

産総研 人工知能研究センター
第61回AIセミナー「地震 × AI:人工知能で進化する地震研究の最前線」
2022年12月22日(木) 16:00-17:00

機械学習を活用した 微小地震データの大量処理による 地震発生場の物理的状態の推定

内出 崇彦

国立研究開発法人 産業技術総合研究所
地質調査総合センター 活断層・火山研究部門

共同研究者: 今西 和俊・椎名 高裕・堀川 晴央・雨澤 勇太・寒河江 皓大(産総研GSJ)、
緒方 淳・深山 覚・佐藤 圭浩(産総研AIRC)、黒田 大貴(長岡技術科学大学)

謝辞: 本研究では、(国研)防災科学技術研究所の高感度地震観測網(Hi-net)、気象庁、産業技術総合研究所地質調査総合センターの地震観測網の地震波形データ、気象庁の一元化処理カタログを使用しました。本研究は(公財)三菱財団 自然科学研究助成、産総研エッジランナース、文部科学省STAR-Eプロジェクト、科研費 学術変革領域研究(A)「Slow-to-Fast地震学」の支援を受けて実施しました。

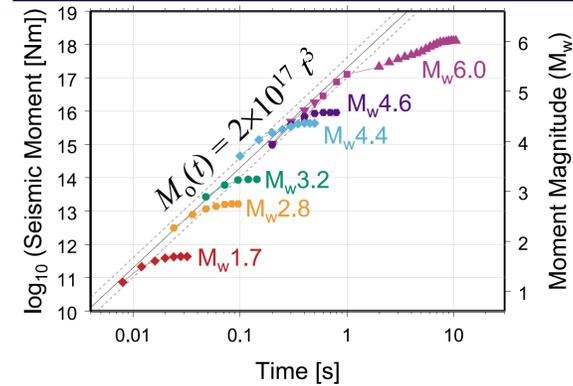
自己紹介

| | |
|-----------------|---|
| 1998.4 – 2010.3 | 東京大学 理学部 地球惑星物理学科 東京大学 大学院理学系研究科 地球惑星科学専攻 (修士課程・博士課程・学振特別研究員(DC2→PD)) |
| 2009.6 – 2011.9 | 博士研究員@Scripps Institution of Oceanography, UC San Diego, USA |
| 2010.4 – 2013.3 | 学振特別研究員(PD)@京都大学防災研究所 |
| 2013.4 – 現在 | 産業技術総合研究所 地質調査総合センター 活断層・火山研究部門 (研究員→主任研究員→上級主任研究員) |

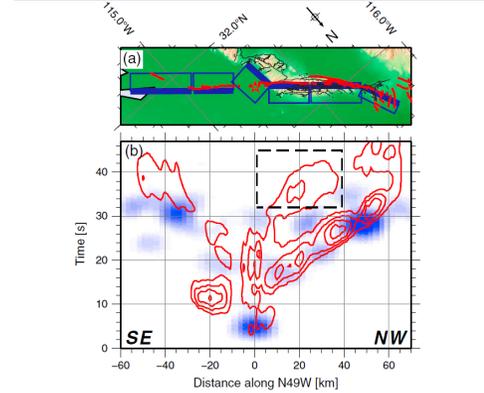
専門

- 震源地震学 (Earthquake Seismology)
 - 地震のスケールリング
 - 震源における地震波放射の周波数依存性
 - 小地震・微小地震の震源特性
- 地震テクニクス
 - 微小地震の特性に基づく断層の物理的状態の推定 (断層形状、応力、摩擦特性)

震源における断層破壊成長の自己相似性

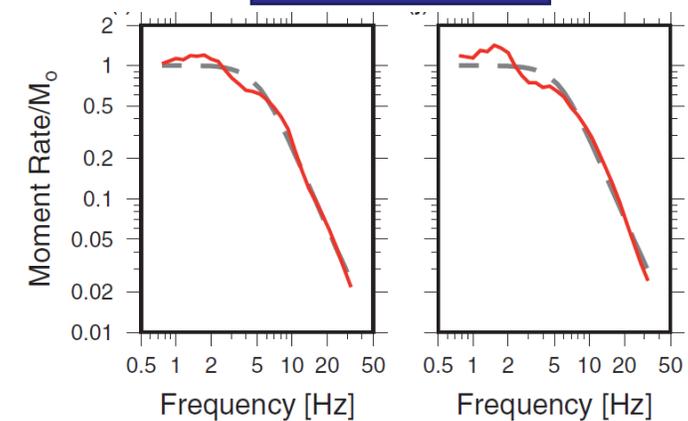


高周波数地震波放射

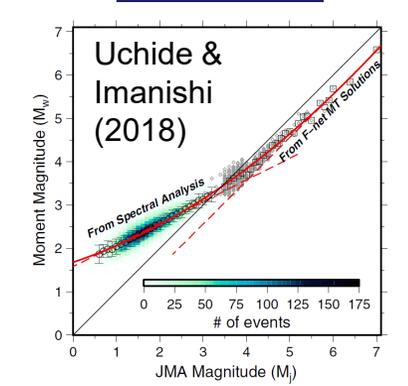


Uchide, Yao, & Shearer (2013)

震源スペクトル



M_w vs M_j



Uchide & Imanishi (2018)

地震学における 深層学習の導入

地震学における深層学習の導入

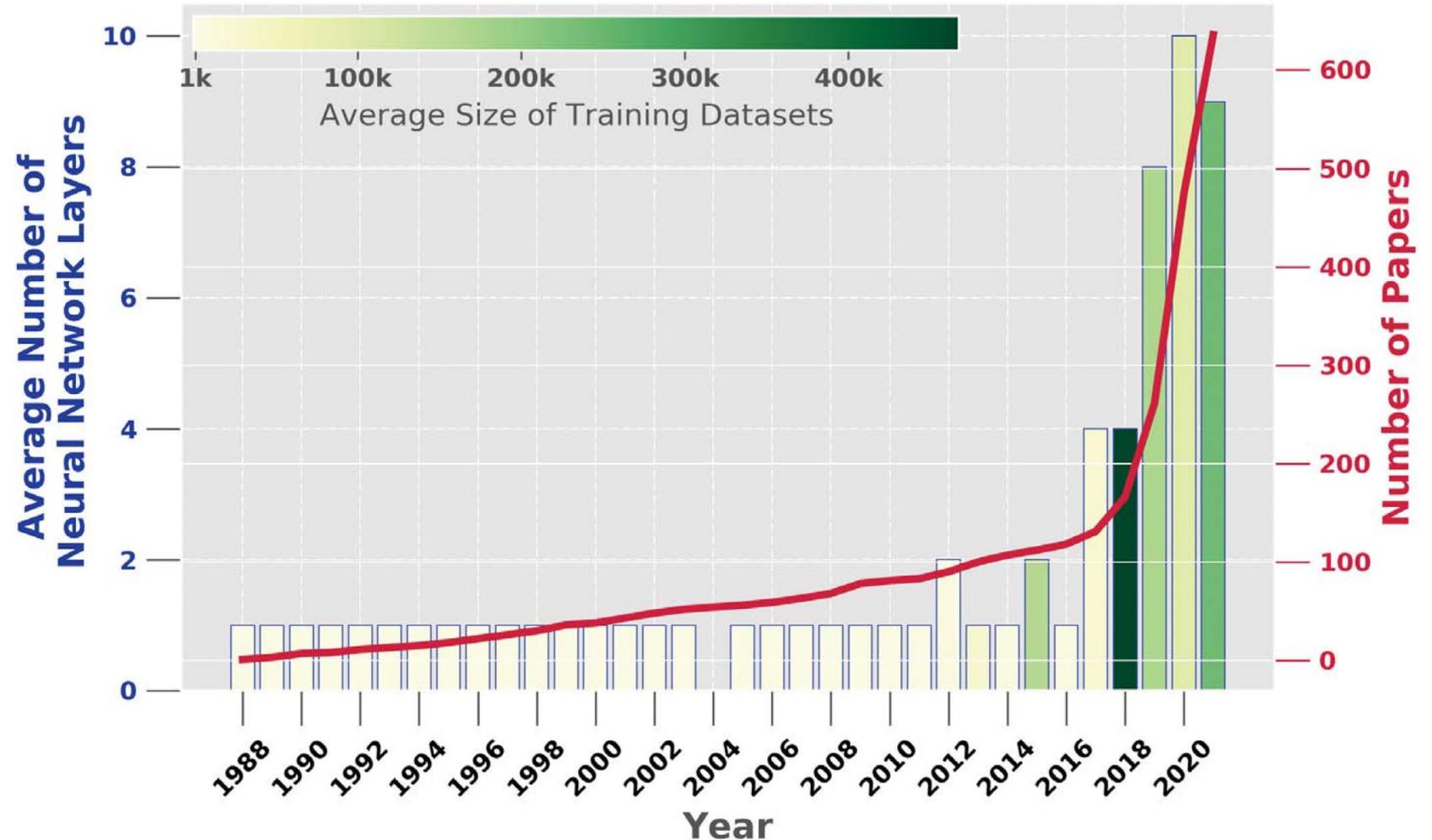
[1] 論文数急増中

REVIEW

SEISMOLOGY

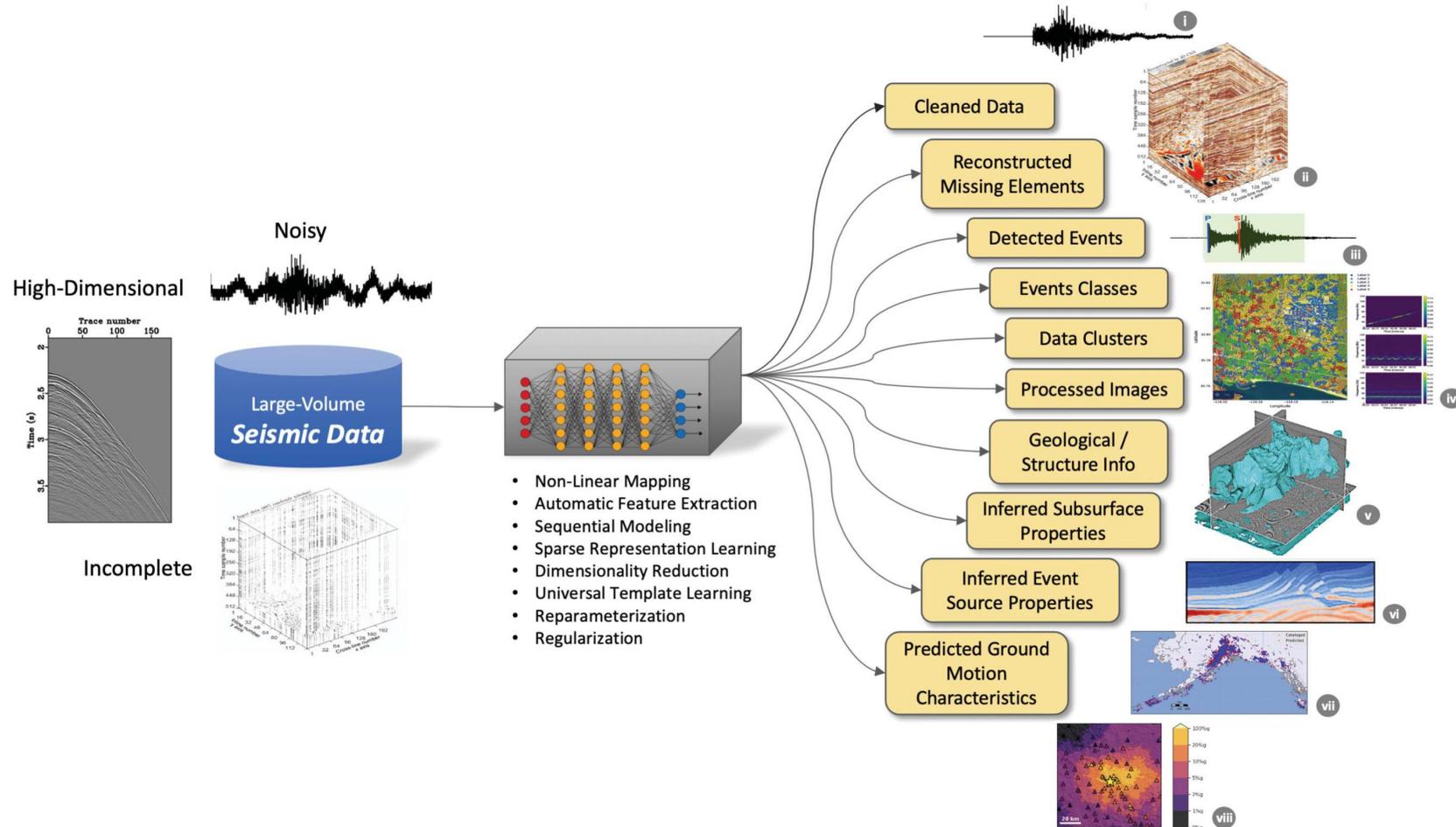
Deep-learning seismology

S. Mostafa Mousavi^{1,2*} and Gregory C. Beroza¹



地震学における深層学習の導入

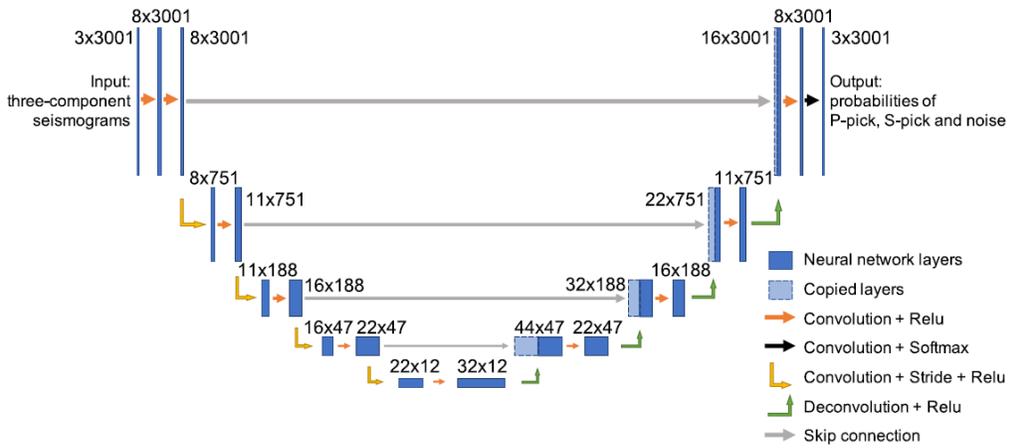
[2] 広がる応用



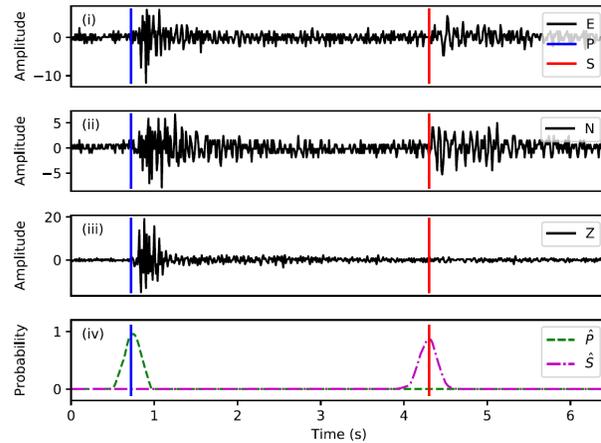
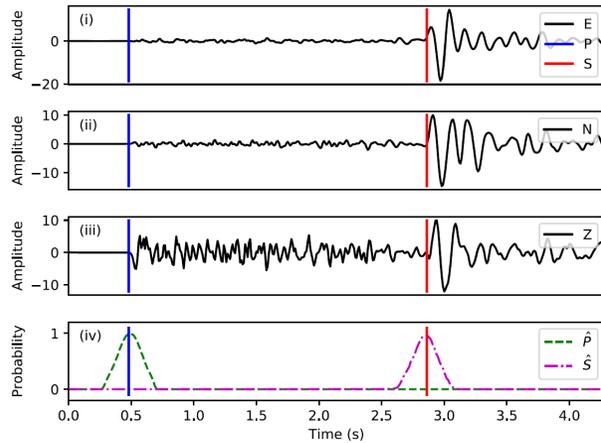
地震学における深層学習の導入

