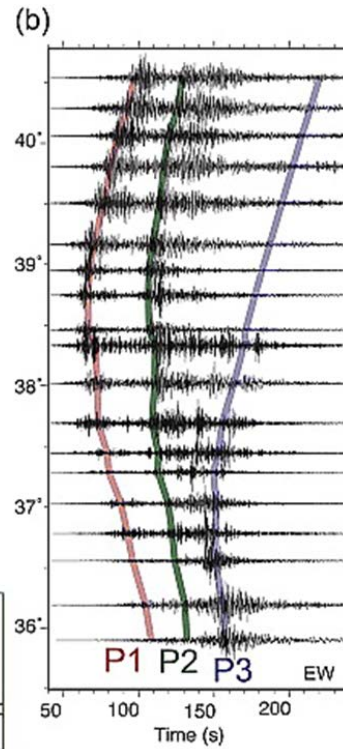
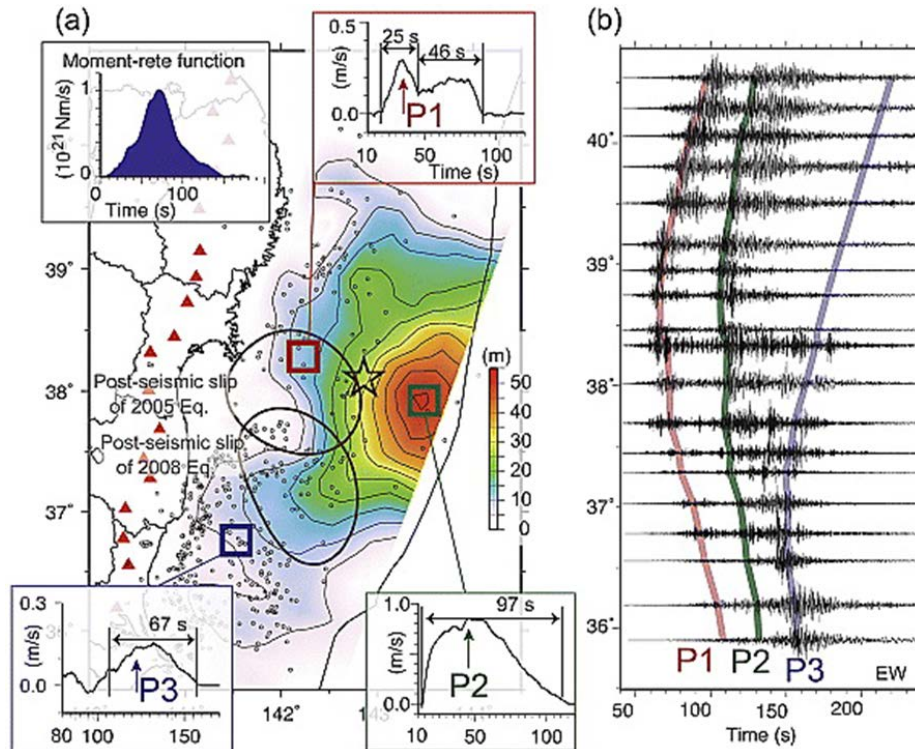


2011東北日本沖地震の 波形解析に現れた 海溝陸側斜面（三陸海底崖） の地滑り

戎崎俊一
理研

Yagi and Fukahata 2011による波形解析



- 主に3つの波

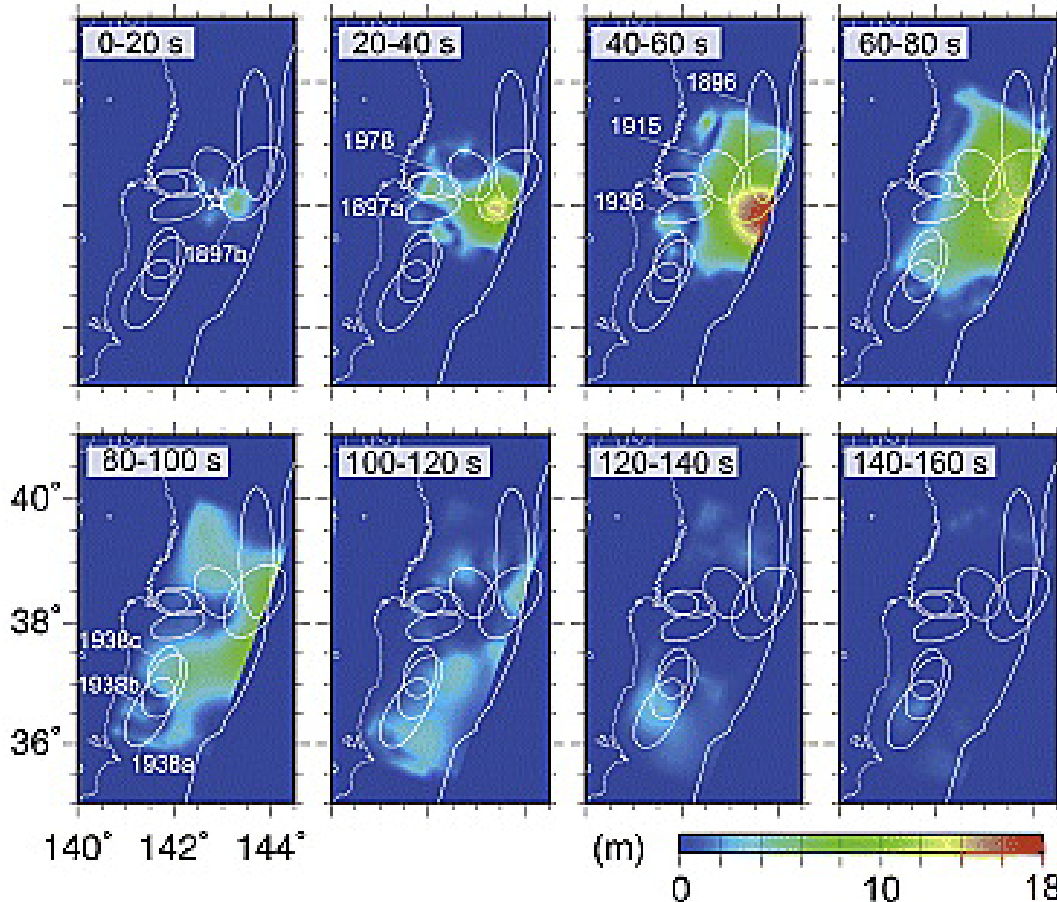
- P1: 震源域

- P2: 震源域の東方80km

- P3: 震源域の南西150km

- P2が永く続く (100秒)

断層すべりの伝搬



➤ 0 – 20秒

震源域：すべり量～3-4m

➤ 20 – 40秒

海溝陸側斜面で > 10m

➤ 40 – 60秒

海溝陸側斜面でのみ

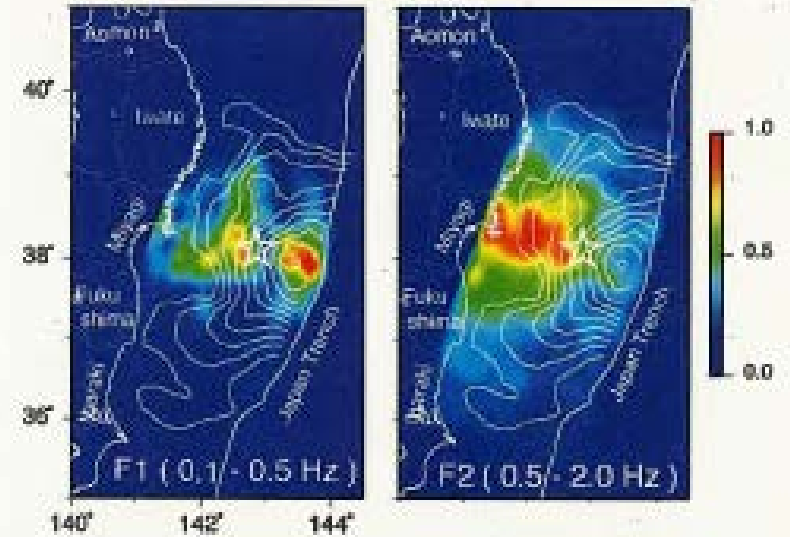
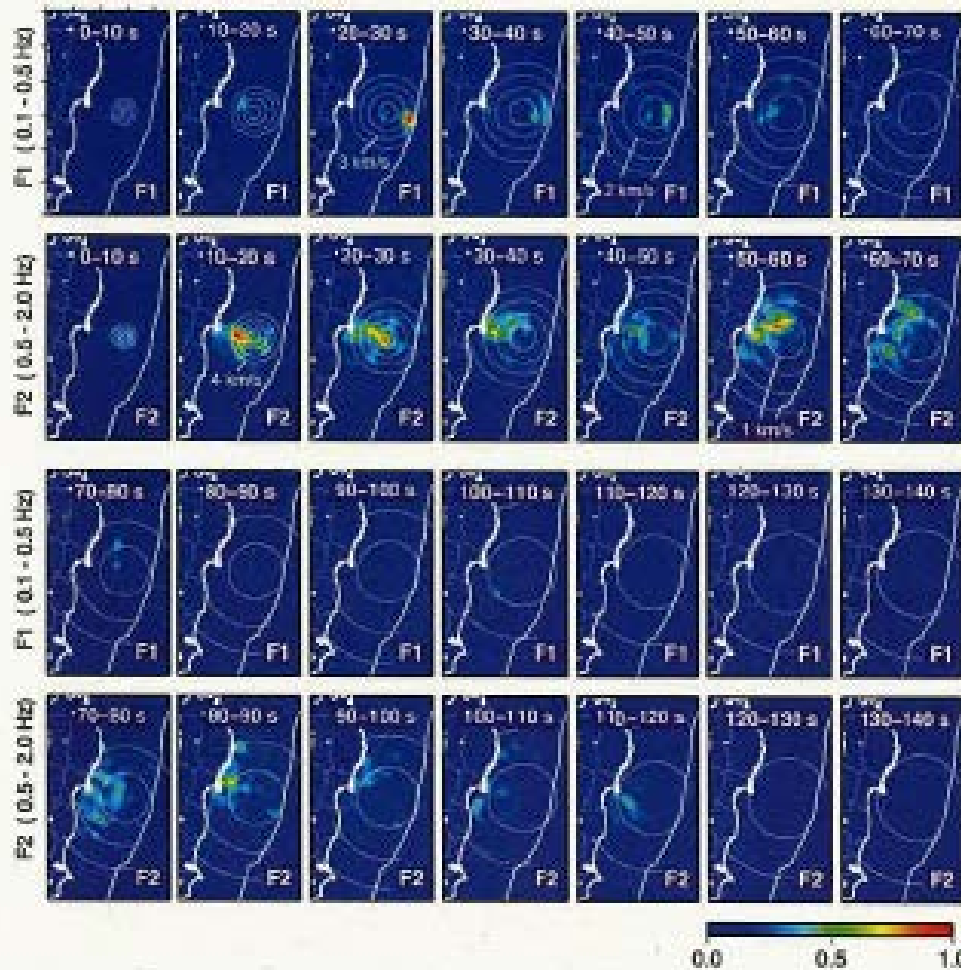
すべり量拡大 > 20m

