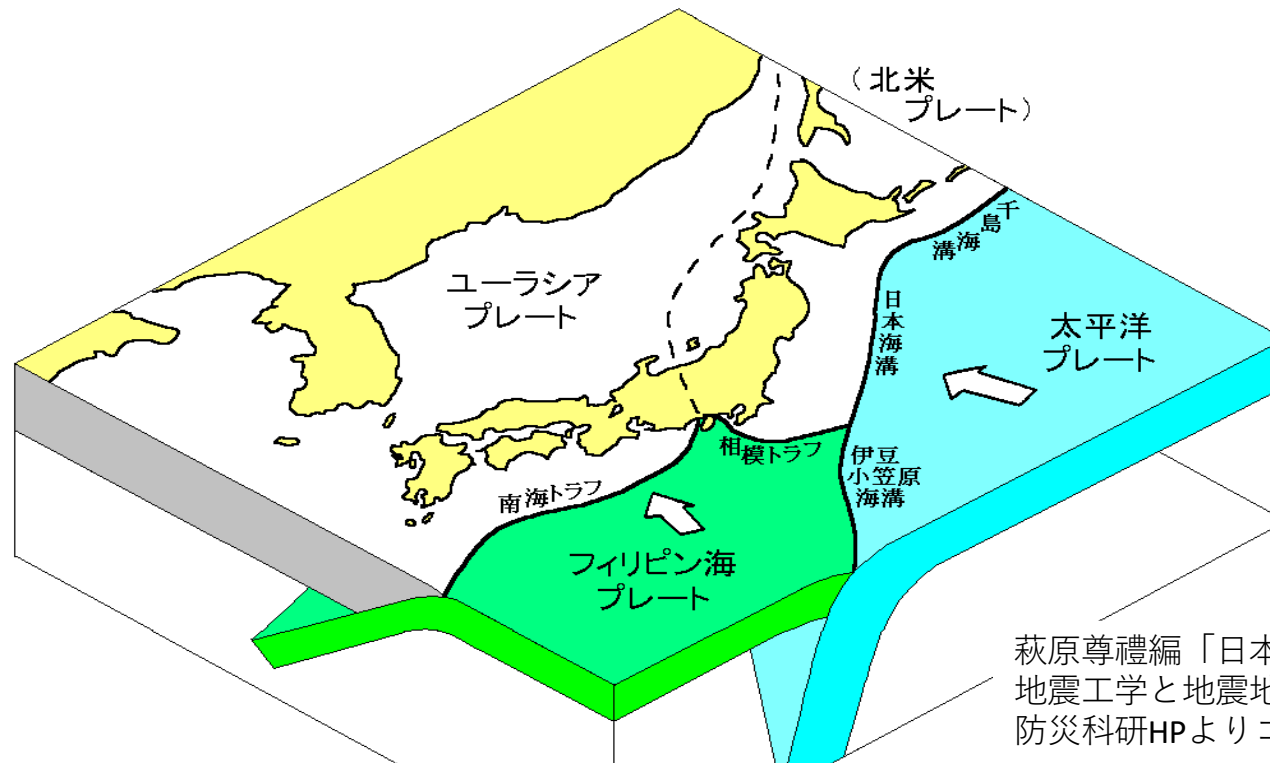


日本列島と プレートテクトニクス

防災研究所地震災害研究センター

深畑幸俊



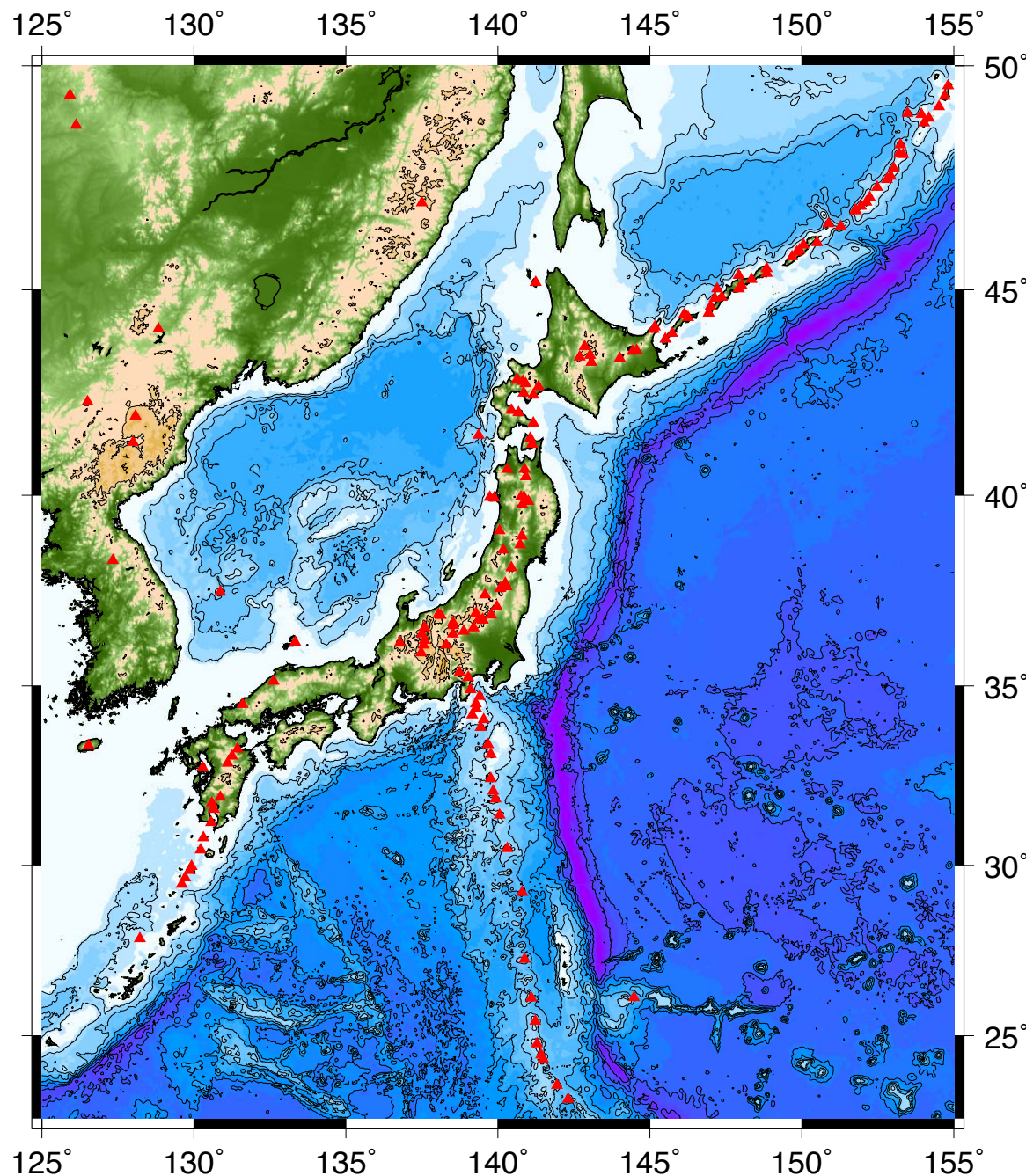
萩原尊禮編「日本列島の地震，
地震工学と地震地体構造」鹿島出版会
防災科研HPよりコピー

日本における被害地震や火山災害

- ・ 2018年大阪府北部地震
- ・ 2016年熊本地震
- ・ 2011年東北地方太平洋沖地震
- ・ 2008年岩手宮城内陸地震
- ・ 2007年中越沖地震，能登半島地震
- ・ 2004年中越地震
- ・ 1995年兵庫県南部地震
- ⋮
- ・ 2014年御嶽山
- ・ 2000年三宅島，有珠山
- ・ 1991年雲仙普賢岳
- ・ 1986年伊豆大島
- ⋮

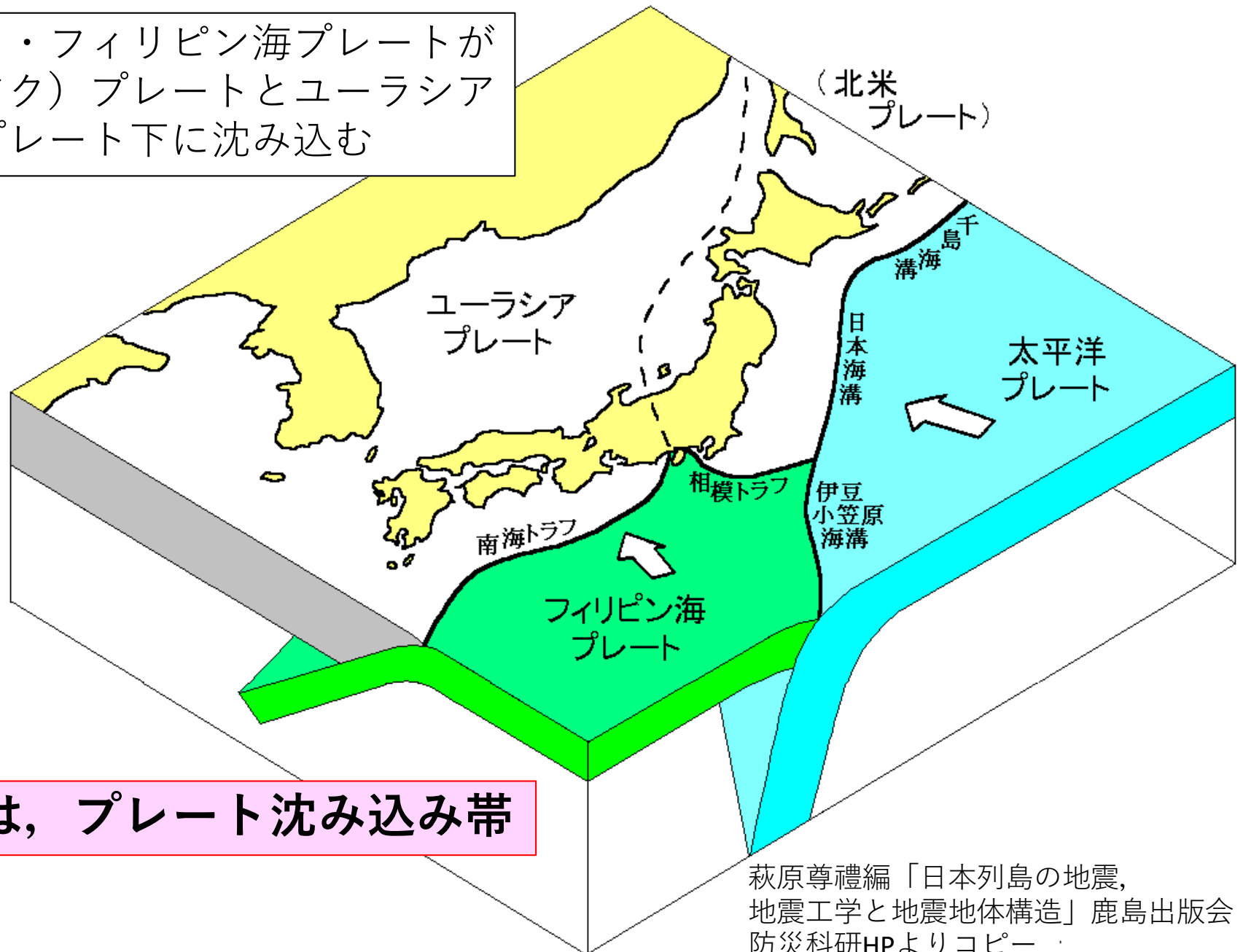
日本にはなぜ
地震・火山が多いのか？

プレート境界だから？



日本周辺のプレート配置図

太平洋プレート・フィリピン海プレートが
北米（オホーツク）プレートとユーラシア
（アムール）プレート下に沈み込む

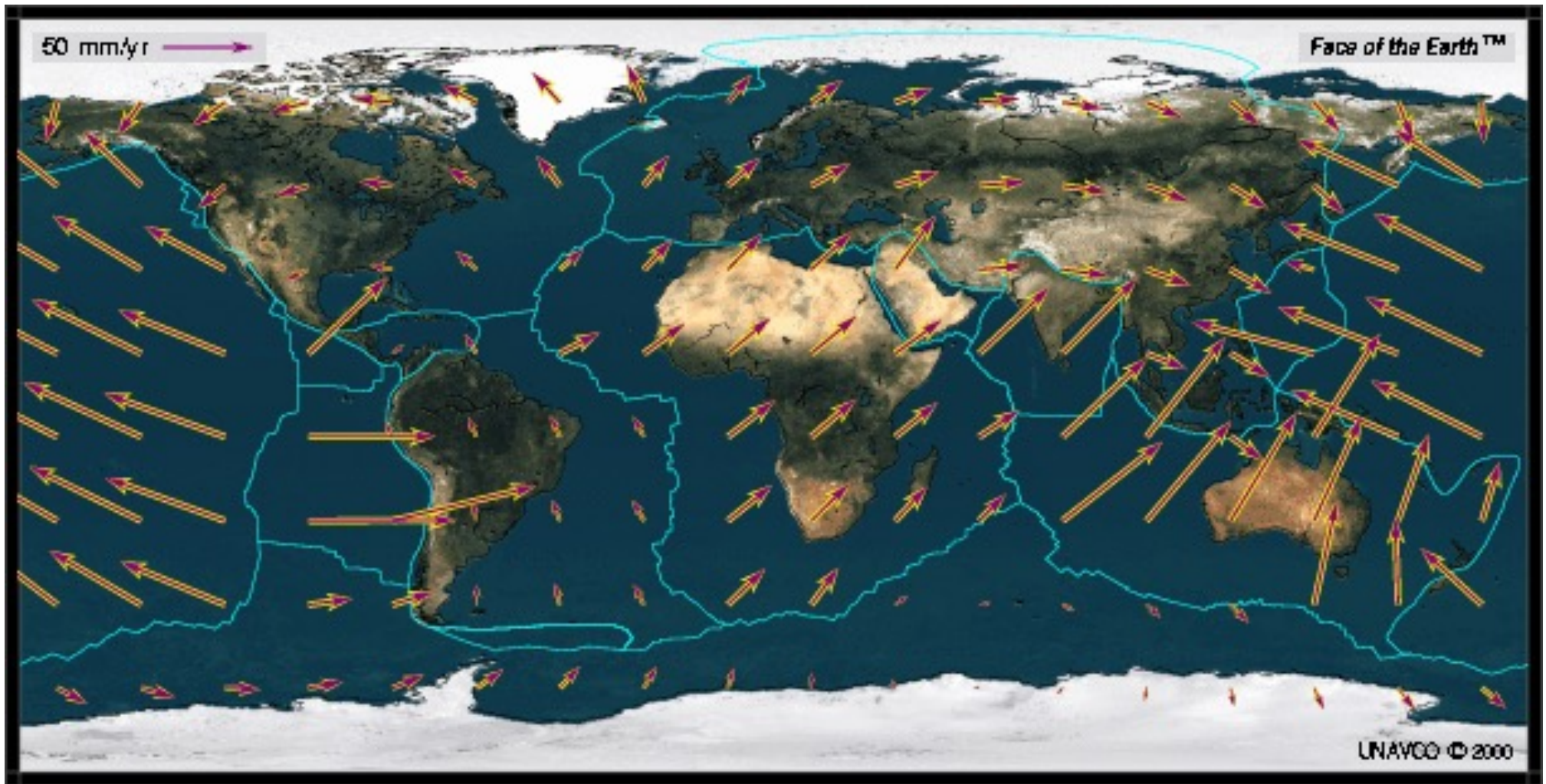


日本列島は、プレート沈み込み帯

萩原尊禮編「日本列島の地震，
地震工学と地震地体構造」鹿島出版会
防災科研HPよりコピー

プレートテクトニクス

UNAVCO

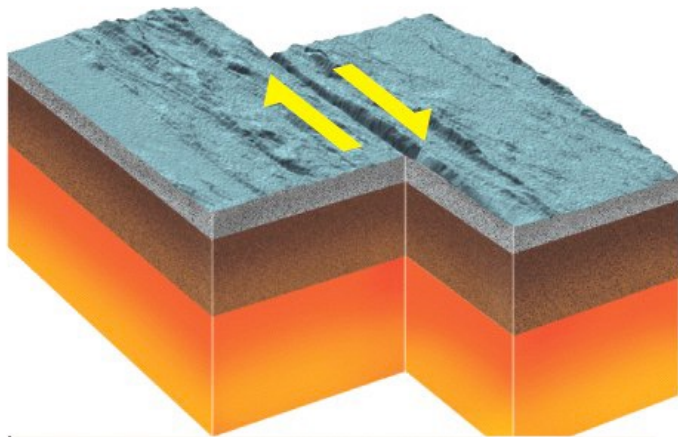


- ・地球表層は10数枚のプレートに分かれて剛体的に相対運動
- ・プレート境界で様々な地学現象(地震, 火山, 山地形成など)が生じる

プレートテクトニクス：3種類の相対運動

(USGSのHPより)

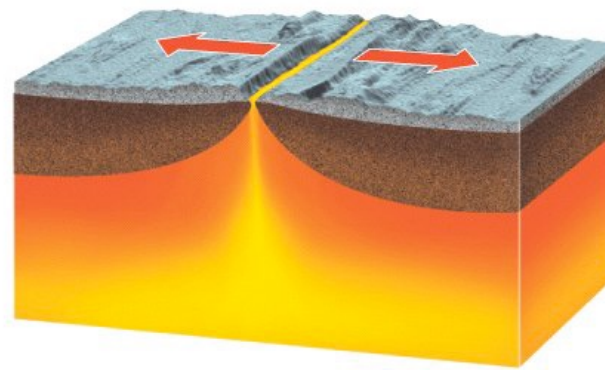
ずれる



At transform-fault boundaries, plates slide horizontally past each other.

トランスフォーム断層

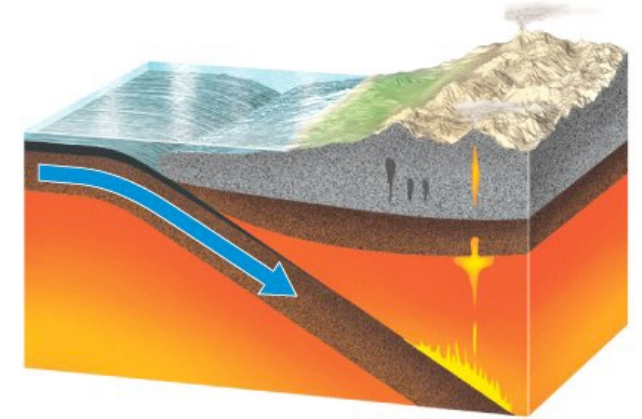
広がる



At divergent boundaries, plates move apart and create new lithosphere.

海嶺

狭まる

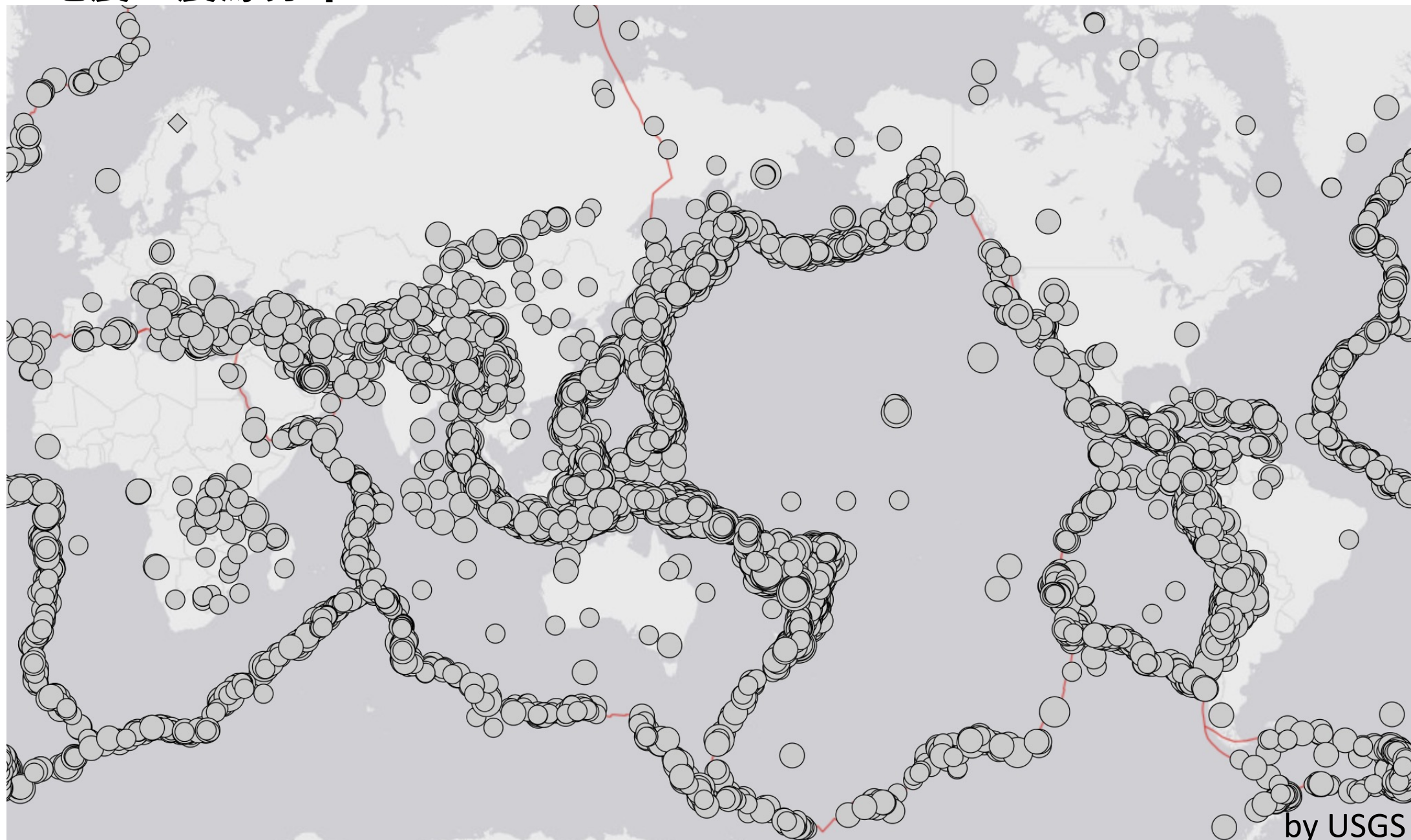


At convergent boundaries, plates collide and one is pulled into the mantle and recycled.