[4] 応用例(1): 地震波到達時刻の読み取りと結び付け

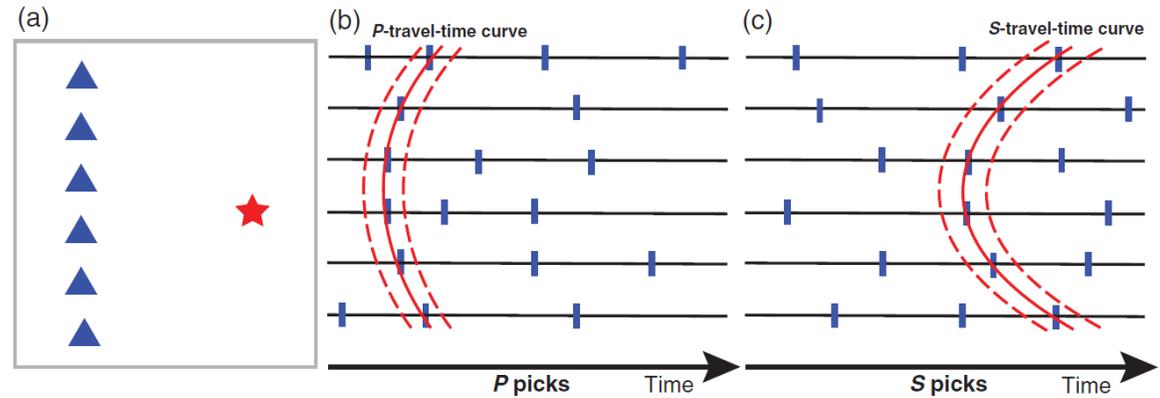
Phase Picking



Zhu & Beroza (2019)



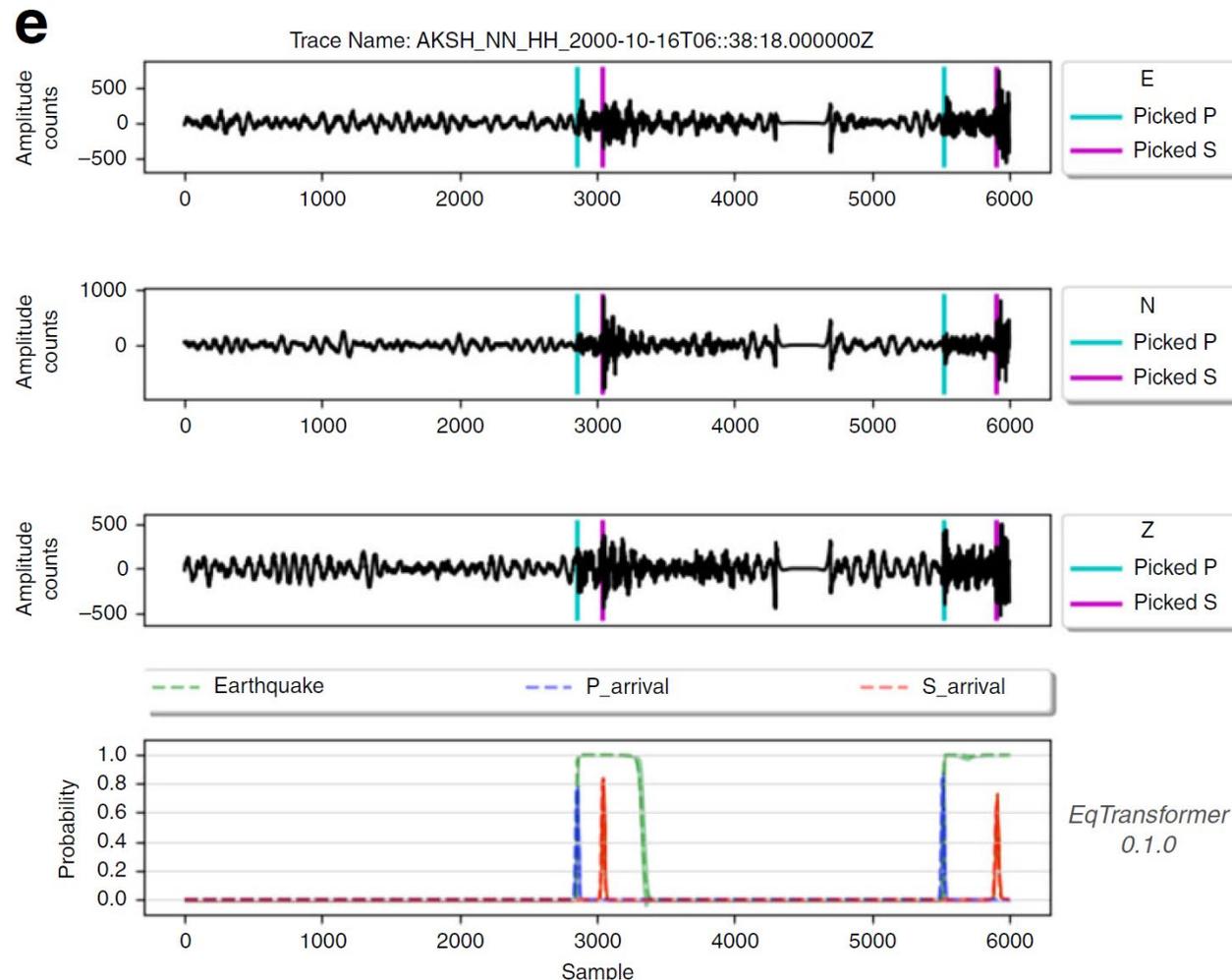
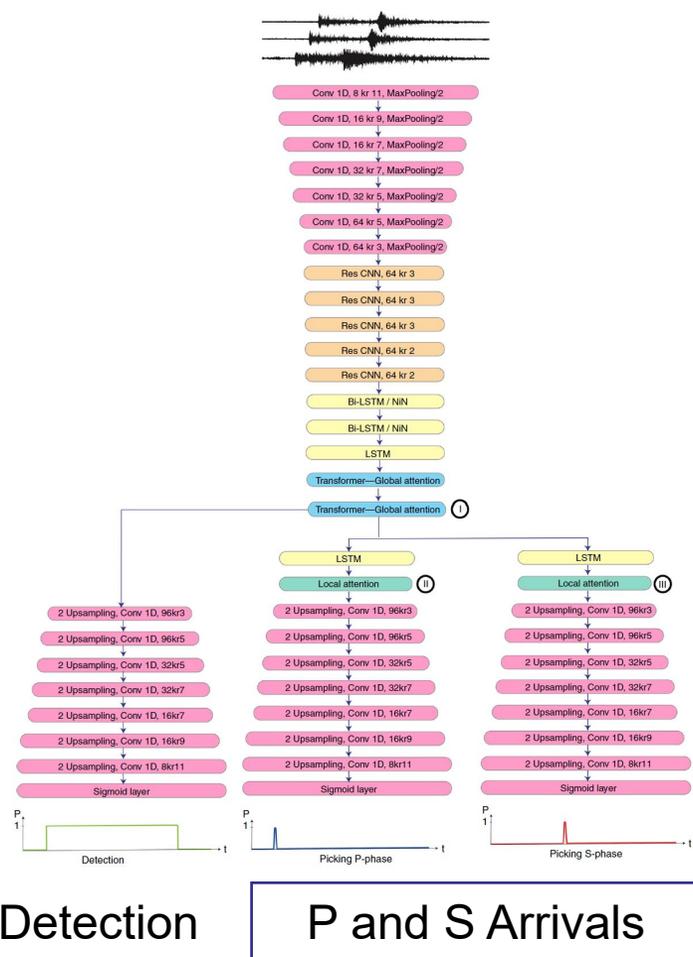
Phase Association



Zhang et al. (2019)

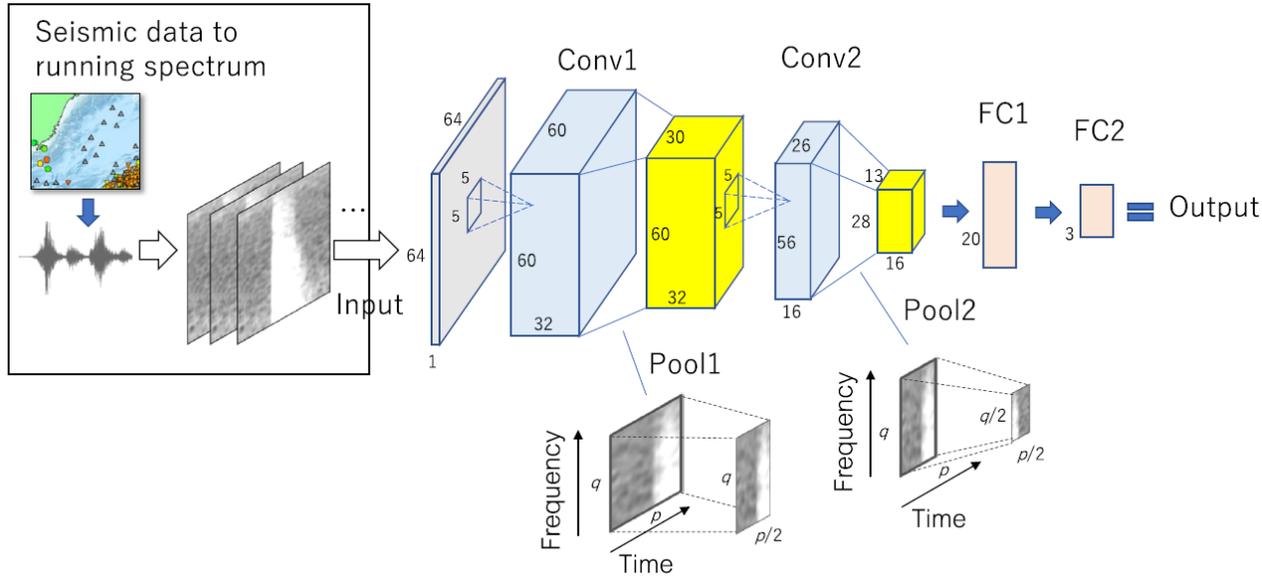
地震学における深層学習の導入

[5] 応用例(2): 地震検出・地震波到達時刻の読み取り

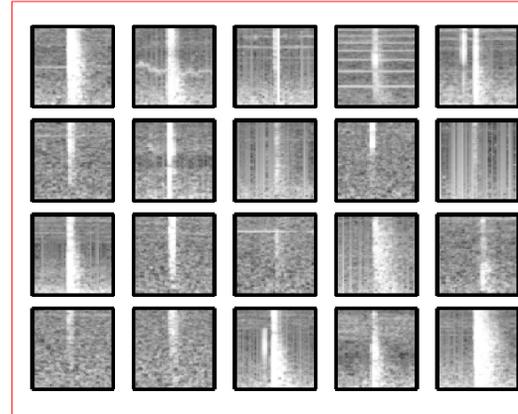


地震学における深層学習の導入

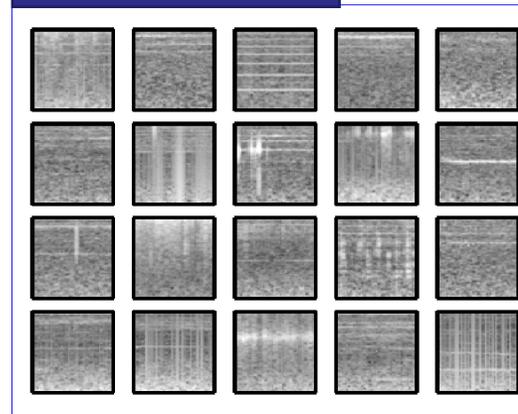
[6] 応用例(3): イベント分類 (Nakano et al., 2019)



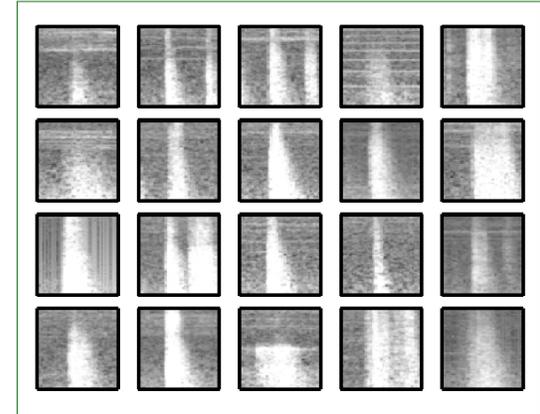
(a) Earthquake



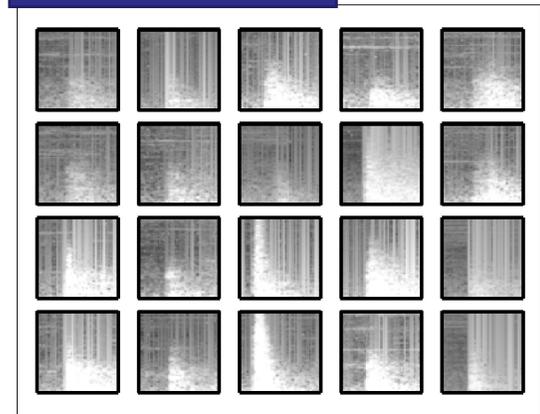
ノイズ



(b) Tremor



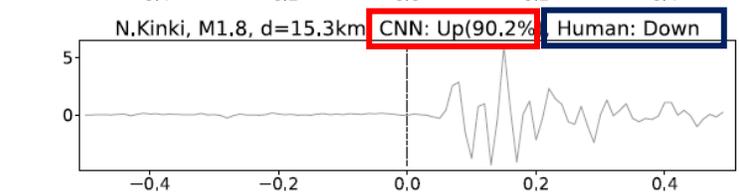
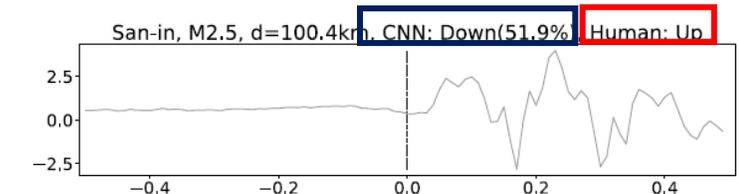
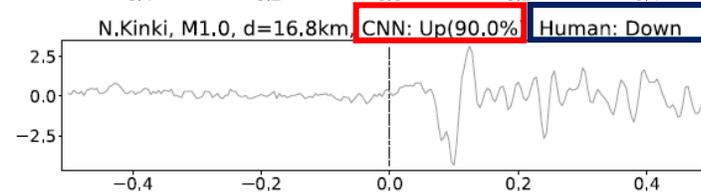
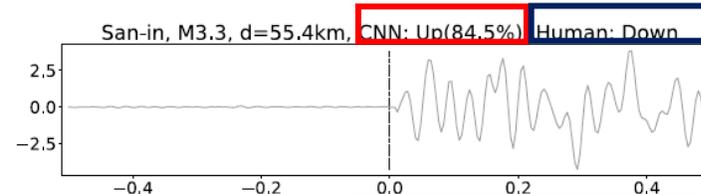
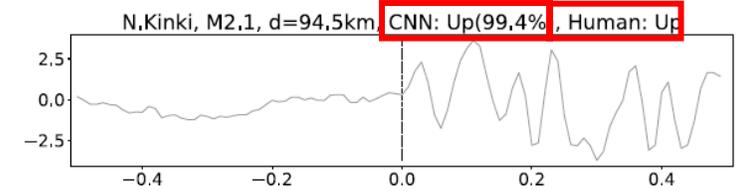
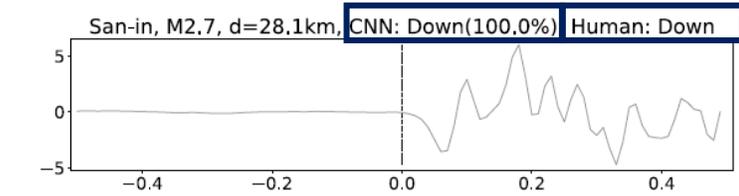
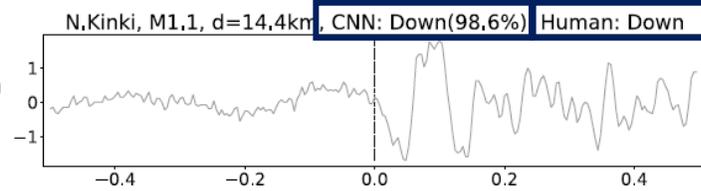
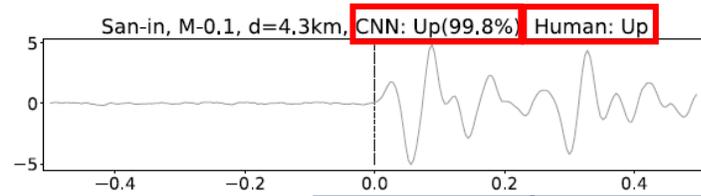
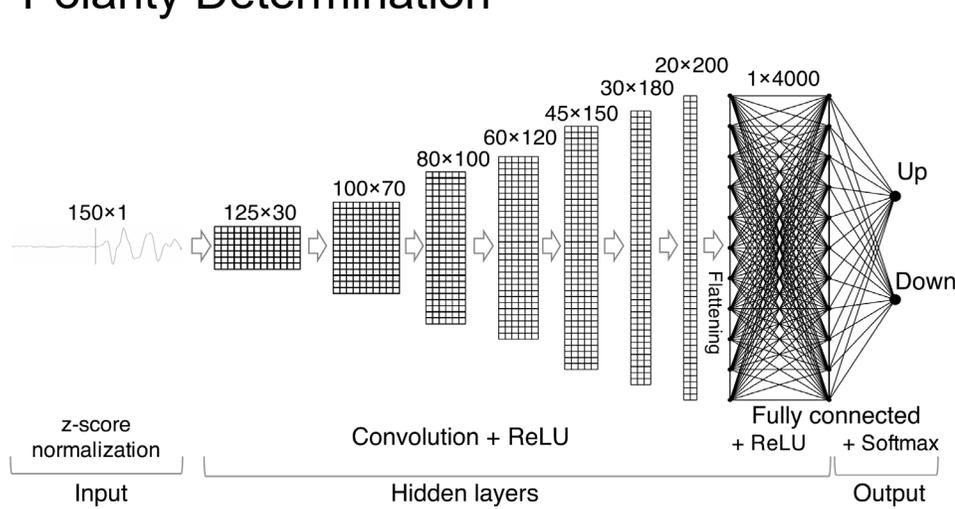
遠地地震