震源域ではすべり収束

➤ 60 – 120秒

南側へ海溝陸側斜面に沿って
すべり領域が拡大

Yagi et al. 2012, Earth and Planetary Science letters, 355-356, 94-101



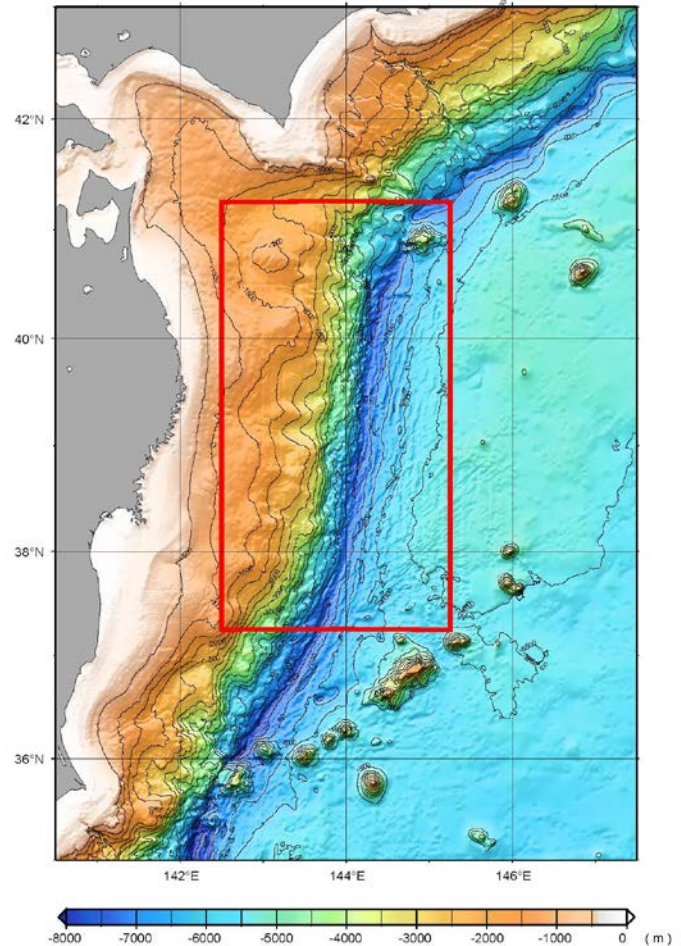
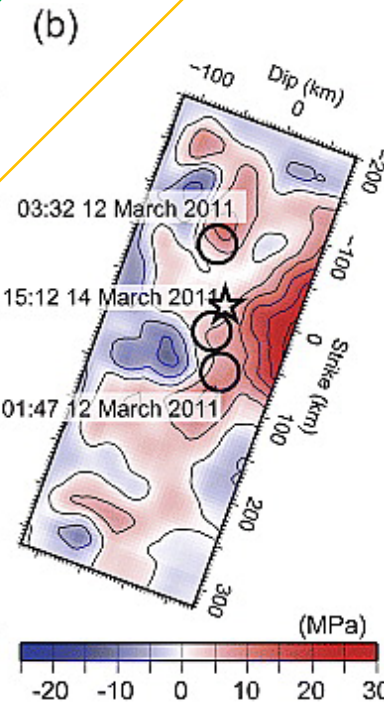
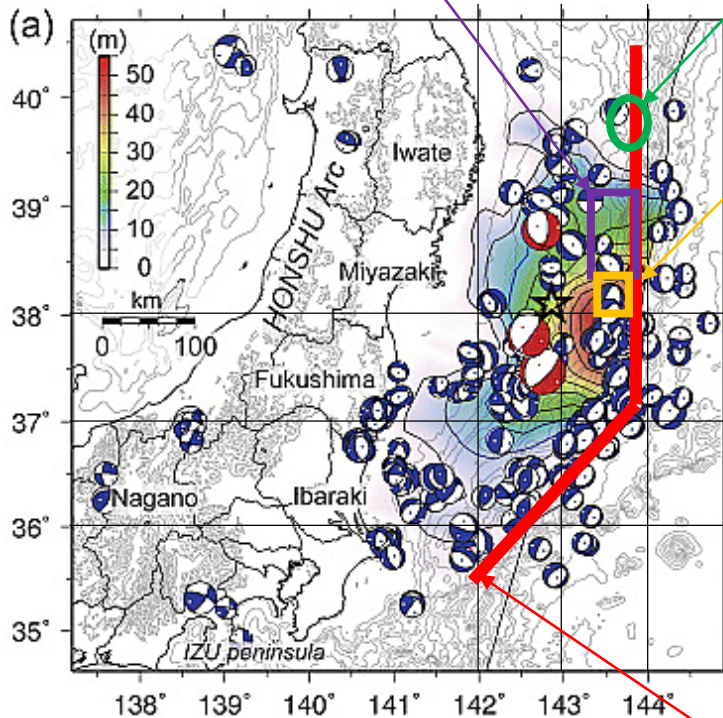
P2成分は低周波成分 (0.1-0.5Hz) にもみ現れる

断層すべり量、余震震源 海溝陸側急斜面の地滑り跡

Kawamura et al 2011

Tappin et al. 2014

Fujiwara et al 2011



海溝陸側急斜面

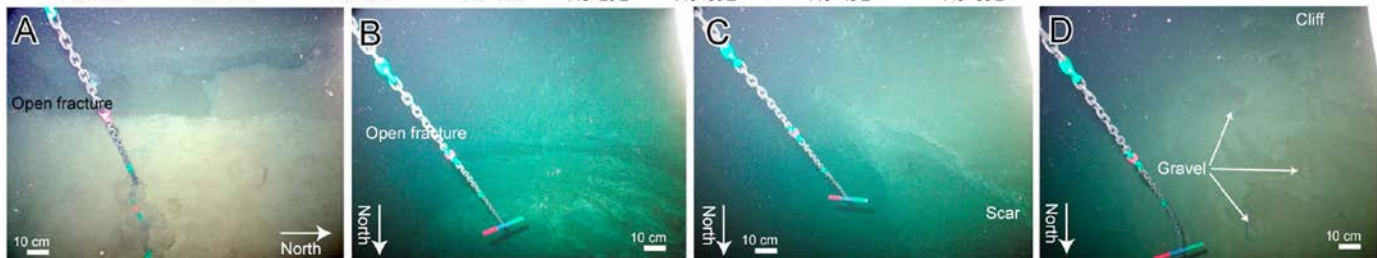
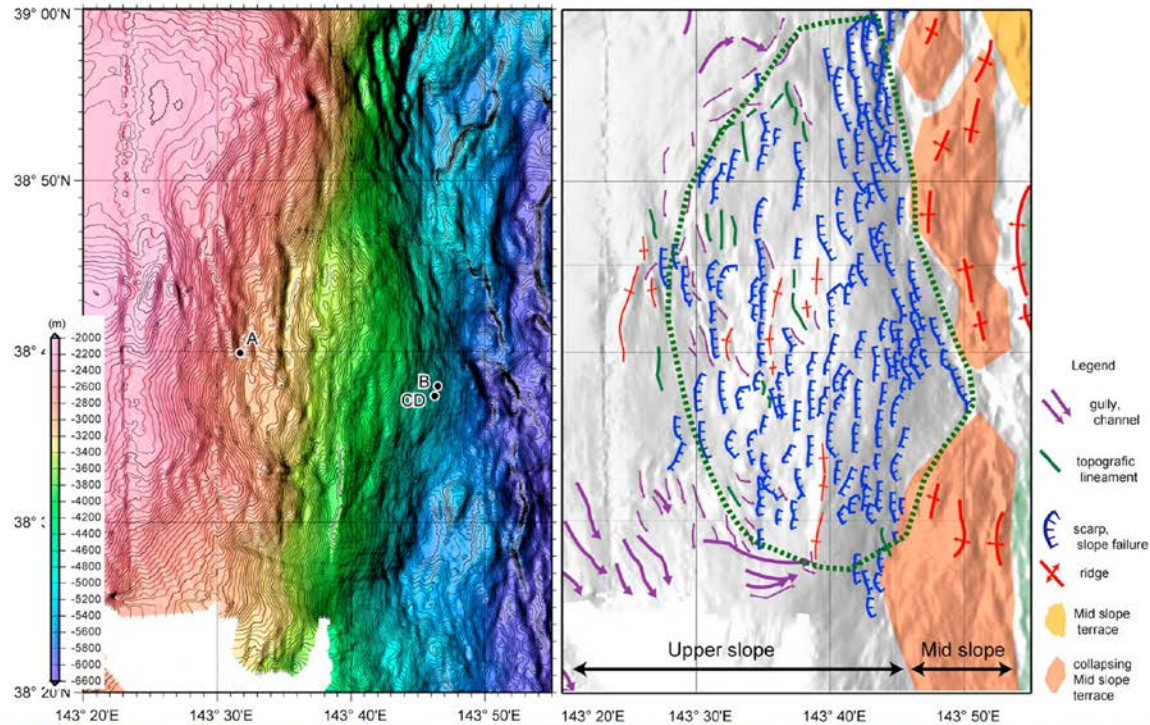
Yagi and Fukahata, 2011, GRL, 38, L19307

Sasaki 2003

不思議な伝搬

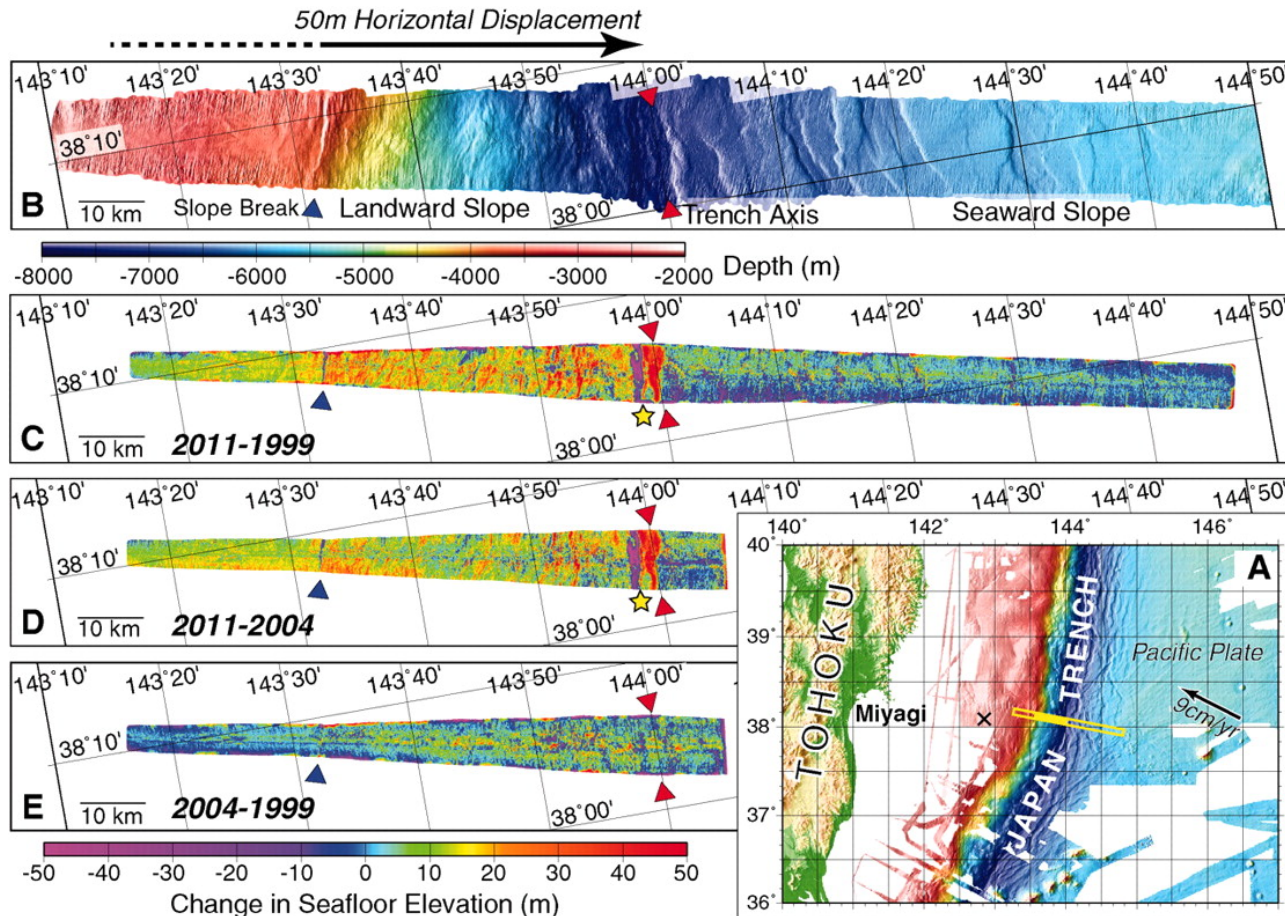
- P1よりP2の方が積算移動量が**10倍大きい**。
 - P1領域よりP2領域のほうに歪みエネルギーが蓄積していた？
→P2領域で破壊が始まるべきだが、そうはならなかった。
 - P2領域に別の形のエネルギー源があると考えべき。
 - P2領域は海溝陸側の急斜面（三陸海底崖）に対応している。
- **P2は地滑り起源**ではないか？
 - マグニチュード→エネルギー
 - ◆ $\text{Log}_{10} E = 4.8 + 1.5M$
 - ◆ $M = 9 \rightarrow E = 2.0 \times 10^{18} \text{ J}$
 - 重力エネルギー
 - ◆ $V = 50\text{m} * 100\text{km} * 100\text{km} = 5 \times 10^{11} \text{ m}^3$
 - ◆ $M = V * \rho = 5 \times 10^{11} \text{ m}^3 * 1000 \text{ kg/m}^3 = 5 \times 10^{14} \text{ kg}$
 - ◆ $E = M * h * g = 5 \times 10^{14} \text{ kg} * 1000 \text{ m} * 9.8 \text{ ms}^{-2} = 4.9 \times 10^{18} \text{ J}$
 - モーメントマグニチュード→モーメント
 - ◆ $\text{Log}_{10} M_0 = 9.1 + 1.5M_w$
 - ◆ $M_w = 9 \rightarrow M_0 = 4.0 \times 10^{22} \text{ Nm}$
 - ◆ 上部マントルの弾性率: $\mu = (3-6) \times 10^{10} \text{ N m}^{-2}$
 - ◆ 面積 * 変位 = $6.7 \times 10^{11} \text{ m}^3$
 - 概ね整合的

