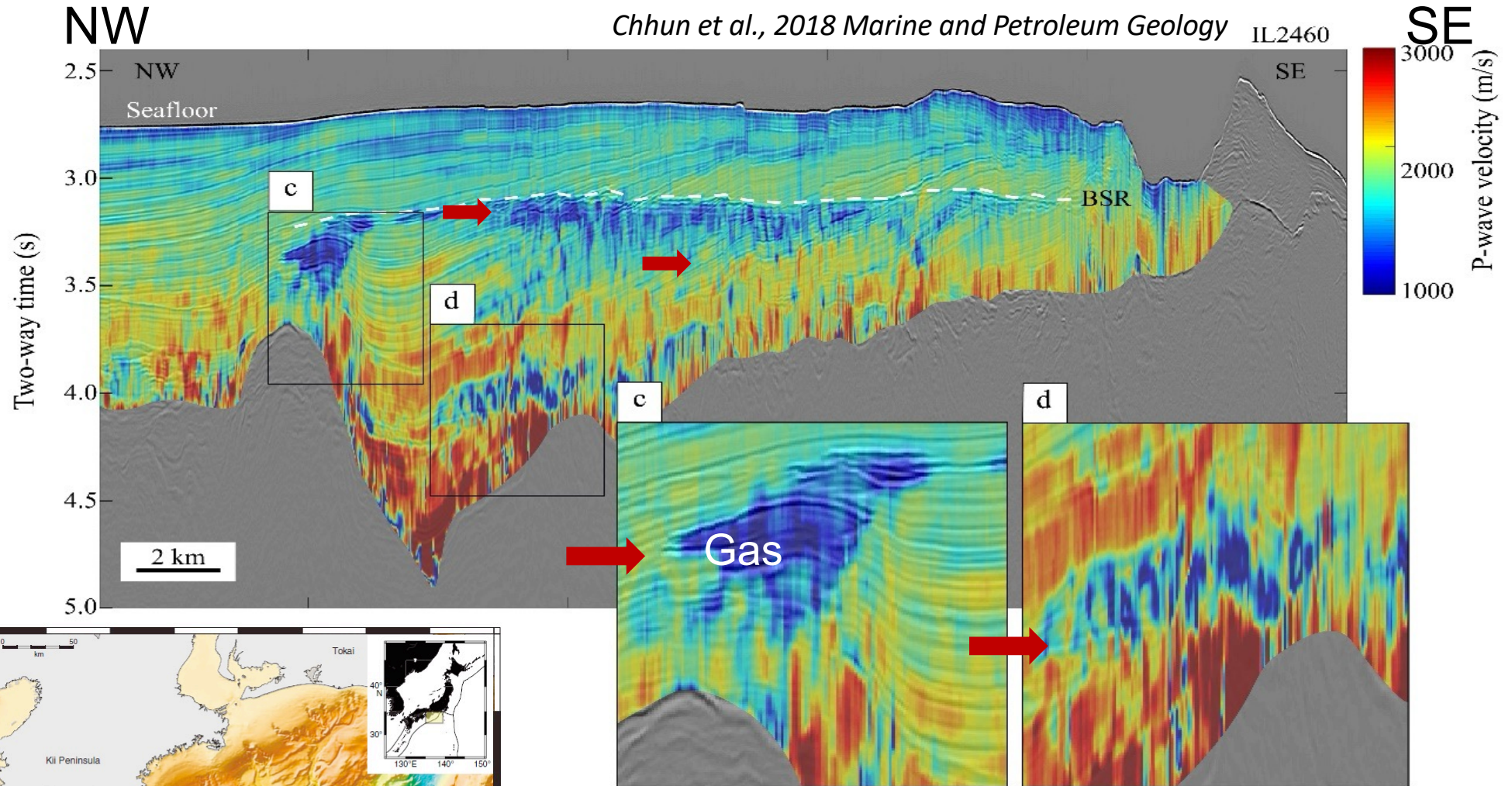


高い空間解像度でP波速度を調べる

天然ガス層・メタンハイドレートが発見



Chhun et al., 2018 Marine and Petroleum Geology IL2460



$$v_p = \sqrt{\frac{K + (4/3)\mu}{\rho}}$$

$$v_s = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}}$$

美優: Myu → μ

健太郎: Kentaro → K and Rho → $K \& \rho$

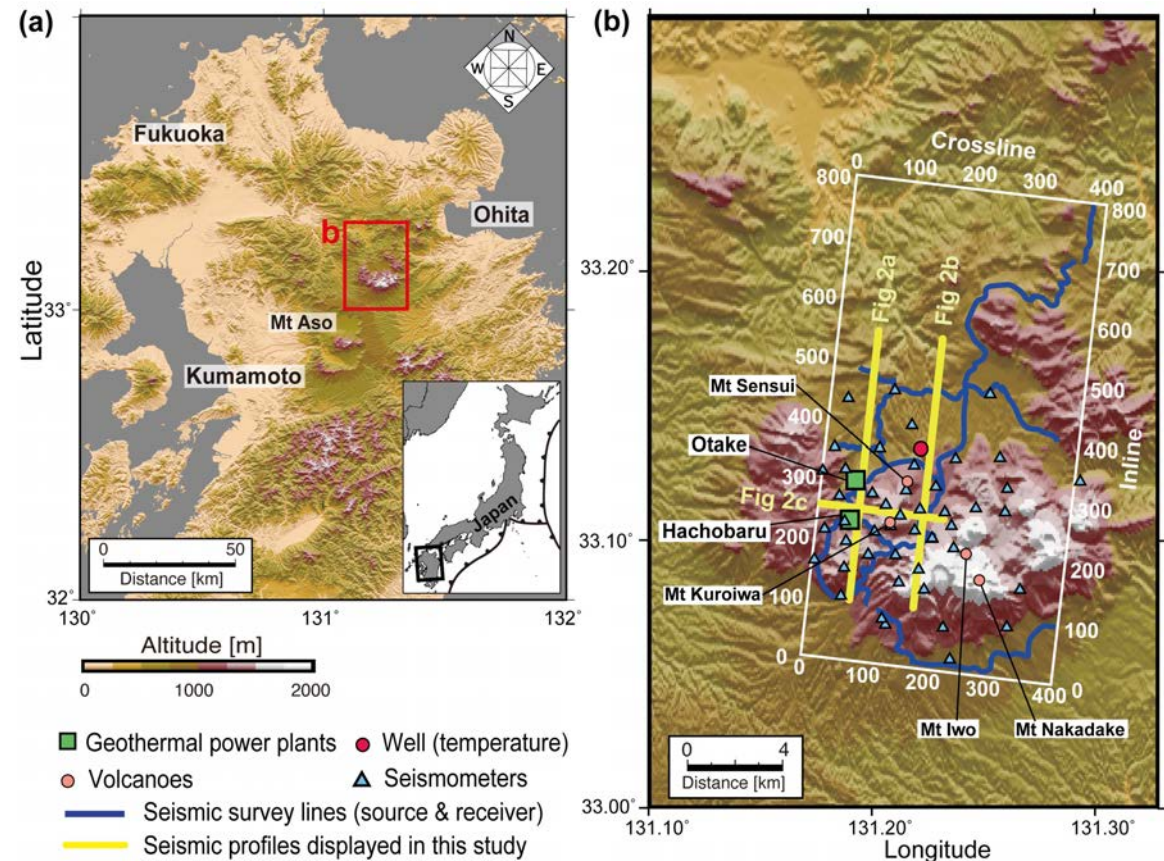
美和: 和 → +

陸上の複雑構造も可視化

九重地熱地域で亀裂や貯留層などを推定：超臨界地熱開発に向けて

地震探査と自然地震観測を行ったところ、超臨界地熱発電を行う上で鍵となる構造がわかってきた

Seismic sources	
Number of Vibroseis	3
Hold-down weight	18.6 t/vehicle
Total number of shot points	855
Elevation range	767.7–1329.5 m
Shot-point interval	50 m
Receivers	
Component	Vertical
Natural frequency	5 Hz or 10 Hz
Receiver number	1270
Receiver interval	25 m



発破位置は道路上（限られた地点）のみに限定されているため、CRSという手法を利用することにより、空間解像度の向上を試みた

反射断面図と弾性波速度プロファイル (Vp/Vs) N-S方向の測線

高振幅反射帯

➤ ①マグマに関連する構造
連続した傾斜反射面

➤ ②亀裂帯

高いVp/Vs

➤ ③超臨界流体

水平反射面

➤ ④シール層

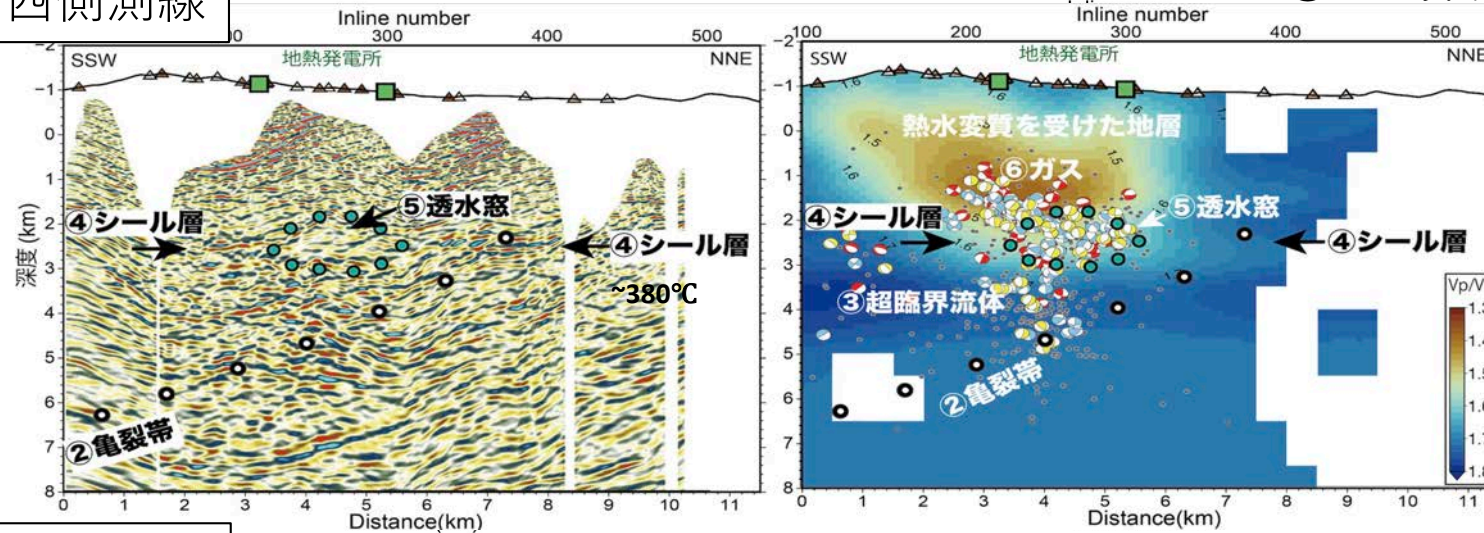
低振幅反射帯

➤ ⑤割れ目 (流体の流路; 透水窓)

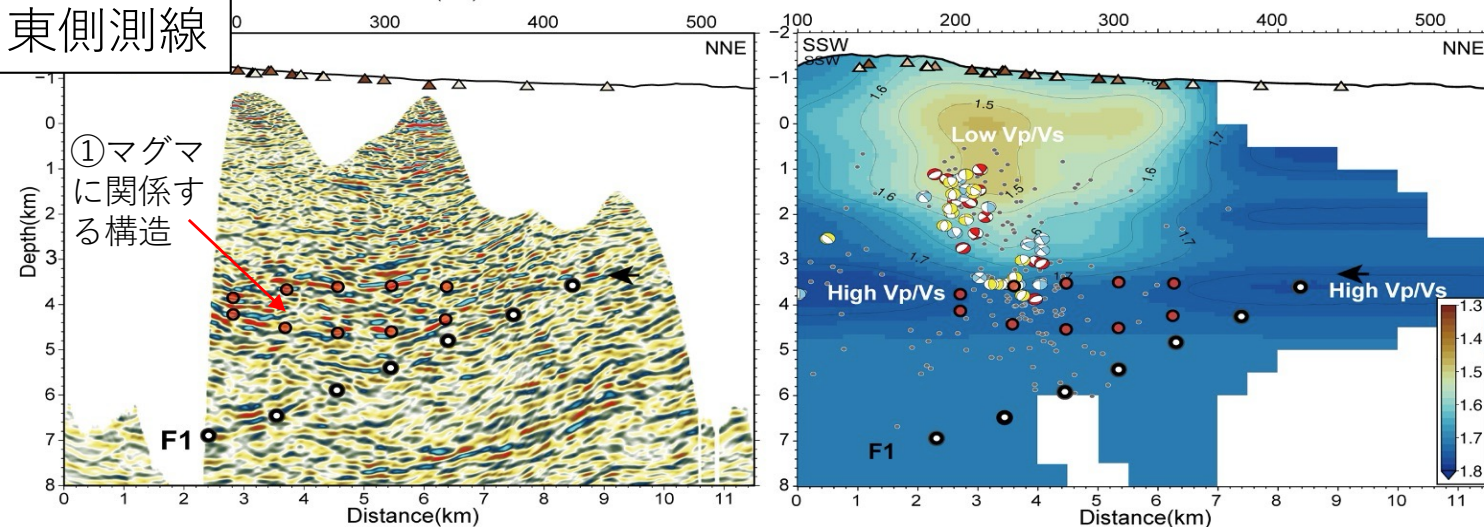
低Vp/Vs

➤ ⑥超臨界流体から相変化したガス

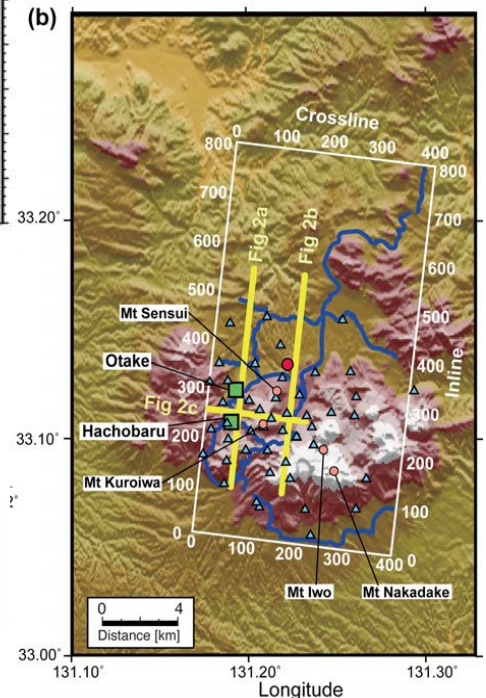
西側測線



東側測線



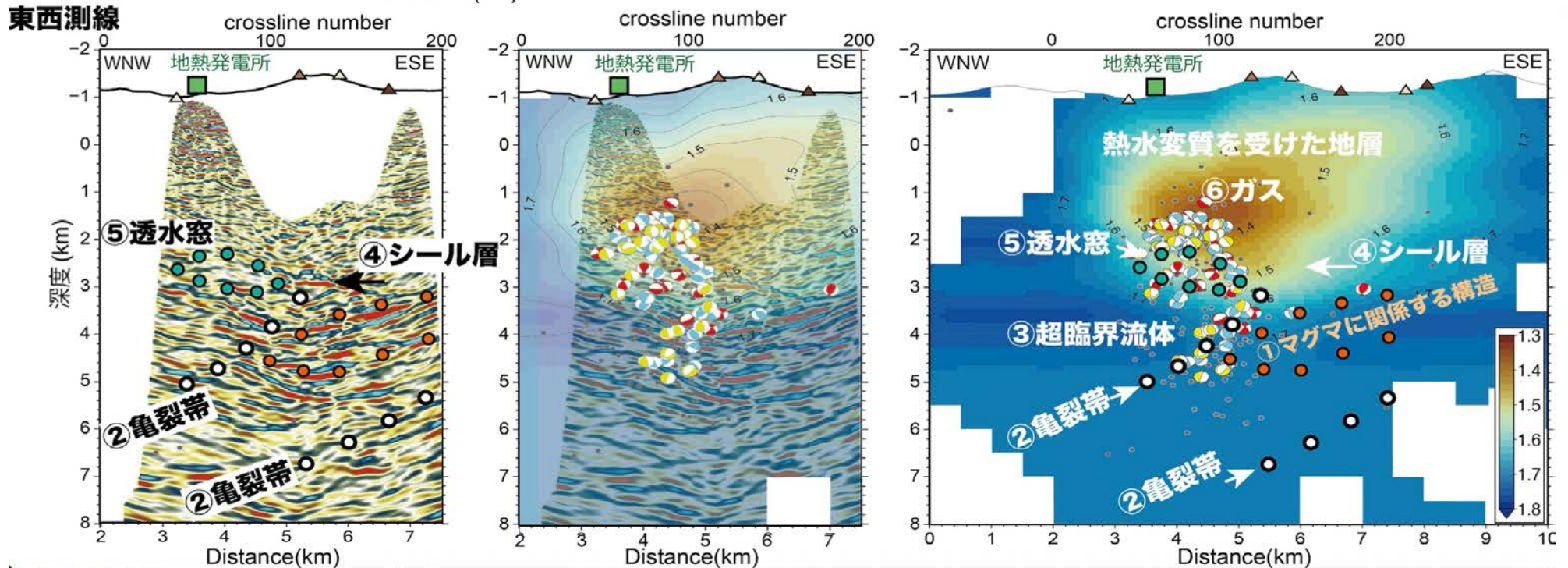
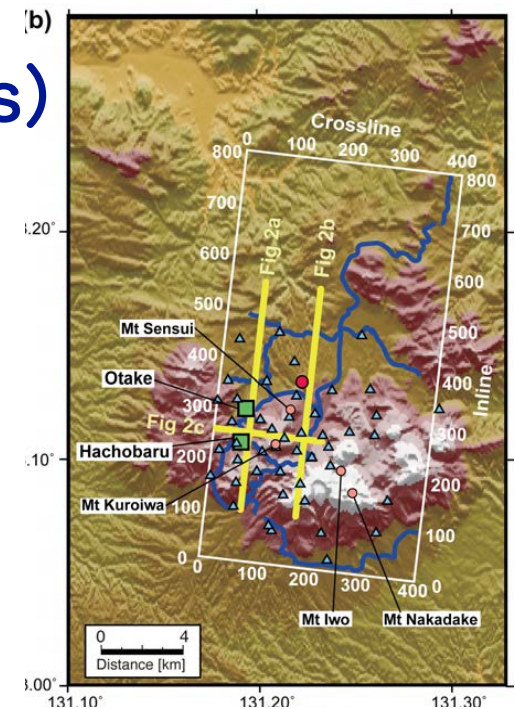
NEDO事業



Tsuji et al., 2025
Commun. Earth Environ.