地震学における深層学習の導入

[7] 応用例(4): P波初動極性判定 (Hara et al., 2019)

Polarity Determination



地震学における深層学習の導入

[8] 応用例(5): データセット

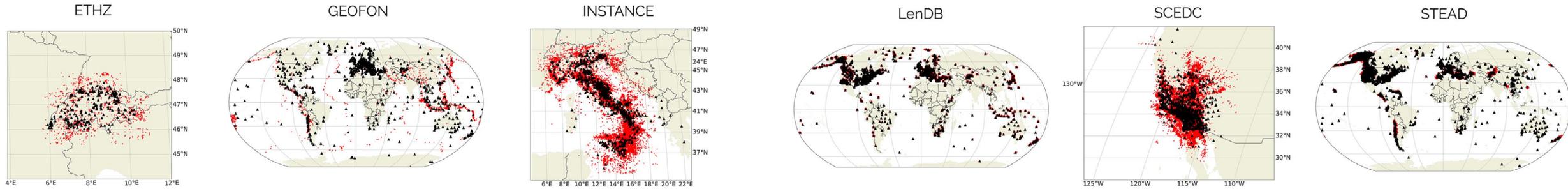
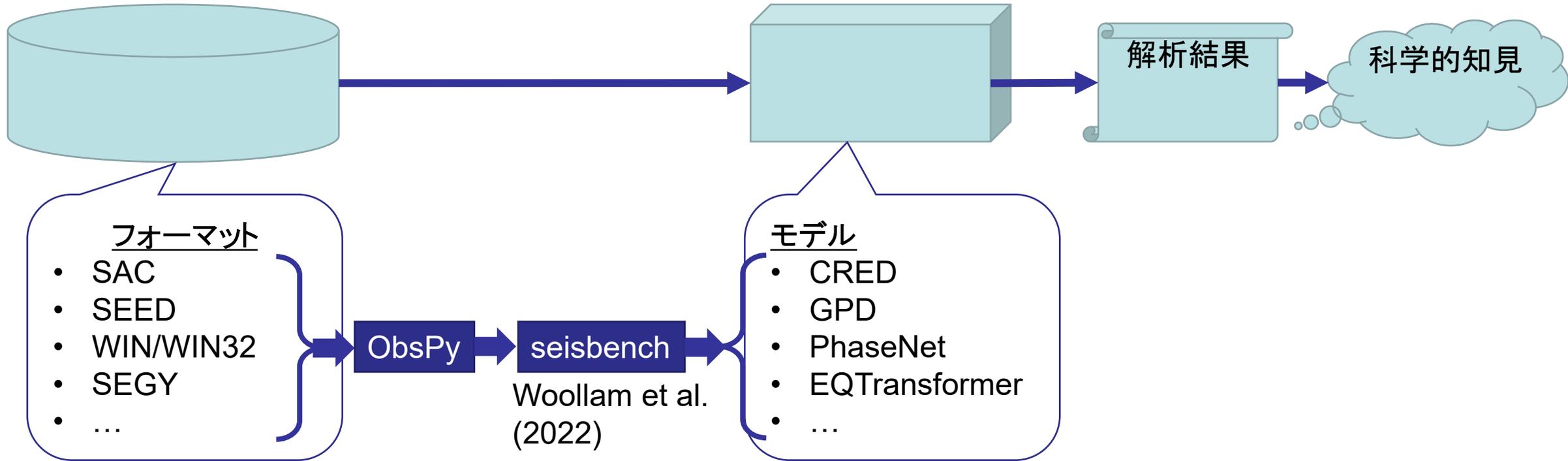


TABLE 1
Overview of the Datasets

| Dataset | Traces | Events | P picks | S picks | Noise | Region | Distance | Tr. Length | f_s (Hz) |
|----------|-----------|---------|-----------|-----------|---------|---------------------|----------|------------|------------|
| ETHZ | 36,743 | 2,231 | 35,227 | 18,960 | 0 | Switzerland | L/R | Variable | 100–500 |
| INSTANCE | 1,291,537 | 54,008 | 1,159,249 | 713,883 | 132,288 | Italy | L/R | 120 s | 100 |
| Iquique | 13,400 | 409 | 13,327 | 11,361 | 0 | Northern Chile | L | Variable | 100 |
| LenDB | 1,244,942 | 303,902 | 629,095 | 0 | 615,847 | Various | L | 27 s | 20 |
| SCEDC | 8,111,060 | 378,528 | 7,571,970 | 4,364,155 | 0 | Southern California | L | Variable | 40–100 |
| STEAD | 1,265,657 | 441,705 | 1,030,231 | 1,030,231 | 235,426 | Various | L/R | 60 s | 100 |
| GEOFON | 275,274 | 2,270 | 284,240 | 2,847 | 0 | Global | R/T | Variable | 20–200 |
| NEIC | 1,354,789 | 137,424 | 1,025,000 | 329,789 | 0 | Global | R/T | 60 s | 40 |

地震学における深層学習の導入

[9] ツールの開発



```
import obspy
import seisbench.models as sbm

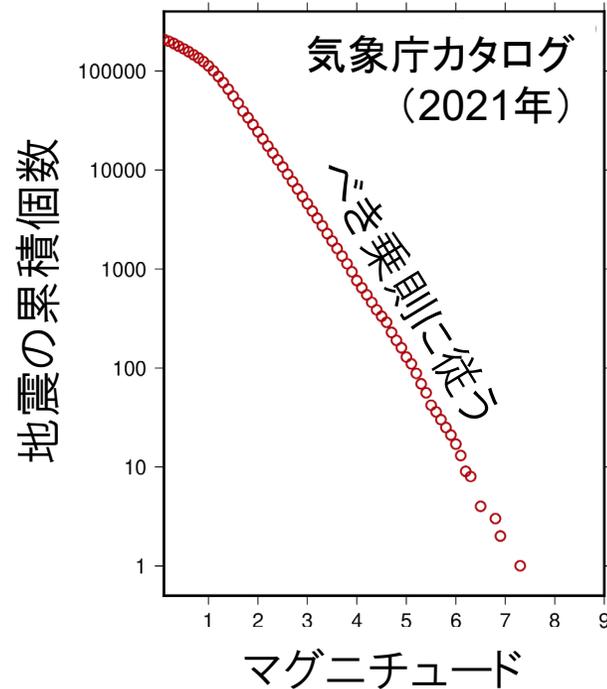
eqt_model = sbm.EQTransformer.from_pretrained('original')
st = obspy.read(datafile)
eqt_picks = eqt_model.classify(st)
```

微小地震の研究

微小地震の研究

[1] なぜ小さい地震を研究するのか

小さい地震は頻繁に発生する



- 観測する機会が多い
- 時空間的な変化が見やすい

震源断層の状態

- 応力
- 断層強度
- 既存断層の形状
- 間隙水圧 など

地震発生背景

反映

推定

地震の性質

- 震源位置・発震時刻
- 震源メカニズム解
(断層とすべりの向き)
- 応力降下量
- マグニチュード など

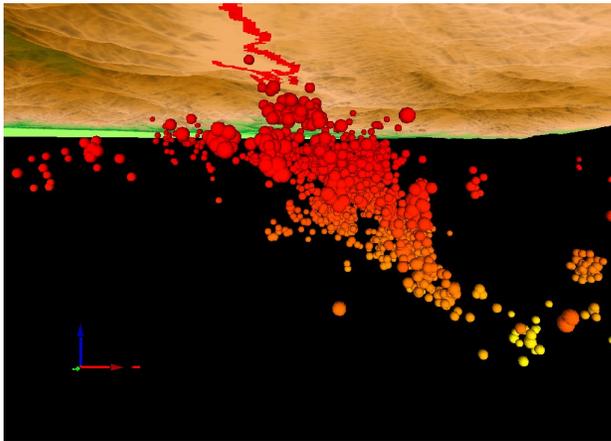
事例研究

大量データ・
高精度の解析

微小地震の研究

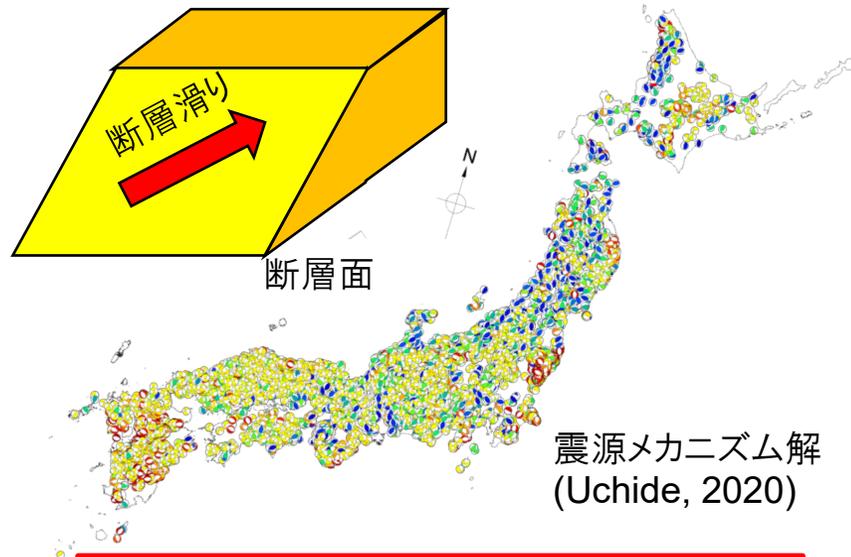
[2] どのように小さい地震を研究するのか

震源決定→**断層形状**



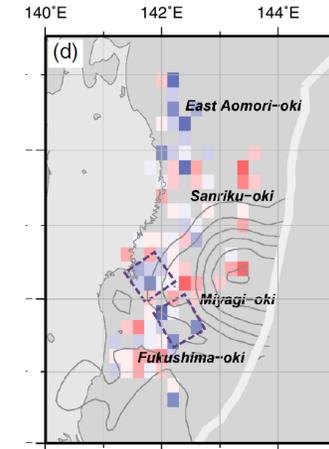
2014年長野県北部の地震の余震
(Imanishi and Uchide, 2017)

震源メカニズム解→**応力場**



震源メカニズム解
(Uchide, 2020)

その他の震源の性質
(応力降下量など)



東北地方
太平洋沖地域
(Uchide et al., 2014)

文科省STAR-Eプロジェクト

産総研(活断層・火山研究部門、
人工知能研究センター)、立命館大学
研究代表者: 内出 崇彦
(令和3年度~7年度)

産総研 活断層・火山研究部門 地震テクトニックマッププロジェクト

産総研エッジランナーズ
三菱財団 自然科学研究助成

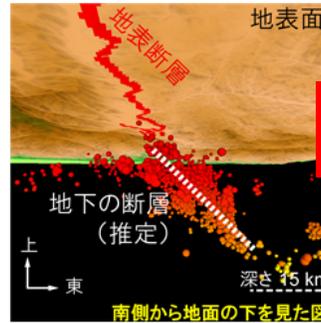
科研費 学術変革領域研究(A) 「Slow-to-Fast地震学」

研究代表者: 井出哲(東京大学)
(令和3年度~7年度)

STAR-E AIST

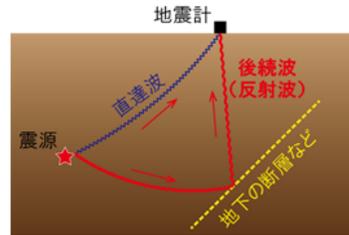
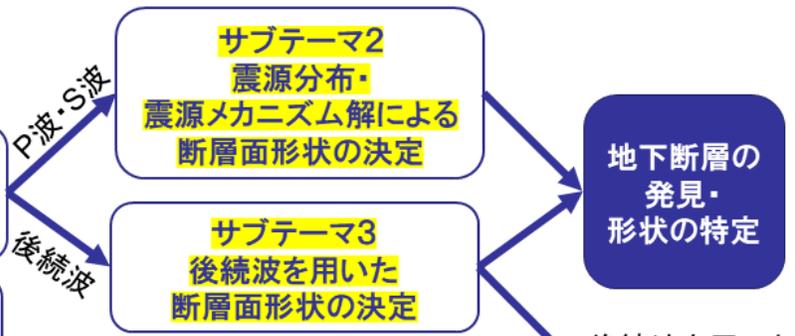
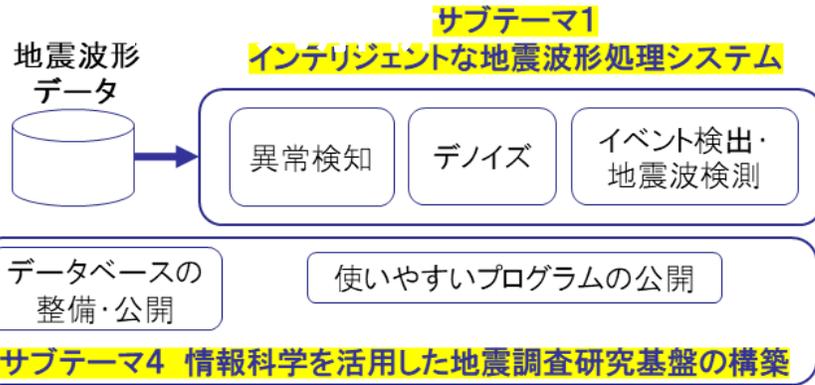
令和3年度～7年度

信号処理と機械学習を活用した
地震波形ビッグデータ解析による
地下断層の探索



パターン認識

客観的・網羅的な
断層自動検出



後続波(反射波・ガイド波等)を利用した
地下構造の推定

データベース、コードの公開

逆解析

| | | |
|-----------|------|---------|
| 研究代表者 | GSJ | 内出 崇彦 |
| 研究実施者 | AIRC | 緒方 淳 |
| | GSJ | 堀川 晴央 |
| | AIRC | 深山 覚 |
| | GSJ | 椎名 高裕 |
| | GSJ | 雨澤 勇太 |
| | AIRC | 佐藤 圭浩 |
| テクニカルスタッフ | GSJ | 松下 レイケン |
| 協力者 | 長岡技大 | 黒田 大貴 |

産総研 地質調査総合センター 活断層・火山研究部門
AIRC: 産総研 人工知能研究センター

日本内陸部の ストレスマップの作成

Uchide (2020), Uchide et al. (2022)

関連記事

- 産総研プレスリリース(2022年6月14日付)
- (公社)日本測量協会 月刊『測量』
- 地震本部ニュース 令和4年秋号
- 2022年12月22日付 日刊工業新聞

