

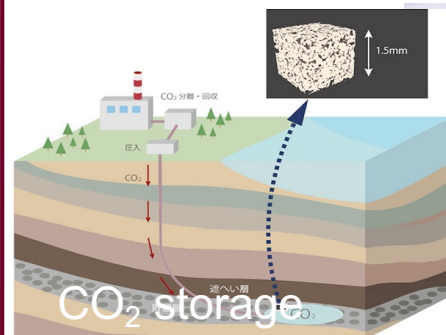
# 光ファイバー型地震計（DAS）等のセンサリング技術や機械学習を用いて地盤や社会活動をモニタリングする技術

辻 健

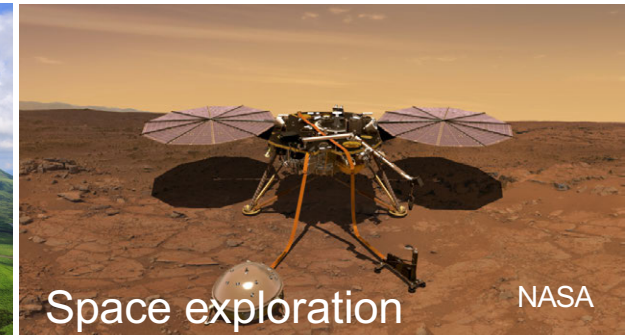
九州大学 大学院工学研究院 物理探査研究室  
カーボンニュートラル・エネルギー国際研究所



*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

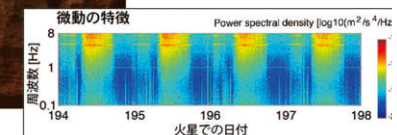
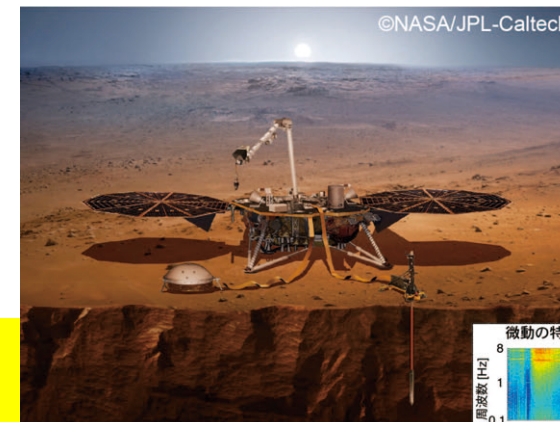
## 動きを捉える

- 地震・火山のモニタリング
- 資源貯留層モニタリング
- CO<sub>2</sub>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 (I<sup>2</sup>CNER) 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CO<sub>2</sub>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CO<sub>2</sub>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CO<sub>2</sub>濃度が高くなった

## I<sup>2</sup>CNERでの我々のグループのプロジェクト

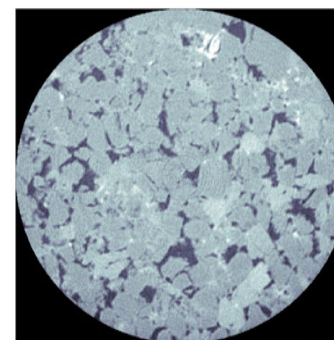
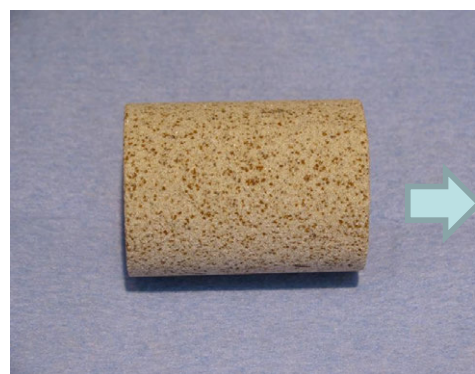
- 大気中のCO<sub>2</sub>回収し、地中貯留（CCS）することで、大気中CO<sub>2</sub>濃度を下げる（大気→地球内部へ）
- 水素の地中貯留
- 地熱発電



# 近年の急速な技術の進歩

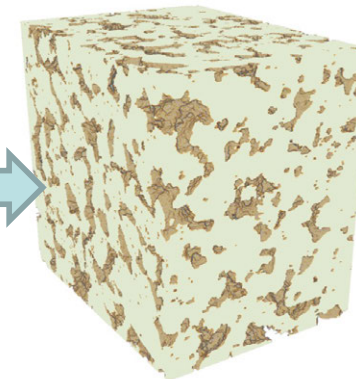
- 目覚ましい探査技術の進歩、解析手法の発達、イメージング技術の発達、計算能力の向上

## 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



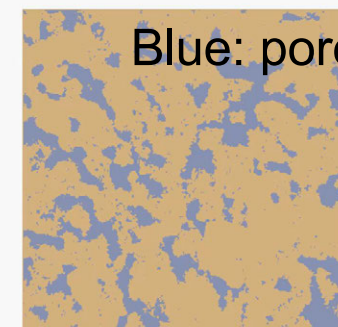
## 計算能力の向上



## モデリング手法の開発



間隙内の流体挙動 (Tsuji et al. 2016)



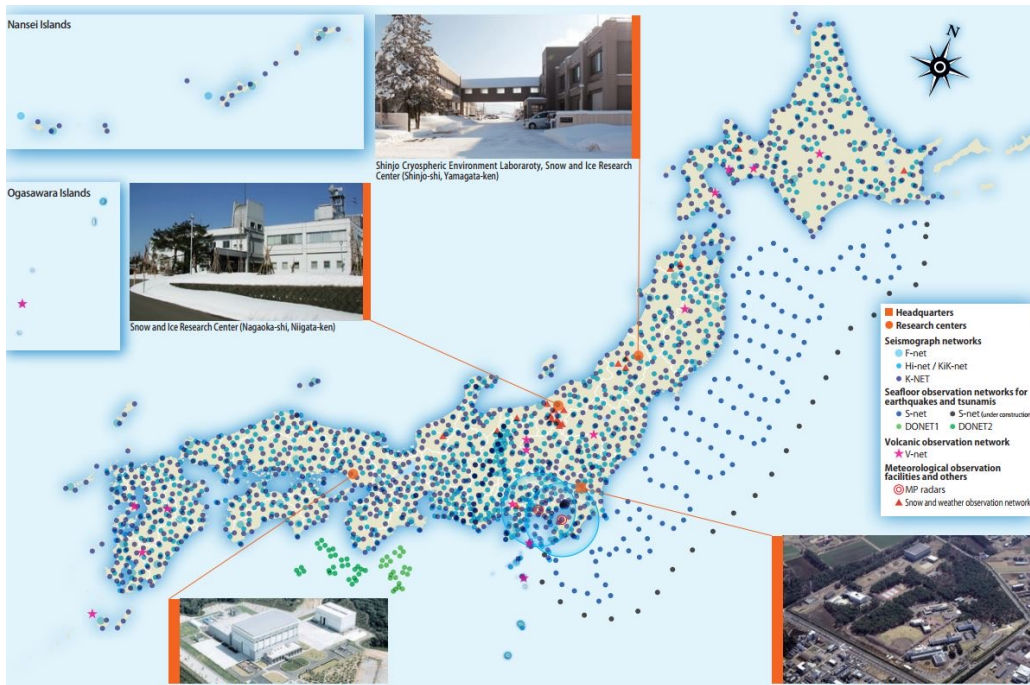
Blue: pore

鉱物化モデリング (Jiang and Tsuji, 2014)

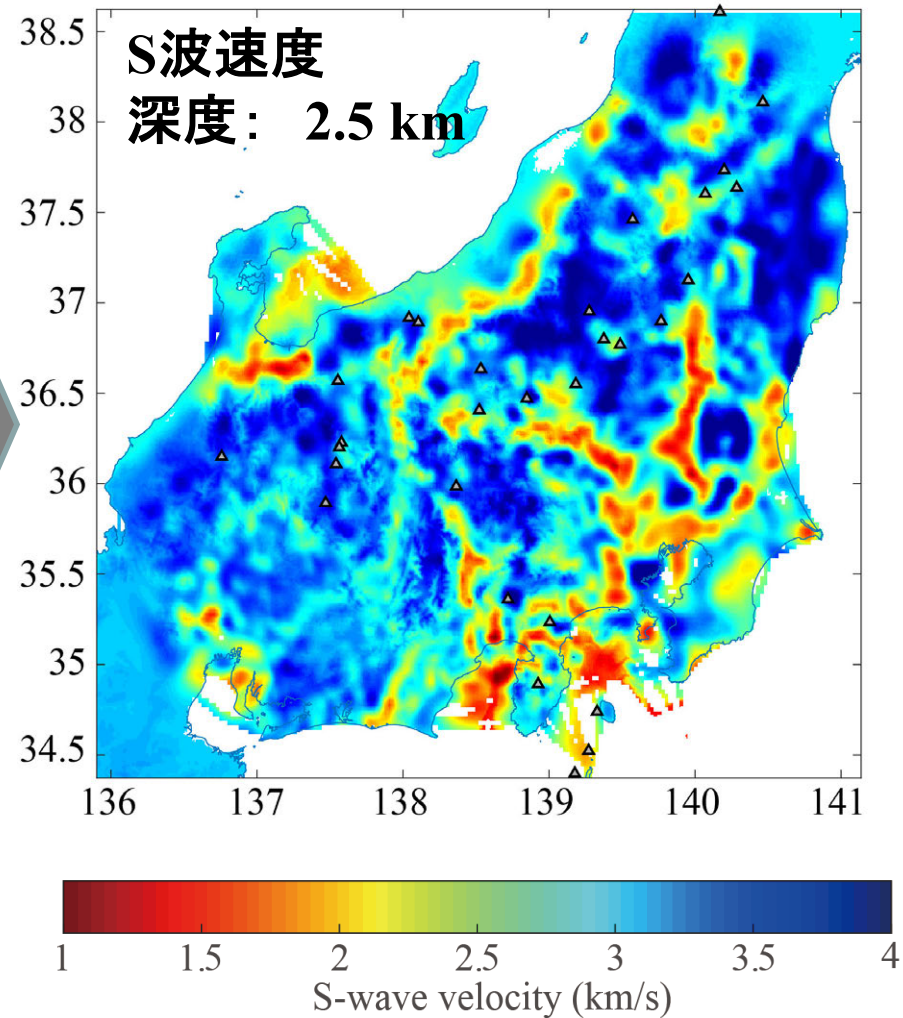
# 豊富な地震探査データ・モデリングデータ： センサリング技術・ビッグデータの解析技術の進歩

