

令和4年度 気象研究所 研究成果発表会

プレート境界大地震の発生 メカニズムの理解に向けて

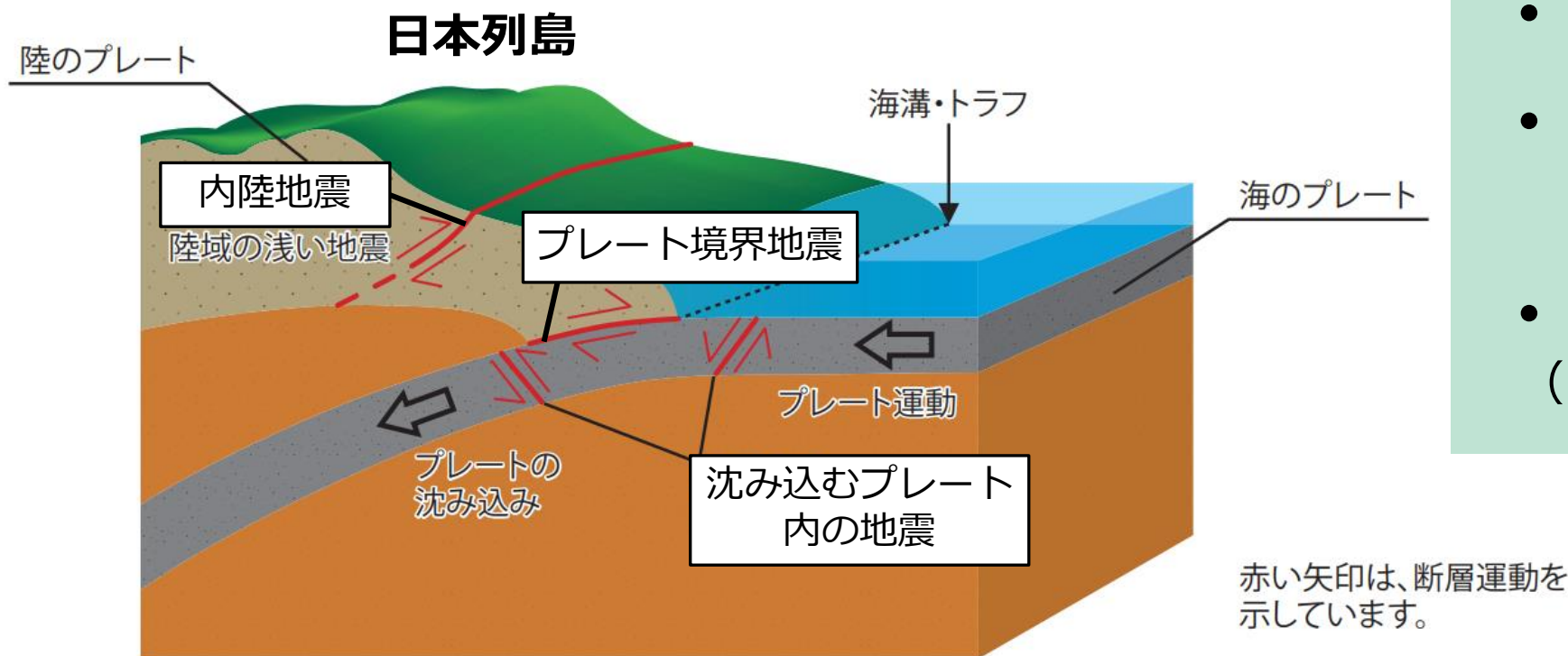
野田朱美

気象研究所 地震津波研究部

目次

- 南海トラフ地震とは？
- 地殻変動観測からプレート境界の状態を知る
- プレート境界の状態から将来の地震を予測する手法の開発

日本の周辺で発生する地震



- プレート境界地震
- 沈み込むプレート内の地震
- 内陸地震
(陸域の浅いところで発生)

「地震がわかる！」(地震調査研究推進本部)に加筆
(https://www.jishin.go.jp/main/pamphlet/wakaru_shiryo2/)

プレート境界で発生する大地震

1900年以降に発生した大地震上位5位

順位	日時（日本時間）	発生場所	マグニチュード（Mw）
1	1960年5月23日	チリ	9.5
2	1964年3月28日	アラスカ湾	9.2
3	2004年12月26日	インドネシア、スマトラ島北部西方沖	9.1
4	2011年3月11日	日本、三陸沖 <u>「平成23年（2011年）東北地方太平洋沖地震」</u>	9.0
	1952年11月5日	カムチャッカ半島	9.0

気象庁webページ (<https://www.jma.go.jp/jma/kishou/known/faq/faq7.html>)

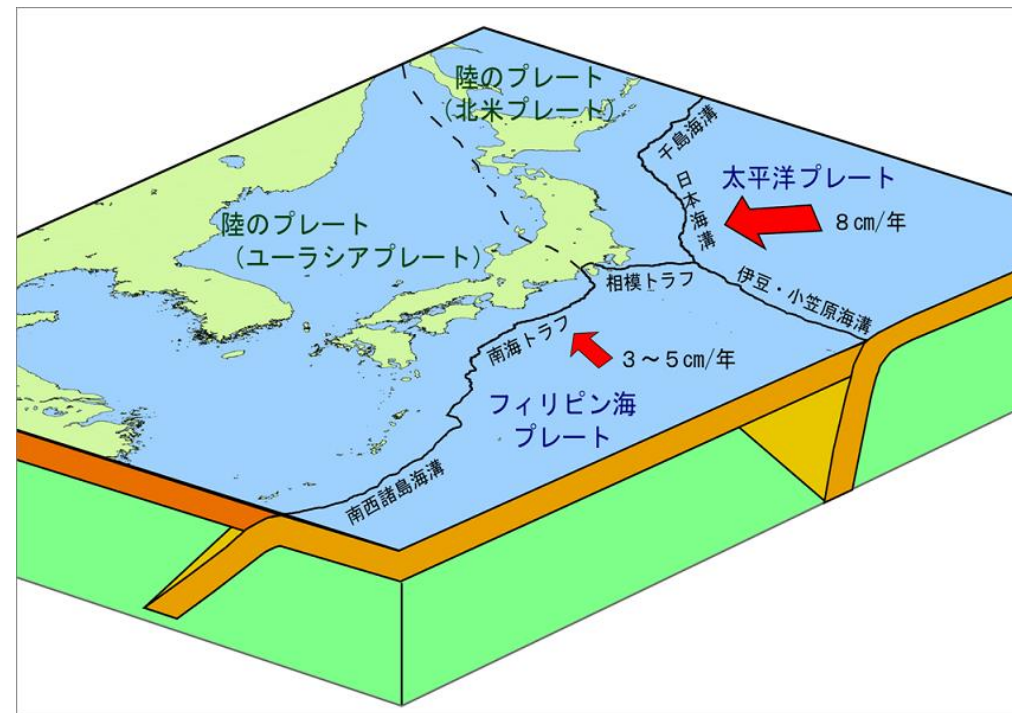


すべて

プレート境界地震

と考えられている。

日本列島周辺のプレート境界

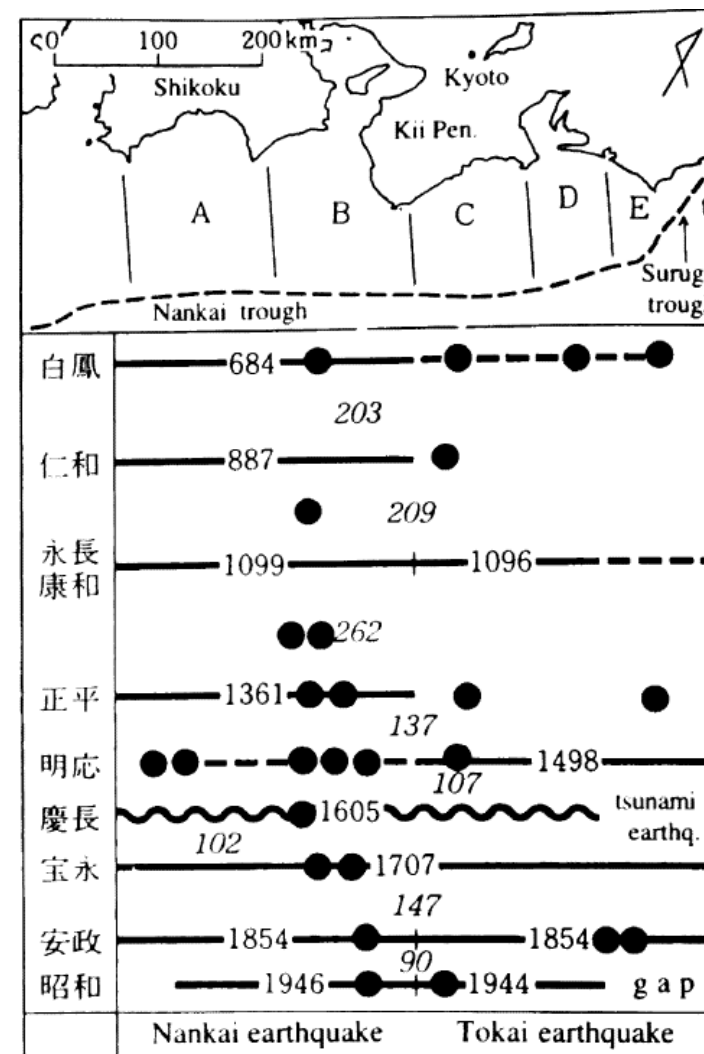


気象庁webページ
(https://www.data.jma.go.jp/eqev/data/jishin/about_eq.html)

南海トラフ沿いのプレート境界大地震

- **マグニチュード8クラスのプレート境界大地震**が約100～200年間隔で発生
- 多くの歴史地震記録が残る
 - 1944年東南海地震、1946年南海地震では測定機器による観測
 - 他のイベントは基本的に古文書ベース
- 沿岸部に甚大な被害（地震動・津波）
 - 昭和に発生した1944年東南海地震、1946年南海地震ではそれぞれ千数百人の死者

次のプレート境界地震の発生は？
(昭和の大地震が発生してから今年で77-79年)



石橋・佐竹 (1998)

南海トラフ地震臨時情報

- 南海トラフ沿いで巨大地震の発生との関連が懸念される異常な現象を観測した場合等に、「**南海トラフ地震臨時情報**」が気象庁から発表される
- 政府や自治体から防災対応が呼びかけられる
 - 避難準備（状況に応じて事前避難）
 - 日ごろからの地震への備えの再確認