研究の背景

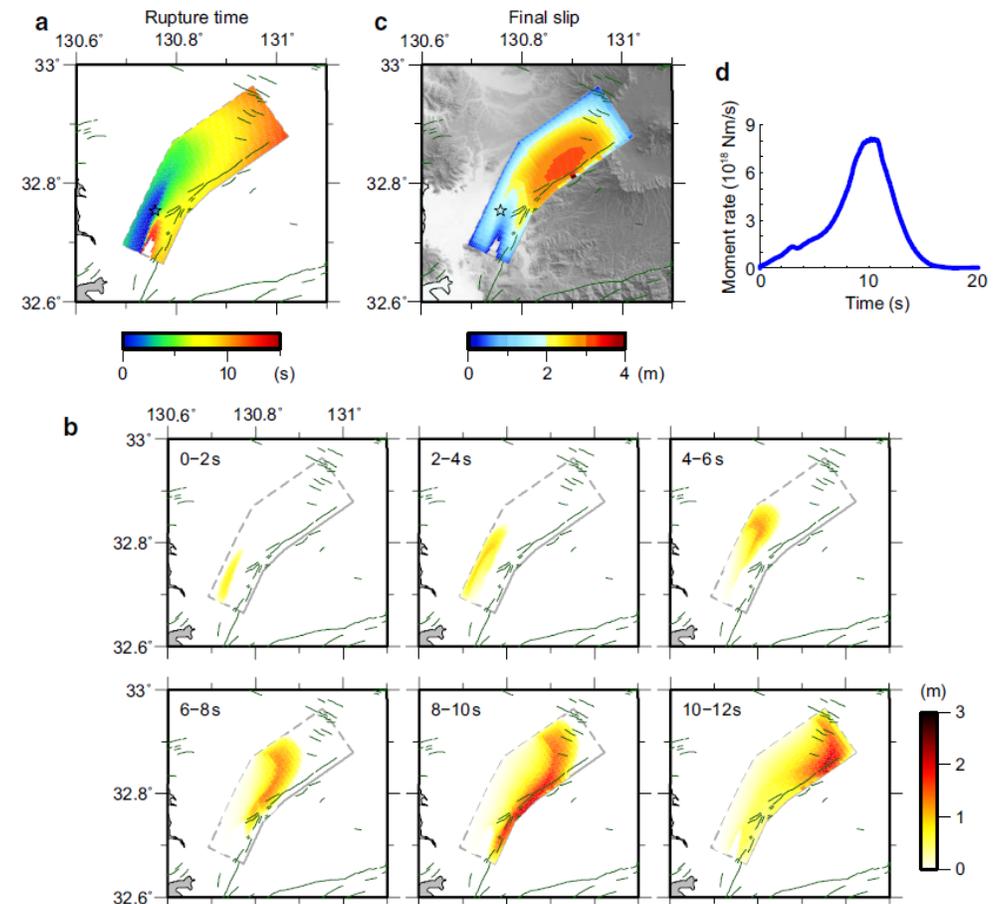
[1] 大地震の現実的なシミュレーションに向けて

- 地震発生と地震災害の予測
 - 地盤構造
 - 震源過程

- 地震発生の要因
 - 破壊・摩擦の物理
 - 断層の形状
 - 断層にかかる応力

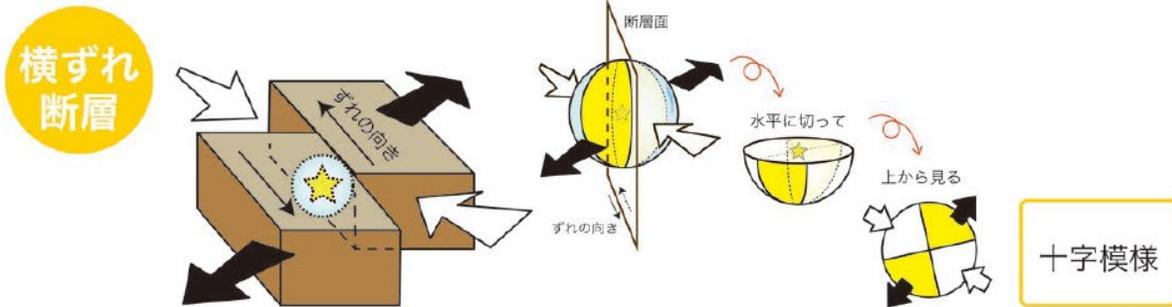
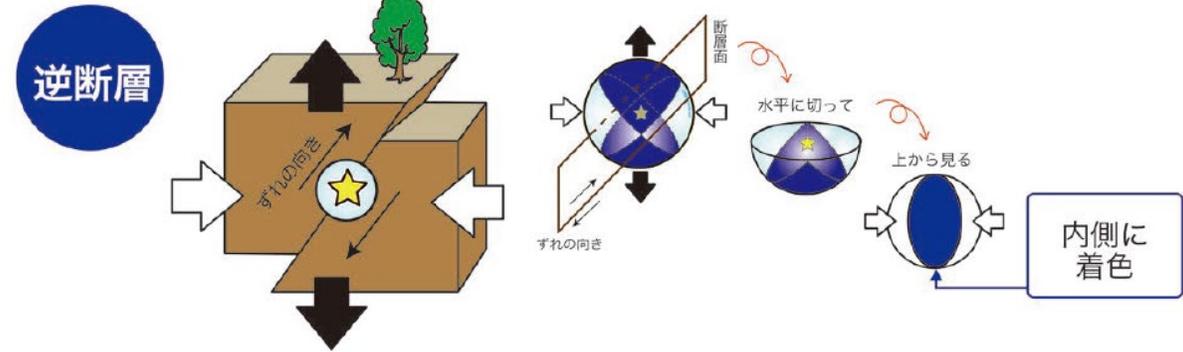
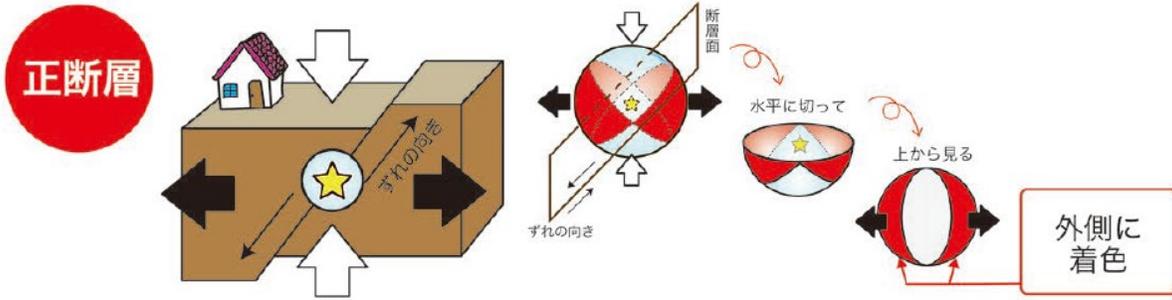
→ シミュレーションのためには現実的な仮定が必要

2016年熊本地震のシミュレーション (Urata et al., 2017)



研究の背景

[2] 断層タイプと応力場

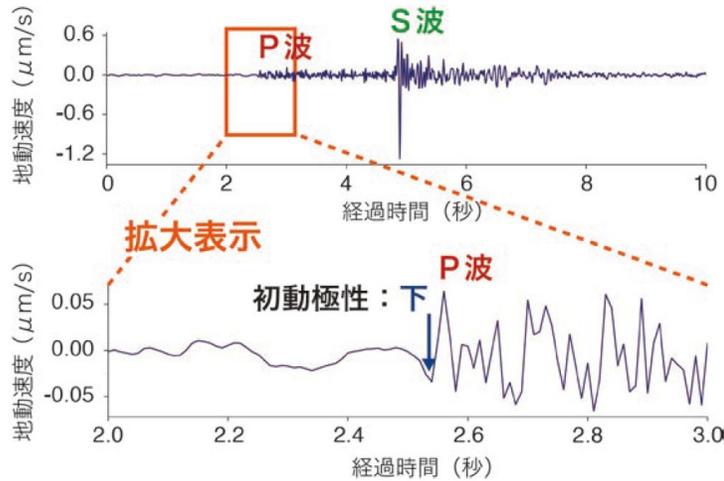


(2021)

研究の背景

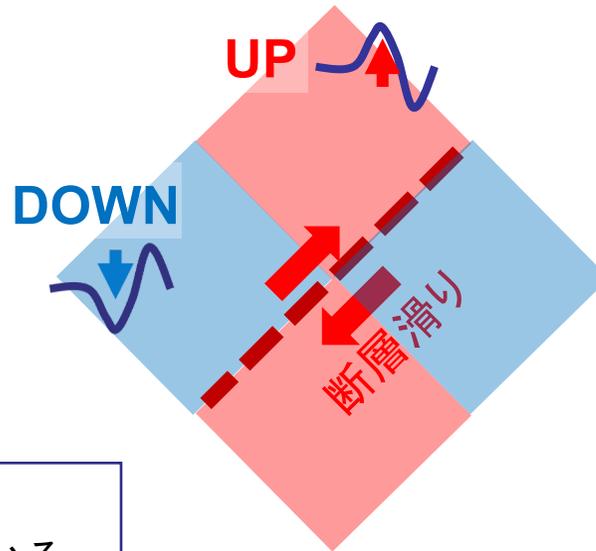
[3] 震源メカニズム解

P波初動極性



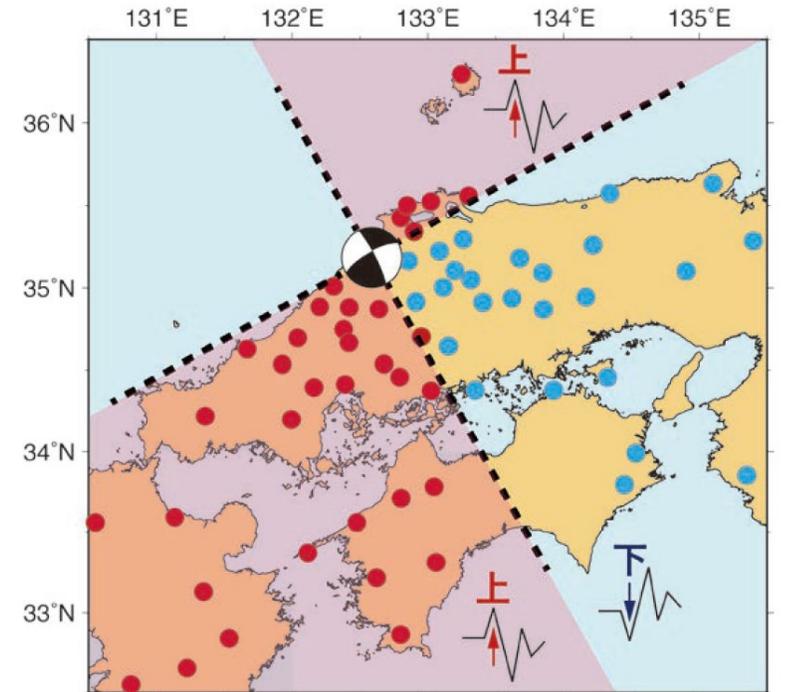
産総研 地質標本館特別展「ストレスマップ」(2021)

P波初動極性と
震源メカニズム解
(断層面・断層滑りの方向)
との関係



M3程度以上の地震については、
気象庁が震源メカニズム解の推定をしている

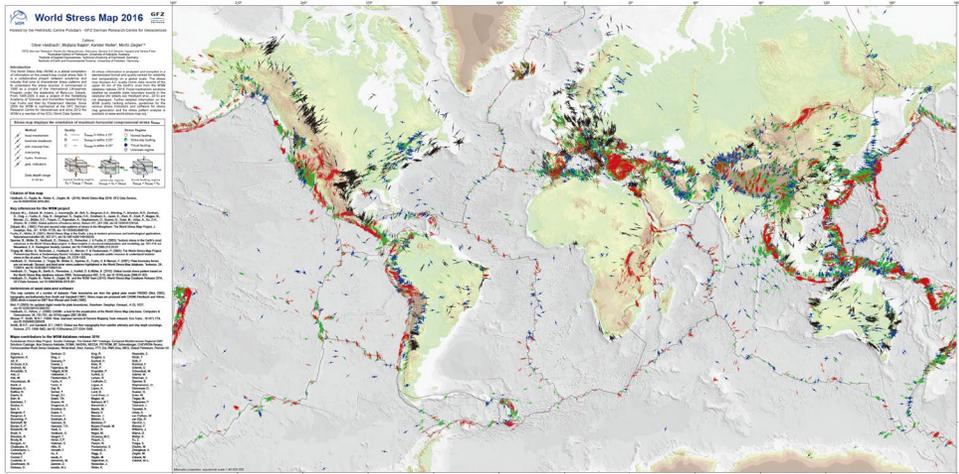
多くの観測点でのP波初動極性から
震源メカニズム解を推定する



(2021)

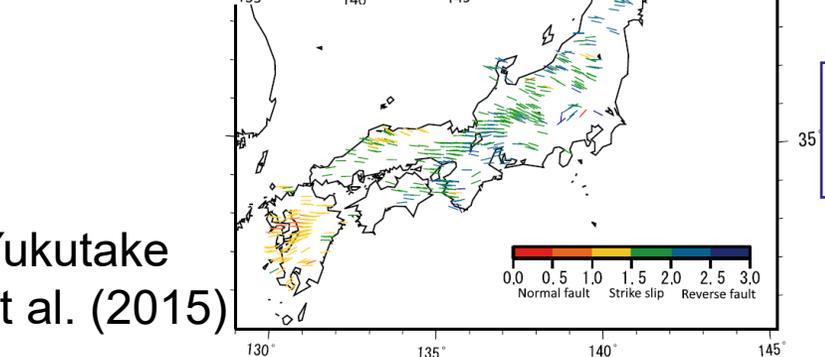
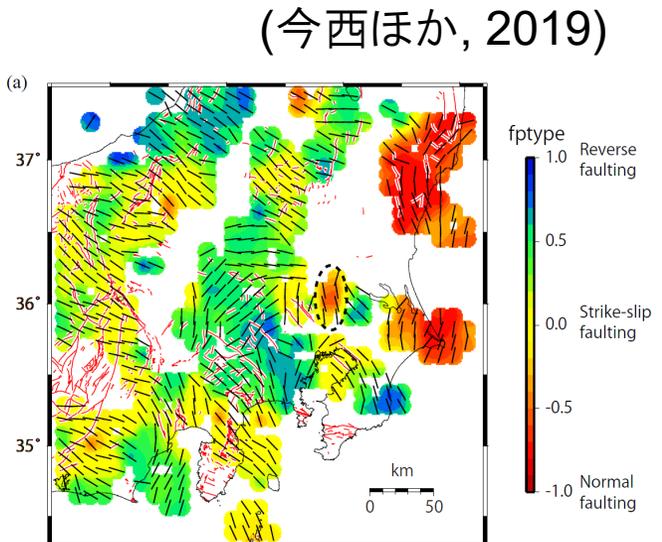
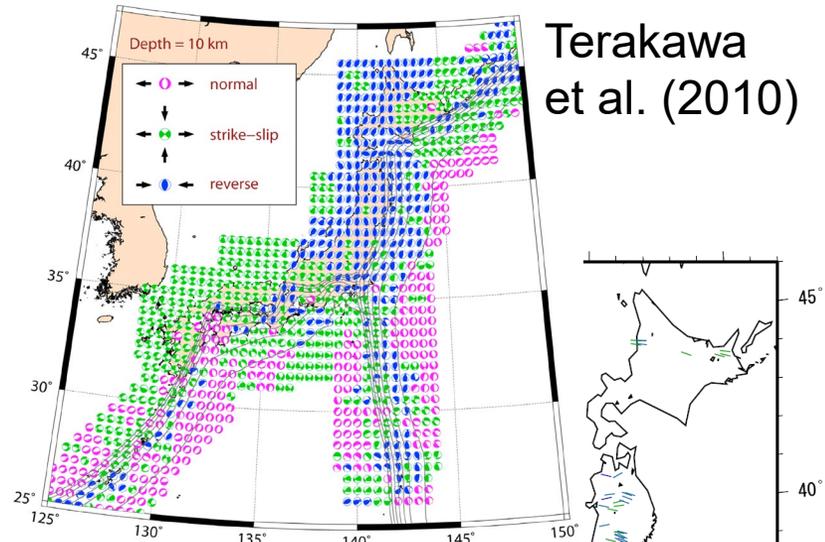
研究の背景

[4] 既存の応力地図



日本全国規模の応力地図

地域的な応力地図



より頻発する微小地震を利用して
より完全な応力地図を作成

Stress map displays the orientation of maximum horizontal compressional stress S_{Hmax}

| Method | Quality | Stress Regime |
|---|---|--|
| <ul style="list-style-type: none"> focal mechanism borehole breakouts drill. induced frac. overcoring hydro. fractures geol. indicators | <ul style="list-style-type: none"> A — S_{Hmax} is within $\pm 15^\circ$ B — S_{Hmax} is within $\pm 20^\circ$ C — S_{Hmax} is within $\pm 25^\circ$ | <ul style="list-style-type: none"> ○ Normal faulting ● Strike-slip faulting ● Thrust faulting ○ Unknown regime |

