

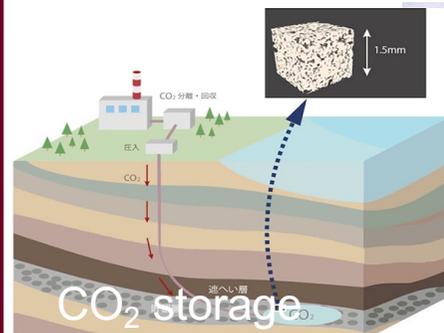
光ファイバー型地震計（DAS）等のセンサリング技術や機械学習を用いて地盤や社会活動をモニタリングする技術

辻 健

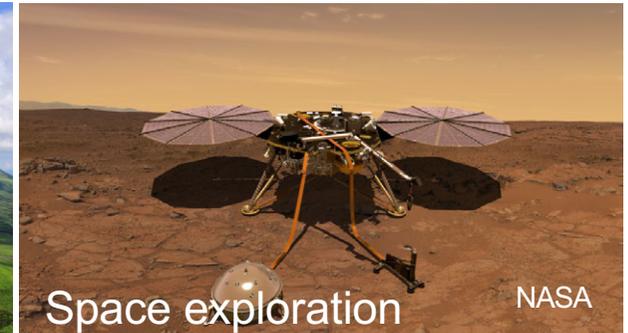
九州大学 大学院工学研究院 物理探査研究室
カーボンニュートラル・エネルギー国際研究所



For Climate Change Reduction



Exploration for Frontier Resources and Energy



物理探査研究室での活動

地下を見る

- 日本周辺の新しいガス貯留層
- メタンハイドレート
- 地震断層・火山

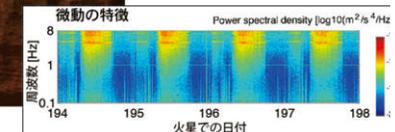
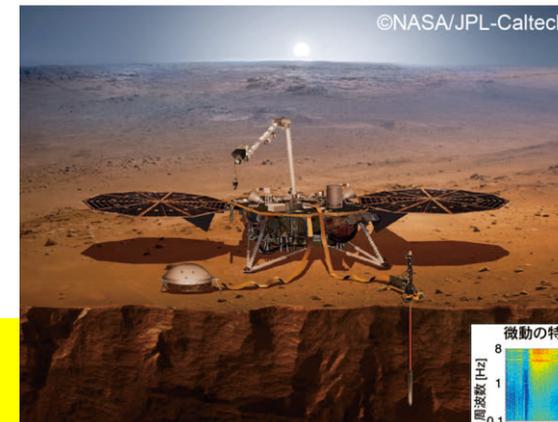
動きを捉える

- 地震・火山のモニタリング
- 資源貯留層モニタリング
- CO₂やメタンの地下挙動モニタリング

フロンティア域での探査

- 深海資源探査
- 月・惑星探査
 - 地震計データの解析

- 地下の構造を調べたり、地下の動きをモニタリングすることに興味を持っている



Suemoto et al., 2020

カーボンニュートラル・エネルギー国際研究所 (I²CNER) マルチスケール構造科学ユニット

地球システム内でうまくCO₂をマネージメントすることが目標

- ・ 地球には多くの炭素（例えばCO₂やメタン）が存在し、その多くが地中にあるが、人間はその炭化水素を使い、大気中のCO₂濃度が高くなった

I²CNERでの我々のグループのプロジェクト

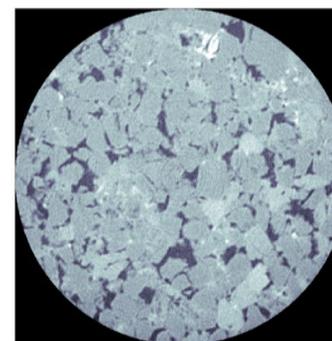
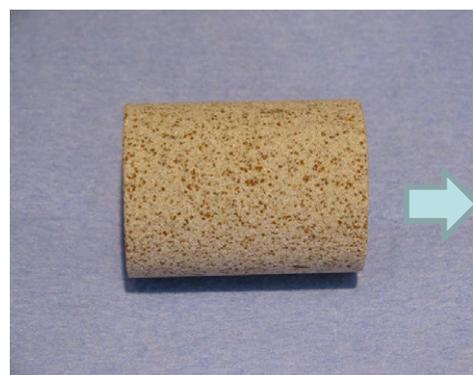
- 大気中のCO₂回収し、地中貯留（CCS）することで、大気中CO₂濃度を下げる（大気→地球内部へ）
- 水素の地中貯留
- 地熱発電



近年の急速な技術の進歩

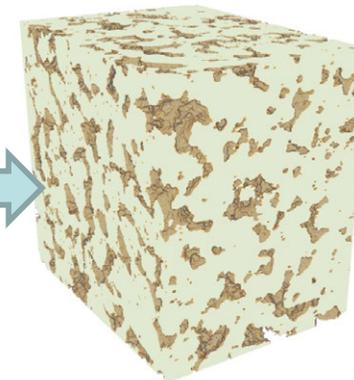
- 目覚ましい探査技術の進歩、解析手法の発達、イメージング技術の発達、計算能力の向上

イメージング技術の進歩による岩石のモデル化



Black: pore

不均質な岩石をモデル化
デジタル岩石



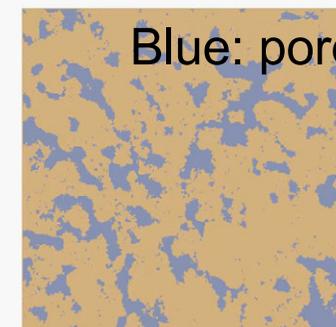
計算能力の向上



モデリング手法の開発



間隙内の流体挙動 (Tsuji et al. 2016)



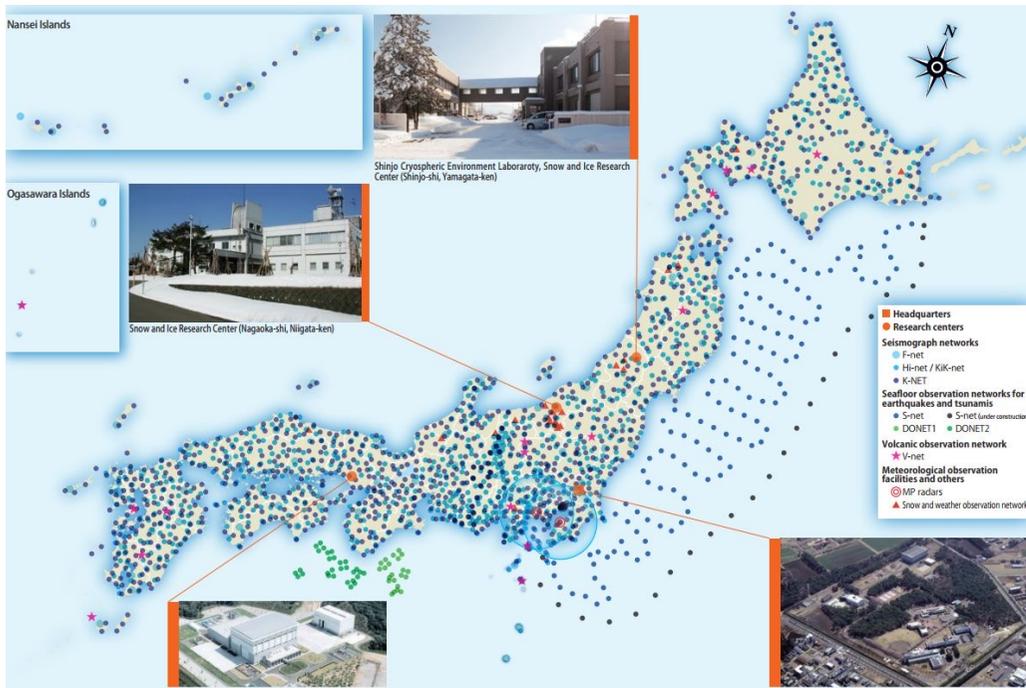
Blue: pore

鉱物化モデリング (Jiang and Tsuji, 2014)

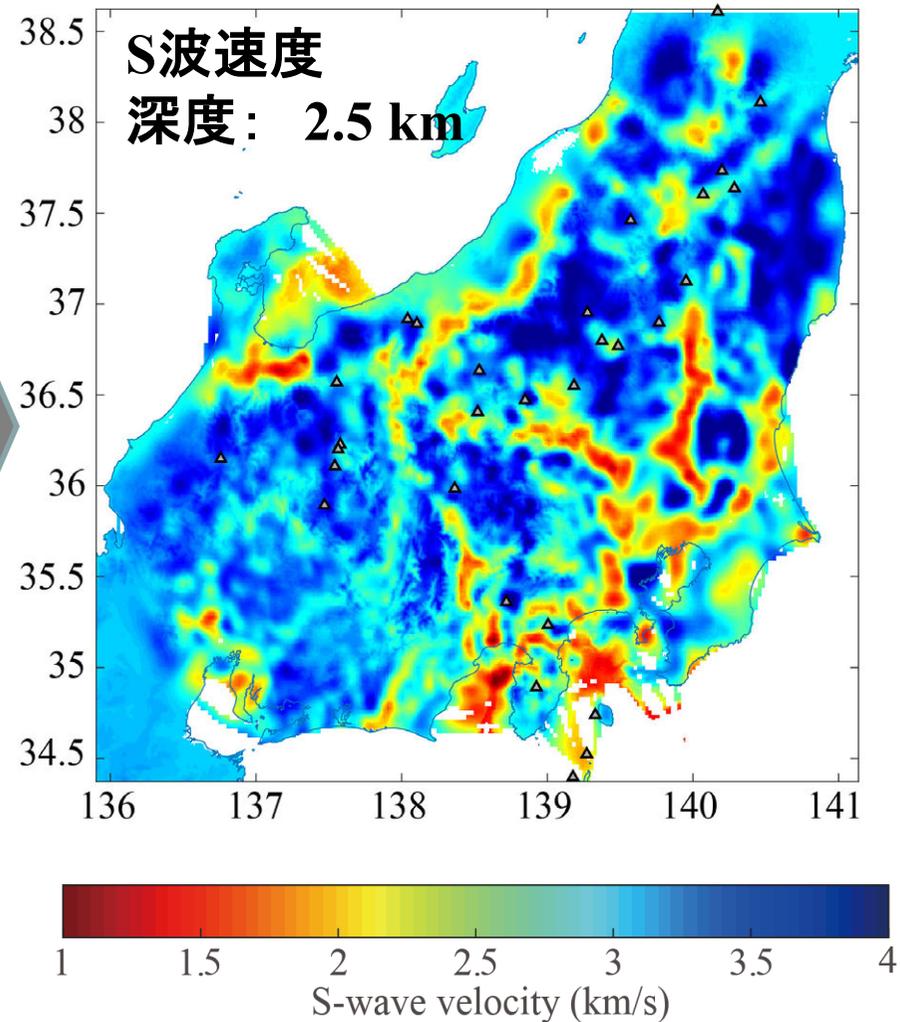
豊富な地震探査データ・モデリングデータ： センサリング技術・ビッグデータの解析技術の進歩

解析手法の発達

Many seismometers around the Japan



微動や自然地震は常に計測されている



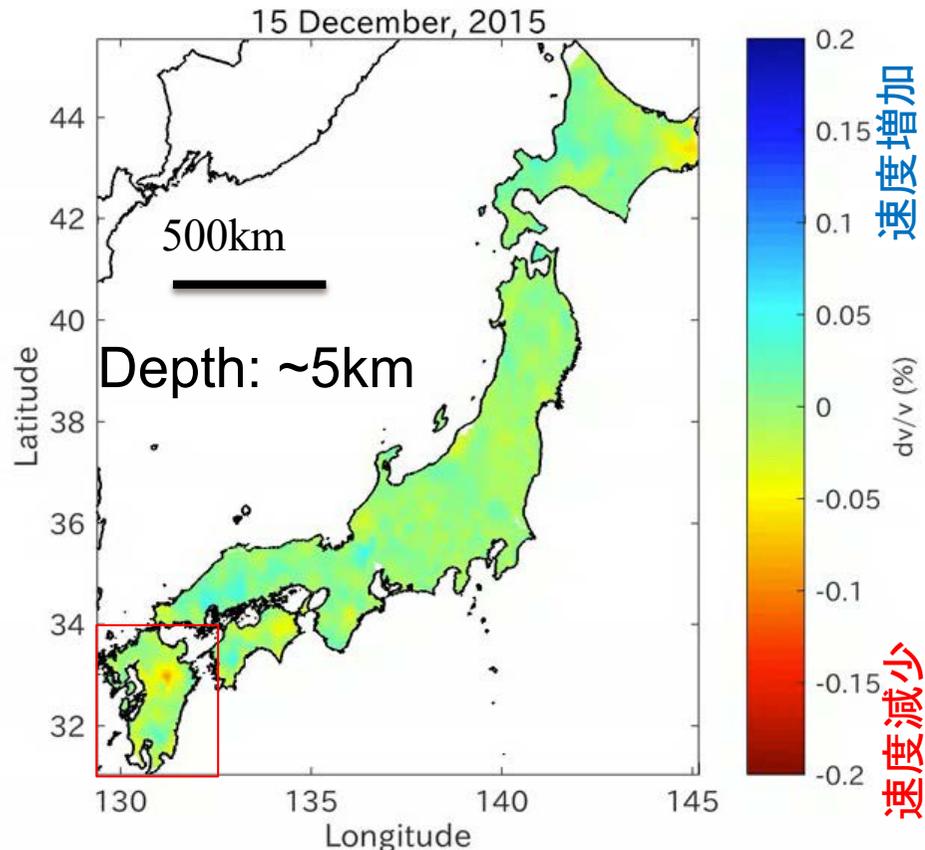
Nimiya et al., 2020 J. Geophys. Res.