## 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



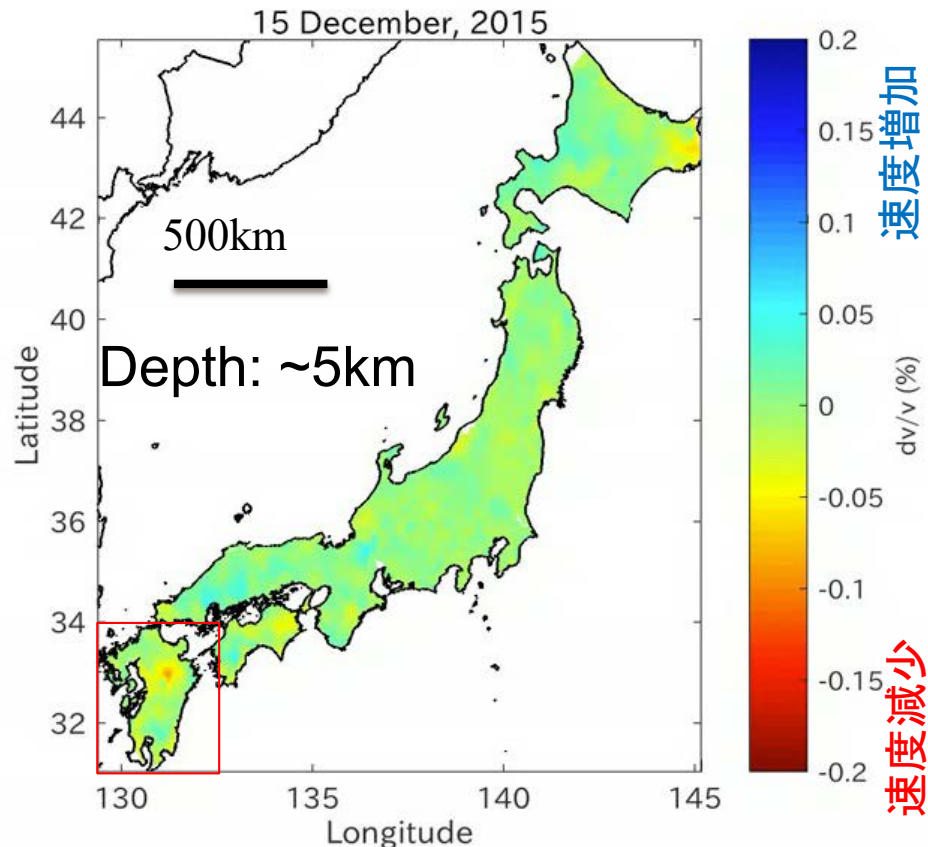
*Nimiya et al., 2020 J. Geophys. Res.*

➤ このS波速度の時間変化を調べれば、

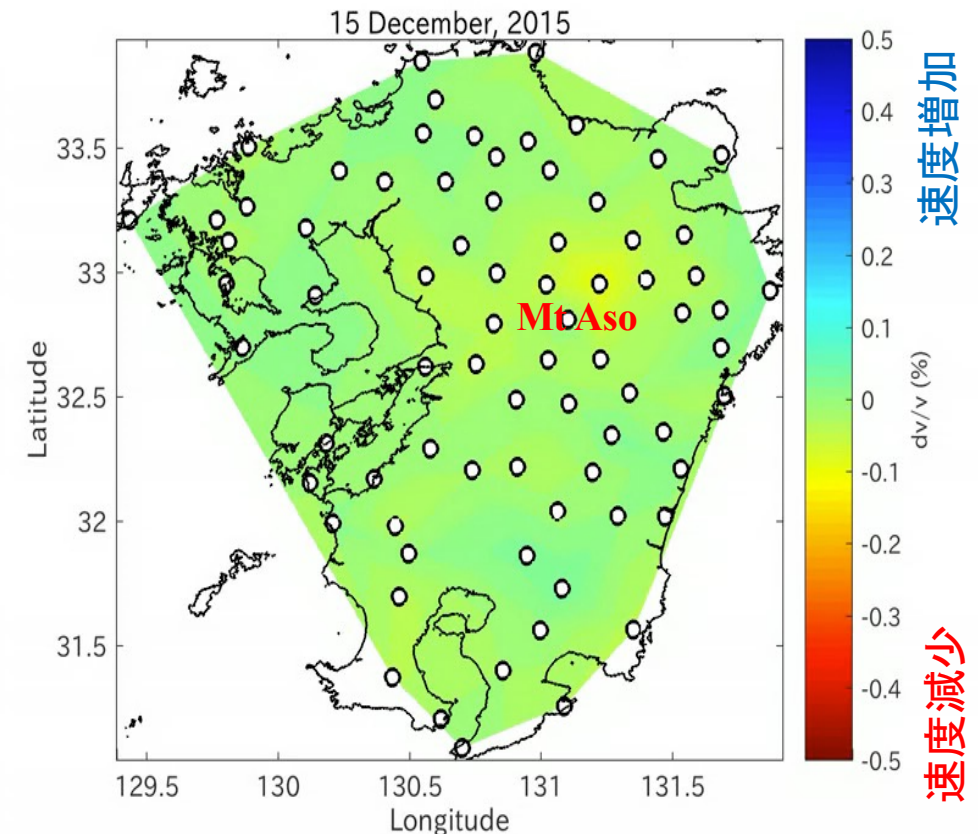
# 日本全国の地殻をモニタリング： 熊本地震に適用した結果

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

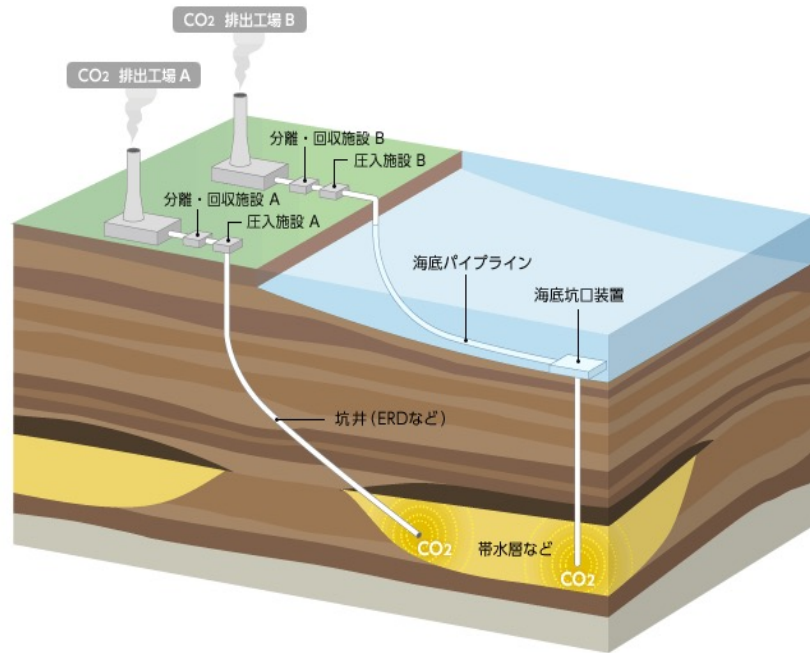
# 今日の話題

- ・ 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
  - CO<sub>2</sub>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)

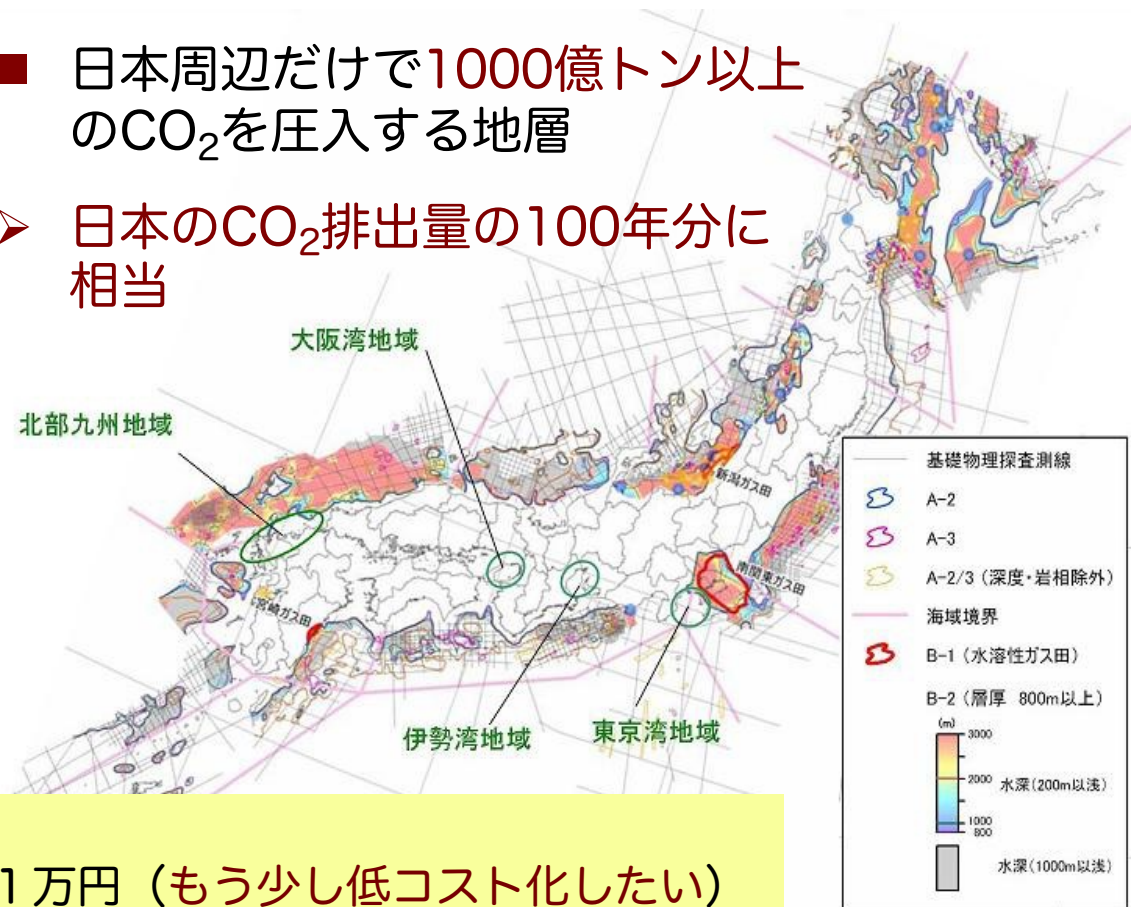
- 現在の技術で実現可能 (近未来的な方法)
- ポテンシャルがある
- コストは？安全性は？

CO<sub>2</sub>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CO<sub>2</sub>を圧入する地層
- 日本のCO<sub>2</sub>排出量の100年分に相当



## 改良すべき点

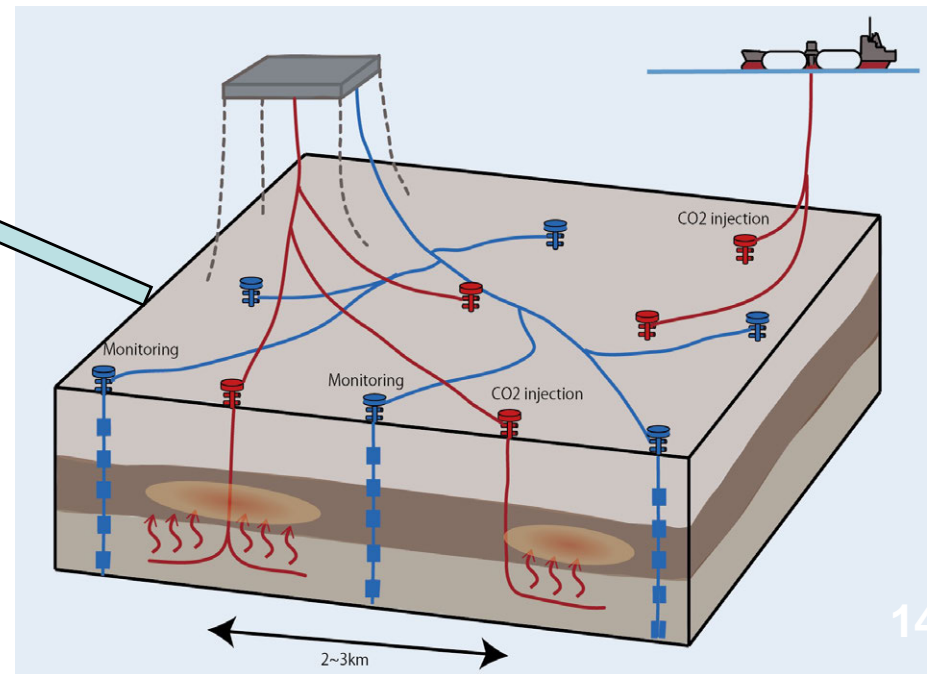
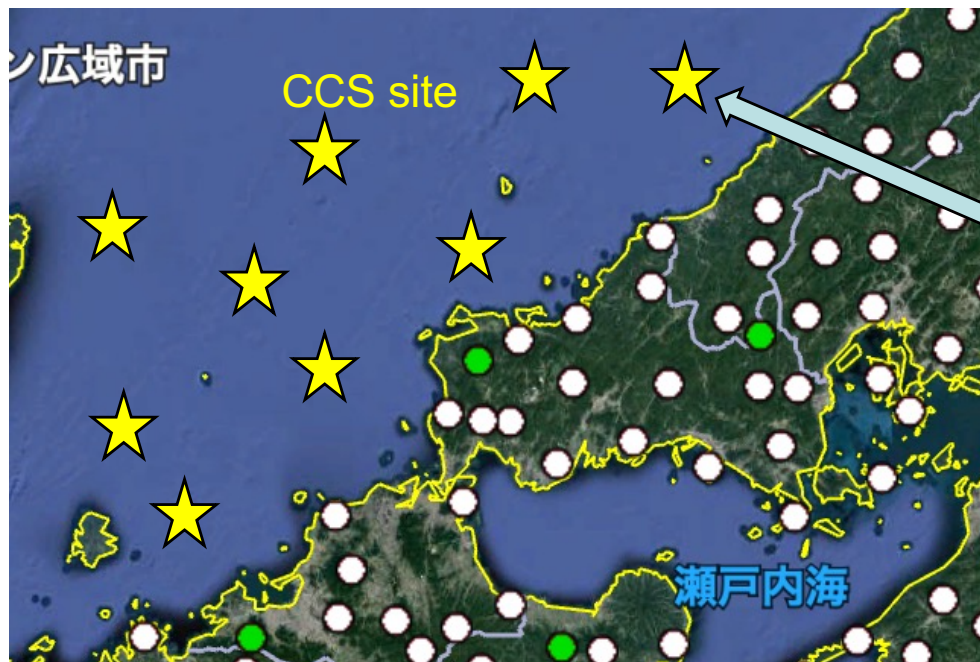
- 1トンのCO<sub>2</sub>の削減するのに1万円 (もう少し低コスト化したい)
- より安全に貯留する方法を開発
- 誘発地震を起こさないためのモニタリングが必要



# CCS/CCUSは有効な方法に思えるが、、、

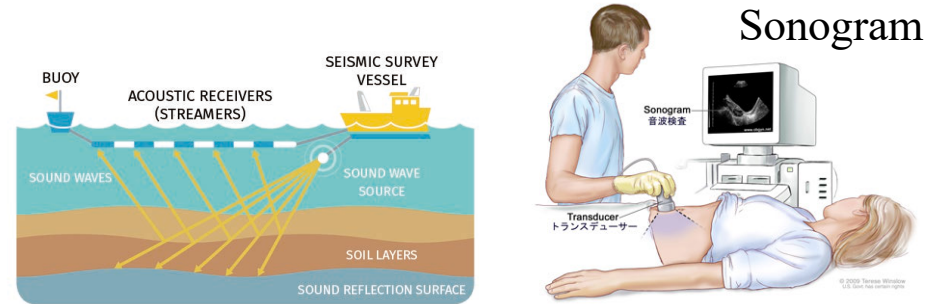
*To achieve 1.5°C sustainable development scenario, CCS/CCUS provides 15% of cumulative CO<sub>2</sub> emission reductions (IEA, 2020)*

- 世界で約6000箇所の大規模スケールのCO<sub>2</sub>貯留サイト (100万トン/年) が必要  
*Tsuji et al. (2021) GHG*
  - 多くのCO<sub>2</sub>貯留サイトをモニタリングして、安全を担保する必要

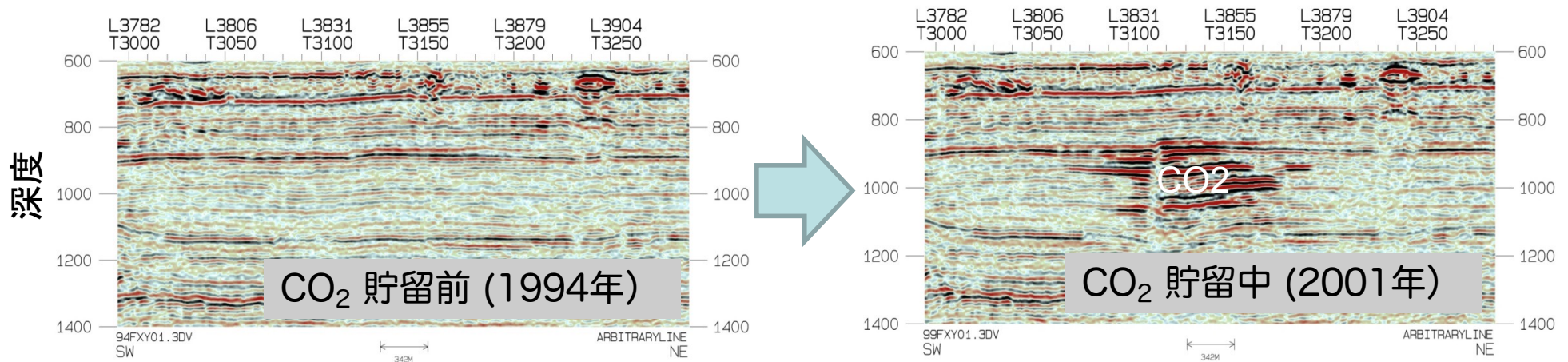


# これまでのCO<sub>2</sub>貯留サイトのモニタリング方法

## 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、

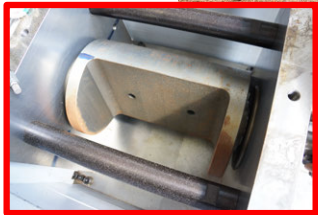
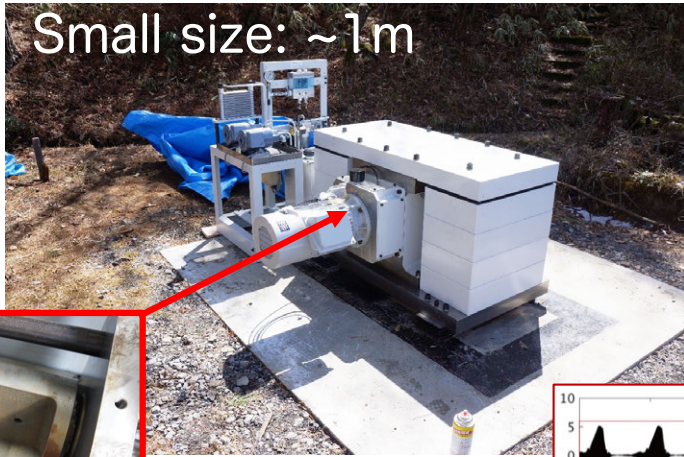
連続的にモニタリングできる手法を開発