反射断面図と弾性波速度プロファイル (Vp/Vs) E-W方向の測線

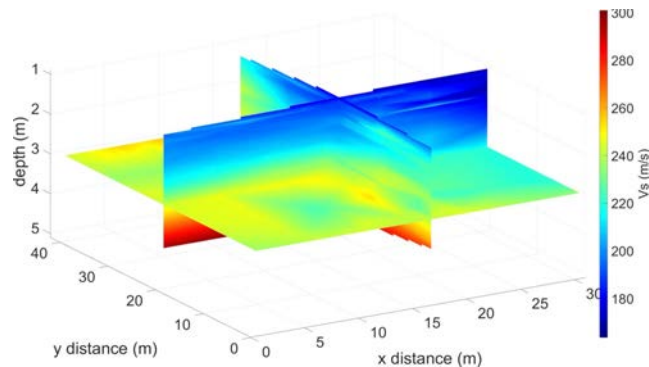
- マグマと透水窓の間に亀裂が発達
- 地震はその亀裂沿いや、低Vp/Vs領域の底部に分布している
 - 亀裂や透水窓は流体の移動経路として機能
 - 超臨界からガス等に相変化するとき地震が発生



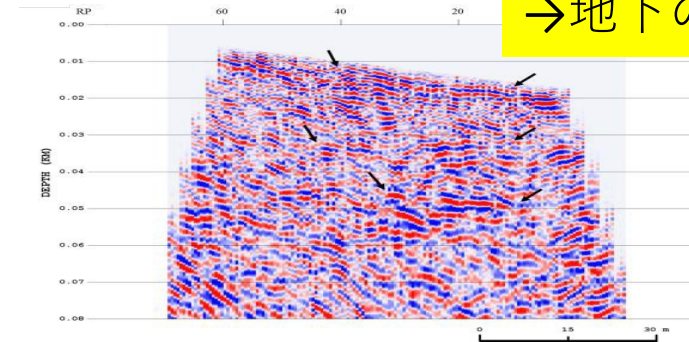
月面でのアクティブ地震探査

- 地下の弾性波速度（P波速度やS波速度）や反射断面図を取得できる
- 短時間で結果が得られる

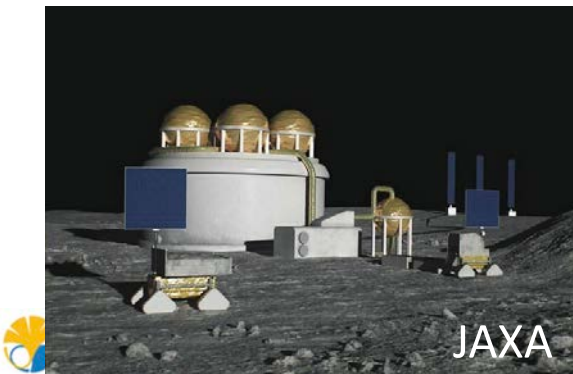
S波速度構造
→ 地層の硬さ



反射断面図
→ 地下の構造



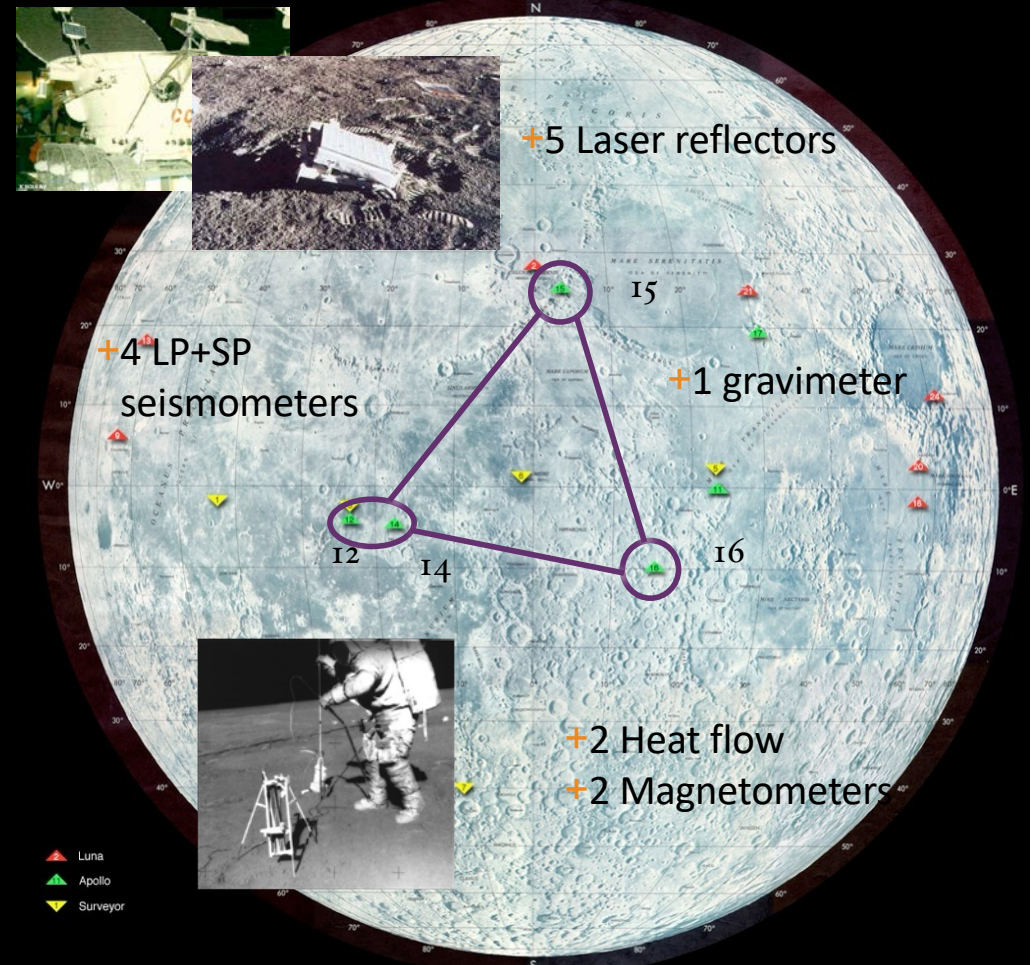
- レゴリス層の物性（強度など）や層厚、その下の岩相を探査
 - 理学（月の形成理解）
 - 工学（月面基地・天文台の建設・与圧ローバー駆動部の設計）
- 氷や鉱物の有無と深度、空間分布、飽和度を調べる
 - 資源



既存Apolloのアクティブ地震探査データの解析 (近年の解析手法を導入すれば、アポロのデータもまだまだ使える)



**ALSEP: First
geophysical
Network other
than on Earth**



アクティブ地震探査も実施している

Apollo 14 アクティブ地震探査

アポロ14号Active Seismic Experiment (ASE)

- 1971年2月6日実施
- 震源: thumper

Kovach et al., 1971, 1972

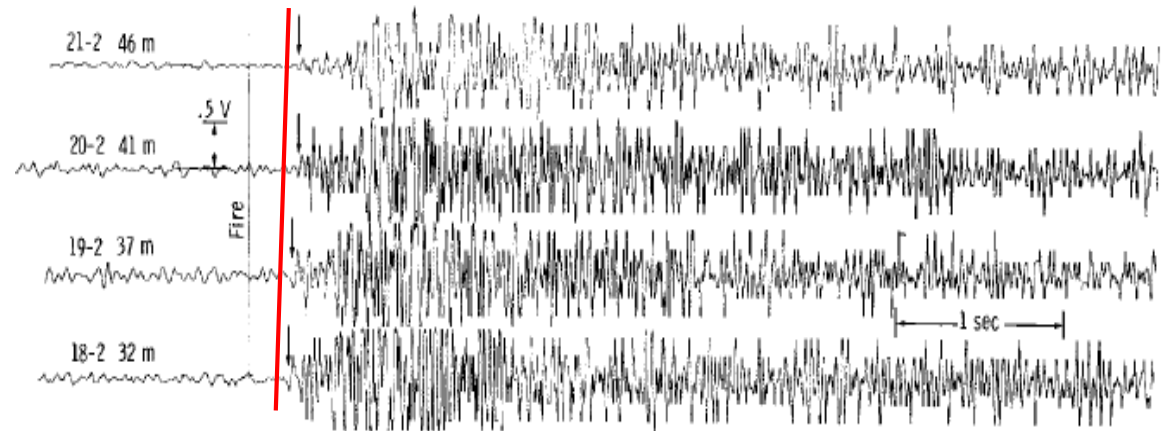
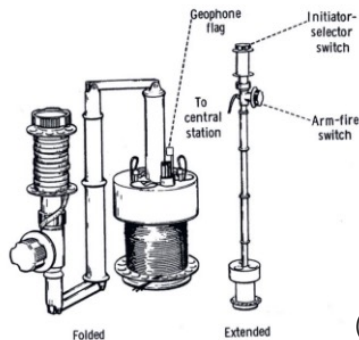


FIGURE 7-12.—Seismic signals produced by thumper firings 18 to 21 as recorded at geophone 2. The traces are aligned to the same relative instant of the firing of the thumper. The small arrows point to the onset of the seismic signal.

屈折波を使ってP波速度を推定

- 第1層: $V_p=104\text{m/s}$ (柔らかい)
- 第2層: $V_p=299\text{m/s}$ (硬い)
- 層境界: 8.5m



(DARTS)

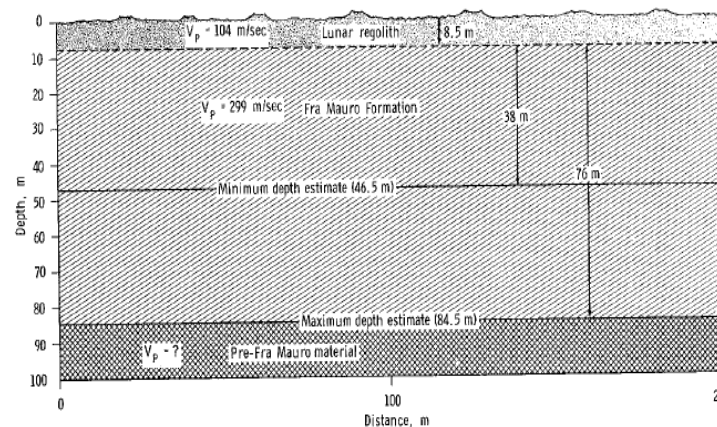
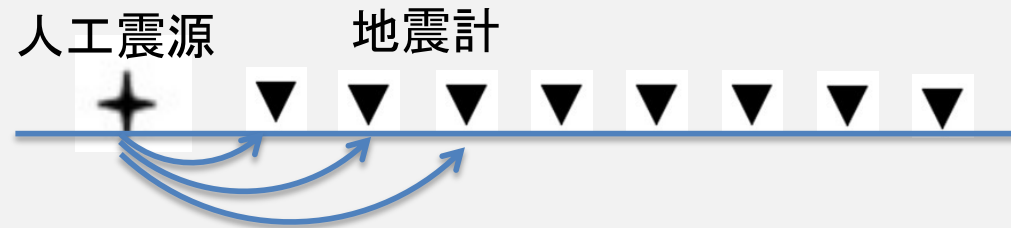


FIGURE 7-1.—Seismic cross section at Fra Mauro landing site. (V_F = seismic-wave velocity.)

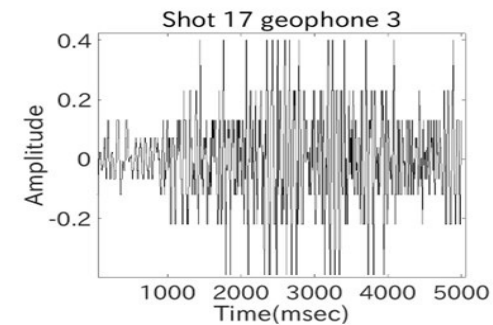
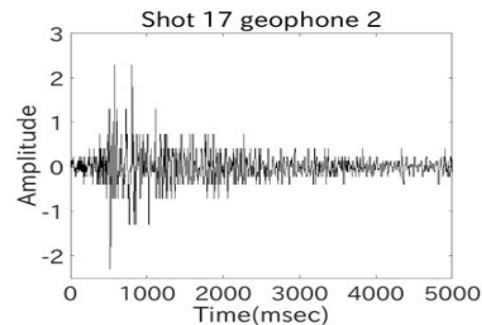
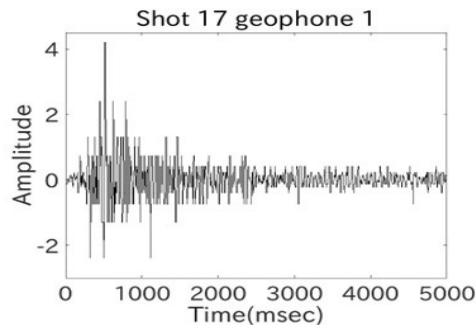
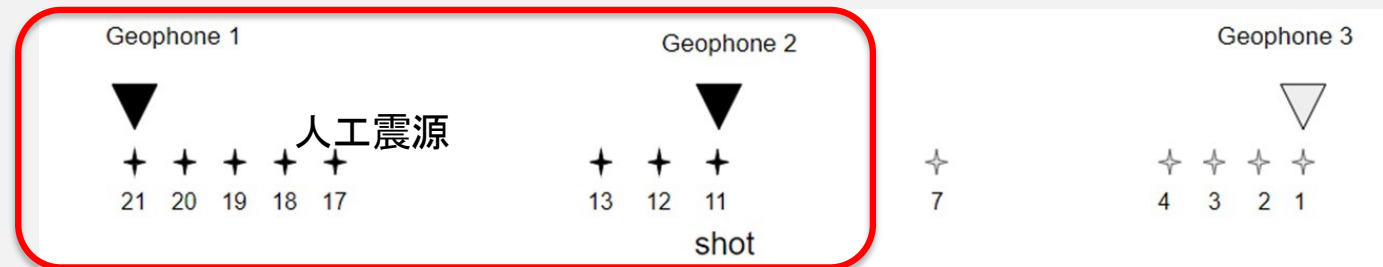
Apollo14 地震計と震源の配置

一般的なアクティブ
地震探査



Apollo 14の
地震探査

地震計



一般的には、地震探査をやりにくい配置

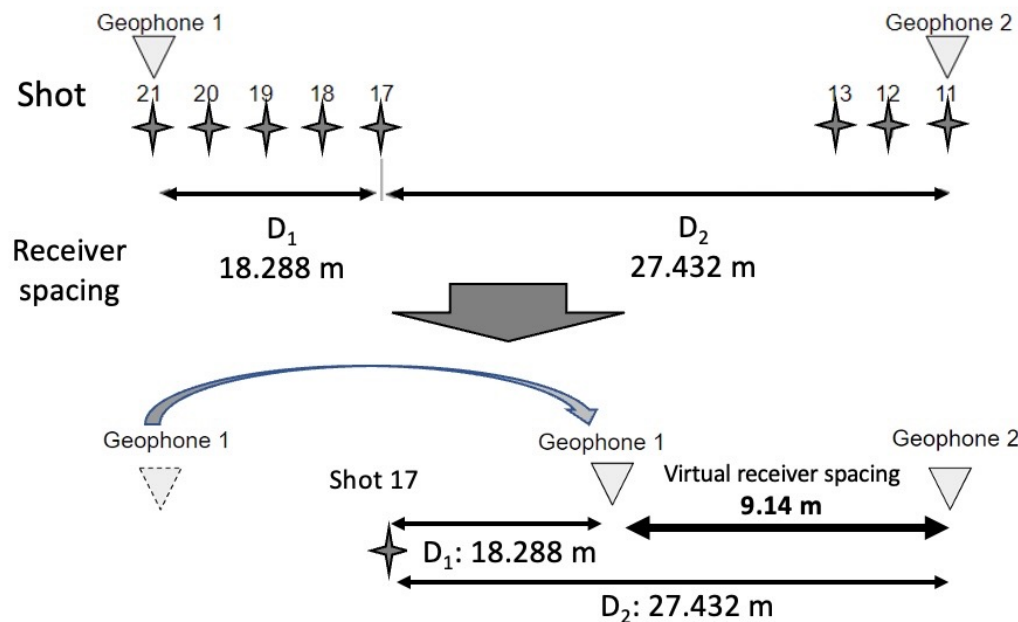
- ノイズが小さかったGeophone 1,2 とその間の震源だけを使用して、地下を探査できるだろうか？

二つの地震計の間にある震源を使って、 Virtualな人工地震探査データの構築

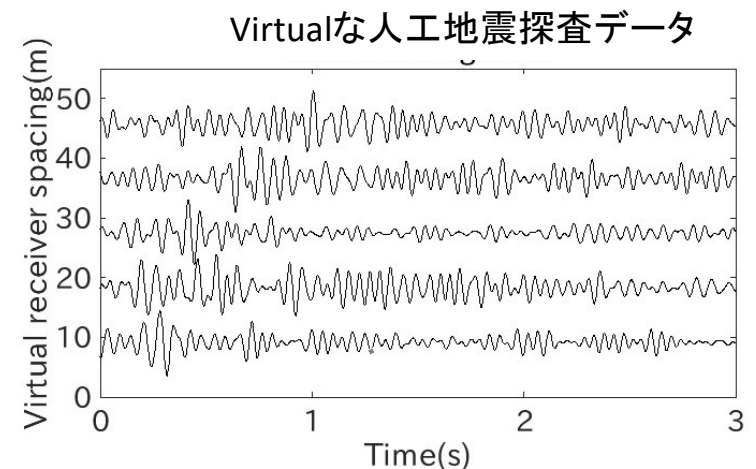
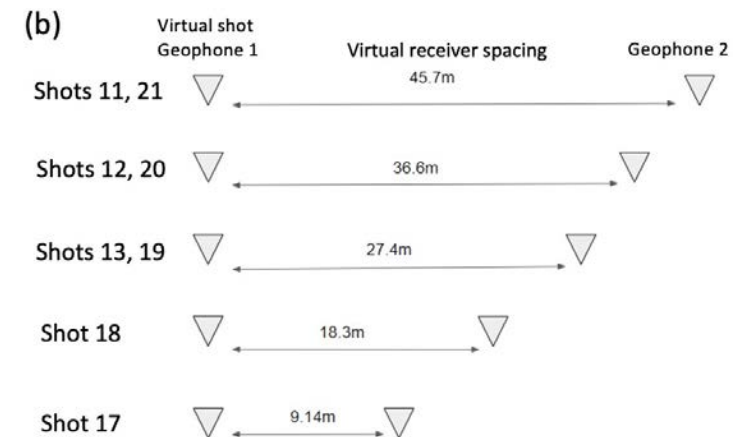
水平方向の均質構造を仮定

- 地震計 1 を、震源に対して反対側(別の地震計 2 の方向)に仮想的に移動
- 地震波干渉法という方法で、Geophone 1 で発振し、Geophone 2 で受振した Virtual な人工地震探査データ