海溝(プレート沈み込み帯)

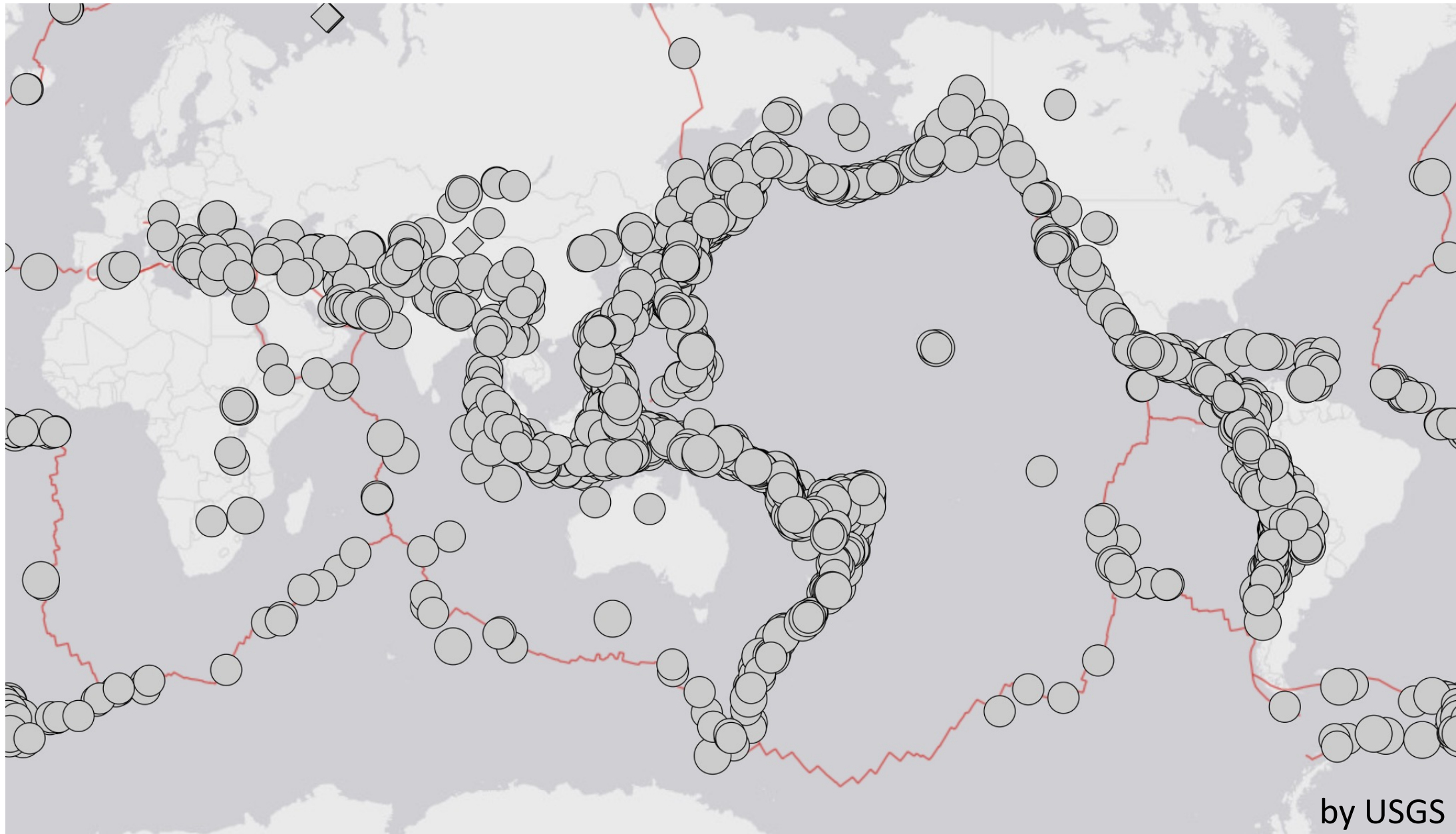
地震の震源分布

M4.6以上, 2020~2022年



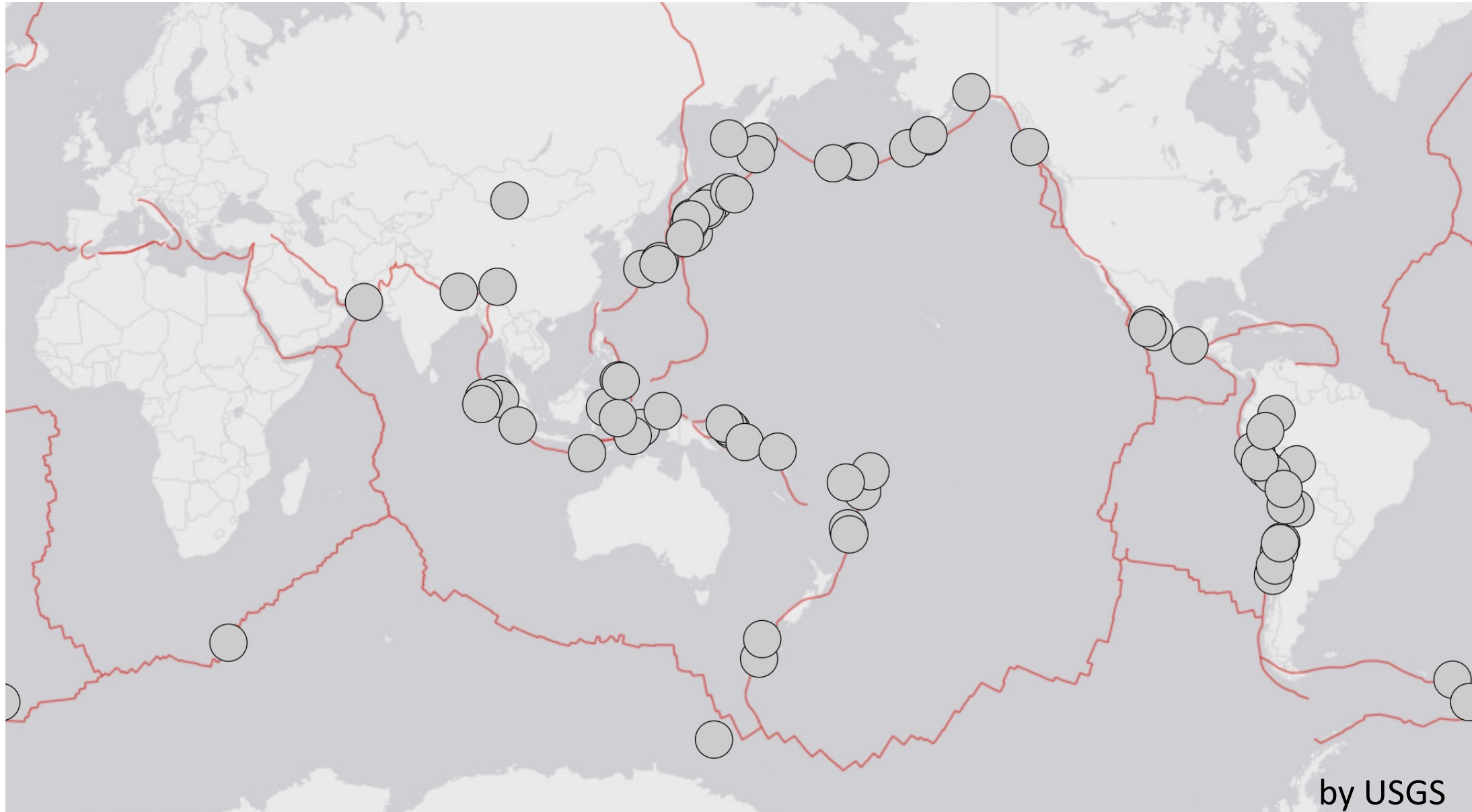
プレート境界をほぼ埋め尽くす

M6.5以上，最近50年間（1973～2022年）



海嶺では大地震は発生しにくい

M8.0以上，最近100年間 (1923 ~ 2022年)

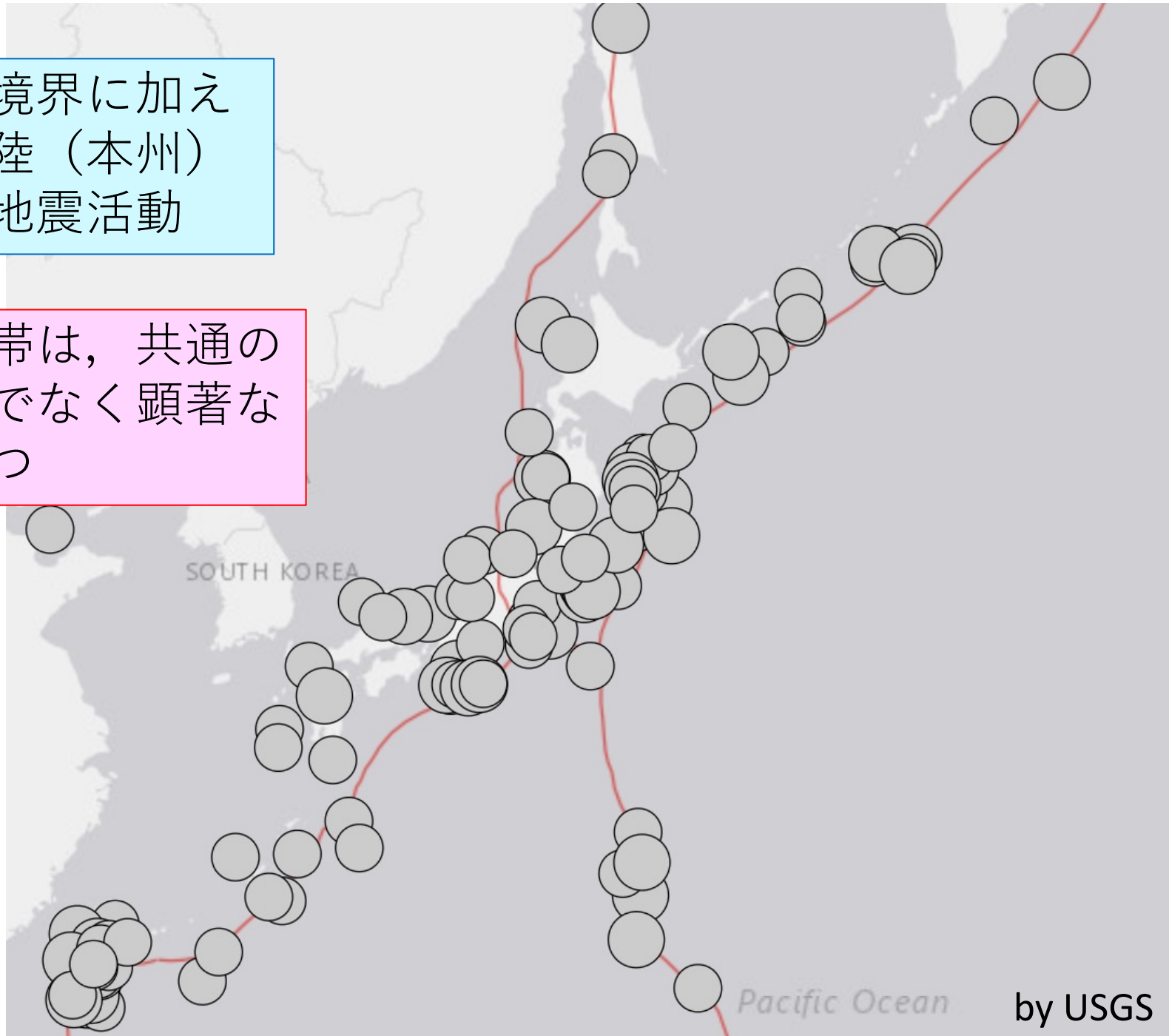


一部の沈み込み帯（伊豆，マリアナ，琉球，チリ南部，エーゲ海，カリブ海など）では巨大地震はほとんど起きない

M6.6以上，最近100年間，15km以浅

プレート境界に加え
日本の内陸（本州）
で活発な地震活動

沈み込み帯は，共通の
特徴だけでなく顕著な
個性も持つ



by USGS

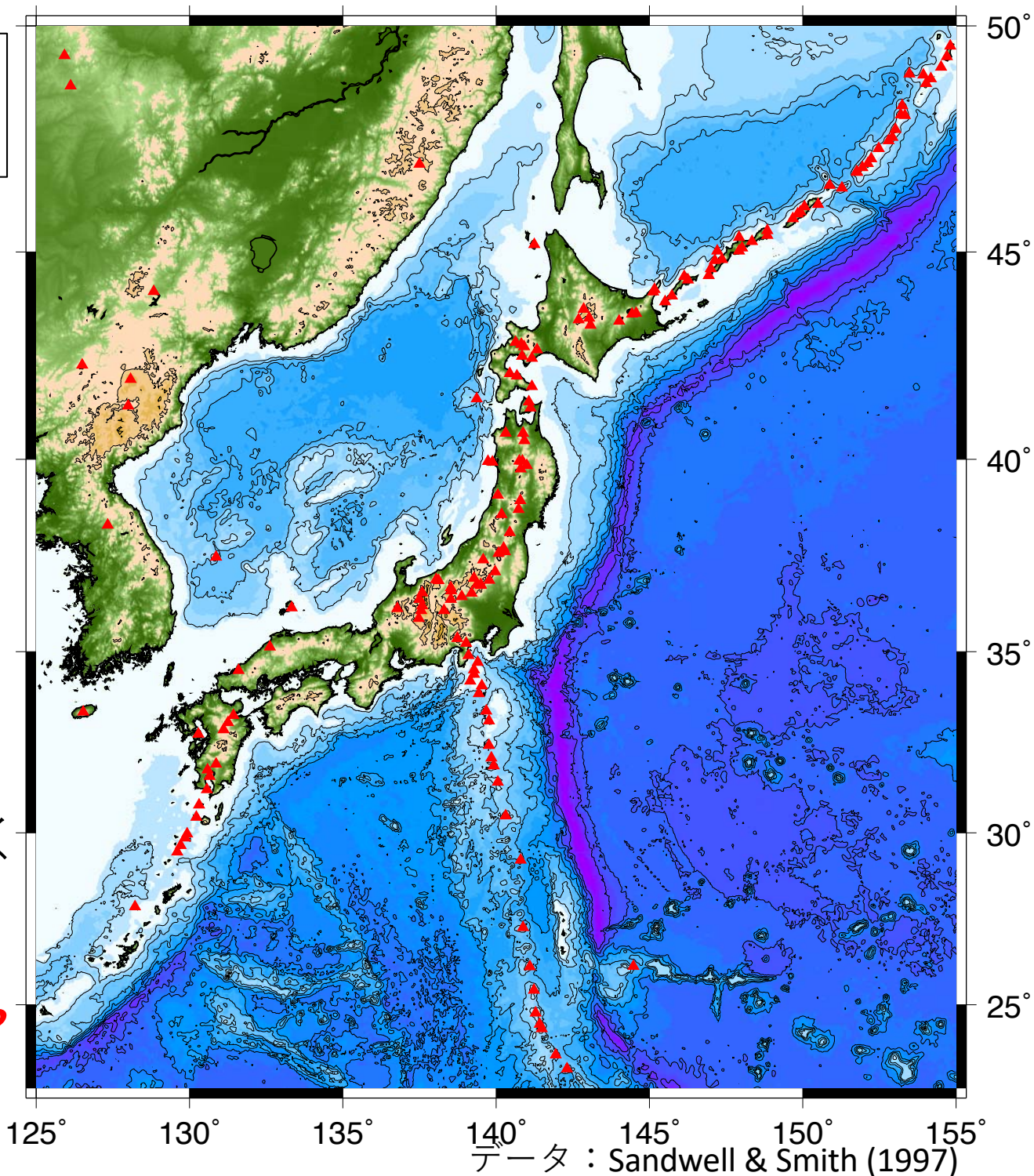
そもそも
地形にも顕著な違いが

日本列島は、島
弧の集合：

- 千島弧
- 本州弧
(東北+西日本弧)
- 伊豆弧
- 琉球弧

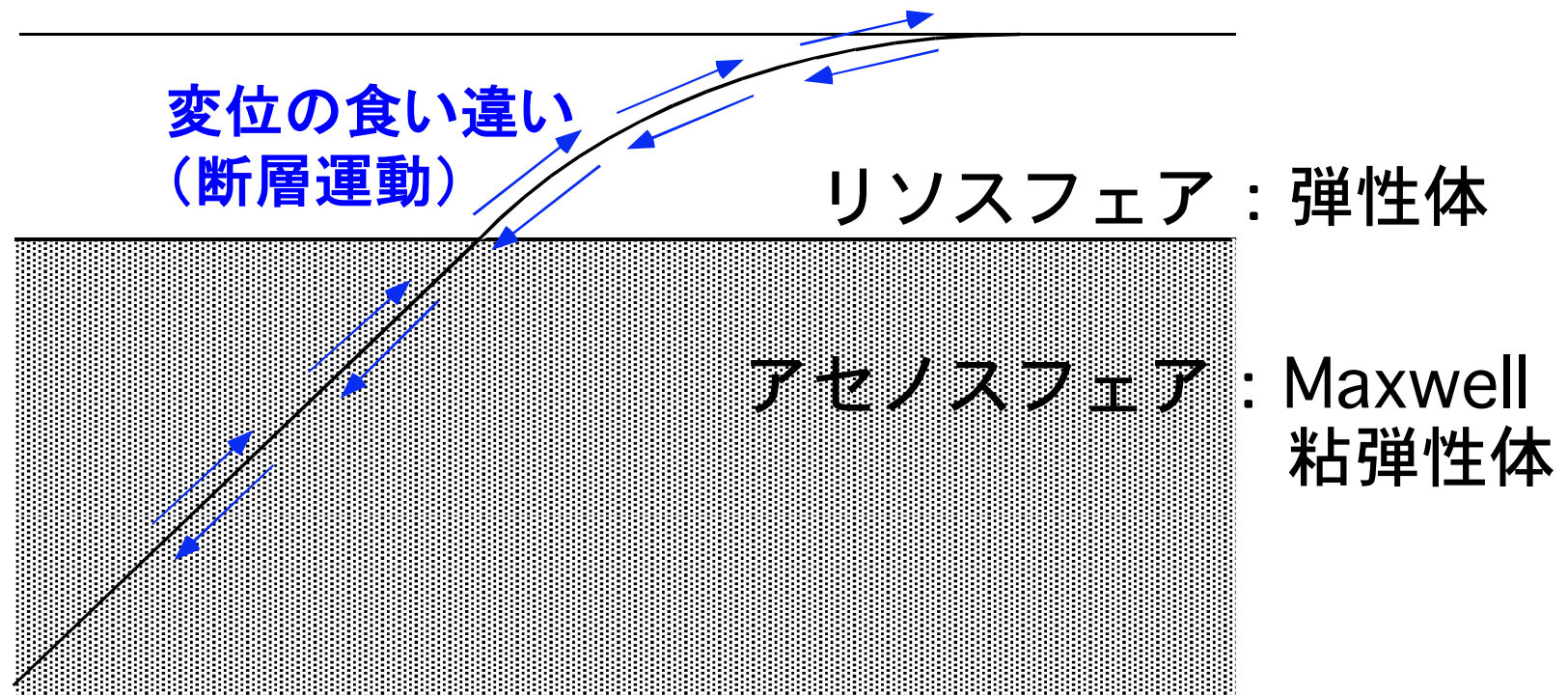
本州弧だけ，幅が広く
地形も高い

何故，島弧はできるのか？



海洋プレートの沈み込みに伴う島弧—海溝系の形成

沈み込み帯の変位の食い違いモデル (Matsu'ura & Sato 1989)

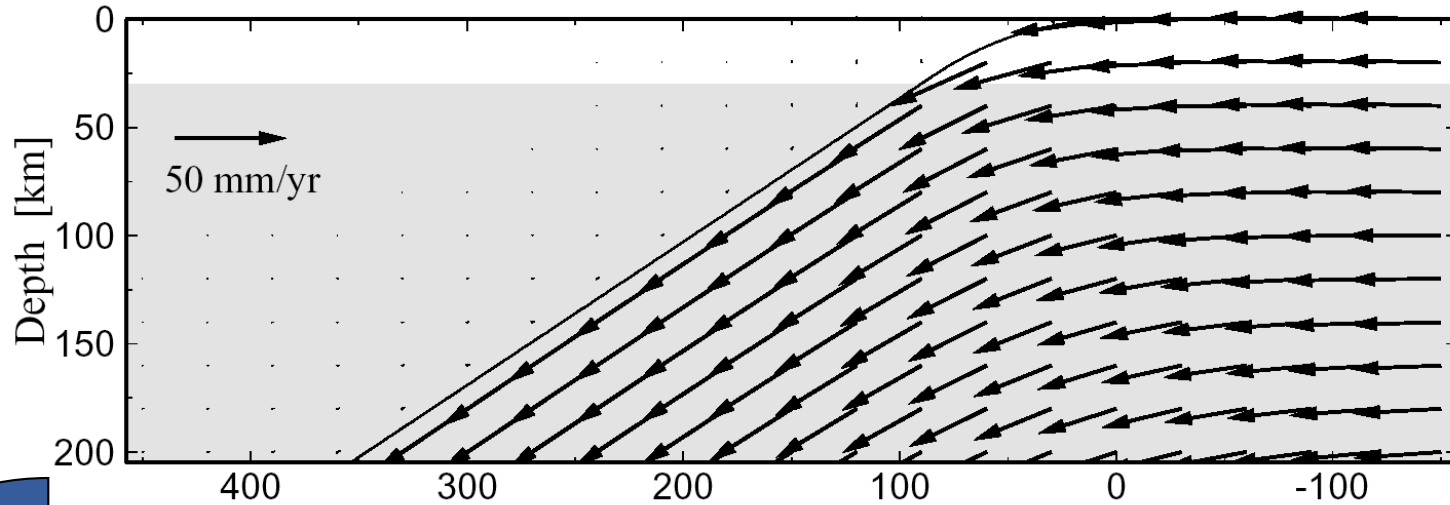


長期間の沈み込み \equiv 一定速度の沈み込み運動 (地震は摂動)

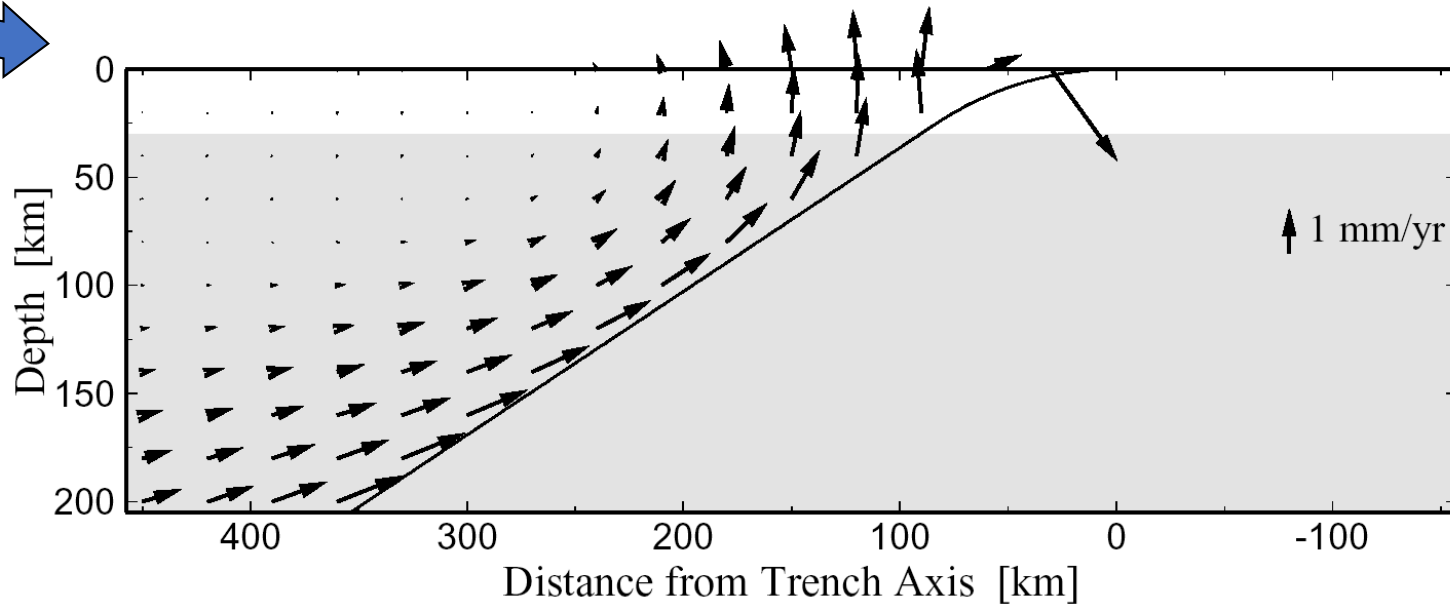
粘弾性体 : 弾性体 (ex. バネ) と粘性流体 (ex. 水あめ) の性質を併せ持つ
cf. マントル対流, 水

プレート境界に変位の食い違いを与えたことによる変形場

Fukahata &
Matsu'ura (2006)



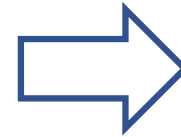
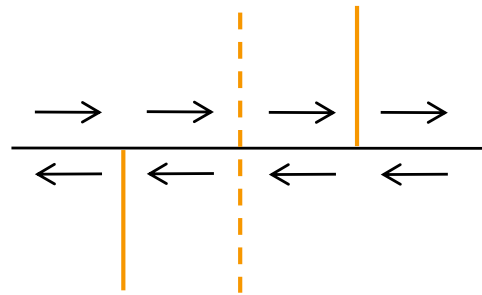
20倍に
拡大



島弧の**隆起**
海溝の**沈降**
が再現

海洋プレートが沈み込むと、なぜ島弧が隆起し、海溝が沈降するのか？

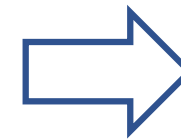
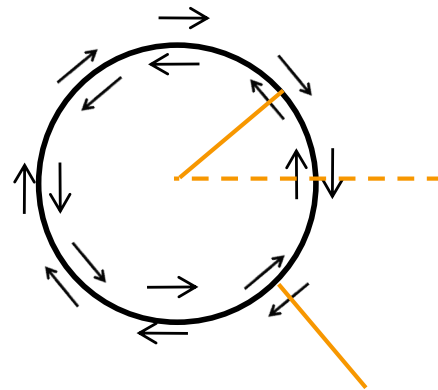
- ・無限に長い横ずれ断層上の一様すべり



無変形
(平行ブロック運動のみ)

曲率ゼロの特殊な場合

- ・円筒形の仮想的断層上の一様滑り

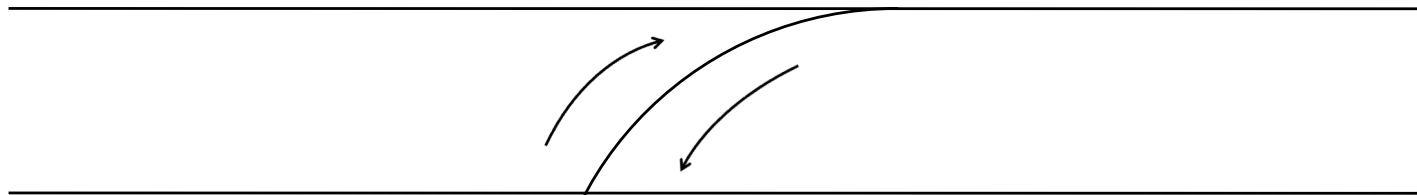


無変形
(回転ブロック運動のみ)