異常な現象の例：

- ・ 震源域でのマグニチュード6.8以上の地震
- ・ ひずみ計での有意な変化
- ・ 通常と異なるゆっくりすべり

**現在の科学技術では、
「いつ」「どこで」「どんな地震」が発生するか、断言することはできない**

- 臨時情報の発表がないまま、突発的に南海トラフ地震が発生することもあります。
- 臨時情報が発表された場合でも、南海トラフ地震が発生しないこともあります。

日ごろの備えをした上で、「南海トラフ地震臨時情報」の活用を！

本発表の内容

断層の物理（力学）に基づいたシミュレーション

○ 異常現象はどのように推移するか？巨大地震に結び付くか？

○ どの程度のマグニチュードのプレート境界地震が発生するか？

⇒将来「臨時情報」で、より具体的な情報を提供

発生する可能性のある地震のモデル（複数）を作成する手法

鍵となるのは、

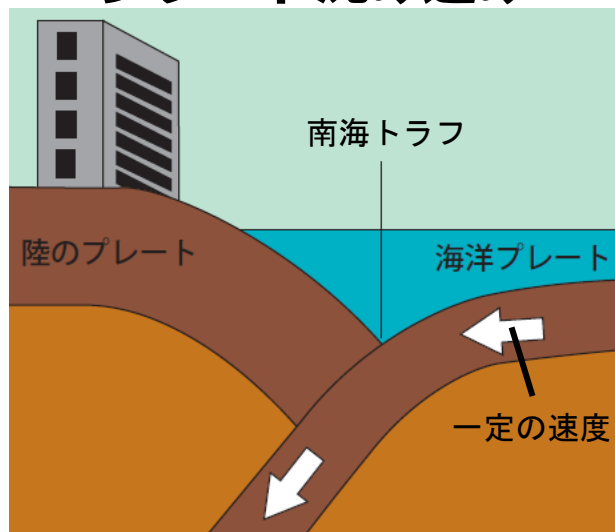
- 最新の地殻変動観測から推定されるプレート境界の状態
- プレート境界に働く2つの力

目次

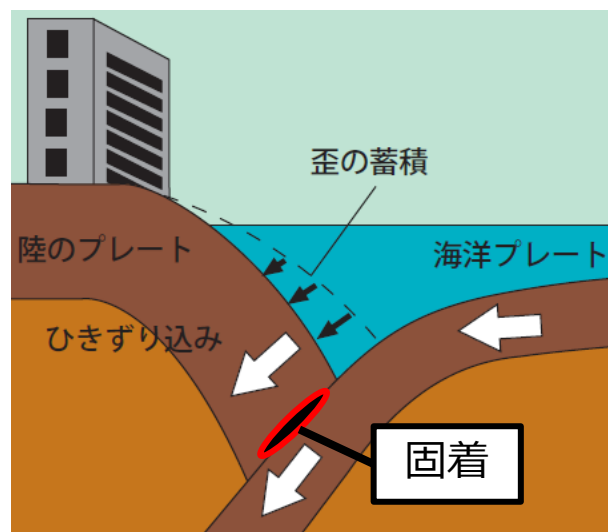
- 南海トラフ地震とは？
- ➡ □ 地殻変動観測からプレート境界の状態を知る
- プレート境界の状態から将来の地震を予測する手法の開発

プレート境界地震発生のしくみ

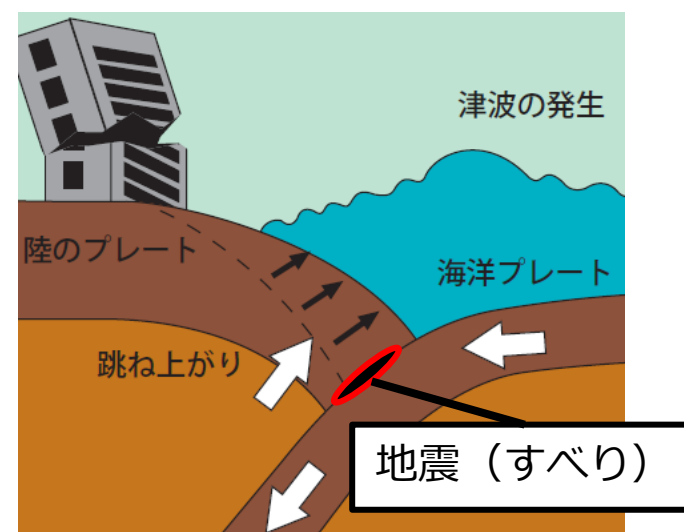
南海トラフにおける プレート沈み込み



プレート境界地震発生前



プレート境界地震発生時



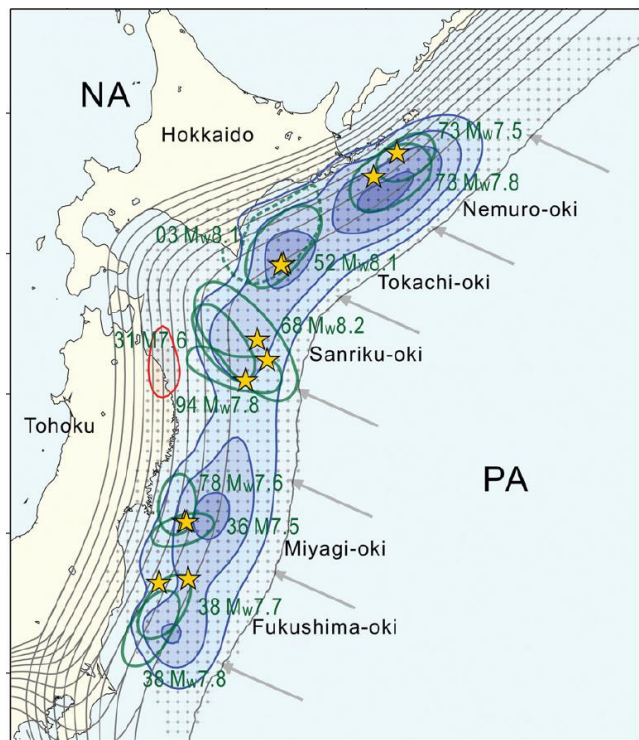
「地震発生のメカニズムを探る」（文部科学省）に加筆
(https://www.jishin.go.jp/main/pamphlet/eq_mech/)

すべり欠損 ...固着によりプレート境界ですべれなかった不足分

「すべり欠損」が大きい ⇒ 陸のプレートの引きずり込みが大きい

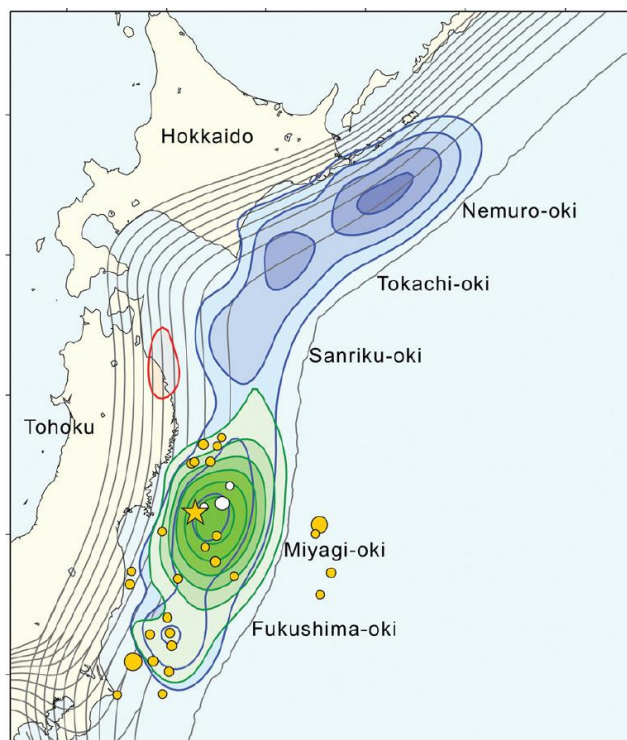
プレート境界のすべり欠損と大地震発生

1年あたりのすべり欠損
(巨大地震発生前)



青色のコンター (すべり欠損) :
3 cm 間隔

2011年東北地方太平洋沖地震の
すべり域 (緑色)



緑色のコンター (地震時すべり) :
4 m 間隔

すべり欠損の大きな領域
で巨大地震が発生



将来発生する大地震を知る
ための重要な手がかり

Hashimoto et al. (2012)

プレート境界のすべり欠損を推定する方法

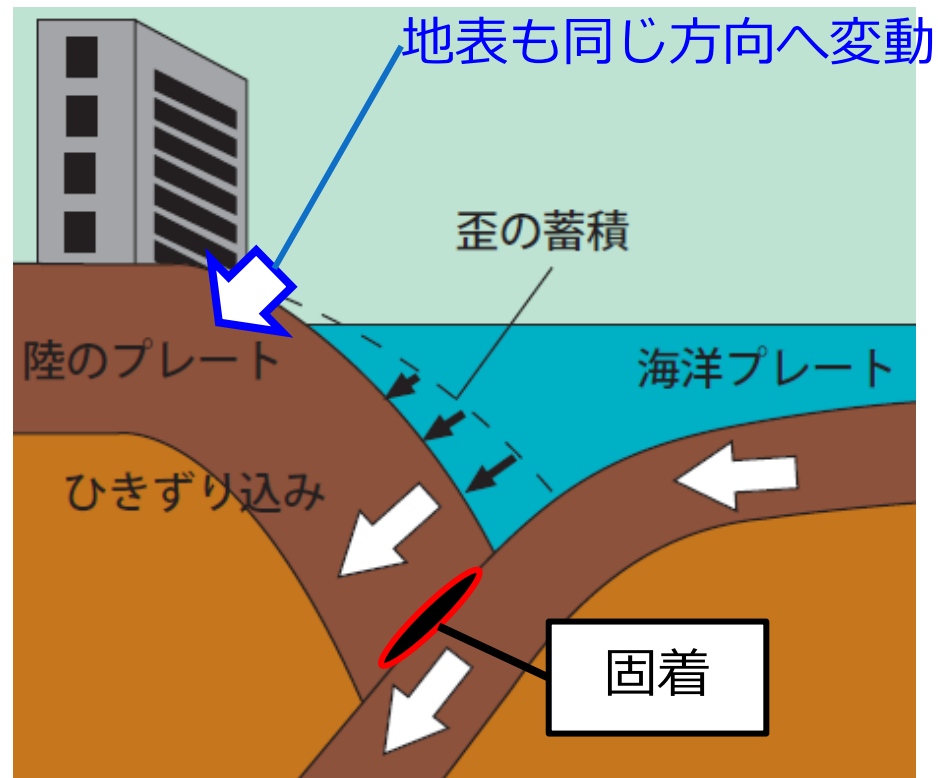
地殻変動を観測する

陸のプレートの引きずり込みにより陸のプレートが変形する



- 陸のプレートの変形  を地表で観測する
- 観測結果からプレート境界での引きずり込みの量（すべり欠損 ）を推測する

プレート境界地震発生前



「地震発生のメカニズムを探る」（文部科学省）に加筆
(https://www.jishin.go.jp/main/pamphlet/eq_mech/)