(a) Focus on Shot 17



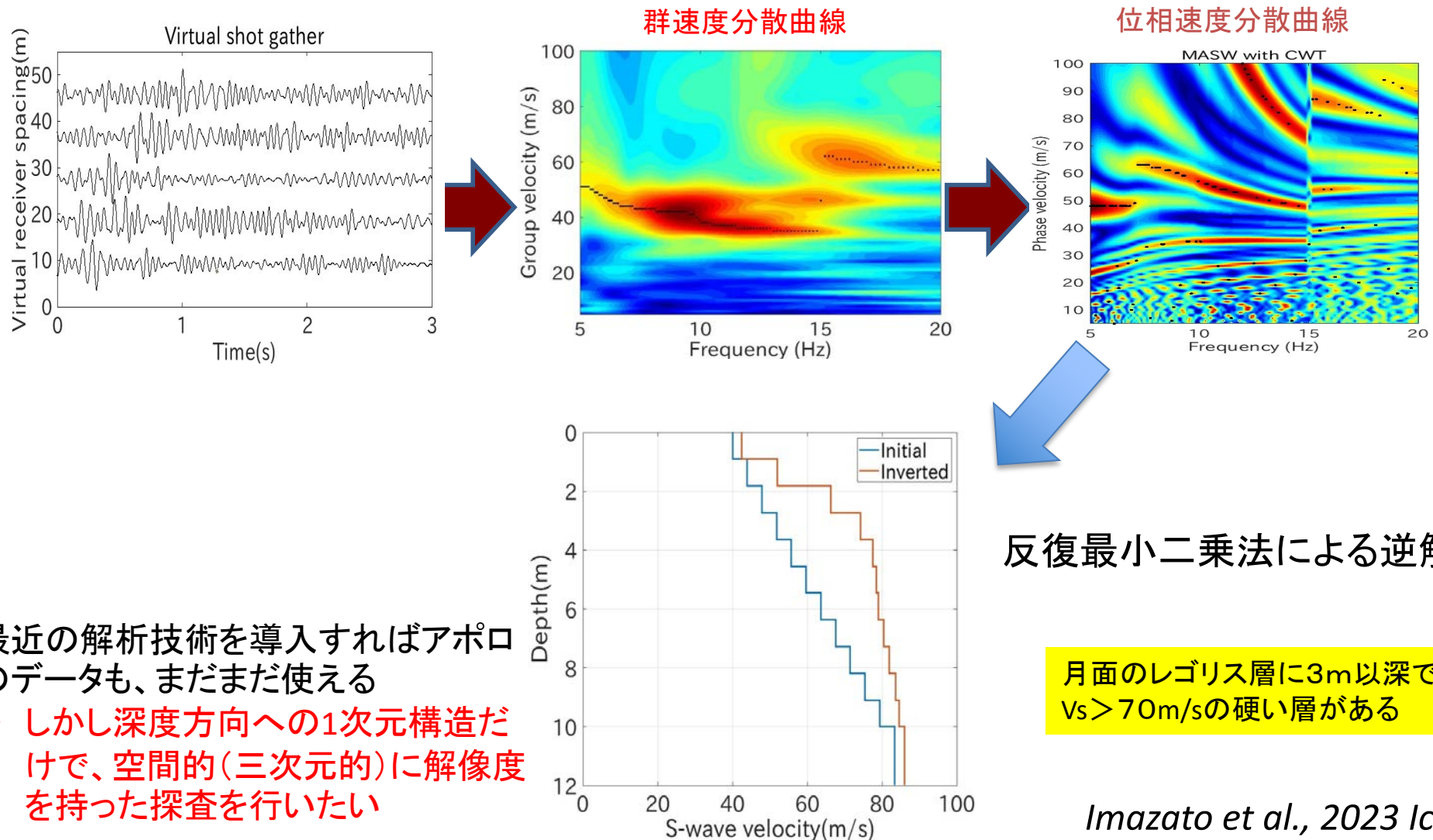
ここは、複雑ですので、こんな方法があるのか、
程度に思っていたいただければ幸いです。



Virtualな人工地震探査データからS波速度の推定

- ノイズが卓越

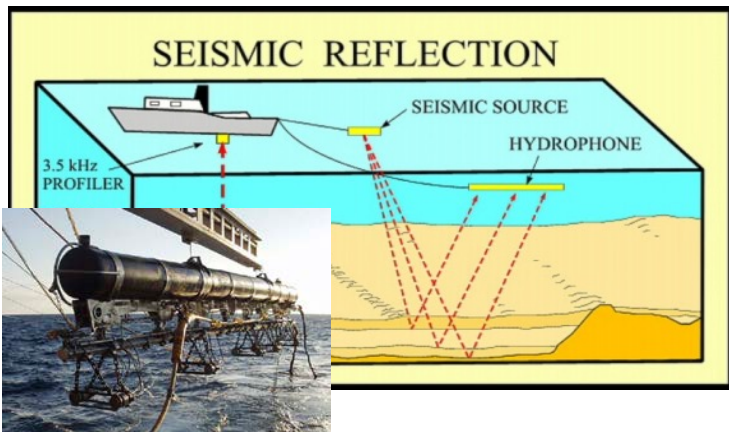
- 連続ウェーブレット変換を用いたMulti-Channel Analysis of Surface Waves (Ikeda and Tsuji et al., 2019)



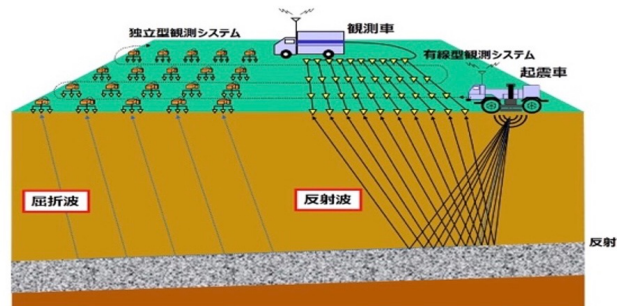
月面での地震探査を実施する上での難しさ

- 地球上では、大型の震源装置を利用
 - （課題１）月面では、震源装置を小型化する必要がある
- 地球上では、多数の地震計を利用・多点で発振
 - （課題２）月面では、探査システムを改良して、1台の地震計と1台の震源で探査したい

海域



陸域



地球での地震探査



地球で利用される震源装置

月で地震探査する上での課題 1 : 震源装置の小型化

- 我々は小型震源装置 (Portable Active Seismic Source; PASS) を開発

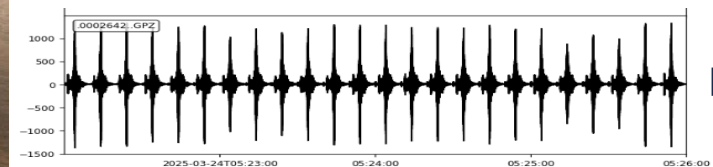


小型化
➡

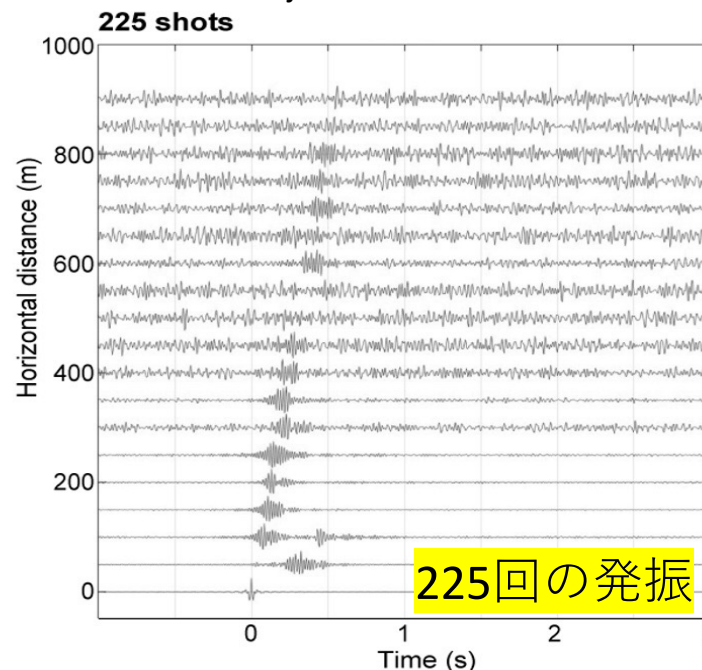
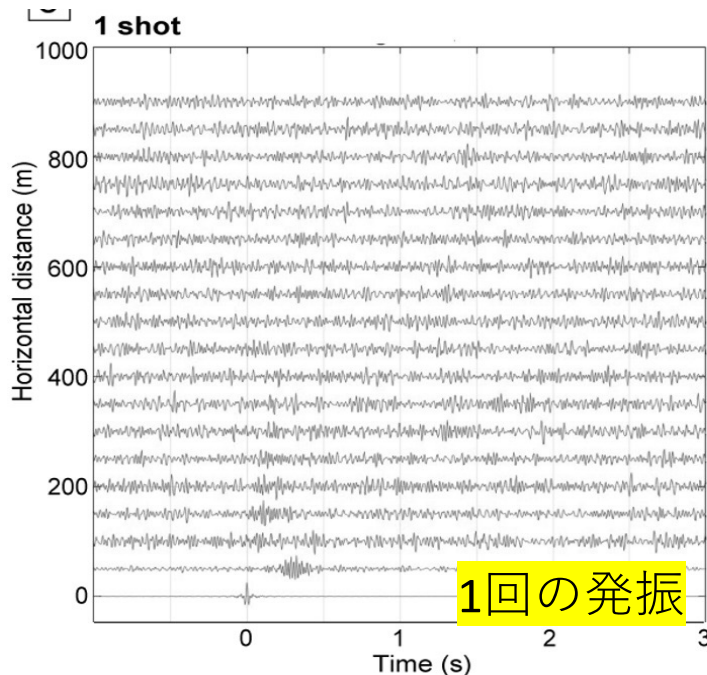


PASSでは周波数変調させたチャープ波を連続的に発生させ、それを重合 (足し合わせる)

- 小型震源でも遠地までの探査が可能



Tsuji et al. 2022 SRL



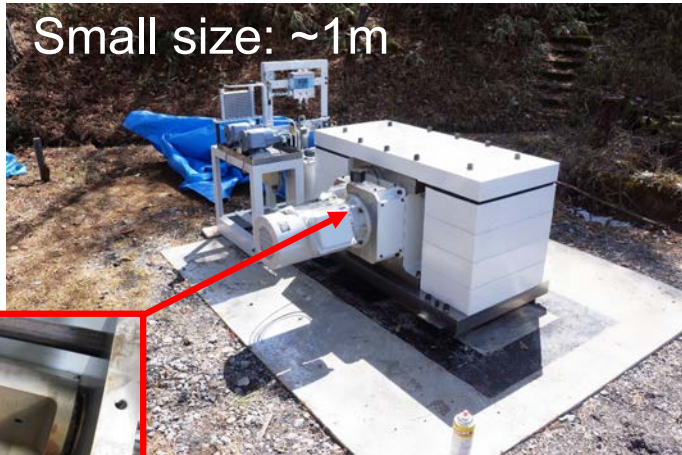
さらに小型化するためにボイスコイルを利用 (~30mm)



重合（足し合わせ）の効果

連続震源装置（大型PASS）

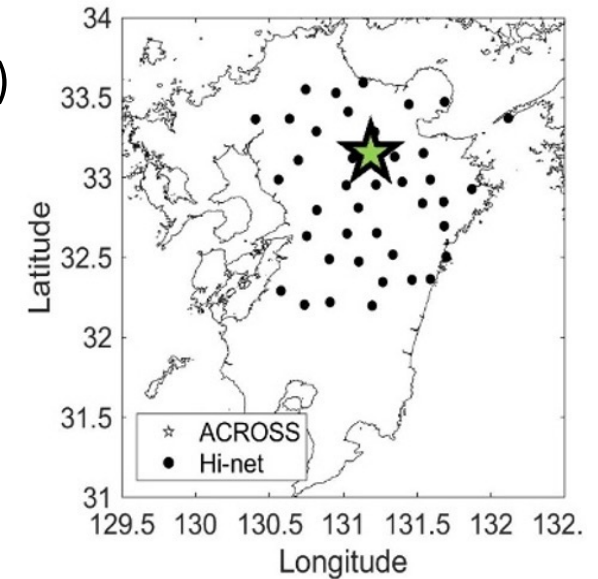
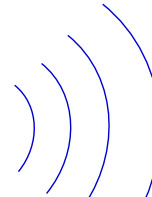
Small size: ~1m



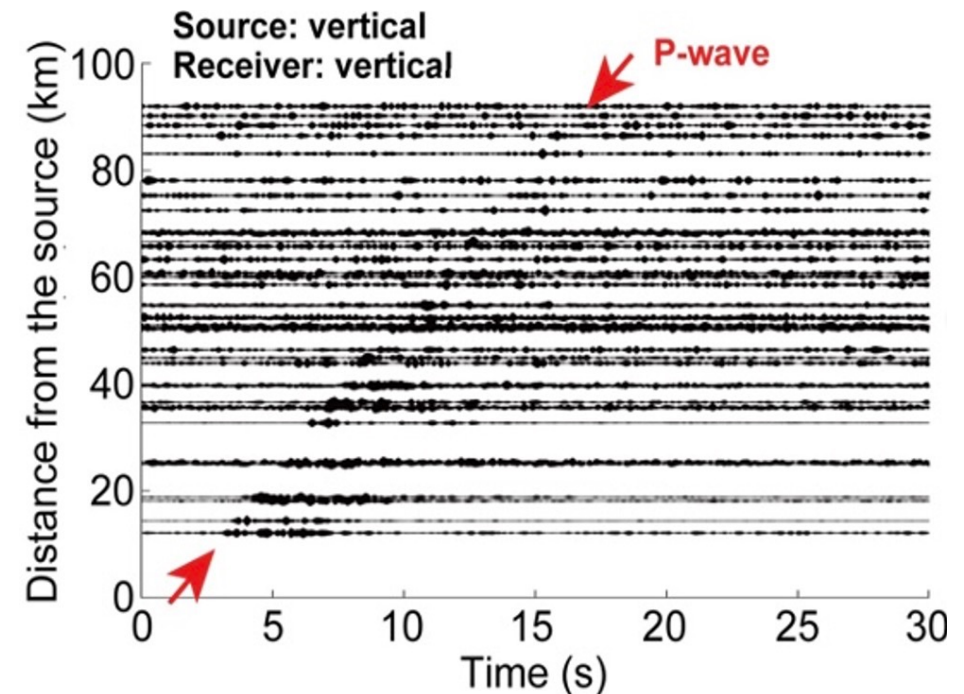
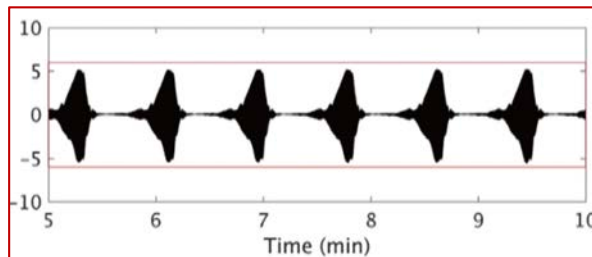
地震計(Stryde社)



発振波形



オモリ (~10 kg)を回転
8000N at 20Hz



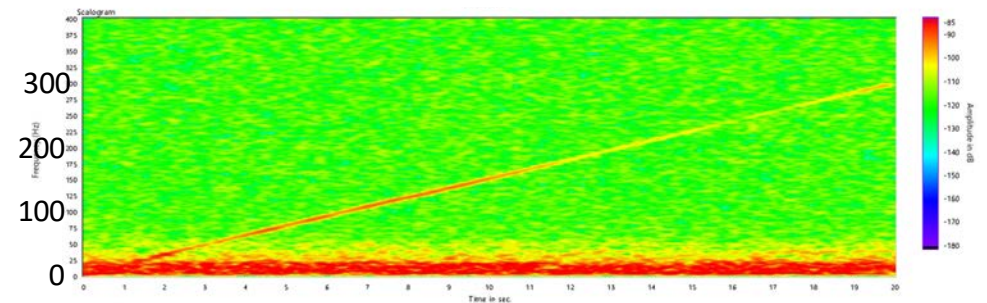
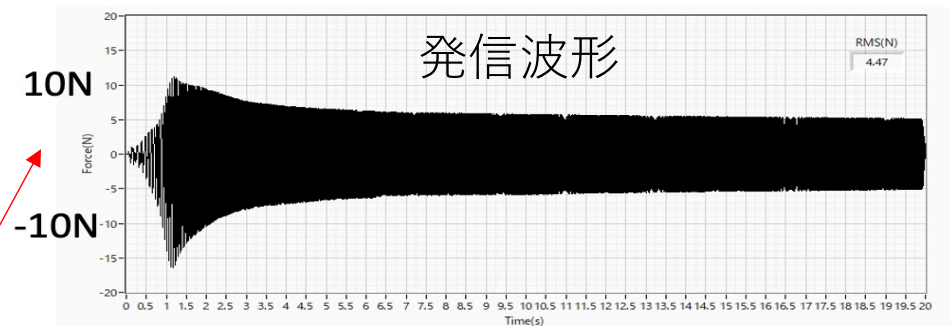
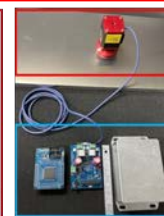
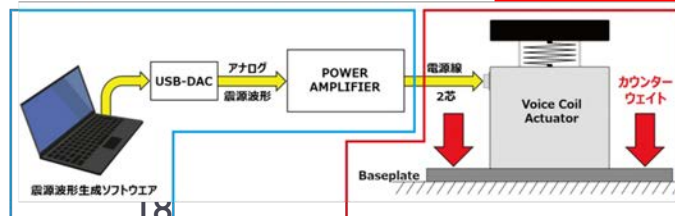
- 小さいサイズであるが、連続的に発振
- 長期間発振したシグナルを足し合わせることで、S/Nを向上させ、長い距離 (~100km) を信号が伝播