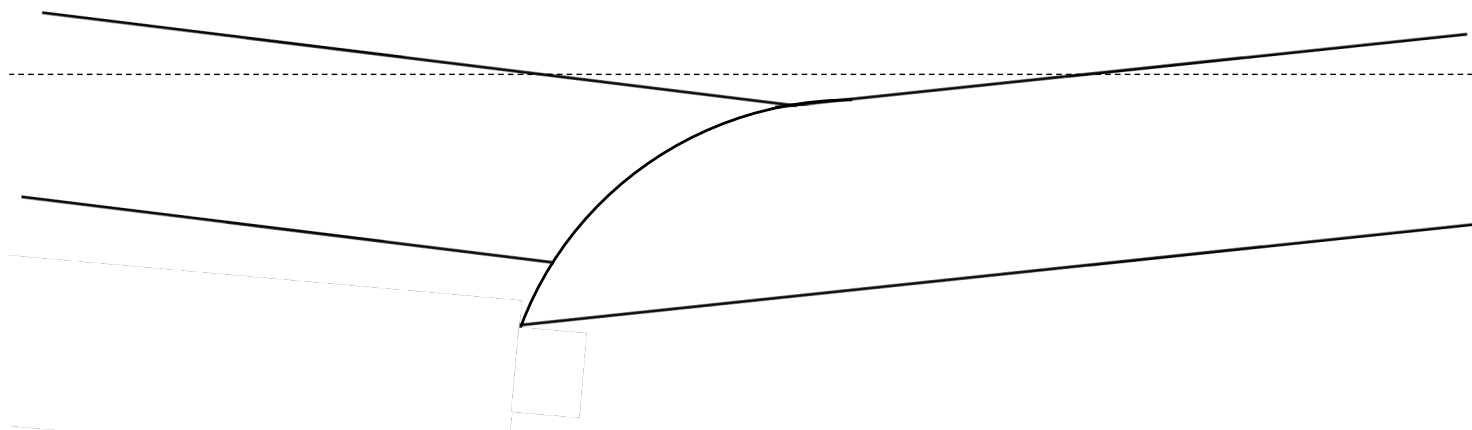
一般に断層の曲率が変化すると、変形が生じる

プレート境界面での変位の食い違い+重力の効果

Fukahata & Matsu'ura (2016)

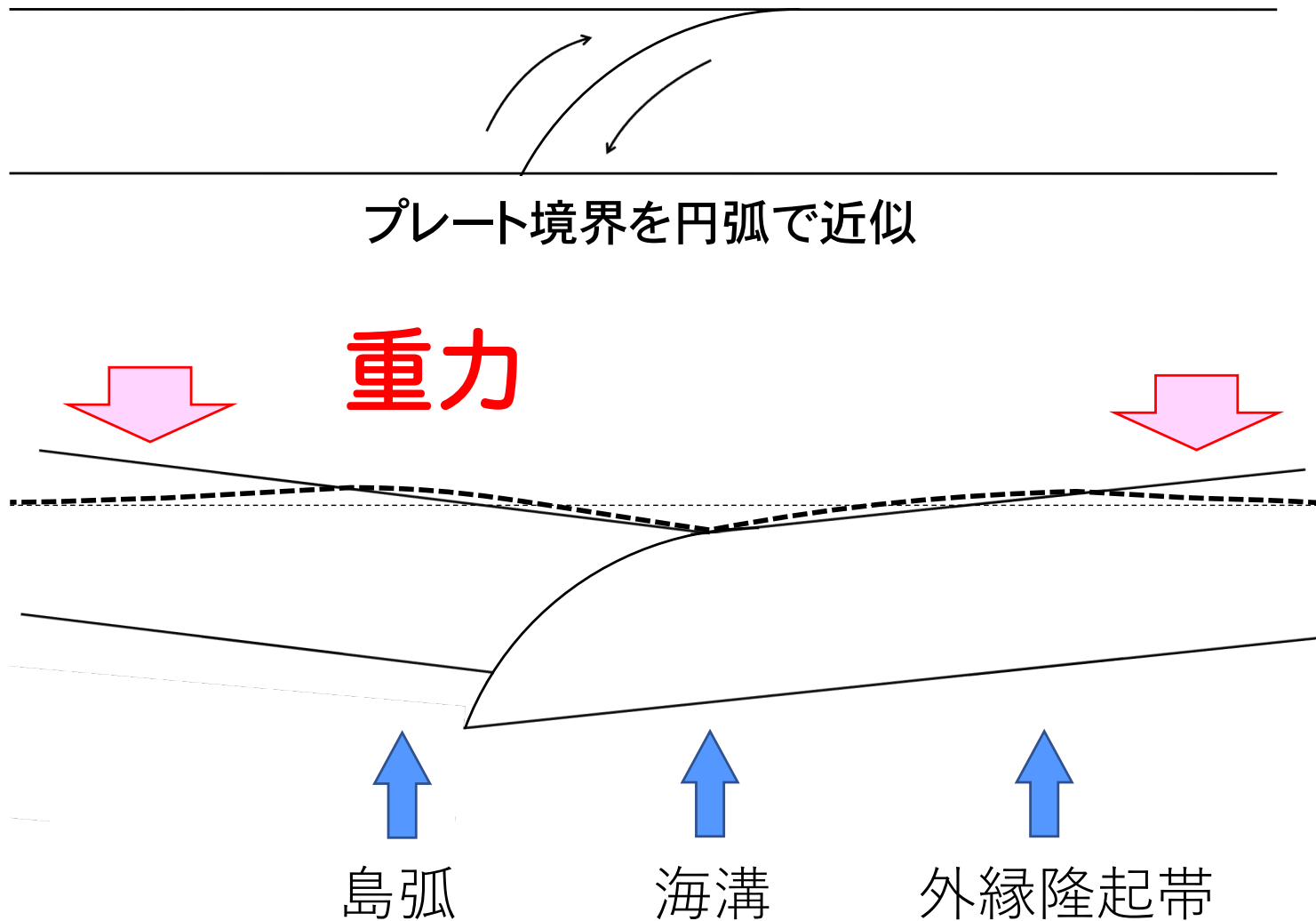


プレート境界を円弧で近似



プレート境界面での変位の食い違い+重力の効果

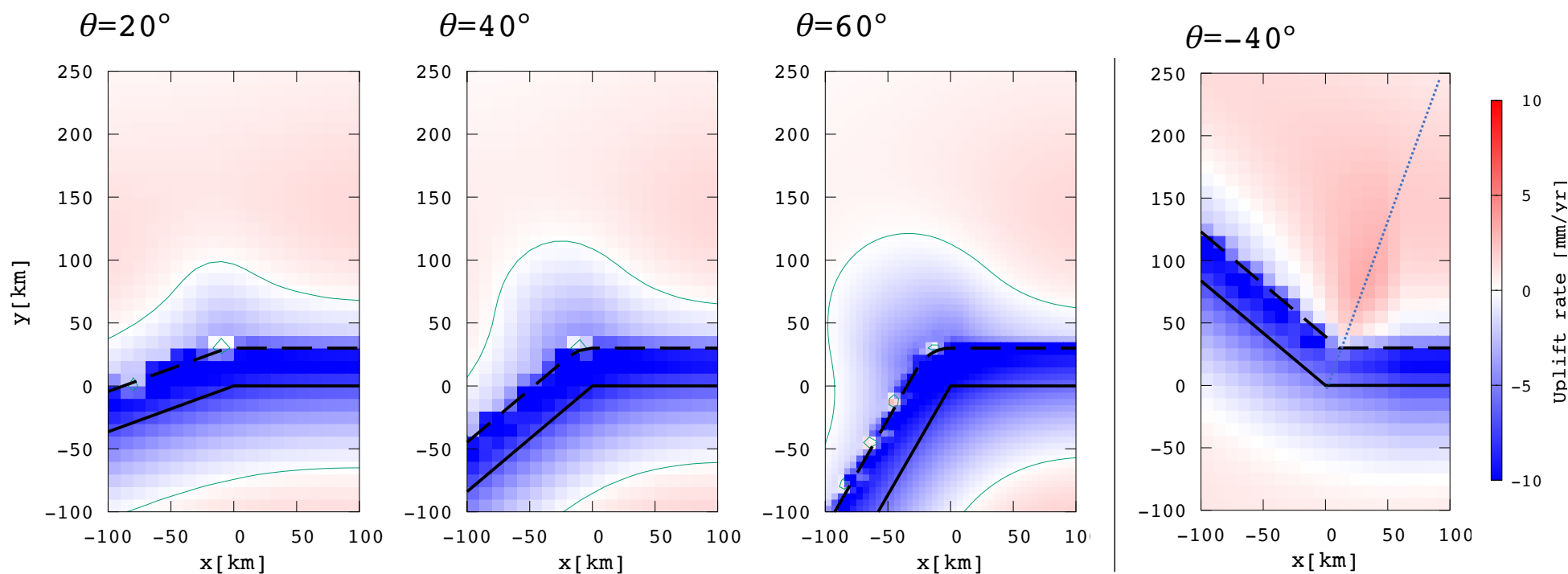
Fukahata & Matsu'ura (2016)



沈み込み帯の2次元の特徴が理解できた！

沈み込み帯の変位の食い違いモデル： 3次元的效果（屈曲した海溝での沈み込み）

—— 海溝軸
- - - 深さ3kmにおけるプレート境界

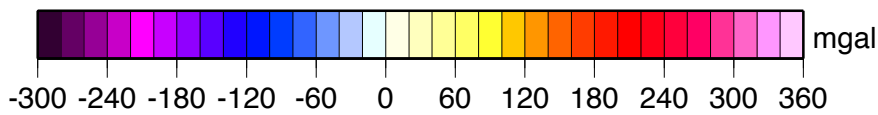
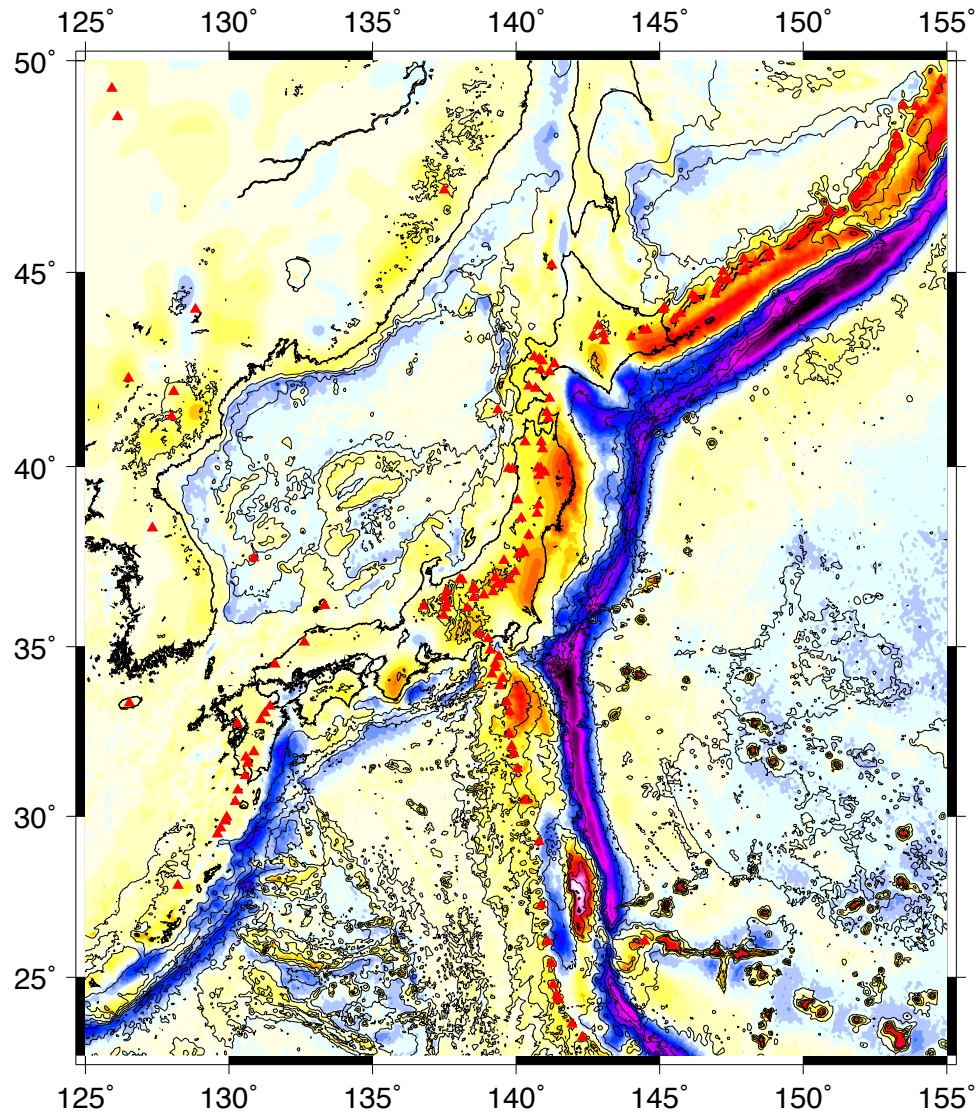


海溝軸の屈曲部付近で島弧側に顕著な沈降
屈曲が大きいかほど大きな沈降域

海側に凸に屈曲の場合は隆起

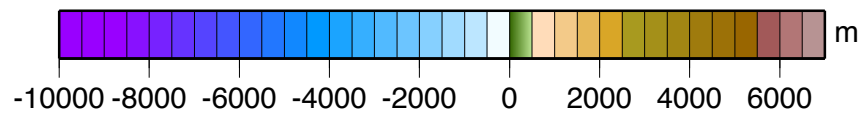
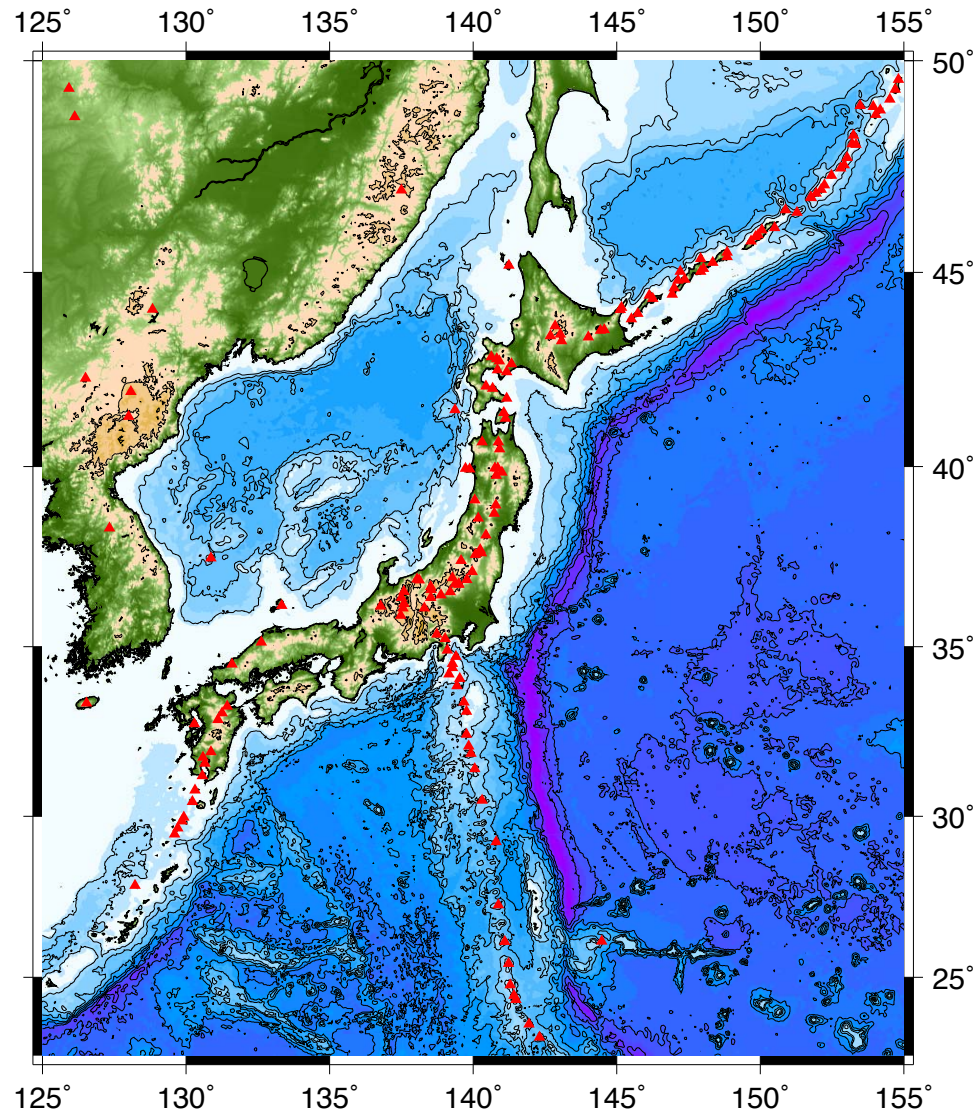
(Mori & Fukahata, in prep.)

重力異常(フリーエア)



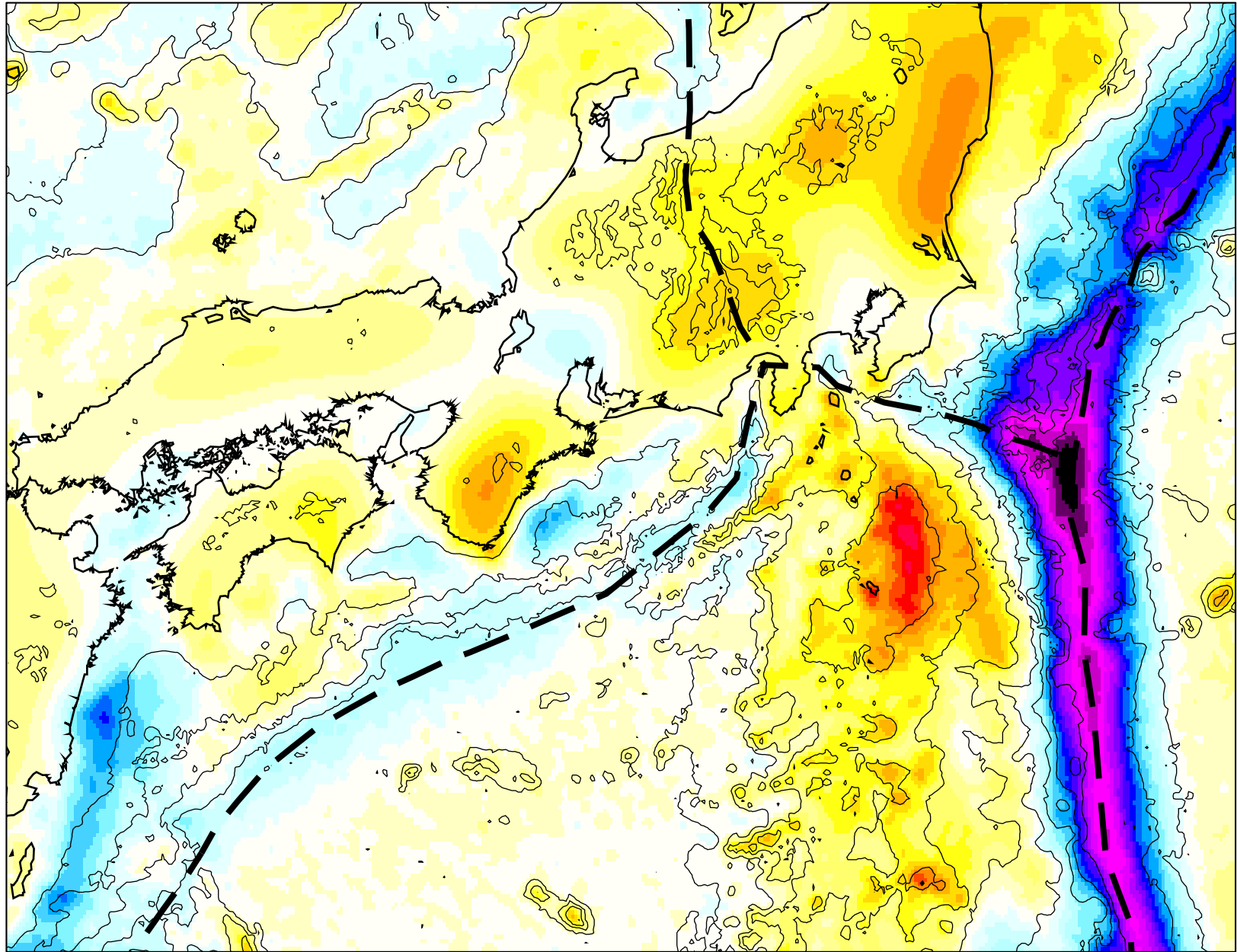
重力平衡(アイソスター)からのずれを表す

地形



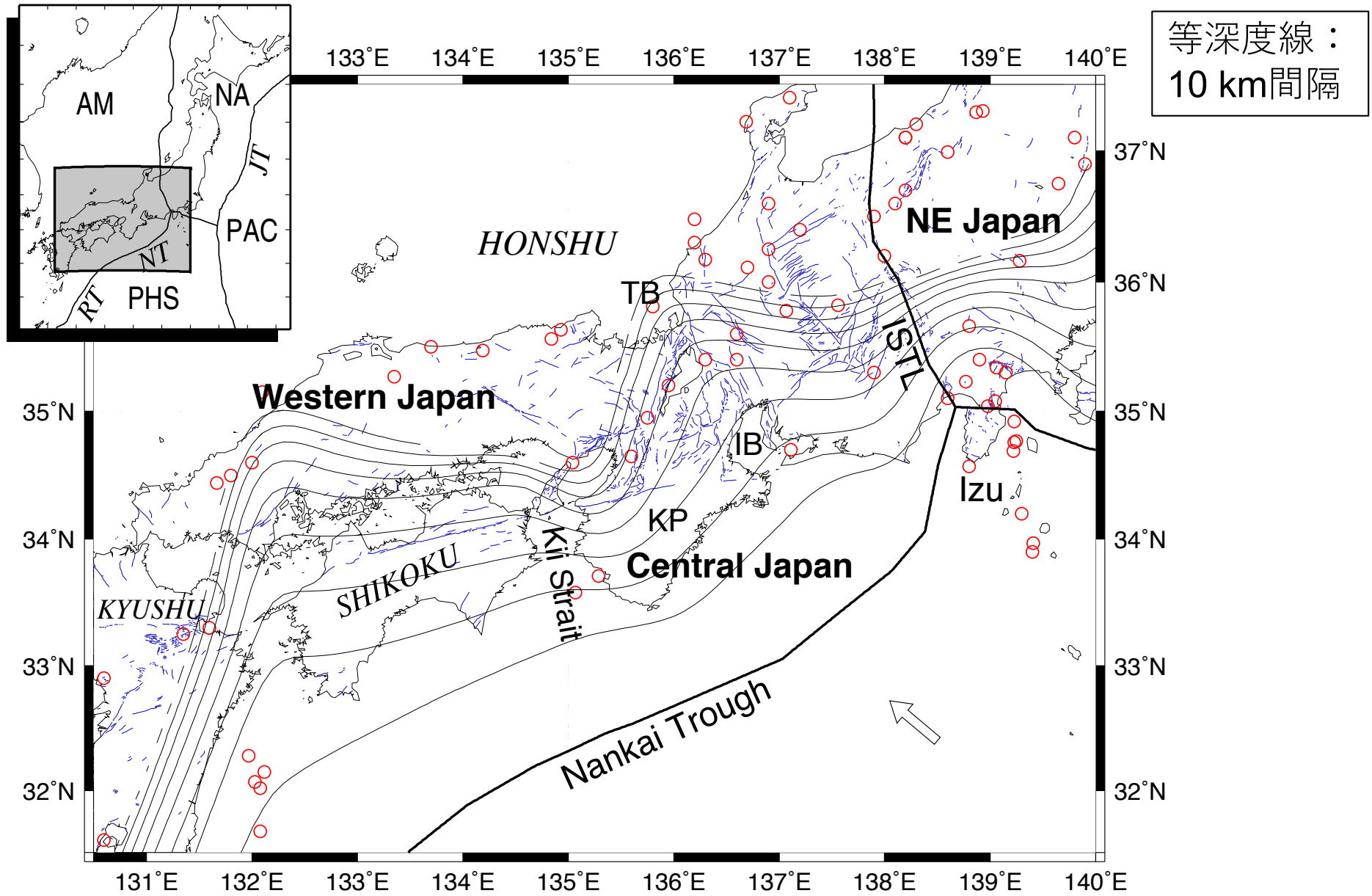
データ : Sandwell & Smith (1997)

重力異常(フリーエア)



データ : Sandwell & Smith (1997)

フィリピン海スラブの形状 (CAMP Model: Hashimoto et al. 2004)



after Fukahata (2019)