Kawamura et al. 2012の地滑り

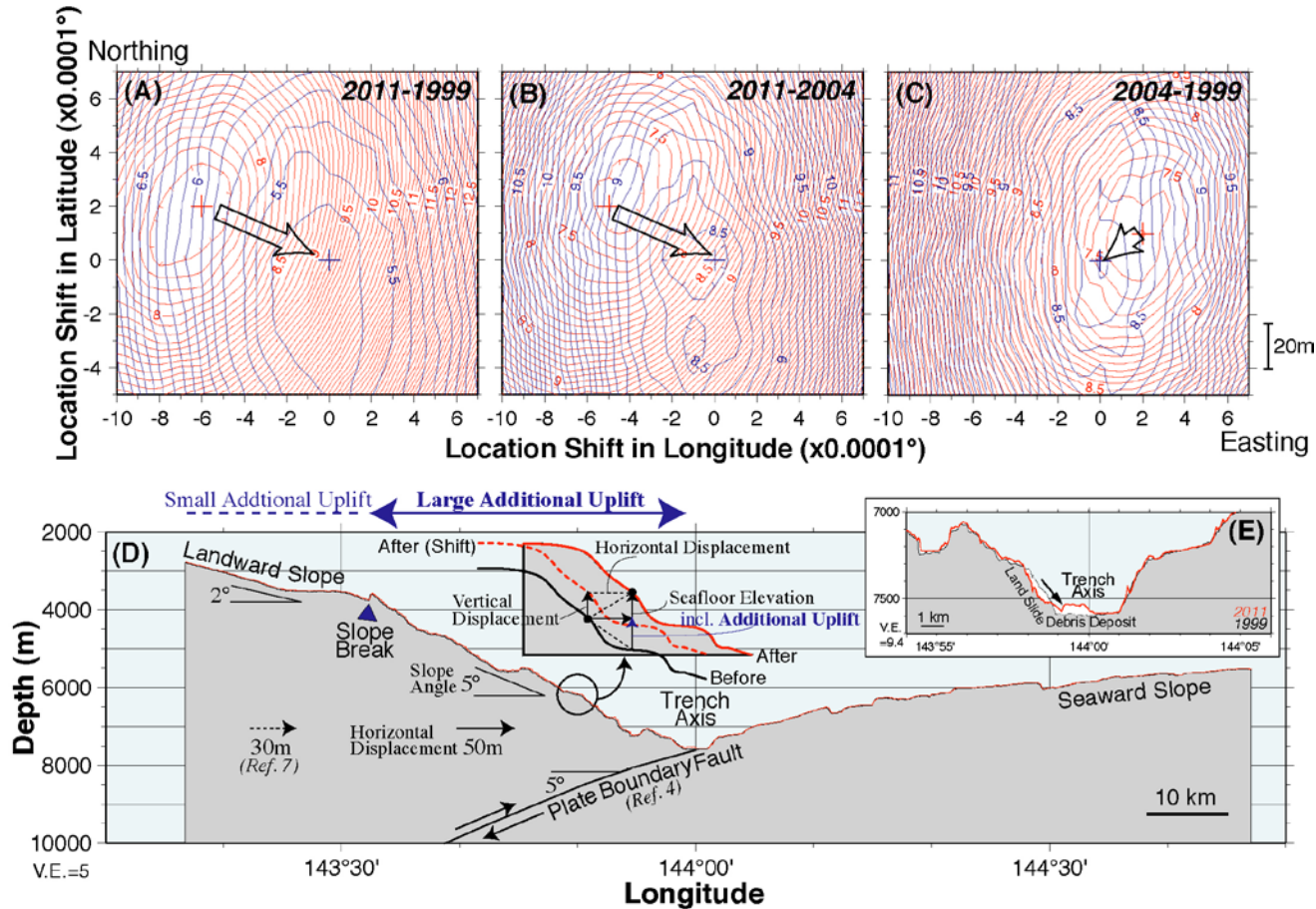


$\Delta h \sim 40\text{m}$ の水深変化

Fujiwara et al 2011, Science, 334, 1240

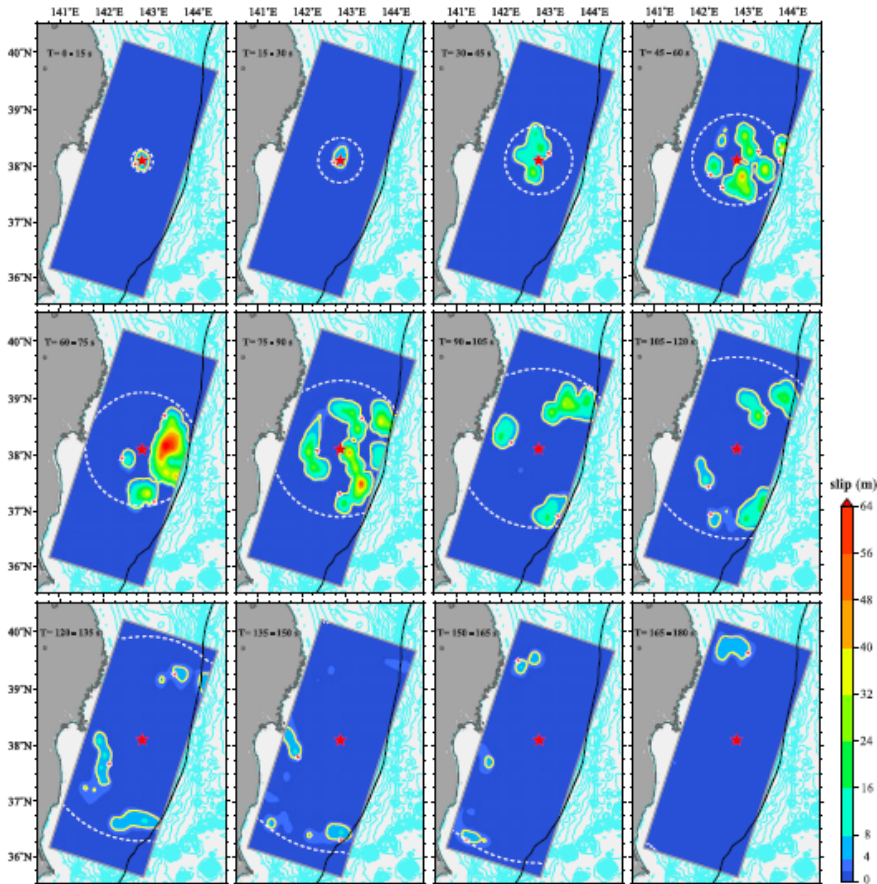


海底地滑り



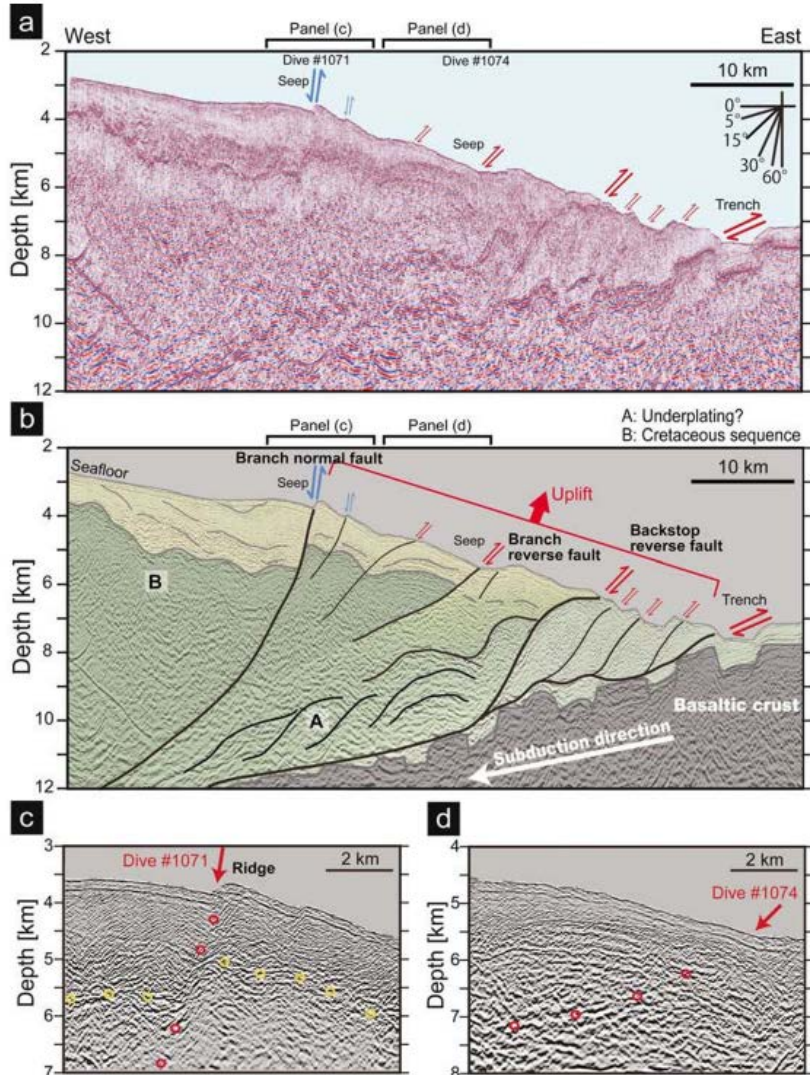
Fujiwara et al 2011, Science, 334, 1240

Shao et al. 2011, Earth Planets Space, 63, 559-564



- 三つの波源 (P1,P2,P3) が見える
 - P2: NTA (near trench asperity)
 - P3: MA (mantle asperity)
- Asperityが歪みエネルギーを蓄積！
 - 体積あたり100倍以上の歪みエネルギー
 - そのメカニズムは？？？
- Asperity仮説に実体はあるか？
 - Asperityの一部は表面に露出
 - NTAは地滑り仮説で代替できそう

Tsuji et al 2011、Earth Planets Space, 63, 831-834



➤ 楔形領域の衝上断層運動

➤ ここは急崖地帯

$\alpha = 10-15^\circ$ の急崖

定常的に崖崩れ地帯

Sasaki 2003

➤ 衝上断層運動は必ず地滑りを引き起こす



断層運動か地滑りかを二者択一で議論するのは生産的でないと思われる

スプレー断層形成・ 液状化・地滑り

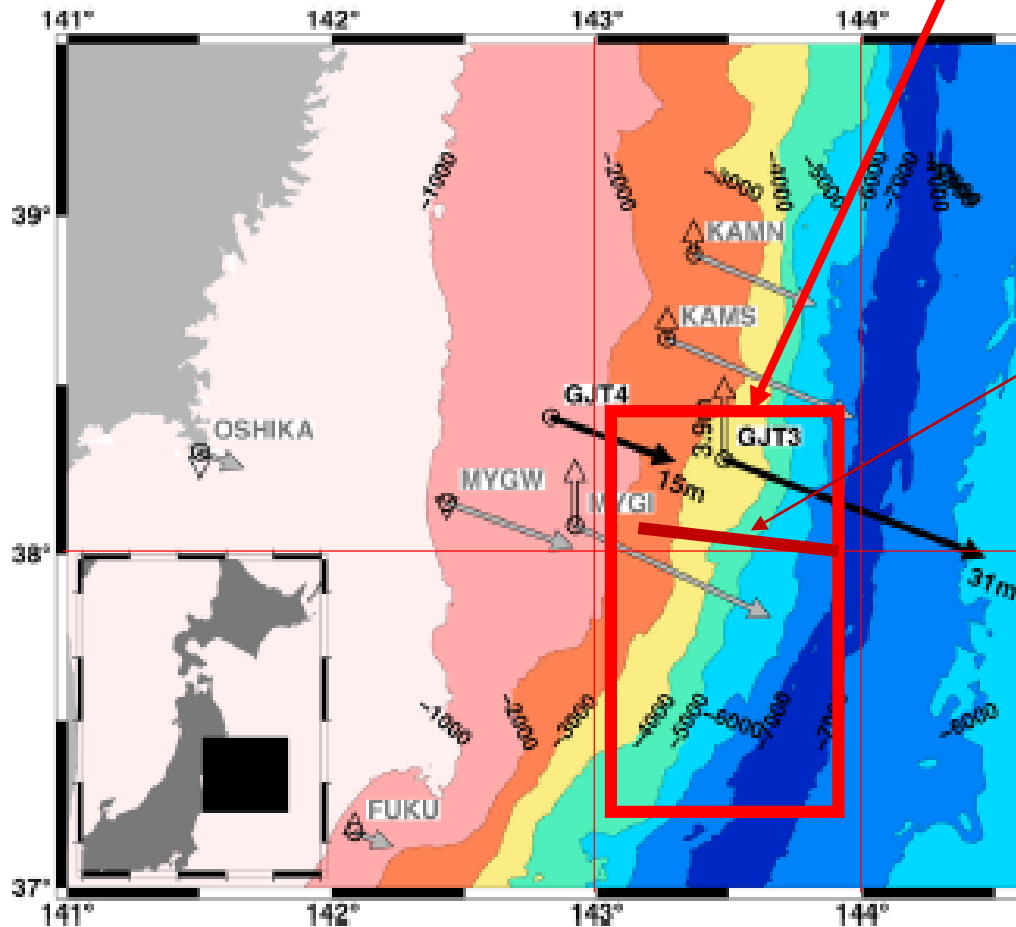
- 表面非線形破壊現象の三つの断面
 - 一体として捉えるべき
- 液状化による掘り起こし
 - 表面物質の見かけの体積は数倍増加する
 - 地滑り地形の同定に注意を要する
- 場合によって三者の強弱が違
 - YagiFukahata領域：三者一体の大規模地滑り
 - Tappin et al./Kawamura et al.:液状化と地滑り
 - 海溝陸側斜面のいたるところで斜面崩壊
 - 異常な高さと継続時間の津波

Ide et al. 2011

- Amplified motion of the hanging wall near Earth's surface is a feature expected for rupture propagation on a thrust fault with **dynamic overshoot (shear stress reduction below dynamic friction)**, as demonstrated by numerical simulations with a free surface