- 低コスト
- 連続的
- 多くのCO<sub>2</sub>貯留サイトを同時にモニタリング

# 貯留CO<sub>2</sub>の連続モニタリングシステム

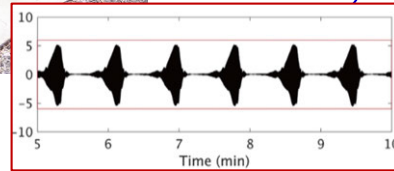
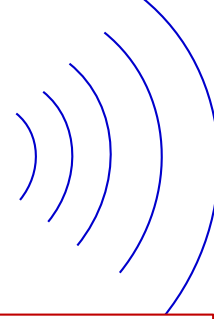
## 小型連続震源装置

Small size: ~1m



オモリ (~10 kg)を回転  
8000N at 20Hz

CO<sub>2</sub>貯留層を  
伝える振動

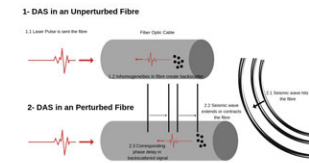


発振波形

## 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CO<sub>2</sub>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



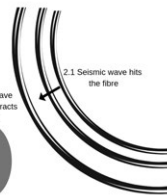
Fiber Optic Cable



## 2- DAS in an Perturbed Fibre



2.2 Seismic wave extends or contracts the fibre



## DAS

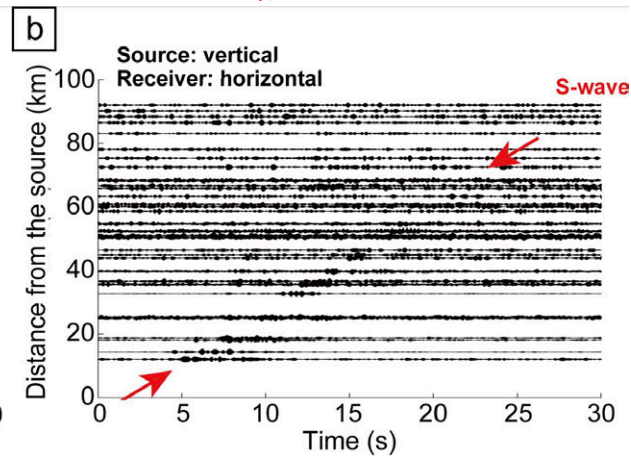
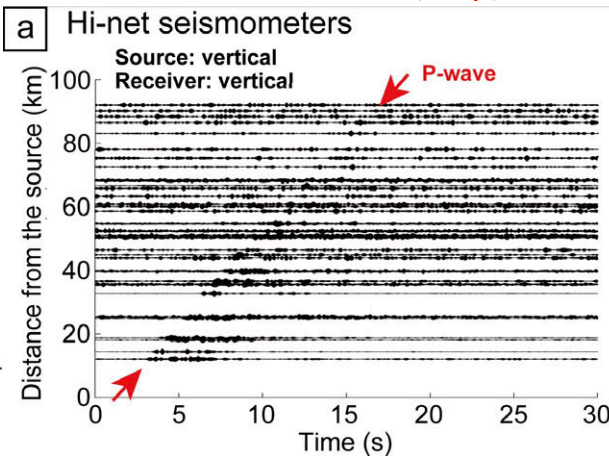
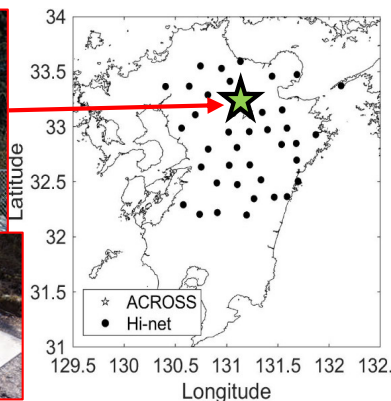
- 光ファイバーケーブルを地震計センサとして利用
- 長大 (e.g. 60 km) で超密な地震計アレイに10m間隔で地震計が並んでいるのと同価なデータ
- Number of channel is ~6,000

# 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

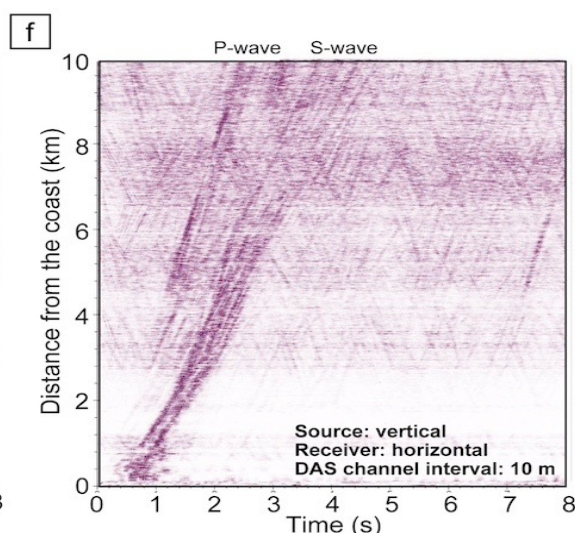
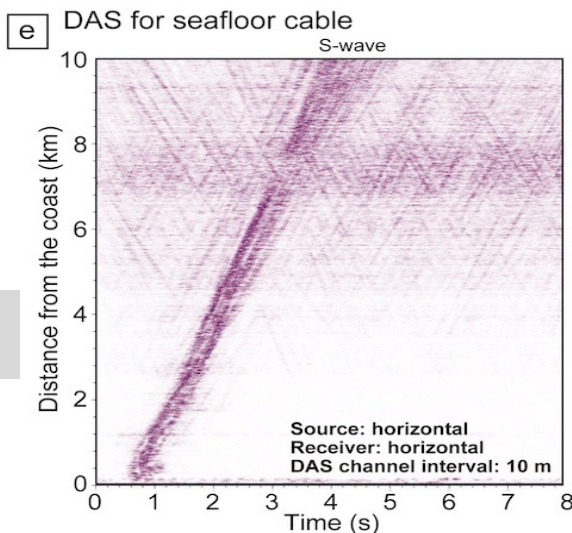
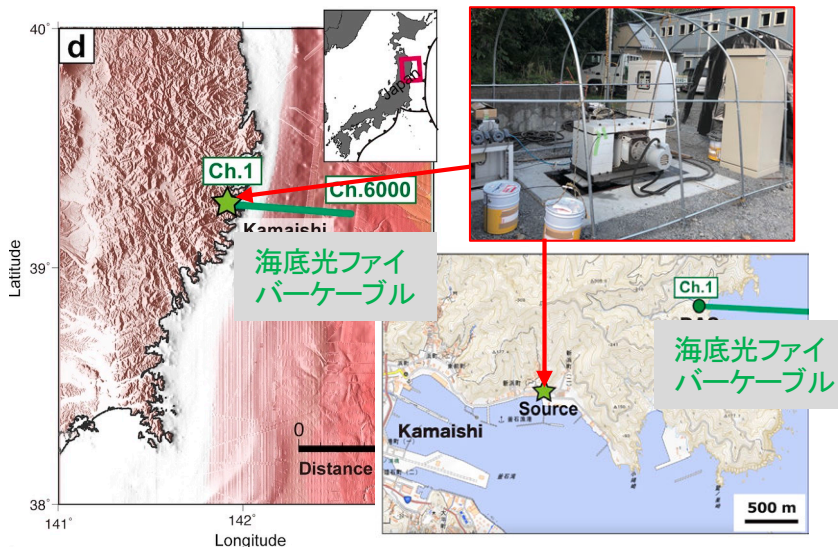
➤ 広い範囲をモニタリング可能

東京大学・釜石観測所

海底光ファイバー（DAS）を利用

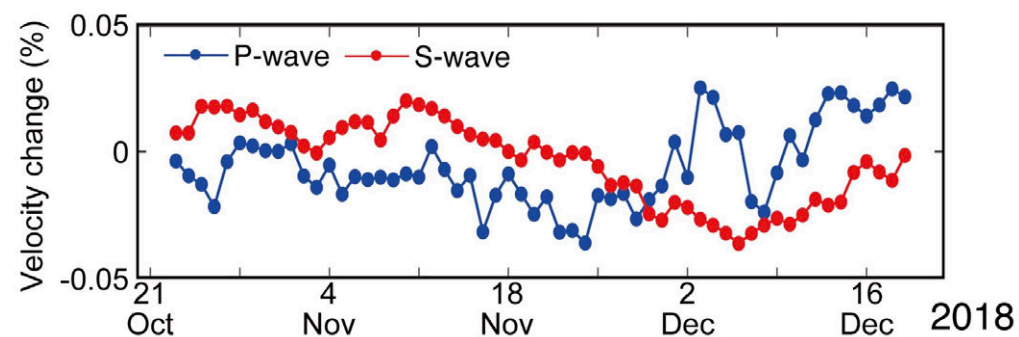
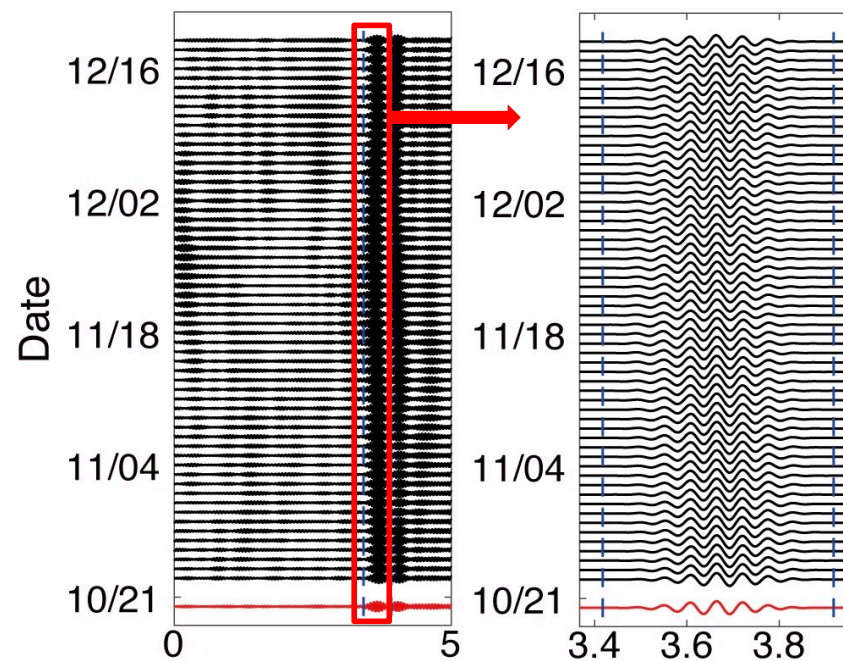
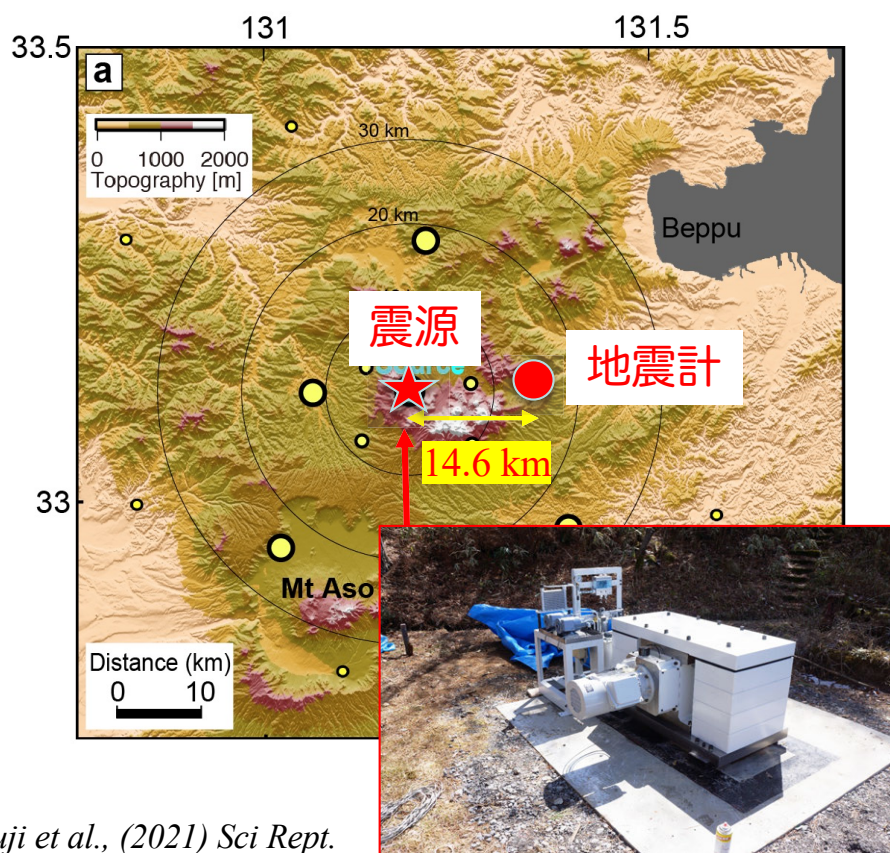
1.5ヶ月間のデータの足し合わせることで、10km  
以上、海底光ファイバーケーブルに信号が伝播