Data depth range
0-40 km

normal faulting regime
 $S_v > S_{Hmax} > S_{Hmin}$

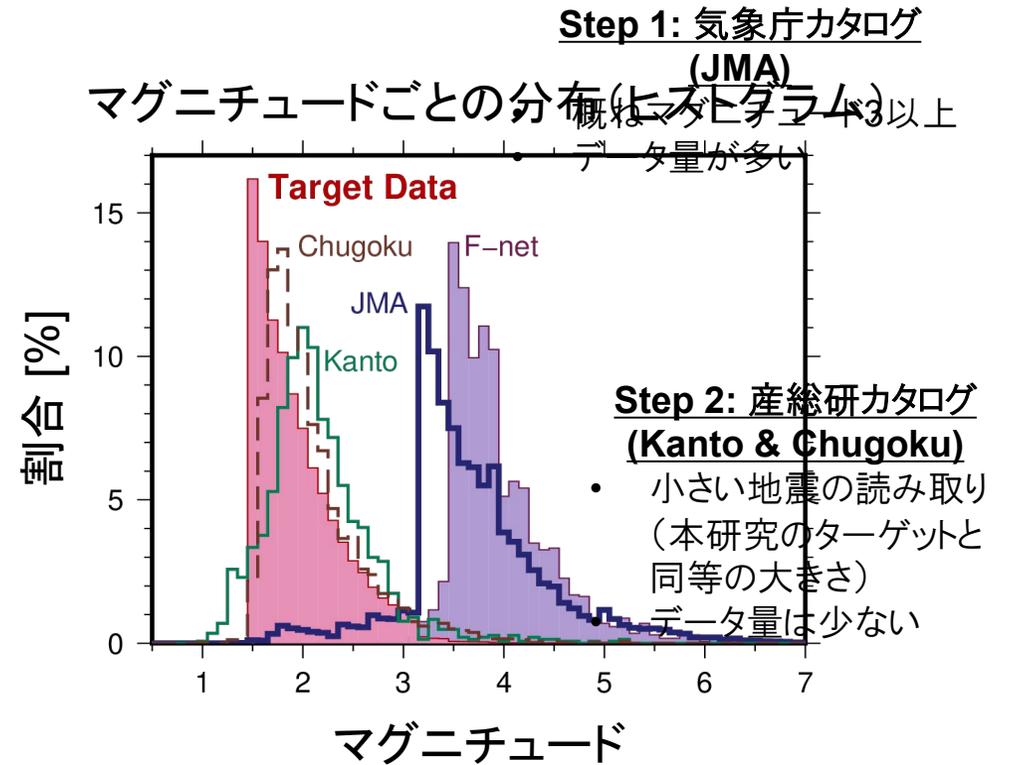
strike-slip regime
 $S_{Hmax} > S_v > S_{Hmin}$

thrust faulting regime
 $S_{Hmax} > S_{Hmin} > S_v$

手法

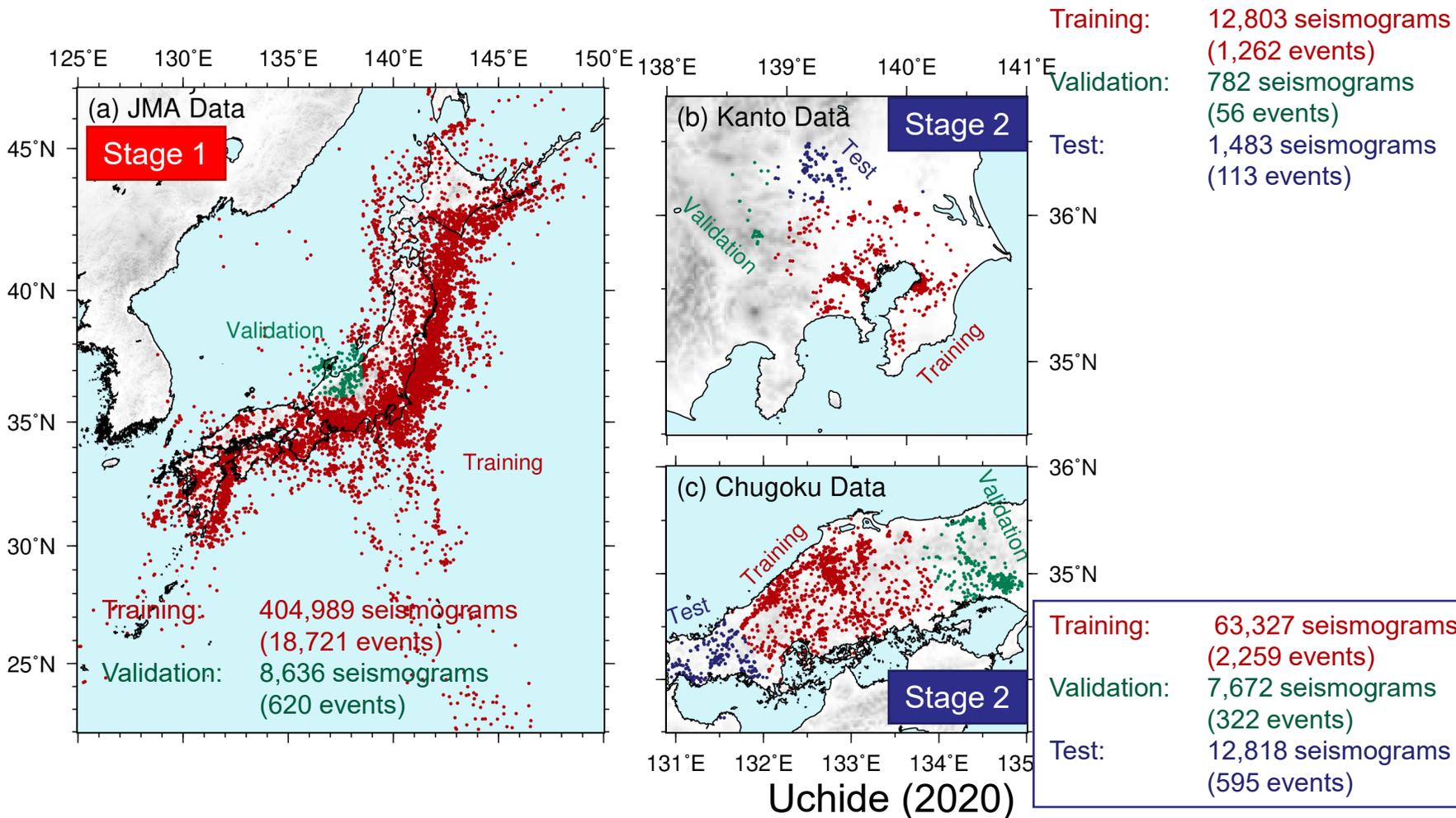
[2] ファインチューニングによる微小地震研究への適応

- 単純なニューラルネットワークモデル
 - 先行研究でも単純なNNモデルで成功 (e.g., Ross et al., 2018; Hara et al., 2019)
- ファインチューニング
 - Step 1
 - 気象庁カタログにあるP波初動極性情報
 - 概ねマグニチュード3以上
 - Step 2
 - 産総研で読み取った関東地方・中国地方の微小地震のP波初動極性情報 (今西ほか, 2019, 2021)
 - 概ねマグニチュード3以下

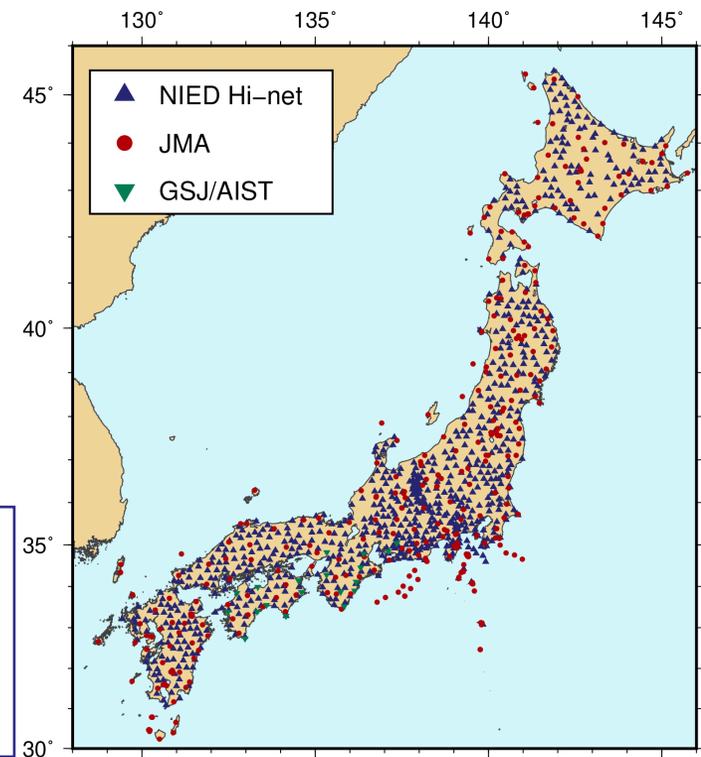


データ

学習・検証・テストデータ



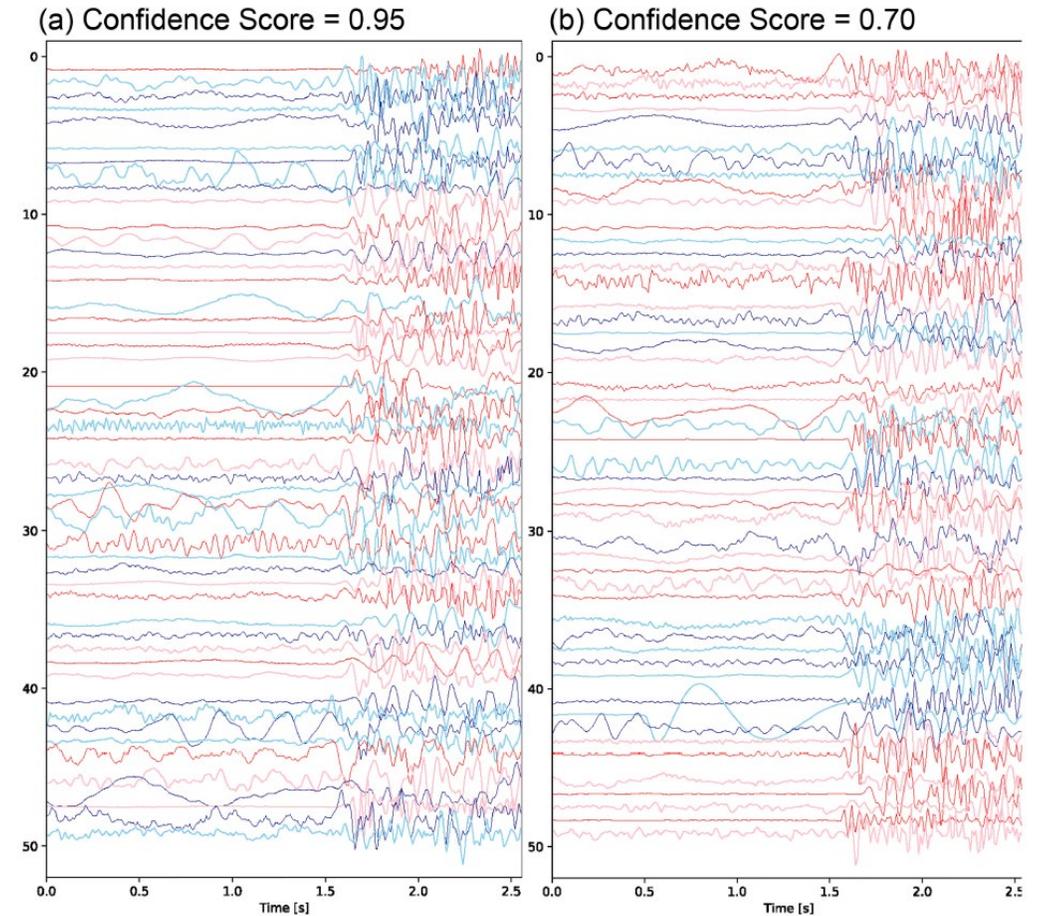
観測点地図



実データへの適用

P波初動極性の自動読み取りから震源メカニズム解の推定へ

- 解析した地震
 - 日本列島周辺
 - 海岸線から50 km以内
 - 20 km以浅
 - $M \geq 0.5$
 - 660,332個の地震
- 地震波形データ
 - 防災科研Hi-net, 気象庁, 産総研
 - 9,348,165本の地震波形データ
- 震源メカニズム解の推定
 - HASH (Hardebeck & Shearer, 2002)

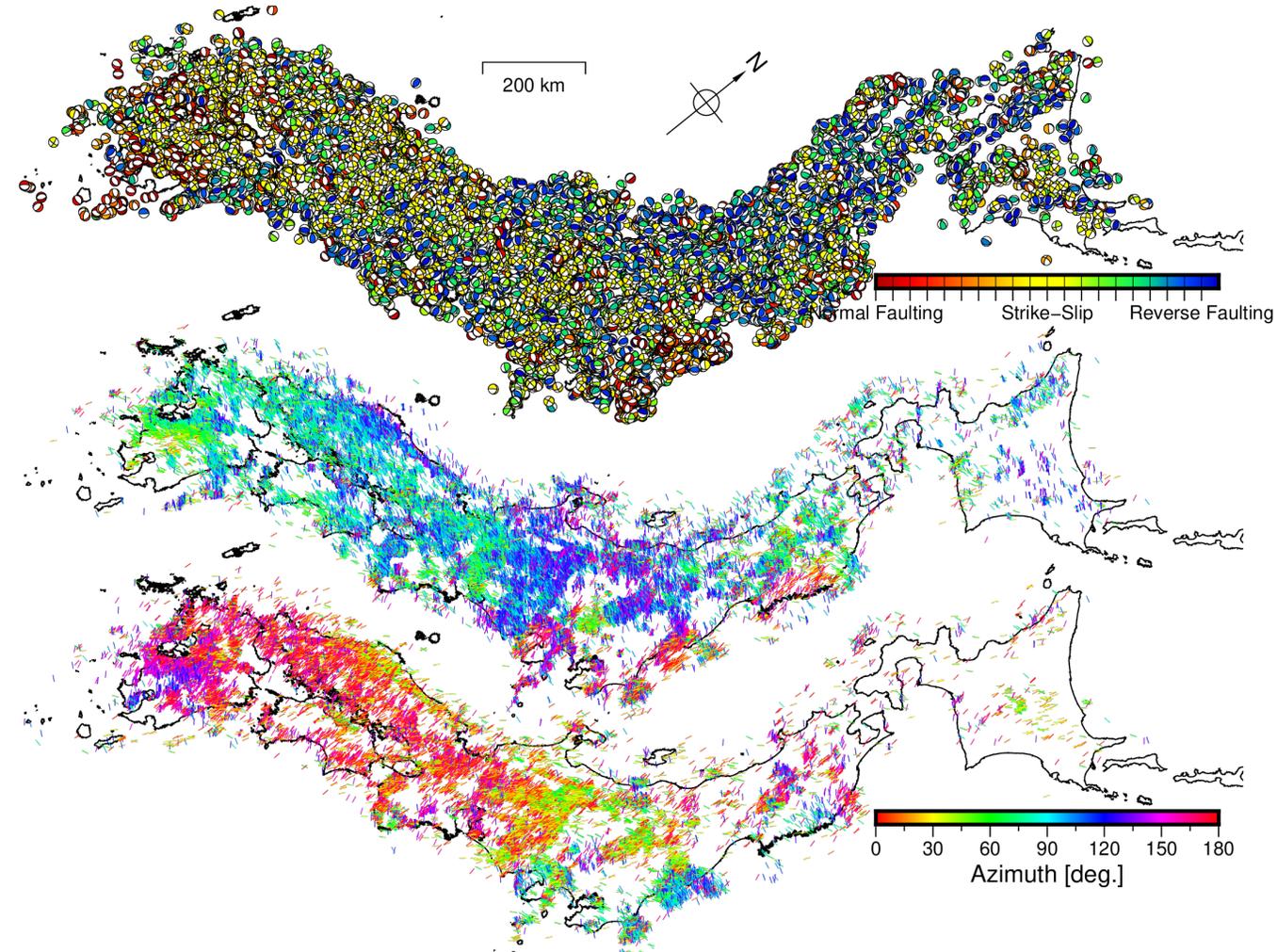


応力場推定

[1] データ

- 震源メカニズム解
 - 216,528個 (A – C ランク)
 - 2002年 – 2020年
 - 20 km以浅
 - 海岸線から50 km以内
 - $M \geq 0.5$