測地観測技術の向上による詳細な地殻変動

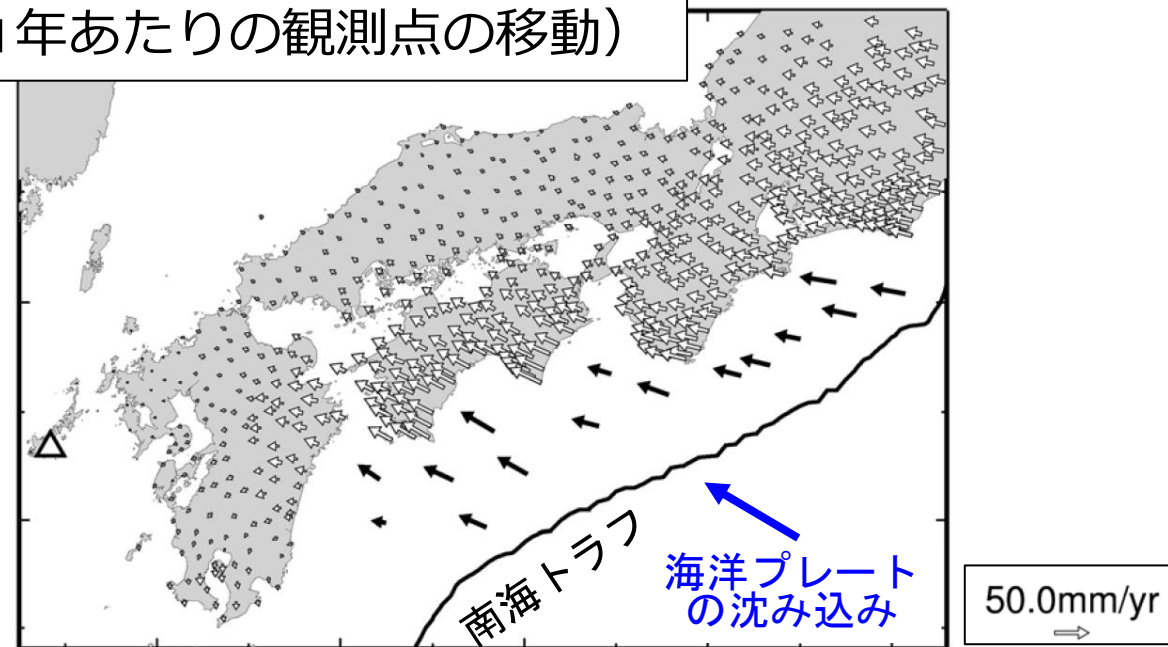
国土地理院GNSS連続観測システム (GEONET)

- 1990年代から観測開始
- 1年あたり1mm程度の変動を捉える
- 全国に約1,300点の観測点を設置

海上保安庁による海底地殻変動観測

- 海底でGNSS観測ができない問題を、海中の音響測距を組み合わせることで解決
- 2000年以降、観測開始
- 観測精度はGEONETより劣る (数mm/年)
- 海底のデータは貴重

地殻変動の観測データ
(1年あたりの観測点の移動)



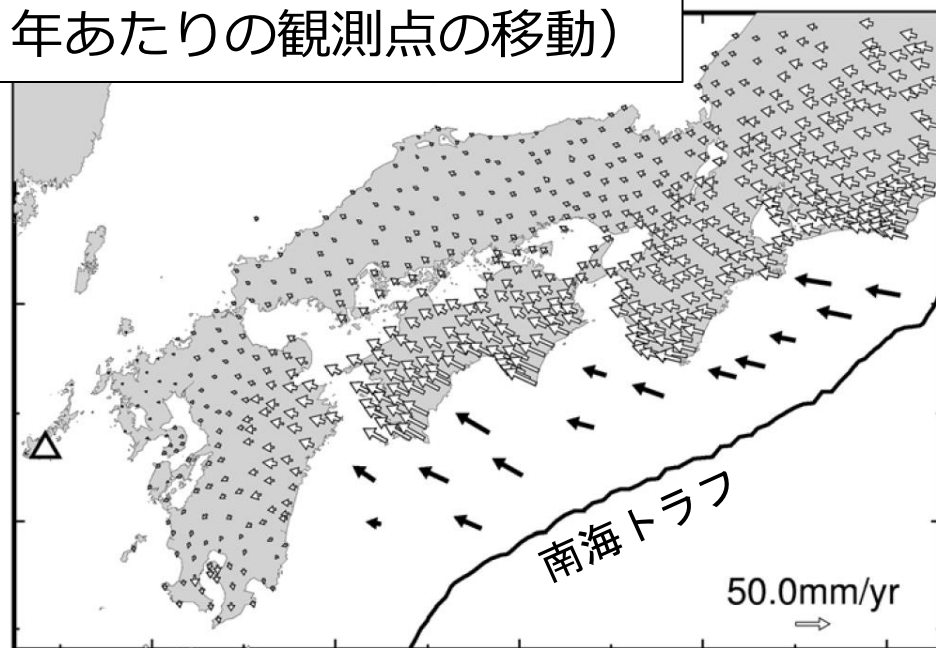
陸上 (国土地理院) + 海底 (海上保安庁)
(海底のデータは Yokota et al. [2016] による)

陸のプレートの引きずり込みにより
太平洋沿岸が北西方向へ移動
(最大で1年あたり約5 cm)

南海トラフ沿いのすべり欠損

Noda et al. (2018)

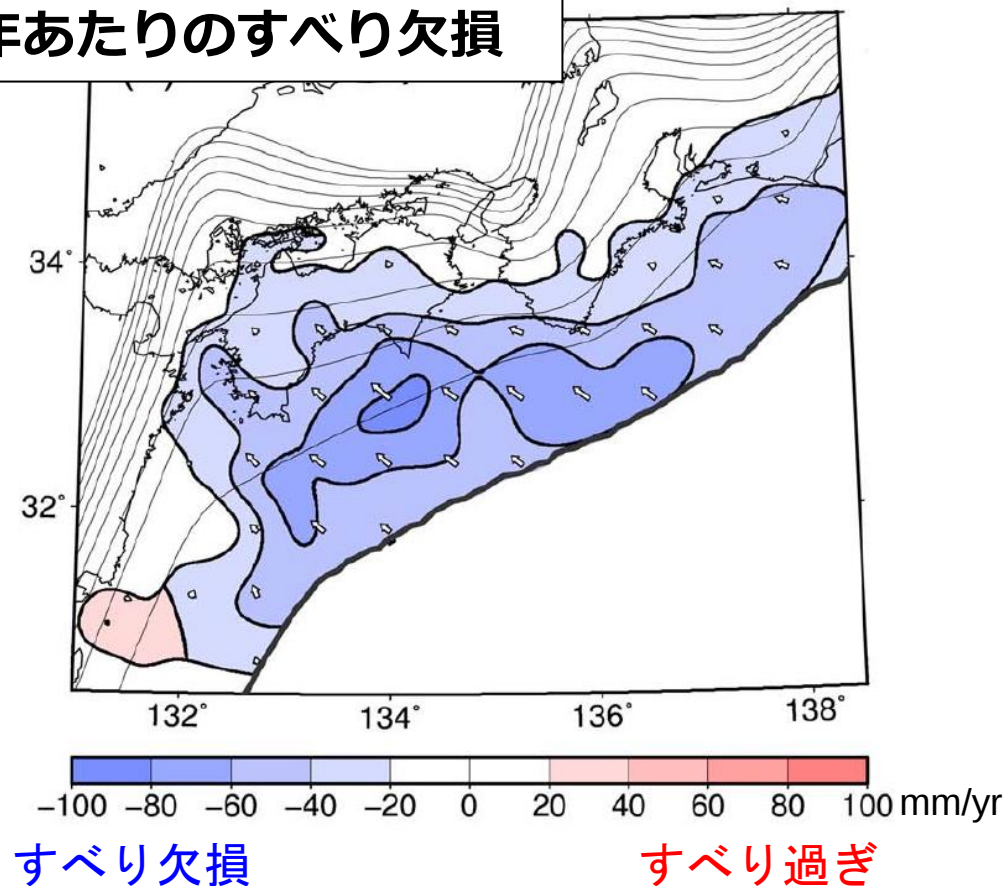
地殻変動の観測データ
(1年あたりの観測点の移動)



陸上（国土地理院）＋海底（海上保安庁）
(海底のデータは Yokota et al. [2016] による)