Kido et al. 2011, GRL, 38, L24303

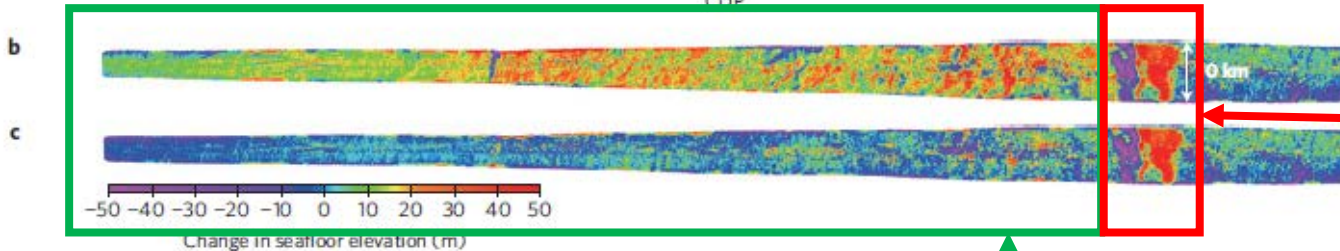
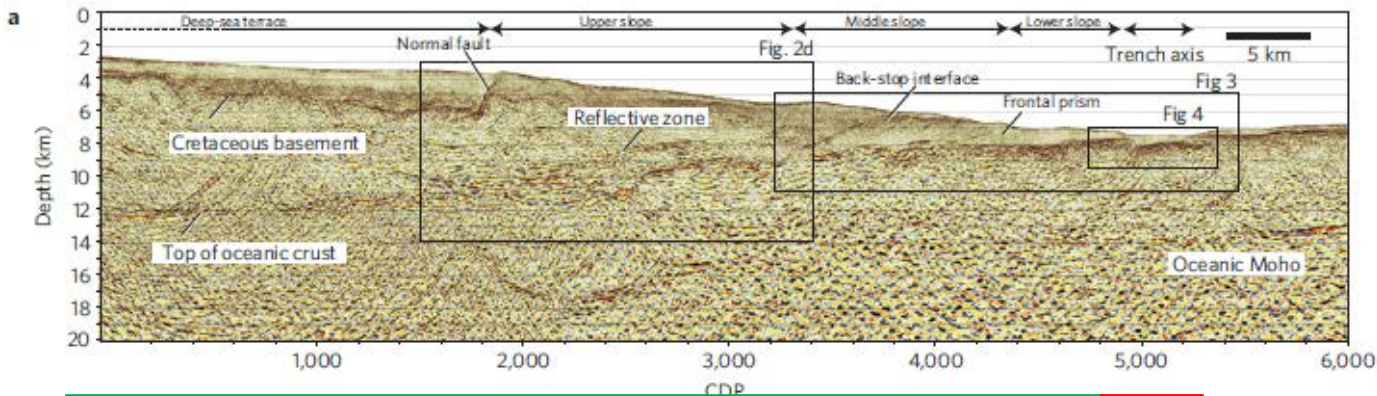
Yagi and Fukada, 2011, GRL, 38, L19307



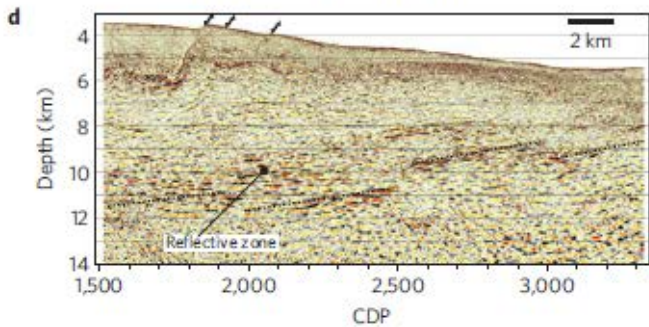
Kodaira et al.
2012, nature
Geoscience, 5,
646-650

GPS-acoustic sites movement: 31 m horizontal/3.9m vertical (up)

2011東北沖地震前後の地形変化 Kodaira et al. 2012



全面破壊
オリストローム型？

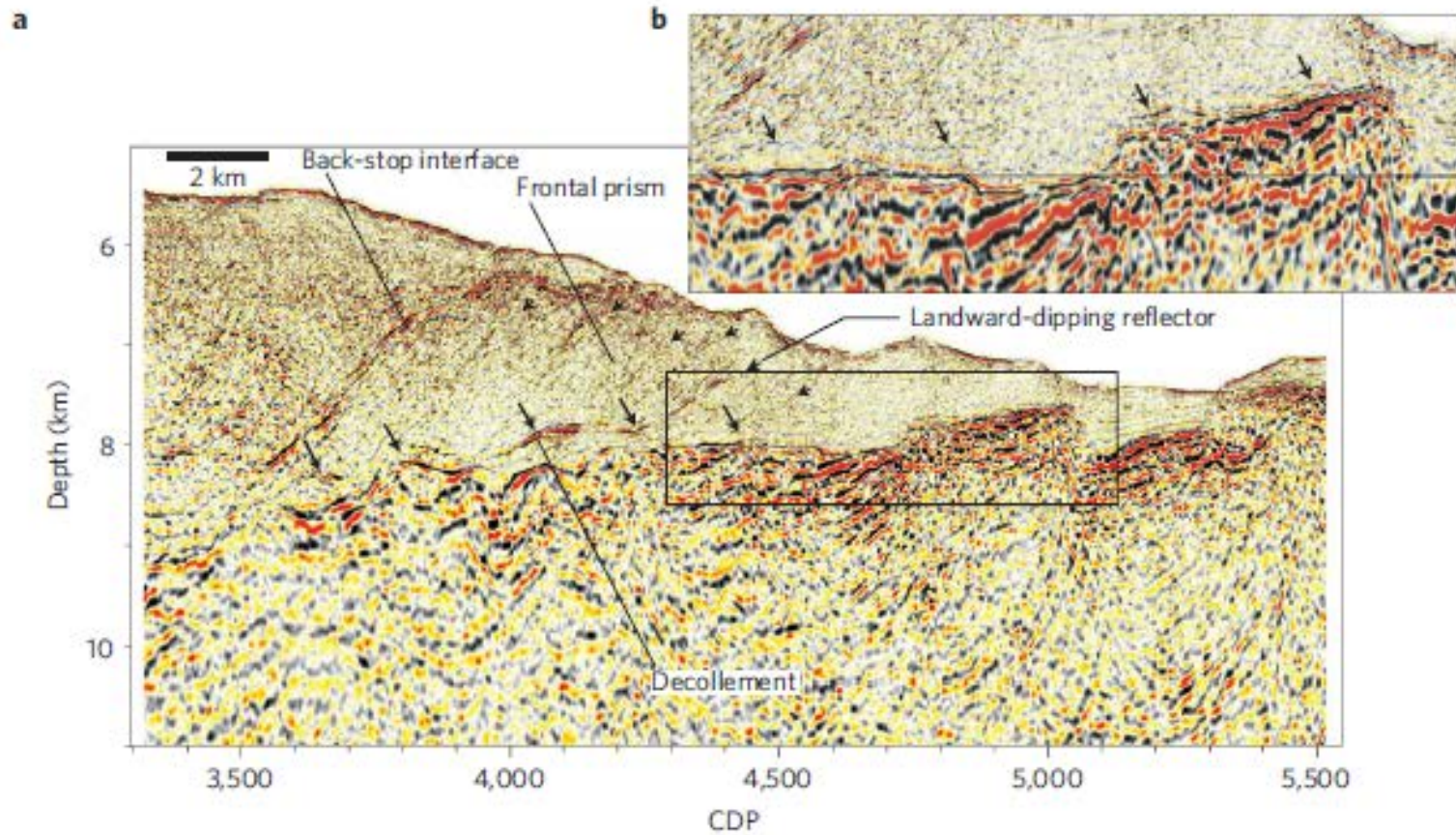


Shift after earthquake bathymetry:
horizontally landward by 50 m
vertically downwards by 10m

地盤が全体に
海側へ50m ←地滑り（液状化型）
上に10m動いた ←？

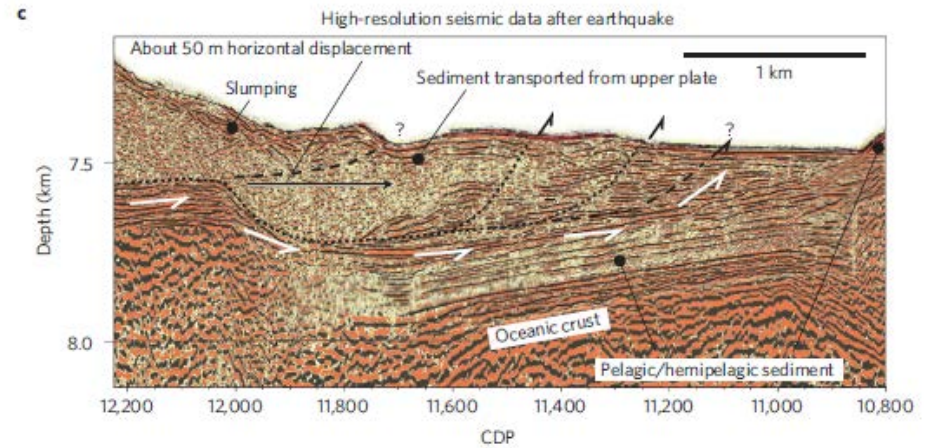
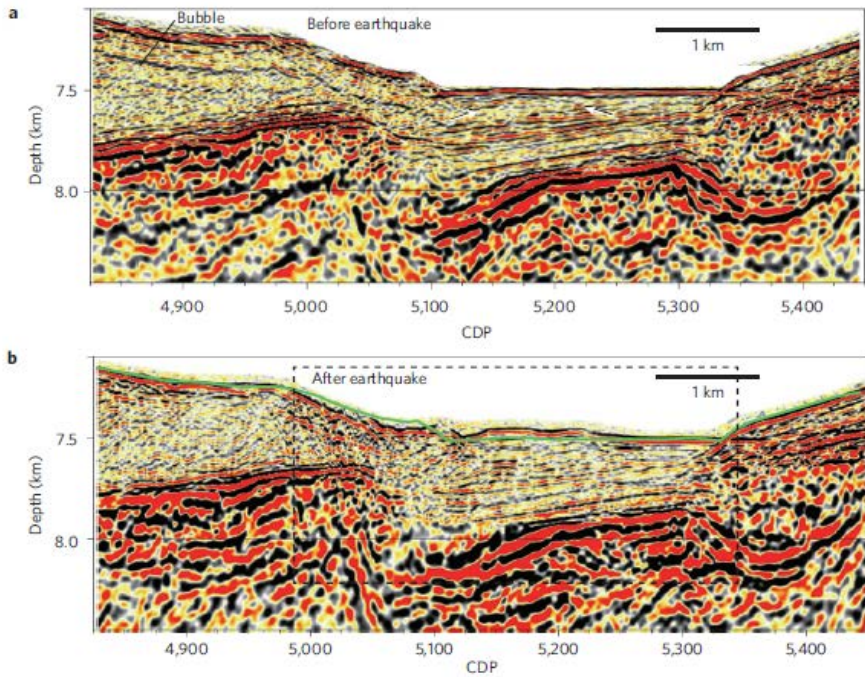
2011東北沖地震前後の地形変化