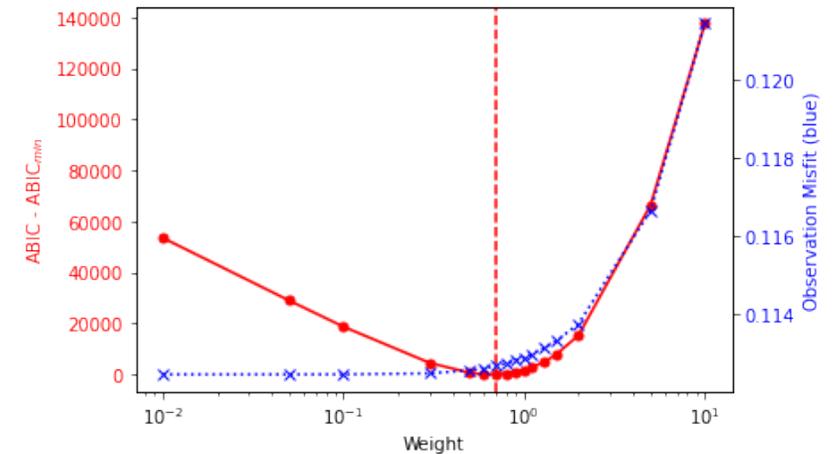
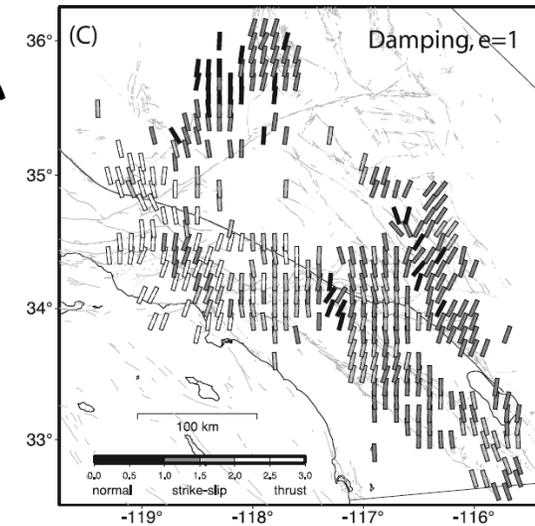
| ランク | 地震数 |
|-----------|---------|
| A | 4,255 |
| B | 60,582 |
| C | 151,691 |
| D | 419,928 |
| Undefined | 23,876 |
| 計 | 660,332 |



応力場推定

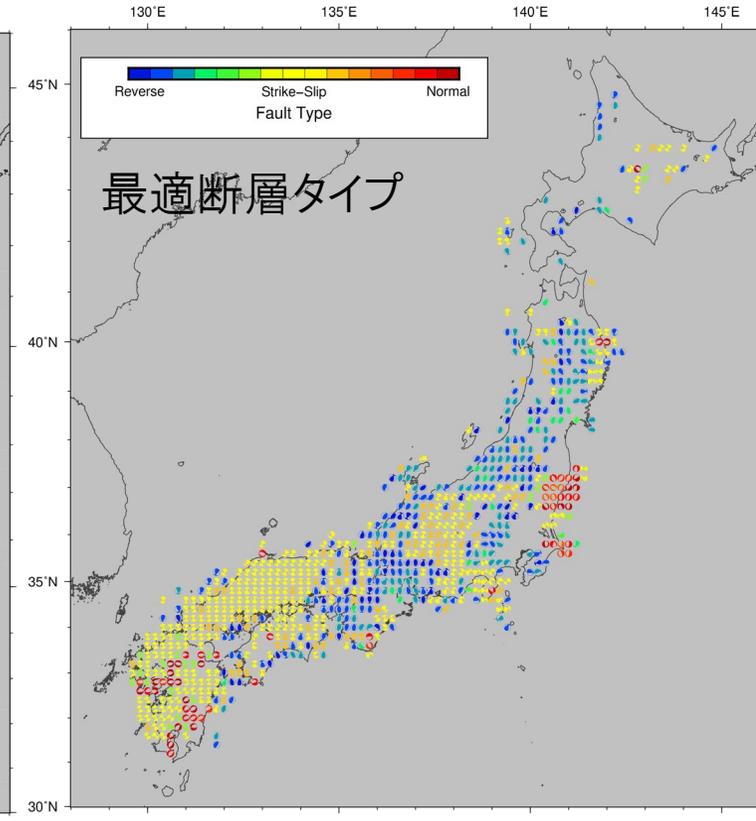
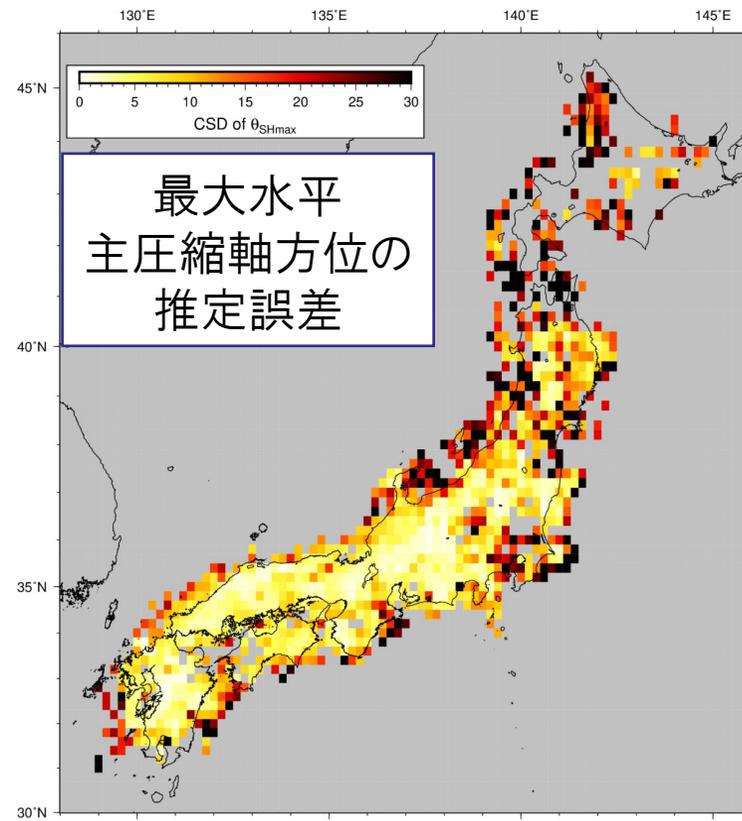
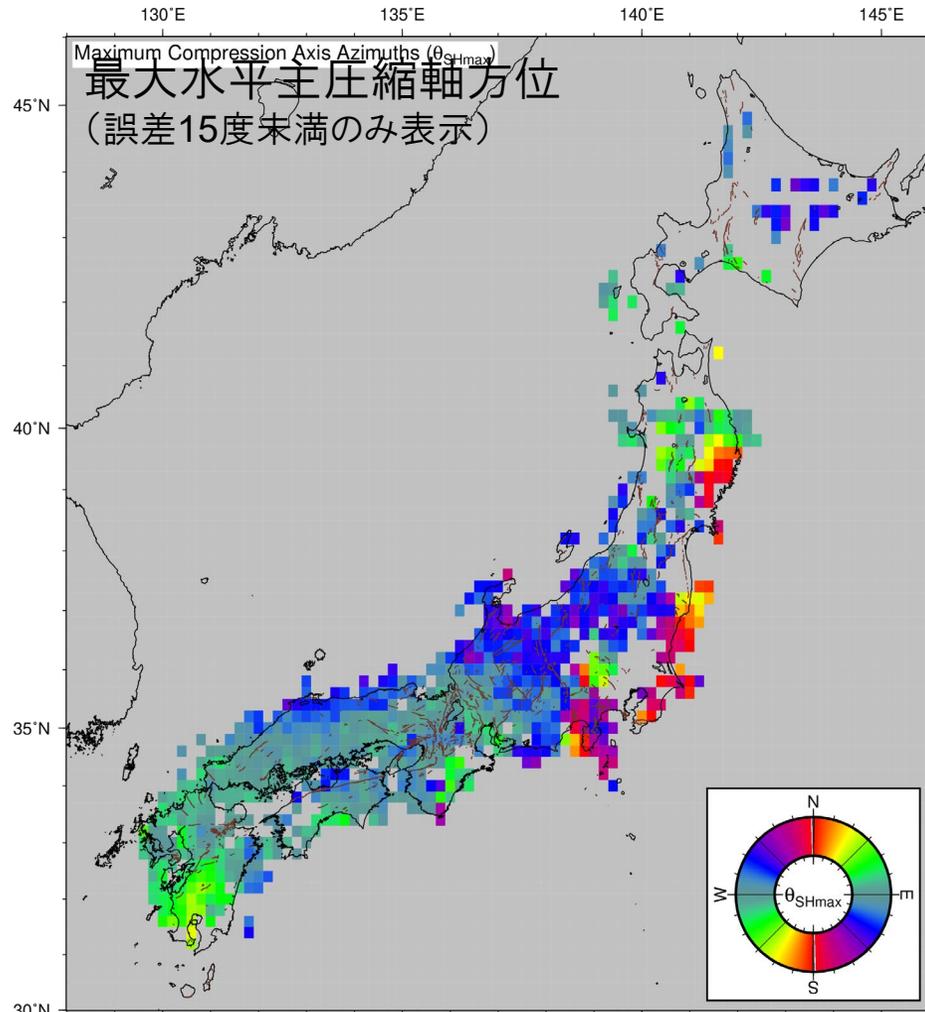
[2] 応力インバージョン

- 応力テンソルを微小地震の断層滑りベクトルから推定した。
 - Hardebeck and Michael (2006)に従って、問題を線形化した。
 - 等方成分は推定しない。
 - 応力の大きさは推定しない。
- 空間スムージング
 - 赤池ベイズ情報量規準(ABIC)を最小にするようなスムージング強度を採用した。



応力場推定

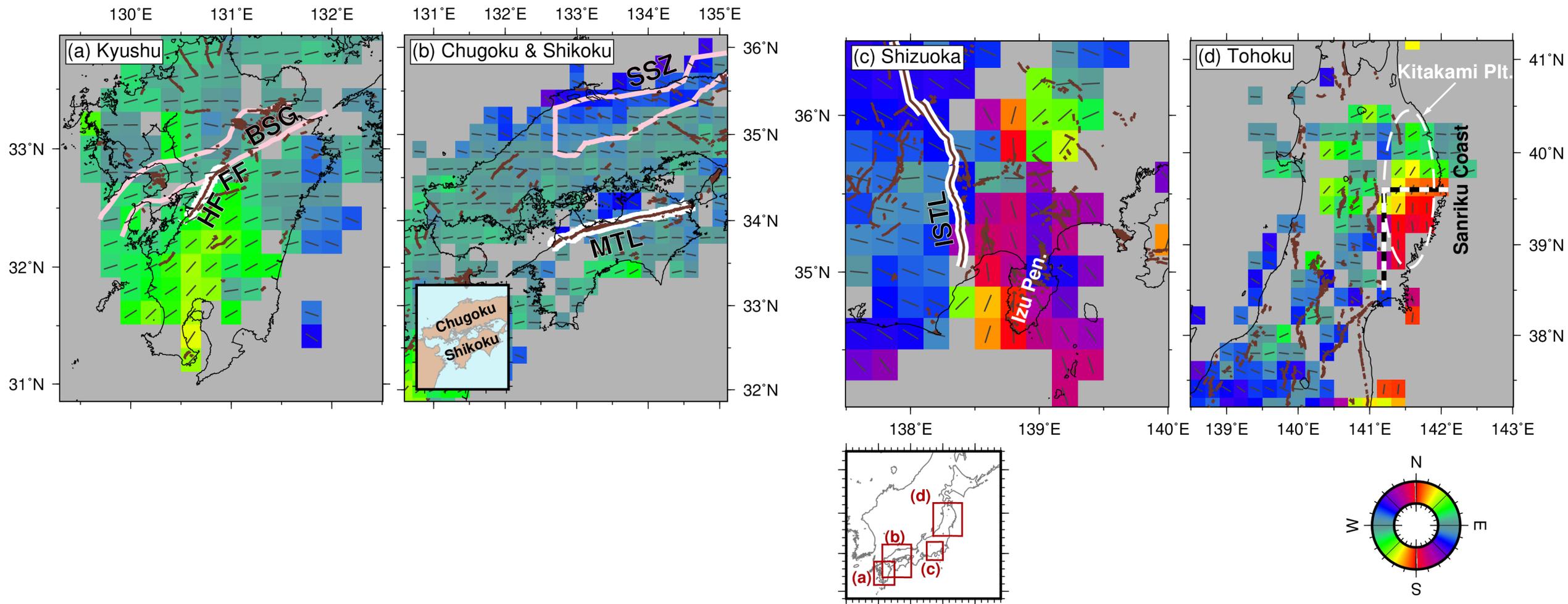
[3] 結果: 水平主圧縮軸方位・断層タイプ



Uchide et al. (2022)