1年あたりのすべり欠損

データ解析



- 南海トラフ沿いに大きなすべり欠損 → 地震を引き起こす歪みの蓄積
- すべり欠損の大きさにはムラがある（海底地殻変動観測の成果）

目次

- 南海トラフ地震とは？

- 地殻変動観測からプレート境界の状態を知る

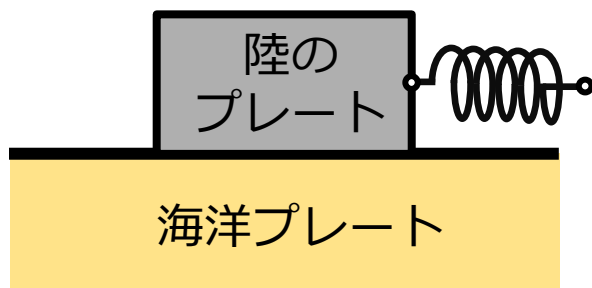
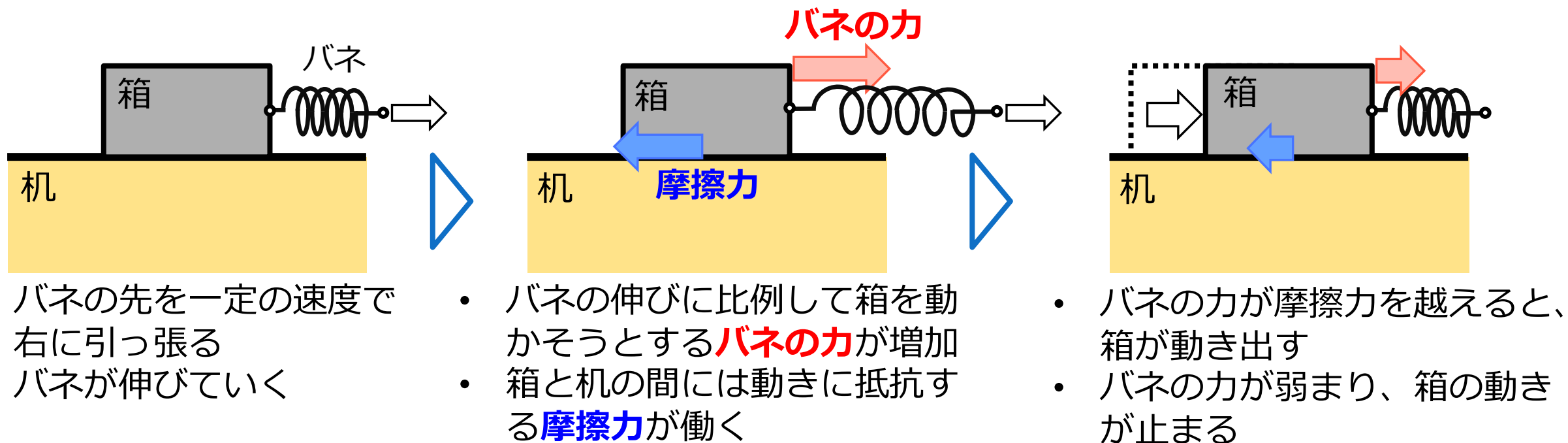
- ➡ □ プレート境界の状態から将来の地震を予測する手法の開発

研究グループ：気象研究所、防災科学技術研究所、産業技術総合研究所

目次

- 南海トラフ地震とは？
 - 地殻変動観測からプレート境界の状態を知る
 - プレート境界の状態から将来の地震を予測する手法の開発
- 
- 地震発生を支配する2つの力
 - 応力を用いた地震シナリオ予測
 - 摩擦力を地震シナリオに取り入れる方法

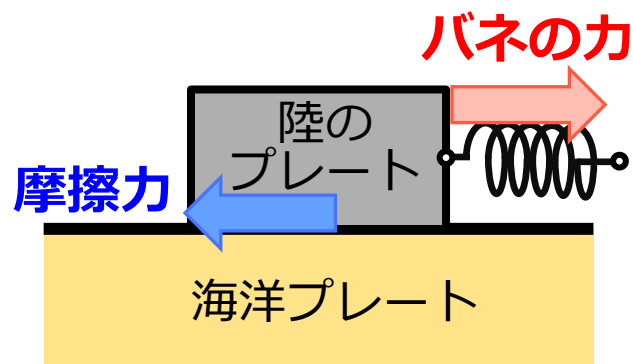
プレート境界に働く力と地震発生



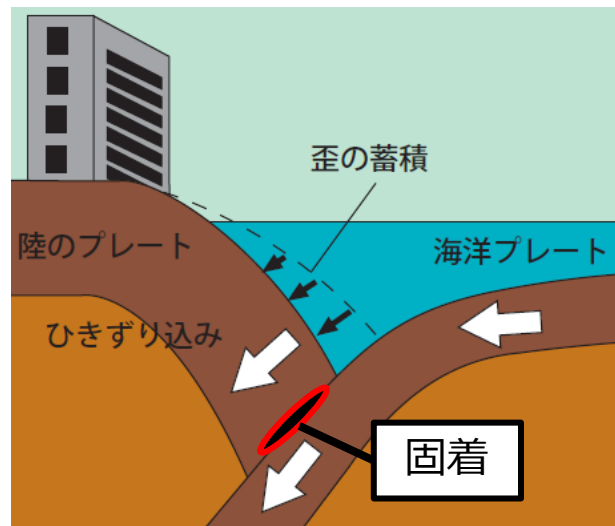
箱が止まっている状態＝プレート境界の固着
箱がすべっているとき＝プレート境界地震発生

地震発生をコントロールする2つの力：
バネの力、摩擦力

地震発生を支配する応力と摩擦力

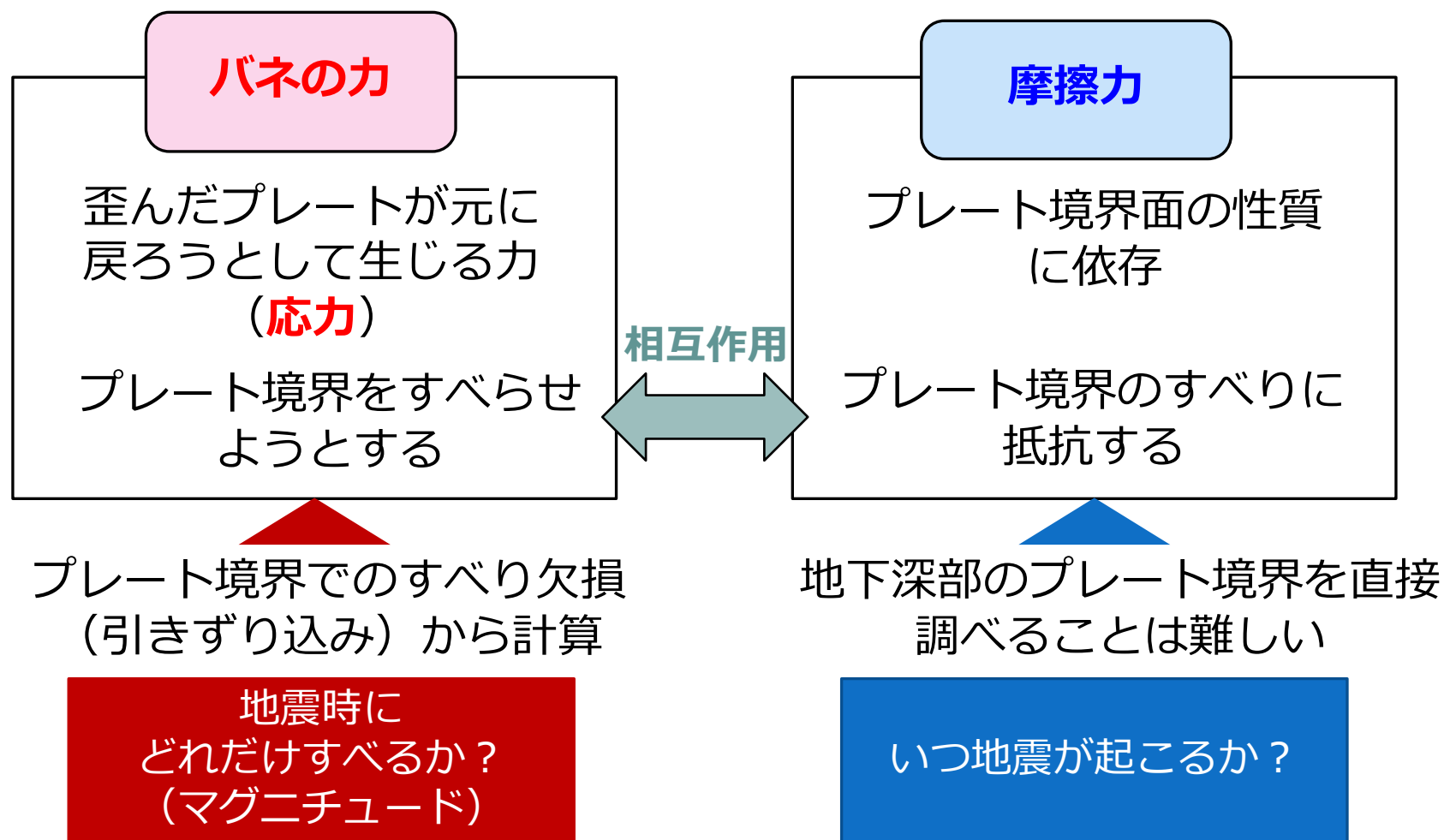


プレート境界地震発生前



「地震発生のメカニズムを探る」(文部科学省)に加筆
(https://www.jishin.go.jp/main/pamphlet/eq_mech/)

2023/01/21



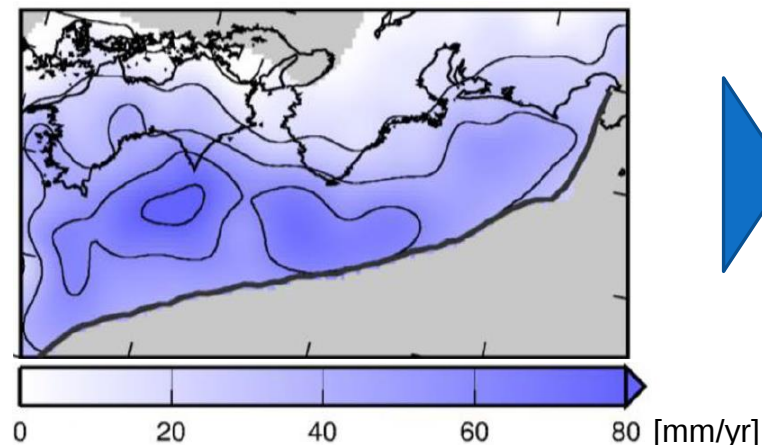
発生する可能性のある地震の
モデル(複数)を作成する手法

目次

- 南海トラフ地震とは？
- 地殻変動観測からプレート境界の状態を知る
- プレート境界の状態から将来の地震を予測する手法の開発
 - 地震発生を支配する2つの力
 - ➡ ● 応力を用いた地震シナリオ予測
 - 摩擦力を地震シナリオに取り入れる方法