➤ このS波速度の時間変化を調べれば、

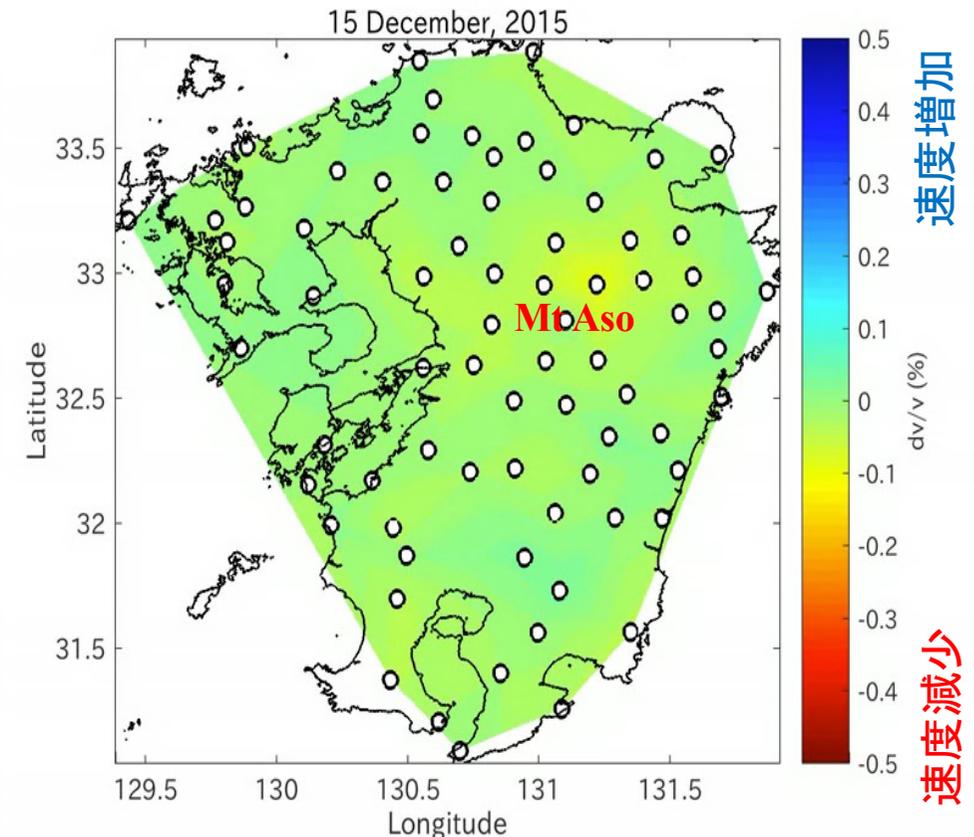
日本全国の地殻をモニタリング： 熊本地震に適用した結果

Nimiya et al., 2017
Science Advances
doi:10.1126/sciadv.1700813

S波速度の時空間変化



深度5kmの弾性波速度の変化 (地盤の硬さの変化)



地震でダメージを受けた場所、次に地震が起こりそうな場所を推定

➤ 巨大な連続データを解析・解釈には、数学的手法やAIが必要となる

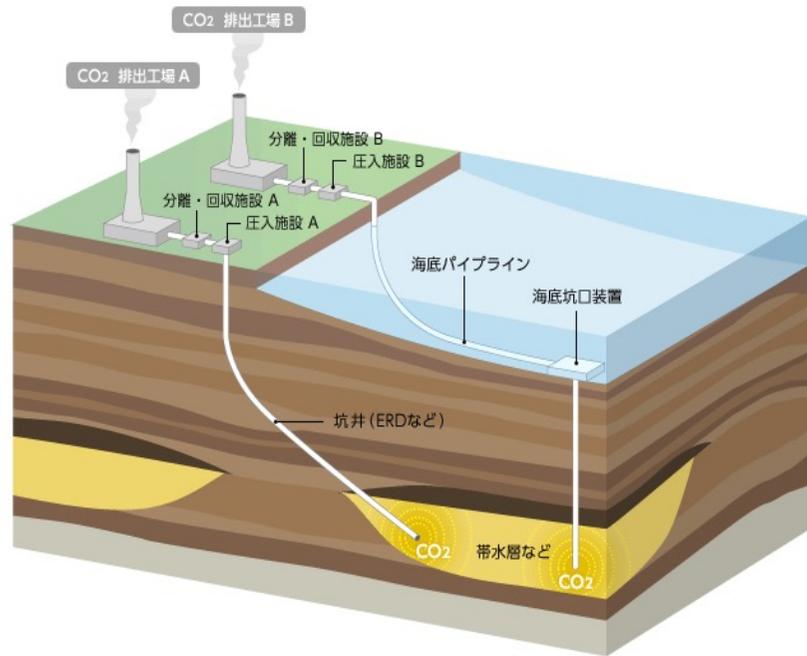
今日の話題

- ・ 最近の技術（DASと小型震源装置など）を用いたモニタリング
 - CO₂地中貯留でのモニタリング（この話題を中心に）
 - 浅部地層・人工構造物のモニタリング（地滑り地域など）
- ・ 機械学習を用いたデータ解析・解釈の自動化
 - 反射法地震探査断面図を自動的に地質解釈
 - 多数の物理探査データを融合して堤防内部を推定
 - デジタル岩石モデルから自動的に物性計測
 - 社会活動のモニタリング（交通量と車種の自動測定など）

二酸化炭素の回収・地下貯留 (CCS)

- 現在の技術で実現可能 (近未来的な方法)
- ポテンシャルがある
- コストは？安全性は？

CO₂回収・貯留の概念図



※ERD: Extended Reach Drilling (大偏距離掘削)

- 日本周辺だけで1000億トン以上のCO₂を圧入する地層
- 日本のCO₂排出量の100年分に相当



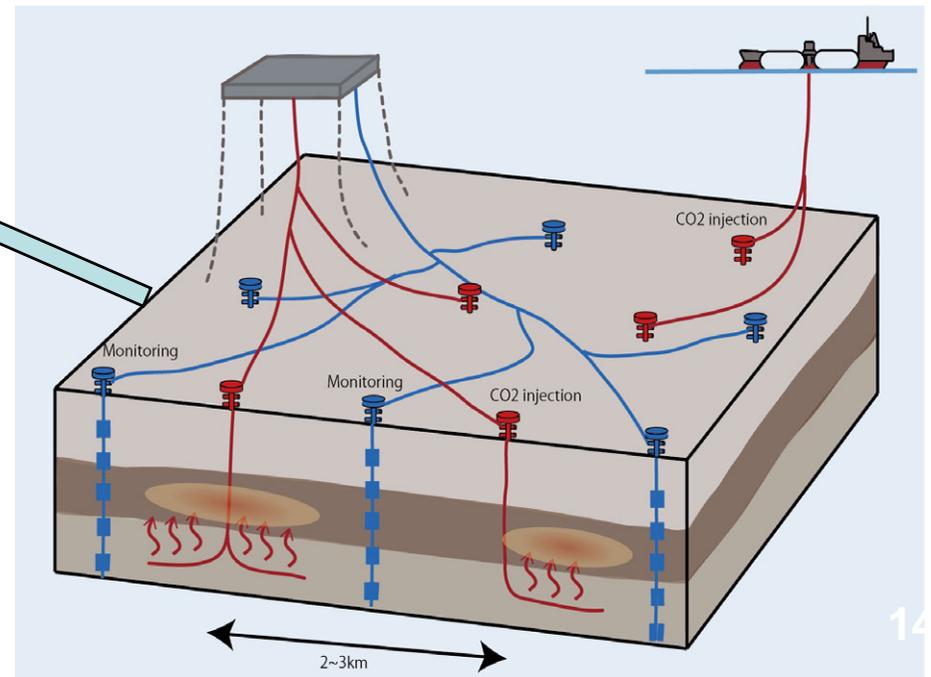
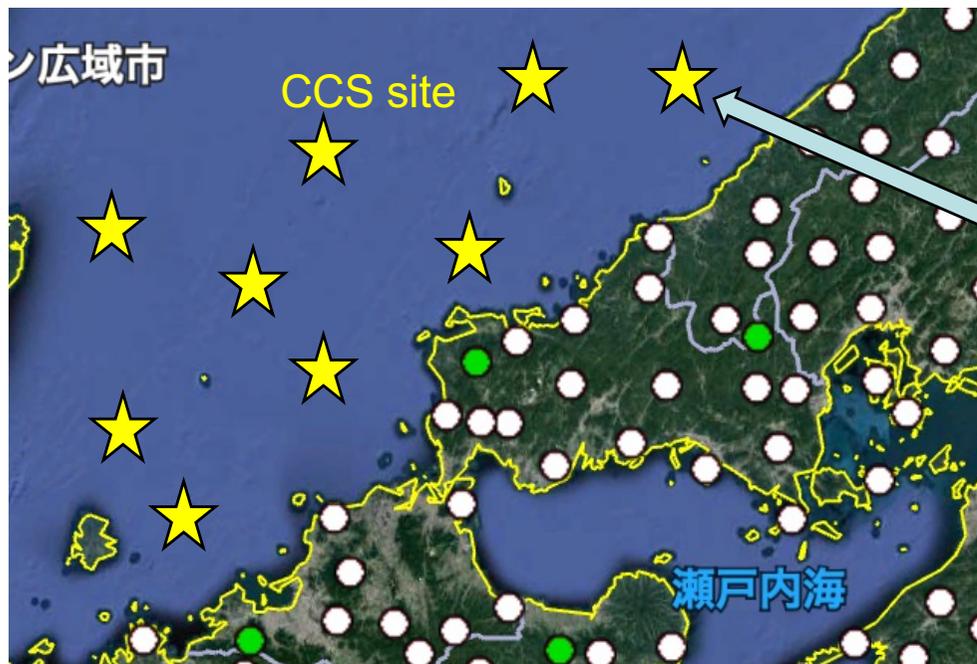
改良すべき点

- 1トンのCO₂の削減するのに1万円 (もう少し低コスト化したい)
- より安全に貯留する方法を開発
- 誘発地震を起こさないためのモニタリングが必要

CCS/CCUSは有効な方法に思えるが、、、

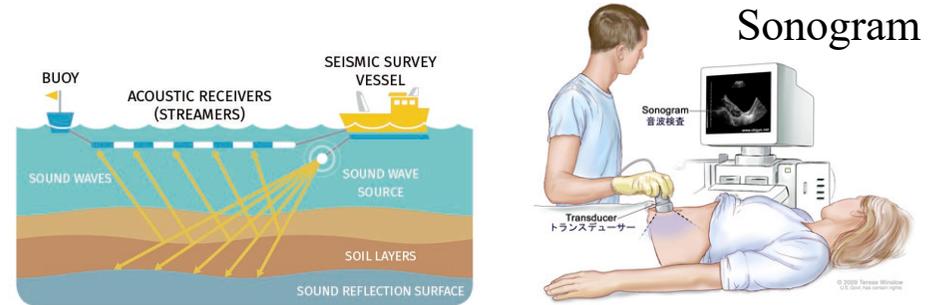
To achieve 1.5°C sustainable development scenario, CCS/CCUS provides 15% of cumulative CO₂ emission reductions (IEA, 2020)

- 世界で約6000箇所の大規模スケールのCO₂貯留サイト (100万トン/年) が必要
Tsuji et al. (2021) GHG
 - 多くのCO₂貯留サイトをモニタリングして、安全を担保する必要

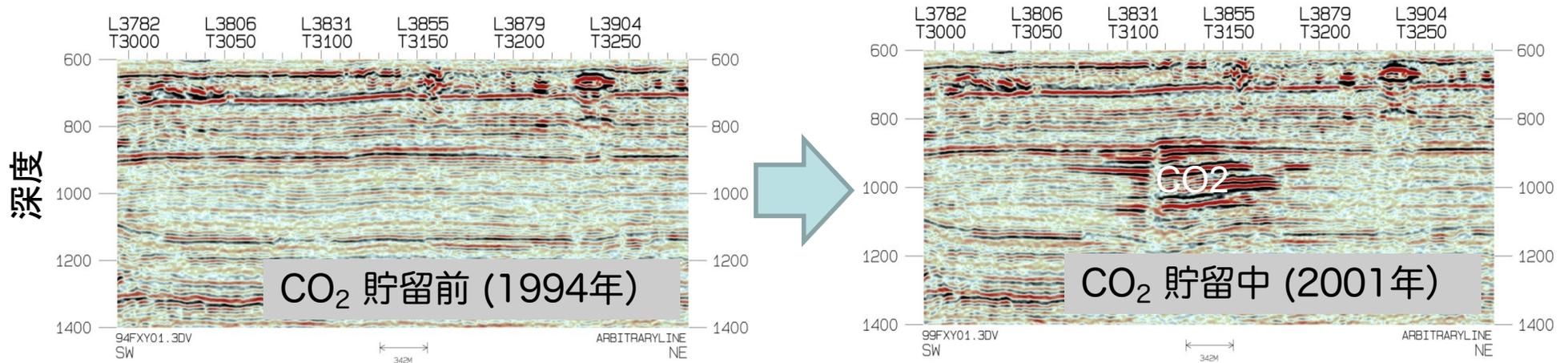


これまでのCO₂貯留サイトのモニタリング方法

繰り返し地震探査



Sleipner CCS project (Arts et al. 2008)