➤ 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CO<sub>2</sub>のモニタリングが可能)

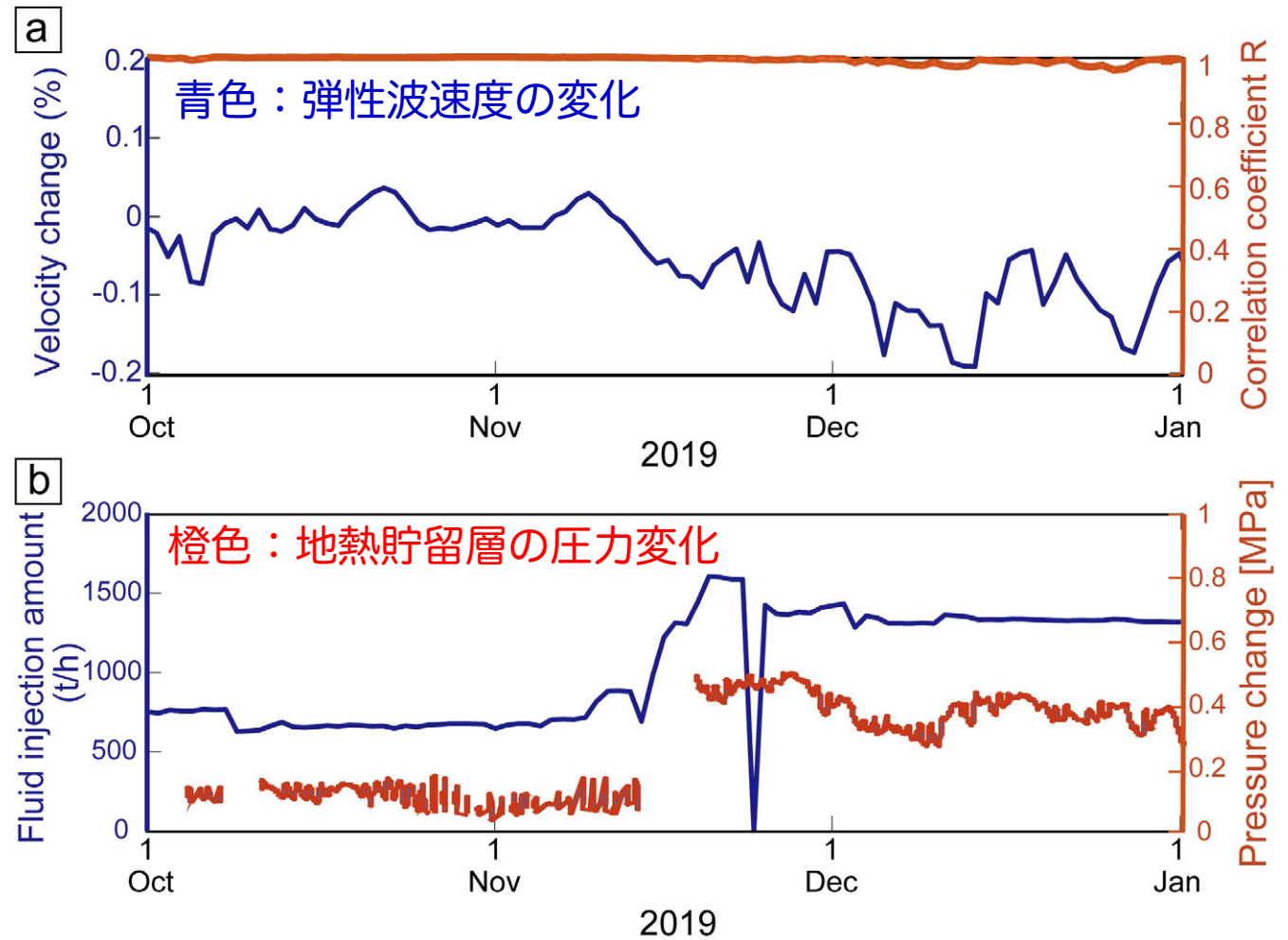
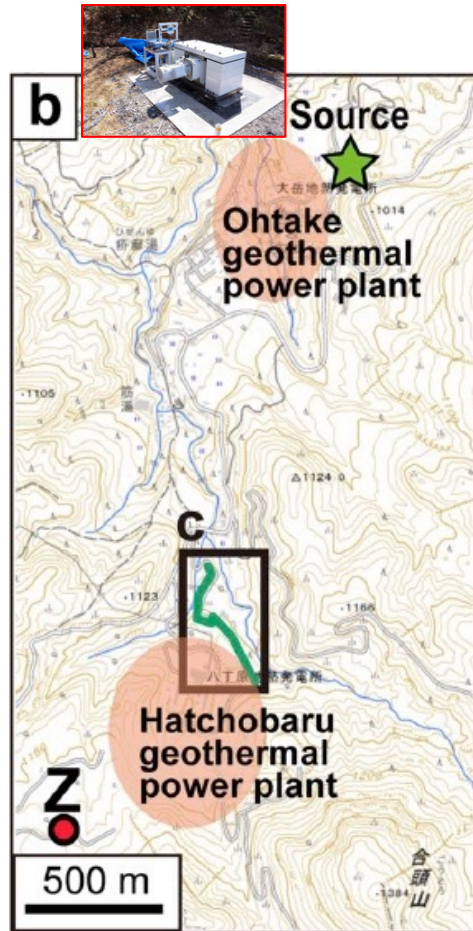


P波速度とS波速度の時間変化

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

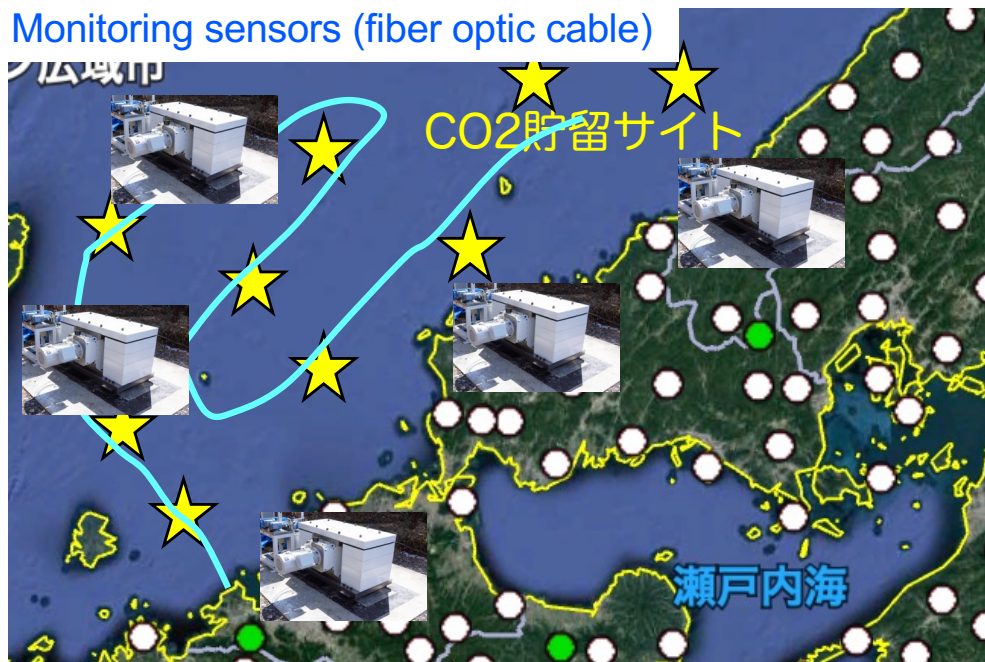
- 地熱発電のオペレーションに伴う貯留層内の変化もモニタリングできている



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

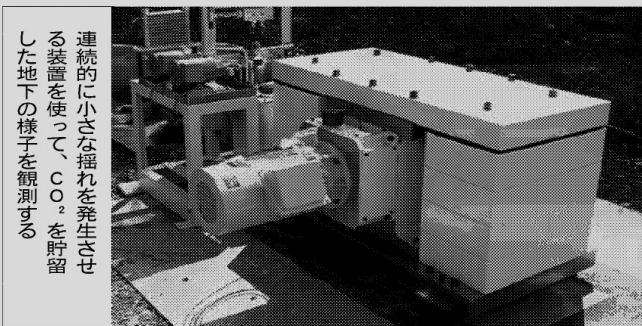
# 新たなモニタリングコンセプトの構築

- DASを利用し、広い範囲に地震計を展開
- 連続的に長距離を伝播する信号を発振する震源装置を多点に設置
- 広域に分布する多数のCO<sub>2</sub>貯留サイトを同時に、連続的に、安価にモニタリング
- 常に貯留したCO<sub>2</sub>をモニタリングし、急なCO<sub>2</sub>の漏洩などに早急に対応



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

## 地下のCO<sub>2</sub>を継続監視



連続的に小さな揺れを発生させる装置を使って、CO<sub>2</sub>を貯留した地下の様子を観測する

九州大学の辻健教授らを使い、地下に埋めた二酸化炭素(CO<sub>2</sub>)の状態を継続的に監視する手法を開発した。温暖化対策

で期待されるCO<sub>2</sub>の回収・貯留(CCS)に役立つ。世界各地のCCSの現場で実用を目指す。パリ協定では、世界の平均気温の上昇を産業革命前に比べて2度を十分下回る目標を掲げている。国際エネルギー機関(IEA)は、これを達成するには削減が必要で、CO<sub>2</sub>のうち15%前後をCCSで対応する必要があるとしている。CCSは欧米などの一部で実用化が進むが、普及に向けてCO<sub>2</sub>の漏洩などが懸念されている。

現在は船から発して海底で跳ね返った音波を地震計で捉え、CO<sub>2</sub>が貯留されている地下の様子を観測するのが一般的。CO<sub>2</sub>が貯留される場所では音波が返る速度が遅くなる。辻教授は「従来の観測を実現し、CCSを活用し、CO<sub>2</sub>を貯留した地下の様子を観測する」と話す。

### 九大教授らが手法開発

なる。ただ、特殊な船を使うなど費用が1億円以上かかる場合もあり、頻りに調べるのは難しい。

2021/10/19 日経

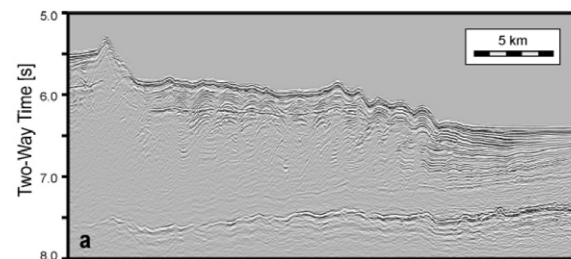


# 今日の話題

- DASと小型震源装置を用いたモニタリング
  - CO<sub>2</sub>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）