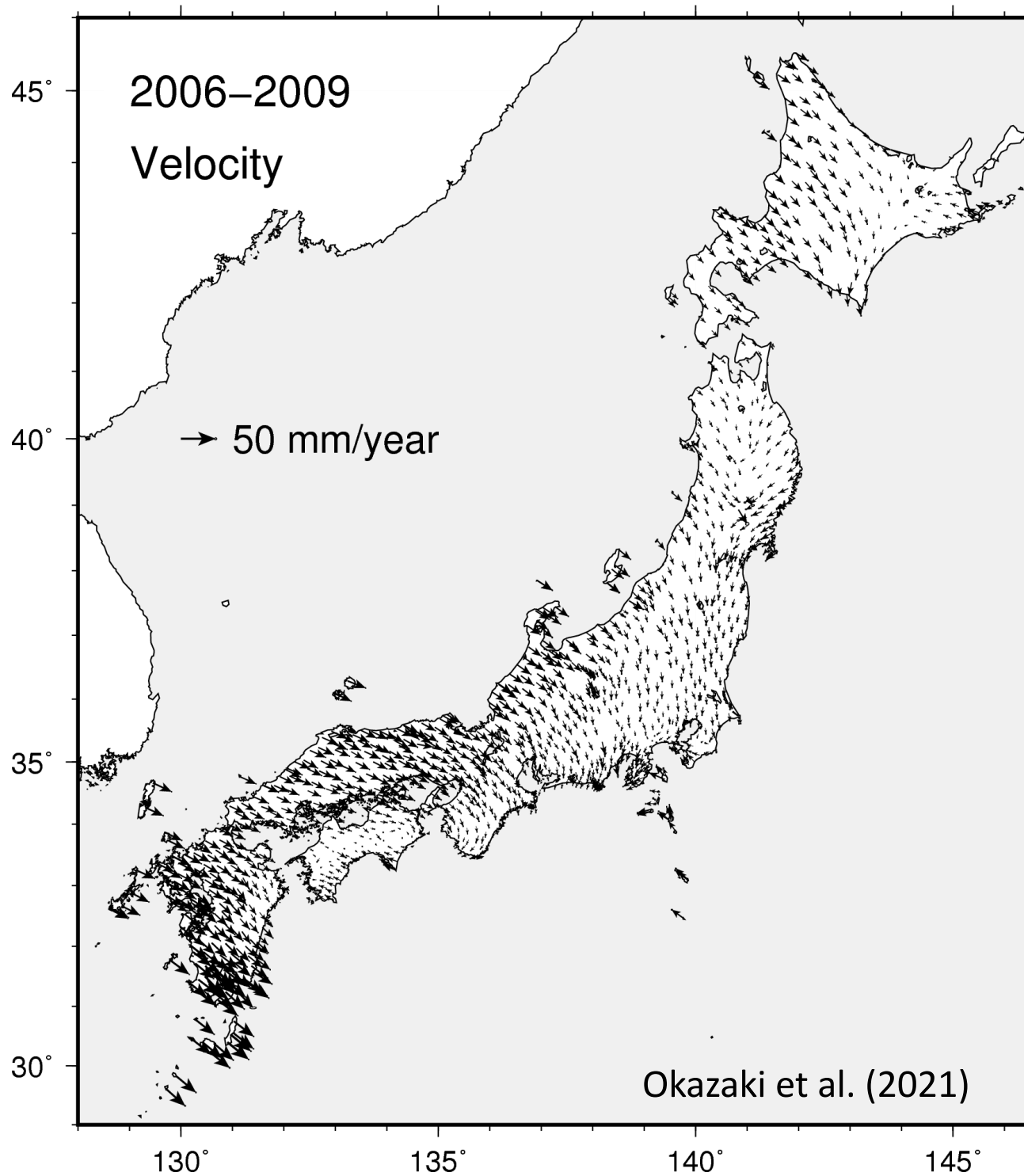
沈み込み帯の変位の食い違いモデルは、
島弧の隆起、海溝の沈降など、
島弧－海溝系に**共通する特徴**を
非常にうまく説明する

しかし、**島弧の個性**（幅や高さの違いなど）の説明には不十分

測地 (GNSS)
データ



変形場に変換



逆解析（インバージョン解析）の手法 (Fukahata et al. 1996) を応用

1. モデル変位速度場 u を基底関数 $\Phi_{j,x}(\mathbf{x})$ の重ね合わせで表現（基底関数展開）：
$$u_x(\mathbf{x}) = \sum_{j=1}^M a_{j,x} \Phi_{j,x}(\mathbf{x}) \quad (a: \text{展開係数})$$

2. 観測データ d とモデル場 u の関係（観測方程式）：

$$d_x(\mathbf{x}_i) = u_x(\mathbf{x}_i) + e_x(\mathbf{x}_i) = \sum_{j=1}^M a_{j,x} \Phi_{j,x}(\mathbf{x}_i) + e_x(\mathbf{x}_i) \quad \longrightarrow \quad \mathbf{d}_x - \mathbf{H}_x \mathbf{a}_x = \mathbf{e}_x$$

e : 誤差（残差） ベクトル・行列表記

3. 先験的情報（ベイズインバージョン）：平滑化の拘束条件

$$\int_X \left(\partial u / \partial x \right)^2 dx = \mathbf{a}^T \mathbf{G} \mathbf{a} \quad : \text{変位速度場の2階微分の総和が小さくなるべき}$$

残差二乗和

ABIC最小

平滑化条件

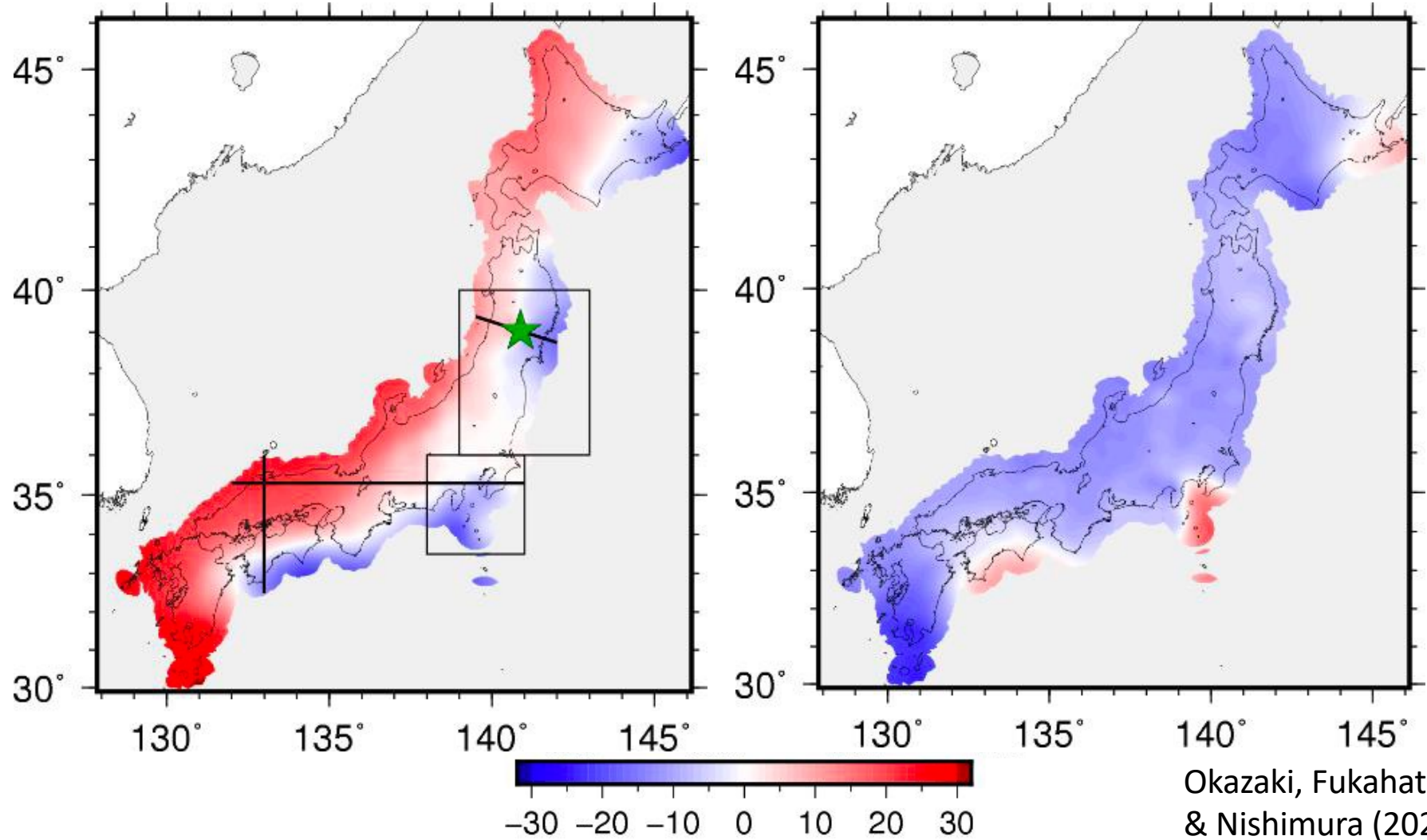
$$\text{評価関数} : s(\mathbf{m}; \alpha^2) = (\mathbf{d} - \mathbf{H}\mathbf{a})^T (\mathbf{d} - \mathbf{H}\mathbf{a}) + \alpha^2 \mathbf{a}^T \mathbf{G} \mathbf{a}$$

両者の重み α^2 を ABIC 最小の規準 (周辺尤度最大化; Akaike 1980) で決めた後, 評価関数を最小化することで展開係数 a を求める

変位速度場

東向き速度

北向き速度



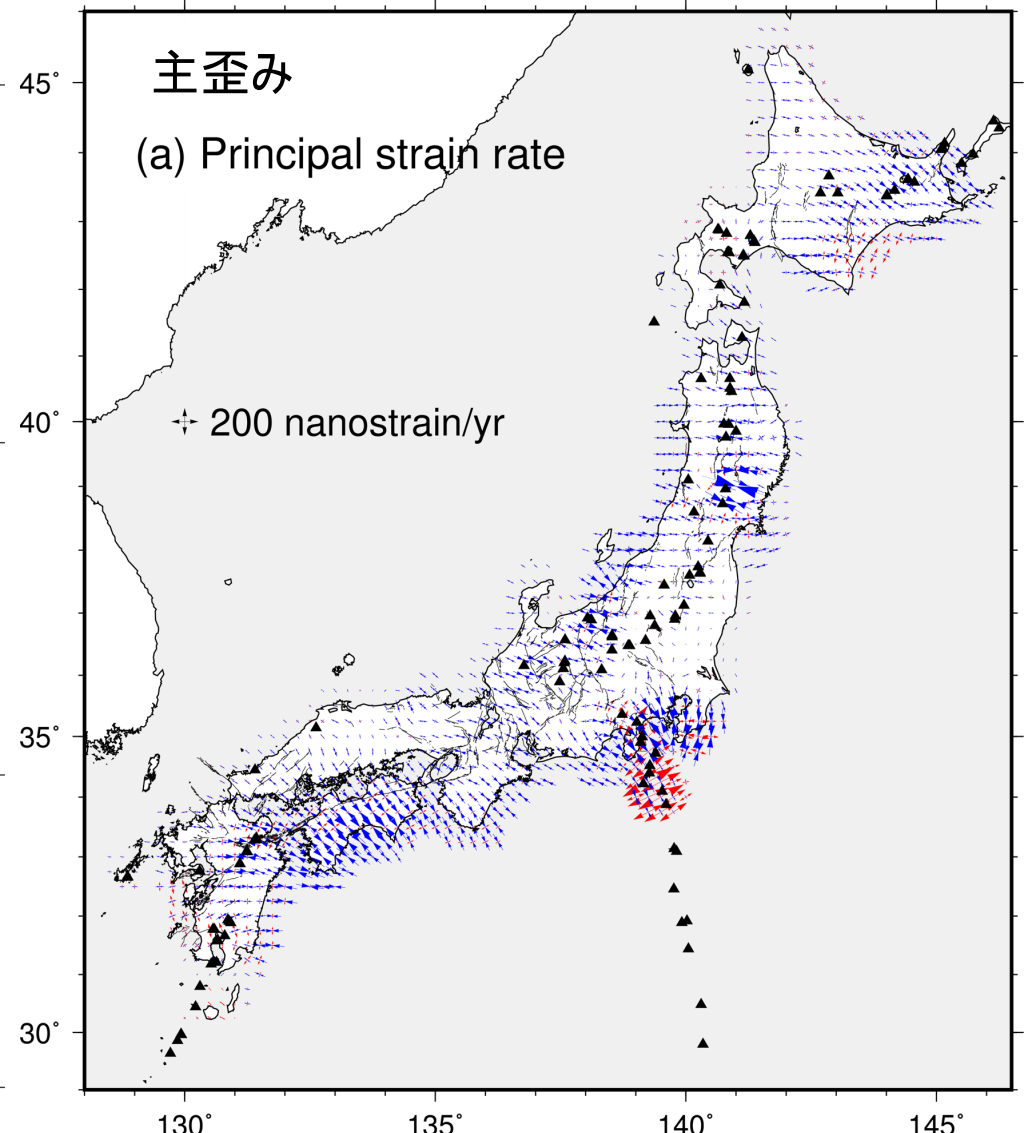
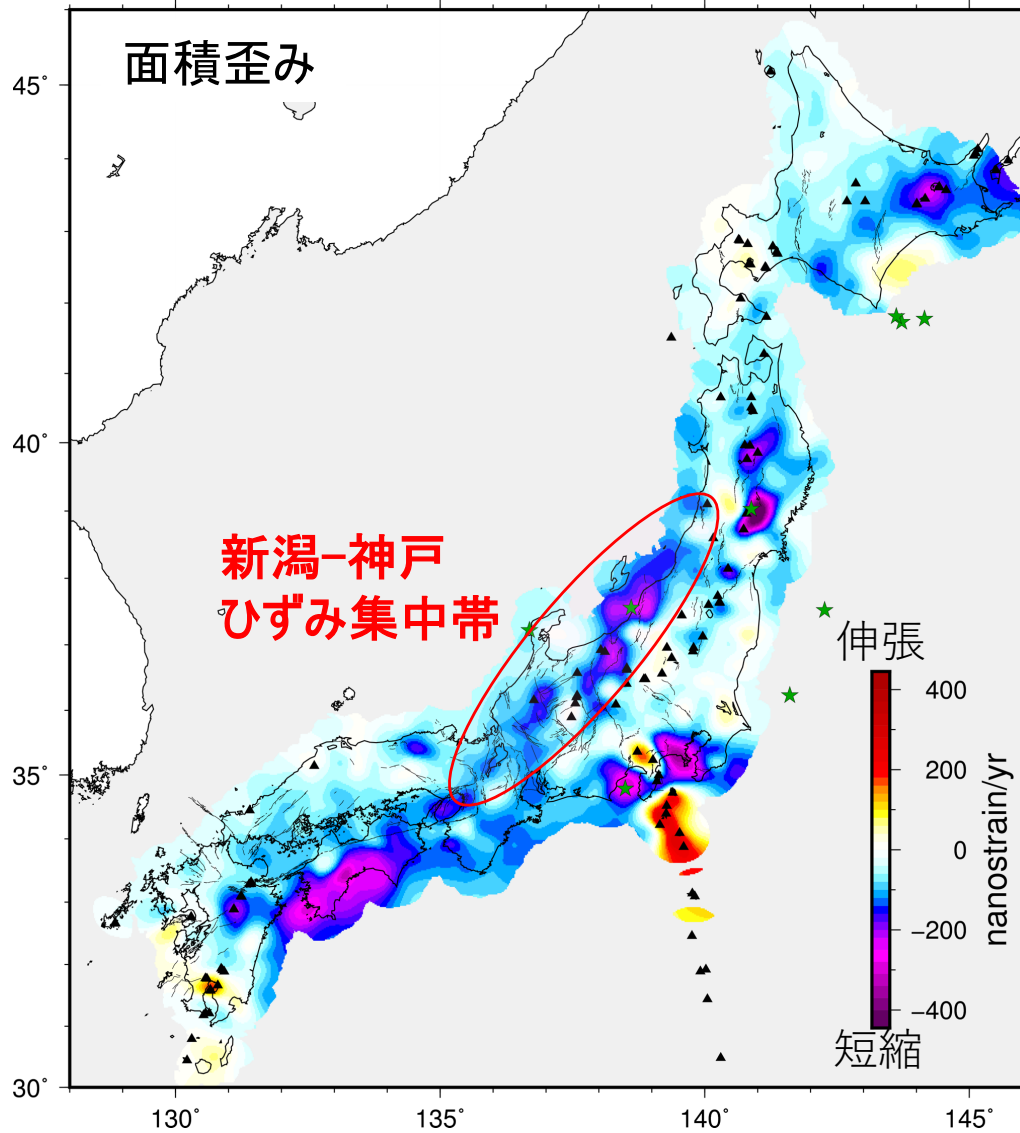
Okazaki, Fukahata
& Nishimura (2021)

並進成分は変形に寄与しない

色が大きく変わるところに変形（歪み）が集中

日本列島の歪み速度場

期間: 2006年1月~2009年12月



本州では東西圧縮が卓越

Okazaki, Fukahata
& Nishimura (2021)

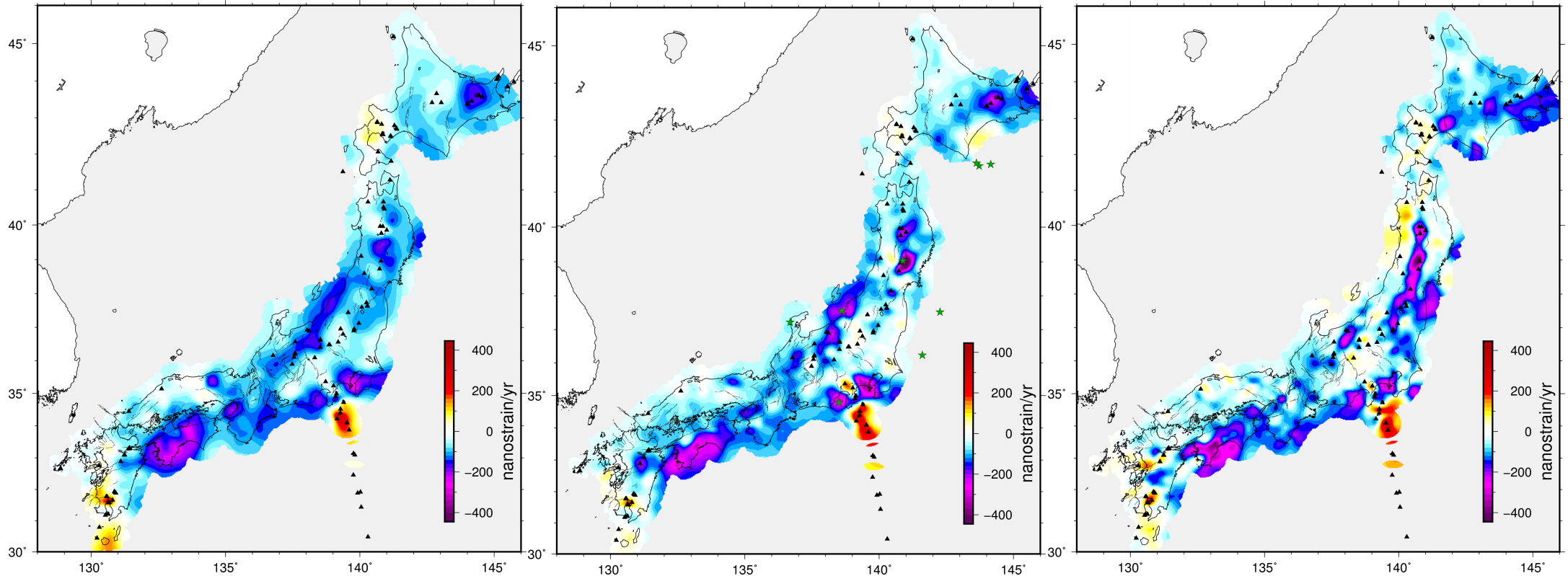
3つの期間の面積歪み速度場

深畑ほか (2022, 地学雑誌)

1997.1 – 1999.12

2006.1 – 2009.12

2017.10 – 2020.9



- ・時間的には概ね定常. 但し, 大地震域, 火山周辺を除く.
- ・空間的には大きな変化. 但し, 特定の地域 (ex. 新潟神戸歪み集中帯) のみに局在しない