非常に有効な手法であるが、次の課題がある

- 高価（1回の探査に億円単位のコスト）
- 不連続的に実施（急な漏洩に対応できない可能性）
- 限られた範囲のモニタリング

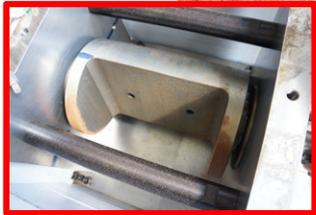
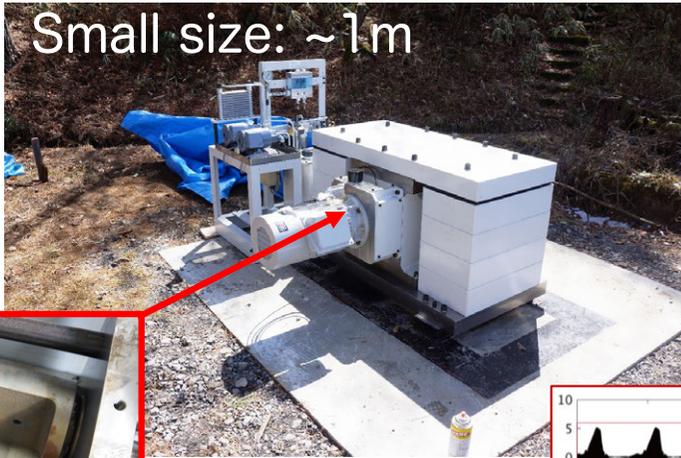
本研究では、
連続的にモニタリングできる手法を開発

- 低コスト
- 連続的
- 多くのCO₂貯留サイトを同時にモニタリング

貯留CO₂の連続モニタリングシステム

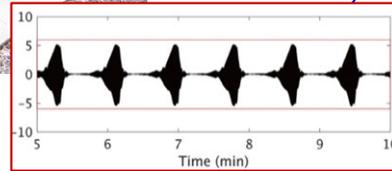
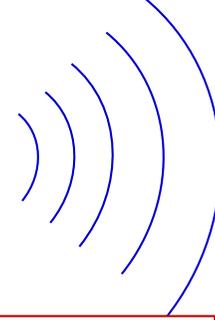
小型連続震源装置

Small size: ~1m



オモリ (~10 kg)を回転
8000N at 20Hz

CO₂貯留層を
伝える振動

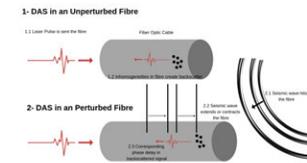


発振波形

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



光ファイバーケーブル



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として扱う
- 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

- 低コスト
- 連続的に貯留CO₂をモニタリング
- 多くの貯留サイトを同時にモニタリング

Tsuji et al., (2021) Sci Rept.
doi: 10.1038/s41598-021-97881-5

Distributed acoustic sensing DAS



九大山の家に設置した計測装置



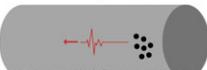
光ファイバーケーブル
自体が地震計センサ
になる

1- DAS in an Unperturbed Fibre

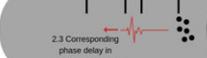
1.1 Laser Pulse is sent the fibre



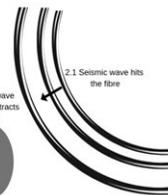
Fiber Optic Cable



2- DAS in an Perturbed Fibre



2.2 Seismic wave extends or contracts the fibre



DAS

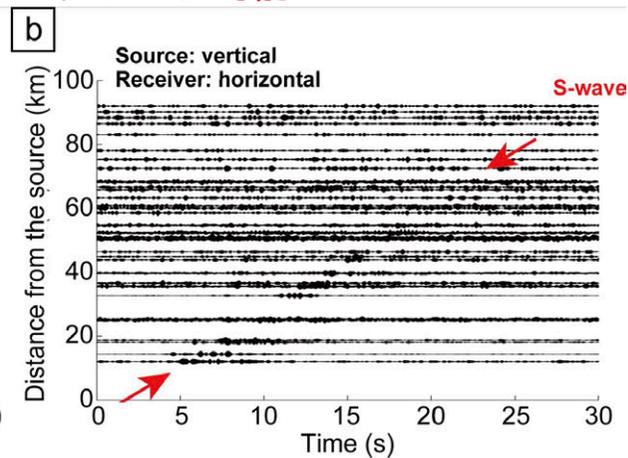
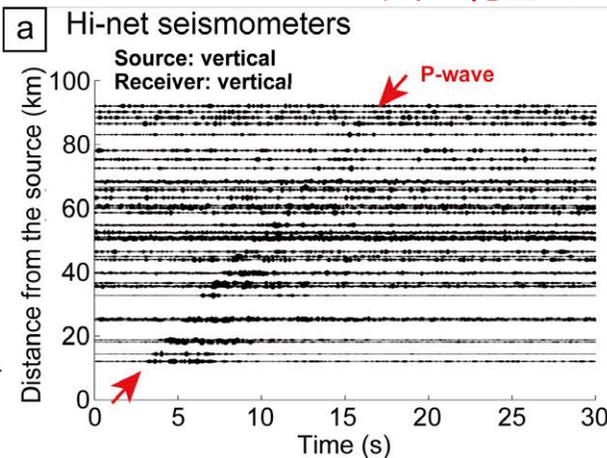
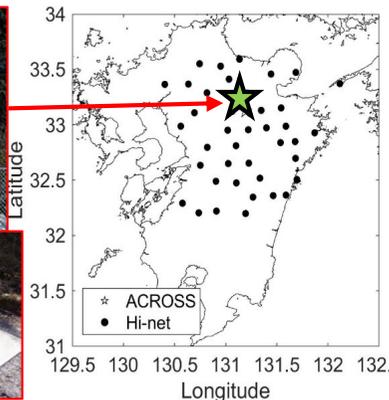
- 光ファイバーケーブルを地震計センサとして利用
- 長大 (e.g. 60 km) で超密な地震計アレイに10m間隔で地震計が並んでいるのと同価なデータ
- Number of channel is ~6,000

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

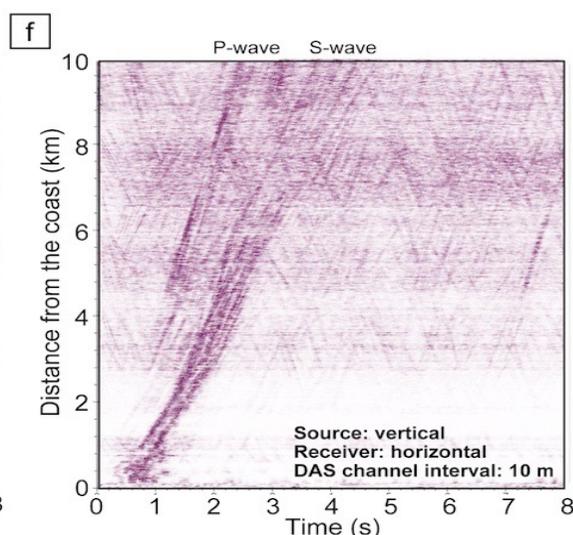
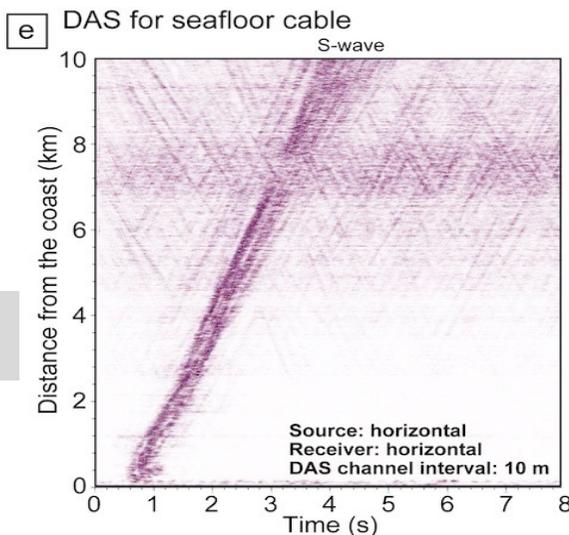
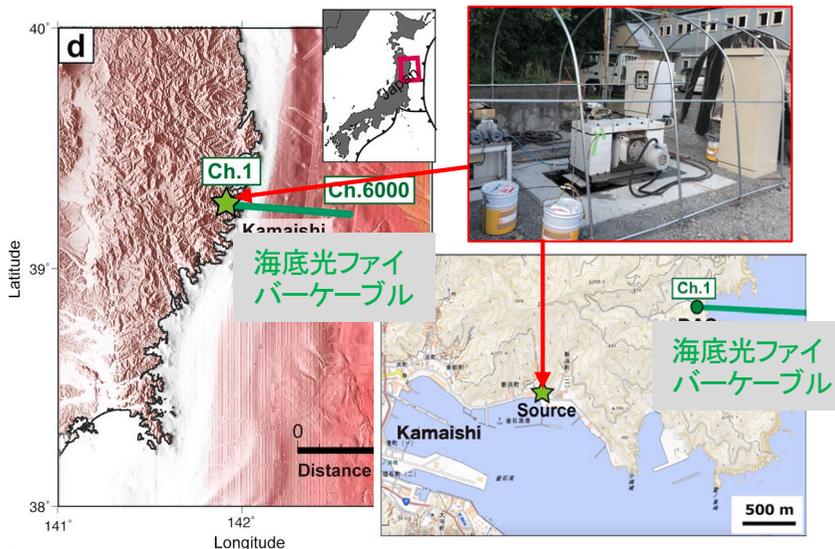


4ヶ月間のデータの足し合わせることで、80km
もの距離をモニタリング信号が伝播
➤ 広い範囲をモニタリング可能

東京大学・釜石観測所

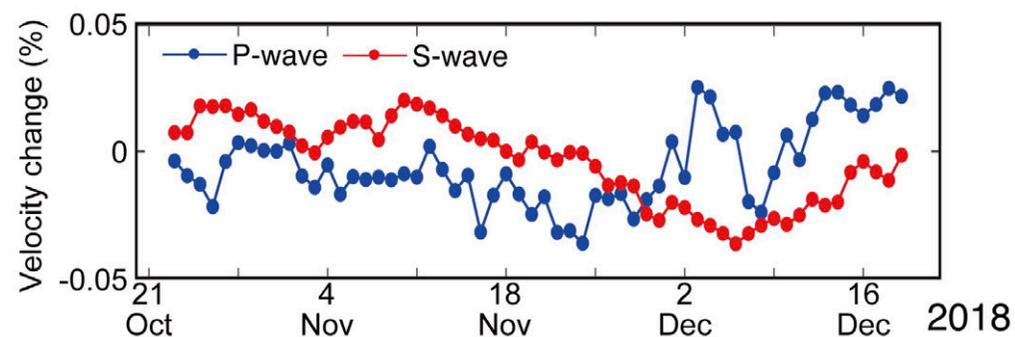
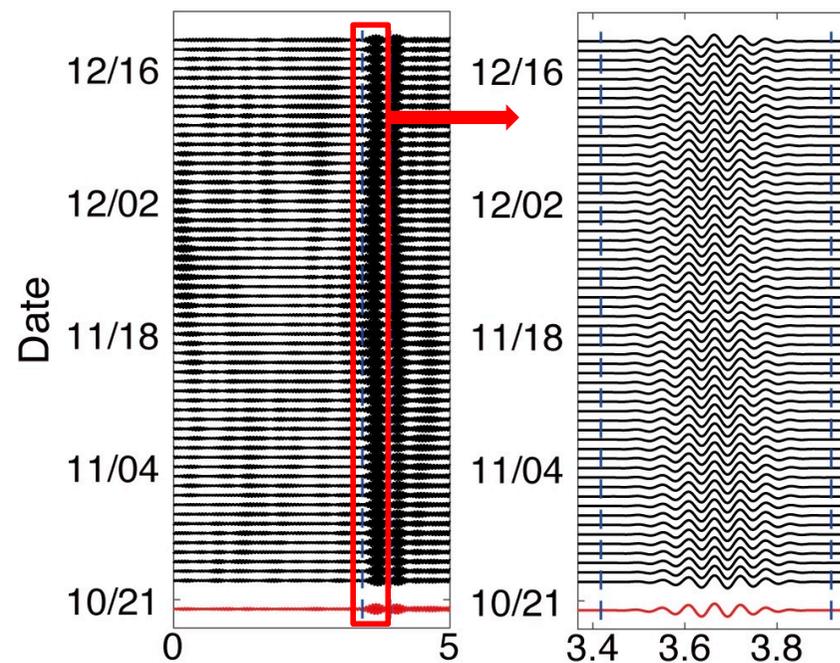
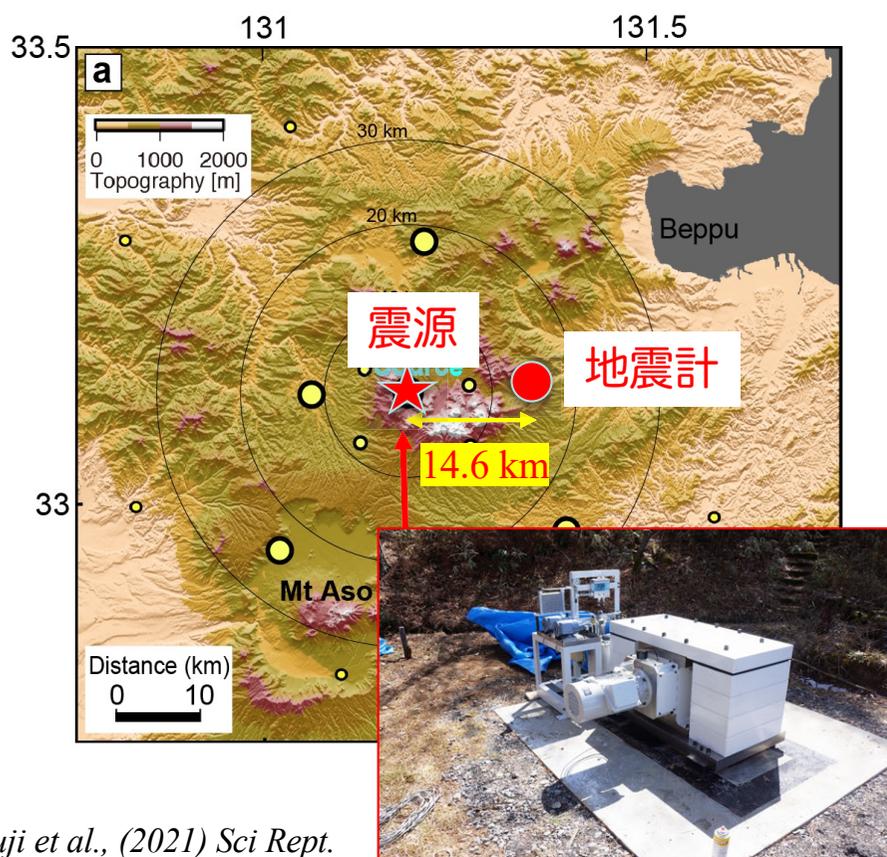
海底光ファイバー（DAS）を利用