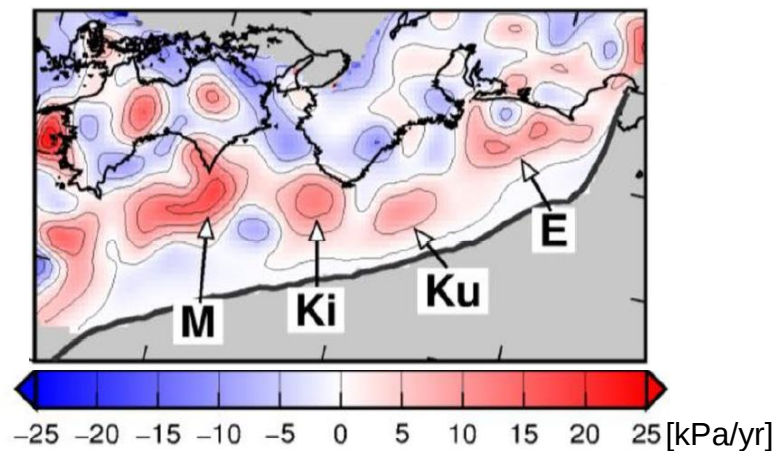
プレート境界に働く応力の推定

1年あたりのすべり欠損



Noda et al. (2021)

1年あたりの応力の増加量
= 応力増加速度

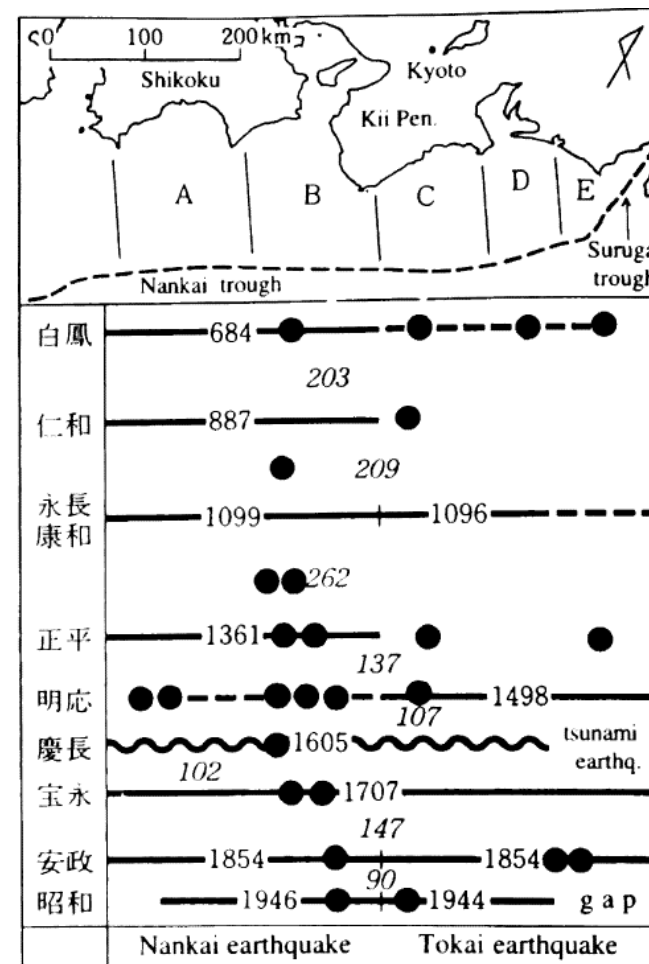


M...室戸沖、Ki...紀伊水道、
Ku...熊野灘、E...遠州灘

※1年あたりの変化量（増加速度）しか知ることが出来ない

- ・ 南海トラフ沿いに応力増加速度の大きな領域が4つ推定された
- ・ 過去に発生した地震の震源域と対応
- ・ これらの応力増加領域をアスペリティと呼ぶ

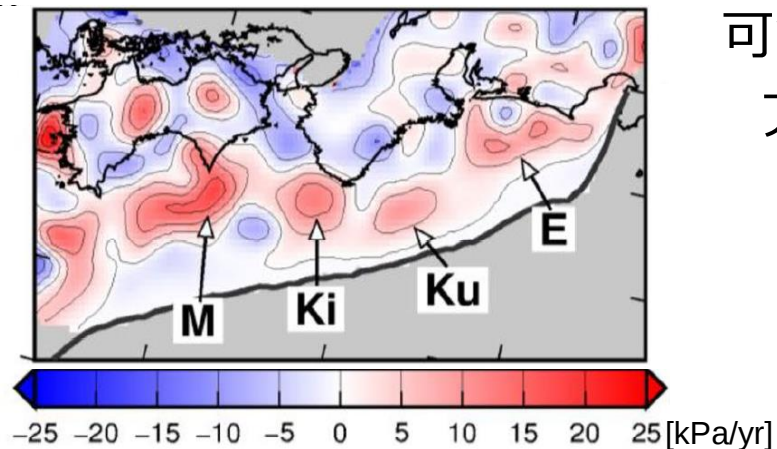
南海トラフで発生した地震



石橋・佐竹 (1998)

応力蓄積量から推定した地震シナリオ（１）

応力増加速度



※摩擦力を考慮しないと、どこから地震が起こるかは分からない。

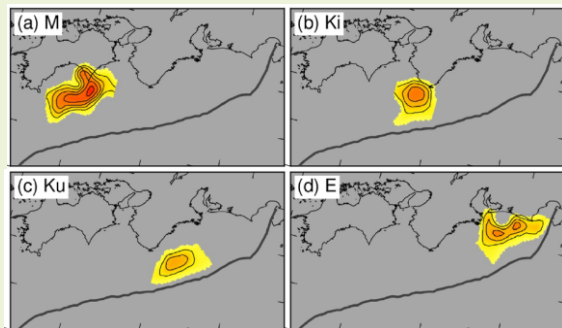
可能性がある震源域：

アスペリティ単独 or 隣り合ったアスペリティの組み合わせ (全10通り)

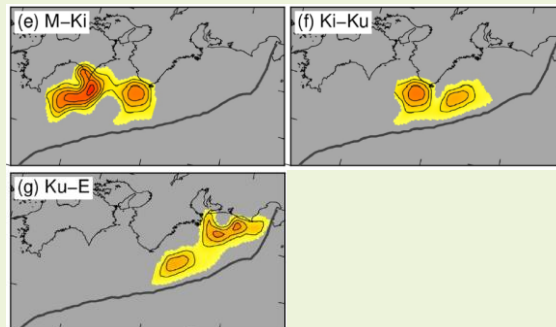
- アスペリティ単独：M, Ki, Ku, E
- 2連動：M-Ki, Ki-Ku, Ku-E
- 3連動：M-Ki-Ku, Ki-Ku-E
- 4連動：M-Ki-Ku-E

⇒ 「地震シナリオ」

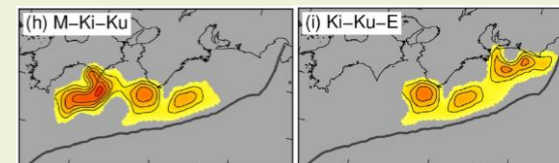
アスペリティ単独（4通り）



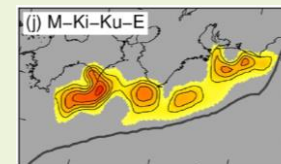
アスペリティ2連動（3通り）



アスペリティ3連動（2通り）



アスペリティ4連動（1通り）



Noda et al. (2021)

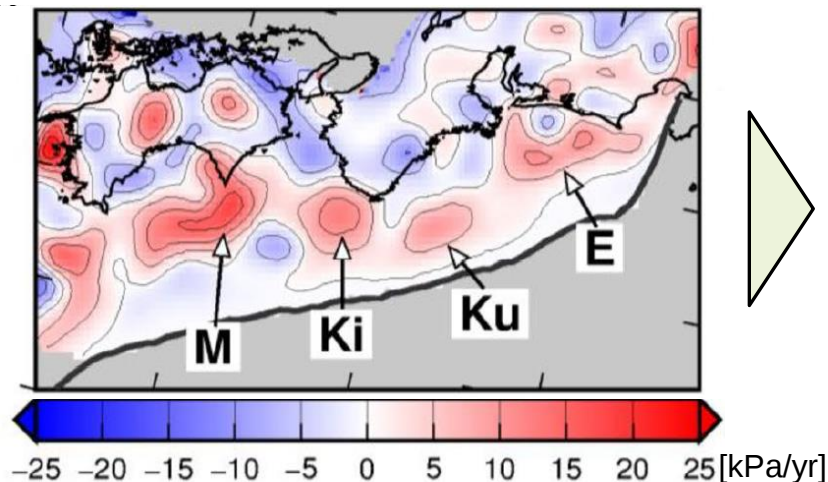
応力蓄積量から推定した地震シナリオ（２）

応力が150年分蓄積した時に地震が発生した場合、どのような地震になるか？

例：2連動 M-Ki のシナリオ

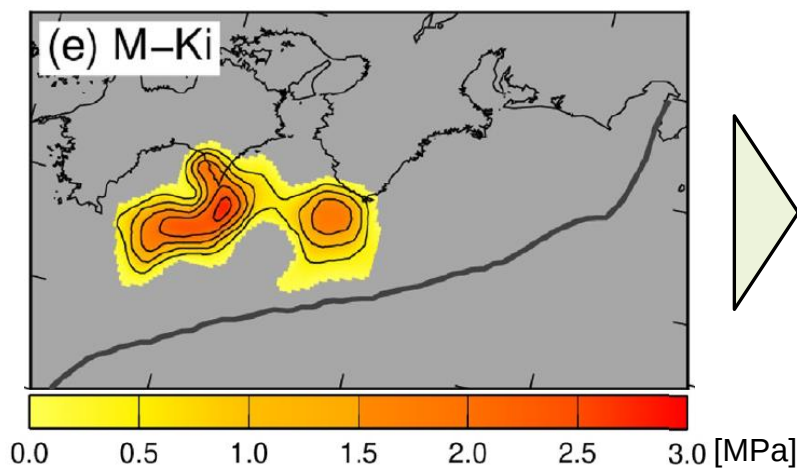
Noda et al. (2021)