プレート境界は日本列島のどこを通るか？

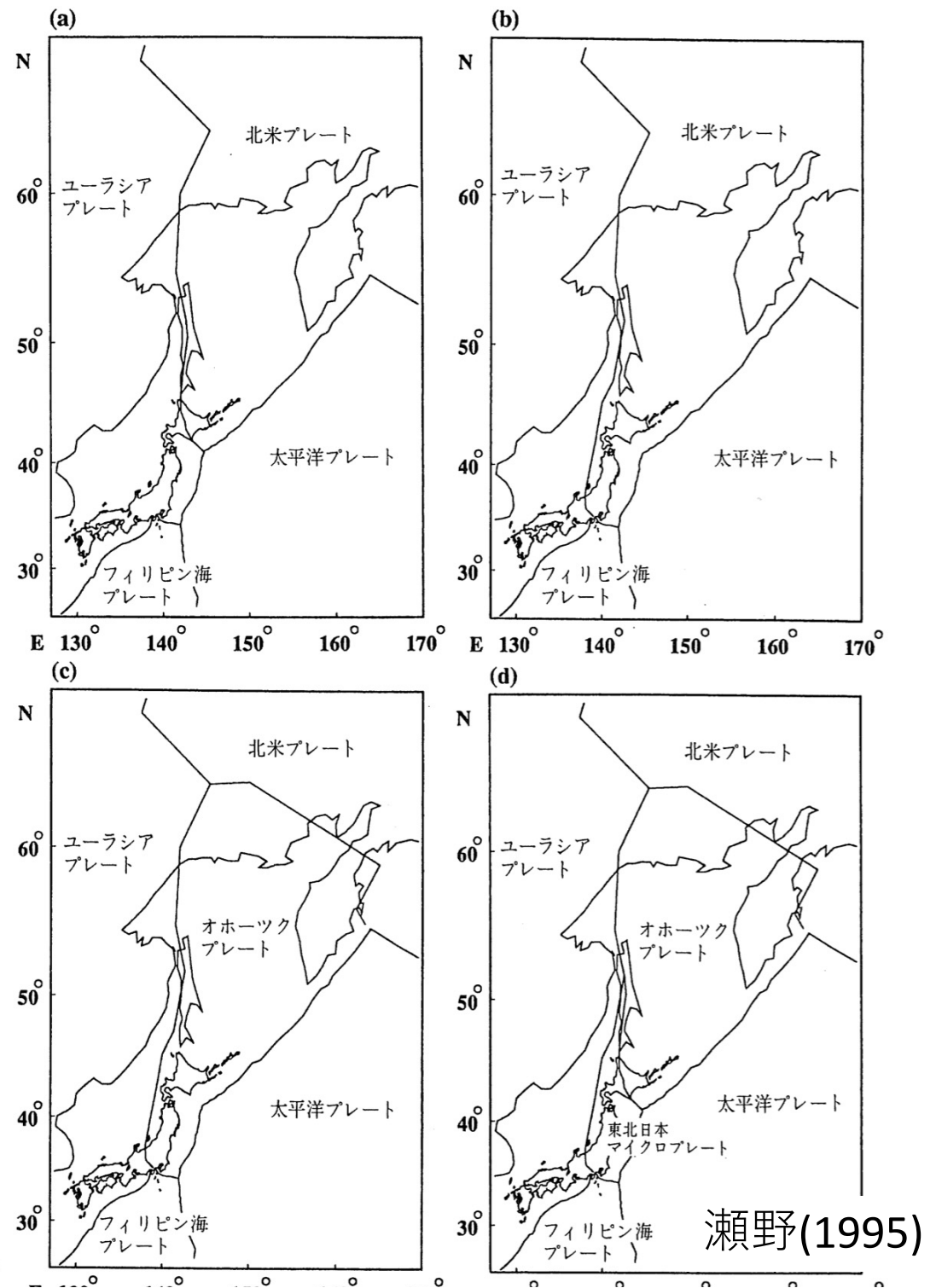
- 日高山脈
- 日本海東縁
- 新潟神戸歪み集中帯 など

変動帯では、変形が極端には局在しない（剛体近似が不適當）

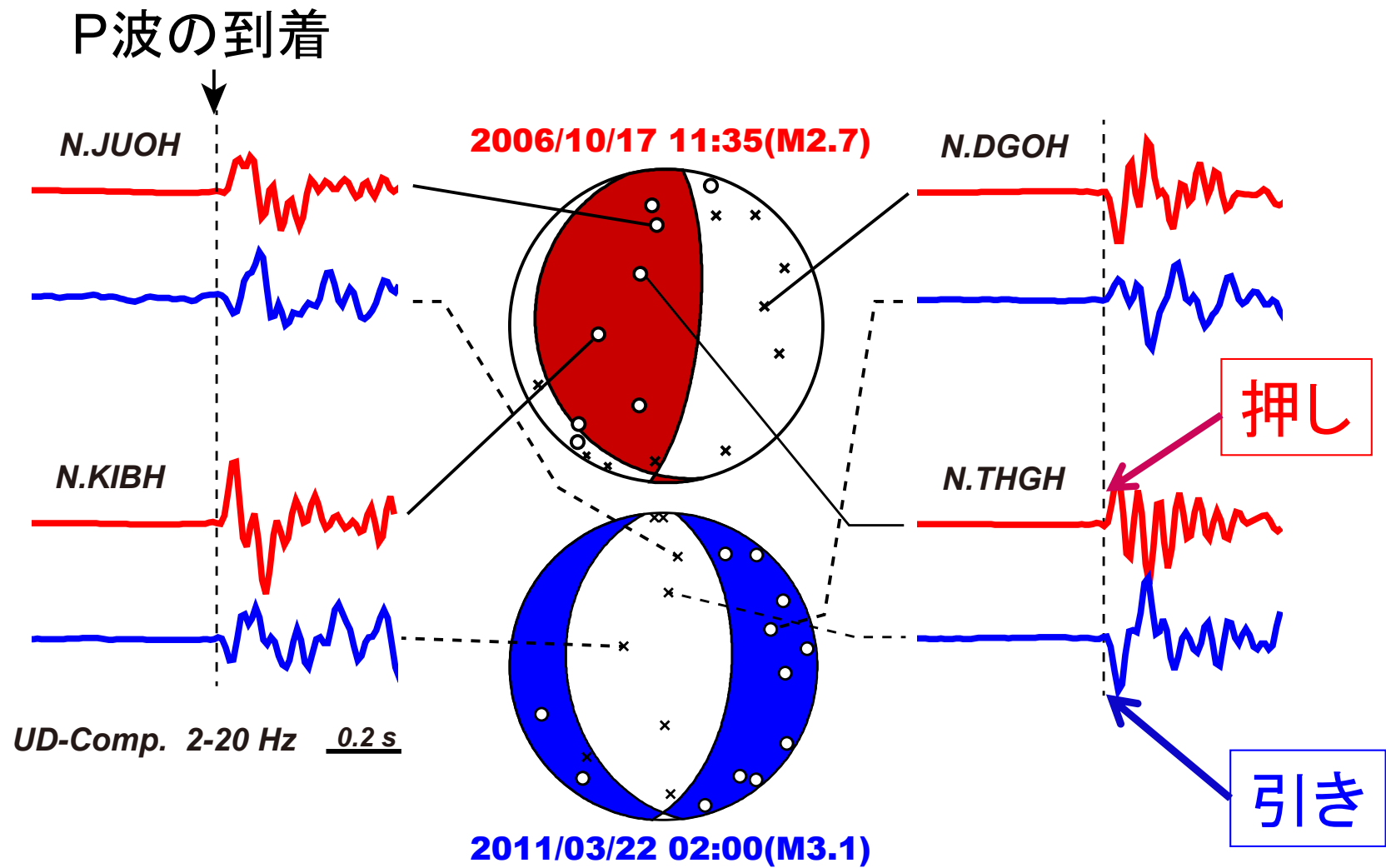


プレート境界を1本の線で表すことは不適切

プレートテクトニクスの限界



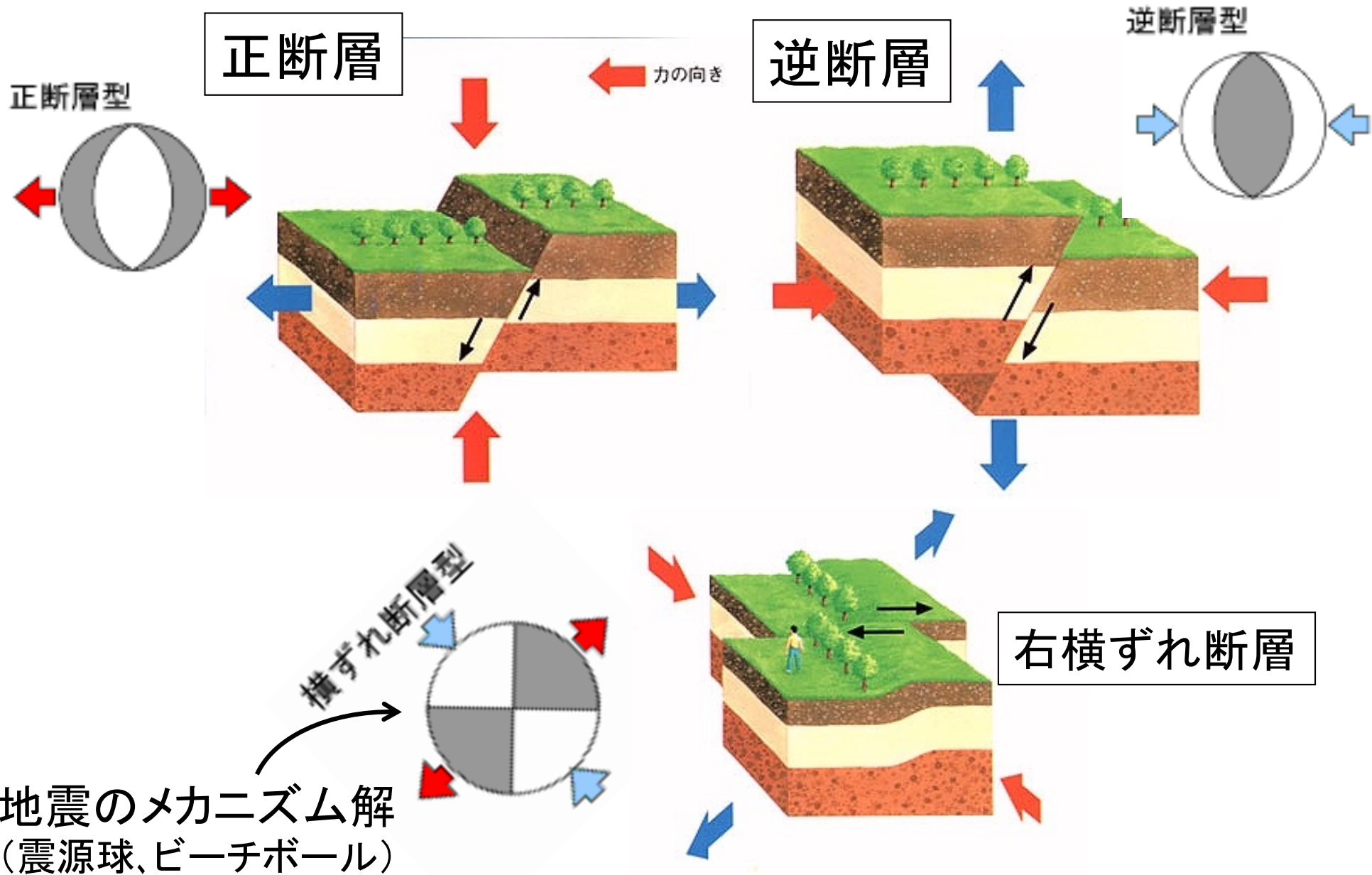
地震波からの情報



Kato et al., (2011)に加筆

地震のメカニズム解

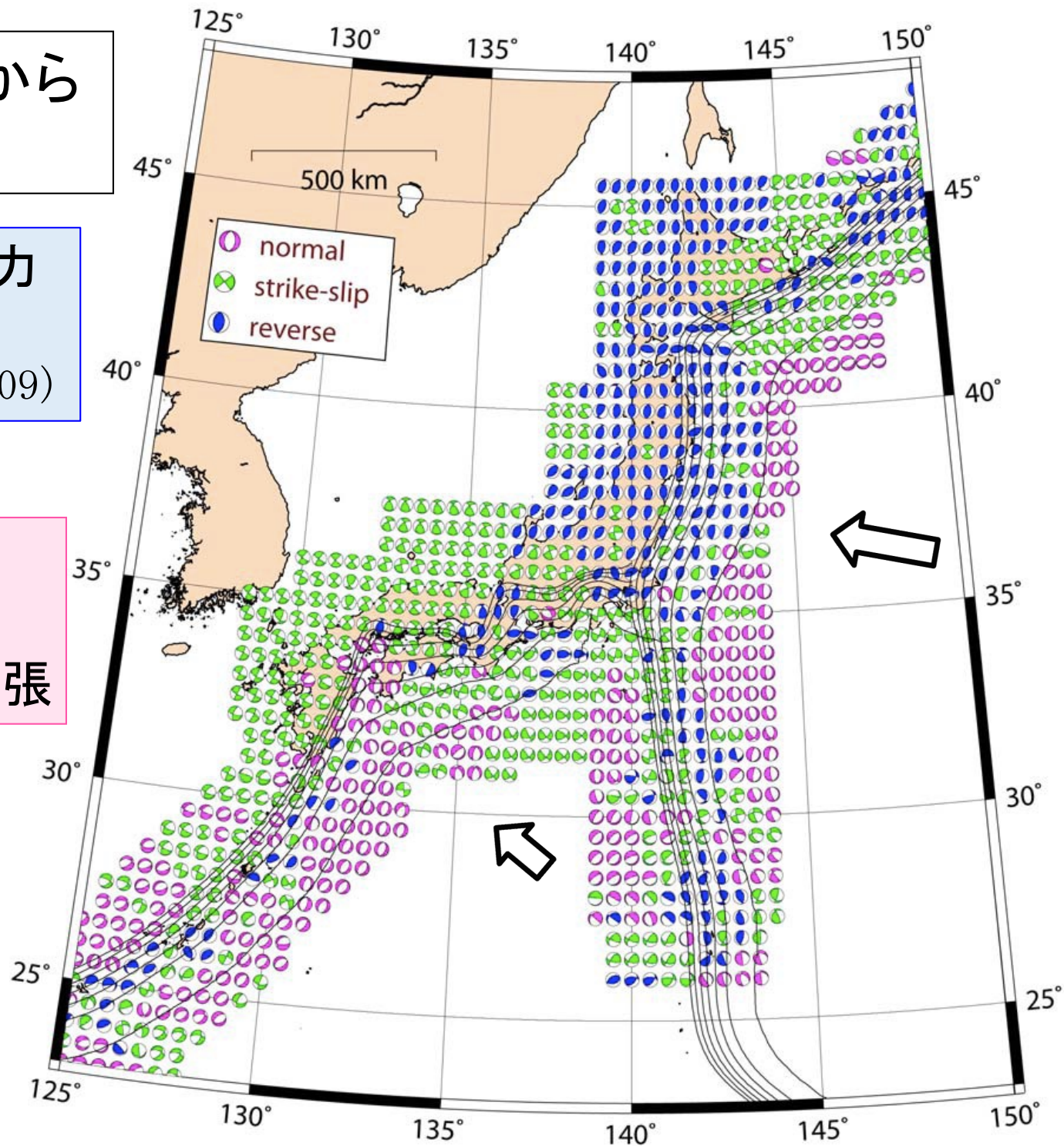
地震発生に関わる力を図示



地震のメカニズムから 推定される応力場

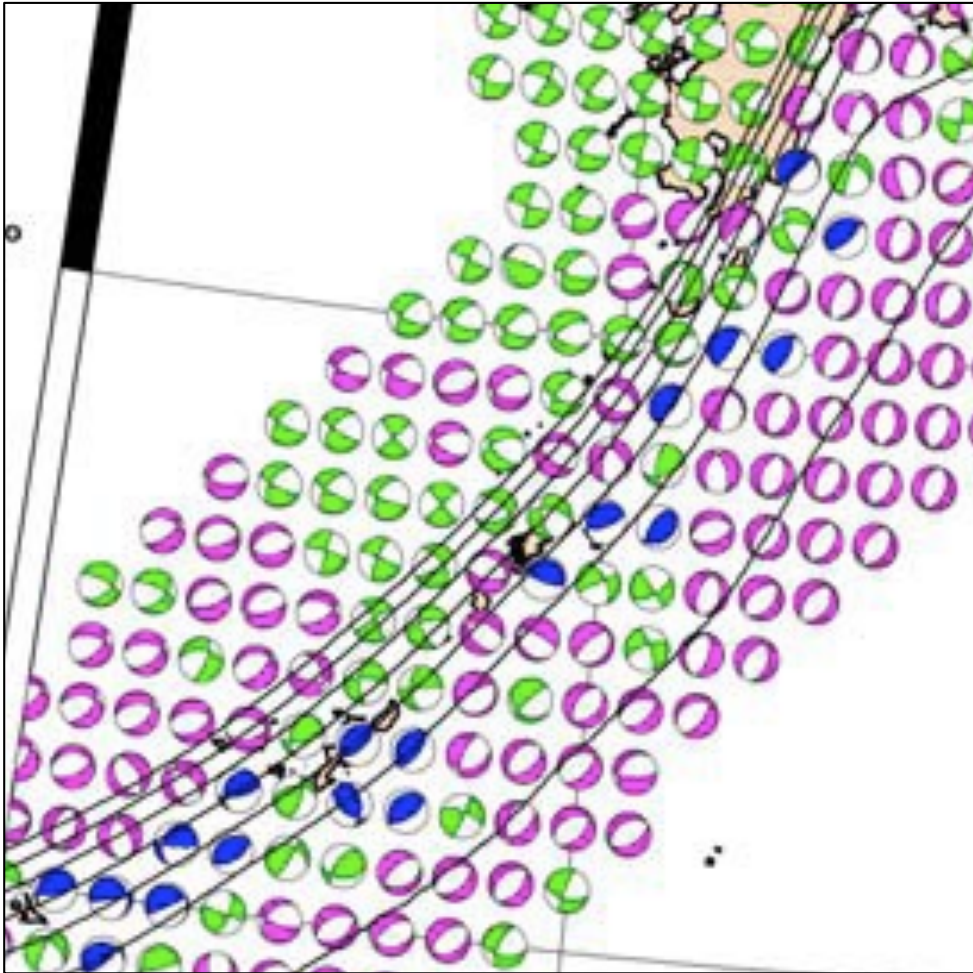
地震による応力
解放パターン
(寺川・松浦, 2009)

本州は東西圧縮
一方、
伊豆・南西諸島は伸張

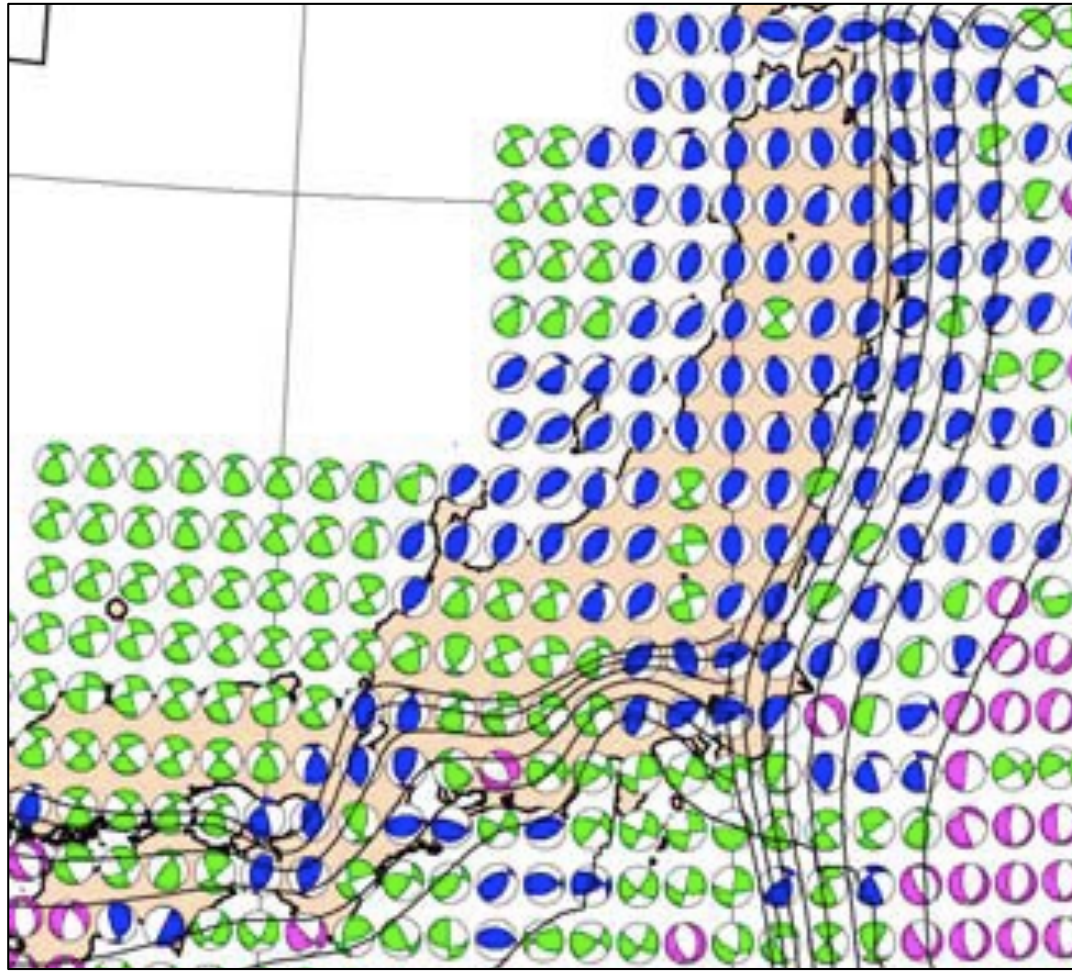


地震のメカニズムから推定される応力場

南西諸島：南北引張



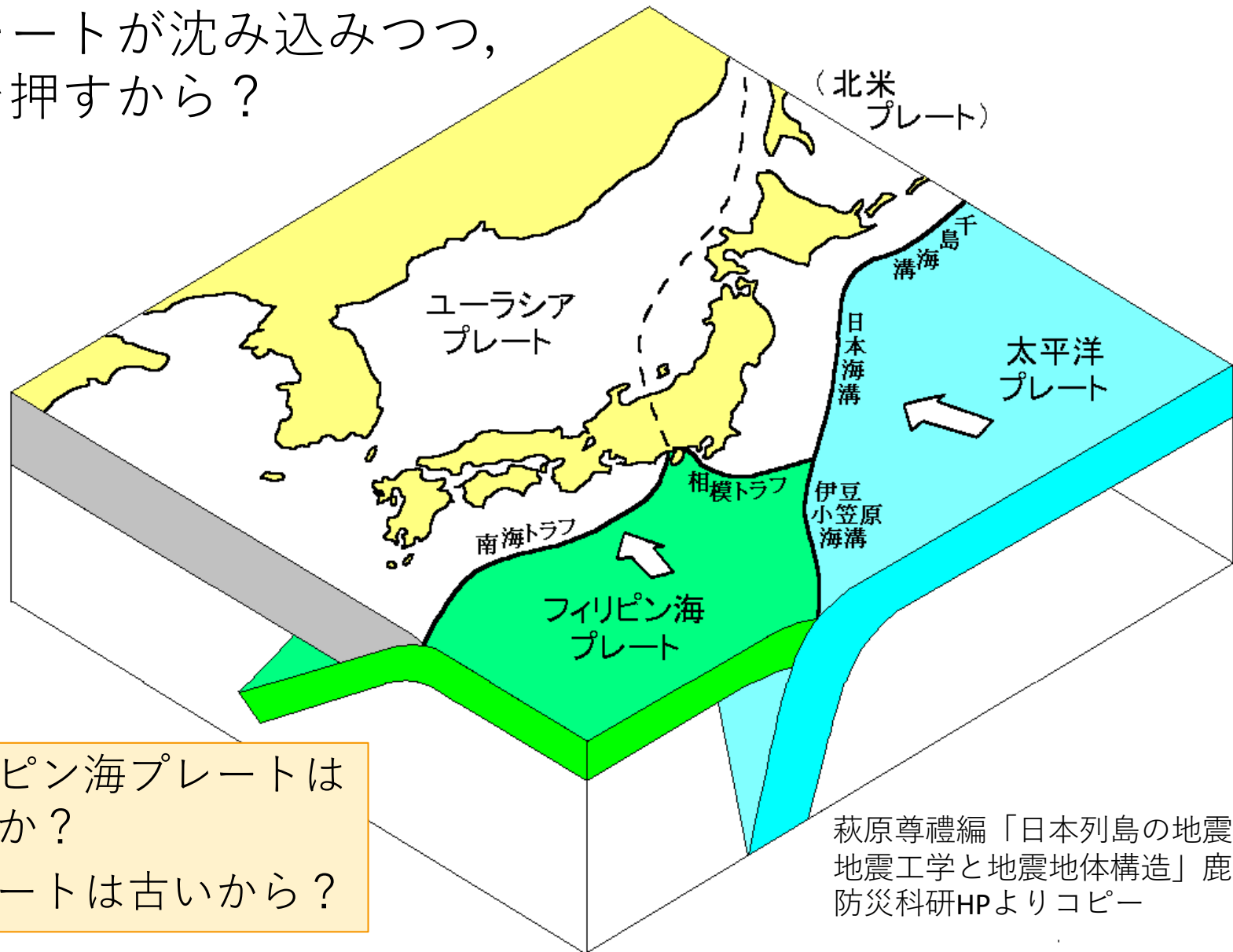
本州：東西圧縮



(寺川・松浦, 2009)

なぜ東西圧縮となるのか？

太平洋プレートが沈み込みつつ、
日本列島を押しやるから？



なぜフィリピン海プレートは
押さないのか？
太平洋プレートは古いから？

萩原尊禮編「日本列島の地震、
地震工学と地震地体構造」鹿島出版会
防災科研HPよりコピー

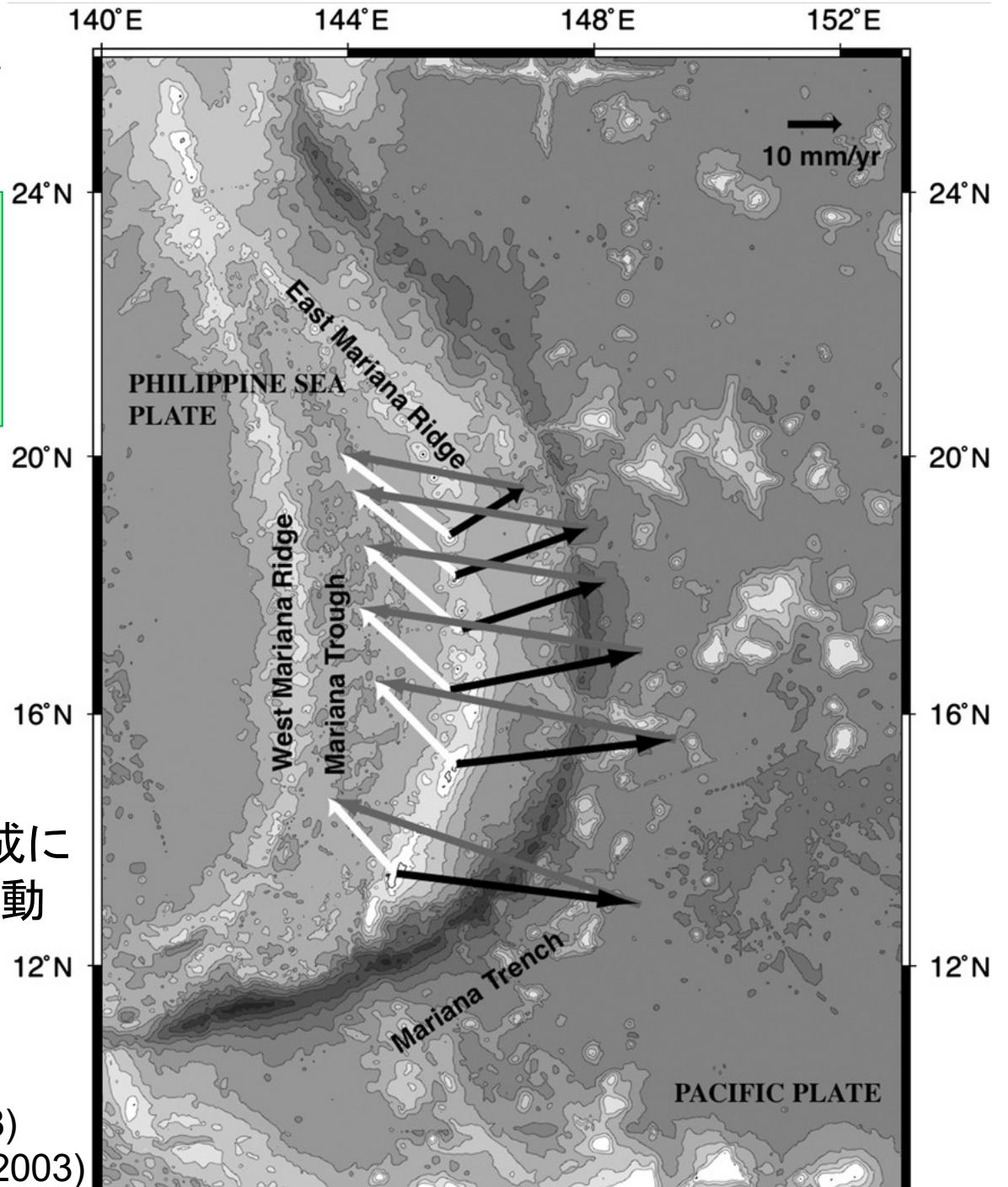
古い太平洋プレートが沈み込む所で地殻が伸張

マリアナトラフの拡大：
マリアナ諸島の背後に海洋底
(縁海)ができつつある

沖縄トラフ(琉球海溝の背後)
でも拡大が進行中

黒矢印：縁海の形成に
伴うマリアナ弧の運動

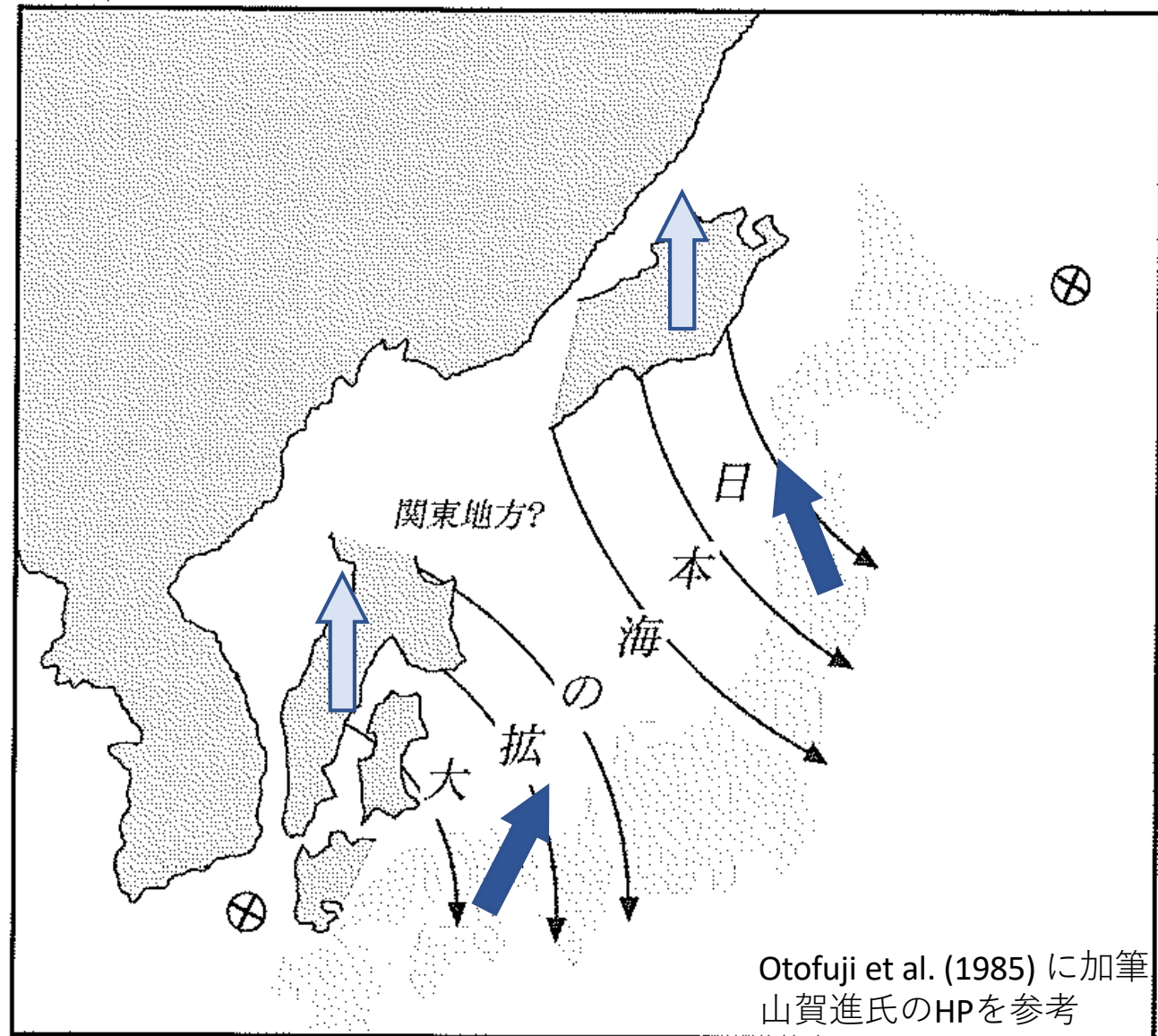
Hashima et al. (2008)
データはKato et al. (2003)