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



高い精度でのモニタリング

- 連続震源装置から14.6km離れた場所に設置された地震計で弾性波速度の変化をモニタリング
- 0.01%の速度変化をモニタリング可能
(非常に高い精度でCO₂のモニタリングが可能)

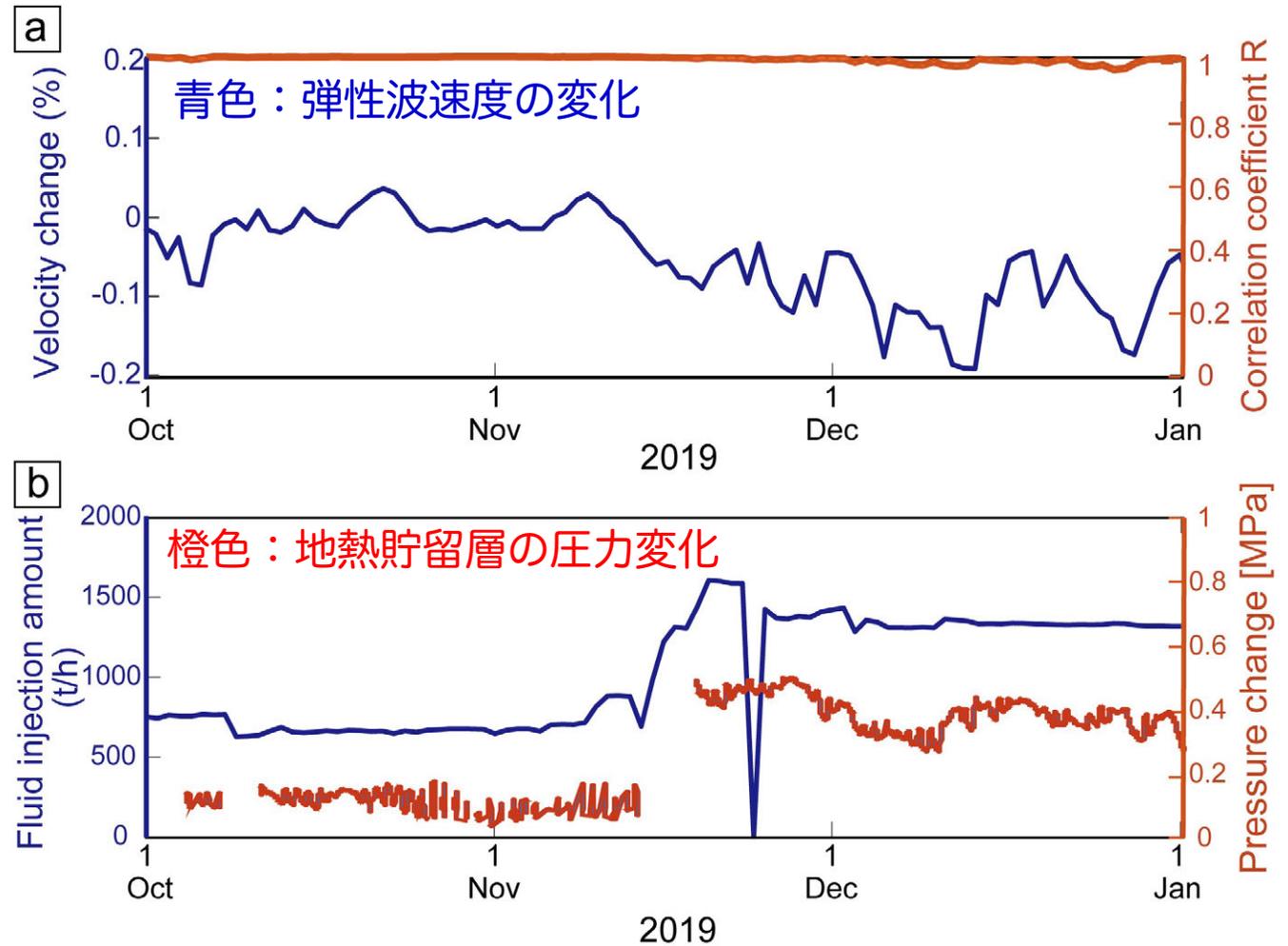
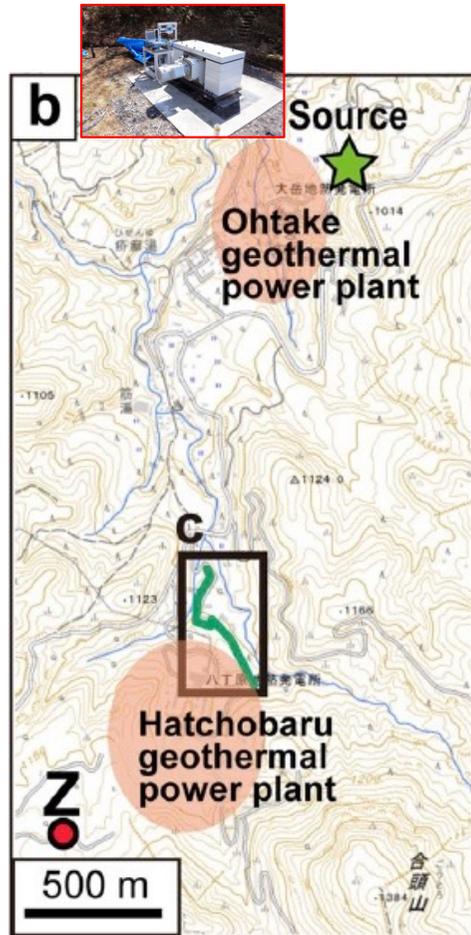


P波速度とS波速度の時間変化

Tsuji et al., (2021) Sci Rept.
doi: 10.1038/s41598-021-97881-5

地熱貯留層のモニタリング

- 地熱発電のオペレーションに伴う貯留層内の変化もモニタリングできている



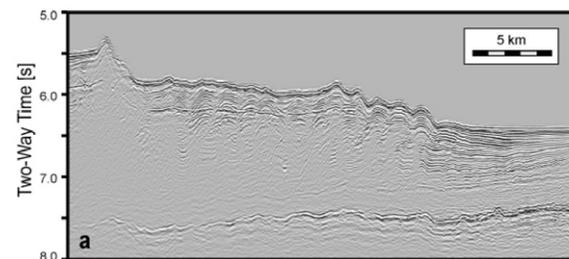
Tsuji et al., (2021) Sci Rept.
doi: 10.1038/s41598-021-97881-5

今日の話題

- DASと小型震源装置を用いたモニタリング
 - CO₂地中貯留でのモニタリング（この話題を中心に）
 - 浅部地層・人工構造物のモニタリング（地滑り地域など）
- 機械学習を用いたデータ解析・解釈の自動化
 - 地震探査断面図を自動的に地質解釈
 - 多数の物理探査データを融合して堤防内部を推定
 - デジタル岩石モデルから自動的に物性計測
 - 社会活動のモニタリング（交通量と車種の自動測定など）

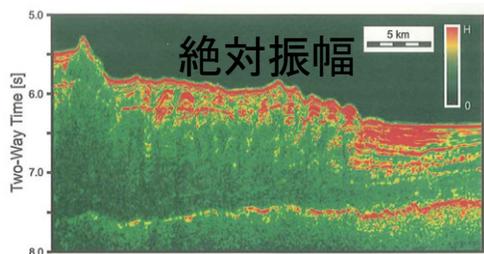
反射法地震探査データへ機械学習

南海トラフの3次元反射法地震探査データに適用した例 (かなり昔の研究)

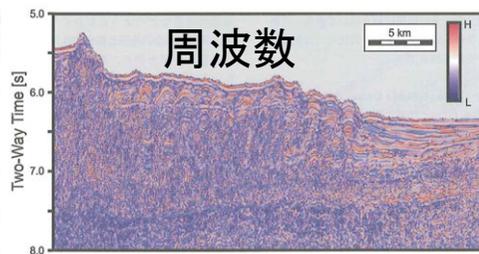


オリジナルデータ
反射断面図

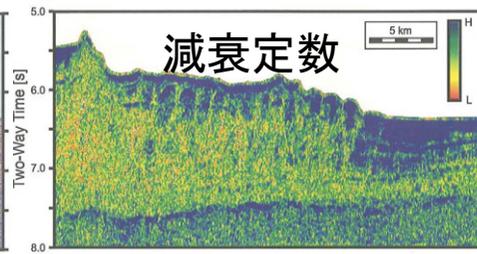
マルチアトリビュートの計算



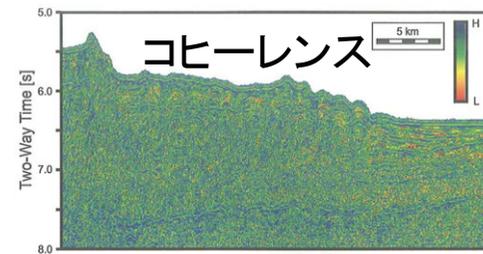
絶対振幅



周波数

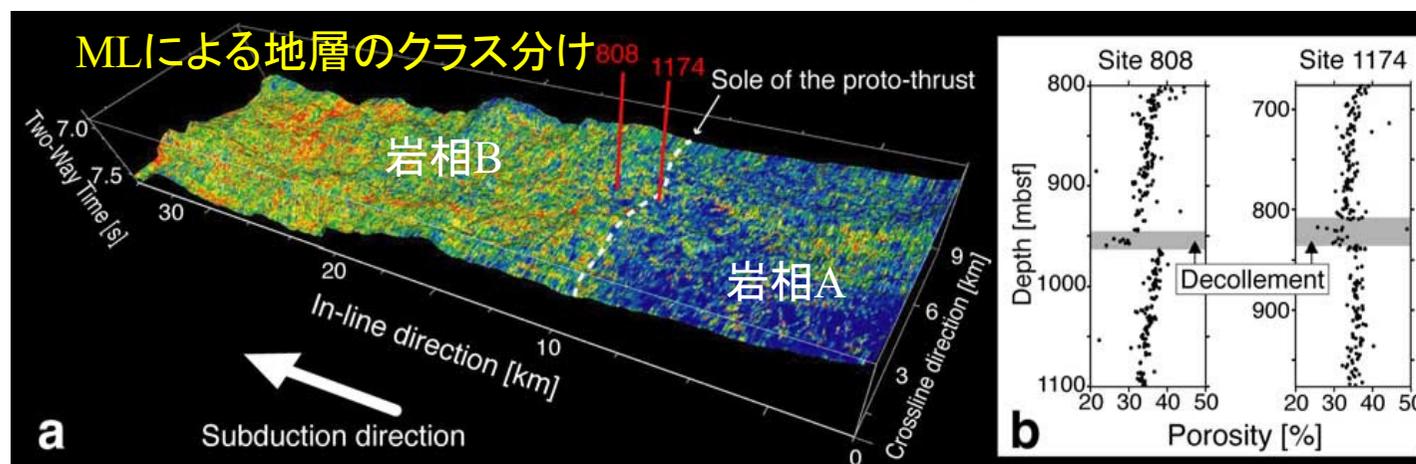


減衰定数



コヒーレンス

教師なしニューラルネットワーク(SOM)

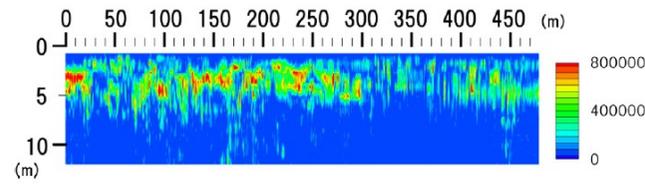


Tsuji et al., 2005
Geoph. Res. Lett.
doi:10.1029/2004GL021861

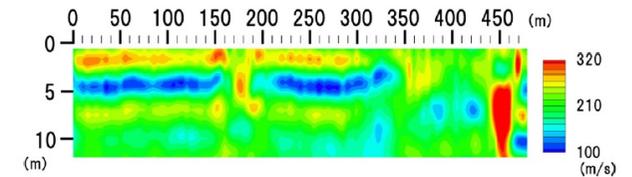
10 教師なしニューラルネットワーク (SOM) で堤体内部を特徴化

宇治川の堤体に沿って各種物理探査を実施し、SOMを用いてそれらのデータを統合

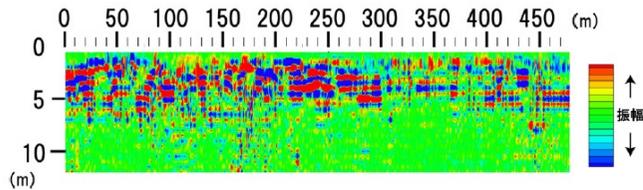
➤ 堤体内部の軟弱箇所を検出



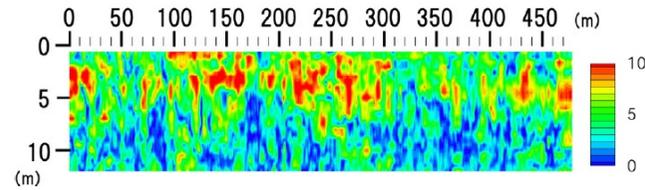
(b) 電磁波波形エンベロープ



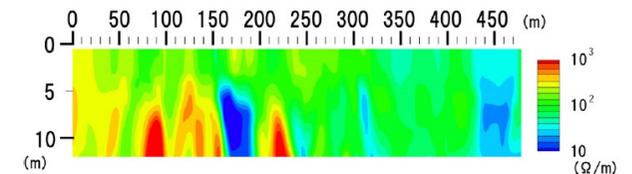
(d) S波速度



(a) 電磁波反射断面



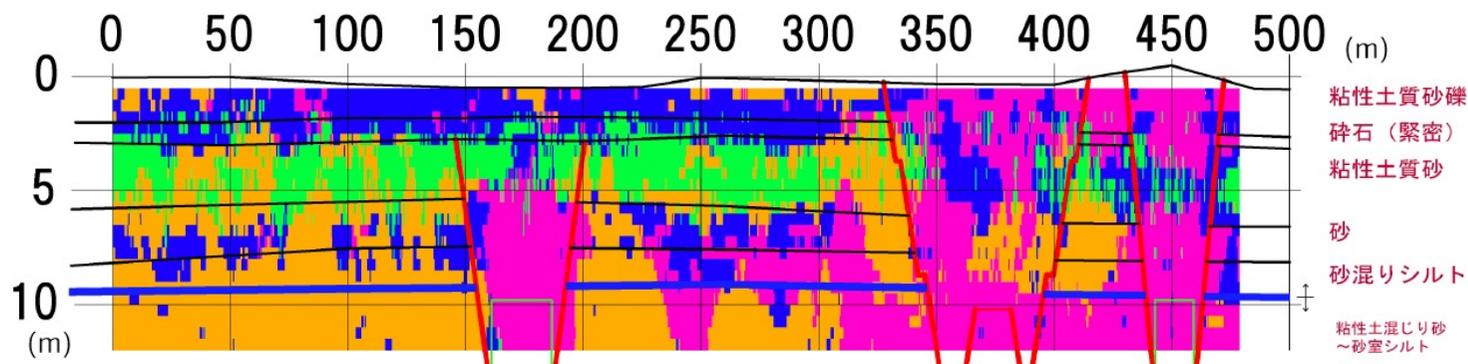
(c) 電磁波波形センブランス



(e) 比抵抗値

教師なしニューラルネットワーク (SOM)