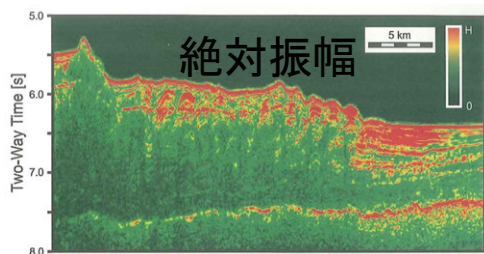
# 反射法地震探査データへ機械学習

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）

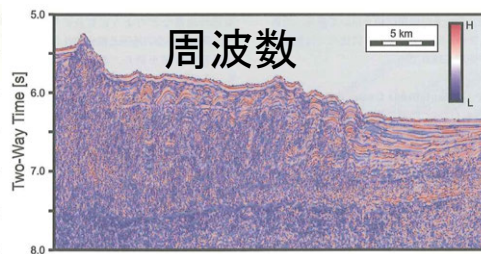


オリジナルデータ  
反射断面図

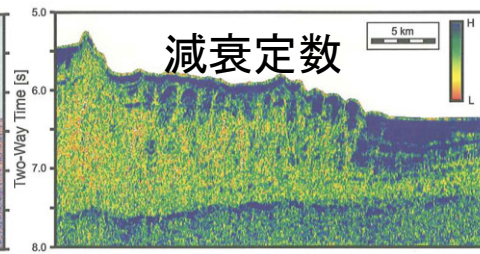
## マルチアトリビュートの計算



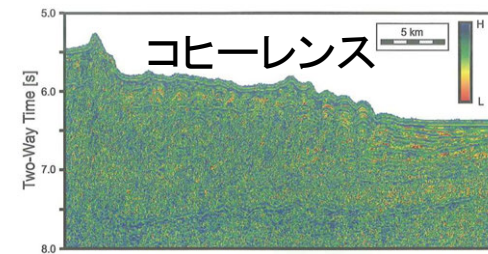
絶対振幅



周波数

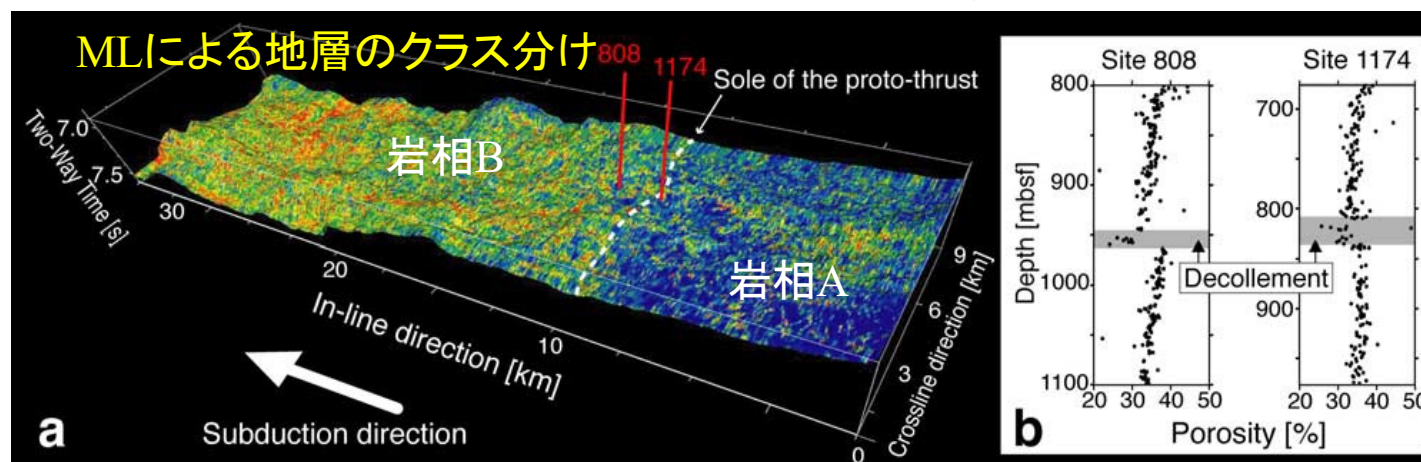


減衰定数



コヒーレンス

## 教師なしニューラルネットワーク(SOM)

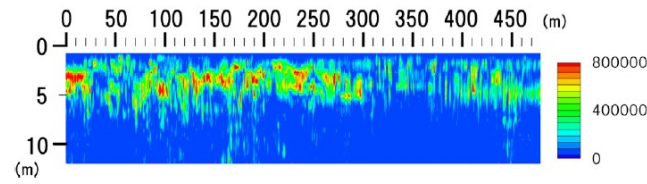


Tsuji et al., 2005  
*Geophy. Res. Lett.*  
doi:10.1029/2004GL021861

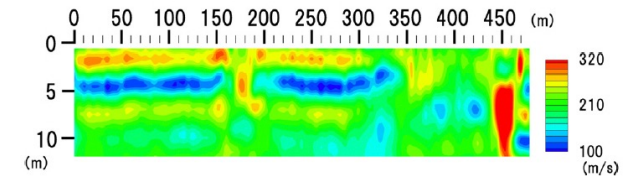
# 10 教師なしニューラルネットワーク (SOM) で堤体内部を特徴化

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

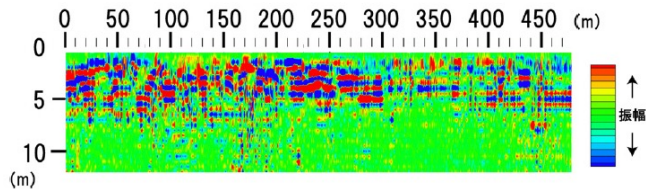
➤ 堤体内部の軟弱箇所を検出



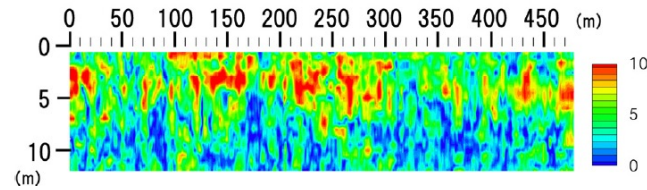
(b) 電磁波波形エンベロープ



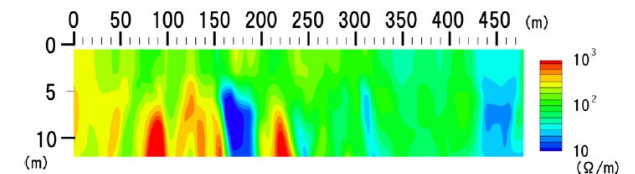
(d) S波速度



(a) 電磁波反射断面



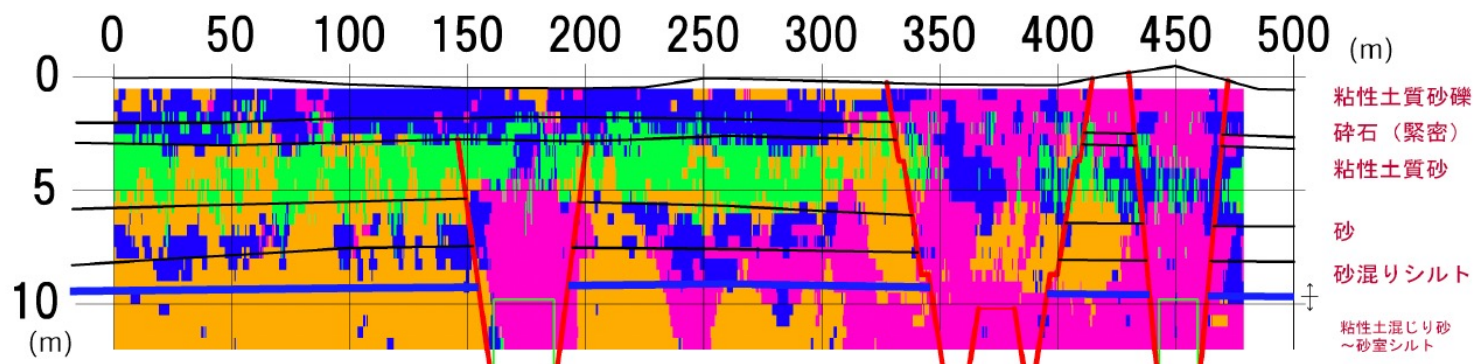
(c) 電磁波波形センブルンス



(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

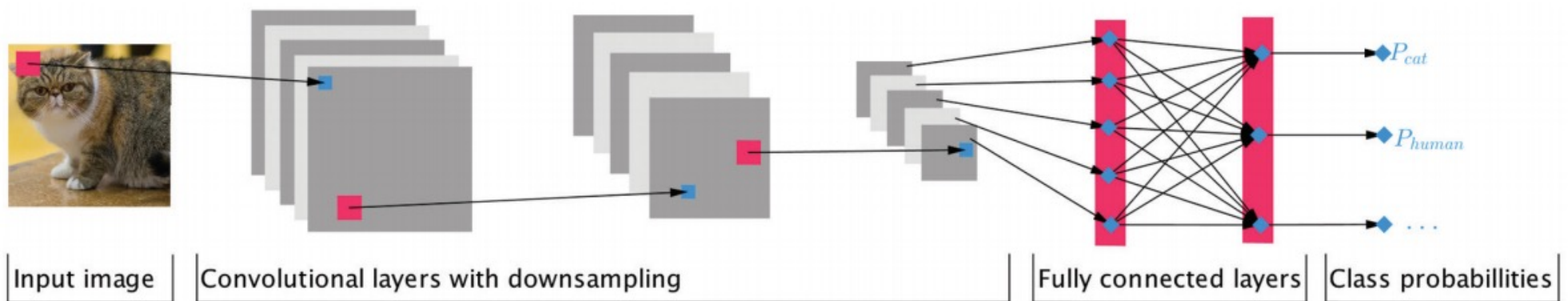
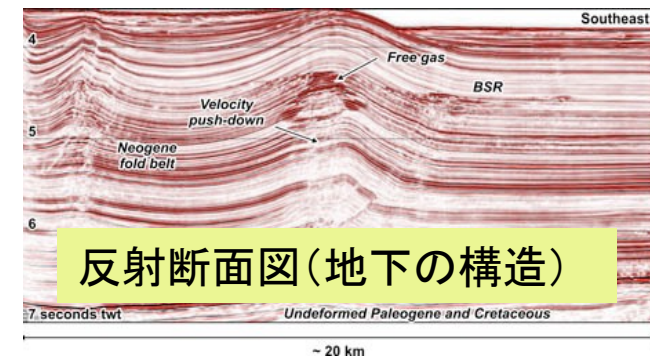


➤ しかし、この手法は、もはやTraditional machine learning と呼ばれている

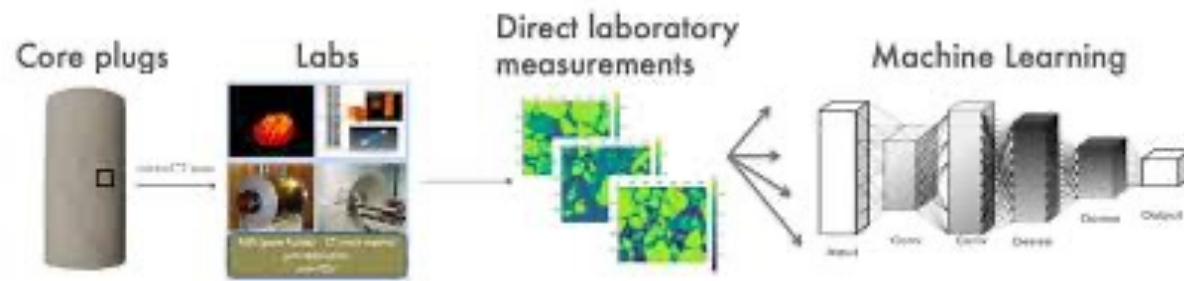
# 最近、よく使われるConvolutional Neural Network (CNN)

- 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**

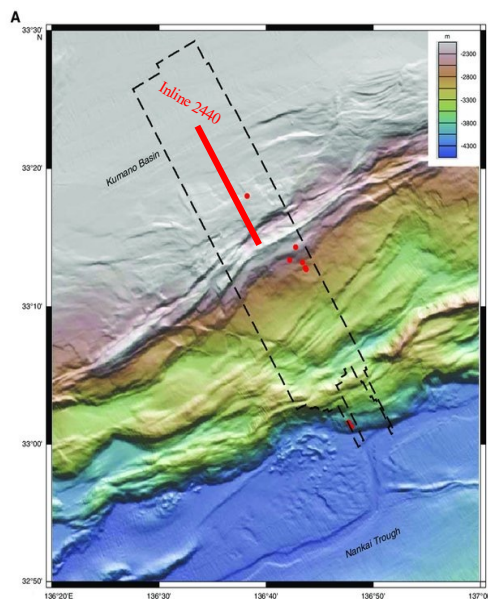
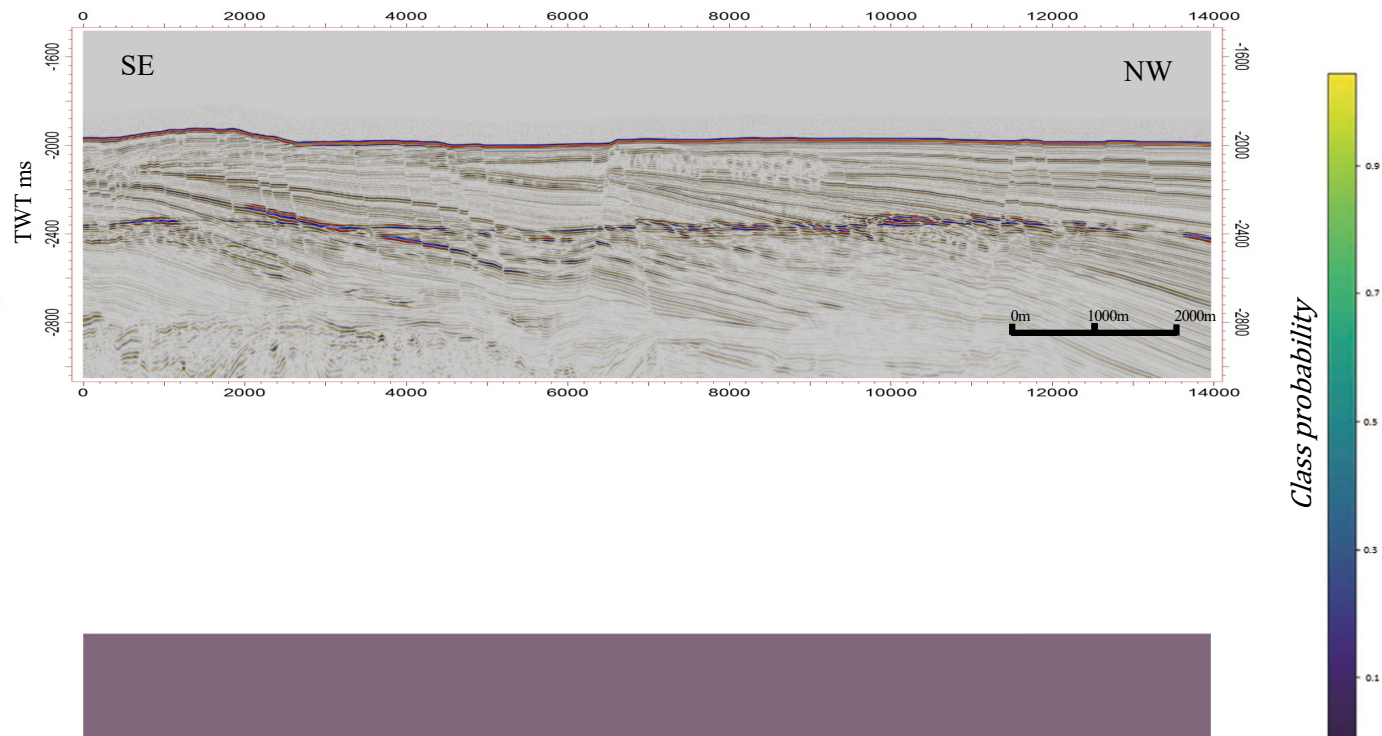
- 画像認識によく使われる
- 反射法地震探査断面図の解釈へ適用  
(GPRにも同様の手法が適用できる)