日本海の形成（約2000～1500万年前）

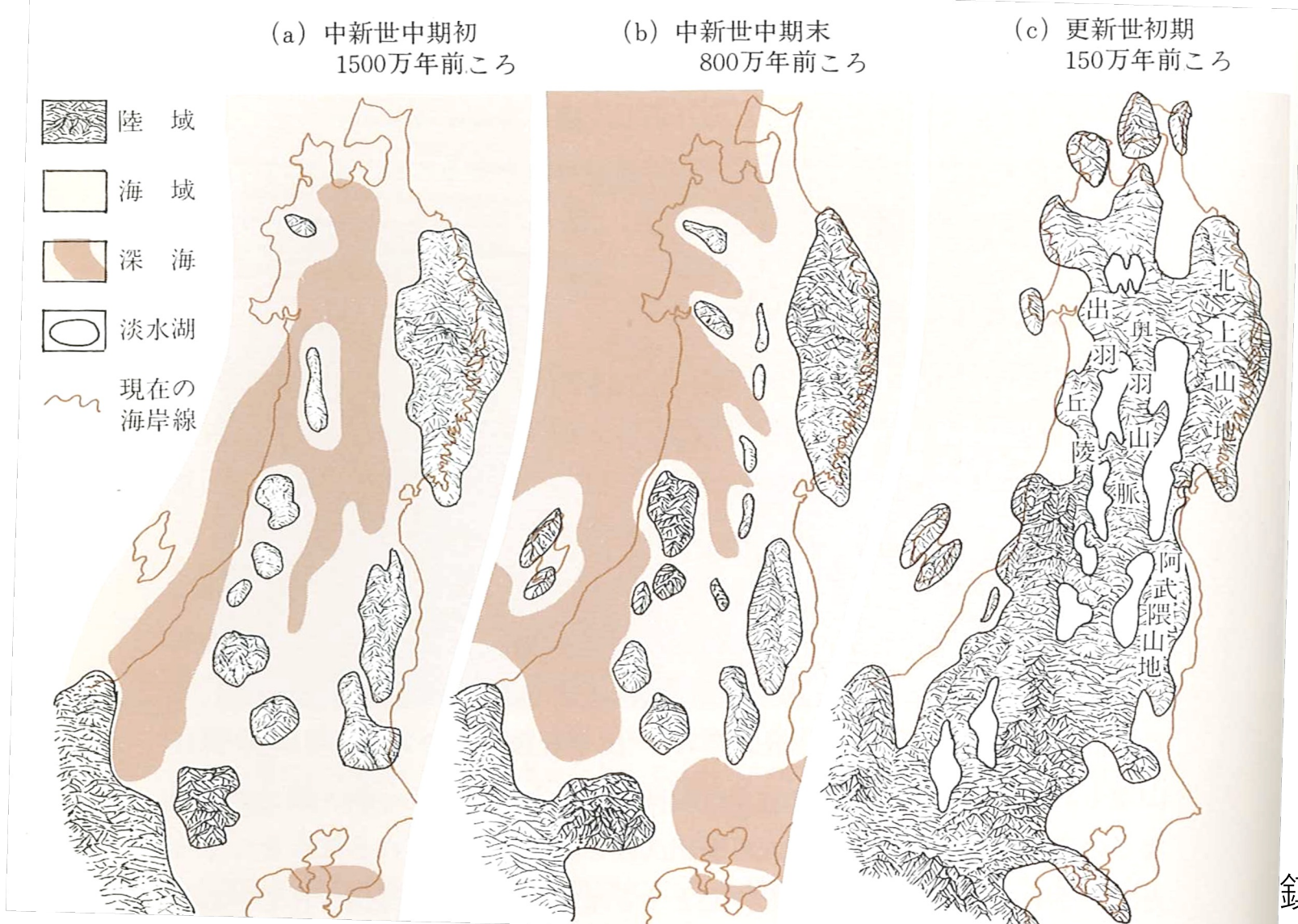
日本海観音開き
モデル

当時は**強伸張場**



古地磁気データ(昔の北の方角を保存)に基づく

東北日本はかつて伸張場だった。3百万年前頃 圧縮場に移行



1500 ~ 800万年前
弱伸張場

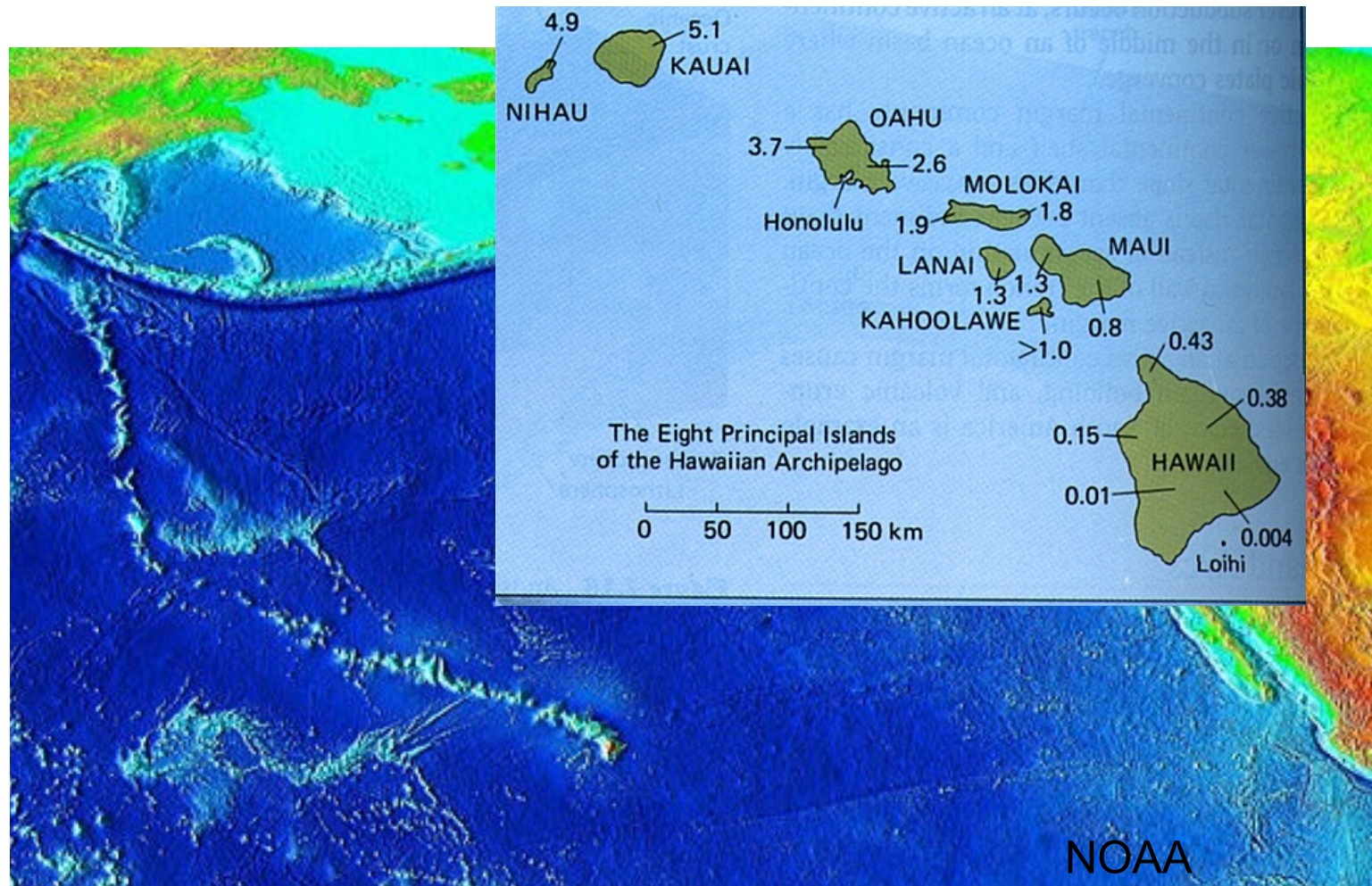
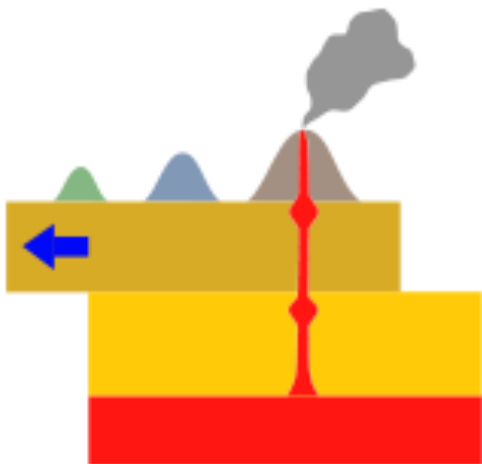
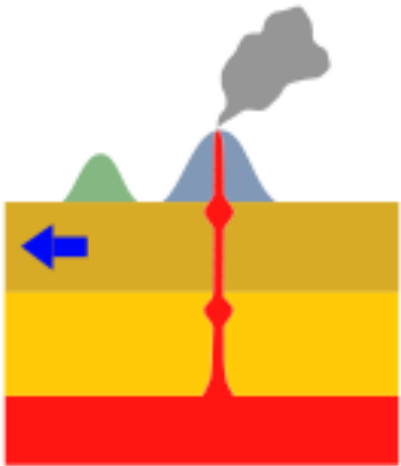
800 ~ 300万年前
弱圧縮場

300万年前以降
強圧縮場

鎮西(1995)

太平洋プレートの運動は、最近4300万年間ほぼ一定

ホットスポット のモデル

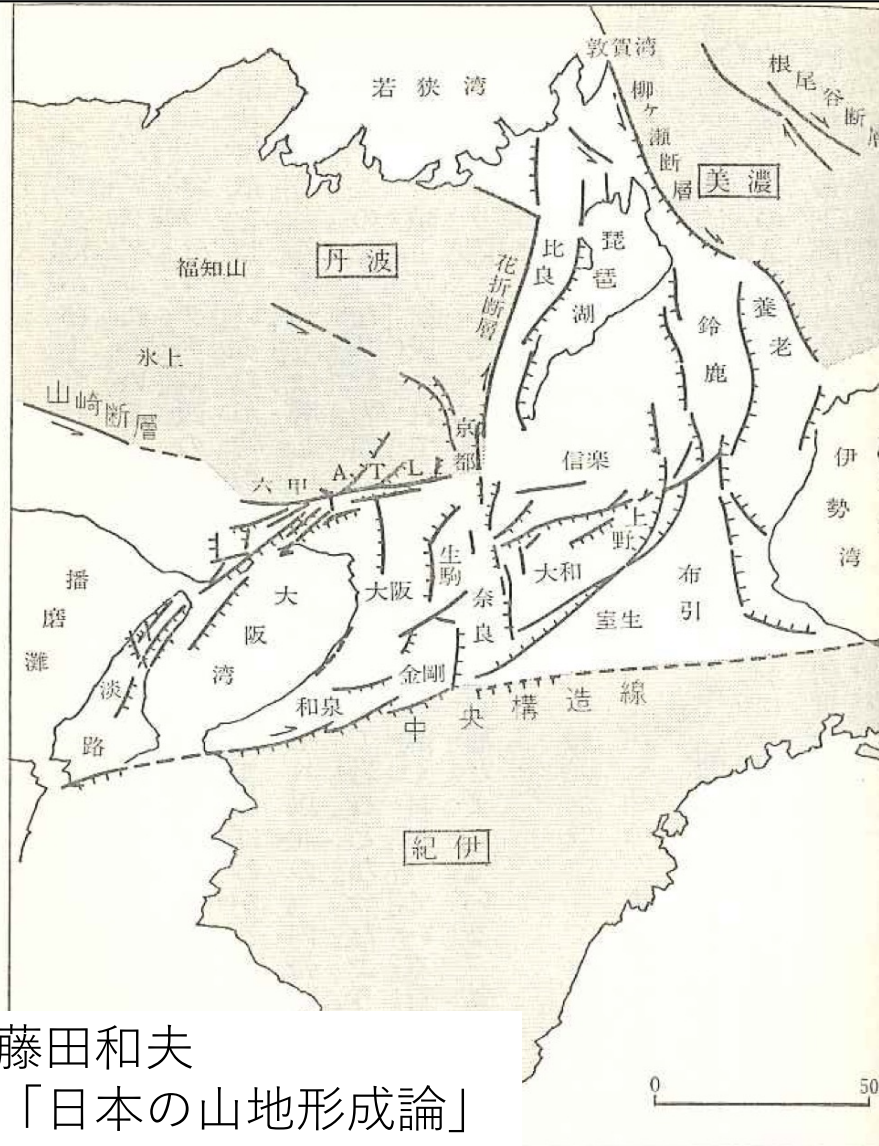


ホットスポット火山列(ハワイ海山列の例)

近畿地方も100~200万年前以降強い東西圧縮



山地群が逆断層で隆起

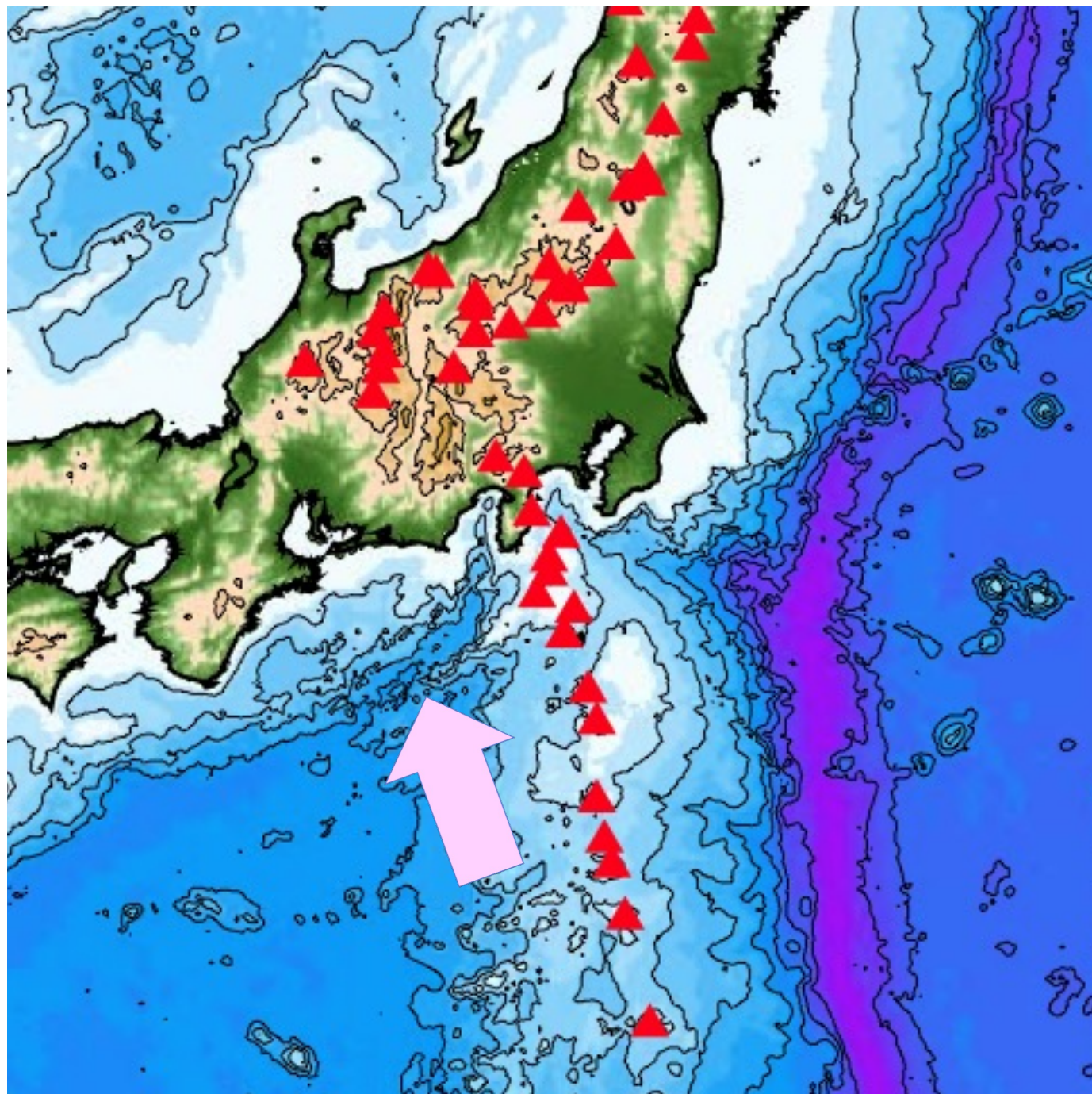


藤田和夫
「日本の山地形成論」

by 堤

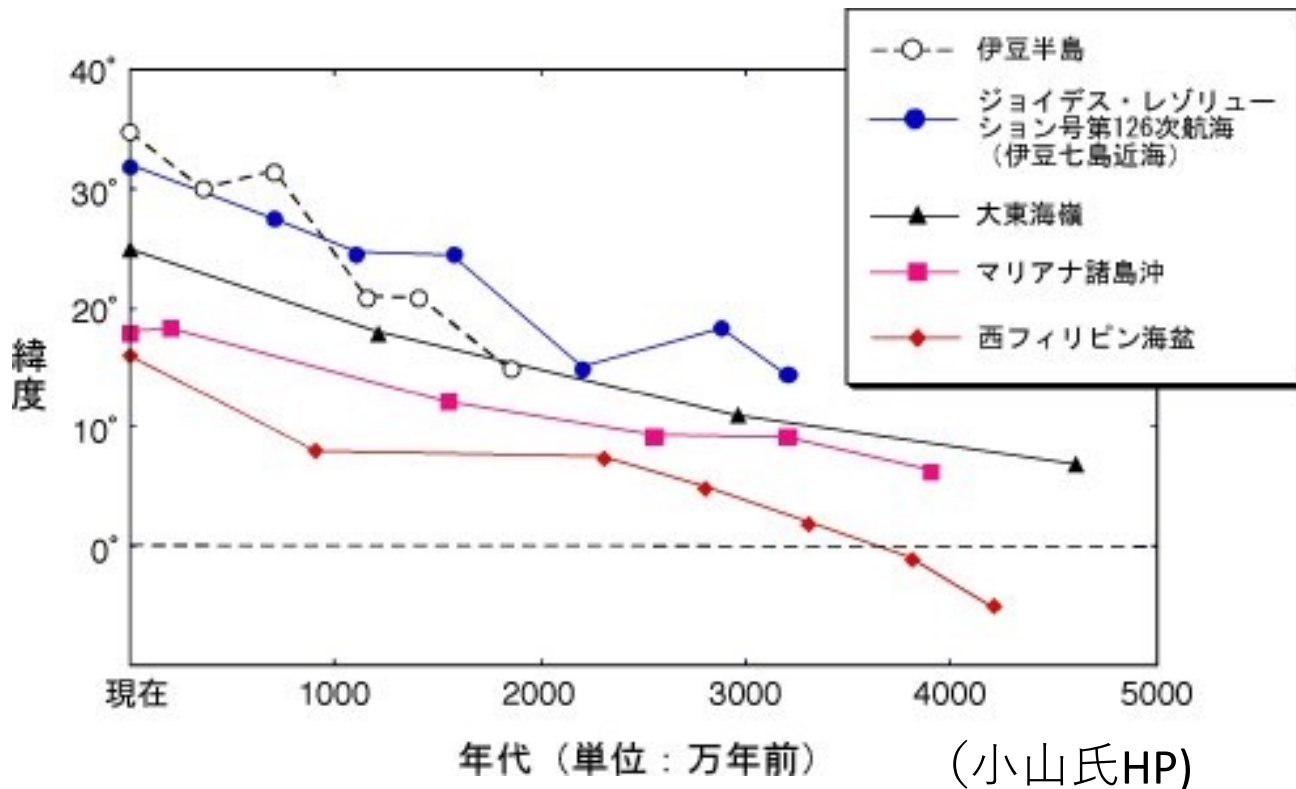
伊豆弧の 本州弧への衝突

伊豆弧を載せたフィリピン海プレートは、かつてほぼ北向きに運動していた

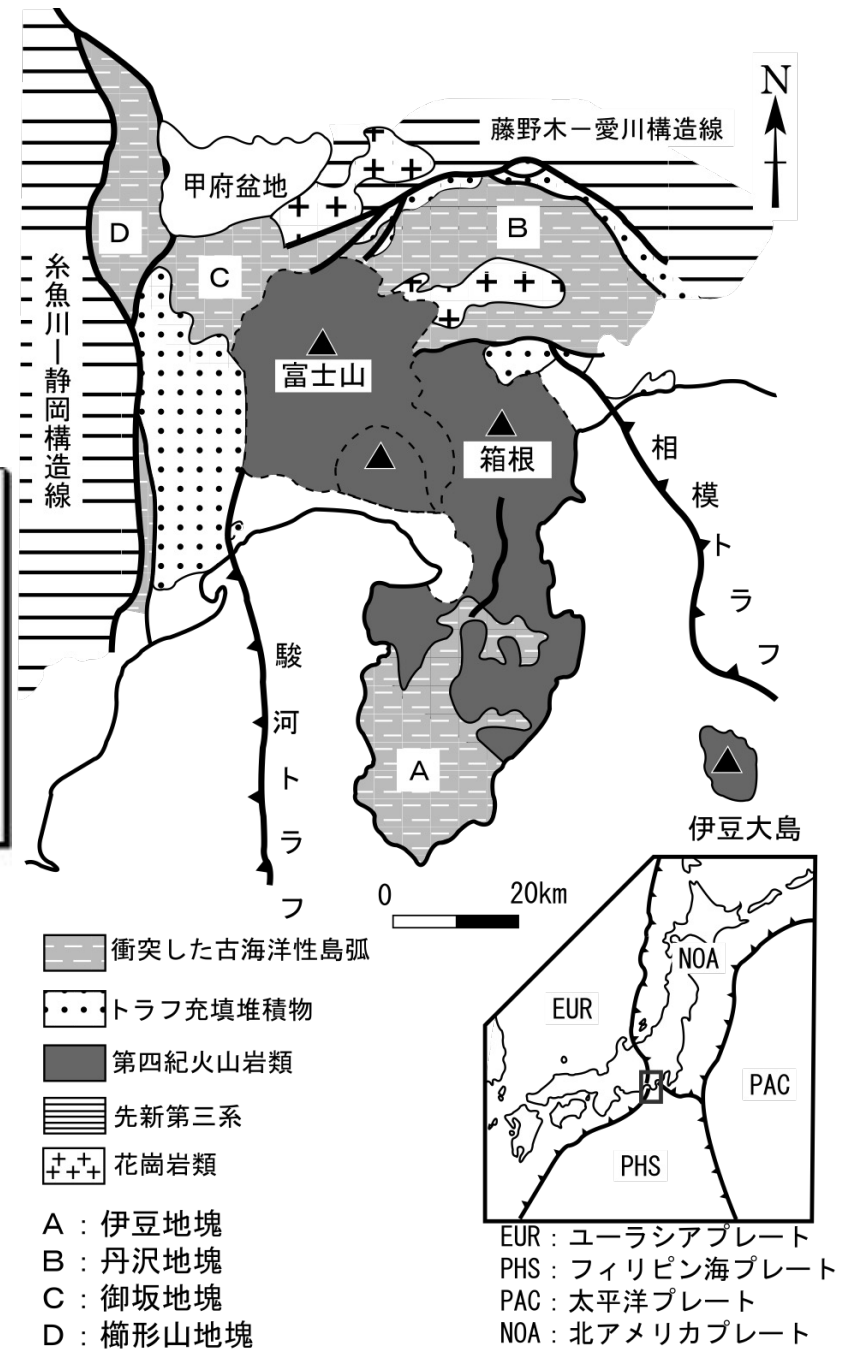


伊豆弧の北上により、
 櫛形山、御坂、丹沢、伊豆半島
 などが次々と衝突

古地磁気データによる古緯度の推定



しかし、フィリピン海プレートは、
 約3百万年前に北西へ運動方向を変化



天野他(2007)