応力場推定

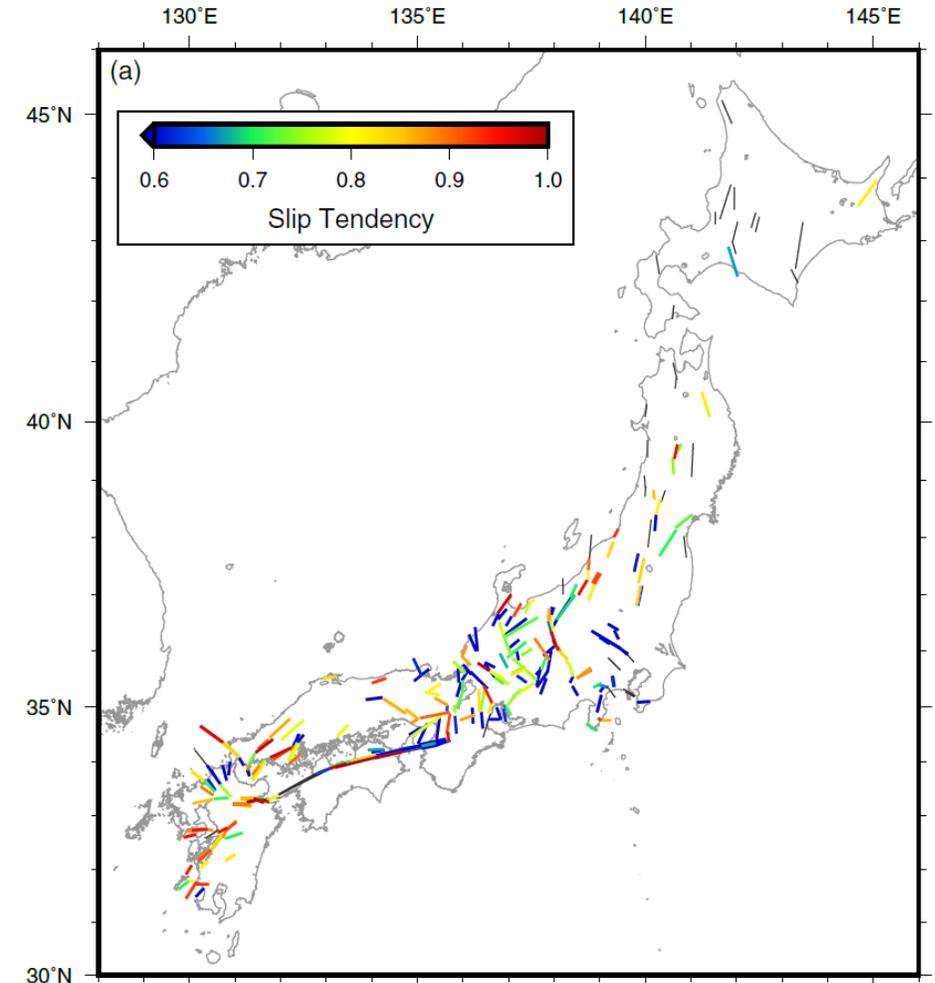
[4] 地質境界における水平主圧縮軸方位のコントラスト



応力場推定

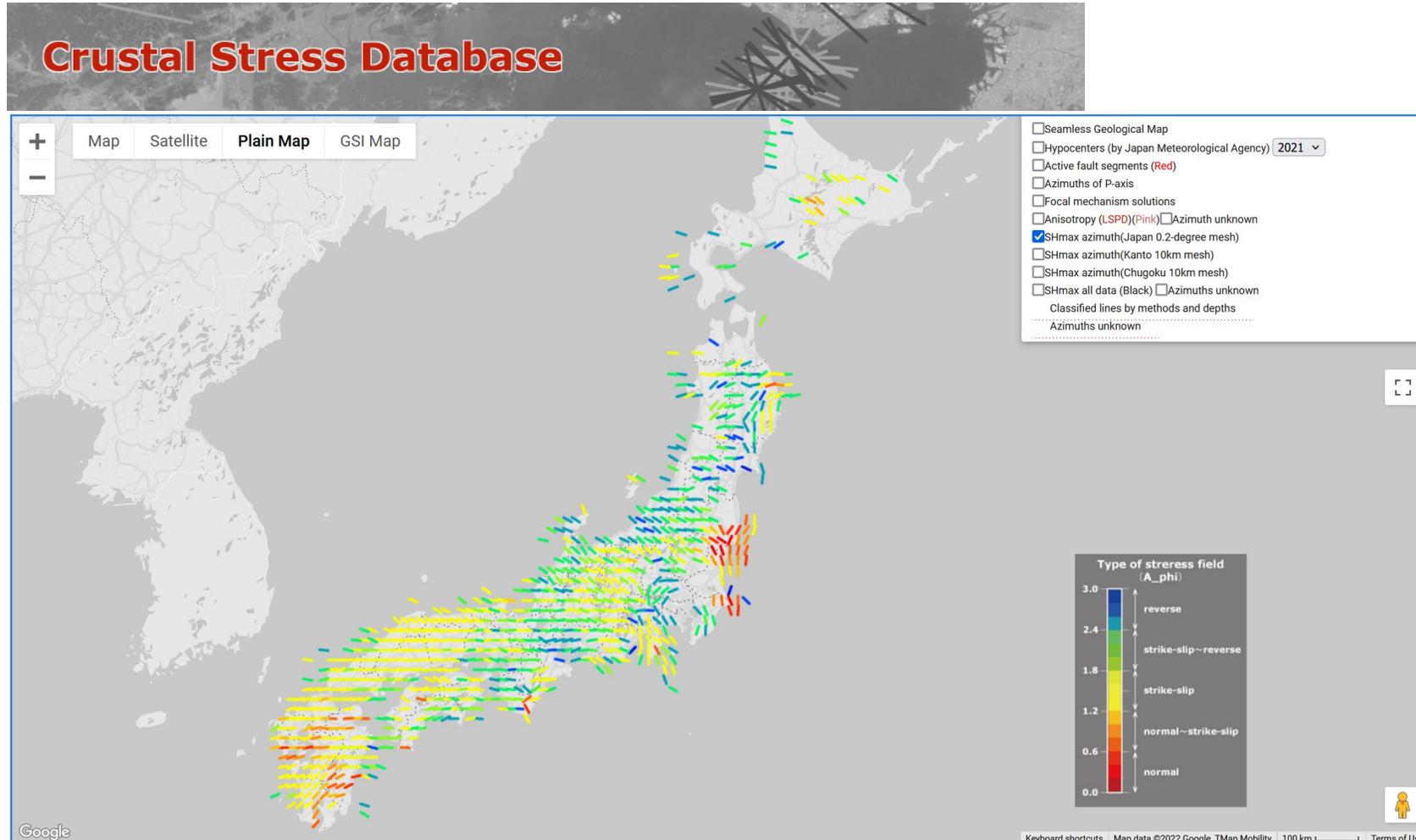
[5] 応力による断層の滑りやすさの評価

- スリップテンデンスー
 - ある断層を滑らせやすいかどうかに関する応力の指標
 - 0は滑らせにくい、1は滑らせやすい
 - 本研究では応力の絶対的な大きさは不明
→ 応力の向きが断層を滑らせやすい向きかどうかを評価



応力場推定

[6] 地殻応力場データベース



応力場推定

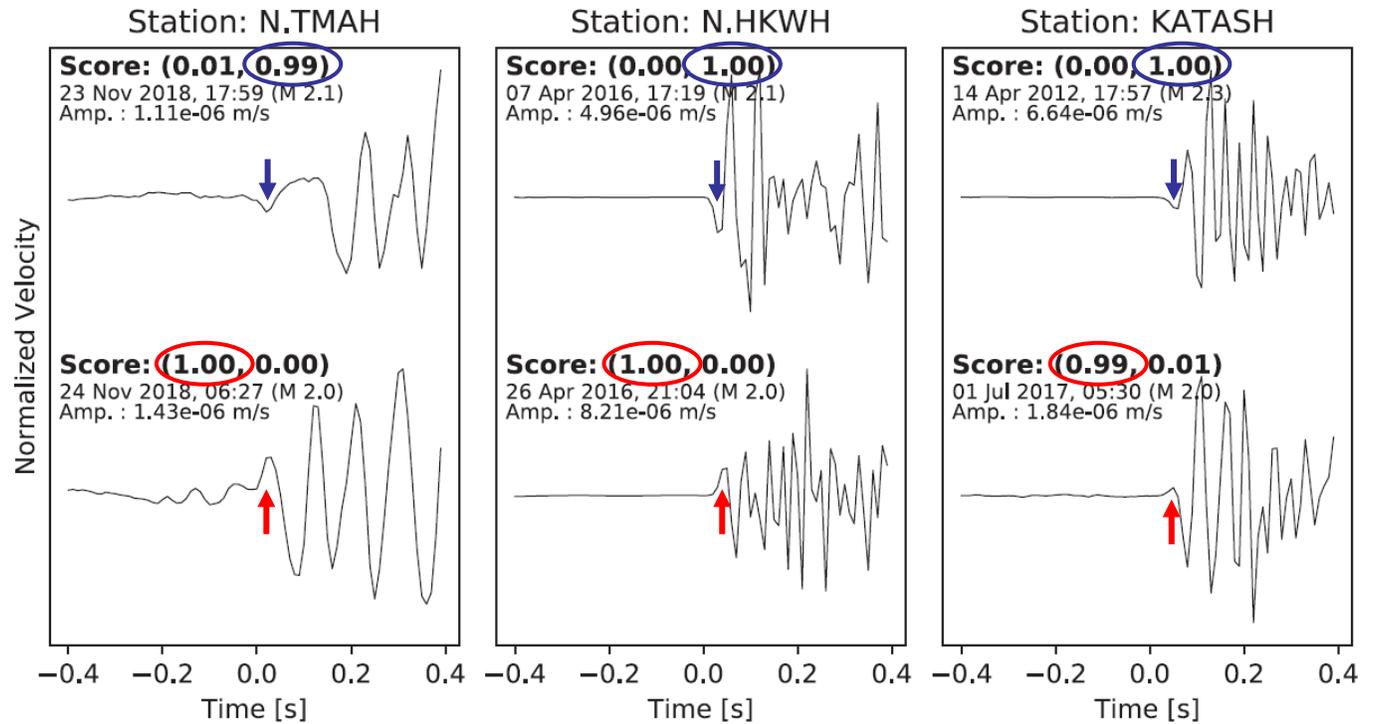
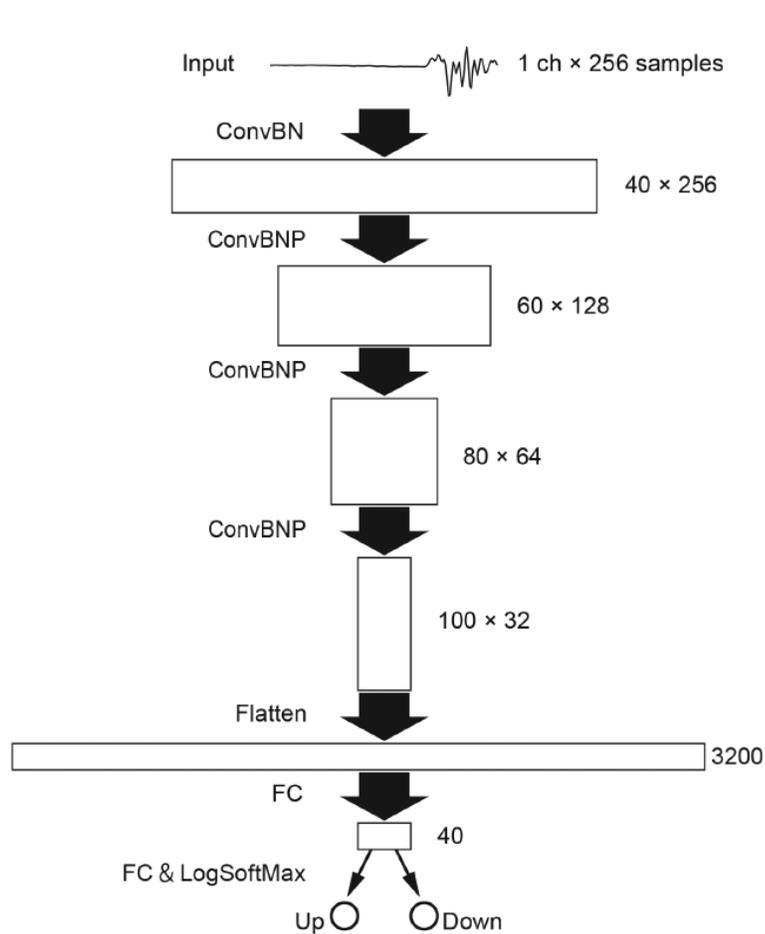
[7] 今後の課題

| | Ver. 0 | Ver. 1 | Ver. 2 | Ver. 3 | ... |
|----------------|--------------------|---------------------------------|---|--------|-----|
| 対象地域 | 海岸線の内側 20 km以浅 | <u>海岸線から50 km以内</u> 20 km以浅 | ... 地域拡大 (海域、深部) | | |
| 地震波形データ | Hi-net & 気象庁 | Hi-net, 気象庁JMA, & <u>産総研</u> | ... 利用する観測網の追加 (防災科研S-netなど、海底観測網など) | | |
| P波・S波到達時刻 | 気象庁カタログ | 同左 | ... 自動検測の導入 | | |
| 震源決定 | 気象庁カタログ | 同左 | ... 自動検測結果の利用、3次元速度構造の利用 | | |
| P波初動極性 | <u>深層学習</u> | 同左 | ... 深層学習モデルの改善 | | |
| 震源メカニズム解 決定 | HASH (P波初動極性より) | 同左 | ... 地震波の振幅の利用 | | |
| 応力インバージョン | (未実施) | HM2006 + <u>ABIC</u> 水平分布のみ | ... 応力の3次元分布や時間変化 | | |
| | Uchide (2020) | Uchide et al. (2022) | | | |

ドメイン知識を活用した ニューラルネットワークモデルの 開発と検証

P波初動極性

機械学習による自動読み取り (Uchide, 2020)



データ拡張

上下逆転させた波形(-1を掛ける)は逆の極性のデータとして利用。

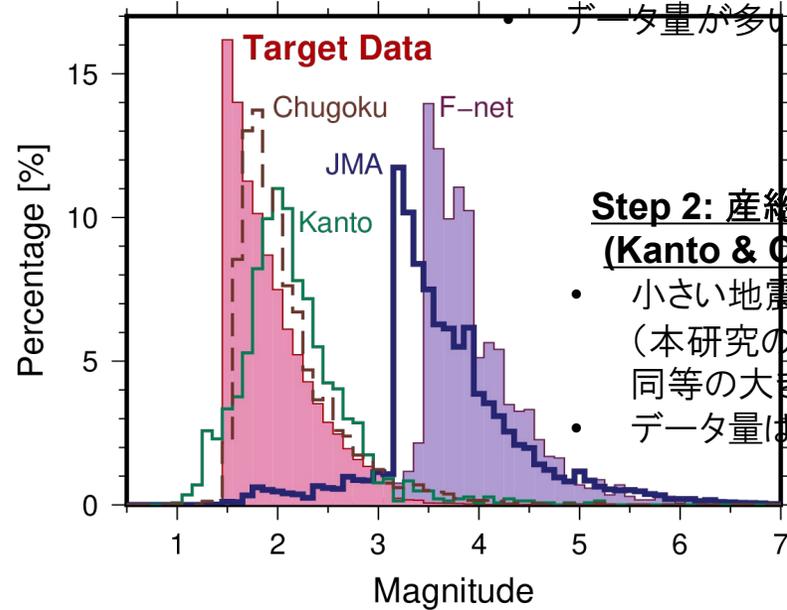
- データ数が倍増する。
- 上下の極性のデータの個数が同じになる。

P波初動極性読み取りのモデルの改善 ファインチューニング

ファインチューニングに用いたデータ

Step 1: 気象庁カタログ (JMA)

- 概ねマグニチュード3以上
データ量が多い



Step 2: 産総研カタログ (Kanto & Chugoku)

- 小さい地震の読み取り
(本研究のターゲットと同等の大きさ)
- データ量は少ない

Training: 404,989 seismograms
(18,721 events)
Validation: 8,636 seismograms
(620 events)

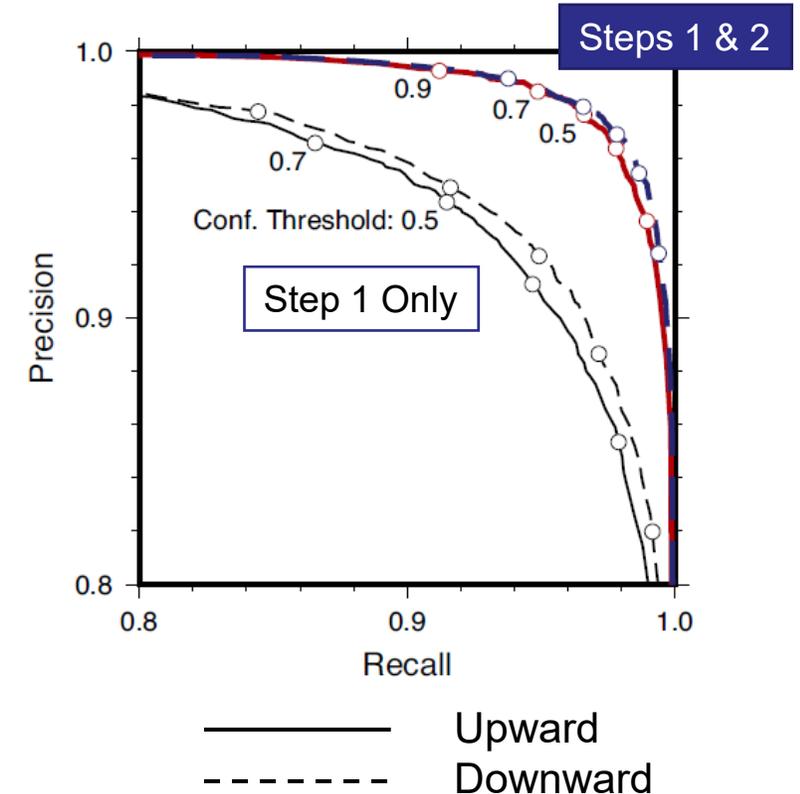
関東地方

Training: 12,803 seismograms
(1,262 events)
Validation: 782 seismograms
(56 events)
Test: 1,483 seismograms
(113 events)

中国地方

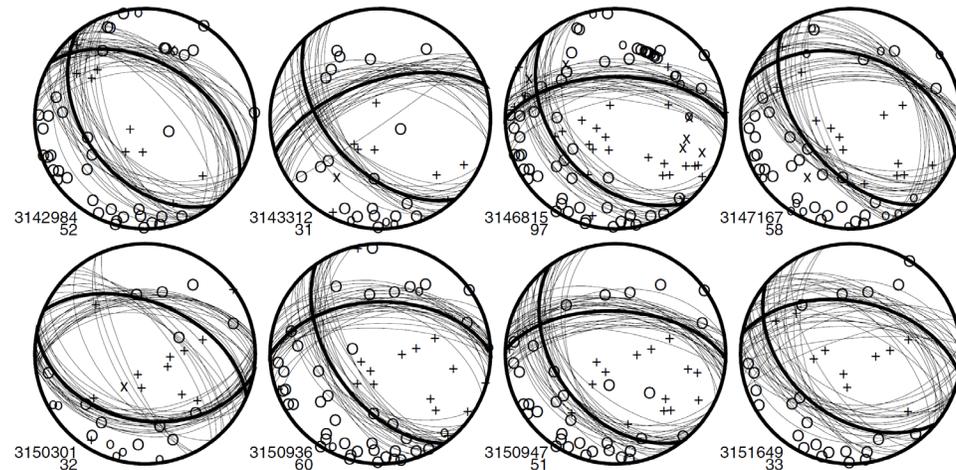
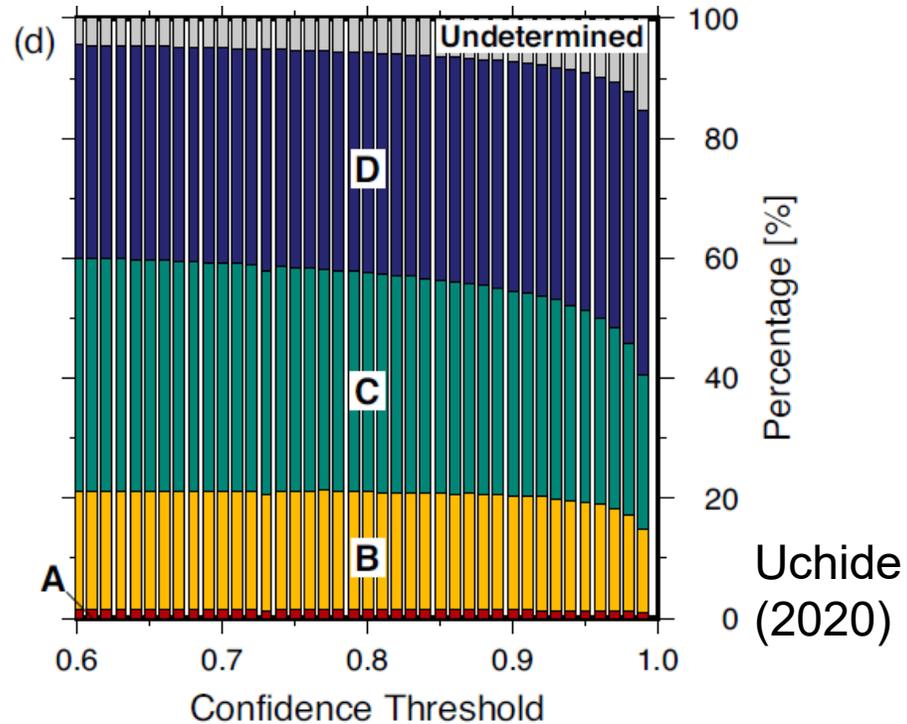
Training: 63,327 seismograms
(2,259 events)
Validation: 7,672 seismograms
(322 events)
Test: 12,818 seismograms
(595 events)