宮川、辻ほか 2010
土木学会論文集C

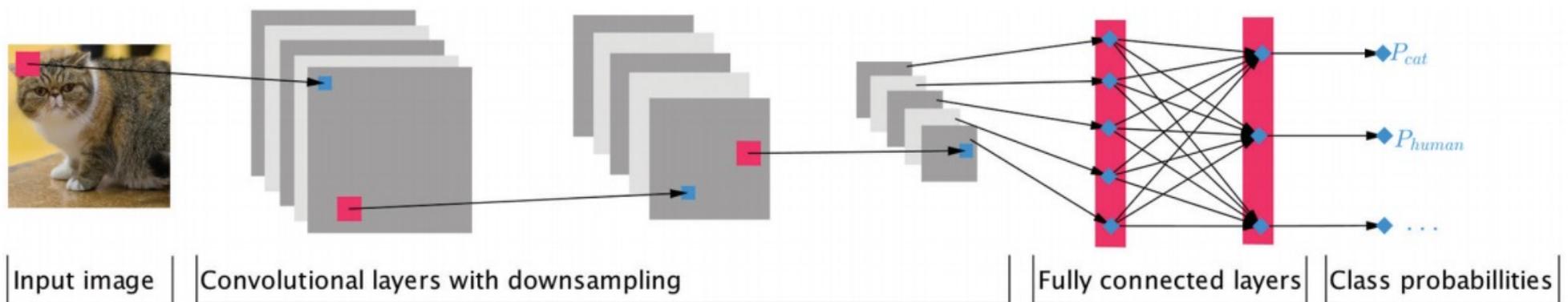
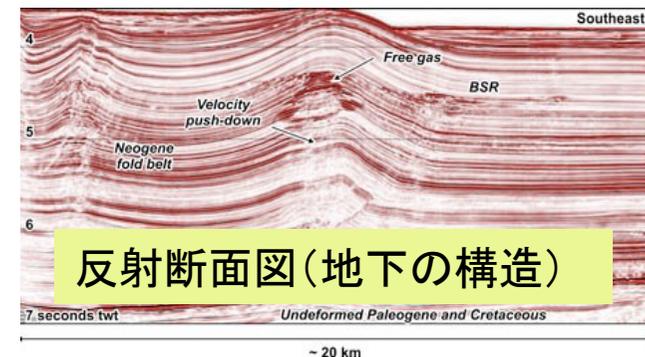


➤ しかし、この手法は、もはやTraditional machine learning と呼ばれている

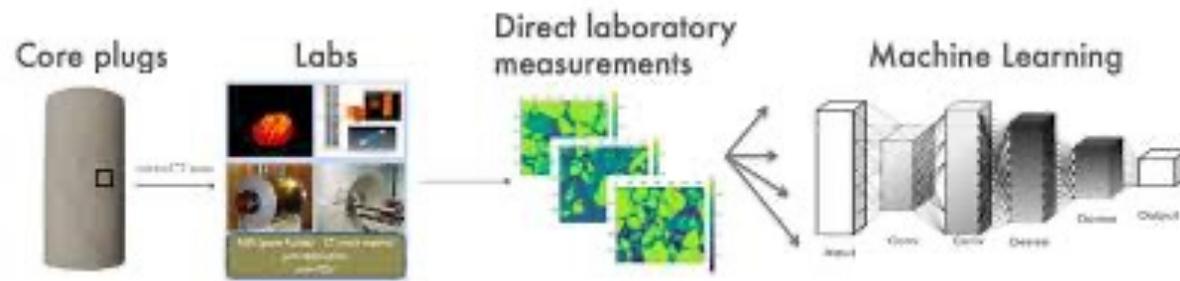
最近、よく使われるConvolutional Neural Network (CNN)

- CNN is a **Deep Learning** algorithm which can take in an input image, assign importance to various aspects/objects in the image and be able to differentiate one from the other.
- It consists two kind of layers : 1- **Convolutional** 2- **Fully connected layers**

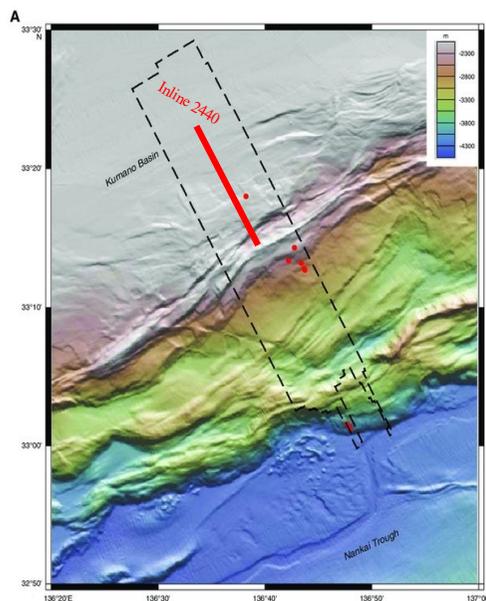
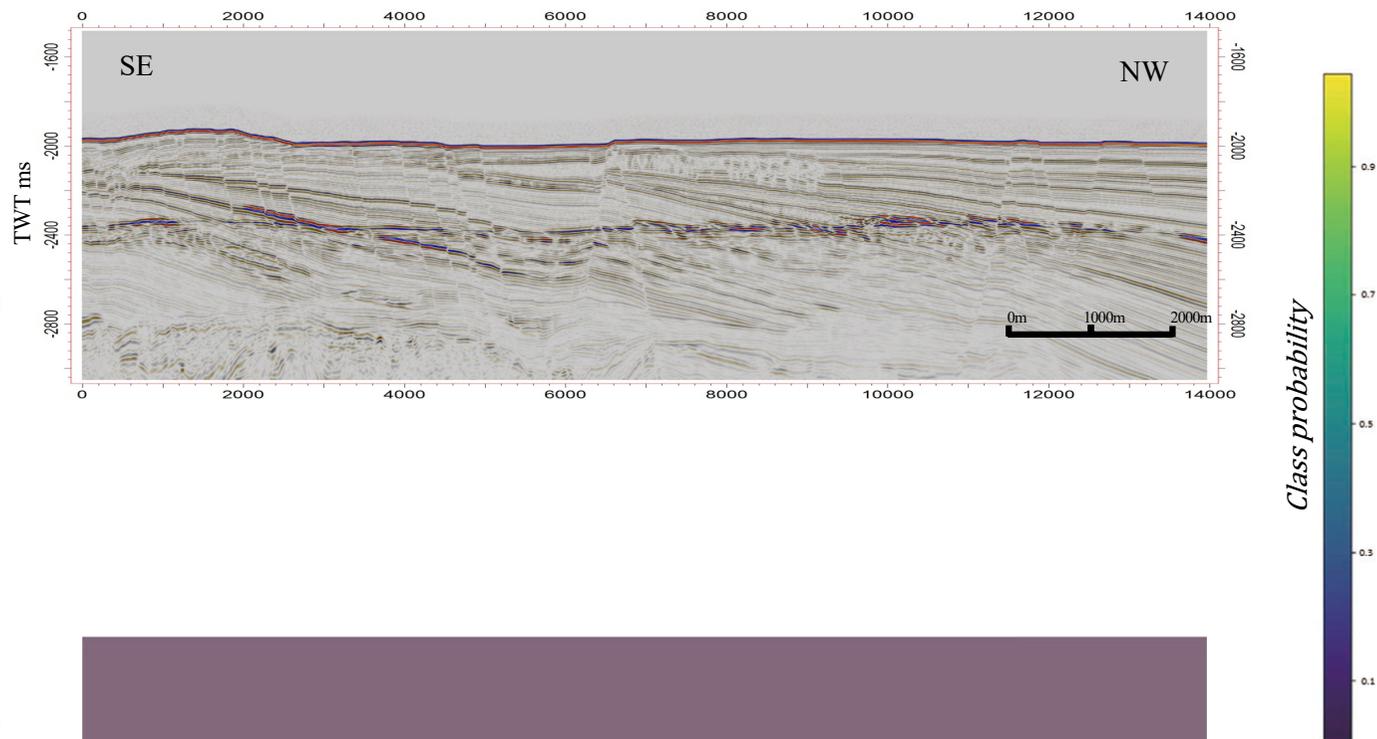
- 画像認識によく使われる
- 反射法地震探査断面図の解釈へ適用
(GPRにも同様の手法が適用できる)



CNNで反射法地震 探査断面図を自動的に に解釈



Objective: 左の反
射断面図から地滑
り層を見つける

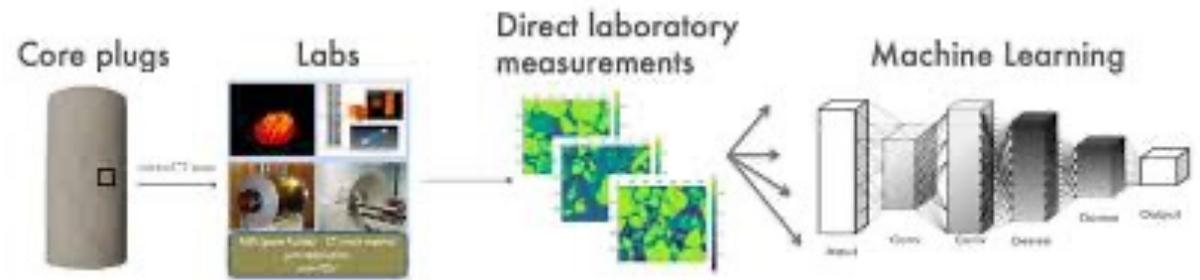


Probabilityとして結果を出すことができることも魅力

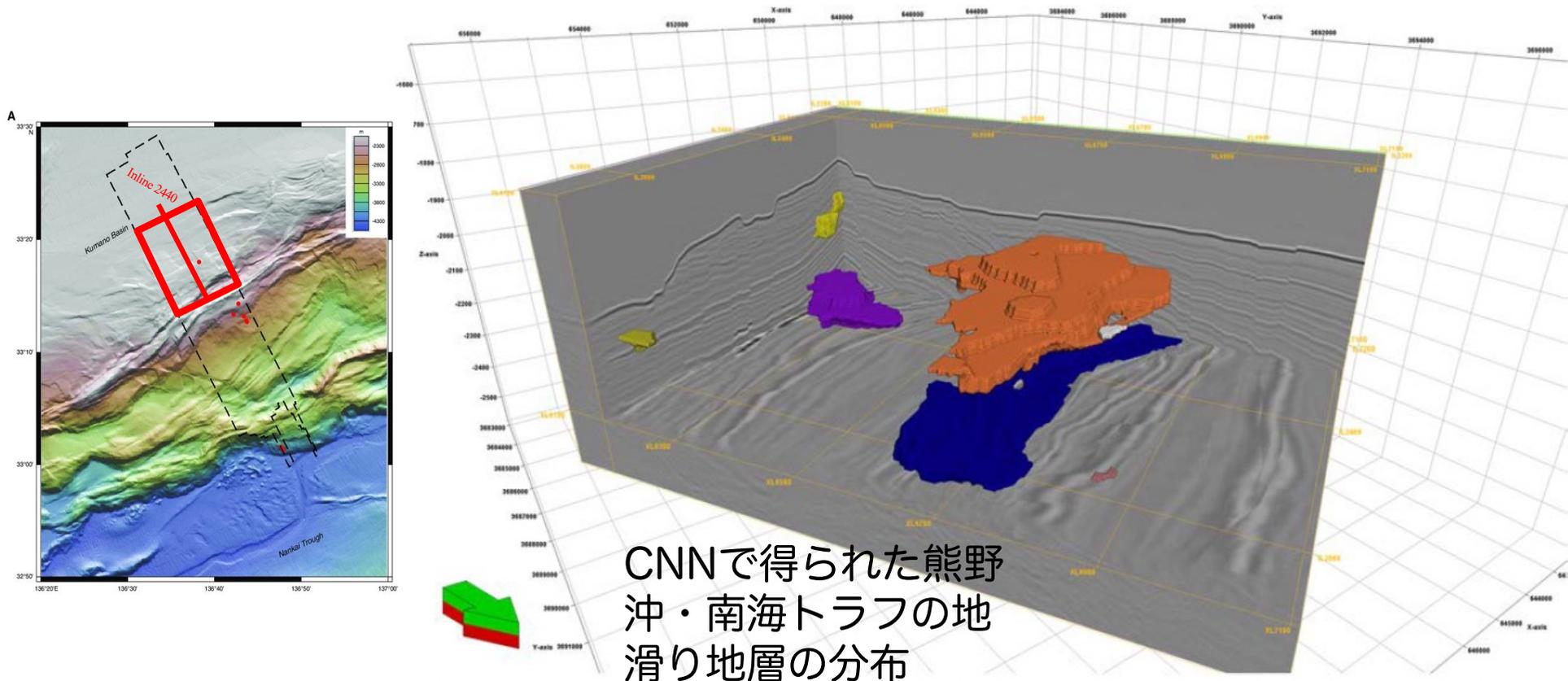


Ahmad and Tsuji (2021), *Marine and Petroleum Geology*, doi: 10.1016/j.marpetgeo.2021.105290