宇宙で利用する小型PASS震源（アクチュエータ部）の開発

- 複数の実験機を用いた試験を通じて、超小型震源の基礎的特性を検証し、小型（450g; 9.8N）でも表面波探査、実体波探査の用途に使用できることを確認

表 1 震源仕様

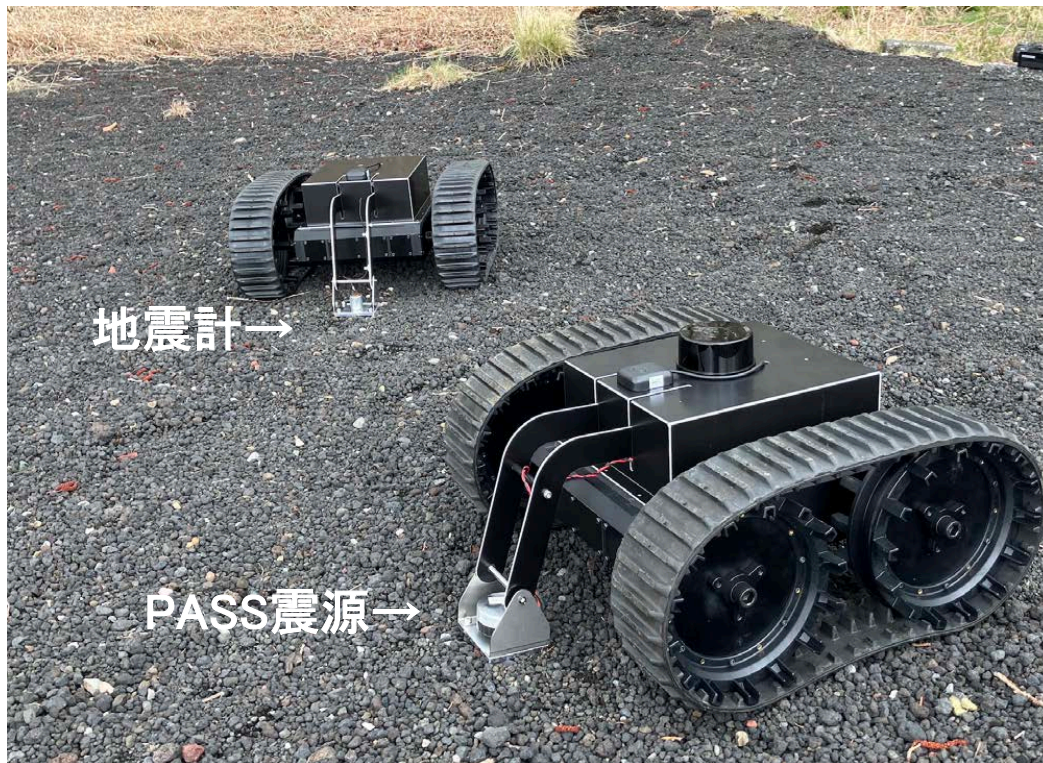
震源型式	電池駆動型電磁バイブレーター
最大加振力	9.8N
周波数帯域	5Hz～300Hz
本体寸法	W41mm * D41mm * H69mm
本体質量	450g
電源	24VDC, 6W



スペクトログラム

月面探査用の小型震源装置を開発 (TRL=5-6)

ローバー用



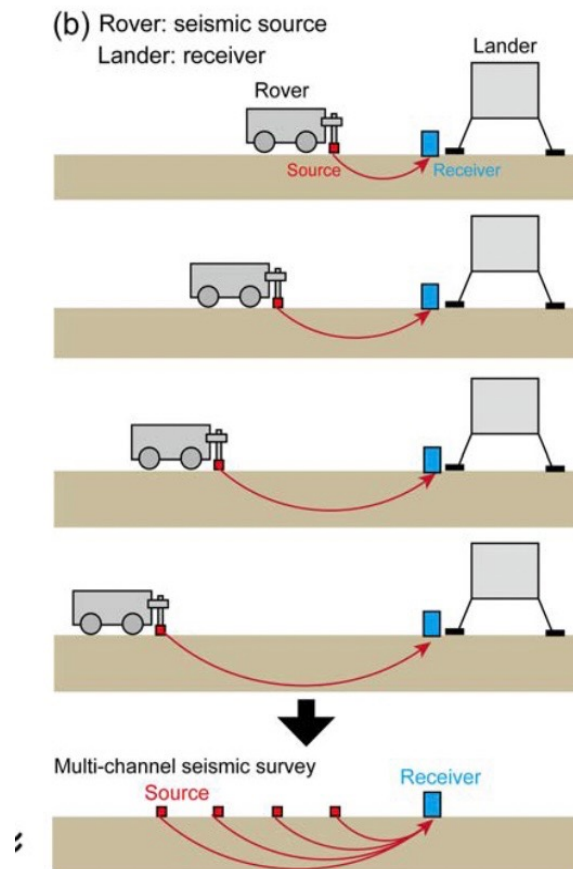
宇宙飛行士用



月で地震探査する上での課題 2 : 限られた装置（1台の地震計と1台の震源）で探査

地震計を多く設置することが望ましいが、宇宙では複数の地震計を利用できない

- 制御された同じ波を出すことができれば、1台の地震計と1台の移動震源で、多くの地震計を用いた場合と同等のデータを取得できる



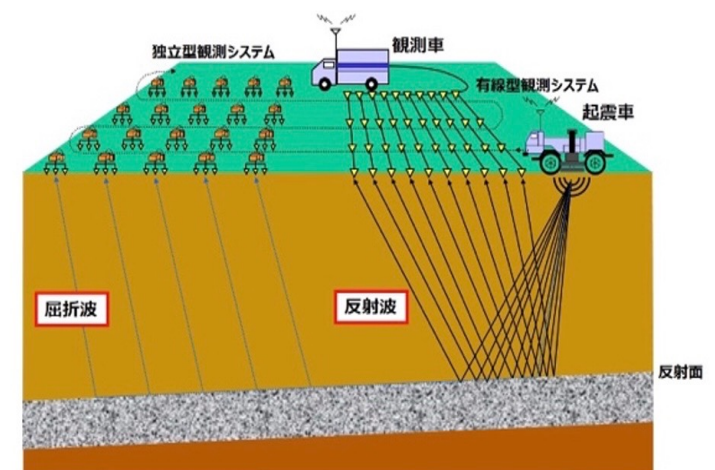
地震計



PASS震源



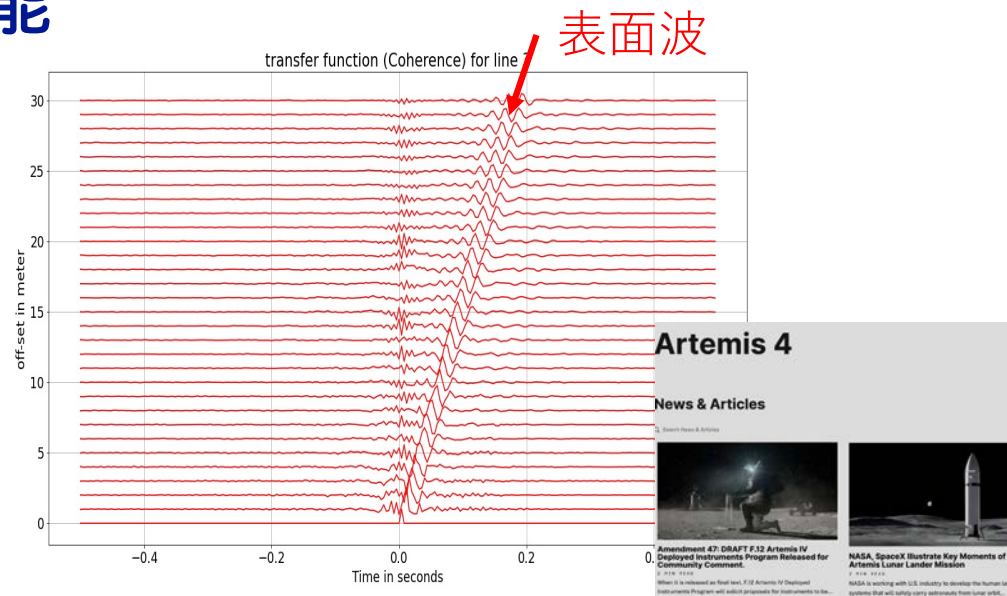
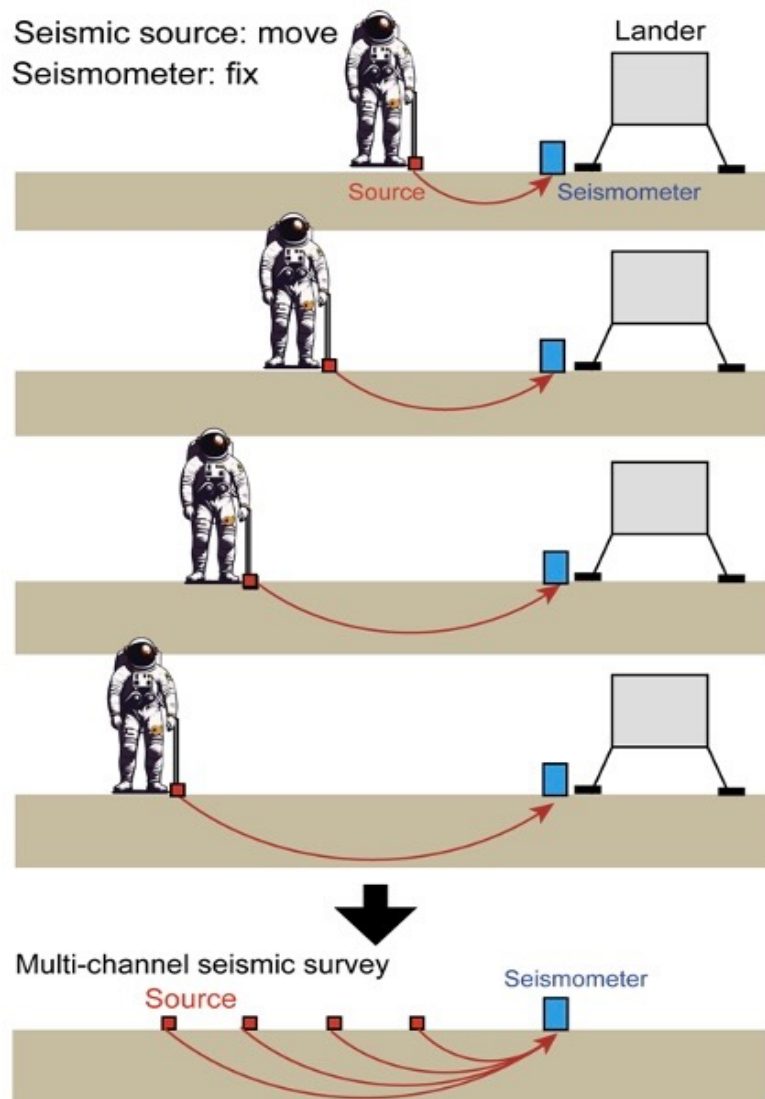
地球上の探査



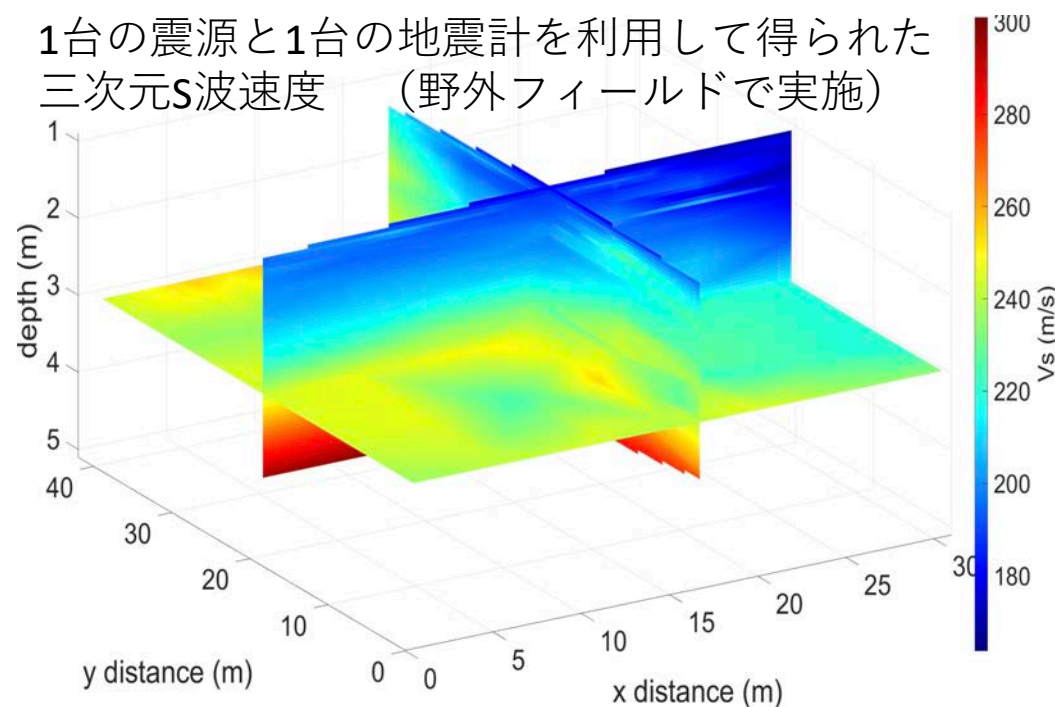
等価なデータ



1台のPASS震源と、1台の地震計で表面波探査を実施： 宇宙飛行士による発信も可能



1台の震源と1台の地震計を利用して得られた
三次元S波速度 (野外フィールドで実施)



Field test at Mt Fuji



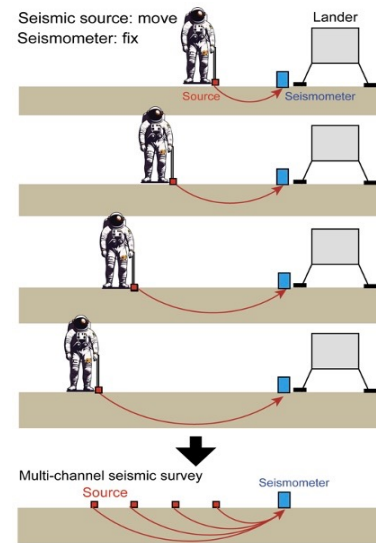
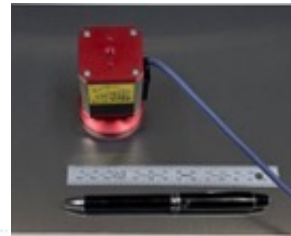
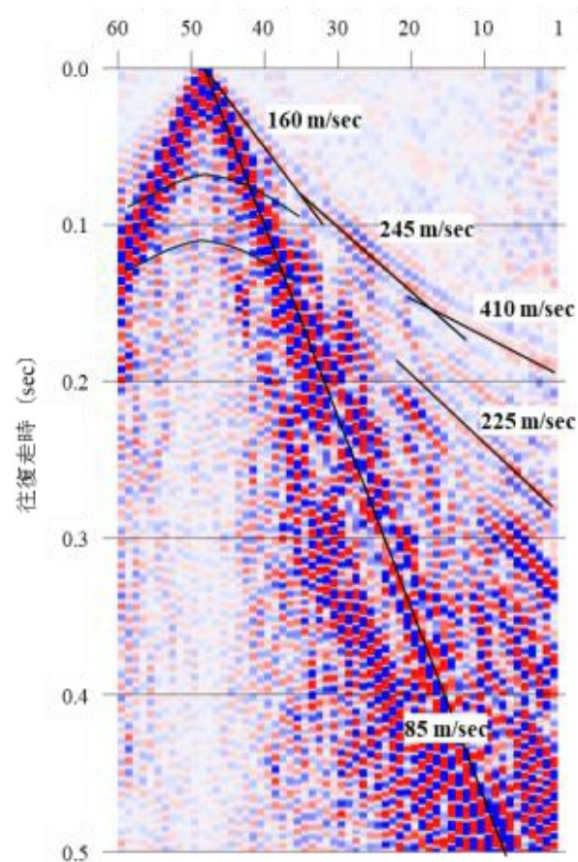
- 富士山五号目のフィールドを利用
✓ 東京からは日帰りで行ける
- スコアで比較的月面環境に近い