応力増加速度



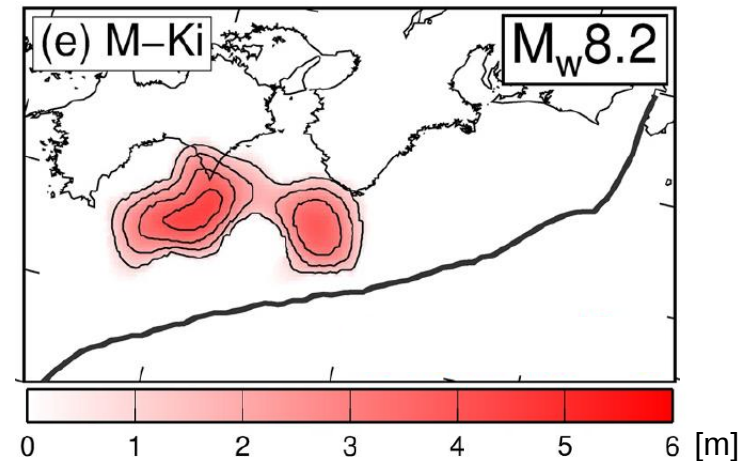
応力増加速度一定と仮定

応力蓄積量



- 応力が増加する領域内を震源域（すべり領域）と設定
- 応力蓄積量
= 応力増加速度×150年

地震時すべりの推定結果

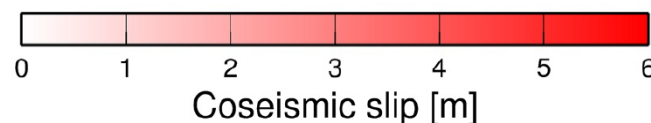
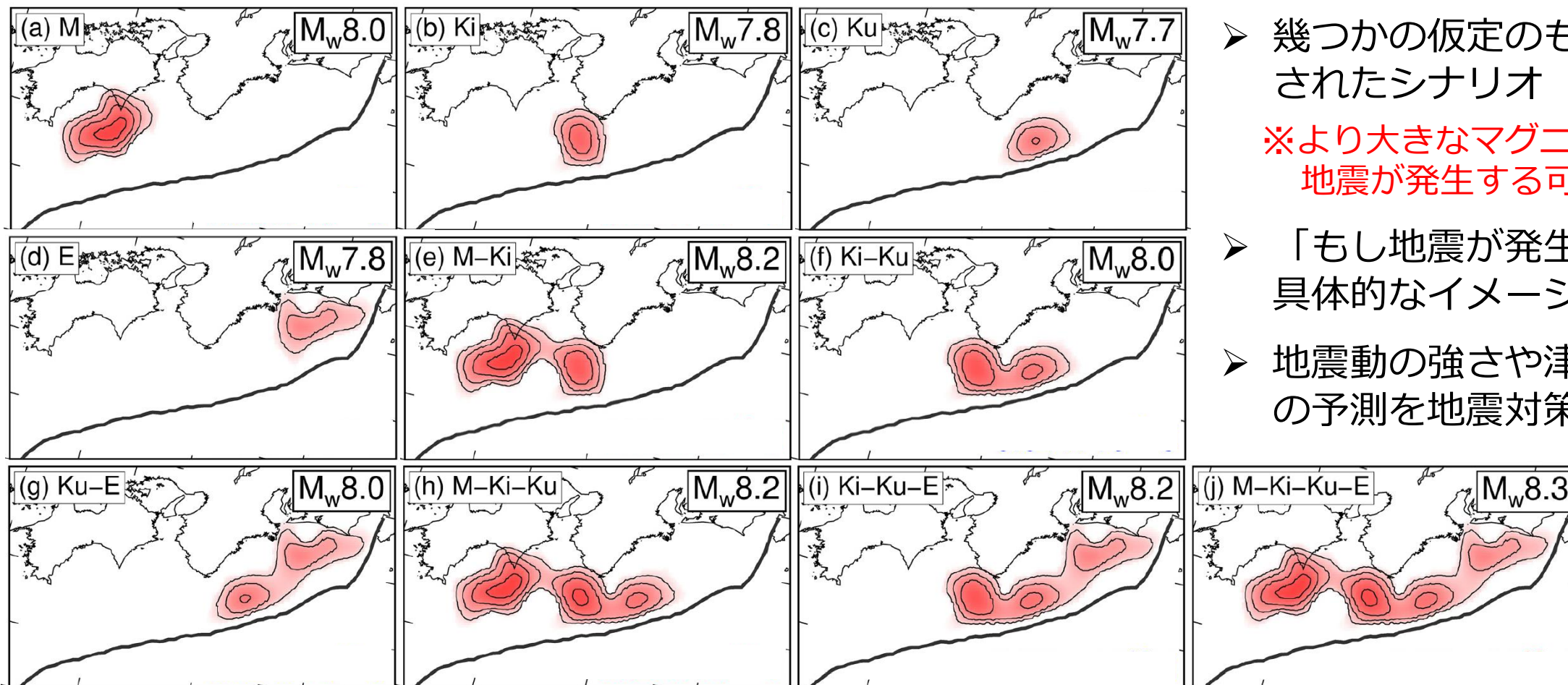


応力蓄積量からすべり分布を推定

※ M_w : モーメントマグニチュード
(マグニチュードの一種)

10通りの地震シナリオ

応力の蓄積時間150年



➤ 幾つかの仮定のもとに推定されたシナリオ

※より大きなマグニチュードの地震が発生する可能性

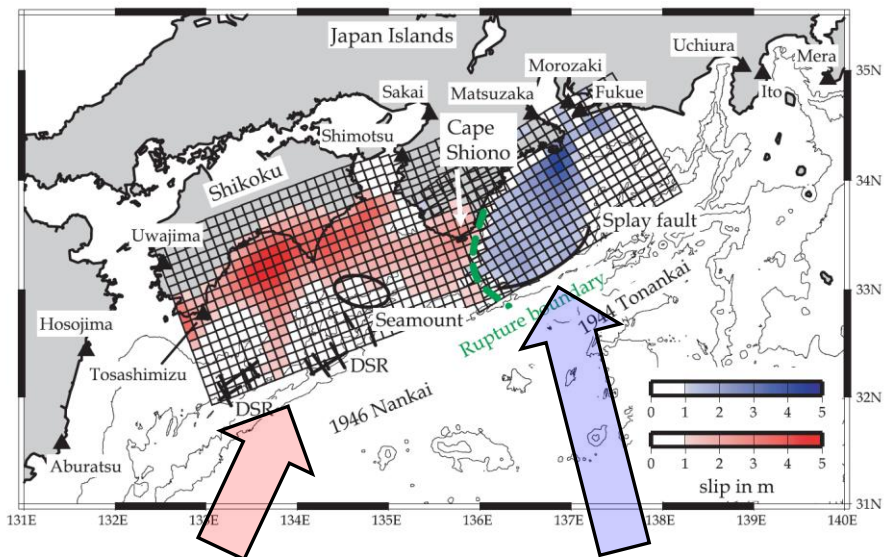
➤ 「もし地震が発生したら」具体的なイメージの醸成

➤ 地震動の強さや津波の高さの予測を地震対策に活用

Noda et al. (2021)

過去の南海トラフ大地震との比較

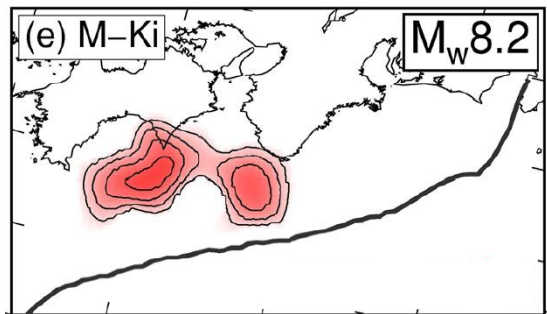
実際の昭和東南海・南海地震のすべり分布 (津波データ解析; Baba & Cummins, 2005)



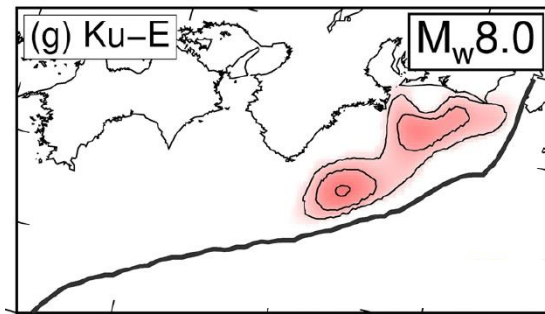
過去の大地震もアスペリティでの
応力蓄積によって発生

1707年宝永地震は南海トラフ全域を破壊

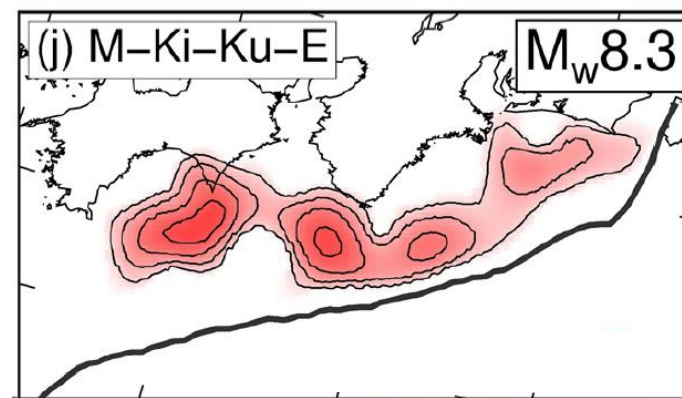
1946年南海地震的なシナリオ



1944年東南海地震的なシナリオ



1707年宝永地震的なシナリオ

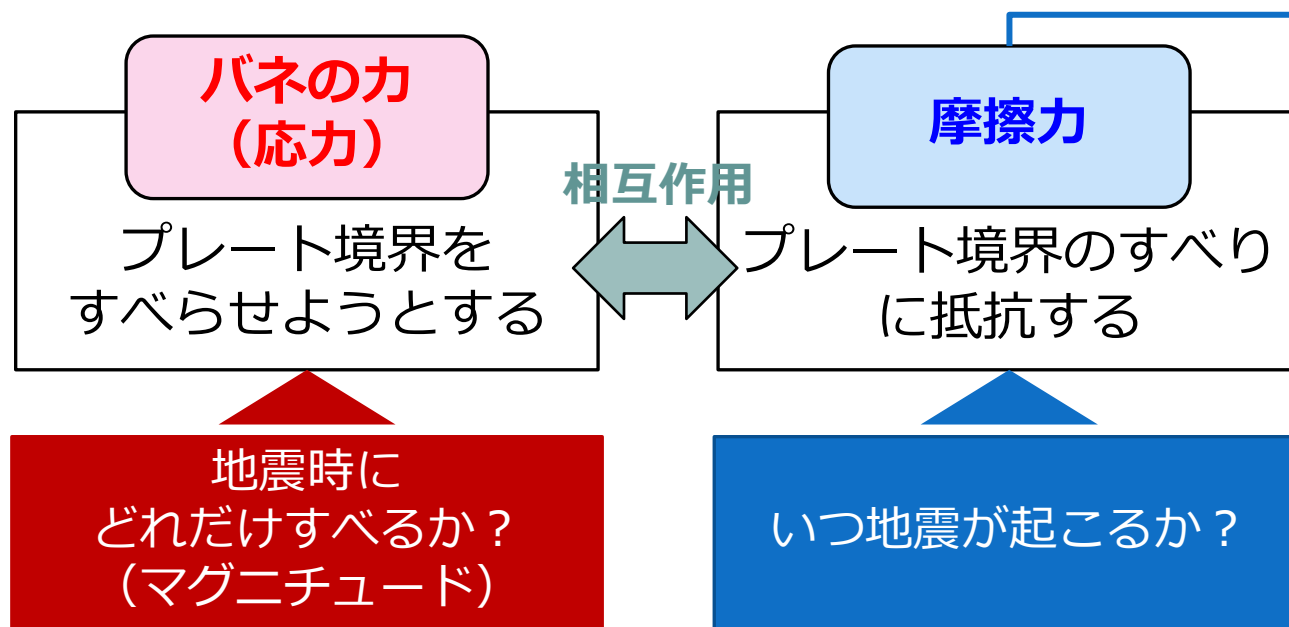


目次

- 南海トラフ地震とは？
- 地殻変動観測からプレート境界の状態を知る
- プレート境界の状態から将来の地震を予測する手法の開発
 - 地震発生を支配する2つの力
 - 応力を用いた地震シナリオ予測
 - ➡ ● 摩擦力を地震シナリオに取り入れる方法