Precision-Recall曲線



閾値の決め方

震源メカニズム解の質に基づく



Hardebeck & Shearer (2002)

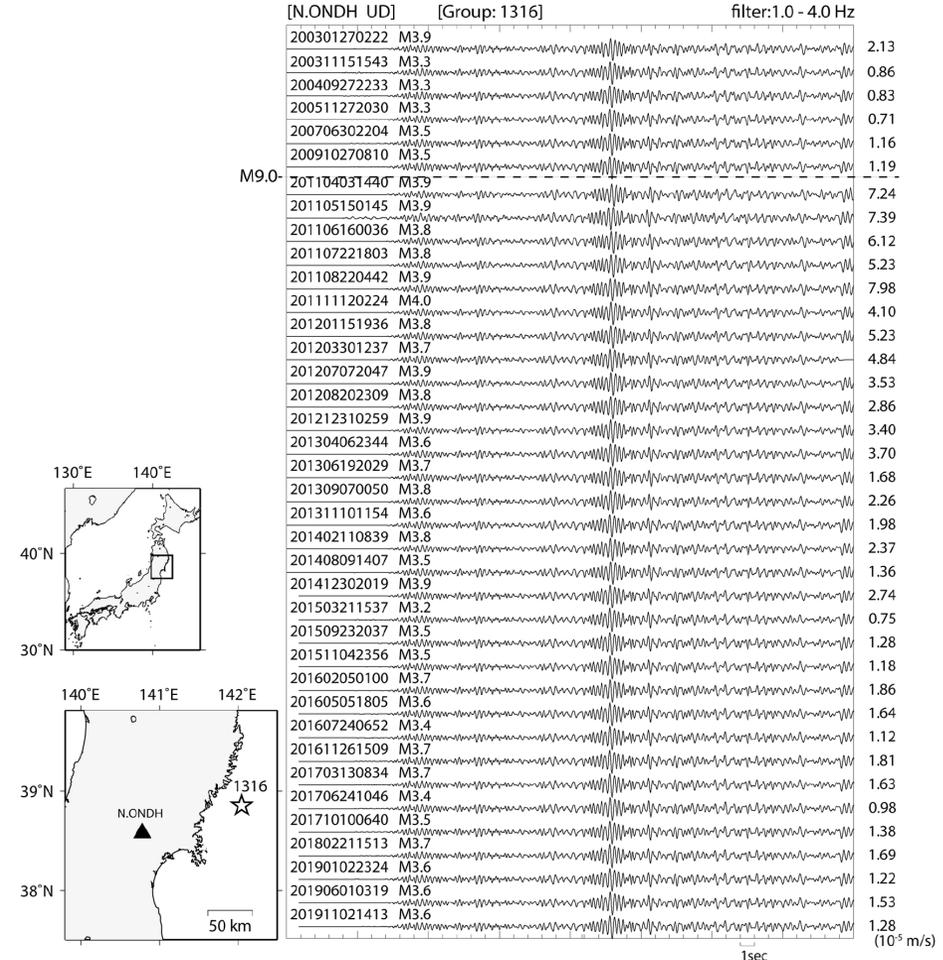
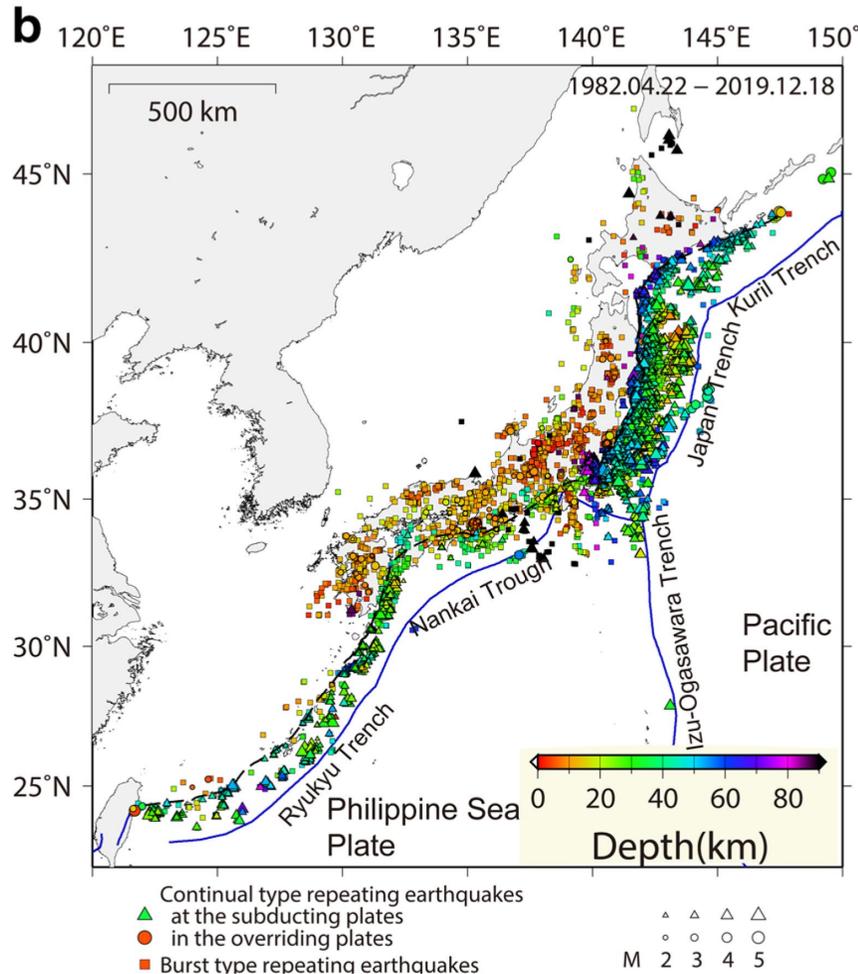
| quality (qual) | average misfit (mfrac) | RMS fault plane uncertainty | station distribution ratio (stdr) | mechanism probability (prob) |
|----------------|---|-----------------------------|-----------------------------------|------------------------------|
| - | | | | |
| A | ≤ 0.15 | $\leq 25^\circ$ | ≥ 0.5 | ≥ 0.8 |
| B | ≤ 0.20 | $\leq 35^\circ$ | ≥ 0.4 | ≥ 0.6 |
| C | ≤ 0.30 | $\leq 45^\circ$ | ≥ 0.3 | ≥ 0.7 |
| D | maximum azimuthal gap $\leq 90^\circ$, maximum takeoff angle gap $\leq 60^\circ$ | | | |
| E | maximum azimuthal gap $> 90^\circ$, maximum takeoff angle gap $> 60^\circ$ | | | |
| F | fewer than 8 polarities | | | |

Uchide (2020)

極性データが増える

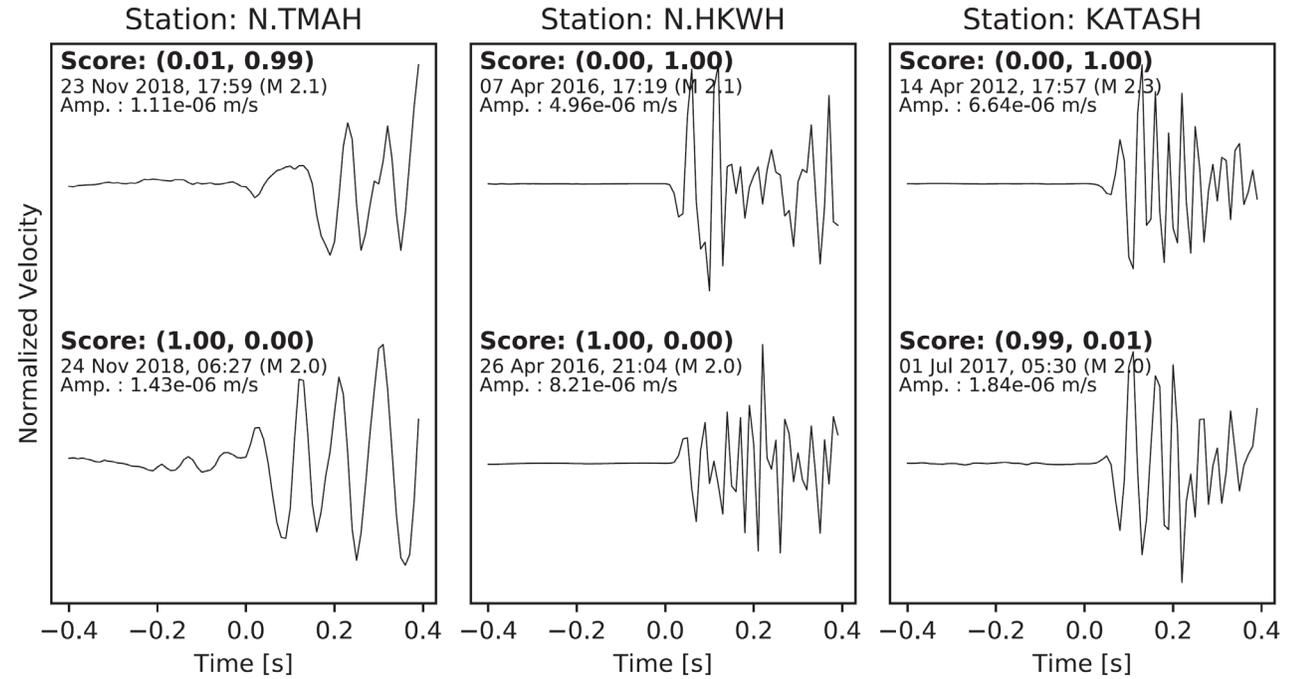
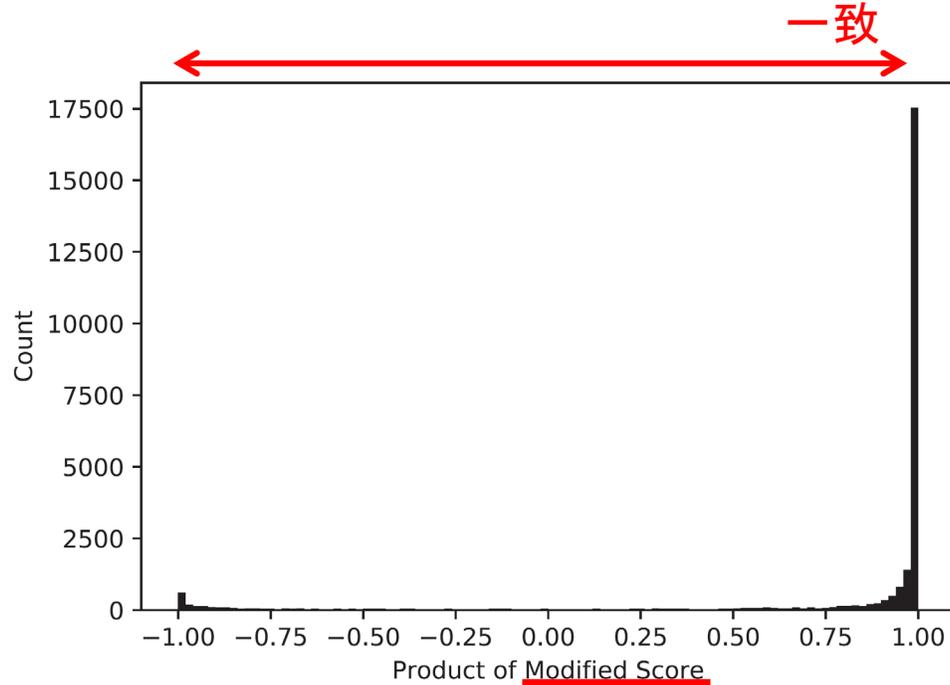
学習済みモデルの評価

[1] 繰り返し地震の利用 (Igarashi, 2020)



学習済みモデルの評価

[2] 繰り返し地震同士の極性の比較

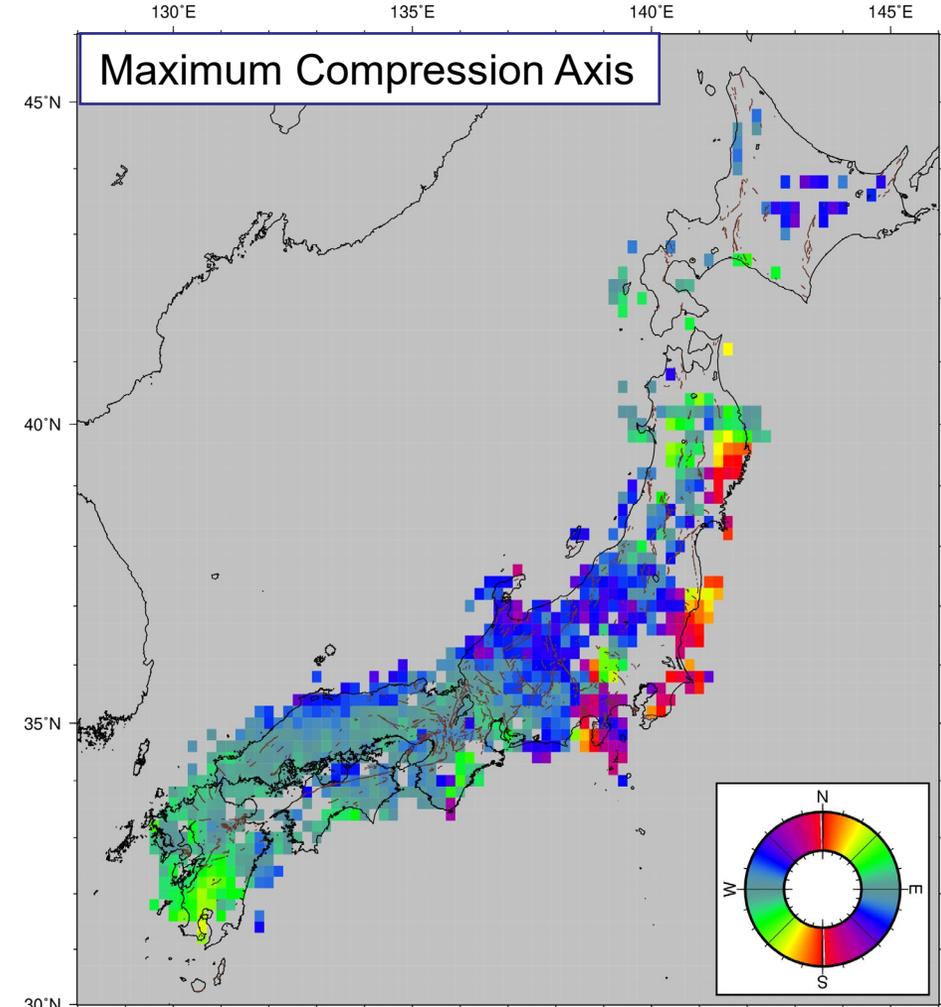


Score_{upward} - Score_{downward}
 Upward: +1
 Downward: -1

Uchide (2020)

まとめ

- どこでどのような地震が発生しやすいかを検討するため、また、日本のテクトニクス の 解明に資するため、大量の微小地震の震源メカニズム解を使って、日本列島の応力場を推定した。
- 得られた応力地図からは、大局的な東西圧縮、地域的な東西圧縮、地質境界における応力方位変化、局所的な応力異常といった、幅広いスケールにおける応力場の特徴が明らかになった。
- ニューラルネットワークモデルの学習データの扱いや学習済みモデルの検証に、ドメイン特有の方法を取った。



<https://doi.org/10.1093/gji/ggaa401>

Dec. 22, 2022



Uchide et al.
(JGR, 2022)

<https://doi.org/10.1029/2022JB024036>



SSA's
"At Work"
article



産総研
プレス
リリース

https://www.aist.go.jp/aist_j/press_release/pr2022/pr20220614_2/pr20220614_2.html