PASS(9.8N; 450g震源) を利用して富士山山麓を探查

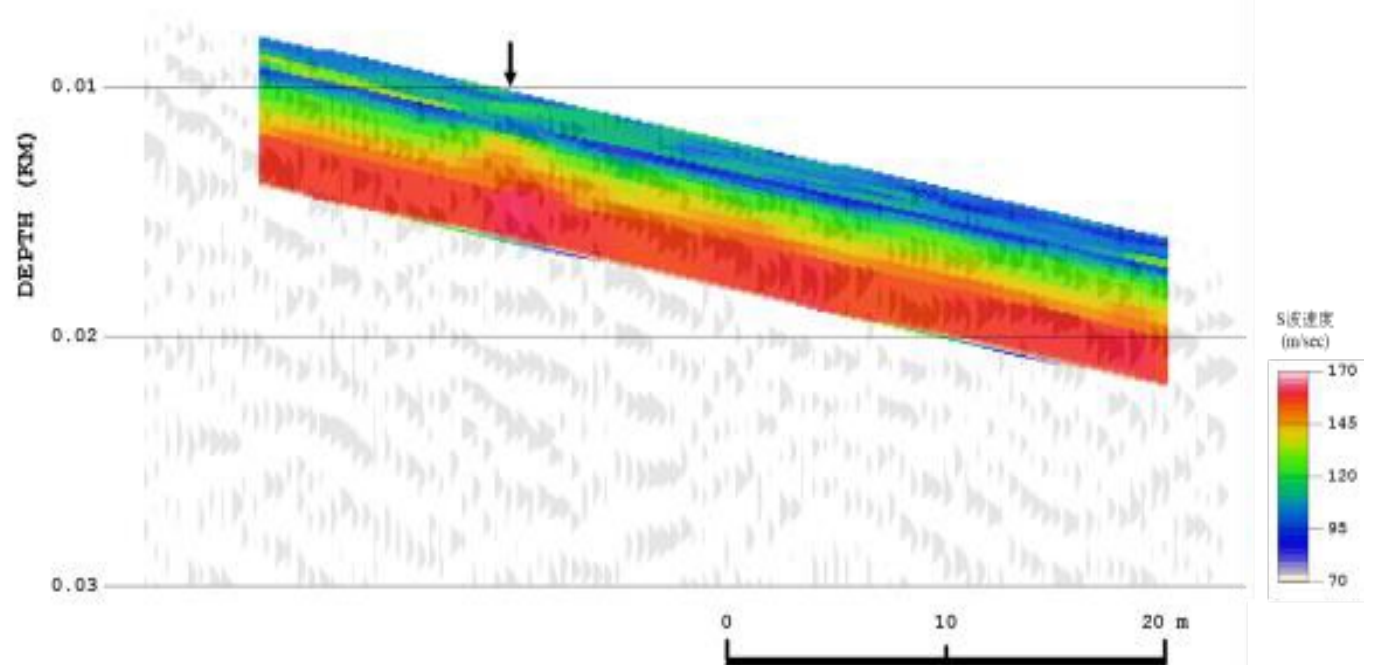
- 測線全体 (80m) に渡って信号が伝達
- 反射波、屈折波、表面波を確認

生データ

SP24

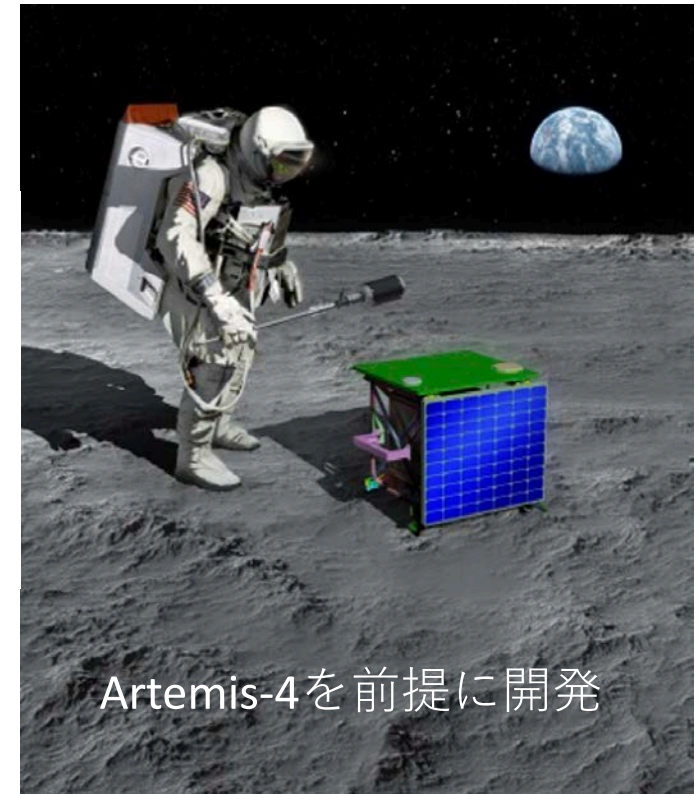
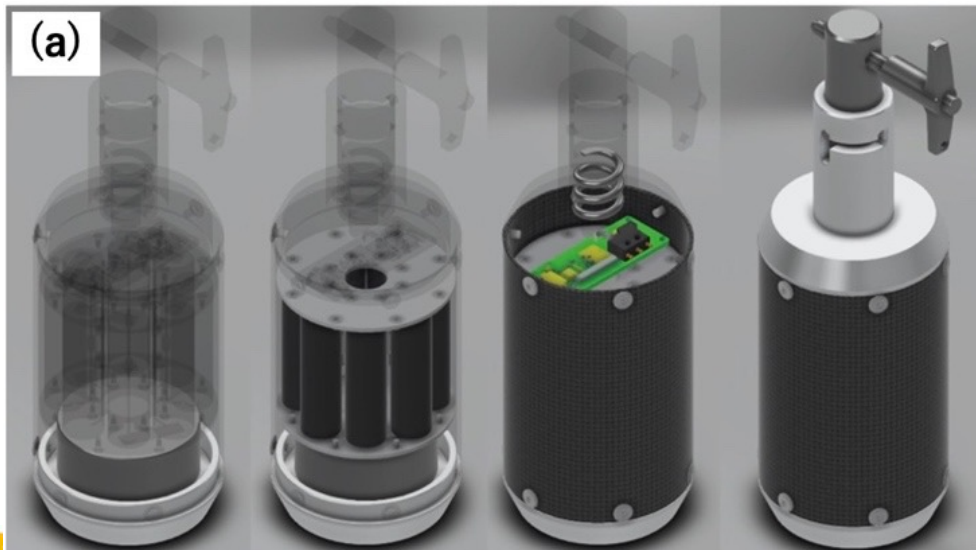


表面波探查によるs波速度



富士山などの探査から必要な震源性能がある程度明らかになったため、月面用にシステムデザイン

- **Weight:** <1 kg
 - **Standalone system**
 - **Total operational cycles:** >100 emissions
 - **Source signal:** Chirp or pseudo-random sweeps
 - **Frequency range:** 10 – 125 Hz
 - **Force output:** 5-10 N
-
- ボイスコイルに対しては真空試験、振動試験、熱試験等を実施
 - 宇宙実績のある電池を利用



Artemis-4を前提に開発

宇宙飛行士用PASS

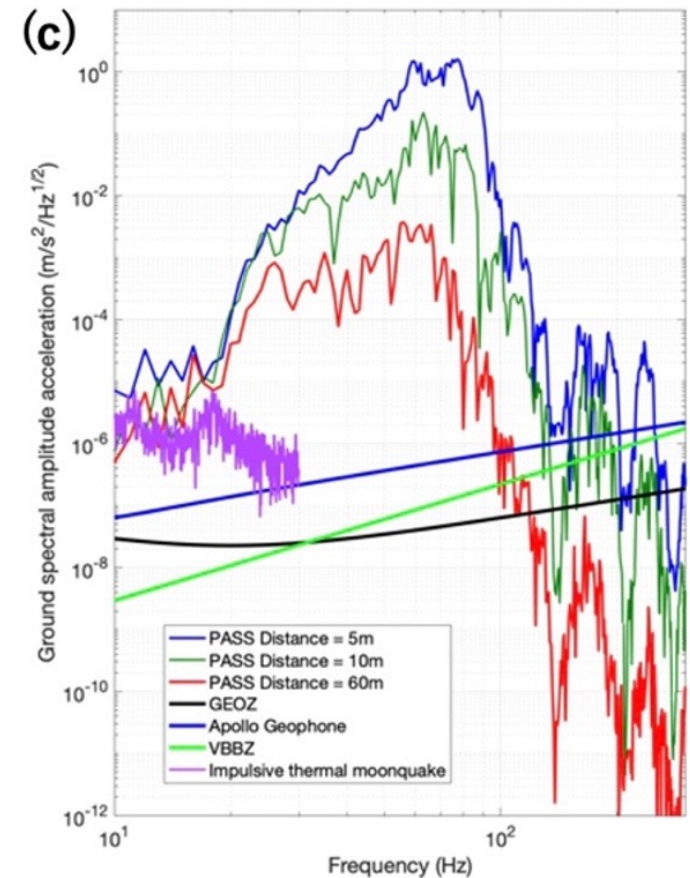
宇宙化したPASS

地球の探査でも利用できるように

月面でのノイズとPASSからの信号を比較



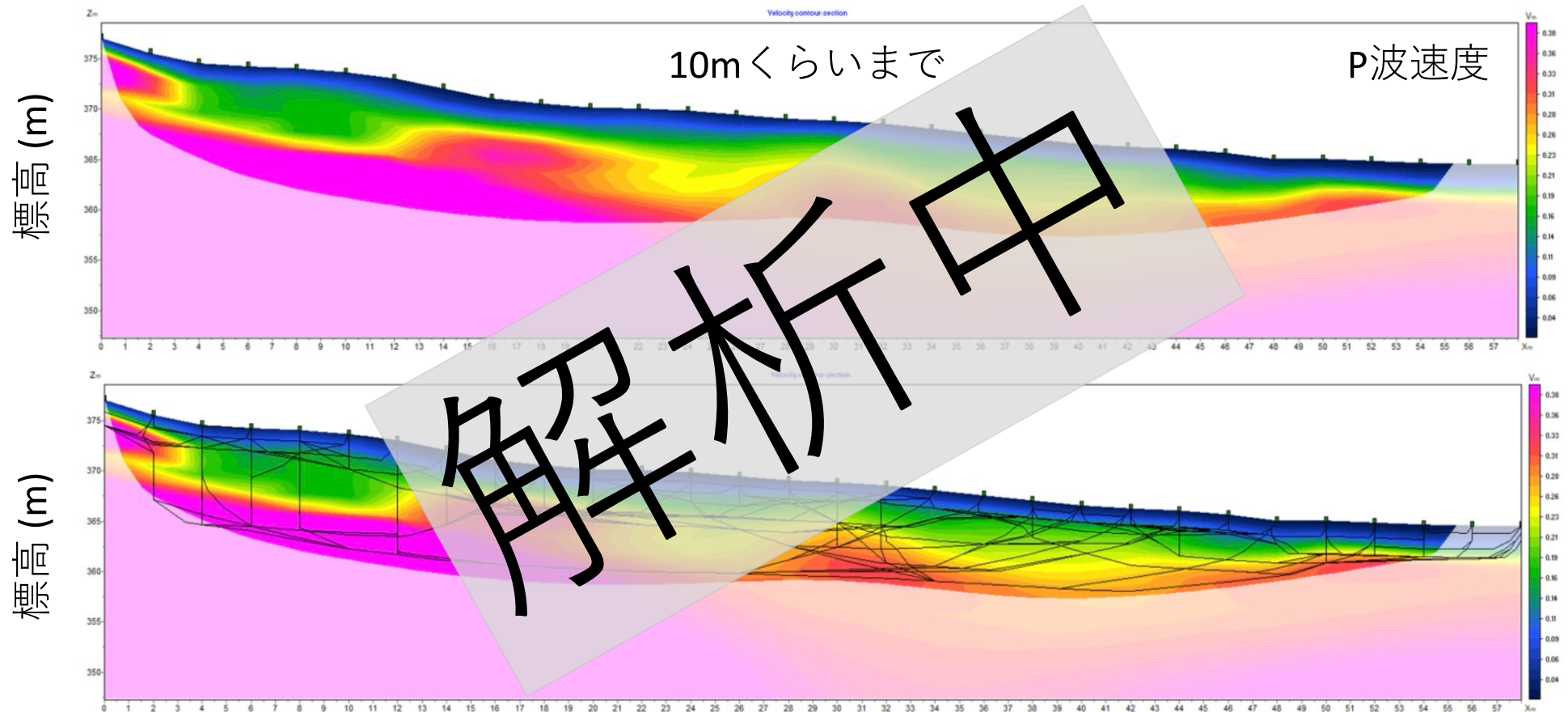
水平距離100m以上信号が伝播



水平距離60m離れても、ノイズレベルよりも圧倒的に信号レベルが高い

大室山での探査

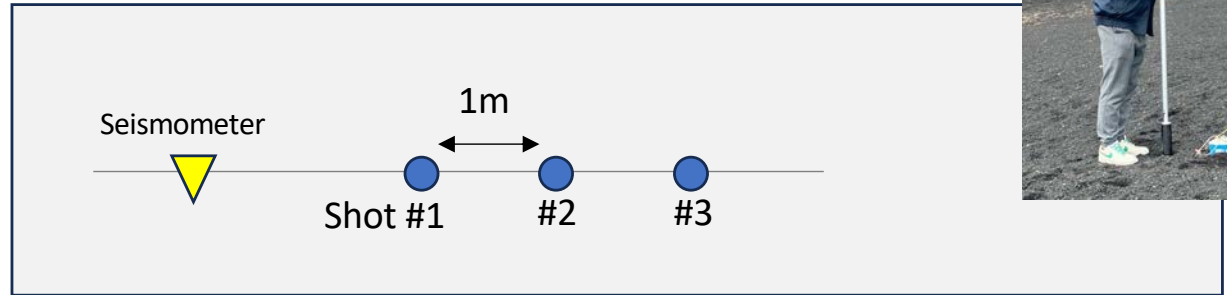
屈折法地震探査



3点で発信した時の結果

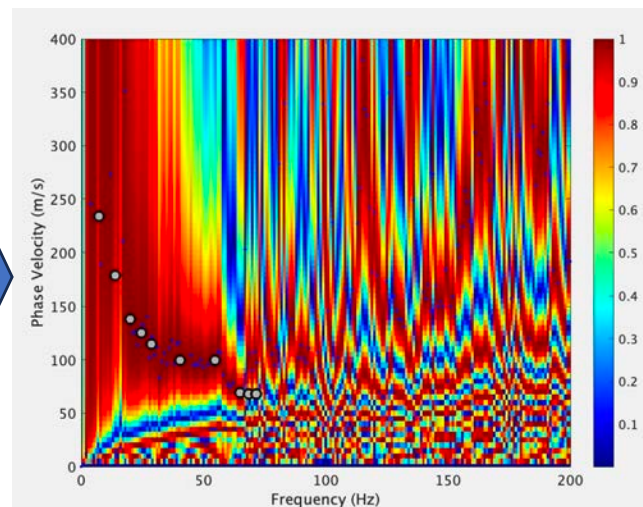
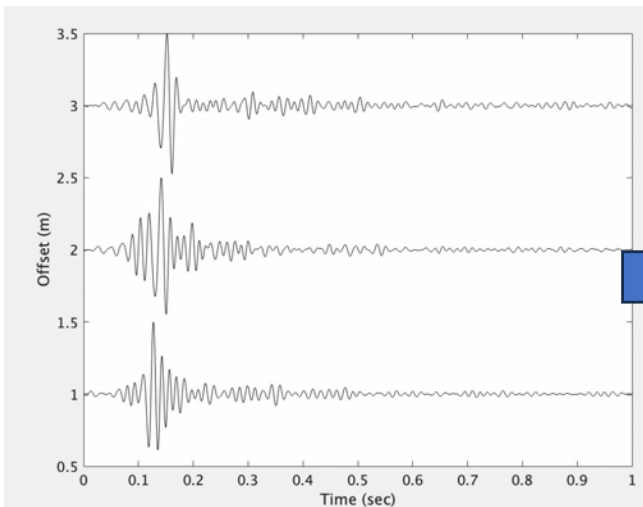
Survey geometry

- Survey line length: 2 m
- Shooting time : 50 s
(5s sweep x 10 times)
- 6分以内に終了

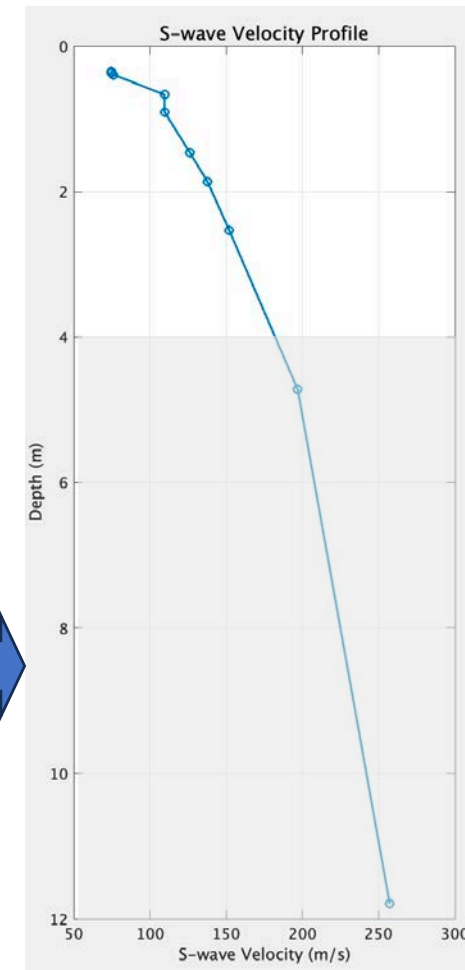


Expected results

- 1D S-wave velocity
 - Investigation depth: 0~3m



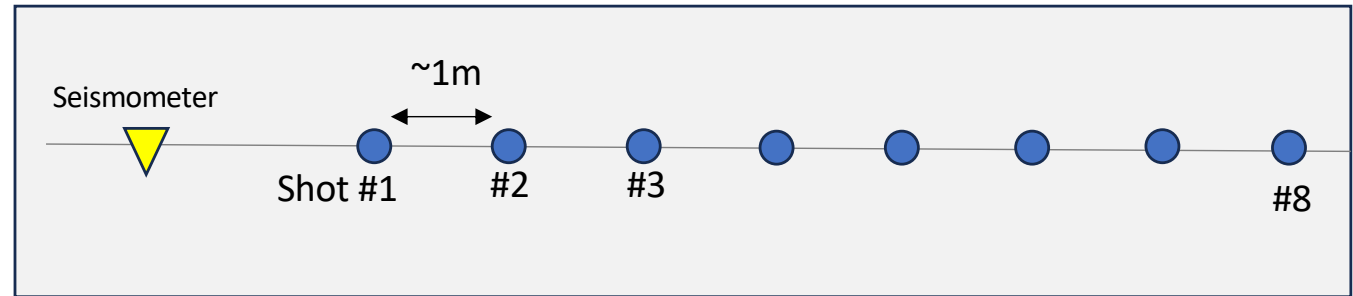
分散曲線



8点で発信した時の結果

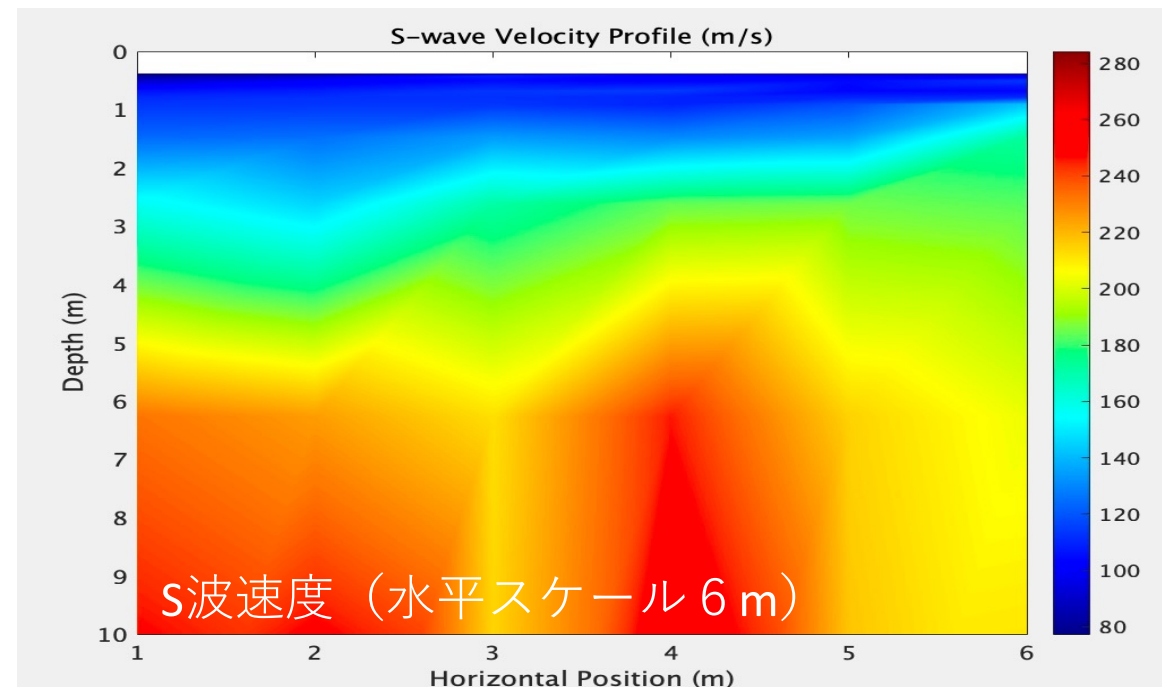
Survey geometry

- Survey line length: ~7 m
- Shooting time : 50 s
(5s sweep x 10 times)
- 16分以内に終了