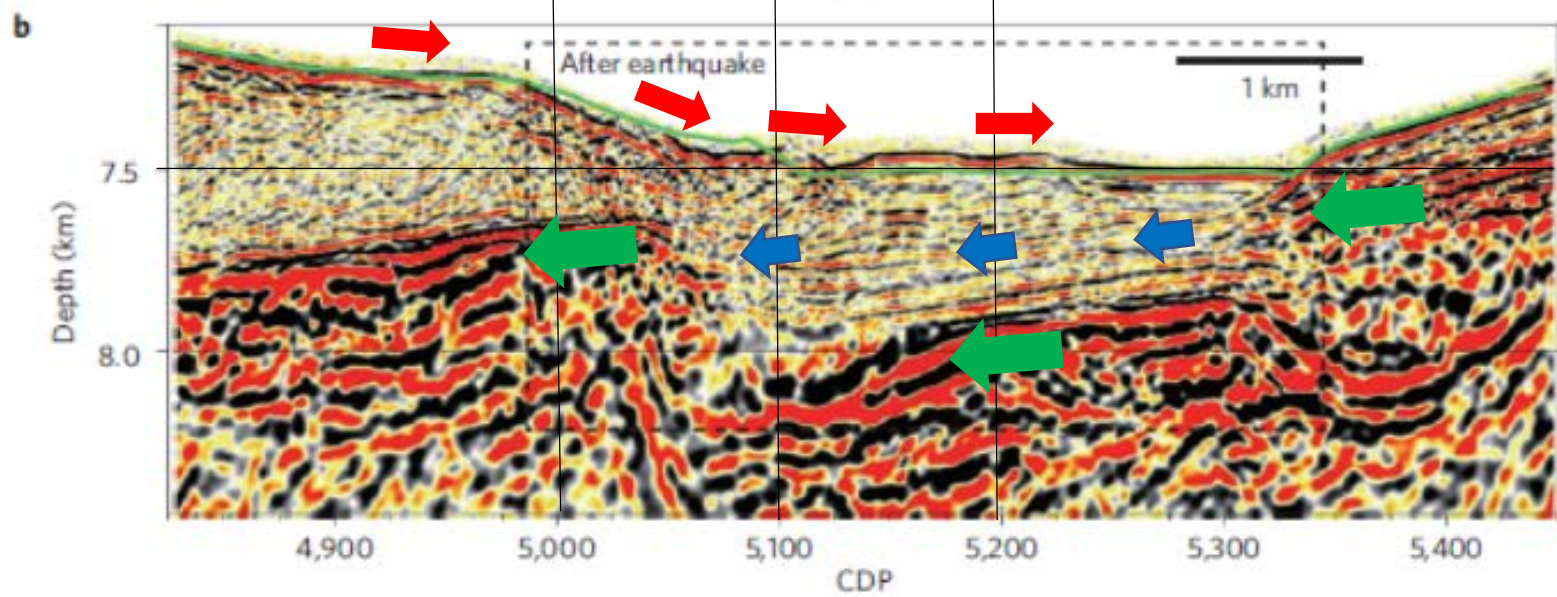
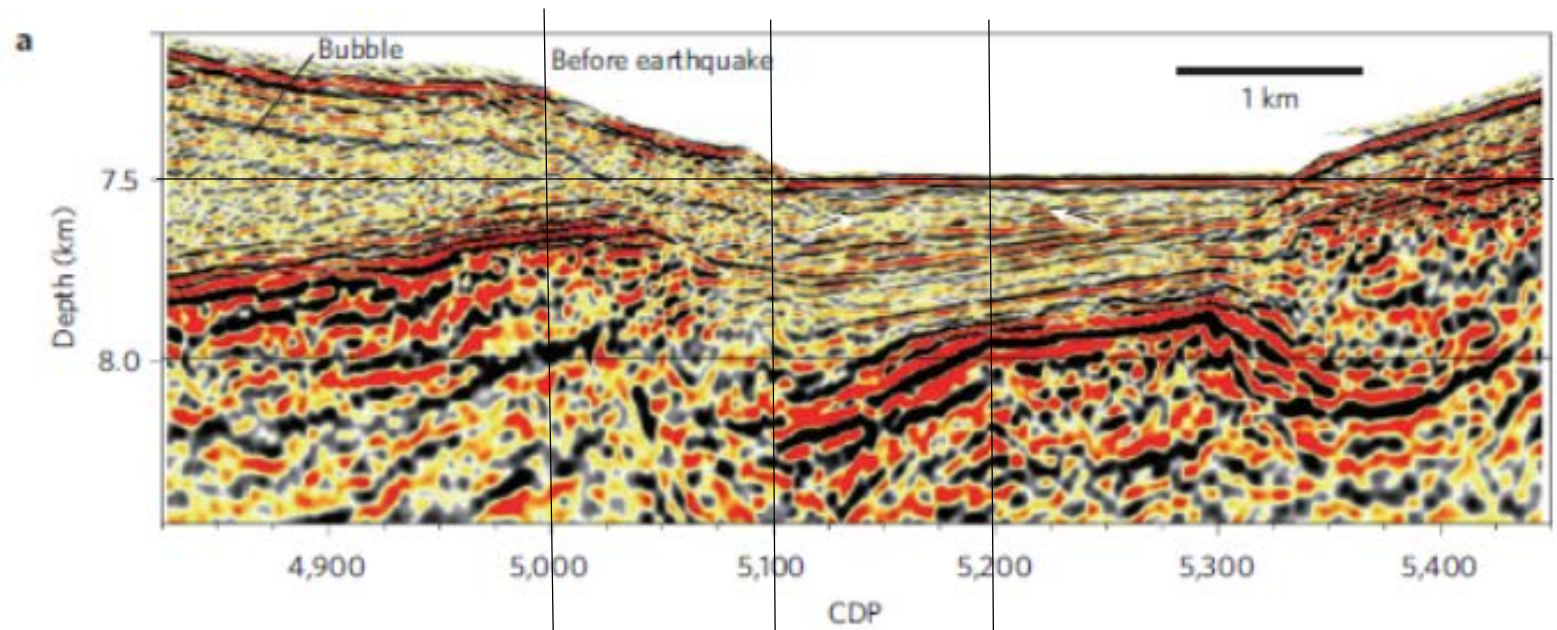
Kodaira et al. 2012



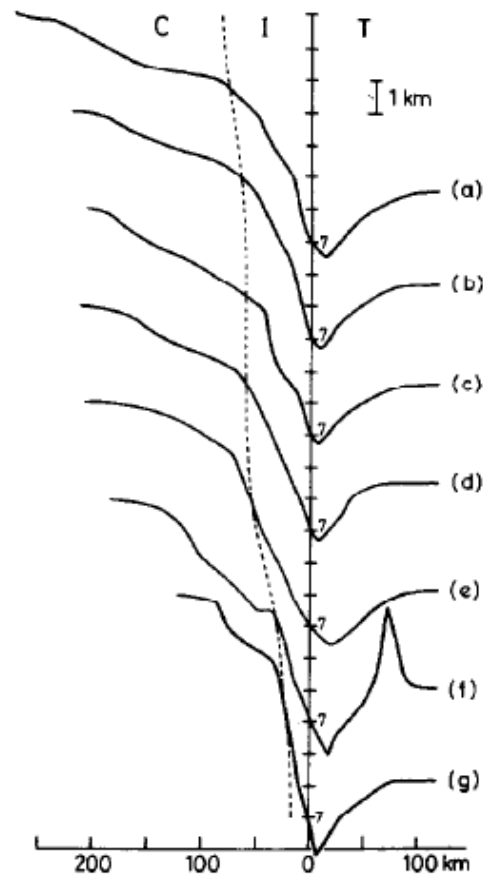
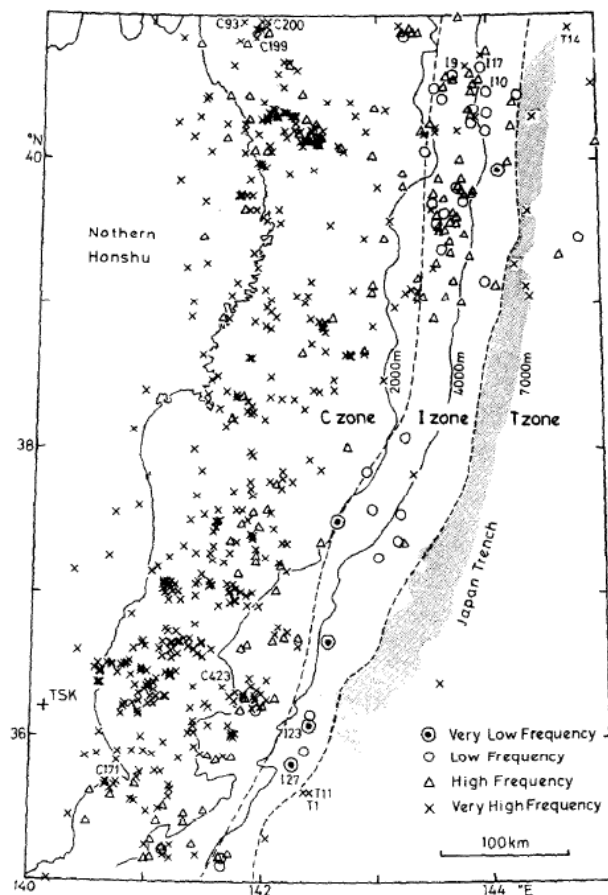
2011東北沖地震前後の地形変化

Kodaira et al. 2012





津波地震（低周波地震） は海溝陸側斜面に集中



Fukao and Kanjo Tectonophysics, 67, 153-162

Fukao and Kanjoによる 低周波地震の定義

(1) They occur in the vicinity of deep-sea trenches. Focal depths are extremely shallow and probably less than 10 km.

(2) The first arrival cannot be read clearly and the amplitudes increase only gradually with time. Wave periods are apparently very long and surface waves are well excited. Total duration of the oscillation is also long.

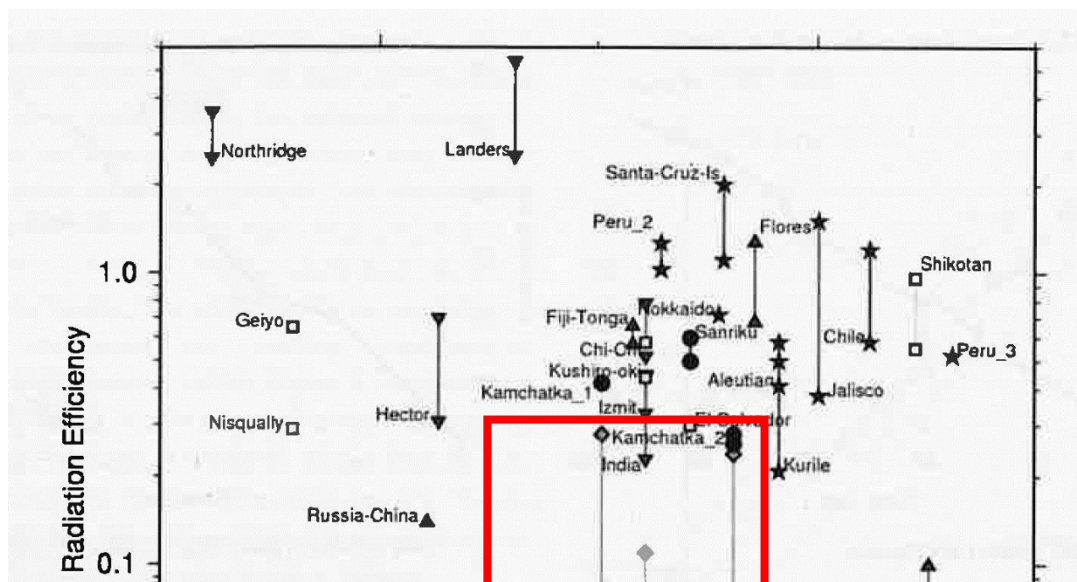
(3) Earthquakes are felt only weakly and slowly although they have large magnitudes.

(4) They often occur as a swarm.

(5) They are sometimes associated with unexpectedly extensive tsunamis.

地震波の放射効率

- 津波地震の放射効率は全部低い (0.04-0.002)
 - 物理過程が違うことを示唆
- 周期20秒以下の地震波によるマグニチュードは7.5で飽和する。
 - より大きな地震では周波数スペクトルのピークが20秒以上になるから
 - これは破壊領域が長大であることでは説明不可
 - 物理過程が違うことを示唆



モーメント・マグニチュード (金森スケール)

$M_w > 8.5$ の津波地震

二次的な海底地滑りによる地震波を含んでいる！？

- 地震波の放射効率が低い
- 地震波スペクトルのピークが低周波にシフトする
- 断層運動のみでは $M_w \sim 8$ まで
- 地滑りによる強化で $M_w \sim 9$ の巨大地震が作られる？

結論

- 2011東北日本沖地震の異常な断層運動
 - アスペリティによるエネルギー蓄積で説明されてきた
 - 三陸海底崖における地滑りでも説明できそう
 - **どちらが物理的に自然かを考えるべき**
- スプレー断層形成・液状化・地滑り：
 - **表面破壊現象の三断面**で一体として考えるべき
 - オリストストローム形成論：巨大地滑りの化石？
- モーメントマグニチュード：
 - 地滑りによる地震波成分を含んでいる
 - 断層運動による地震は $M_w \sim 8$ ぐらいまで
 - 巨大地震（ $M_w \sim 9$ ）は地滑りで強化されたもの？**

Kodaira et al. 2012 SOM

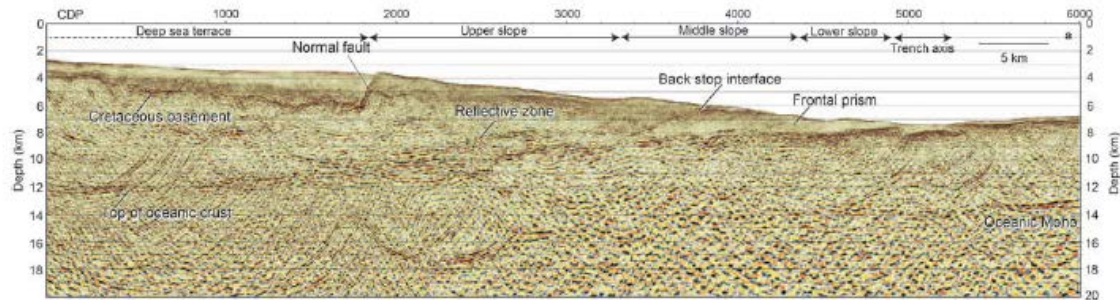


Figure S1

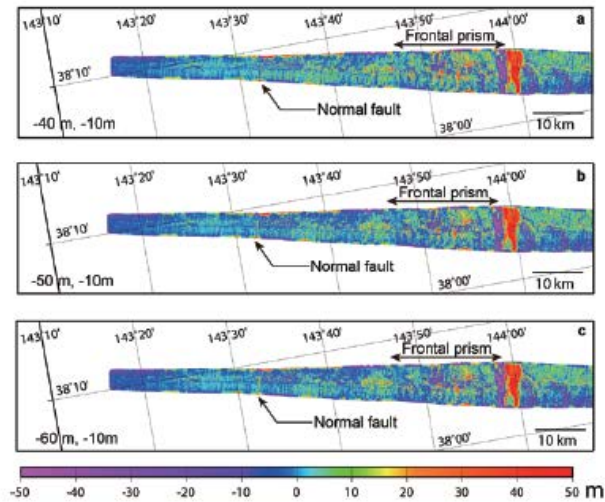
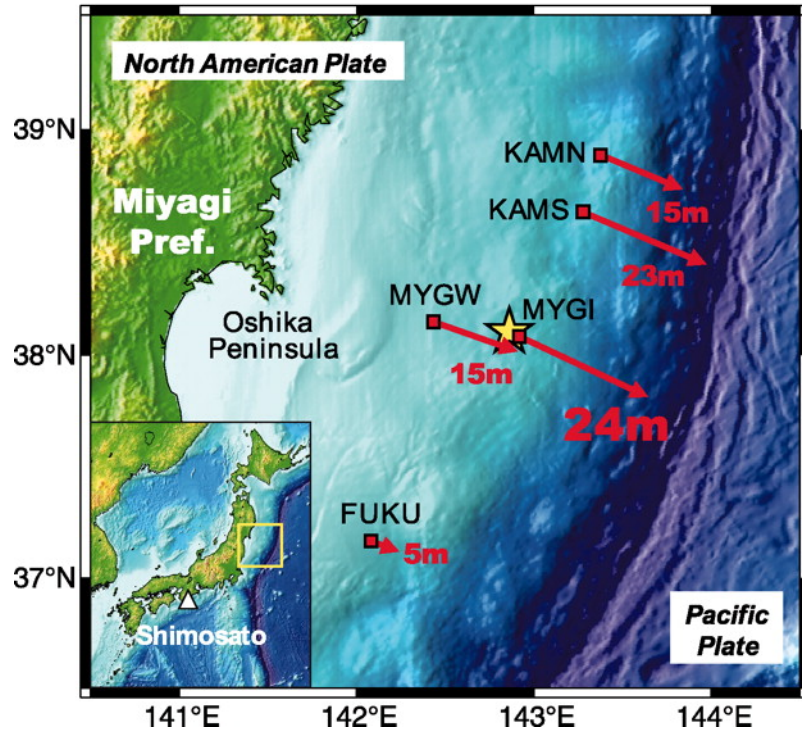