フィリピン海プレートの北西への移動による圧縮場の形成

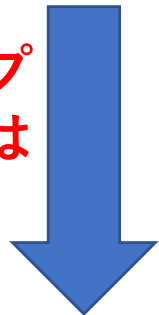
(高橋, 2006)

フィリピン海プレート
の運動方向が北から北
西に変化



伊豆・小笠原海溝
が西へ移動

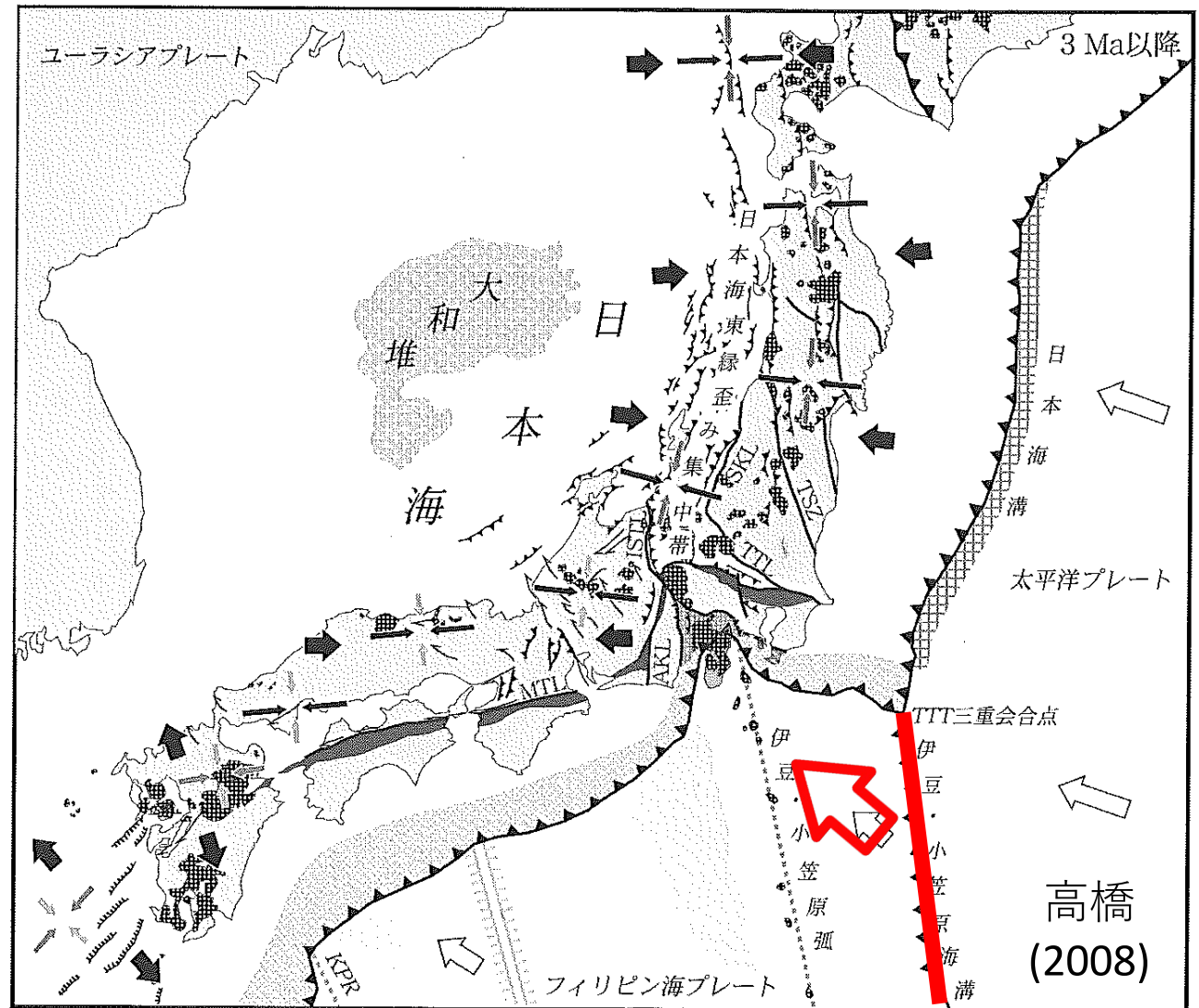
太平洋プ
レートは
連続



日本海溝も西へ移動



本州が東西圧縮

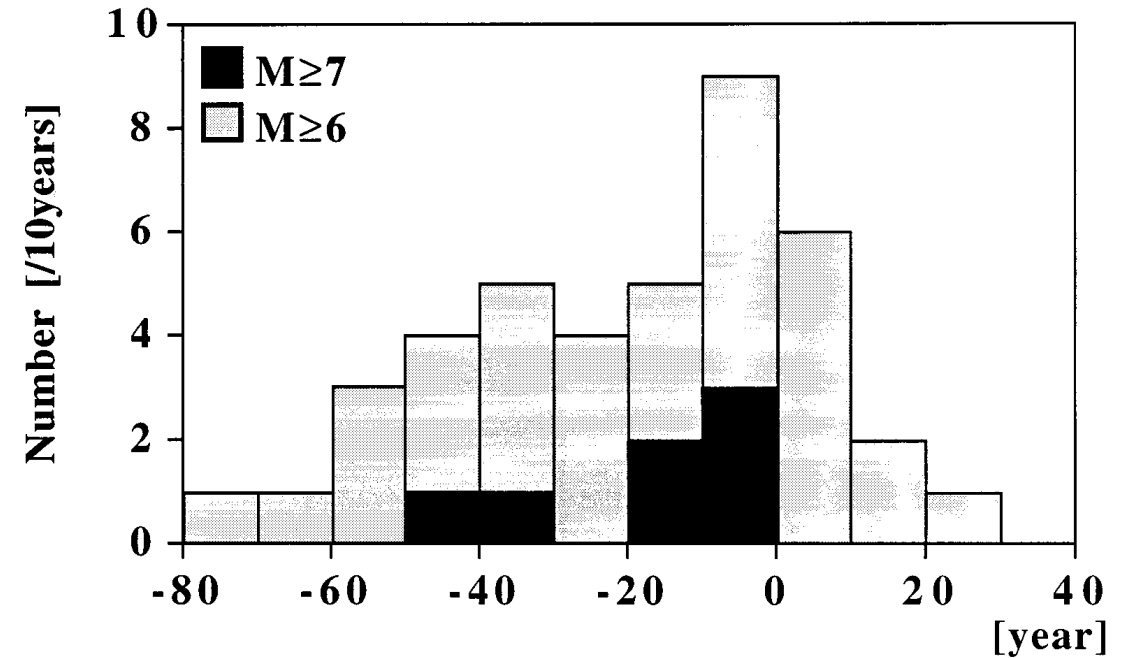
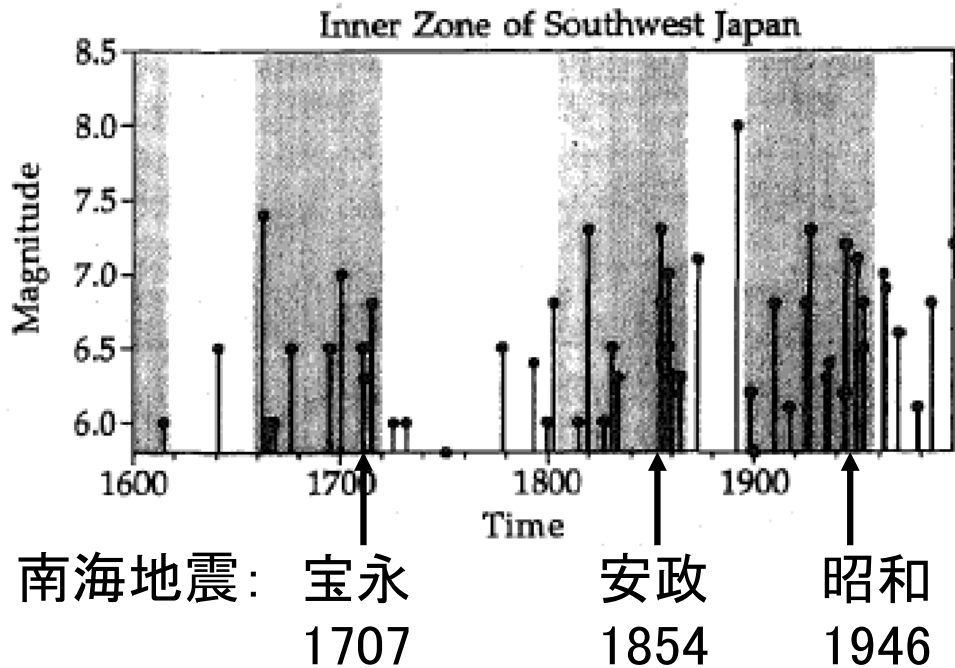




産業技術総合研究所
地質情報研究部門 高橋雅紀



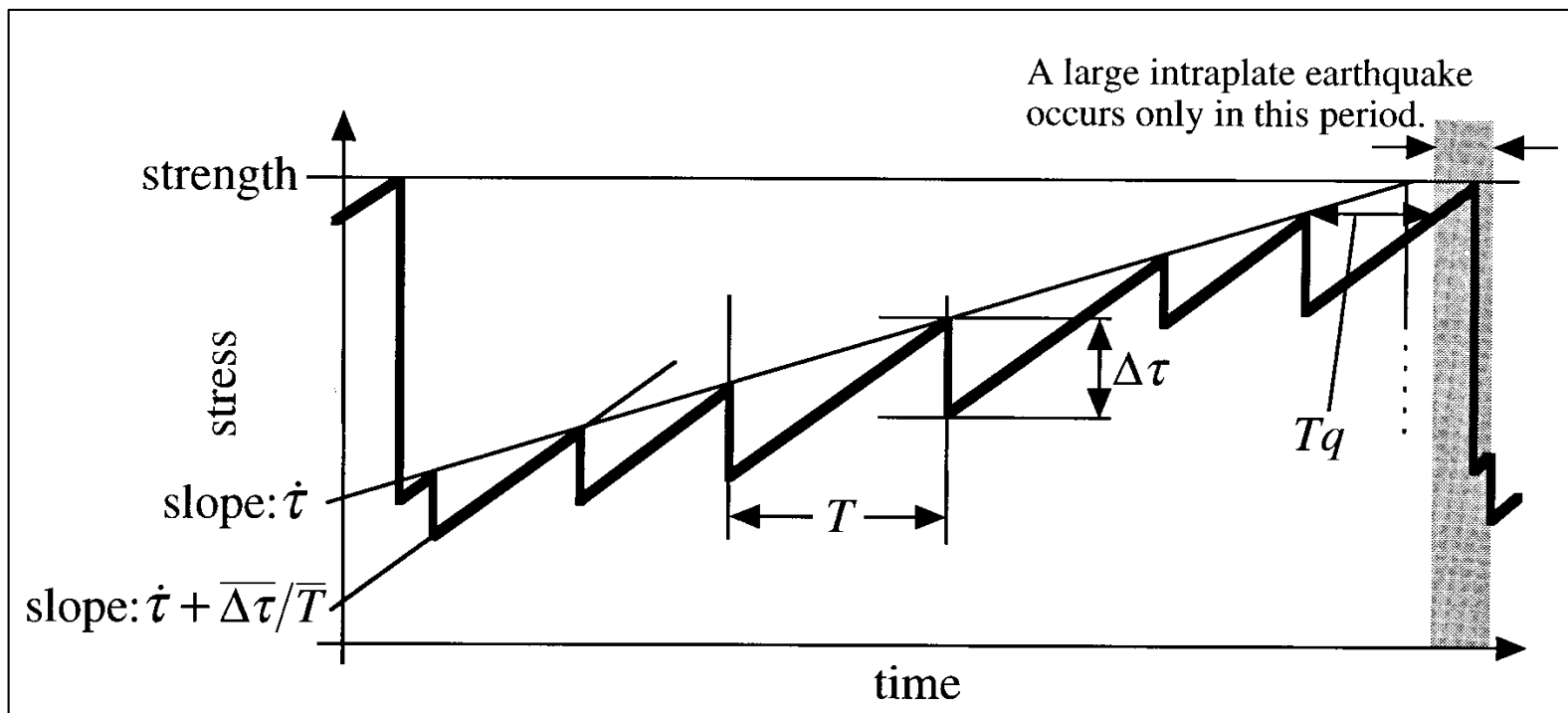
西日本の内陸大地震は、南海地震の前50年、後10年に頻発



(Hori & Oike, 1996, 1999)

西日本の内陸大地震の発生モデル

東西圧縮による定常的応力増加 + 南海地震による摂動



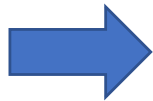
Hori & Oike (1999); Shimazaki (1978)

南海地震により応力が

減少 → 南海地震前 に大地震 (上図の例)

増加 → 南海地震後 に大地震

近畿地方では？



応力減少

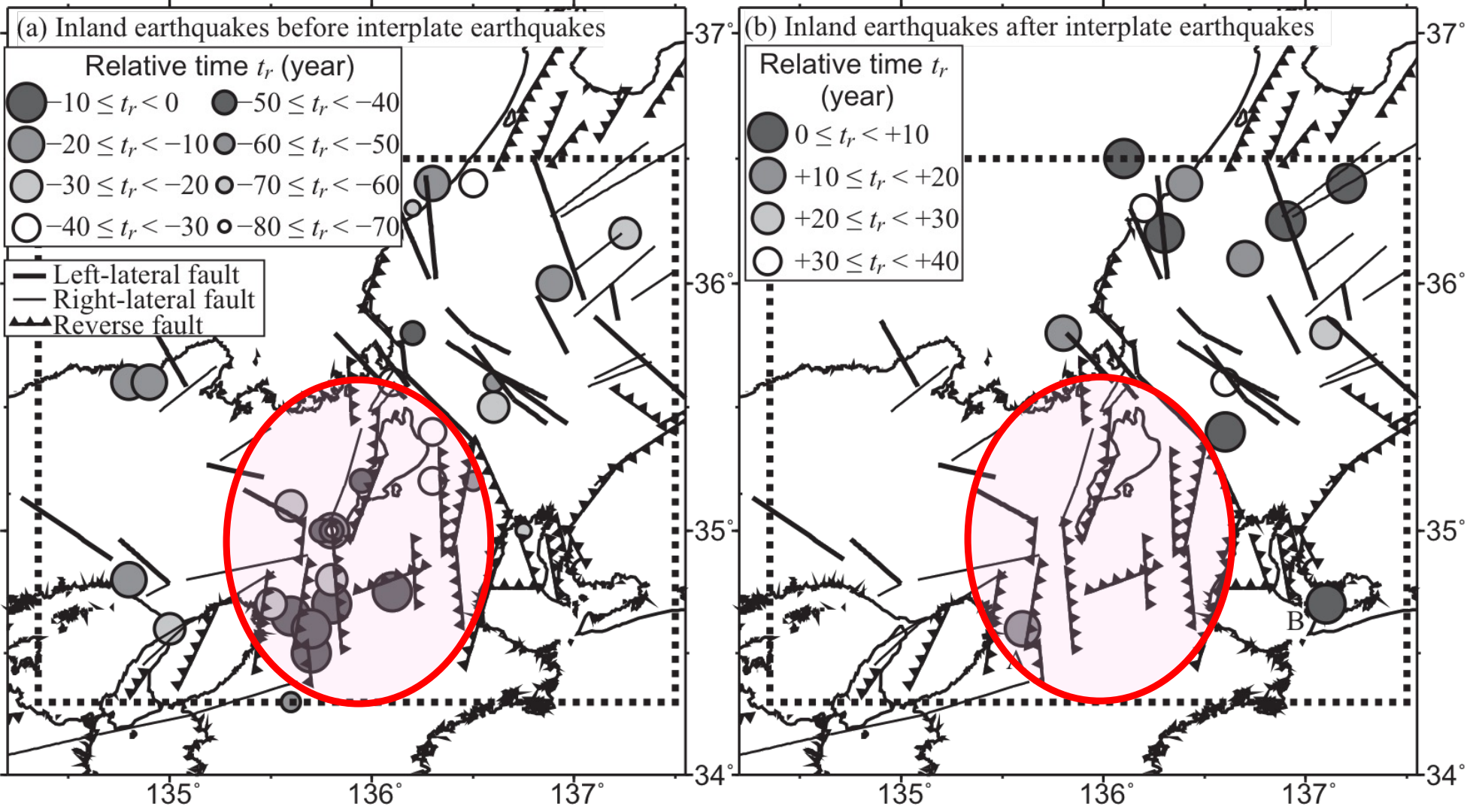
Shikakura, Fukahata & Hirahara (2014)

南海地震

<前>

<後>

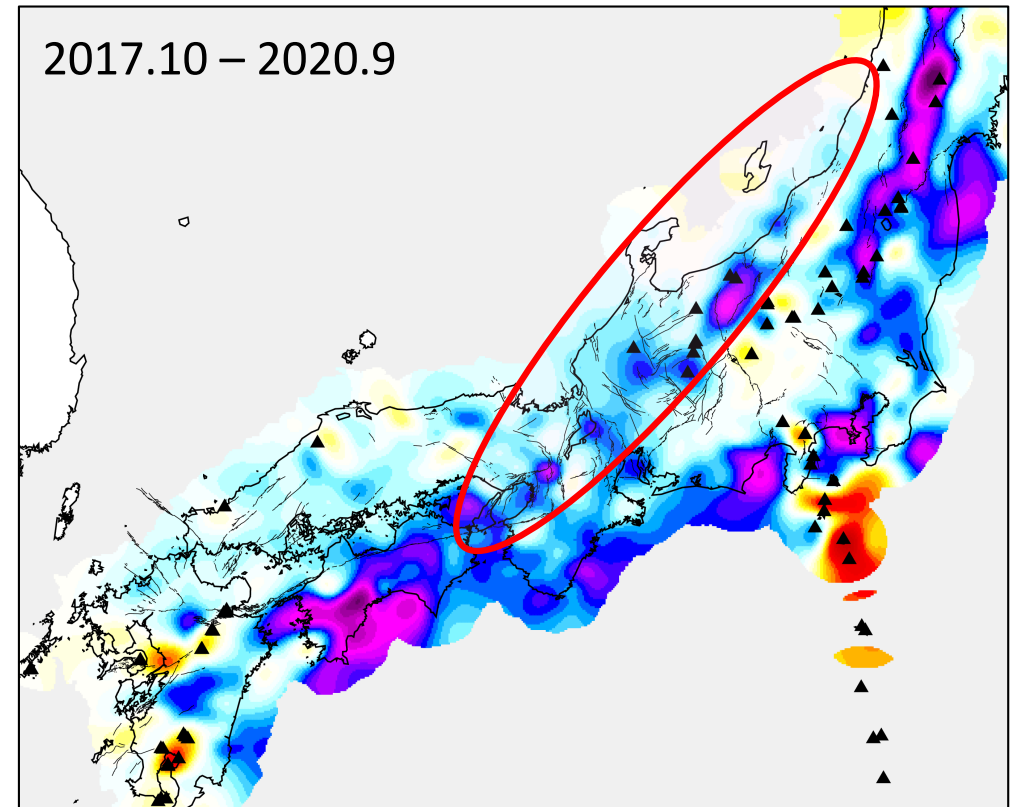
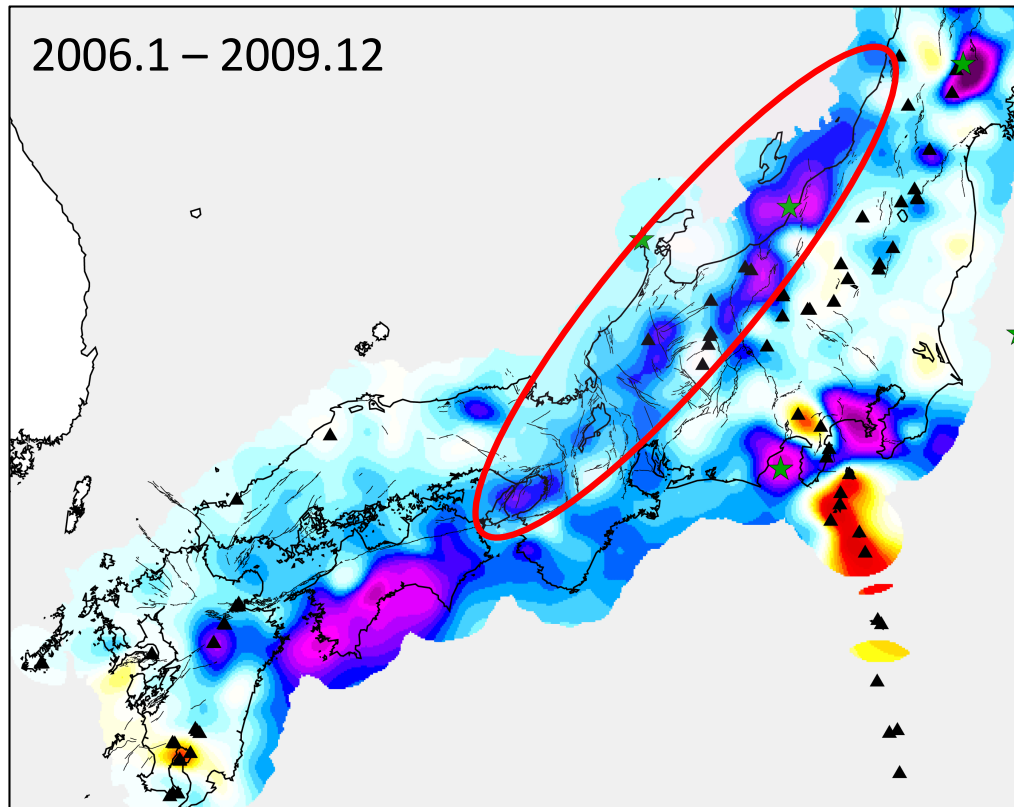
歴史記録に基づく



近畿地方は南海地震前が危ない！

東北沖地震前後の面積歪み速度の比較

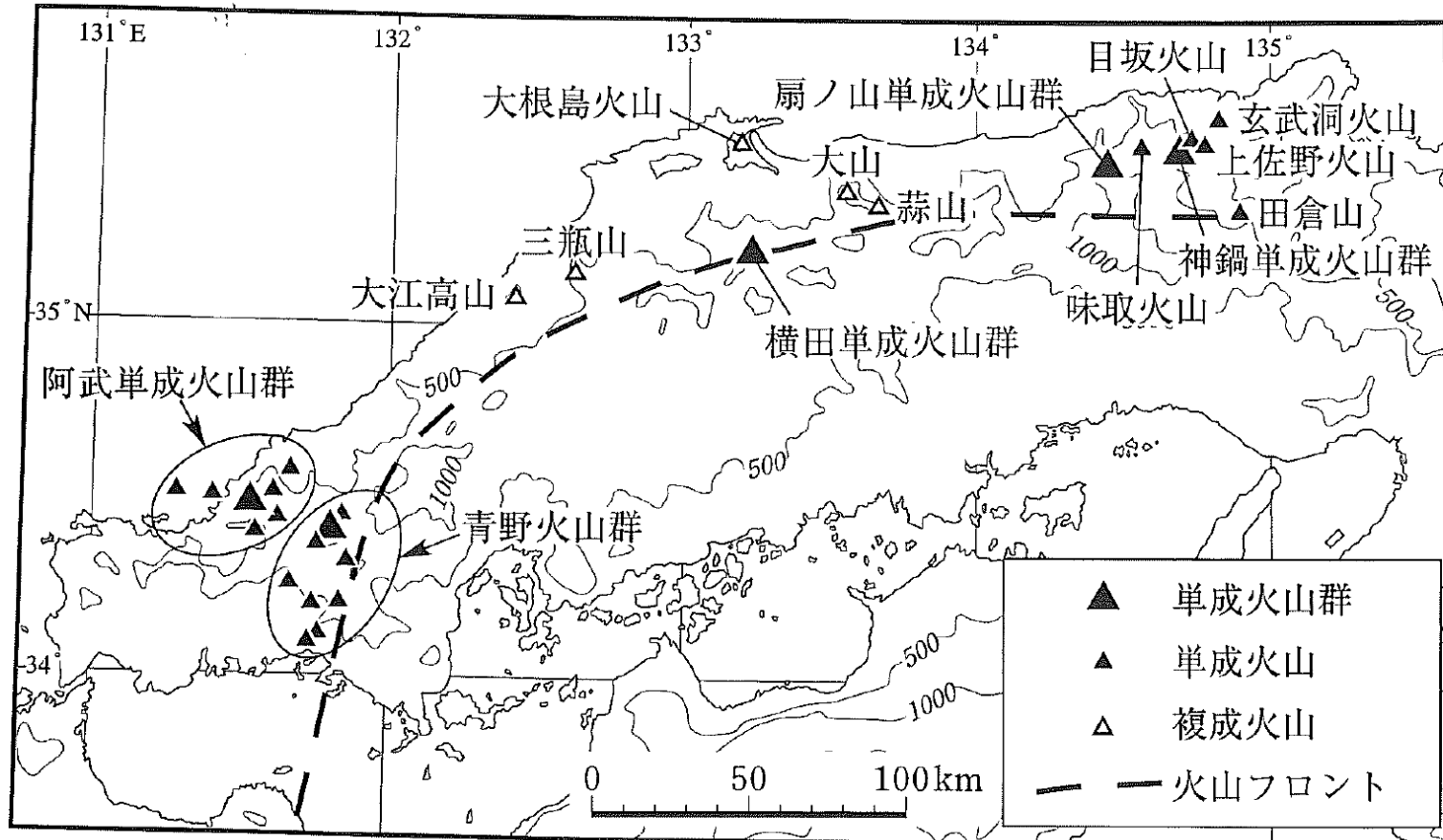
深畑ほか (2022)