Expected results

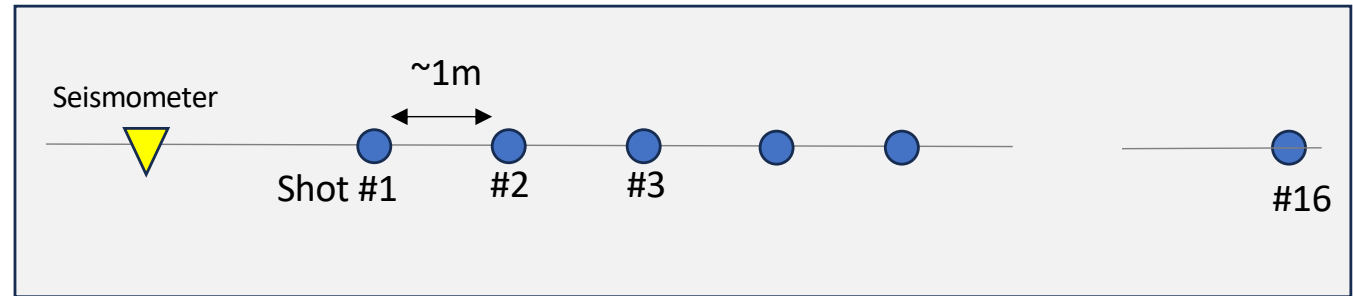
- 2D S-wave velocity
 - Horizontal length 6 m
 - Investigation depth: 0~10m



16点で発信で発信した時の結果

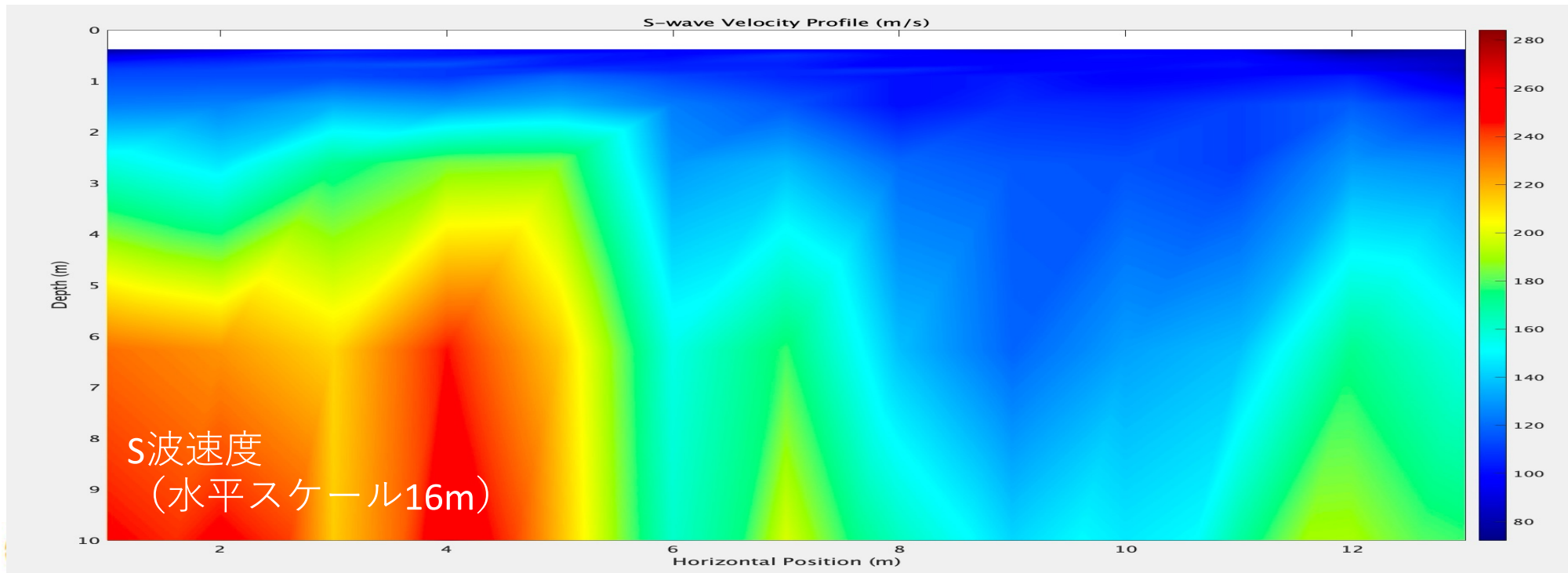
Survey geometry

- Survey line length: 15 m
- Shooting time: 50 s
(5s sweep x 10 times)
- 30分以内に終了



Expected results

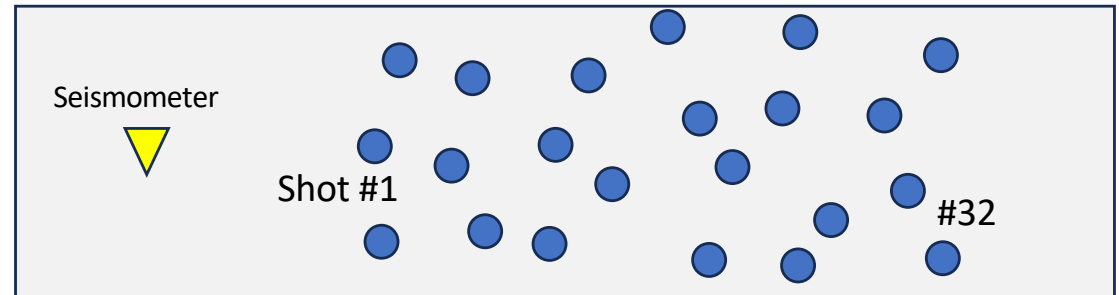
- 2D S-wave velocity
 - Horizontal length 13 m
 - Investigation depth: 0~10m



三次元的にランダム32点で発信した時の結果

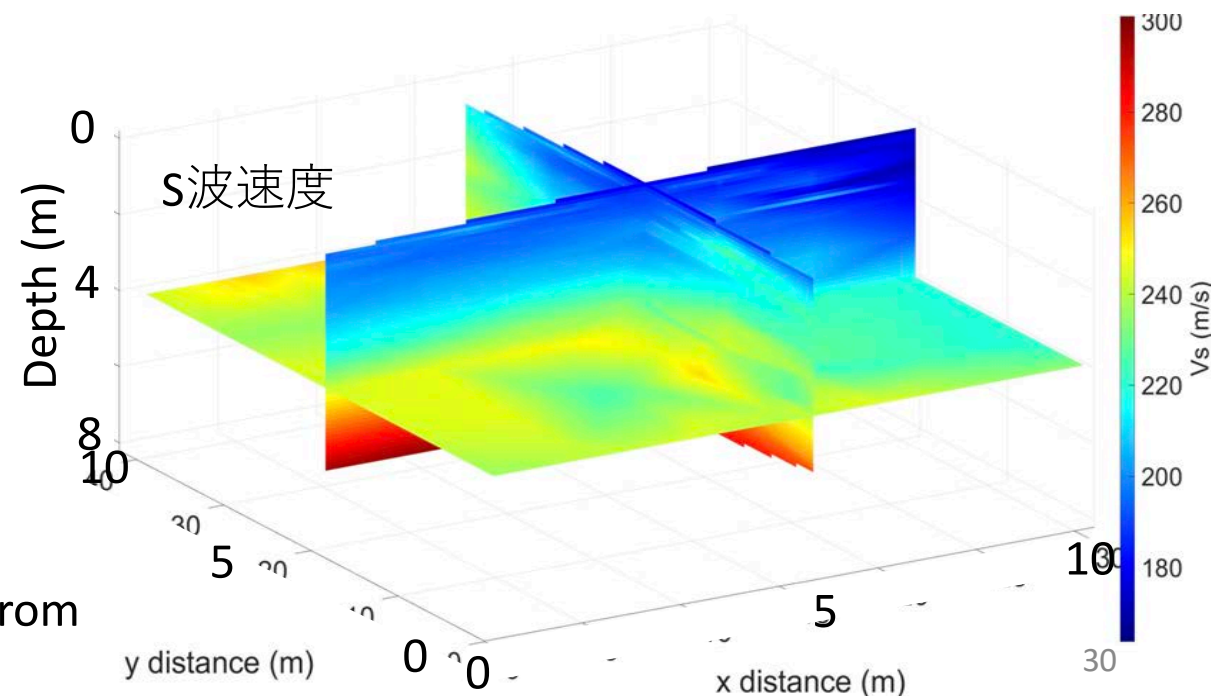
Survey geometry

- Shot positions: 32
- Shot interval: random
- Survey line length: 3D
- Shooting time : 50 s (5s sweep x 10 times)
- 1 時間以内に終了



Expected results

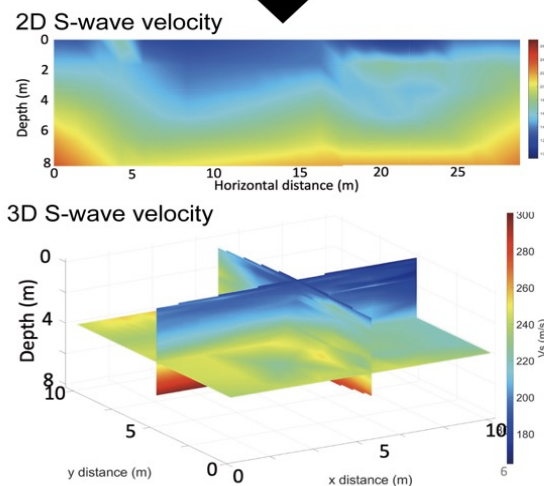
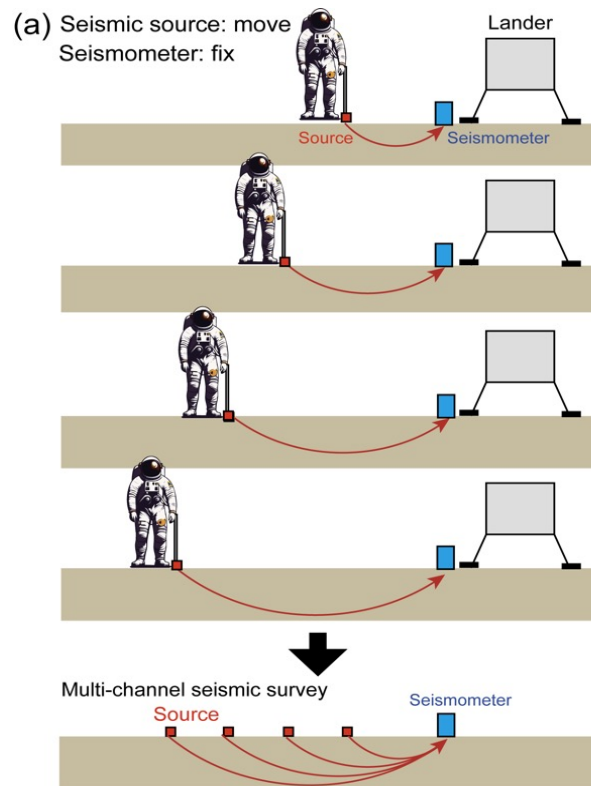
- 3D S-wave velocity
 - Horizontal length 10 x 10 m
 - Investigation depth: 0~10m



This result is not from
the Fuji survey

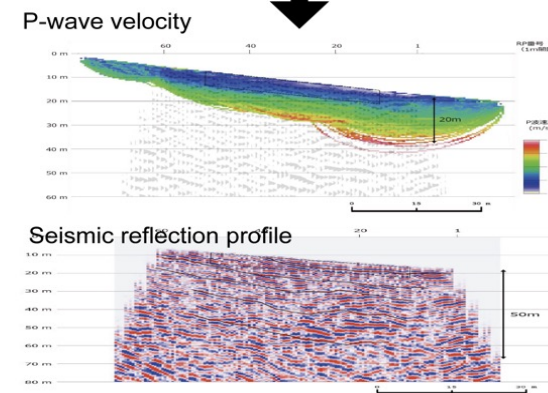
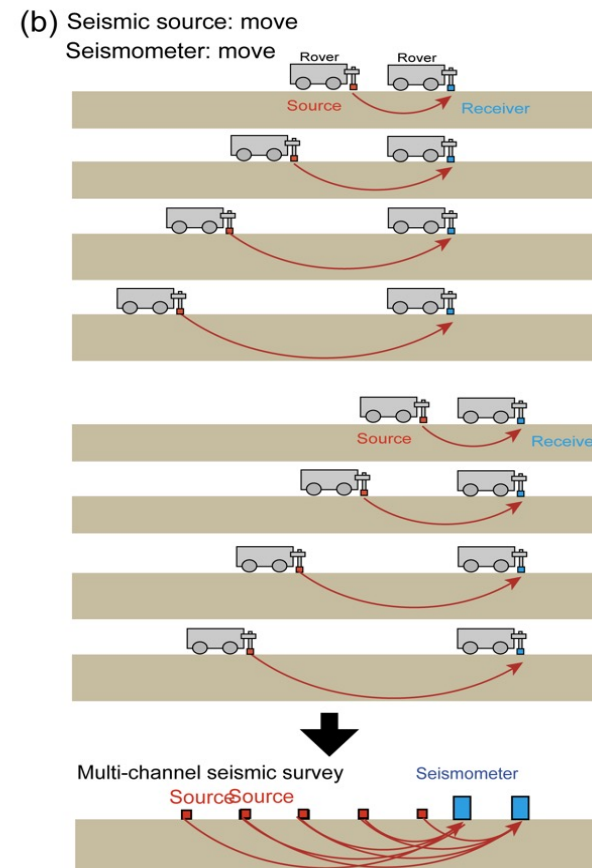
もっと地下の構造を高い精度で深くまで知りたい：実体波の利用

震源または地震計の片方が固定 → 震源と地震計の両方が移動



地表に沿って
伝播する表面
波を利用した
表面波探査

- S波速度



実体波を利用
した反射法地
震探査、屈折
法トモグラ
フィ

- 反射断面図
- P波速度

震源用ローバと地震計ローバを構築

富士山での試験

地震計→

PASS震源→



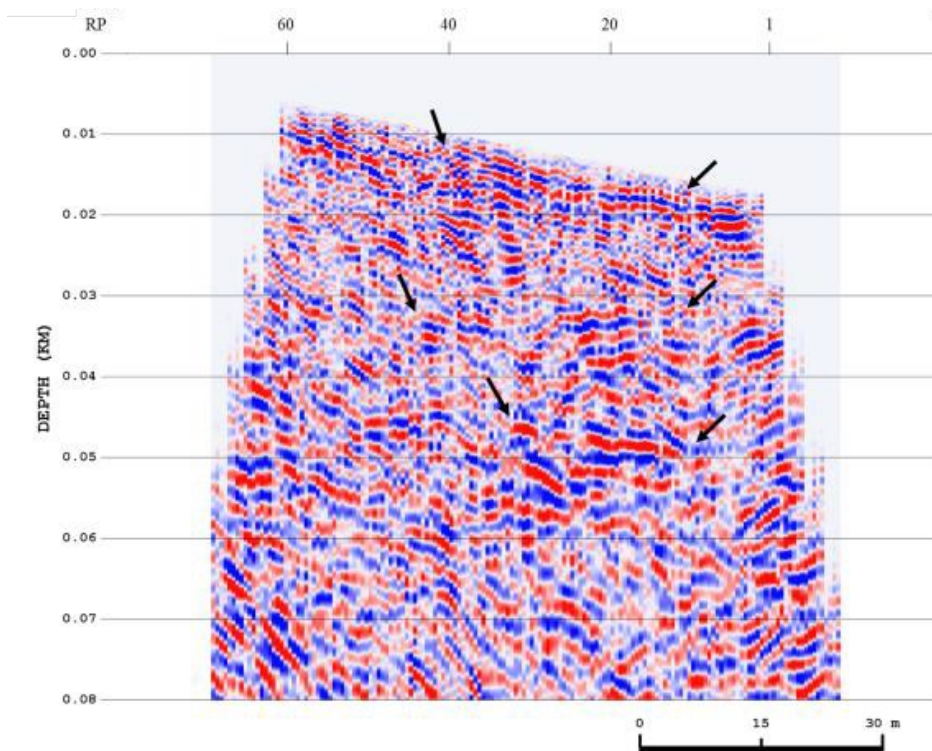
震源コントローラや地震計データロガーなどを小型化し、小型ローバにも搭載可能に

震源重量（controller込み）：500g程度
地震計重量（データロガー込み）：300g程度

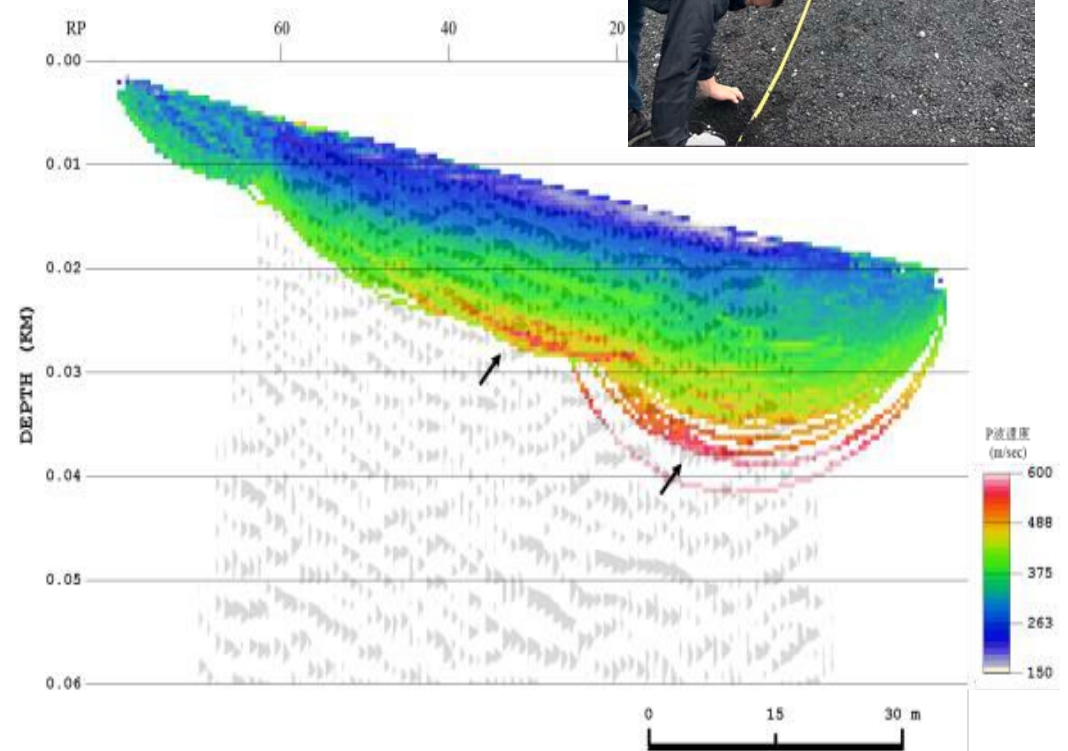
震源と地震計の両方が移動

PASSを利用して富士山山麓を探查

反射断面図



トモグラフィによるP波速度



- 反射断面図：深度100m程度まで可視化可能
- P波速度と（表面波からえられる）S波速度からポアソン比分布を推定可能

For the exploration of deeper subsurface structures

Larger PASS source for larger rover

- Investigate deeper geological formation (~10km depth)
- The seismic profile similar to the earth could be obtained