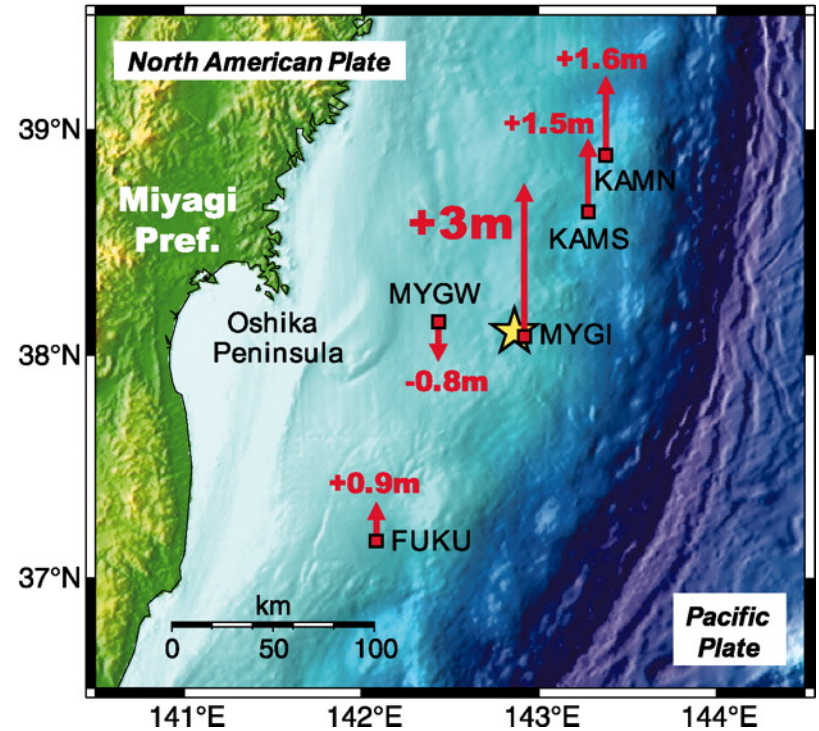
Figure S2

Fig. 1 Horizontal (A) and vertical (B) coseismic displacements at the sea-floor reference points, associated with the 2011 Tohoku-Oki earthquake.

A Horizontal displacements

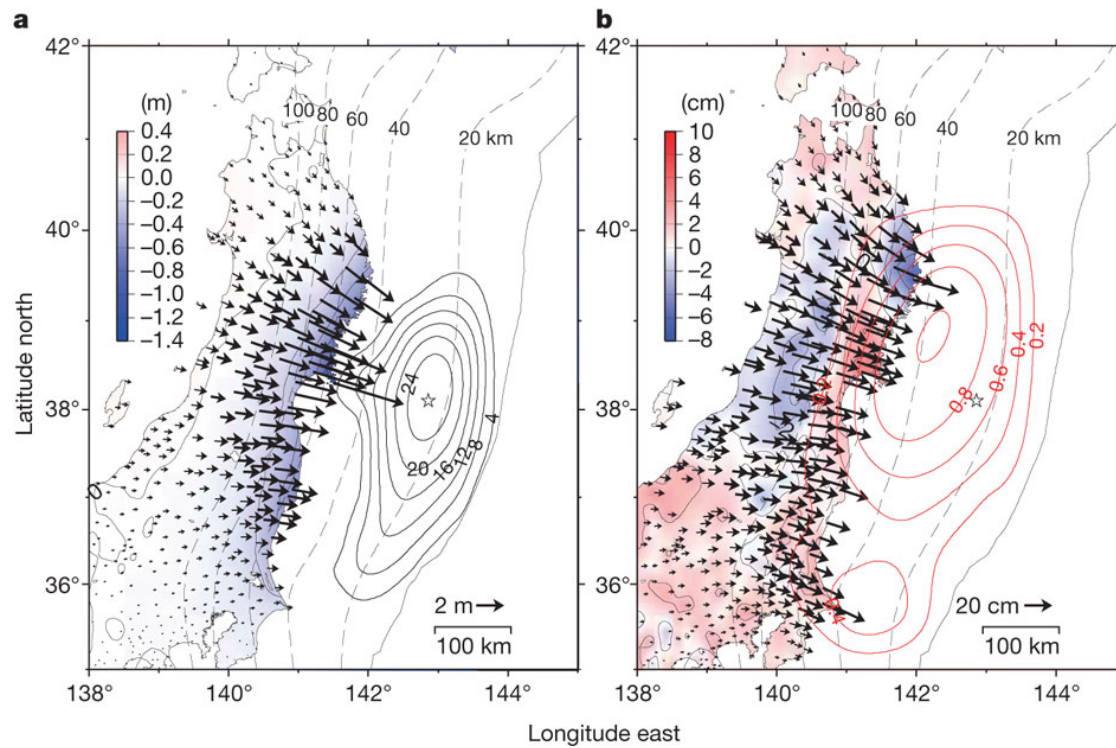


B Vertical displacements



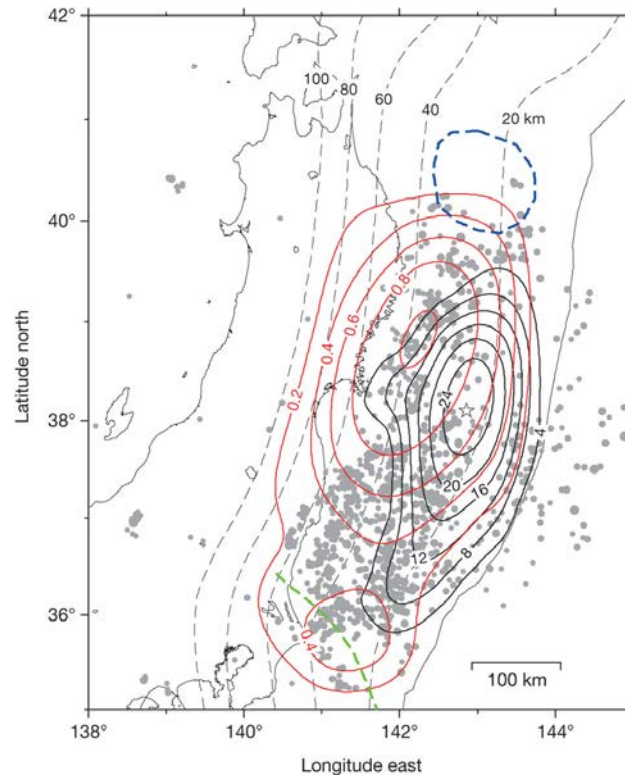
Mariko Sato et al. *Science* 2011;332:1395

Coseismic and postseismic displacements and estimated slip.



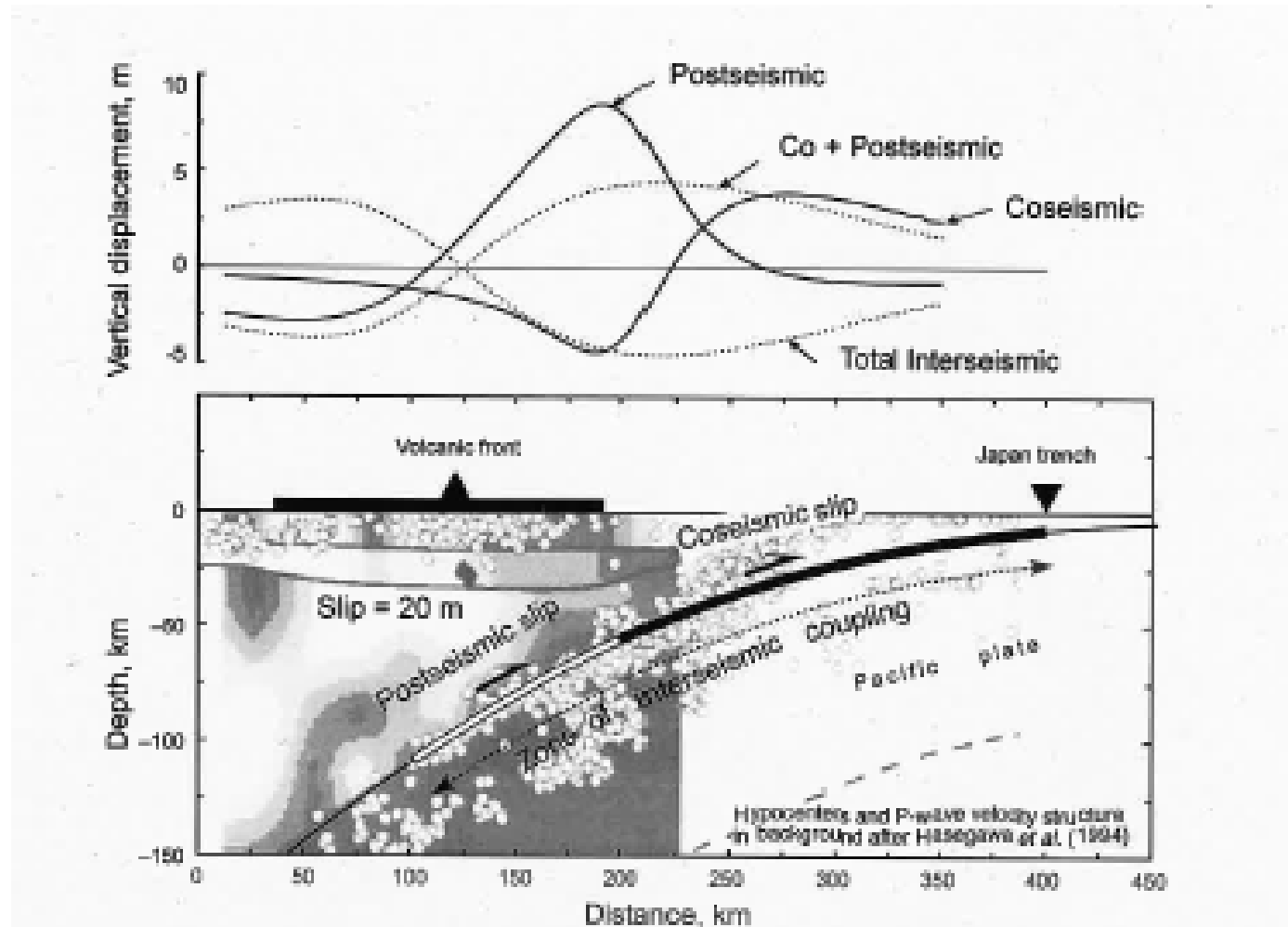
S Ozawa *et al.* *Nature* **000**, 1-4 (2011) doi:10.1038/nature10227

Coseismic slip, postseismic slip and aftershocks.