2011年東北沖地震により、東西短縮速度が鈍化
一方、能登半島群発地震のような活動も誘発

応力場は火山活動とも密接な関係

中国地方の単成火山群



小倉(2004)：
日本の地形 6
近畿・中国・四国

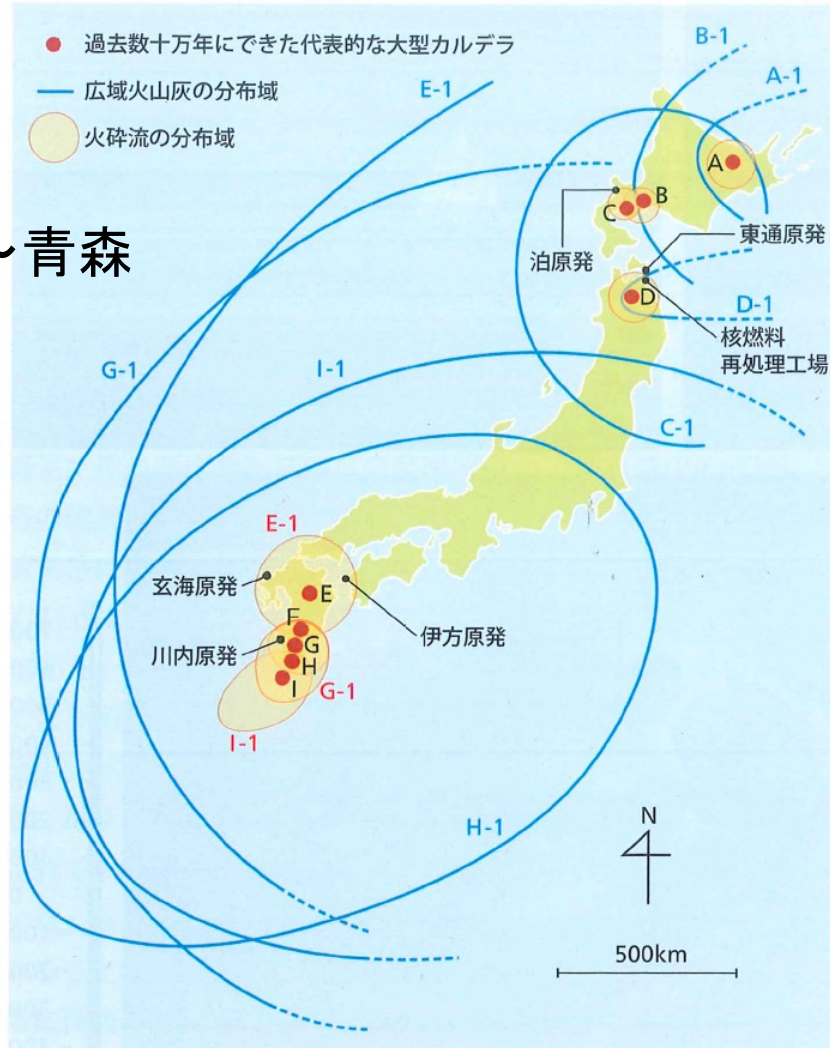
図 3.6.6 近畿地方から中国地方にかけて分布する第四紀火山 [本文中の文献をもとに小倉作成]

単成火山：一度だけの噴火で形成
圧縮的な応力場で生じにくい (中村, 1989)

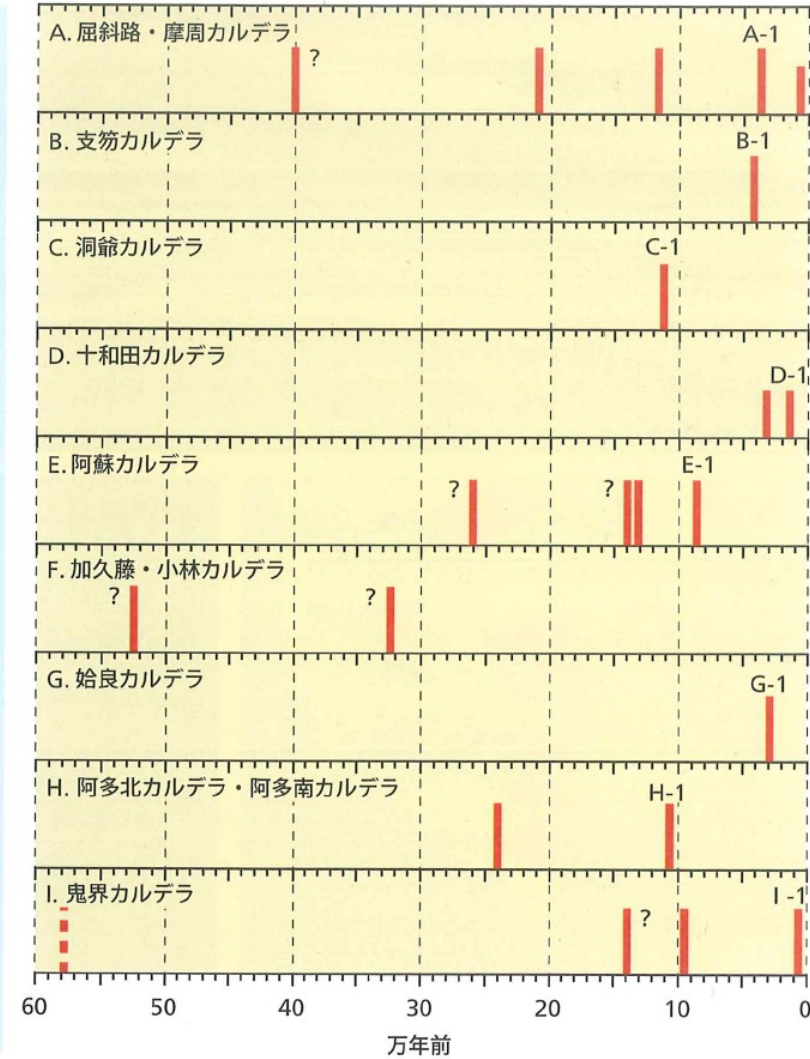
超巨大噴火(カルデラ噴火): 中立的応力場で生じやすい

超巨大噴火と広域テフラ

北海道～青森
九州



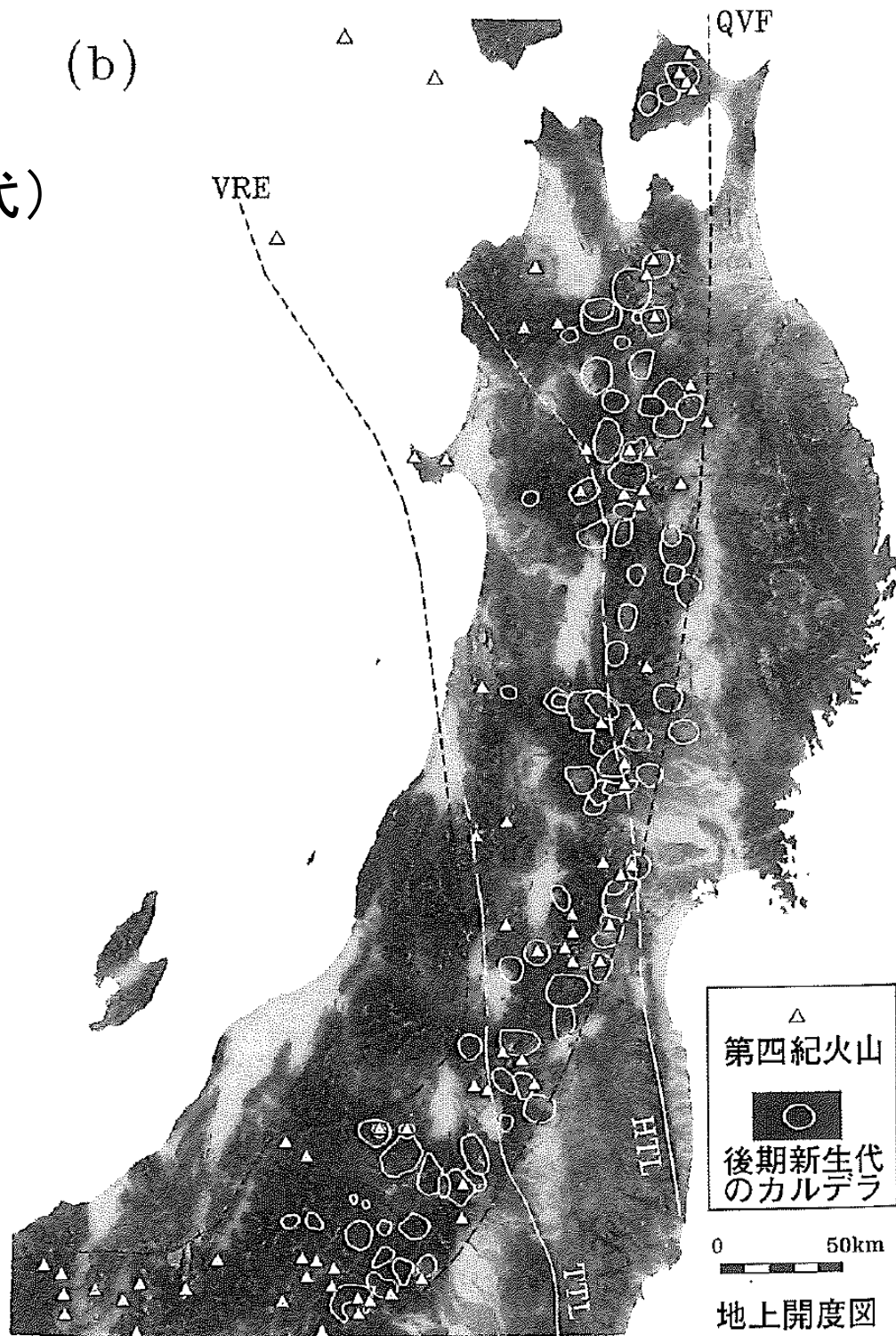
超巨大噴火の時系列



九州では最近約10万年で4回

前野(2016; 日経サイエンス, no.217, p113)

(b)
東北地方もかつて
(中立的応力場の時代)
は多くのカルデラ火山



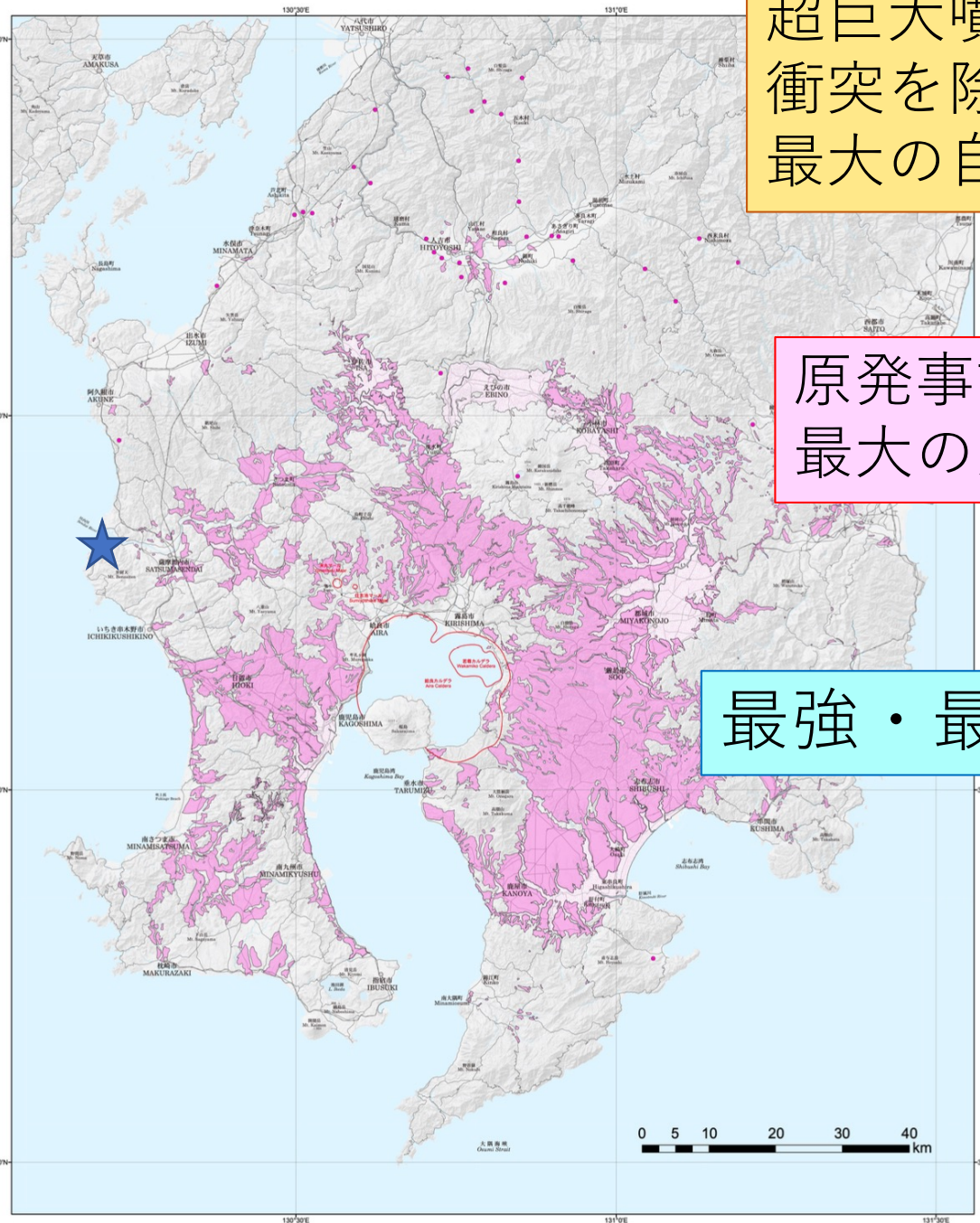
吉田武義
(2017, 日本地方地質誌2,
東北地方p130)

始良カルデラ
入戸火砕流
(約 3 万年前)

南九州一帯に
火砕流が襲来

ピンクの点にも
小規模な火砕流
の跡

川内原発にも
約 10 m の
火砕流が到達
と推定



超巨大噴火：（巨大隕石
衝突を除けば恐らく）
最大の自然災害

+

原発事故：戦争と並ぶ
最大の人為的災害



最強・最悪の複合災害

(宝田他, 2022 ;
産総研)

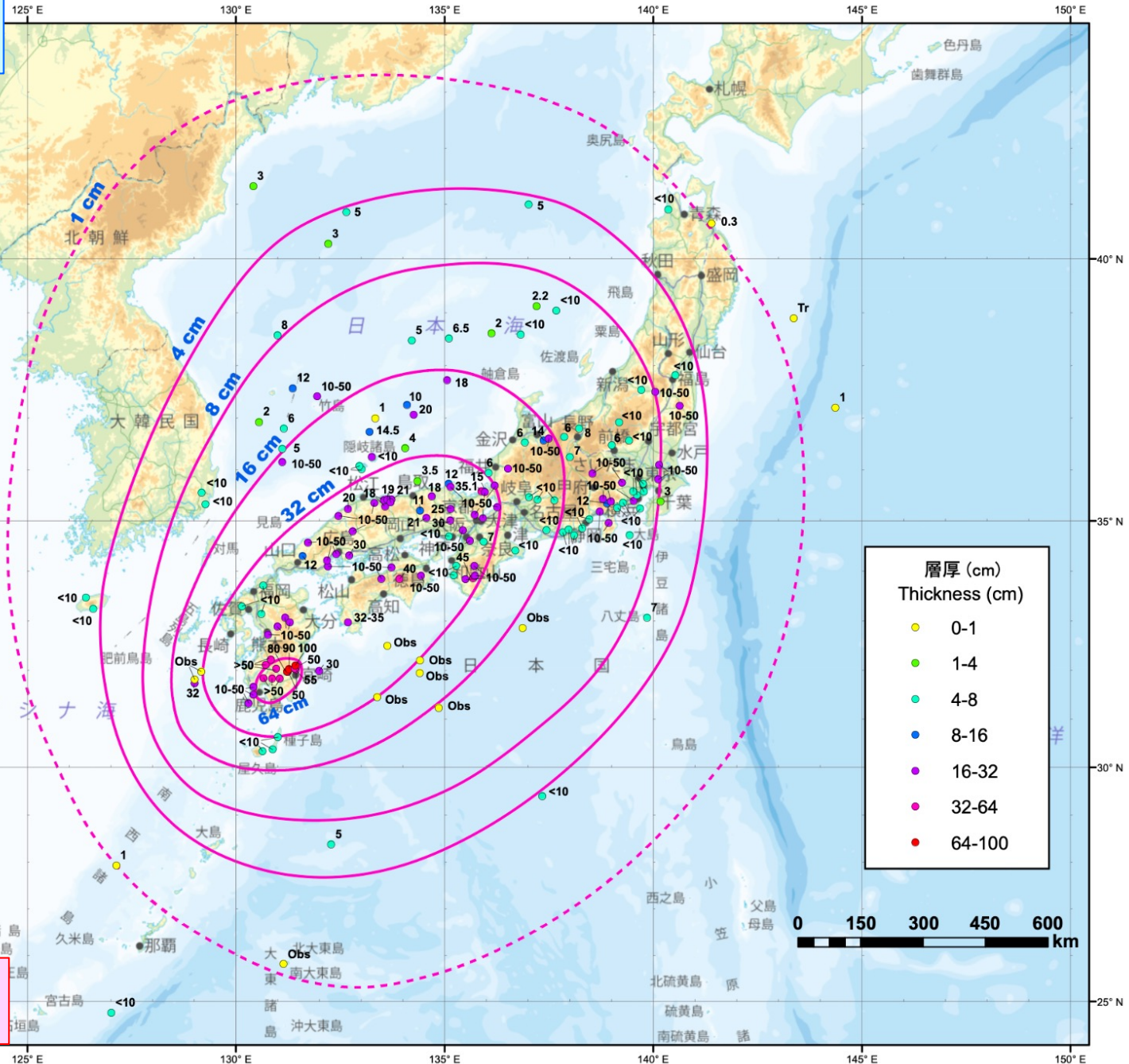
火山灰も広範囲に

京都・大阪：数十 cm
東京：10cm超

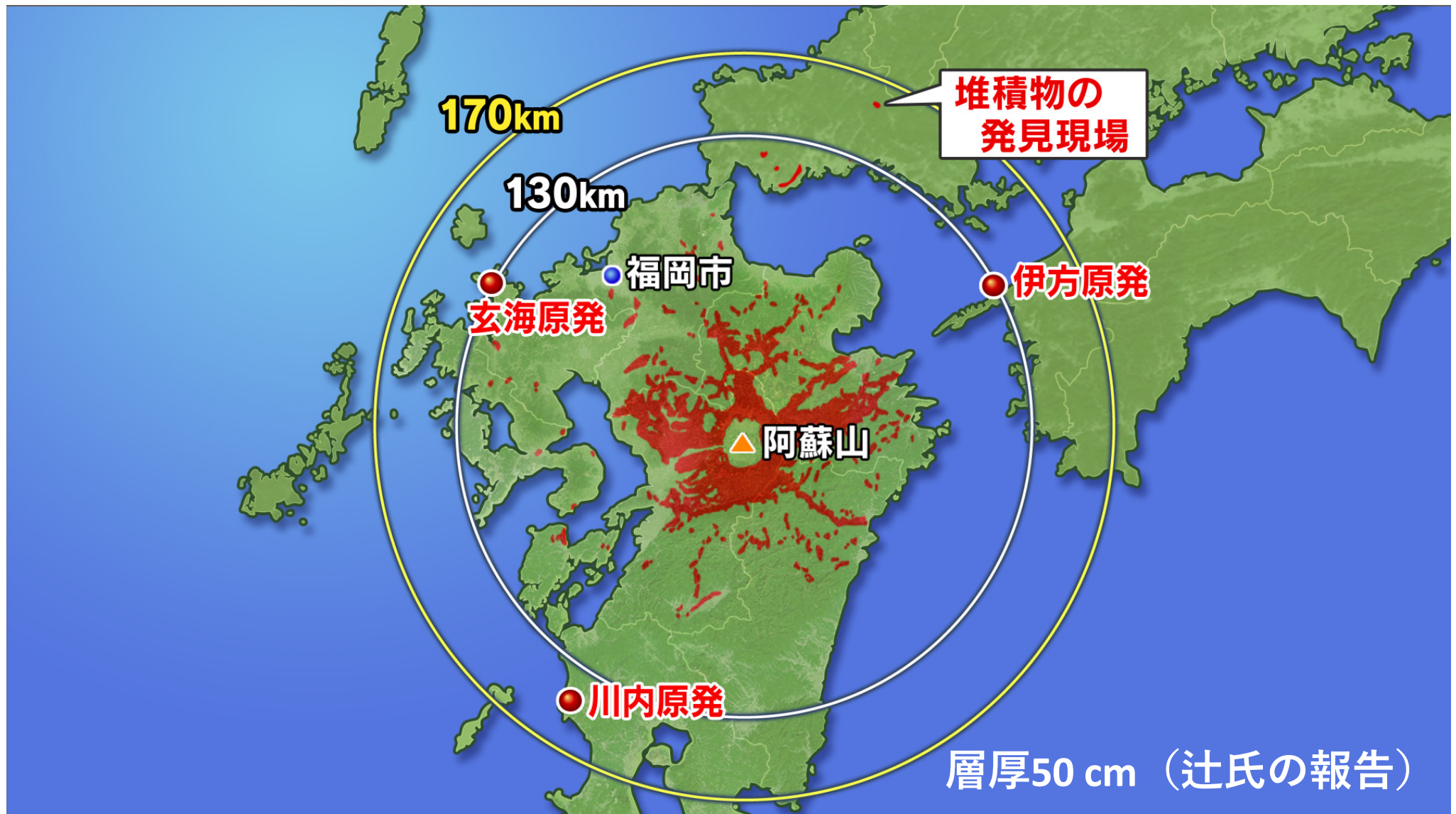
降灰にも放射性物質：
福島原発事故の再来

- ・ 住民パニック
- ・ 外国からの支援の停滞
- ・ 日本難民への差別，
受入拒否

日本国存立の危機に



阿蘇4の火砕流（約9万年前）



<九州における超巨大噴火>

10万年で4回 \equiv 1年当たり2.5万分の1

cf. 巨大隕石による大量絶滅：5億4千万年間で1回だけ

交通事故死：年間約3千人 \equiv 4万分の1

超巨大噴火の方が確率が2倍近く高い！

100年間，原発が稼働したとすると，250分の1

日本国の命運を賭けるには高過ぎる確率では？

加えて，それ以外の危険も
(地震動，津波，老朽化，戦争，テロ)

地質学的に脆弱な日本で**原発**を動かすことは
ロシアルーレットを回しているようなもの


<経産省資料による安全目標> (総合資源エネルギー調査会自主的安全性向上・技術・人材WG 第5回会合 資料1)

福島第一原発事故を踏まえ、発電用原子炉については、事故時の**セシウム137の放出量が100TBq**を超えるような事故の発生頻度は、**100万炉年に1回**程度を超えないように抑制されるべき。(テロ等によるものを除く)

セシウム137の放出量が100TBq：**福島原発事故の約1/100**

超巨大噴火による危険は、発生頻度で1桁以上，放出量で2～3桁ないしはそれ以上安全目標を上回る

仮に1千万人が被災するとすれば，年平均400人

 **しかし，その危険性は事実上無視され続けている**
(かつての津波と同様)

日常性バイアスの悪例

まとめ

- ・日本列島は、海洋プレートが地球内部に沈み込むプレート沈み込み帯に位置するため地震が多い。中でも**東北地方～近畿地方に特に地震が多い**のは、フィリピン海プレートが北西方向に運動することに起因する**東西圧縮**のためと考えられる。
- ・南海地震発生の前50年、後10年に西南日本で内陸地震活動が活発化することが知られているが、近畿地方では、**南海地震前が特に危険**である。
- ・超巨大噴火（カルデラ噴火）は、九州および青森以北で繰り返して起こってきた。超巨大噴火が原子力発電所に与える影響を軽視するのは極めて危険である。