摩擦を知るには？

地震発生を支配する2つの力



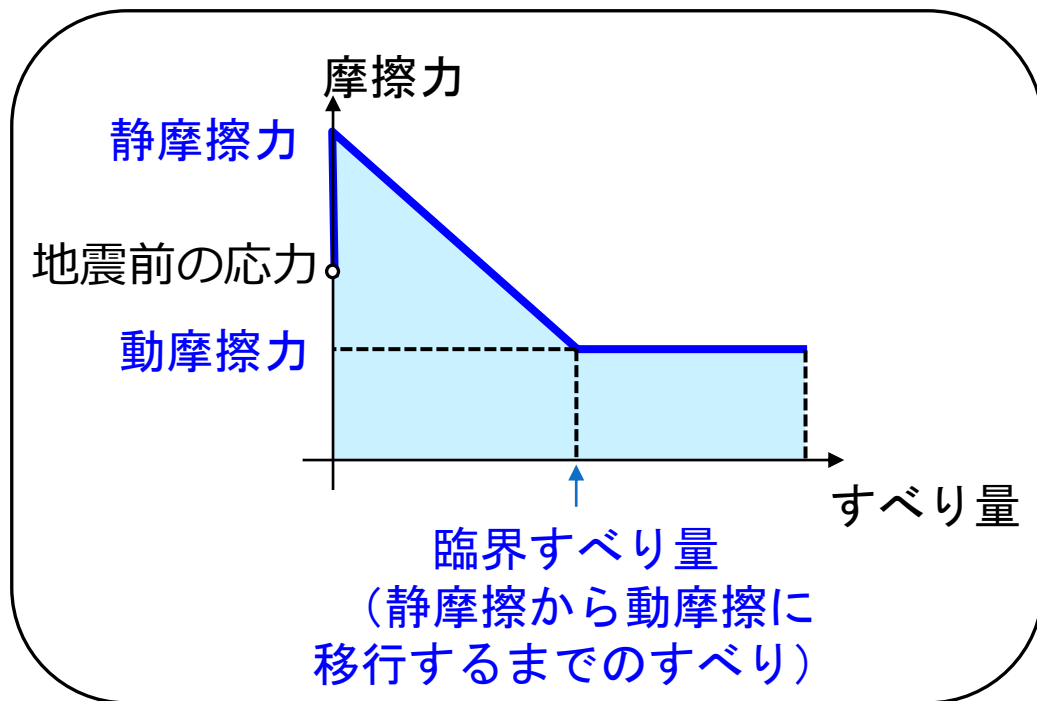
↓
地震シナリオ

- 世界で発生した大地震から
 - 地震時のすべりの発展
- シミュレーションから
 - 過去に起こった地震を再現する
- 岩石実験から
 - 岩石試料（数cm～数m）をすべらせる実験
 - 海底掘削で採取したプレート境界の試料