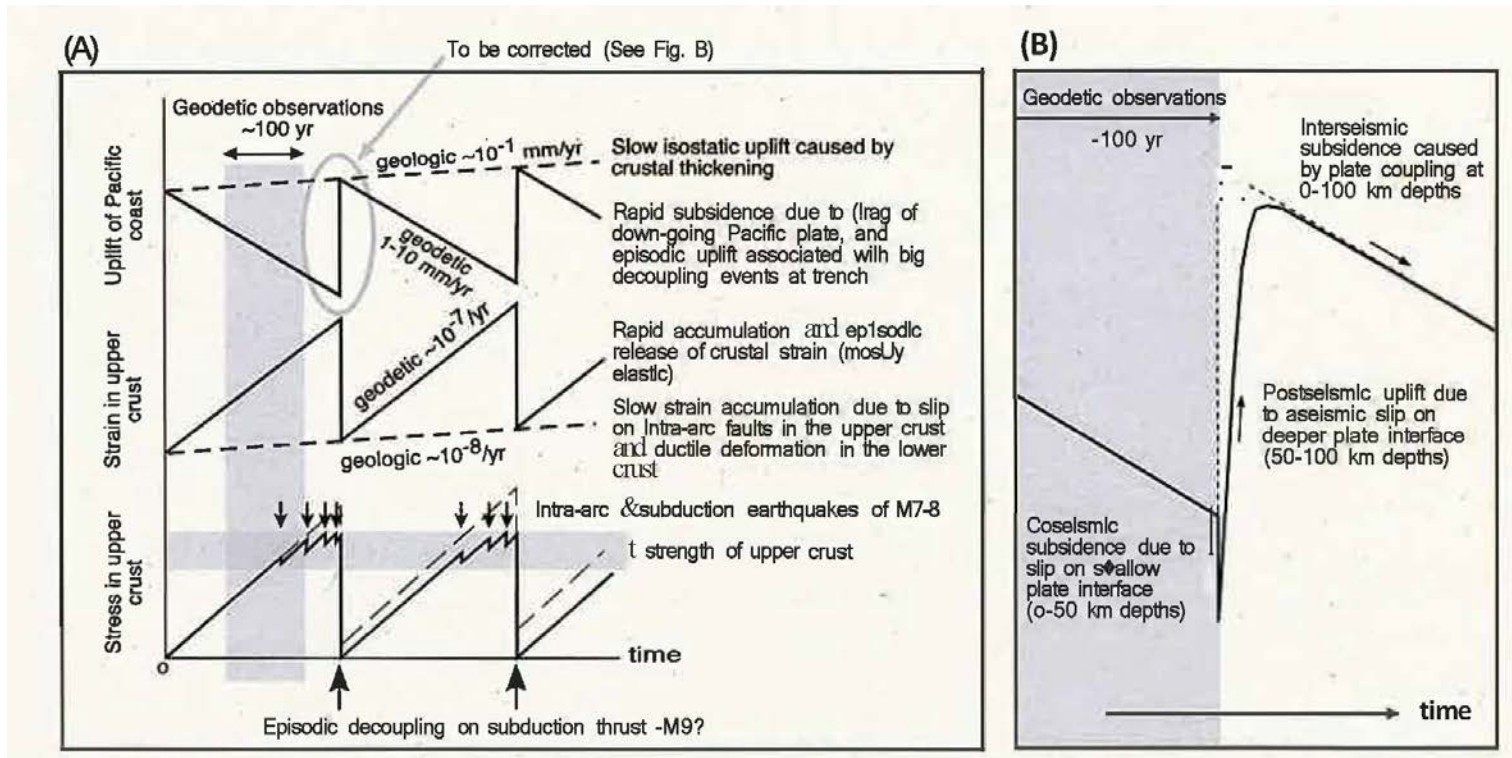


S Ozawa *et al.* *Nature* **000**, 1-4 (2011) doi:10.1038/nature10227

Ikeda 2014, Episodes, 37, 234-245

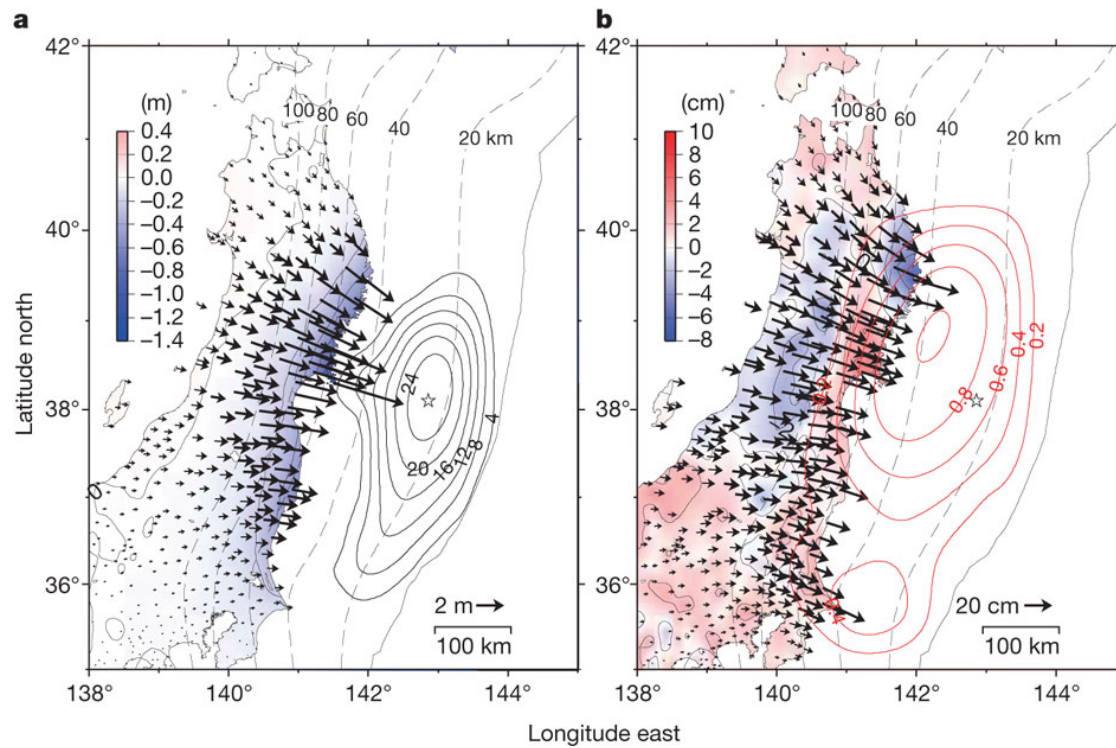


Ikeda 2014, Episodes, 37, 234-245



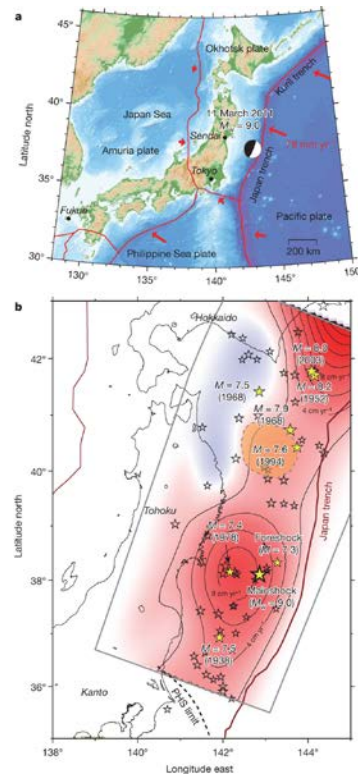
- GPSによる変位量 \gg 地質学時間で平均した変位量

Coseismic and postseismic displacements and estimated slip.



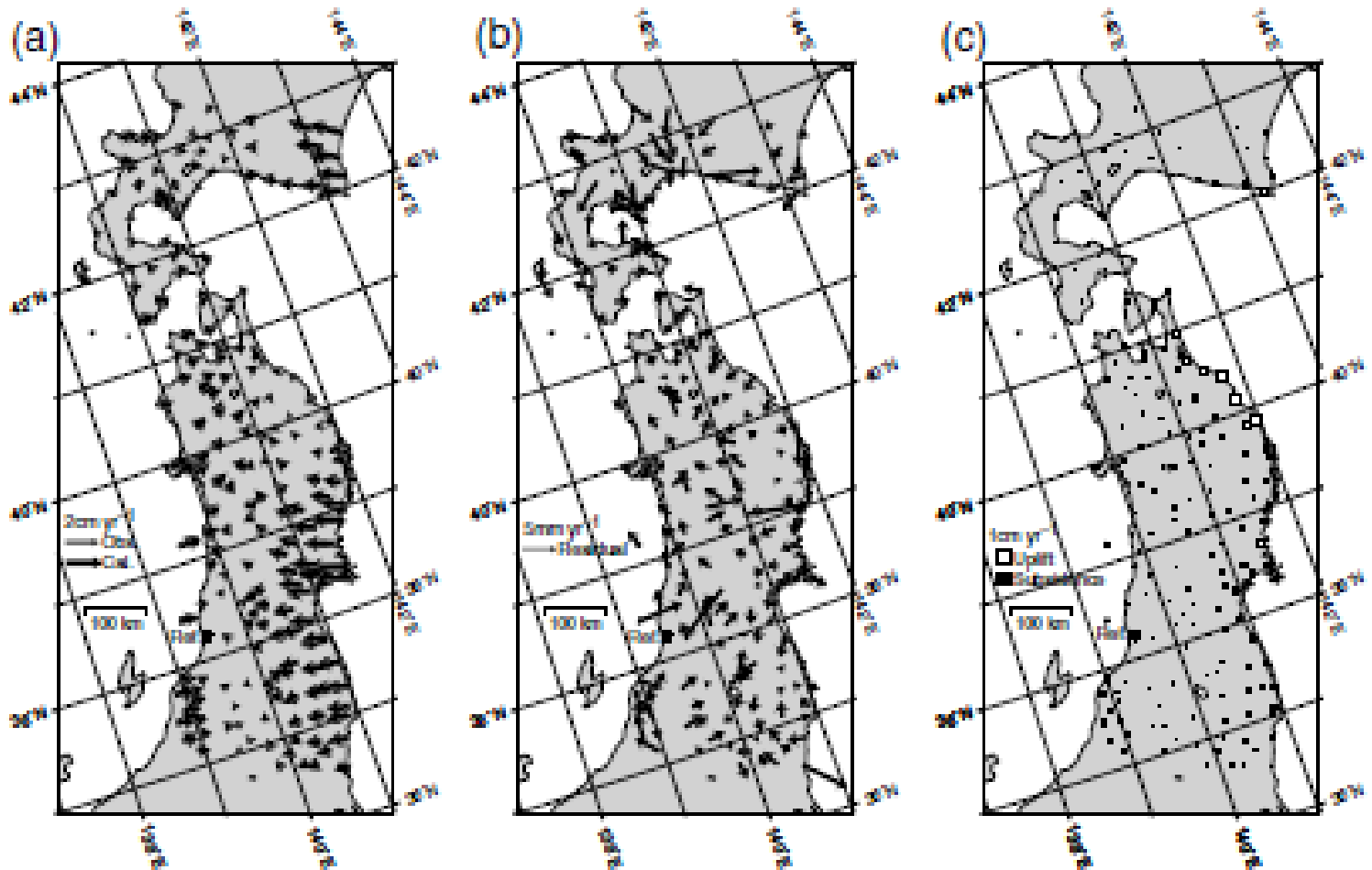
S Ozawa *et al.* *Nature* **000**, 1-4 (2011) doi:10.1038/nature10227

Tectonic setting in and around the Tohoku-Oki earthquake.

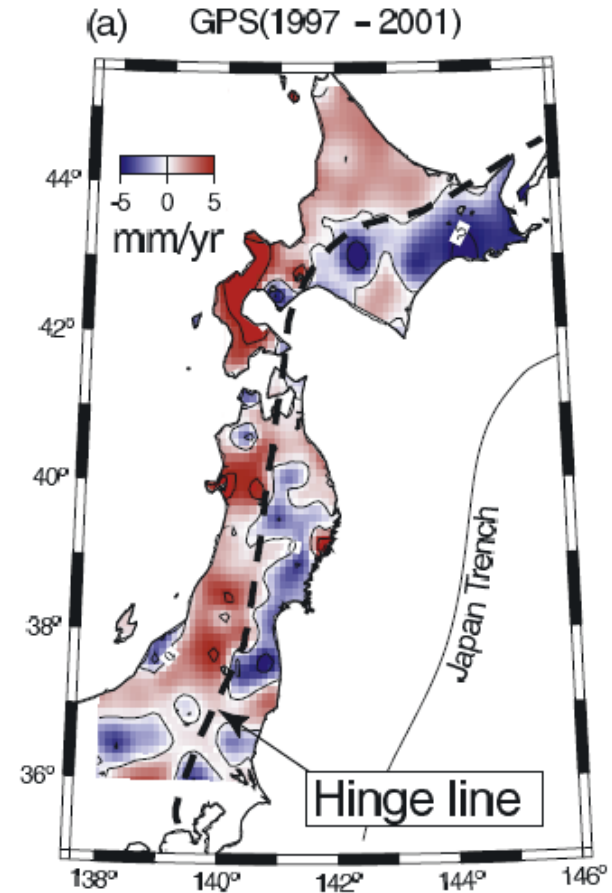
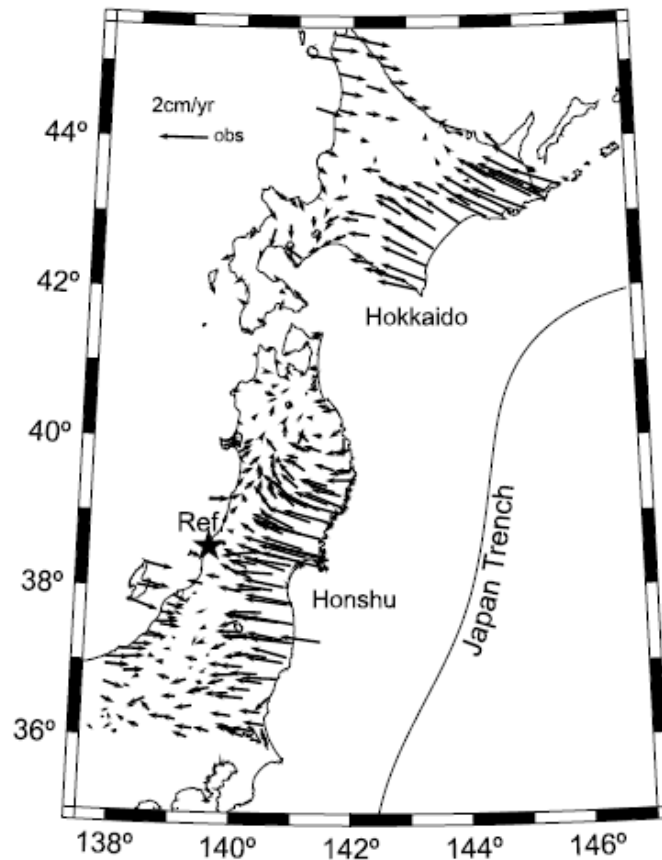