Deployed by astronaut or small rover



Source

Force: <10 N

Deployed by large rover

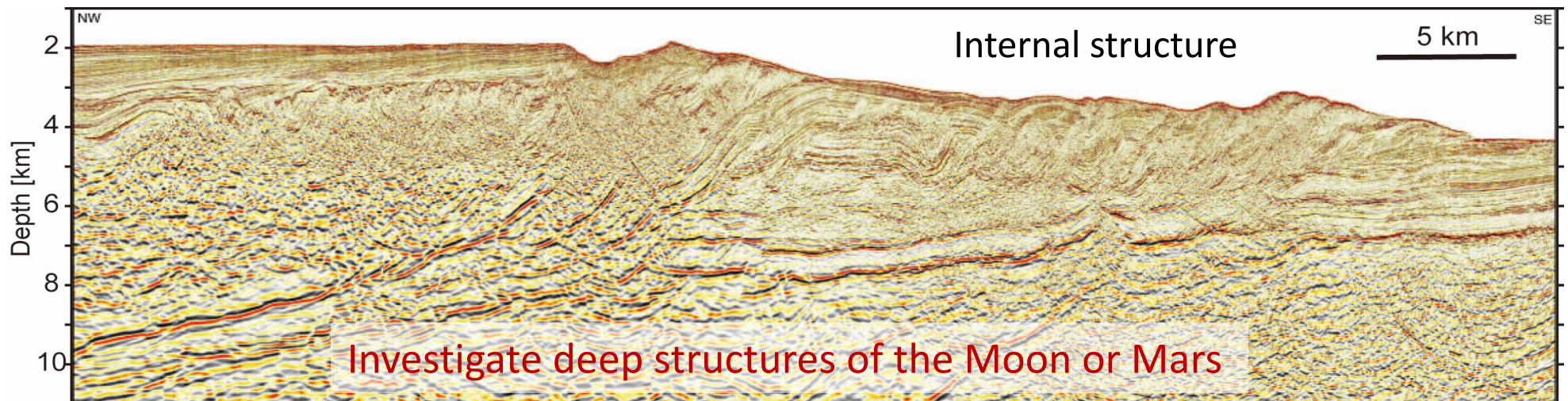


Force: ~1000 N



Landward

Seaward



Internal structure

5 km

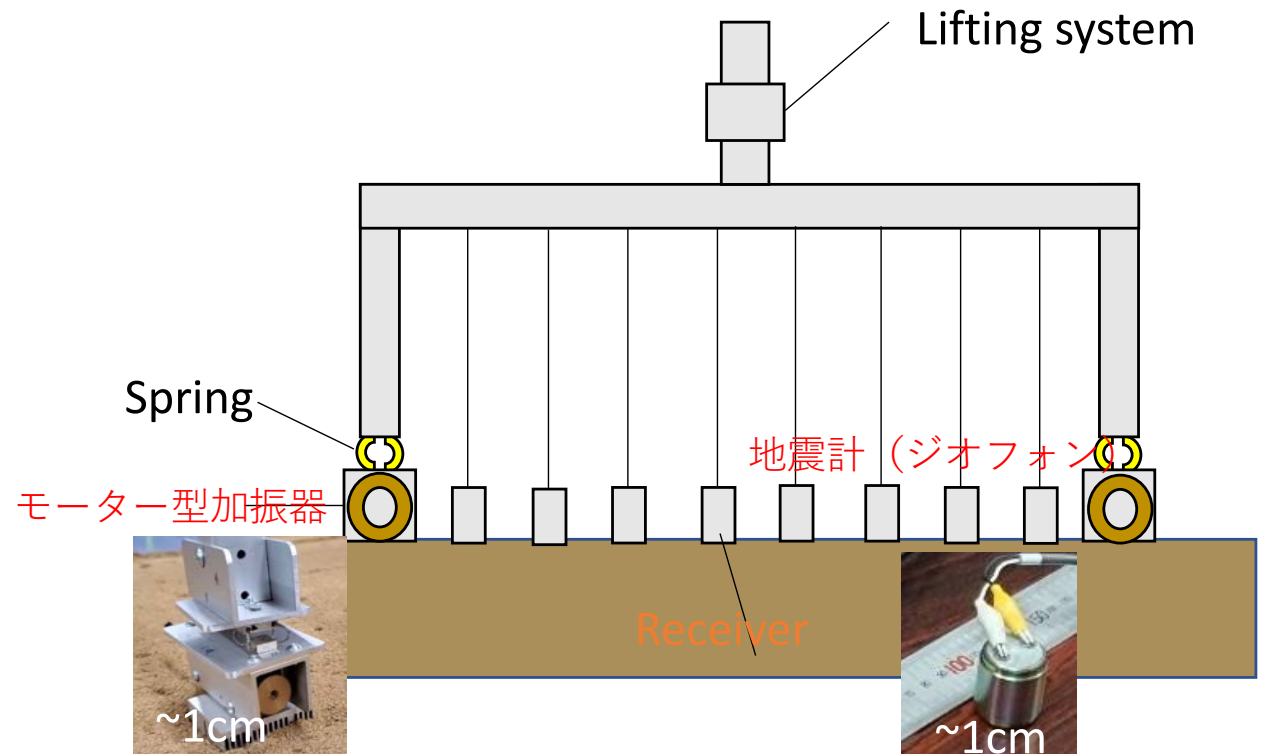
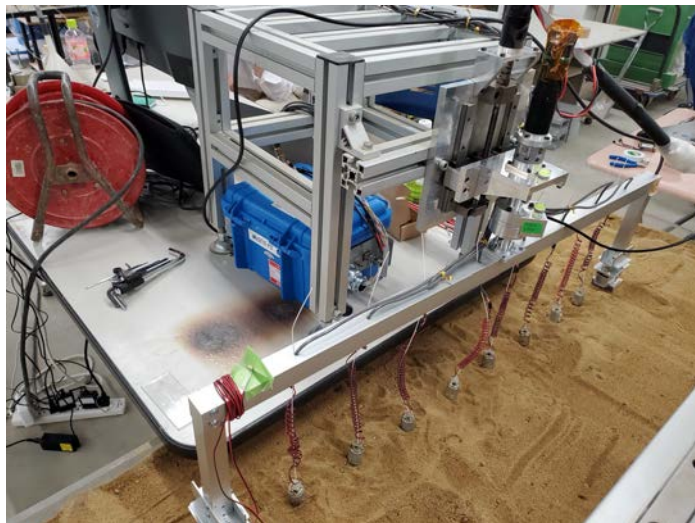
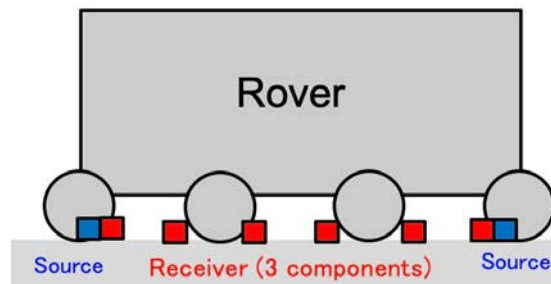
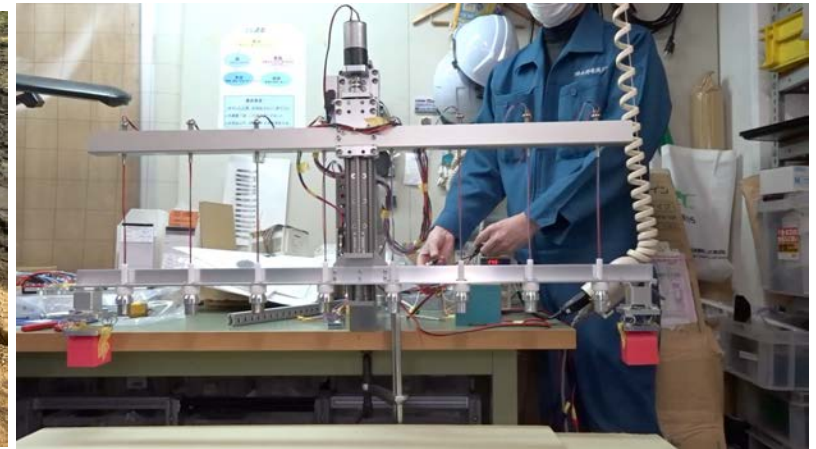
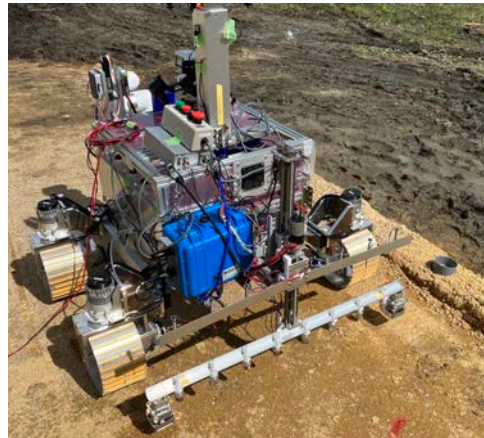
Investigate deep structures of the Moon or Mars

小型アレイ型のアクティブ地震探査システム (小型ローバー1台があれば探査できる)

ローバーに設置

- Length: 0.5 m - 1m
- Receiver: 5 – 10 geophones

国交相の「宇宙無人建設革新
技術開発推進プロジェクト」



フィールド試験

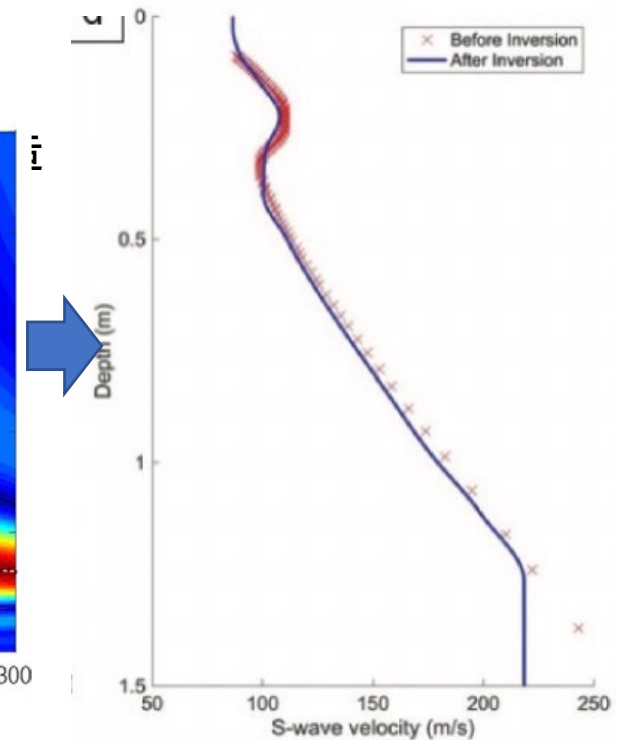
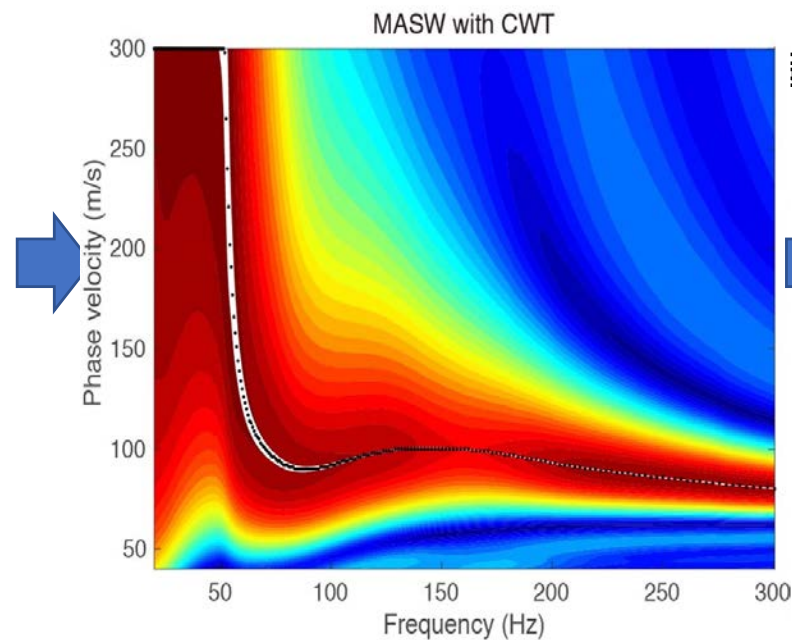
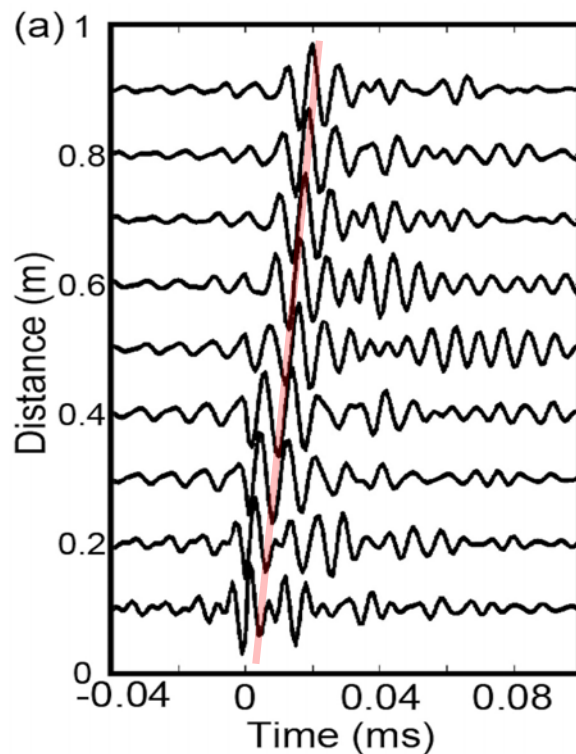
砂浜で試験を実施

- 1.5 mくらいまでのS波速度構造を表面波探査で推定



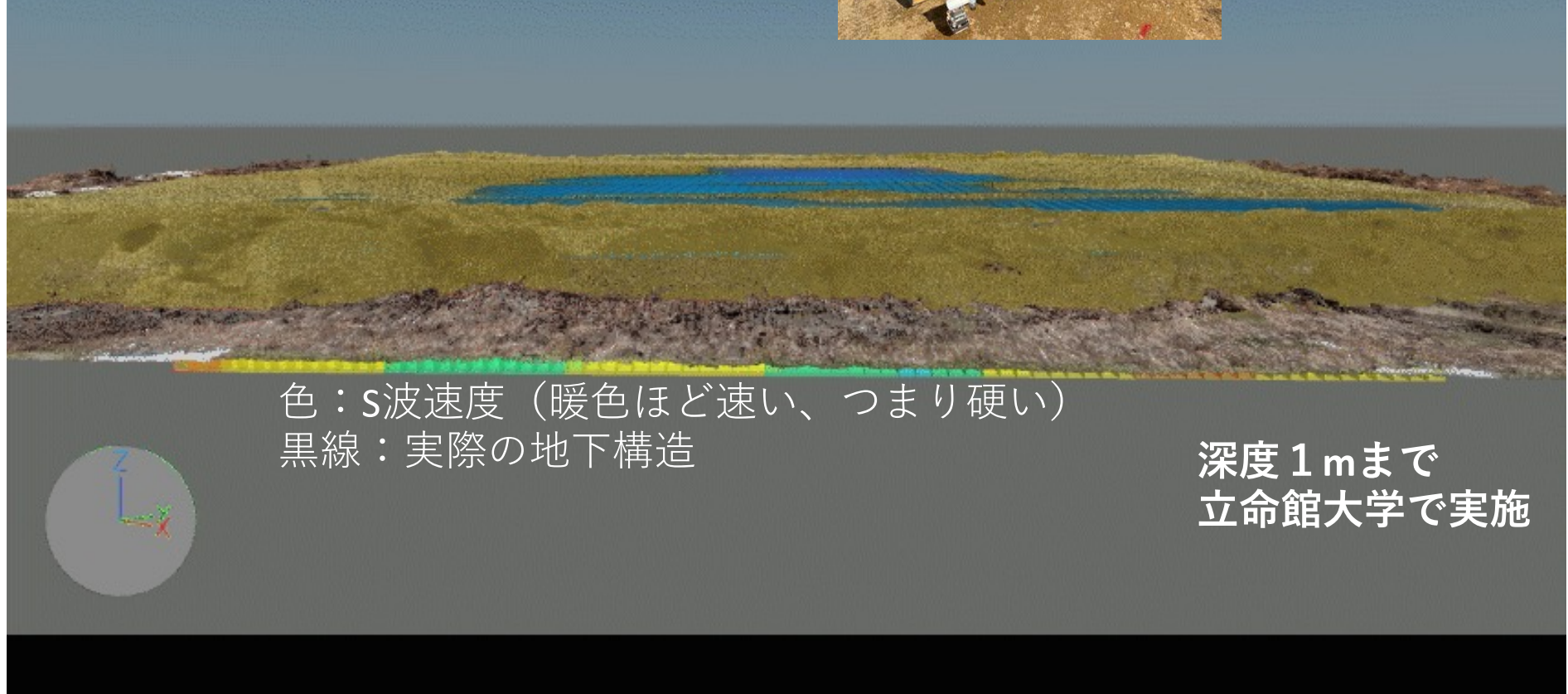
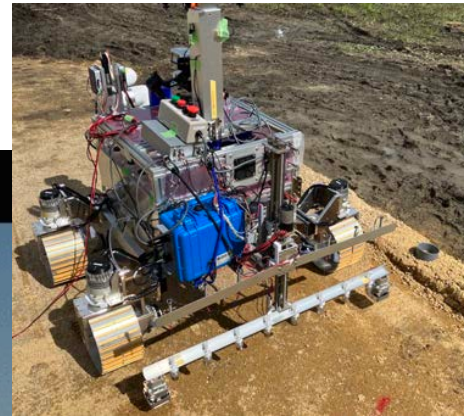
Tsuji et al. 2023 ICARUS