CNNで反射法地震 探査断面図を自動的に に解釈

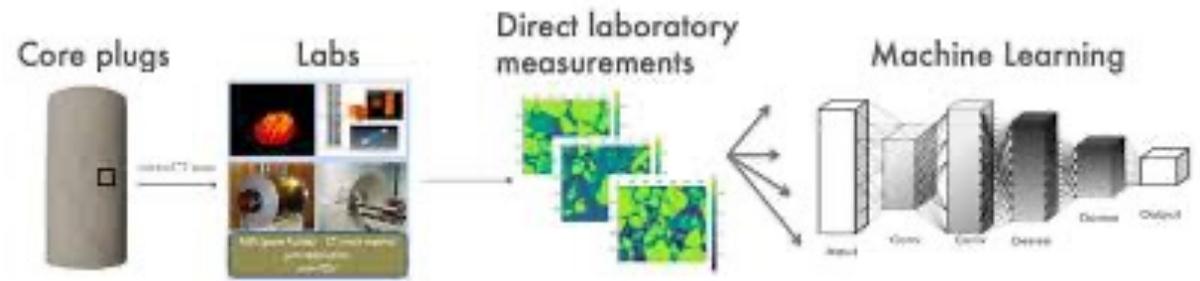


三次元的に地滑り層を解釈するのは難しいが、CNNを利用すれば、短い時間で可能



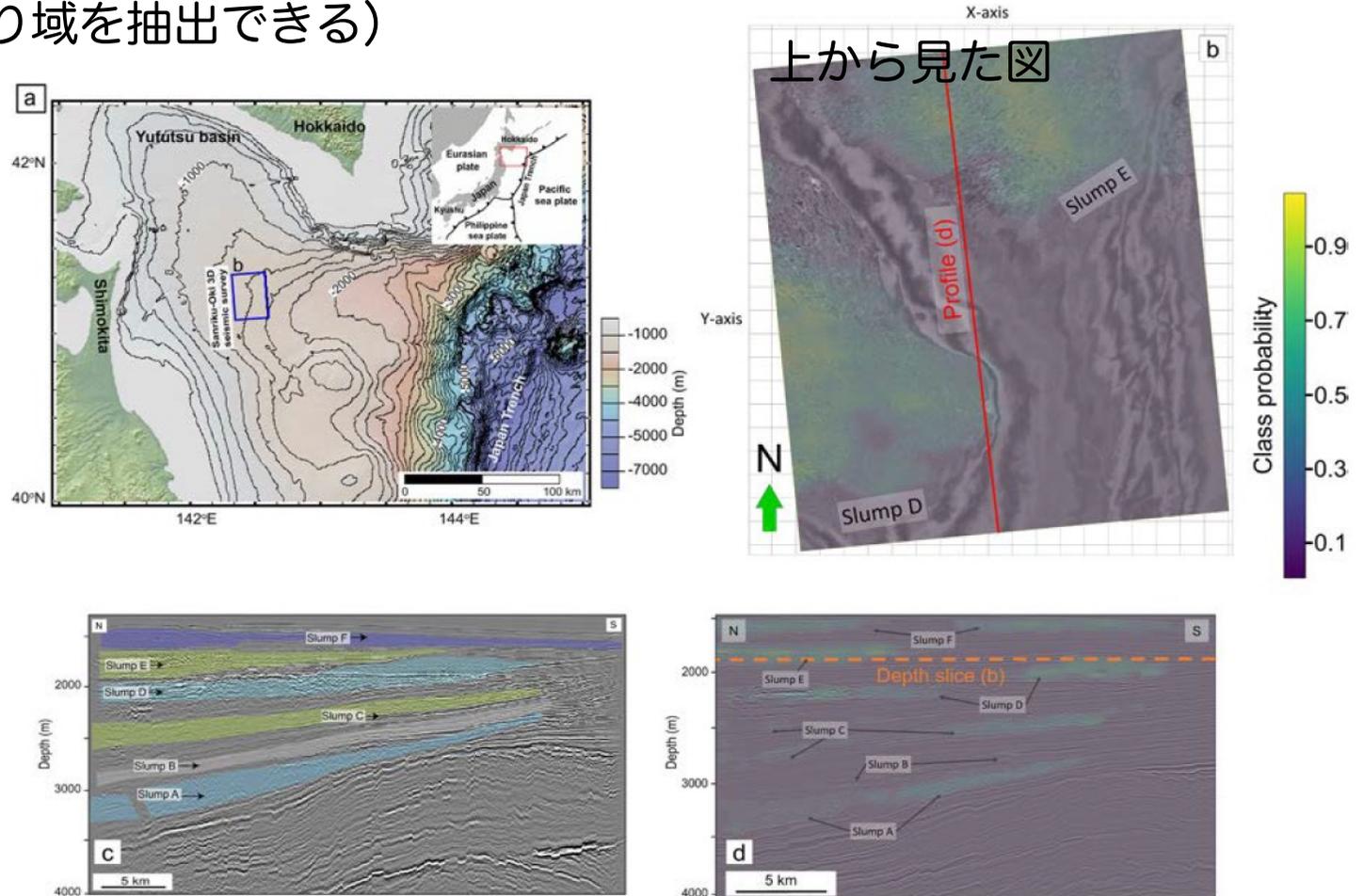
Ahmad and Tsuji (2021), *Marine and Petroleum Geology*, doi: 10.1016/j.marpetgeo.2021.105290

CNNで反射法地震 探査断面図を自動的に に解釈



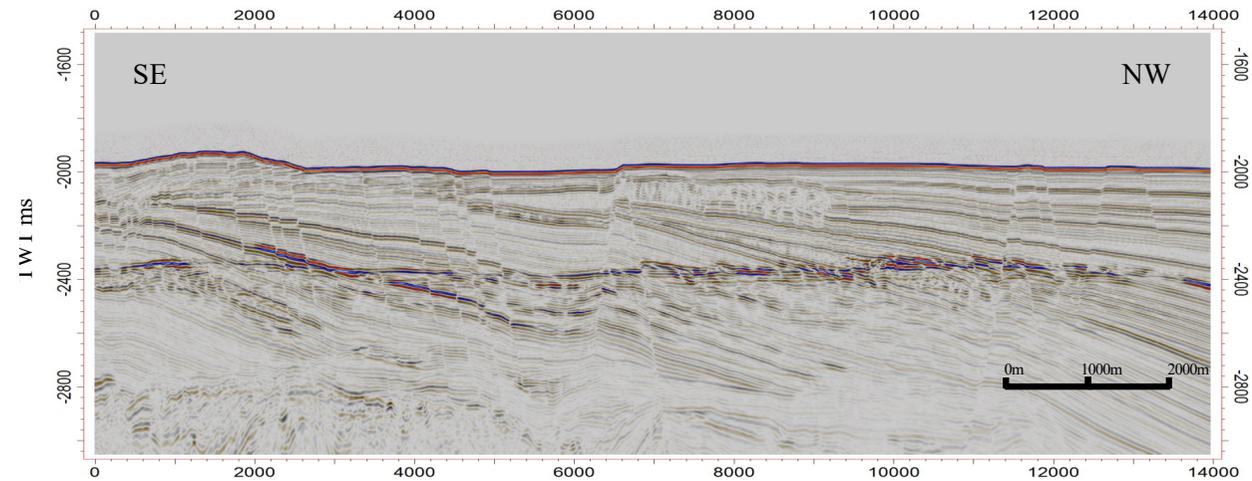
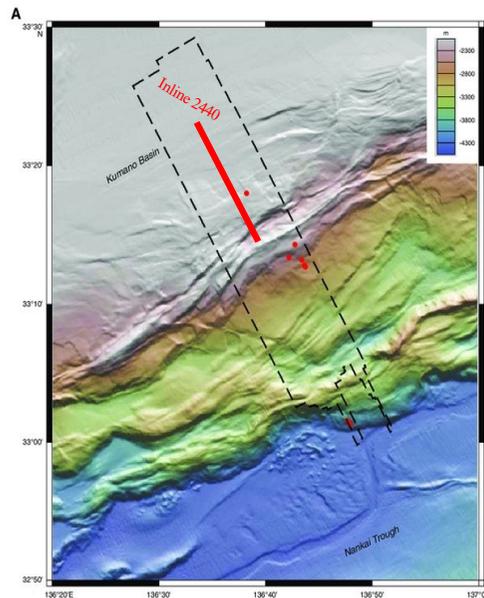
一度CNNを学習すれば、ある程度は他の場所にも適用できる（自動的に地滑り域を抽出できる）

三陸沖の三次元反射法地震探査データに対して適用すると、多くの地滑り層を発見



Ahmad and Tsuji (2021), *Marine and Petroleum Geology*, doi: 10.1016/j.marpetgeo.2021.105290

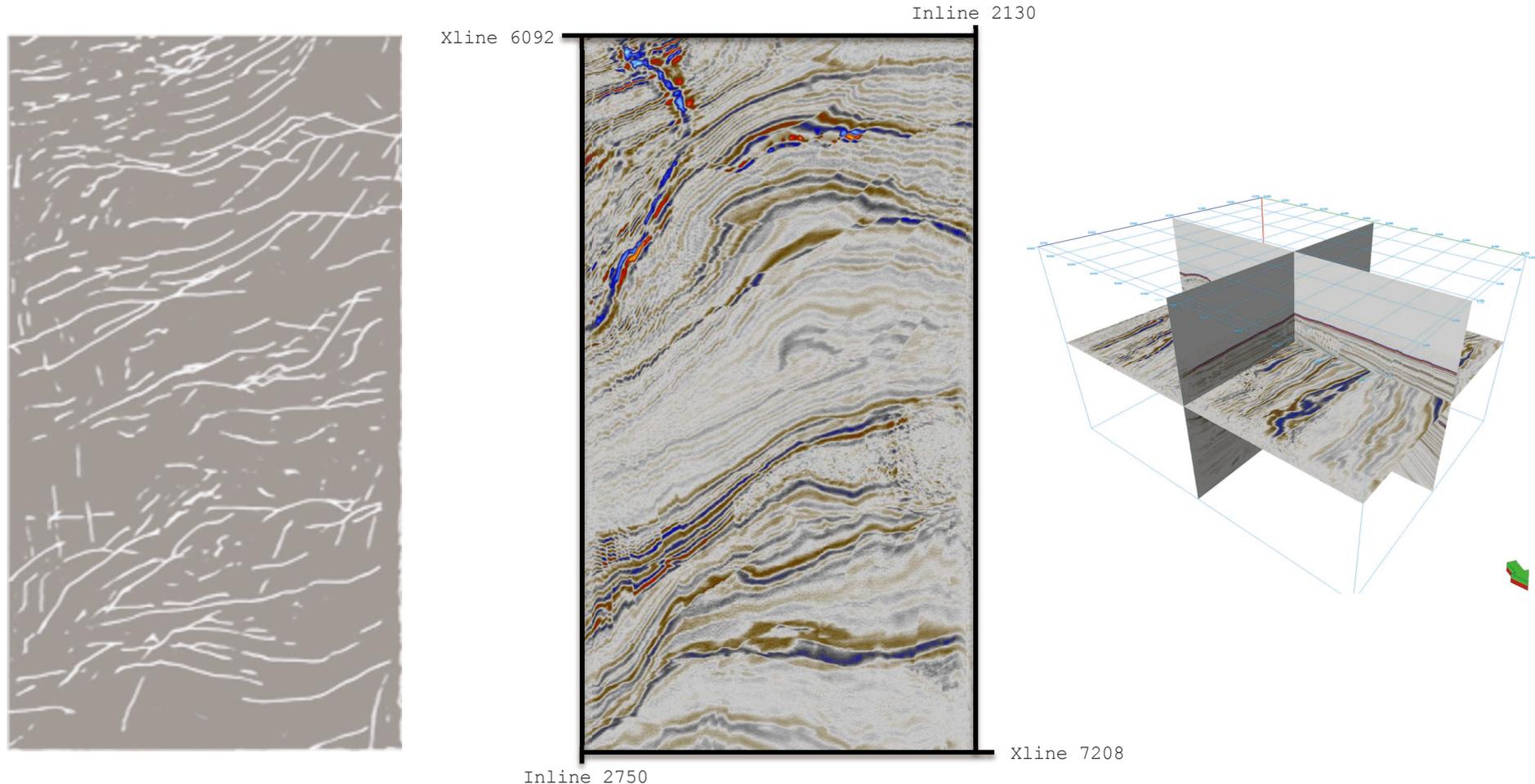
CNNで断層を自動的に抽出



Ahmad and Tsuji (2021), *Marine and Petroleum Geology*, doi: 10.1016/j.marpetgeo.2021.105290