摩擦の性質は
すべて試みないと分からない
ことが困難

摩擦を地震シナリオに取り入れるには？

地震時に断層面に働く 摩擦力のモデル



青文字：摩擦の性質を表すパラメター

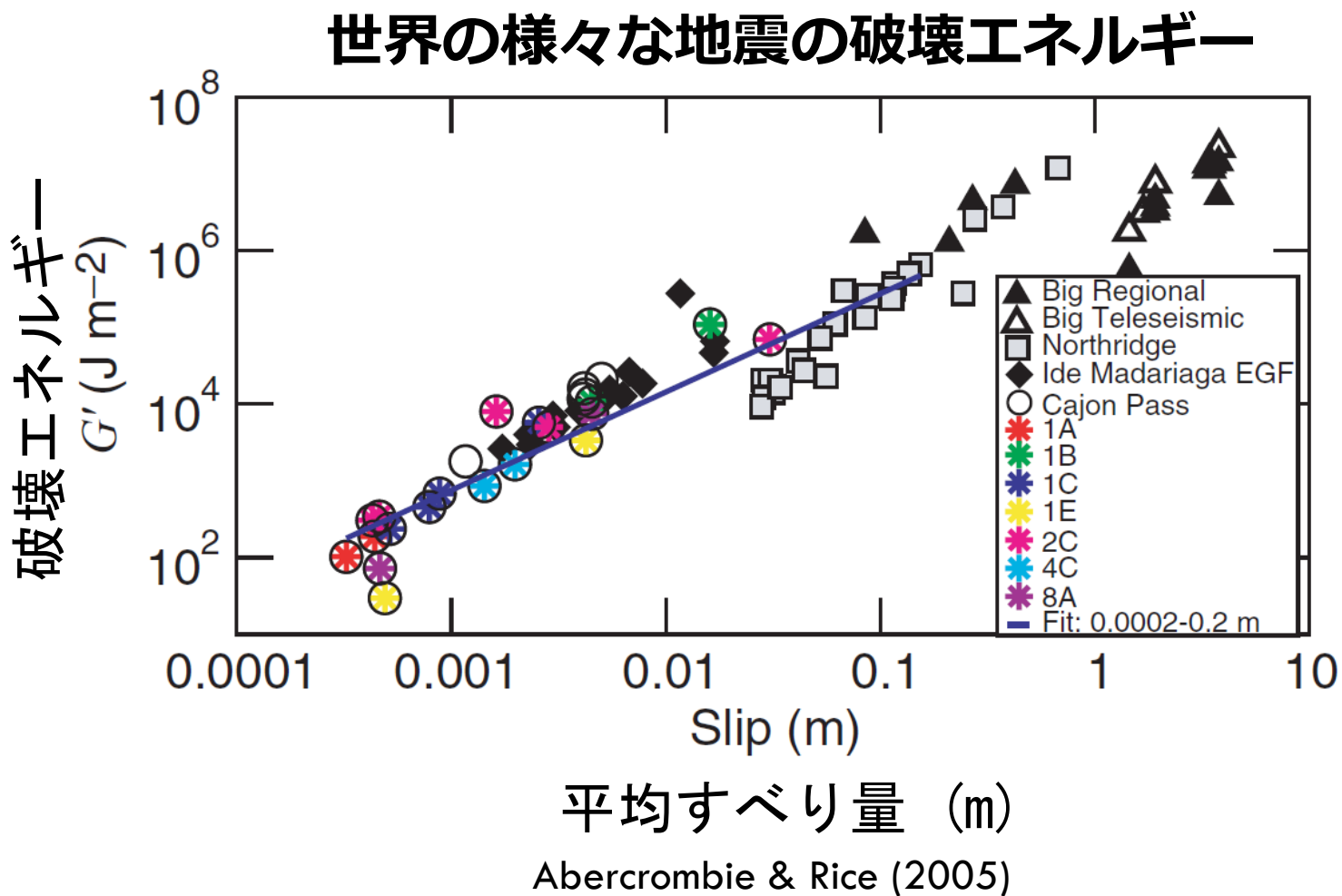
断層すべりの際に
摩擦に使われるエネルギー

破壊エネルギー

破壊エネルギーは比較的
安定的な推定が可能と言われている

地震シナリオへ

破壊エネルギーの性質



破壊エネルギーはすべり量に従って大きくなる性質を持つ



実際に地震が発生する
(すべる) 前に
大体の大きさを見積る

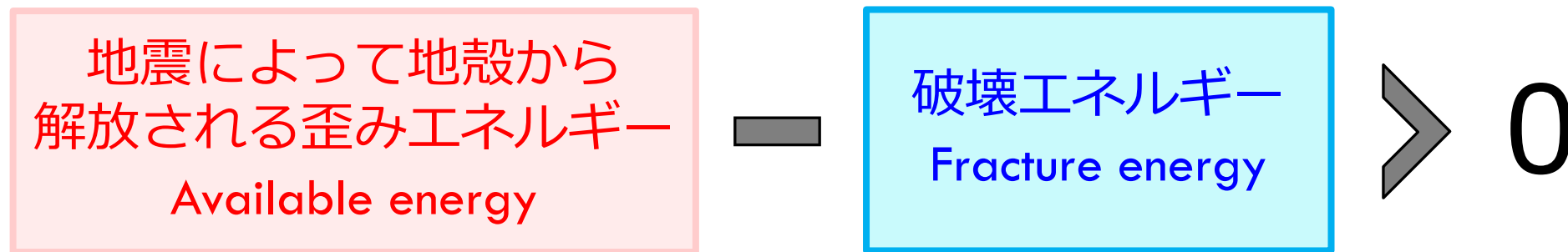
※ただし、そのバラつき
は非常に大きい

地震発生の必要条件

地震発生時のエネルギー保存則



残差エネルギー =



応力・すべり分布

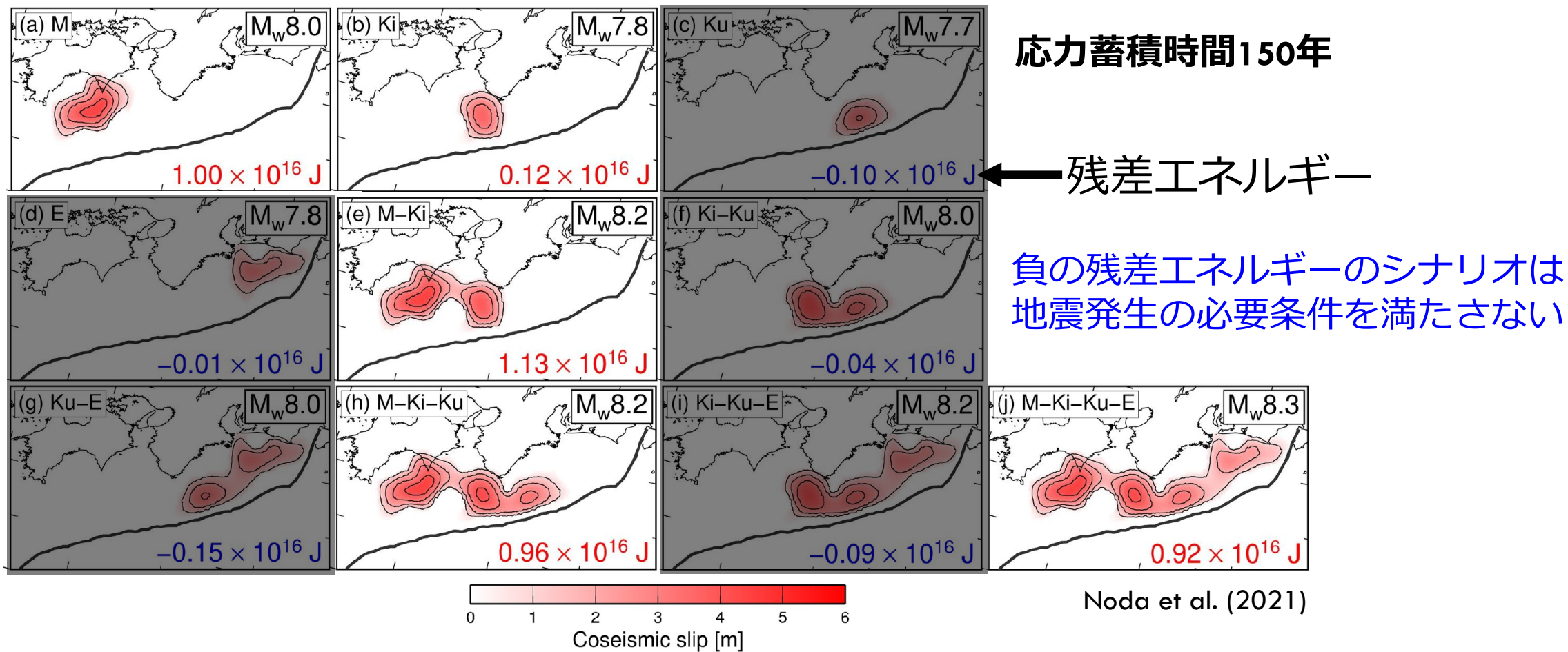
平均すべり量

地震シナリオ

地震発生の必要条件

地震発生に必要な条件の評価結果

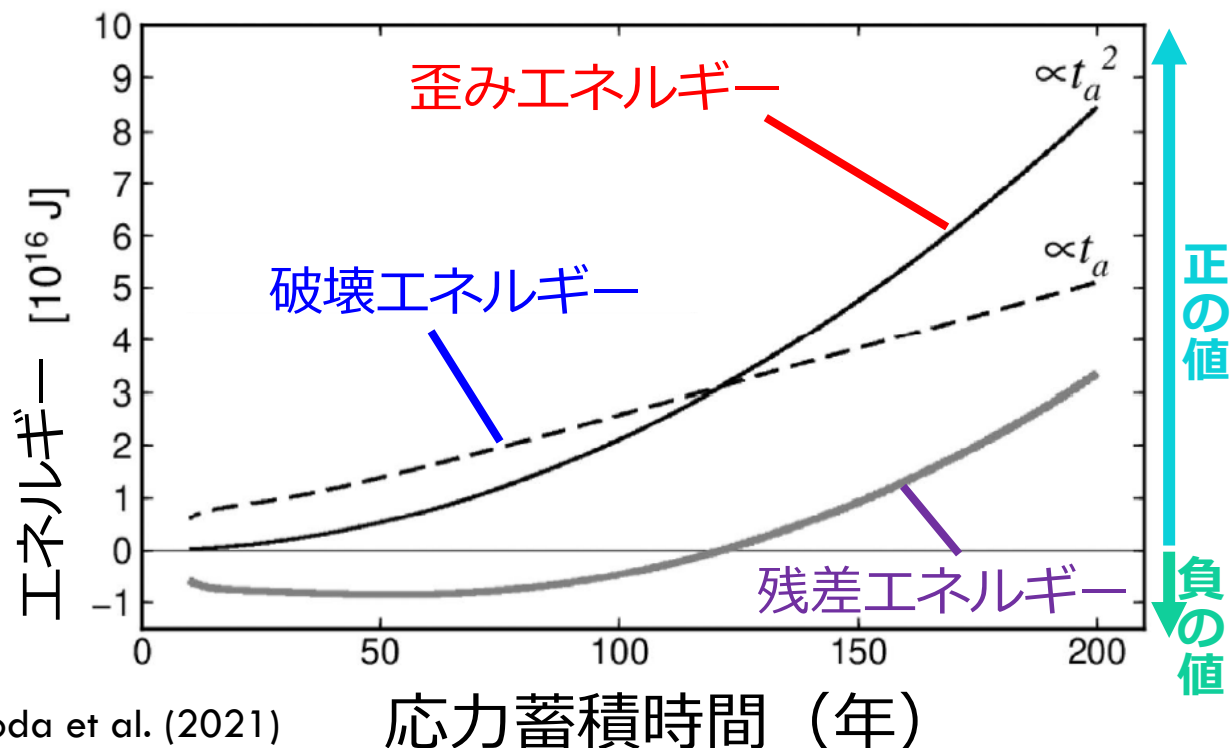
ある経験的なモデル (Hok et al. 2011) を用いて破壊エネルギーを算定



応力蓄積時間とエネルギー

応力を蓄積する時間が長くなるほど、解放される歪みエネルギーは大きくなる

地震シナリオ M-Ki-Ku-Eのエネルギー変化



- いずれ必ず地震発生の必要条件（**正の残差エネルギー**）を満たすようになる（地震発生の準備が整うまで、ある程度の時間がかかる）
- 残差エネルギーが正になった後、いつ地震が発生するかはわからない

残差エネルギーを用いた評価

- × いつ地震が発生するか？
- いつ「地震が発生してもおかしくない状態」になるか？

より現実的な地震シナリオ作成のために

今回紹介した地震シナリオは最終的なモデルではない。
今後も観測の情報等を取り入れて、より現実的なシナリオに改善していく必要がある。

応力

- 精度の良いすべり欠損の推定（特に海溝付近の観測密度）
 - 海溝付近の地震時すべりの予測に影響
- 長期的すべり欠損の時間変化の推定
 - 応力蓄積量の推定に影響（今回は応力増加速度一定を仮定）

摩擦力

- 現時点で得られる破壊エネルギーはバラつきが非常に大きい（「地震発生の必要条件を満たすようになる時期」を精度よく推定することは難しい）
 - 破壊エネルギーの地域性の調査等によるバラつきの軽減

まとめ

- 地殻変動観測網の充実、地震発生メカニズムの理解の進展により、プレート境界の固着状態の詳細な推定が可能になった。
 - 西南日本の地殻変動データを解析した結果、南海トラフ沿いに大きなすべり欠損が推定され、次の地震発生への準備が進んでいると考えられる。
- プレート境界のすべり欠損の推定結果に基づき、将来発生する可能性のある地震シナリオを作成する手法を開発している。
 - プレート境界地震の発生は、応力と摩擦力の相互作用に支配される。
 - すべり欠損からプレート境界に働く応力を推定し、将来発生する可能性のある地震シナリオを複数作成した。
 - 摩擦力を破壊エネルギーの形で考慮することで、いつ「地震が発生してもおかしくない状態」になるかを評価する手法を提案した。
- より現実に近い地震シナリオの作成を目指して、本研究で提示した理論的枠組みのもと、今後も応力や摩擦力の情報を更新していくことが重要。

引用文献

- Abercrombie, R. E., & Rice, J. R. (2005). Can observations of earthquake scaling constrain slip weakening? *Geophysical Journal International*, **162**, 406–424. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246x.2005.02579.x>
- Baba, T., & Cummins, P. R. (2005). Contiguous rupture areas of two Nankai trough earthquakes revealed by high-resolution tsunami waveform inversion. *Geophysical Research Letters*, **32**, L08305. <https://doi.org/10.1029/2004GL022320>
- Hashimoto, C., Noda, A., & Matsu'ura, M. (2012). The Mw 9.0 northeast Japan earthquake: Total rupture of a basement asperity. *Geophysical Journal International*, **189**(1), 1–5. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2011.05368.x>
- Hok, S., Fukuyama, E., & Hashimoto, C. (2011). Dynamic rupture scenarios of anticipated Nankai-Tonankai earthquakes, southwest Japan. *Journal of Geophysical Research*, **116**, B12319. <https://doi.org/10.1029/2011jb008492>
- 石橋 克彦, 佐竹 健治 (1998). 総合報告: 古地震研究によるプレート境界巨大地震の長期予測の問題点 -日本付近のプレート沈み込み帯を中心として-. 地震2, **50**(別冊), 1-21. https://doi.org/10.4294/zisin1948.50.appendix_1
- 地震調査研究推進本部 (2014)「地震がわかる！」 https://www.jishin.go.jp/main/pamphlet/wakaru_shiryo2/
- 文部科学省 (2004)「地震発生のメカニズムを探る」 https://www.jishin.go.jp/main/pamphlet/eq_mech/
- Noda, A., Saito, T., & Fukuyama, E. (2018). Slip-deficit rate distribution along the Nankai trough, Southwest Japan, with elastic lithosphere and viscoelastic asthenosphere. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, **123**, 8125–8142. <https://doi.org/10.1029/2018JB015515>
- Noda, A., Saito, T., Fukuyama, E., & Urata, Y. (2021). Energy-based scenarios for great thrust-type earthquakes in the Nankai trough subduction zone, southwest Japan, using an interseismic slip-deficit model. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, **126**, e2020JB020417. <https://doi.org/10.1029/2020JB020417>
- Yokota, Y., Ishikawa, T., Watanabe, S., Tashiro, T., & Asada, A. (2016). Seafloor geodetic constraints on interplate coupling of the Nankai Trough megathrust zone. *Nature*, **534**, 374–377. <https://doi.org/10.1038/nature17632>