# 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

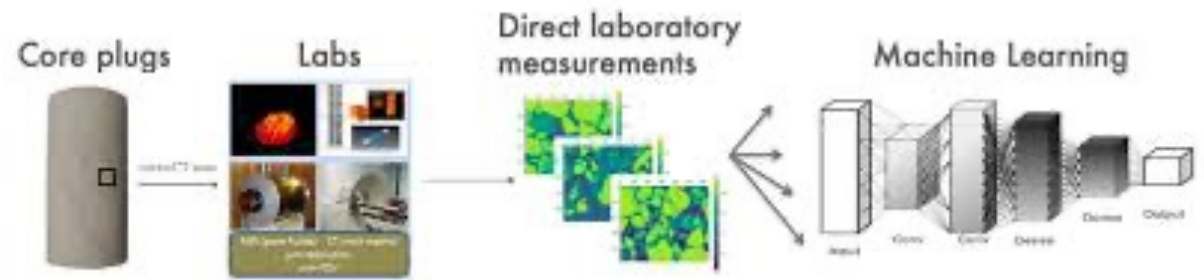


Probabilityとして結果を出すことができることも魅力

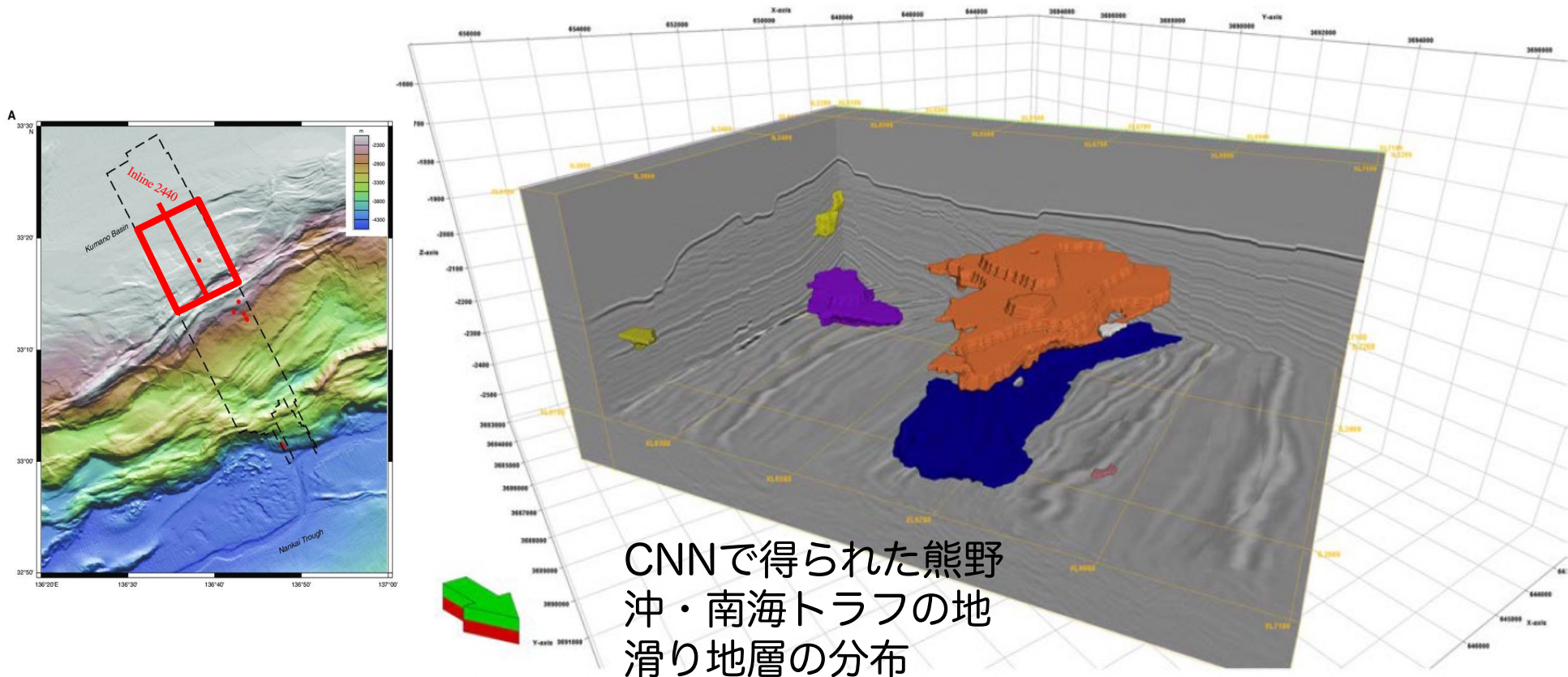


Ahmad and Tsuji (2021), *Marine and Petroleum Geology*, doi: 10.1016/j.marpetgeo.2021.105290

# CNNで反射法地震 探査断面図を自動的に に解釈



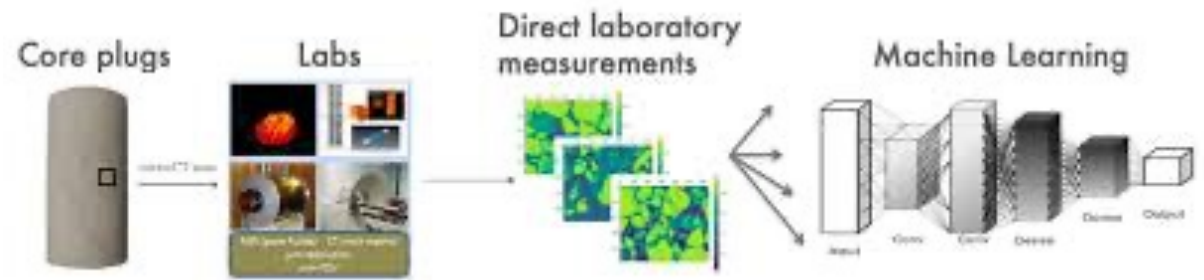
三次元的に地滑り層を解釈するのは難しいが、CNNを利用すれば、短い時間で可能



CNNで得られた熊野  
沖・南海トラフの地  
滑り地層の分布

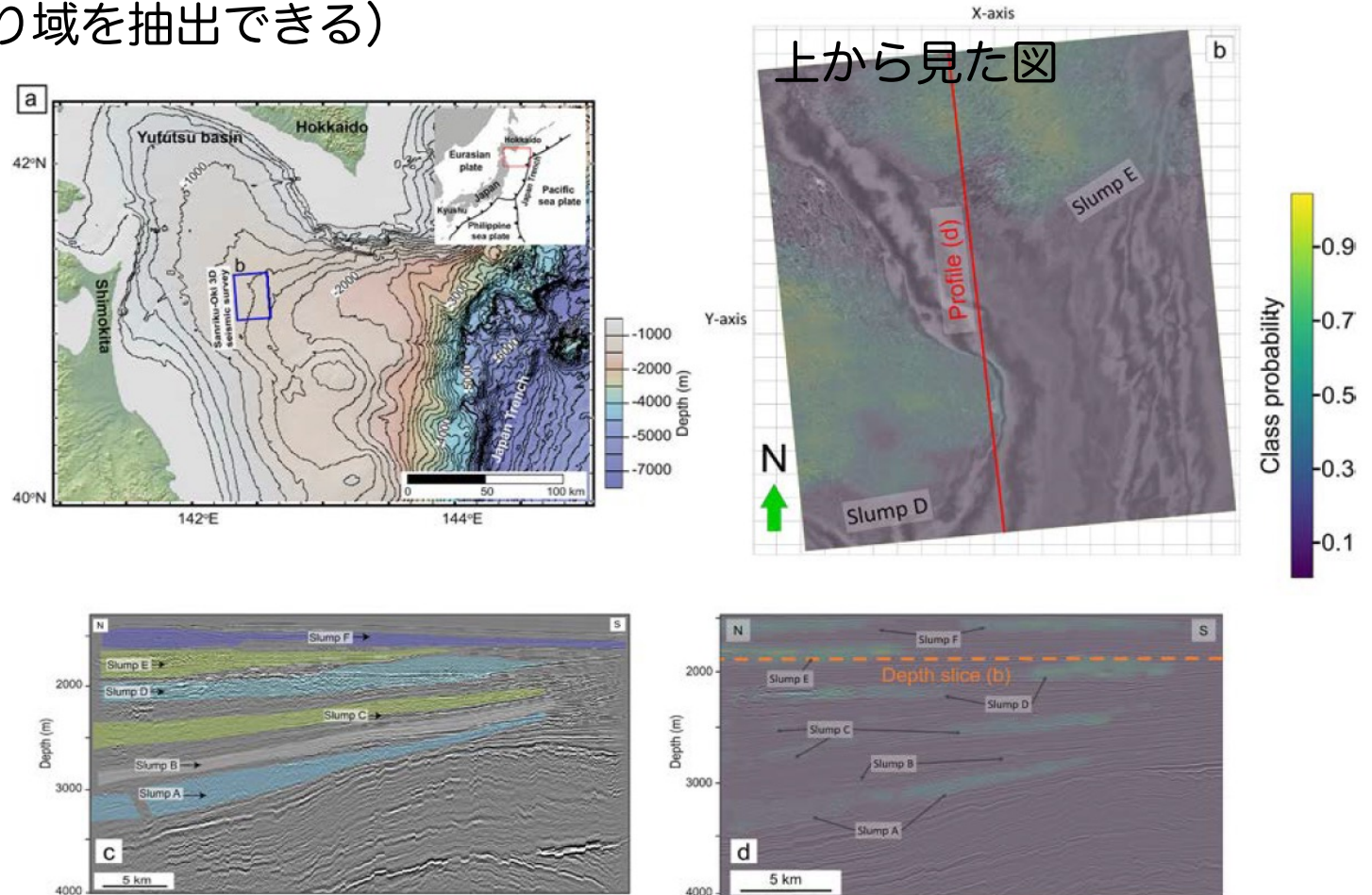
Ahmad and Tsuji (2021), *Marine and Petroleum Geology*, doi: 10.1016/j.marpetgeo.2021.105290

# CNNで反射法地震 探査断面図を自動的に に解釈



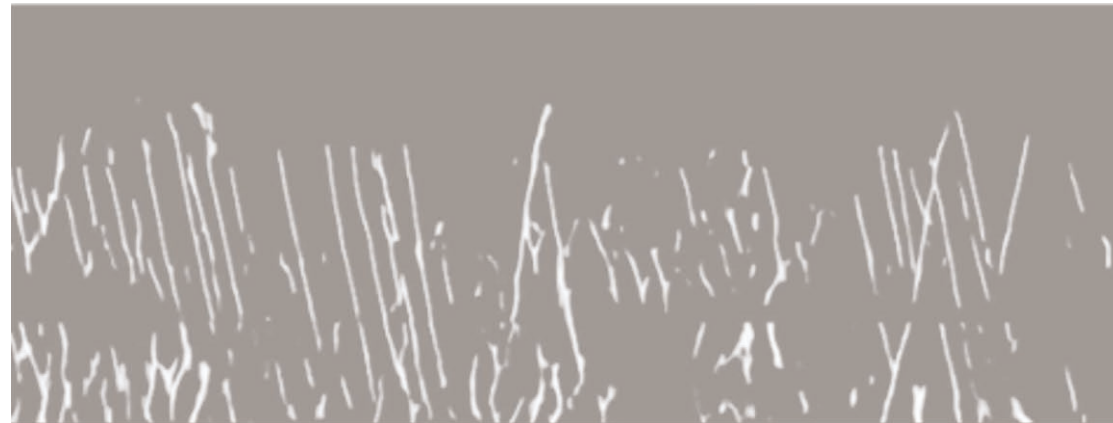
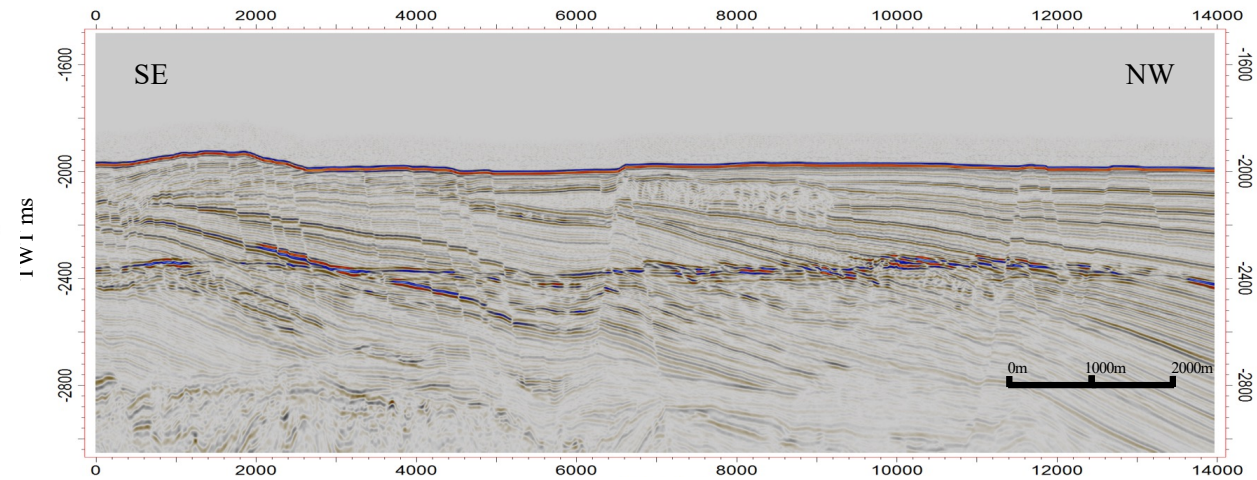
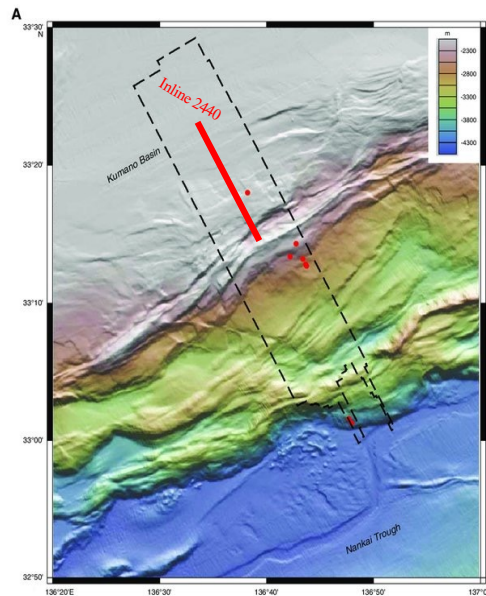
一度CNNを学習すれば、ある程度は他の場所にも適用できる（自動的に地滑り域を抽出できる）