反射法地震探査データから断層を自動抽出

調査地域を上から見た図（海底下約200m）



Time-slice -2220 ms

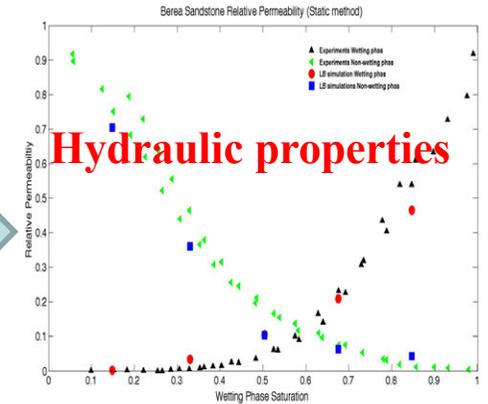
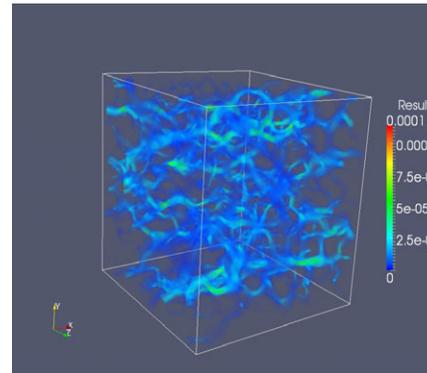
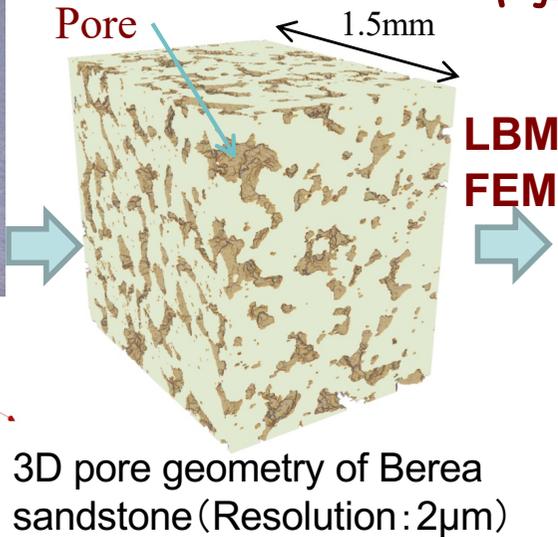
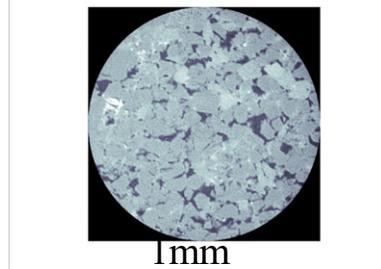
Ahmad and Tsuji (2021), Marine and Petroleum Geology, doi: 10.1016/j.marpetgeo.2021.105290

今日の話題

- DASと小型震源装置を用いたモニタリング
 - CO₂地中貯留でのモニタリング（この話題を中心に）
 - 浅部地層・人工構造物のモニタリング（地滑り地域など）
- 機械学習を用いたデータ解析・解釈の自動化
 - 反射法地震探査断面図を自動的に地質解釈
 - 多数の物理探査データを融合して堤防内部を推定
 - デジタル岩石モデルから自動的に物性計測
 - 社会活動のモニタリング（交通量と車種の自動測定など）

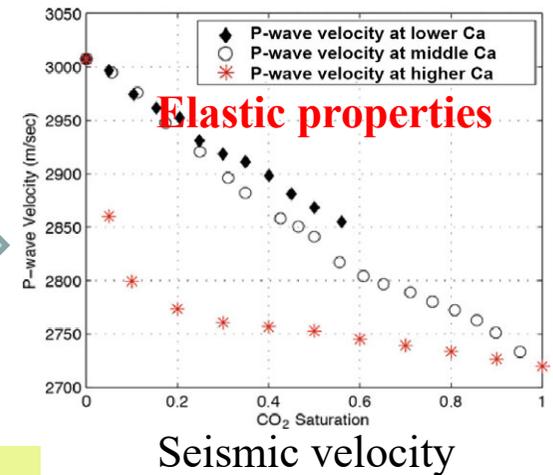
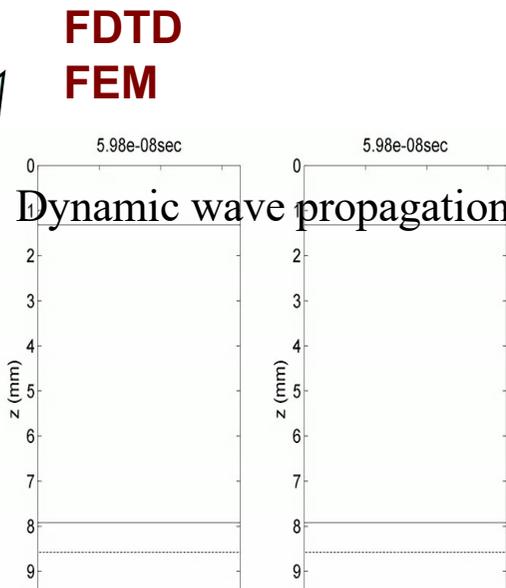
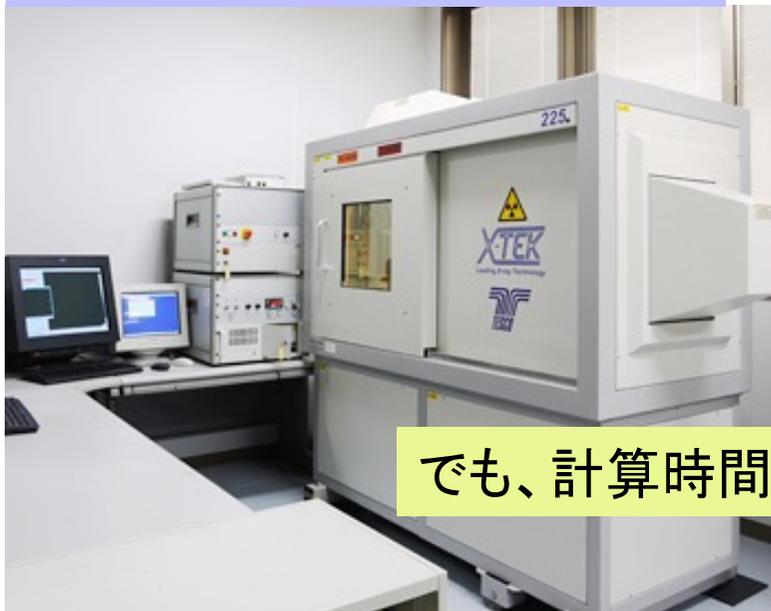
デジタル岩石物理

近年の計算環境の向上により、デジタル岩石に対して数値シミュレーションを適用して浸透率や弾性波速度を計算できるようになった



Tsuji et al. 2016 Adv. Wat. Resour.

Microfocus X-ray CT images

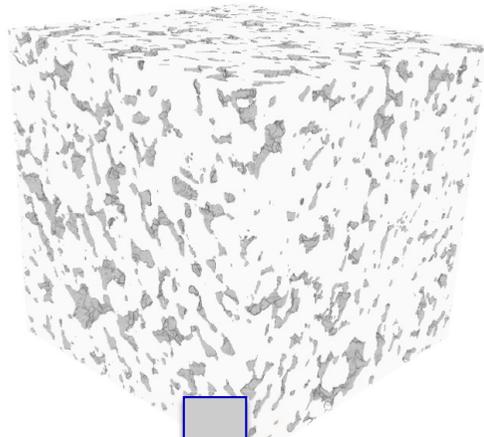


でも、計算時間が必要・専門知識が必要。。。

Tsuji et al. 2019 Computer and Geosciences

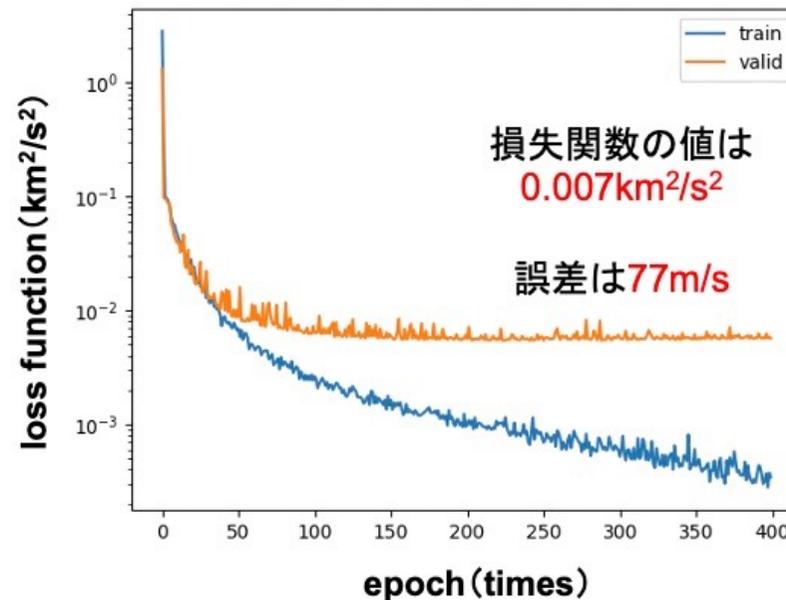
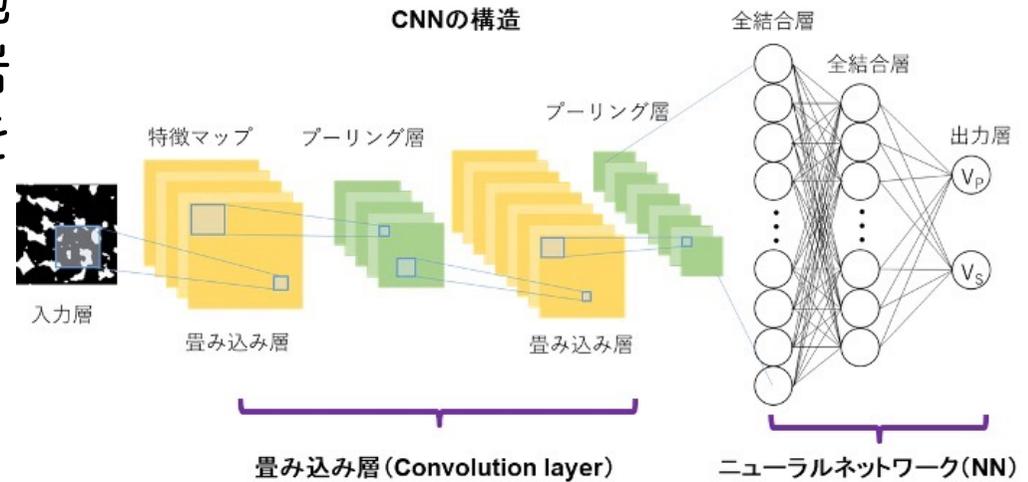
機械学習を利用して、間隙形状から直接、浸透率や弾性波速度を推定

実験や数値シミュレーションを実施せずに、顔認証のようにデジタル岩石から直接、浸透率や弾性波速度を推定できる



弾性波速度

浸透率



Shige et al., 2020



今日の話題

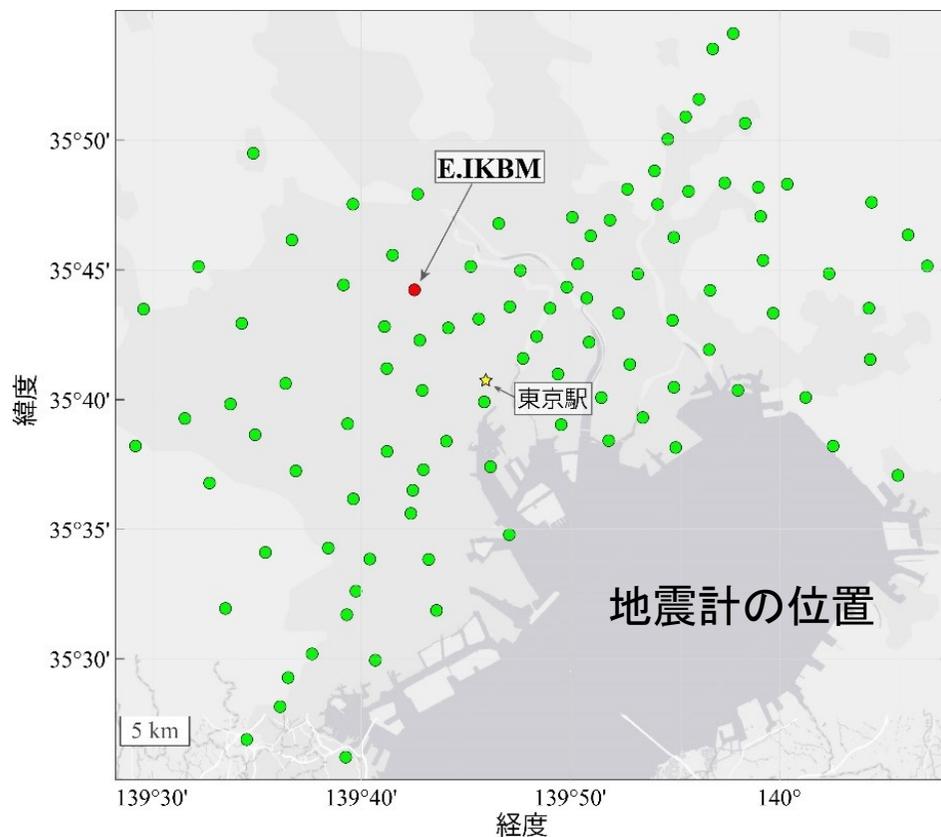
- DASと小型震源装置を用いたモニタリング
 - CO₂地中貯留でのモニタリング（この話題を中心に）
 - 浅部地層・人工構造物のモニタリング（地滑り地域など）
- 機械学習を用いたデータ解析・解釈の自動化
 - 反射法地震探査断面図を自動的に地質解釈
 - 多数の物理探査データを融合して堤防内部を推定
 - デジタル岩石モデルから自動的に物性計測
 - 社会活動のモニタリング（交通量と車種の自動測定など）