S Ozawa *et al.* *Nature* **000**, 1-4 (2011) doi:10.1038/nature10227

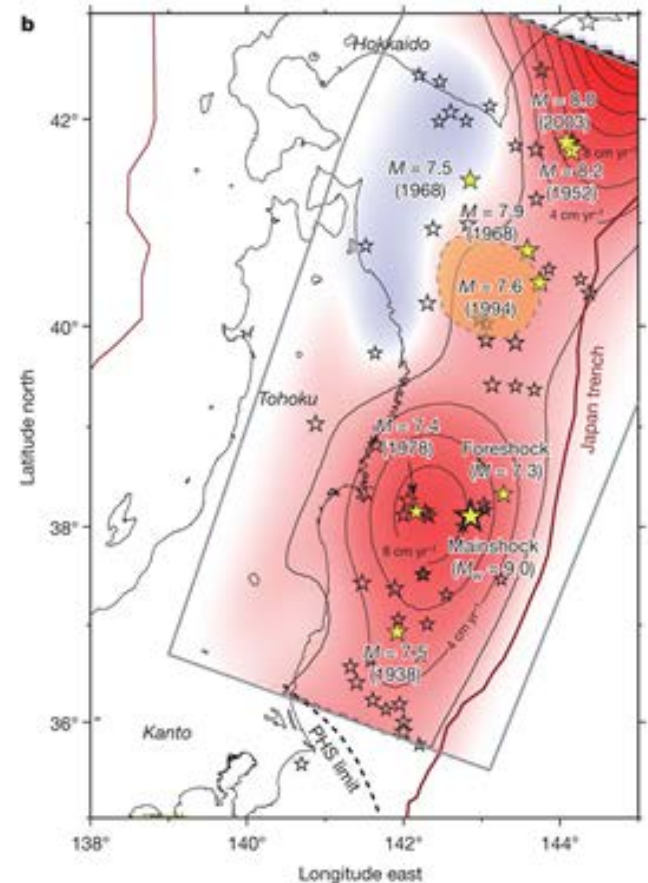
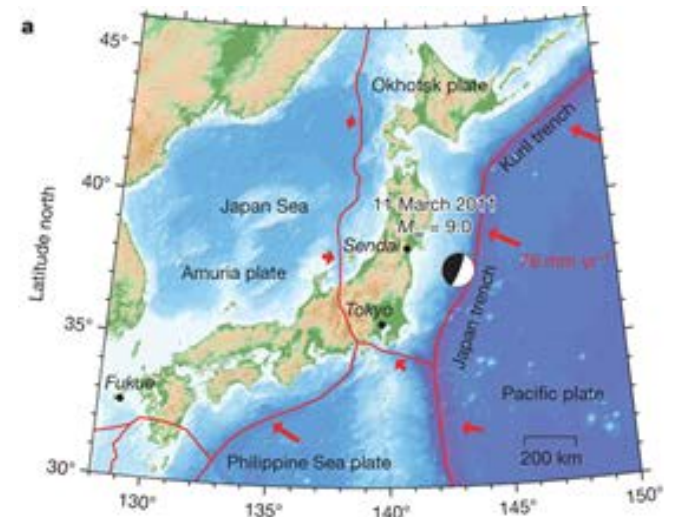
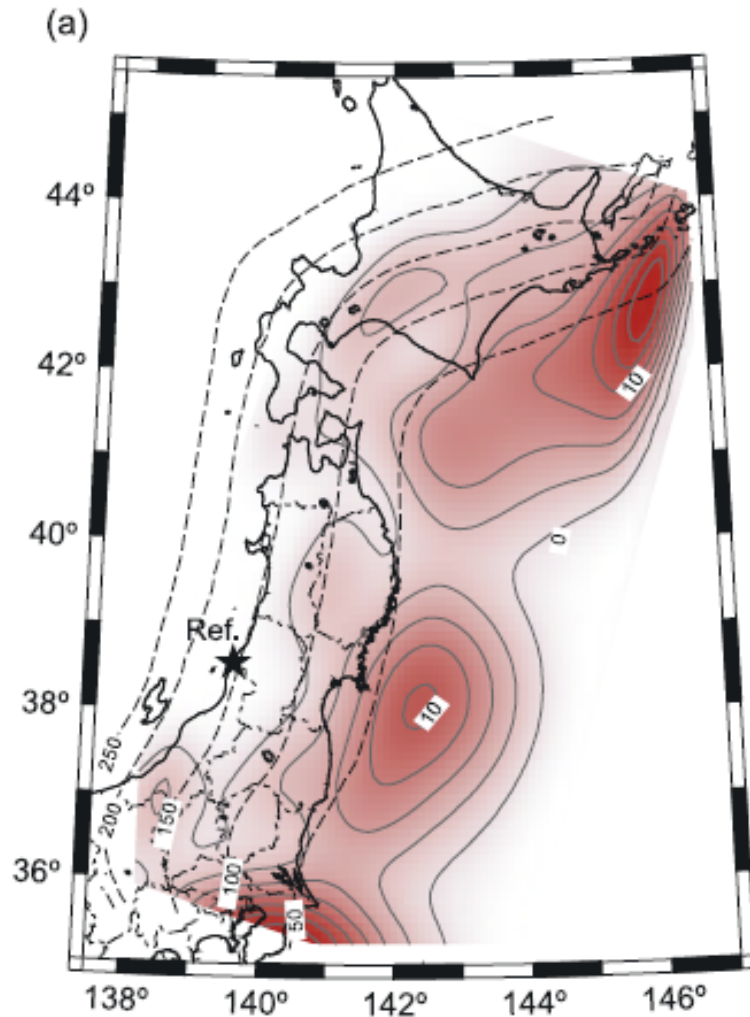
Nishimura et al. 2004, Geophys J. Int., 157, 901-916



Suwa et al. 2006, JGR, 111,B04402

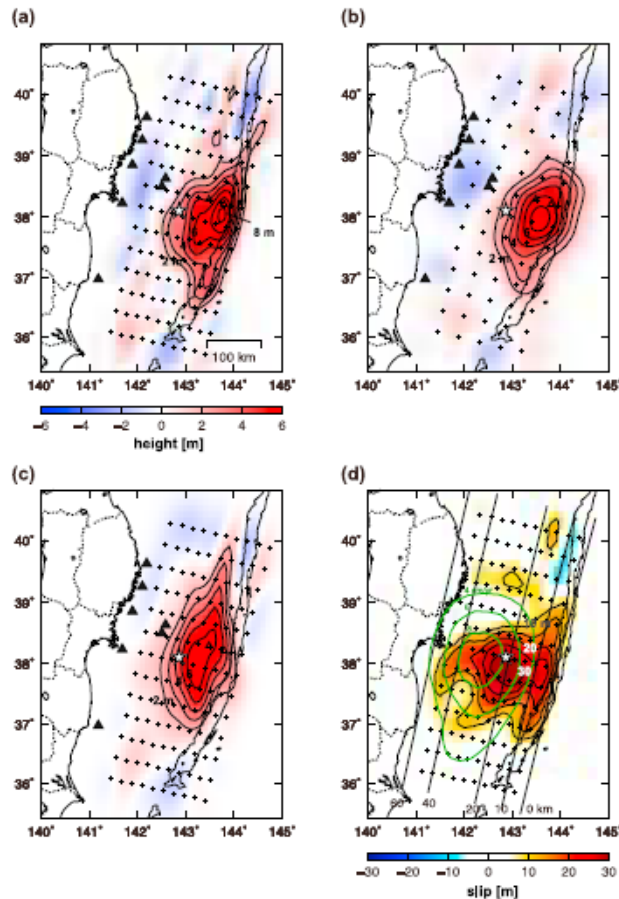


Suwa et al. 2006, JGR, 111, B04402



津波波源の逆解析

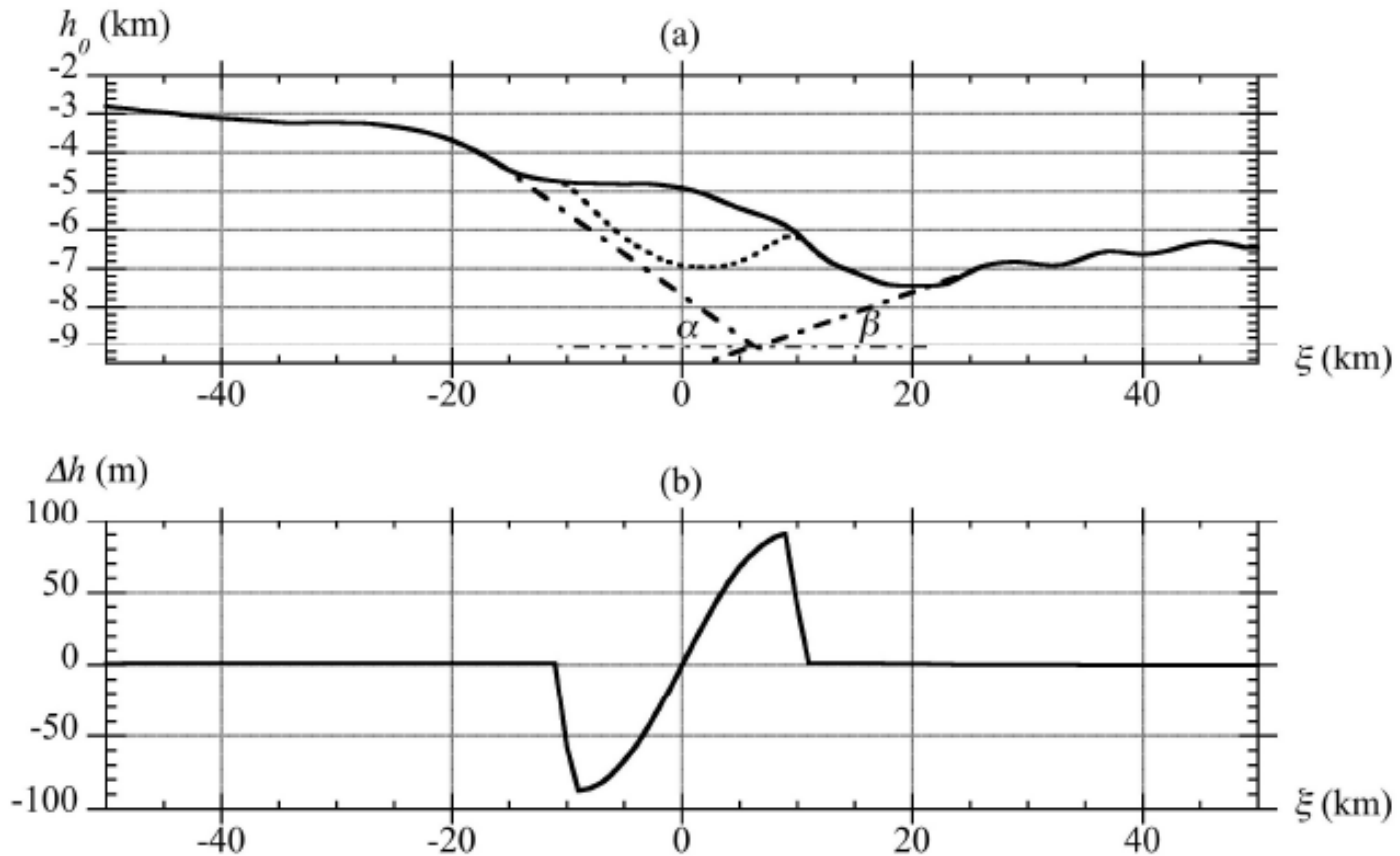
Saito et al. 2011 GRL, 38, L00G19



- 地震発生時に瞬間的に海底が変化したと近似
- 地殻変動の場合
音速 \gg 浅水波速度
岩石: $3000-5000 \text{ km s}^{-1}$
海水: 1500 km s^{-1}
浅水波速度 ($h=6 \text{ km}$)
 $\sim 240 \text{ m s}^{-1}$
単極性の海面変動
- 地滑りの場合
終端速度 ($\alpha = 5 - 15^\circ$)
 $200-500 \text{ m s}^{-1}$
海底面の時間変化を陽に考慮する必要
双極性の海底面変動

Tappin et al. 2014の海底面変動

Tappin et al. 2014, Marine Geology, 357, 344-361



海底面の時間変化を陽に取り入れる