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

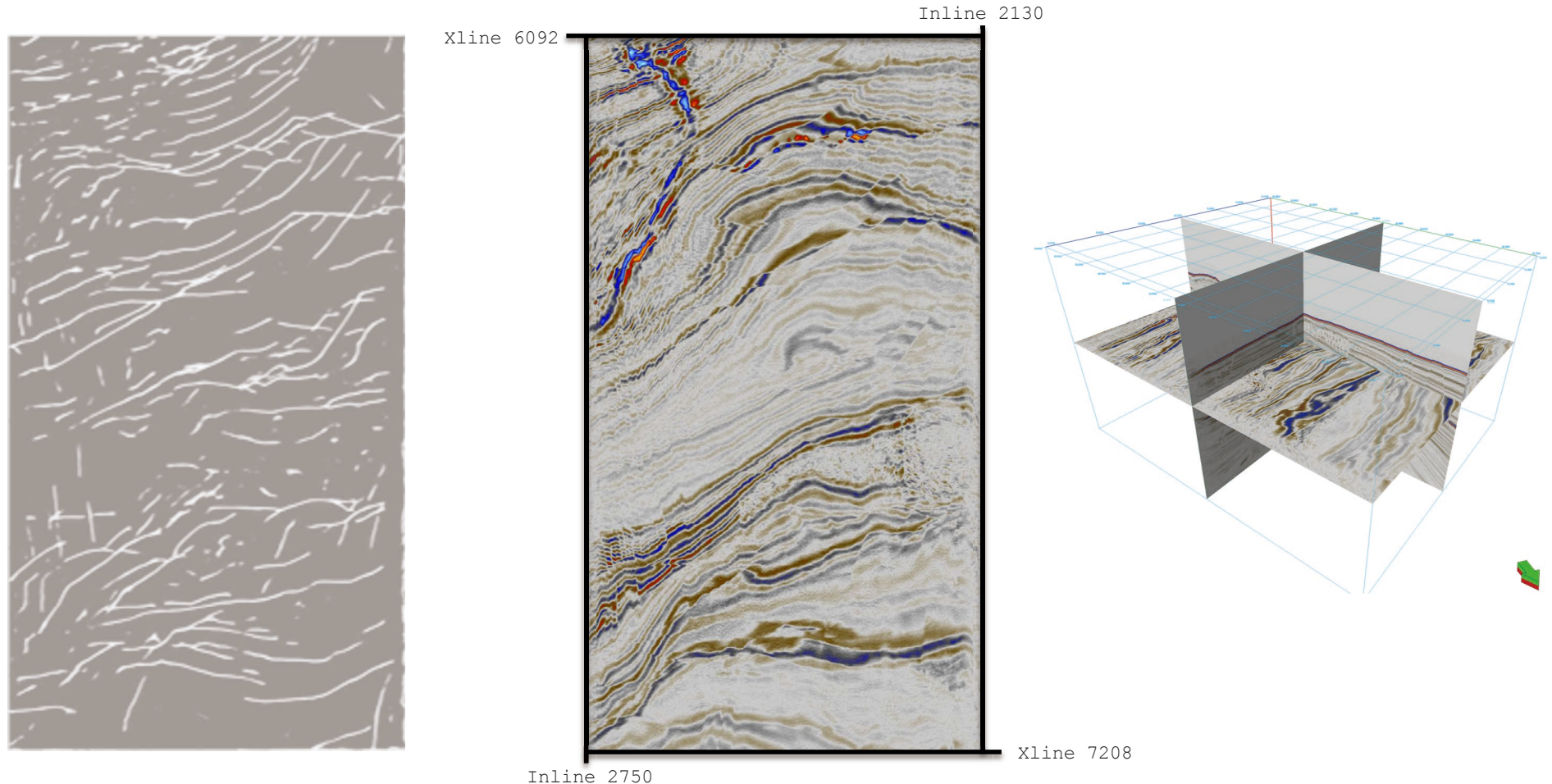


Ahmad and Tsuji (2021), *Marine and Petroleum Geology*, doi: 10.1016/j.marpetgeo.2021.105290



# 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

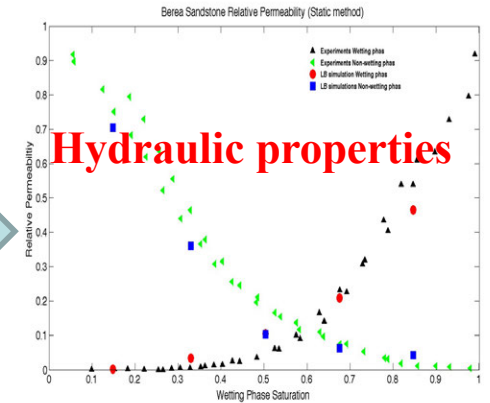
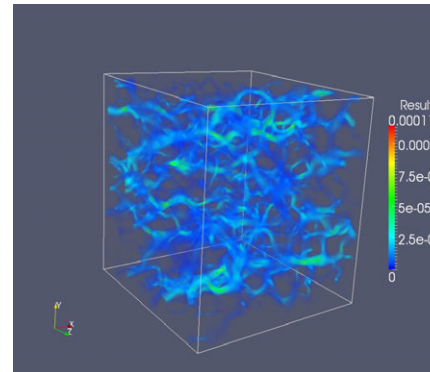
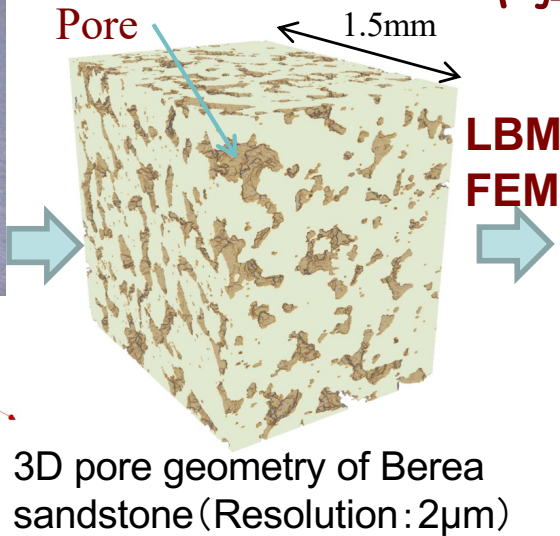
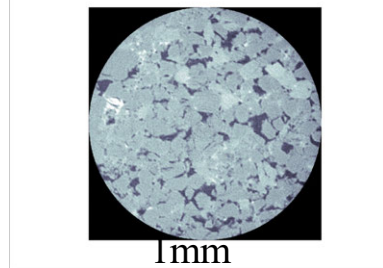
*Ahmad and Tsuji (2021), Marine and Petroleum Geology, doi: 10.1016/j.marpetgeo.2021.105290*

# 今日の話題

- DASと小型震源装置を用いたモニタリング
  - CO<sub>2</sub>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）

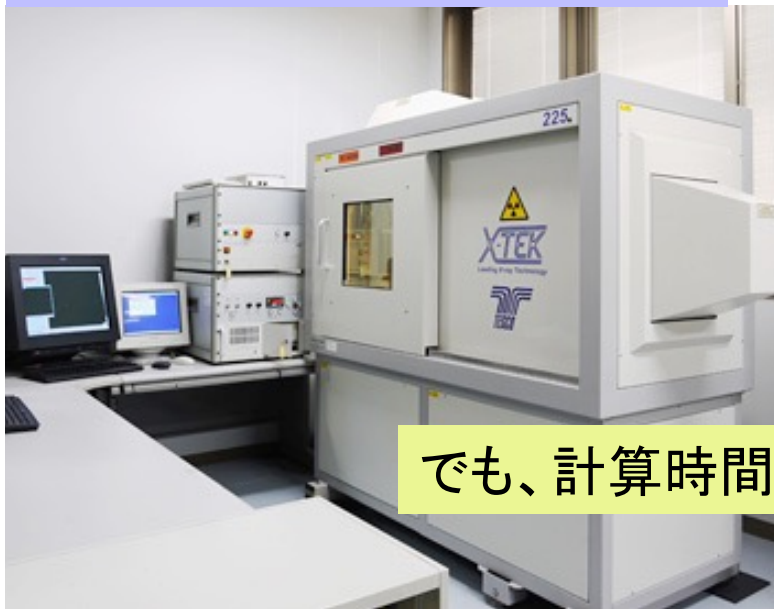
# デジタル岩石物理

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

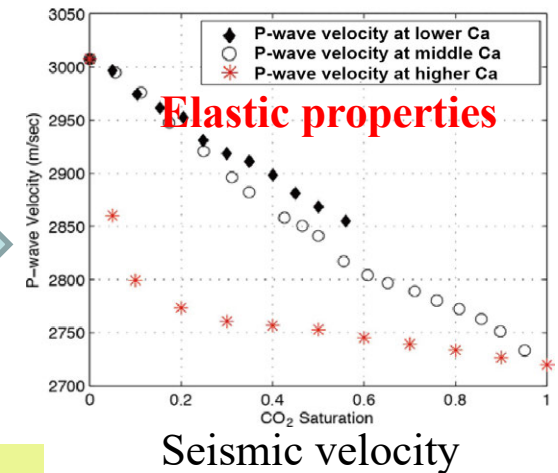
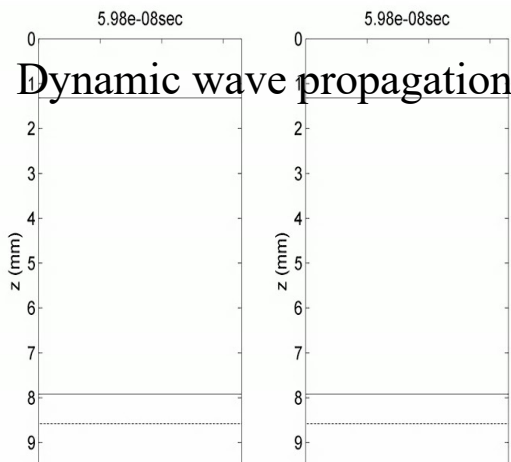


*Tsuji et al. 2016 Adv. Wat. Resour.*

## Microfocus X-ray CT images



FDTD  
FEM

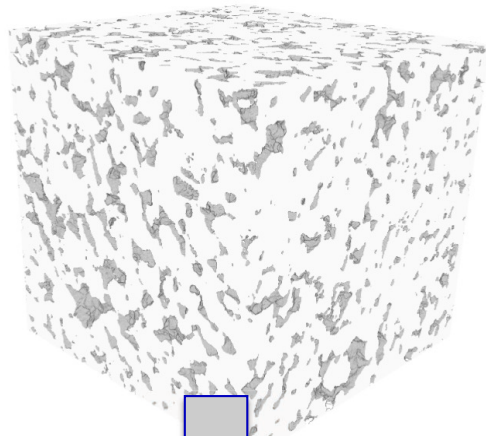


でも、計算時間が必要・専門知識が必要。。。

*Tsuji et al. 2019 Computer and Geosciences*

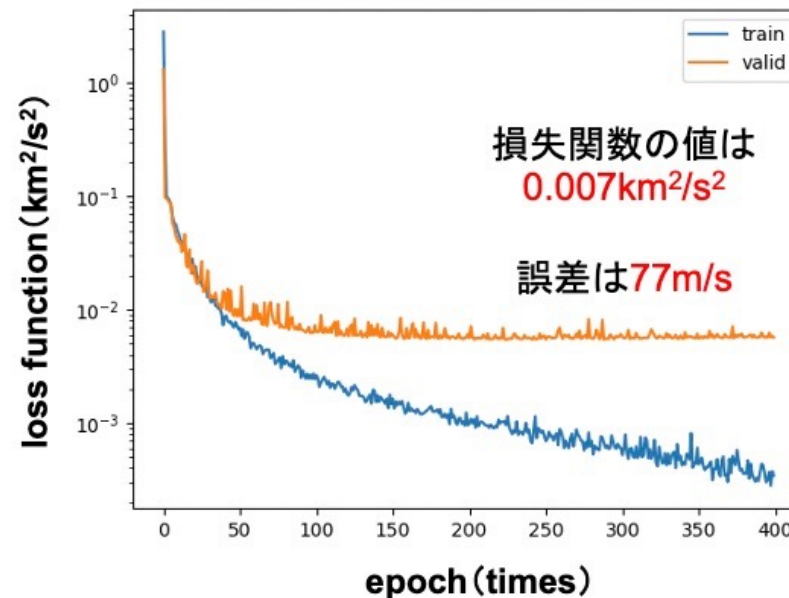
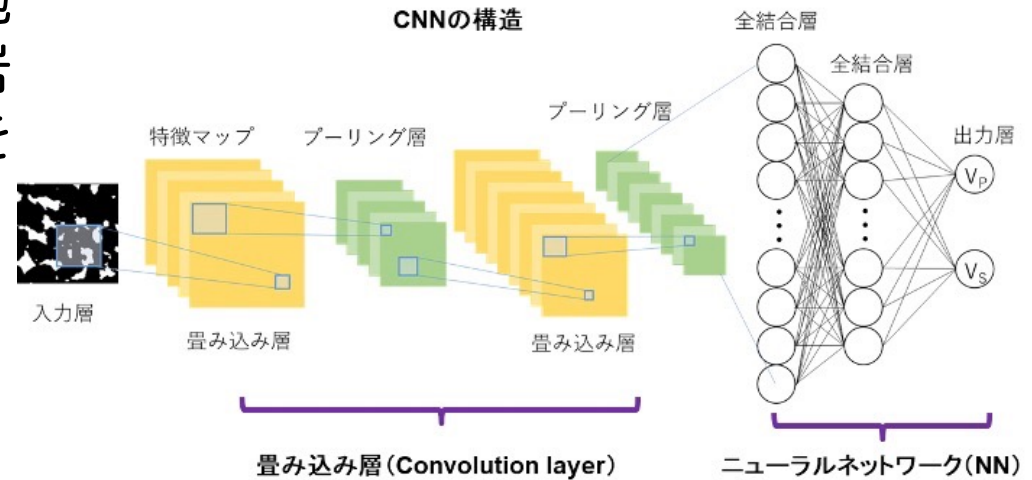
# 機械学習を利用して、間隙形状から直接、浸透率や弾性波速度を推定

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

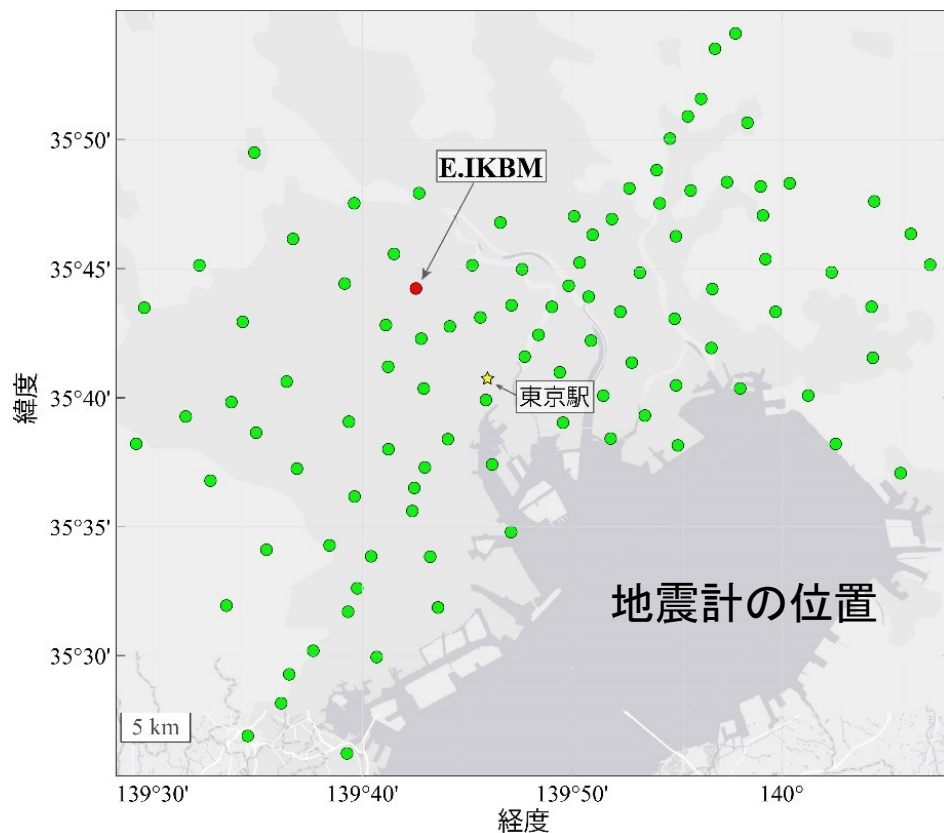
- DASと小型震源装置を用いたモニタリング
  - CO<sub>2</sub>地中貯留でのモニタリング（この話題を中心に）
  - 浅部地層・人工構造物のモニタリング（地滑り地域など）
- 機械学習を用いたデータ解析・解釈の自動化
  - 反射法地震探査断面図を自動的に地質解釈
  - 多数の物理探査データを融合して堤防内部を推定
  - デジタル岩石モデルから自動的に物性計測
  - 社会活動のモニタリング（交通量と車種の自動測定など）

# 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



YAHOO! JAPAN ニュース geo\*\*\*\*\* 167ポイント プレミアム会員 日曜日はさらに最大5%相当戻ってくる!