波形記録

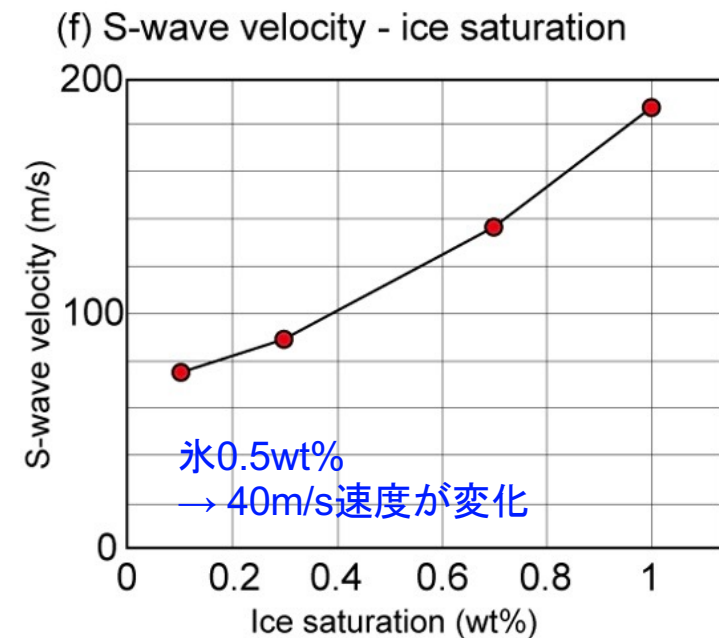
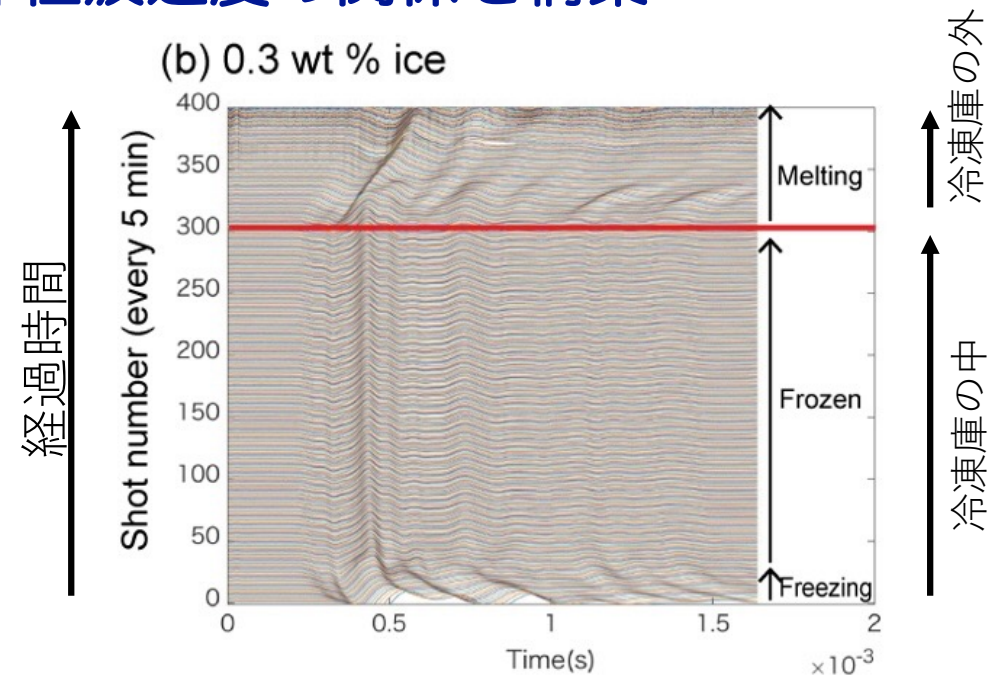
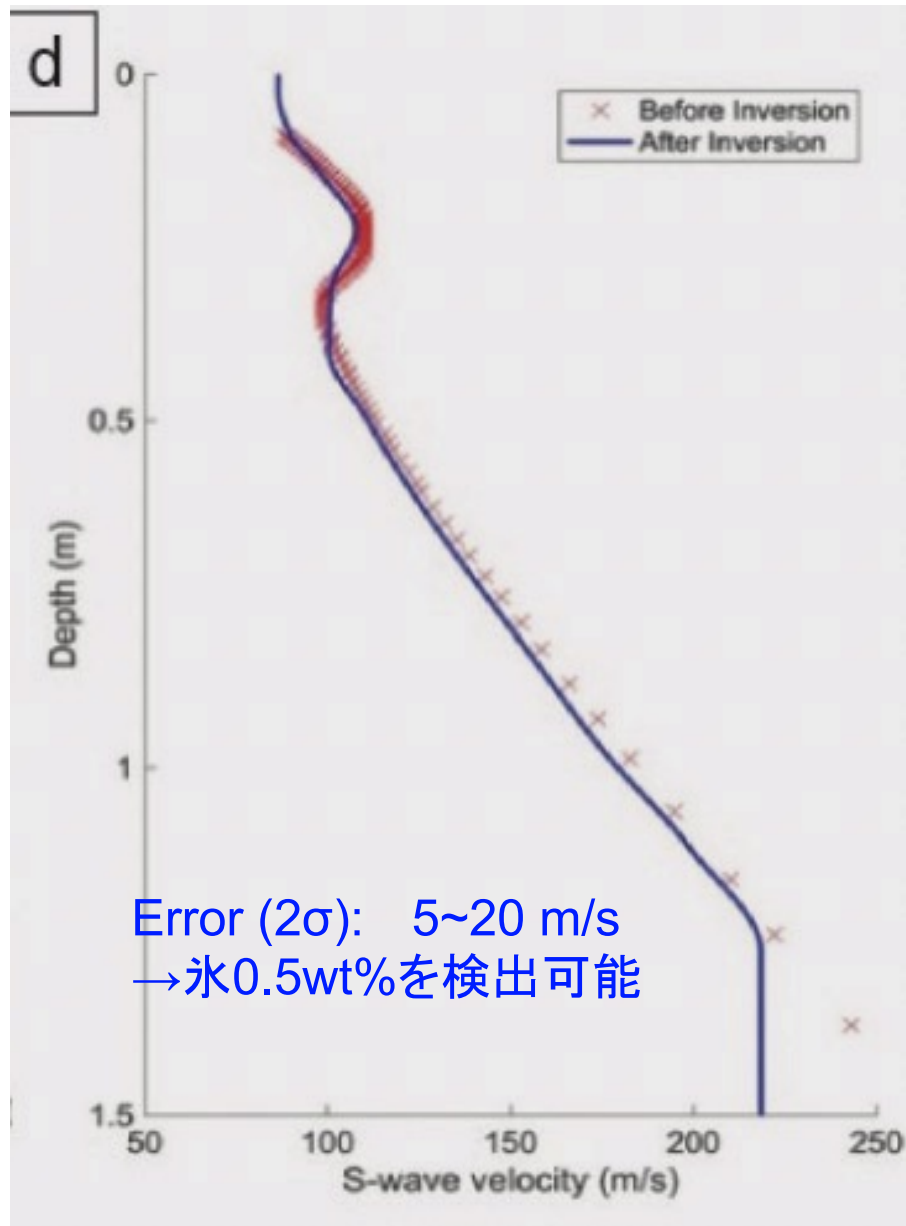


Error (2σ): 5~20 m/s
→氷0.5w%を検出可能

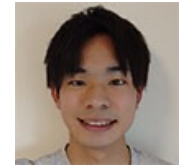
表面波探査によるS波速度構造と実構造の比較



本当に氷などがあれば分かるの？ 実験で氷含有率と弾性波速度の関係を構築



弾性波速度から氷飽和度を推定する方法： デジタル岩石物理を用いたアプローチ

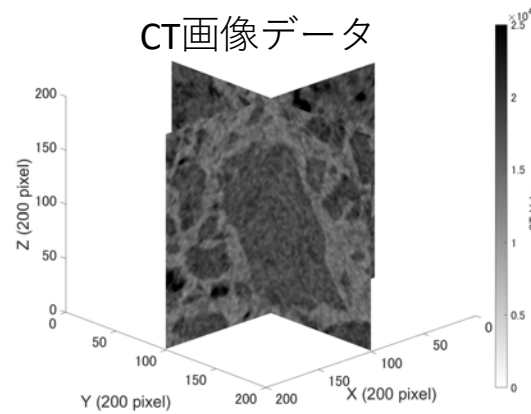


Kunimasu et al., 2023 Icarus

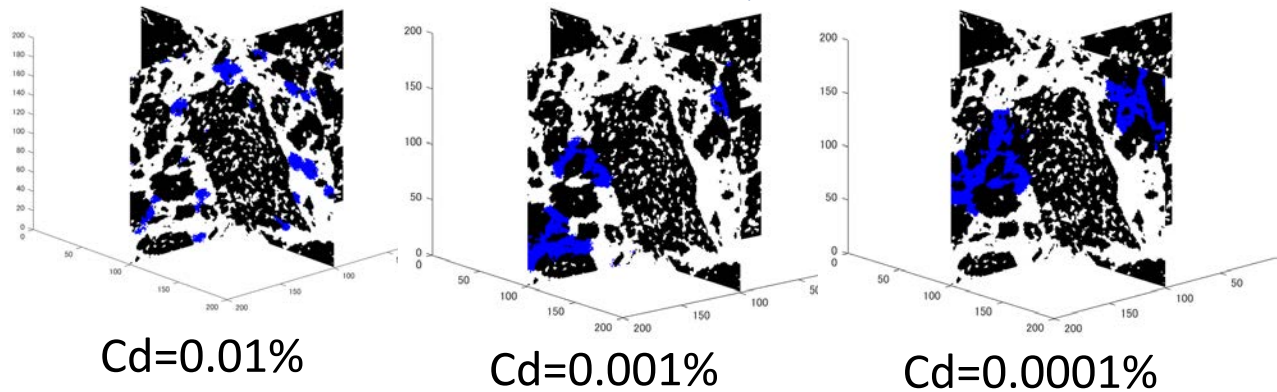
本研究で用いたレゴリスシミュラント



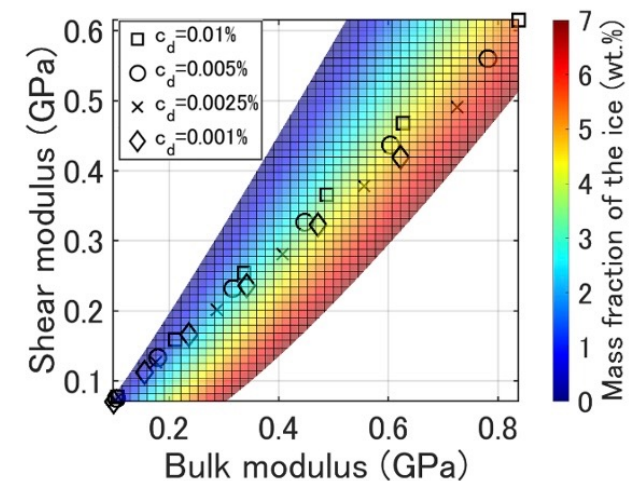
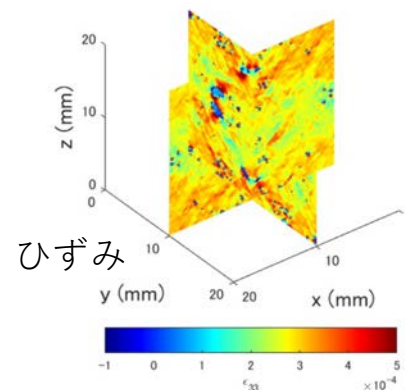
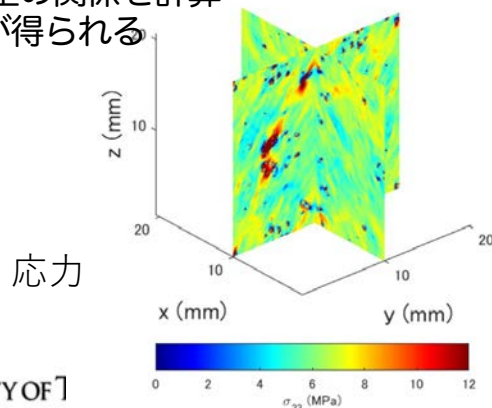
CT画像データ



シミュレーションで氷を析出



FEMで応力と歪の関係を計算
→弾性波速度が得られる



微小アレイをドローンに 搭載した探査も可能に

- 宇宙探査のおかげで、地球でもドローンを使った自動探査装置を開発できた

Tsuji et al. 2021 SEG Drone summit

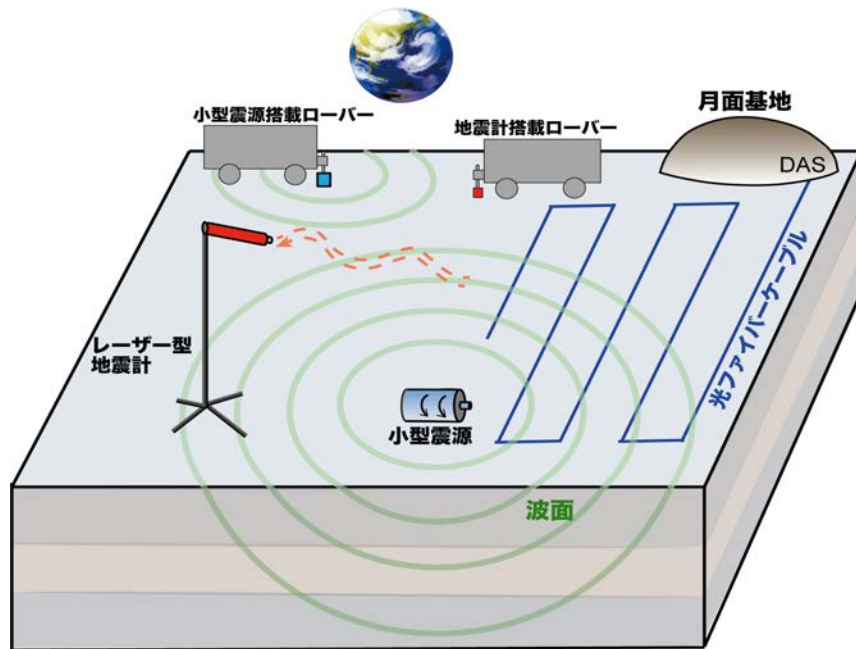


Six receivers and one source in a ~1.5 m array.



Six receivers and one source in a ~1.5 m array.

最近の探査技術・解析技術の進歩



機器

- 光ファイバセンシングの装置 (DAS) を独自開発
- レーザー型地震計
- ポータブル地震計
- ポータブル震源装置PASS

解析方法

- 波形インバージョン
- 表面波探査の高次モードの利用
- AIによる自動解析

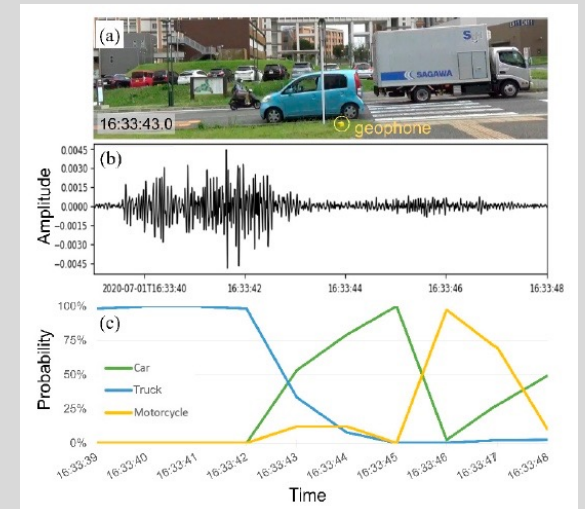
地震や噴火予測

阿蘇山に設置したセンサーの連続モニタリングデータを機械学習で学習すれば、噴火を70%以上の精度で予測できる (Ideno and Tsuji, 2025)



社会活動モニタリング

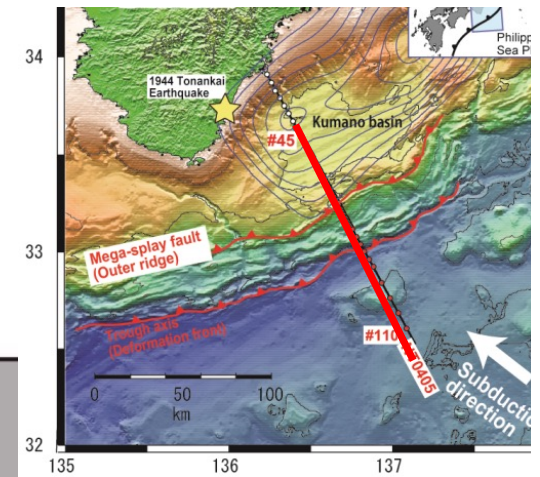
地震計データからAIを使って車種と台数をリアルタイムに推定



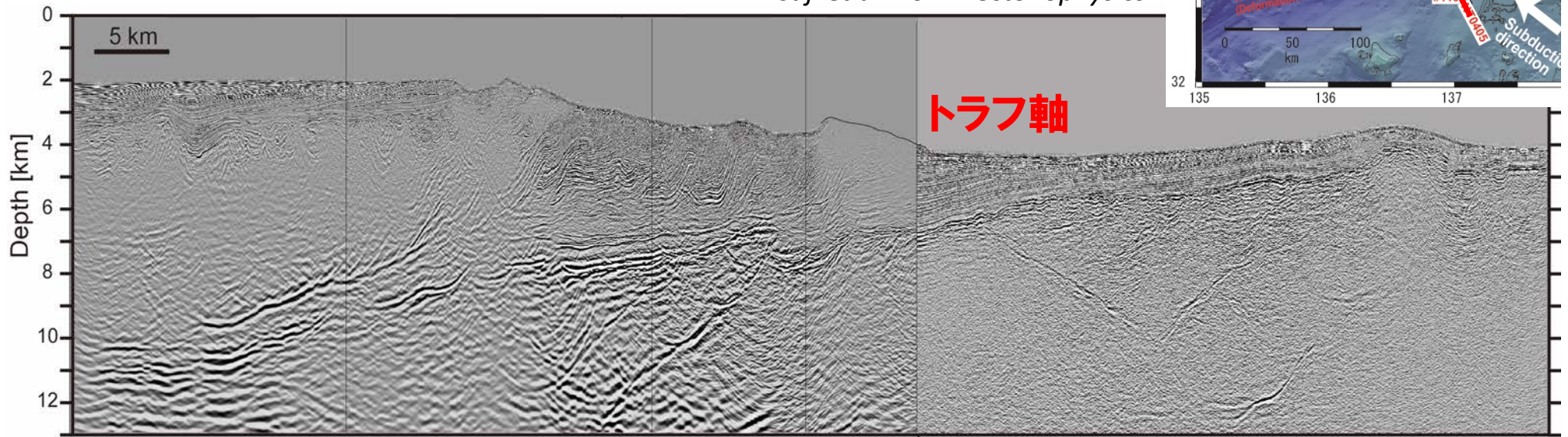
Final goal: このような構造を月面で取得

南海トラフで実施した探査結果

Tsuji et al. 2017 Tectonophysics



← 紀伊半島側



M/V Nordic Explorer ← → R/V Kaiei