社会活動を振動でモニタリング

2021/12/1

社会活動と振動はリンクしている？

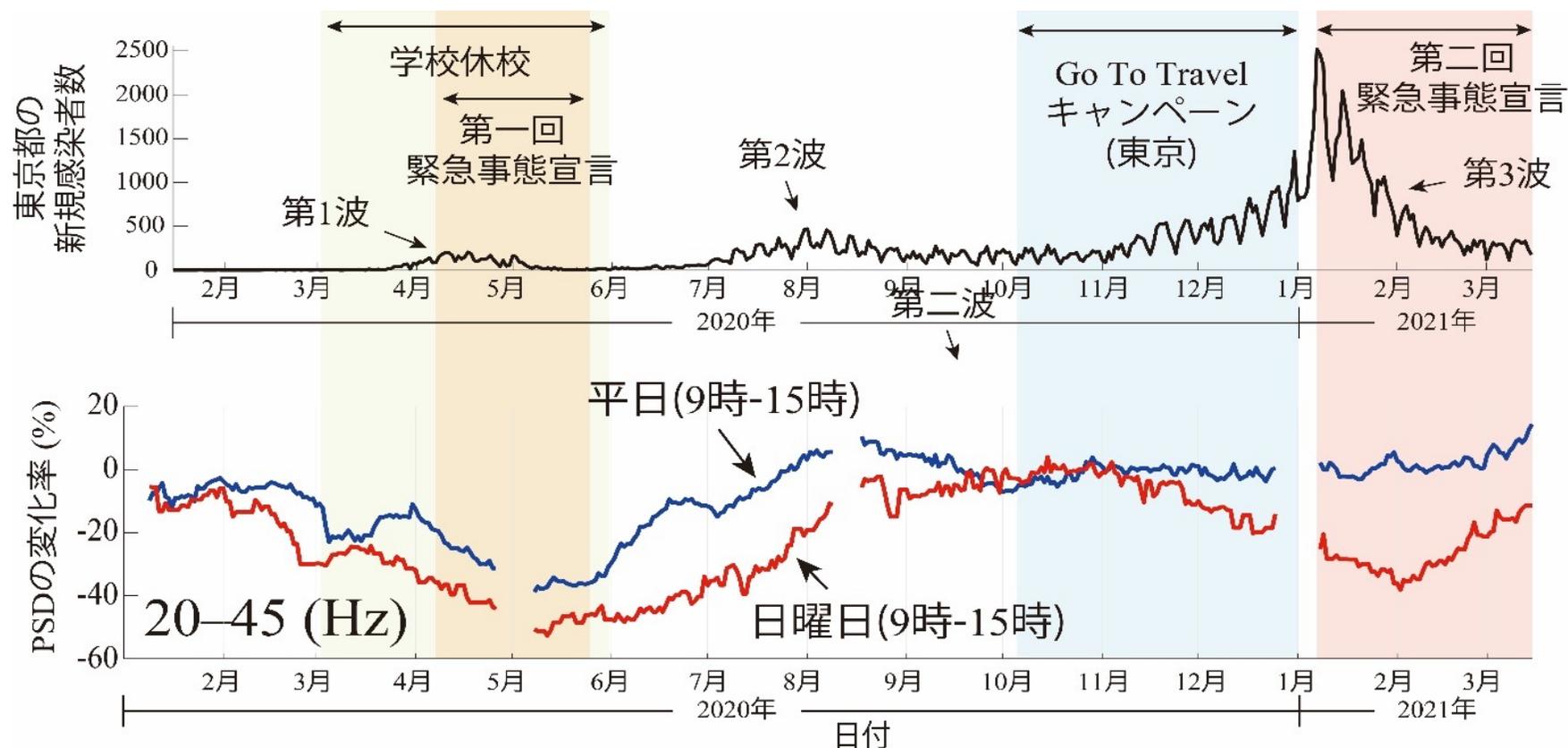
- 防災科学技術研究所の首都圏地震観測網（MeSO-net）の101台の地震計のデータを利用し、コロナに伴う社会活動の変化をモニタリング



A screenshot of a Yahoo! News article in Japanese. The article title is '地震計で人間の活動を計測！ コロナ禍による経済・余暇活動の縮小を確認【産総研調べ】' (Measuring human activity with seismic sensors! Confirmation of economic and leisure activity reduction due to COVID-19 [Survey by AIST]). The article is dated 12/1 (水) 16:06. The main text states that AIST (産業技術総合研究所) and Kyushu University (九州大学) have published a study on the decline of social activities during the COVID-19 pandemic, using seismic sensor data. The article includes a sub-section titled 'コロナ禍において、人間活動による振動が低下' (Vibration from human activity decreases during the COVID-19 pandemic), which explains that human activity vibrations are finer and more frequent than natural vibrations. At the bottom, there is a line graph showing vibration data for '平日(10時-15時)' (Weekday 10:00-15:00) and '日曜日(10時-15時)' (Sunday 10:00-15:00) in the 20-45 Hz range, showing a significant decrease in vibration on Sundays.

東京都の新型コロナ新規感染者数と人間活動に伴う振動

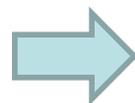
- 1回目の緊急事態宣言でPSDが最も低下
- 宣言解除で平日のPSDが回復したが、日曜日は回復が緩やかで、市民が自発的に余暇を控えた傾向
- 2回目の緊急事態宣言では、宣言下であっても感染者が減り始めるとPSDが回復



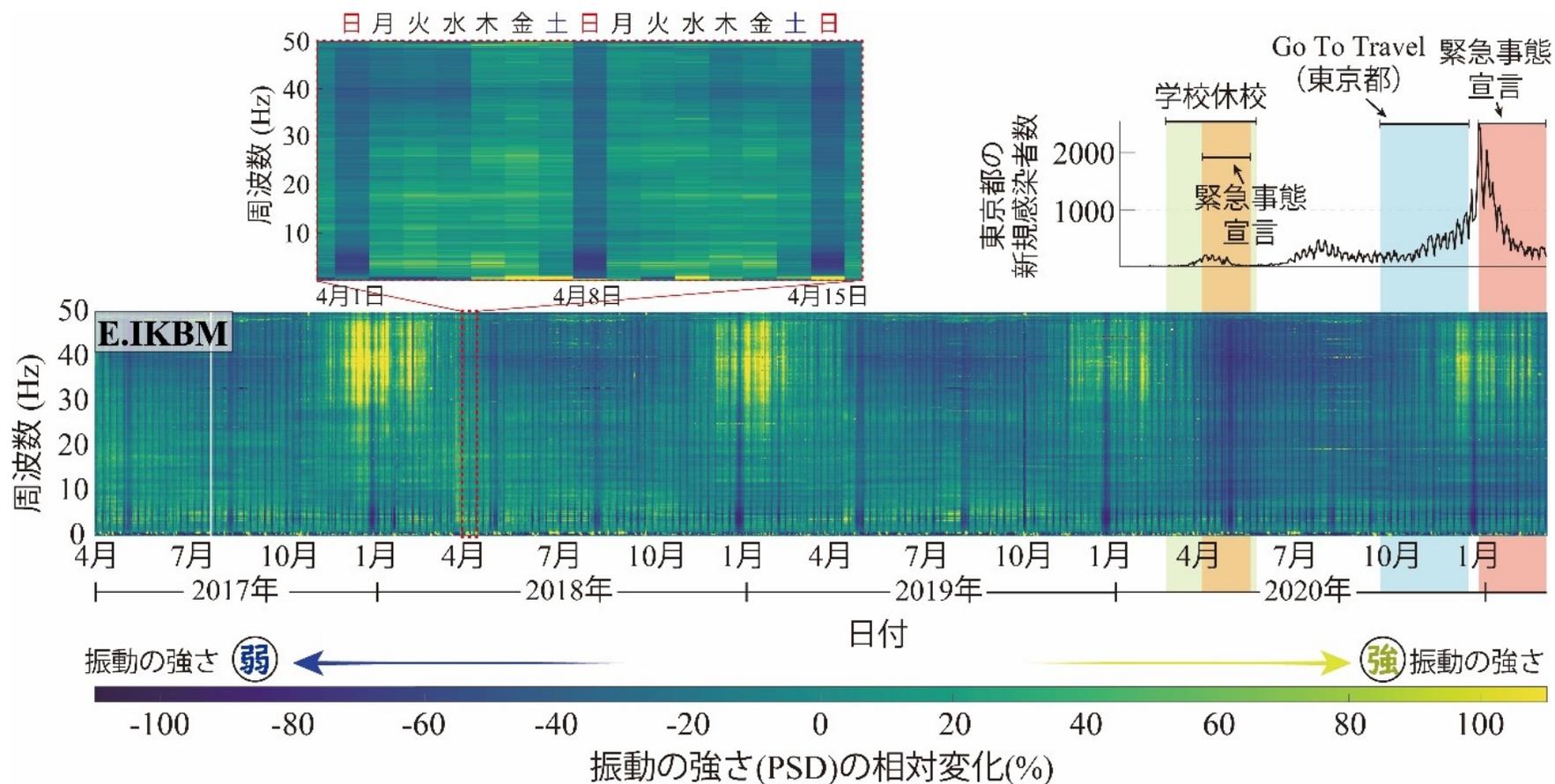
Nimiya, Ikeda and Tsuji (2021) Sci. Rept. Doi:10.1038/s41598-021-00063-6

池袋の観測点で観測された振動の強さの時間変化

- 年度末：振動増加
- 年始・GW・お盆：振動減少
- 日曜日：振動減少



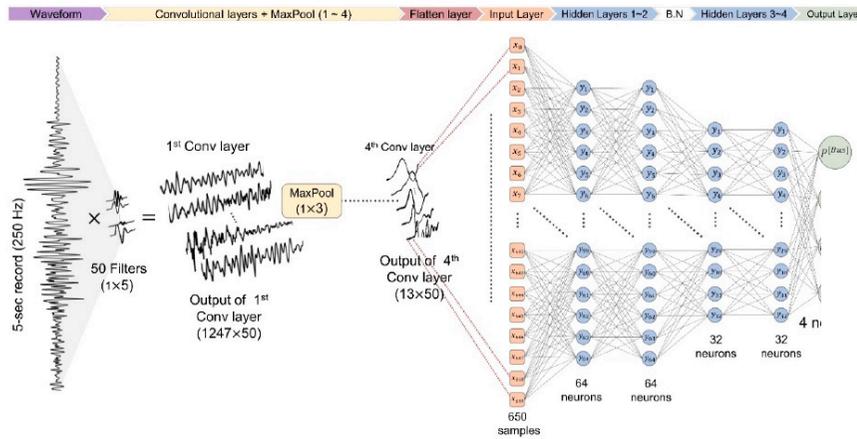
社会活動に関わる様々な傾向が分かる



Nimiya, Ikeda and Tsuji (2021) Sci. Rept. Doi:10.1038/s41598-021-00063-6

地震計で車をモニタリング (機械学習)

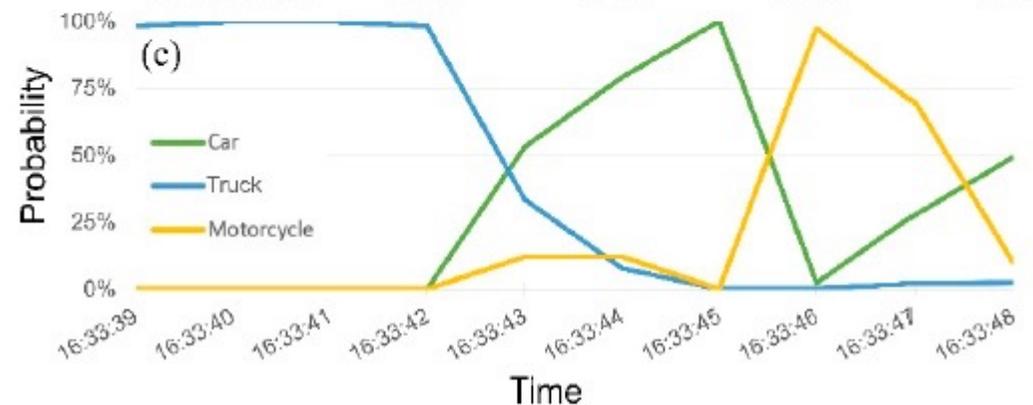
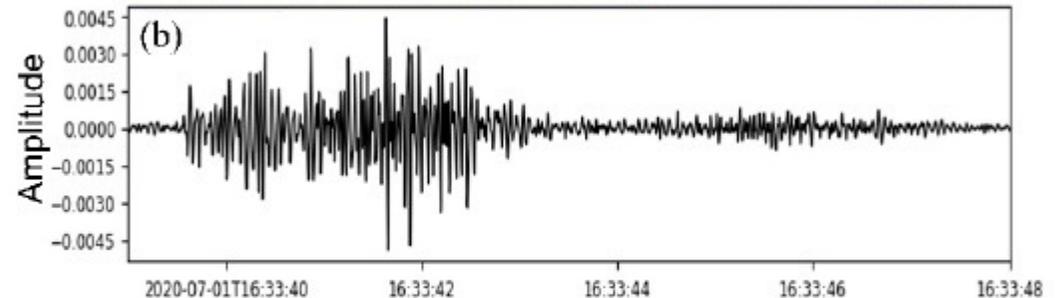
Ahmad and Tsuji, 2021
Applied Sciences,
doi:10.3390/app111045902021



同時に複数台の車が通った場合でもクラス分け可能

- 匿名性や正確さの点で魅力的なシステム
- 振動からは逃れることはできない
- 車の速度のモニタリングも可能

- 作業員の安全確保や不審者のモニタリングにも使える
- 工場の配管内部の異常検出



➤ 振動の持つ情報は、十分に利用されているとは言えず、上手く利用すれば様々なものをモニタリングでき、安全で効率的な社会構築に貢献できる