キーワードを入力 | Q

トップ 速報 ライブ 個人 オリジナル みんなの意見 ランキング

主要 国内 国際 経済 エンタメ スポーツ IT 科学 ライフ 地域

### 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】

12/1(水) 16:06 配信 0 0 0 Web担当者Forum

産業技術総合研究所（活断層・火山研究部門）と九州大学（地球資源システム工学部門）は、「地震計データの、地震観測以外の新しい活用」として、新型コロナウイルス感染拡大にともなう社会活動の低下を、首都圏に設置された地震計データから読み取ったことを発表した。

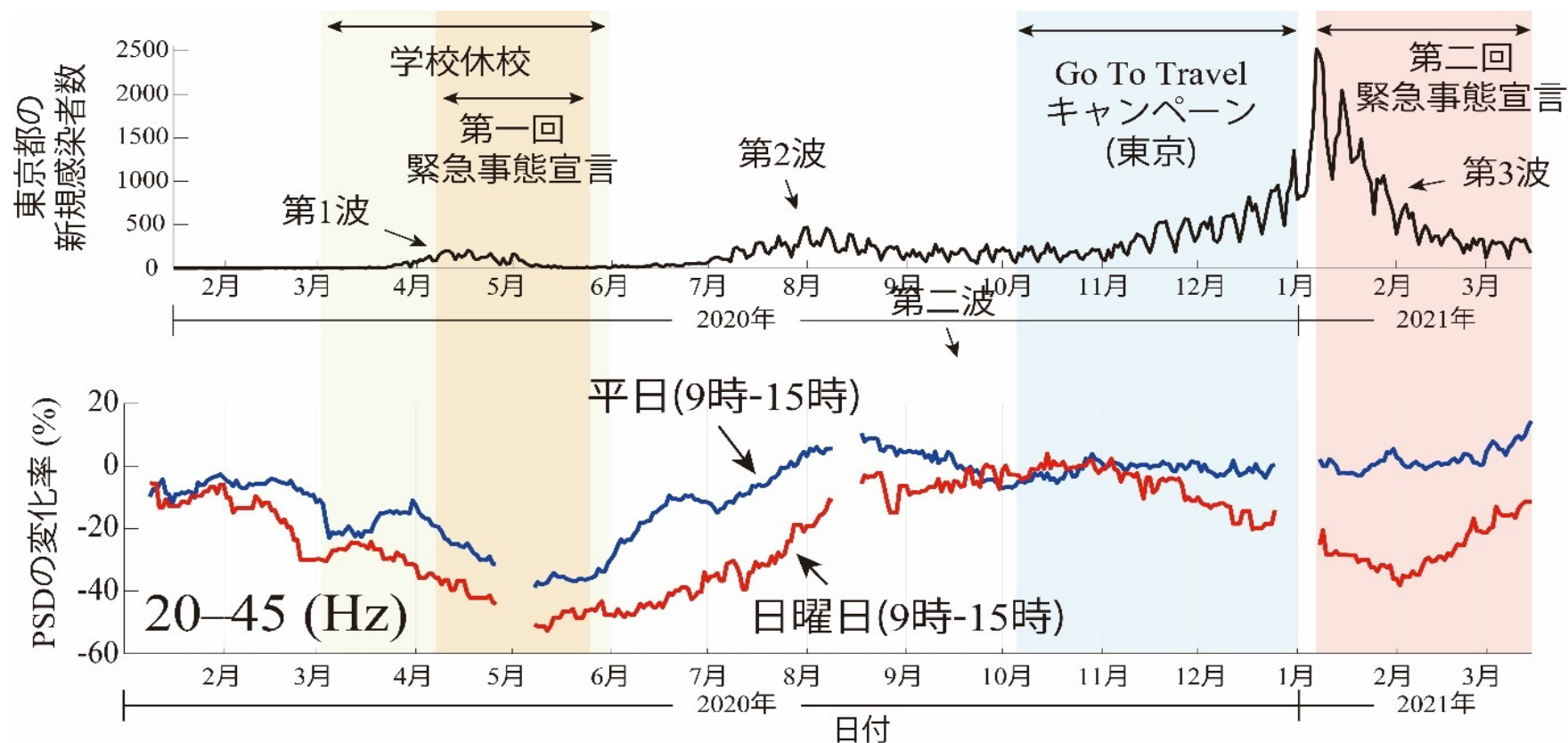
#### コロナ禍において、人間活動による振動が低下

人間活動にともなう振動は、自然界の引き起こす振動に比べて細かく、一秒ごとの振動回数がより多い。こうした振動は、地震観測ではノイズとして扱われるが、この信号を活用する研究が近年進んでいるという。地震計には、地震動以外にもさまざまな振動が記録されており、人間活動にともなって発生する振動も記録されている。この振動が低い＝人流が少ないと考えられる。

今回の調査では、コロナ禍において、人間活動にともなって発生する振動が低下していたことが判明した。特に日曜日の振動は平日と比較して回復が緩やかで、人々が強く自粛していたことがうかがえる。これは、地震計データを人間活動のモニタリングに応用できることを示している。ま

# 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

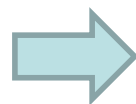
- 1回目の緊急事態宣言でPSDが最も低下
- 宣言解除で平日のPSDが回復したが、日曜日は回復が緩やかで、市民が自発的に余暇を控えた傾向
- 2回目の緊急事態宣言では、宣言下であっても感染者が減り始めるとPSDが回復



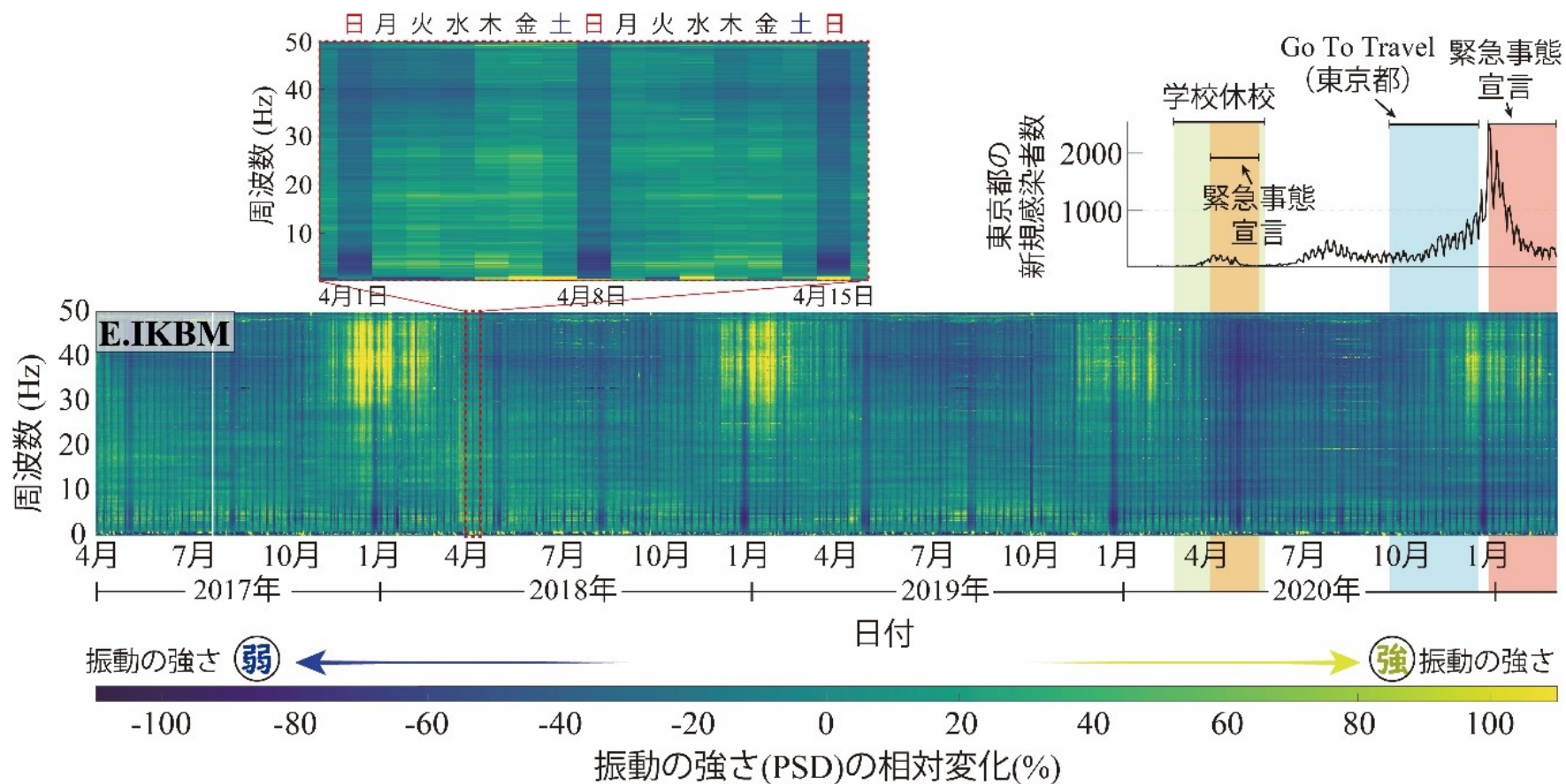
Nimiya, Ikeda and Tsuji (2021) Sci. Rept. Doi:10.1038/s41598-021-00063-6

# 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

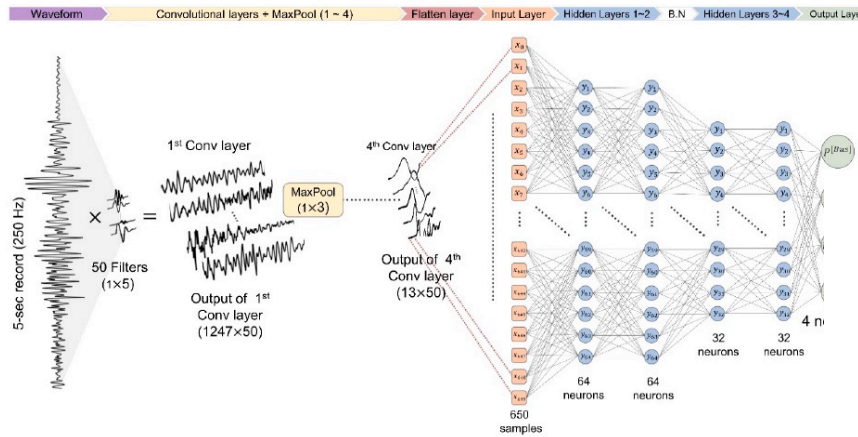


Nimiya, Ikeda and Tsuji (2021) Sci. Rept. Doi:10.1038/s41598-021-00063-6

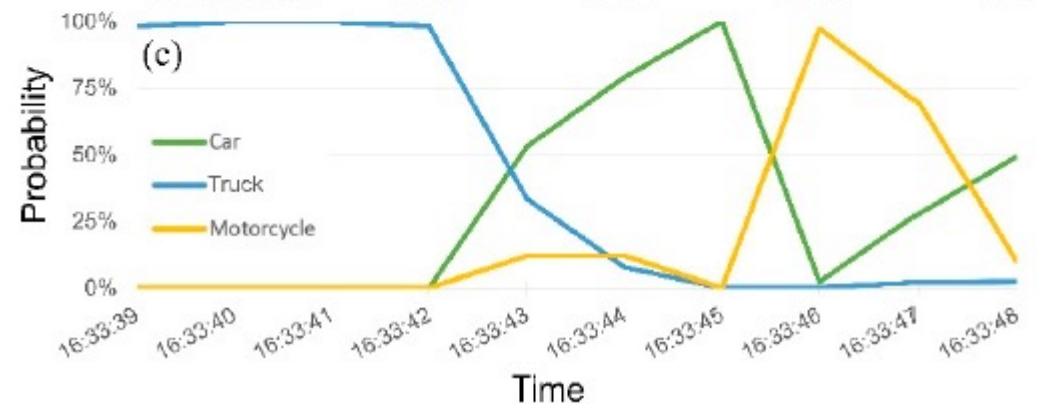
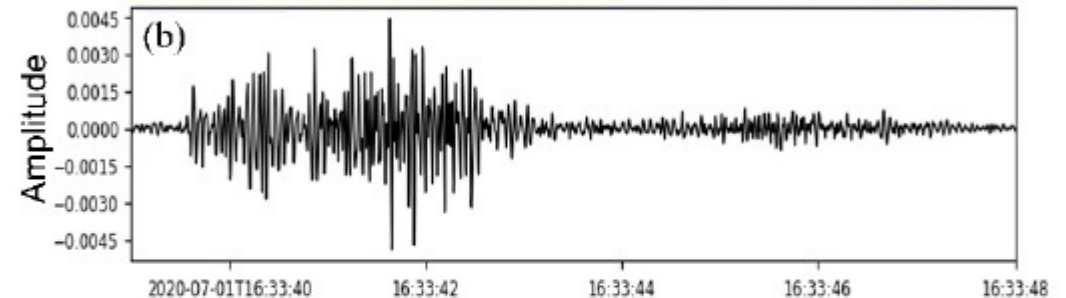


# 地震計で車をモニタリング (機械学習)

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