



2019年1月30日

「国際津波防災学会」津波シミュレーション
分科会第2回会合

インドネシアの津波災害と津波シミュレーション

日本周辺における歴史時代の地震で
誘発された海底地滑り－駿河湾の事例を中心に－

北村晃寿

静大・理学部・防災総合センター

内容

1. 南海トラフのレベル2地震・津波
2. レベル1.5地震・津波
3. 海底地滑りの事例（トルコ・焼津）
4. 駿河湾の地形・地質・歴史的事象
5. 1498年明応東海地震
6. 1495年の地震・津波

想定外の巨大地震

東北地方太平洋沖地震

2011年3月11日14時46分

モーメントマグニチュード 9

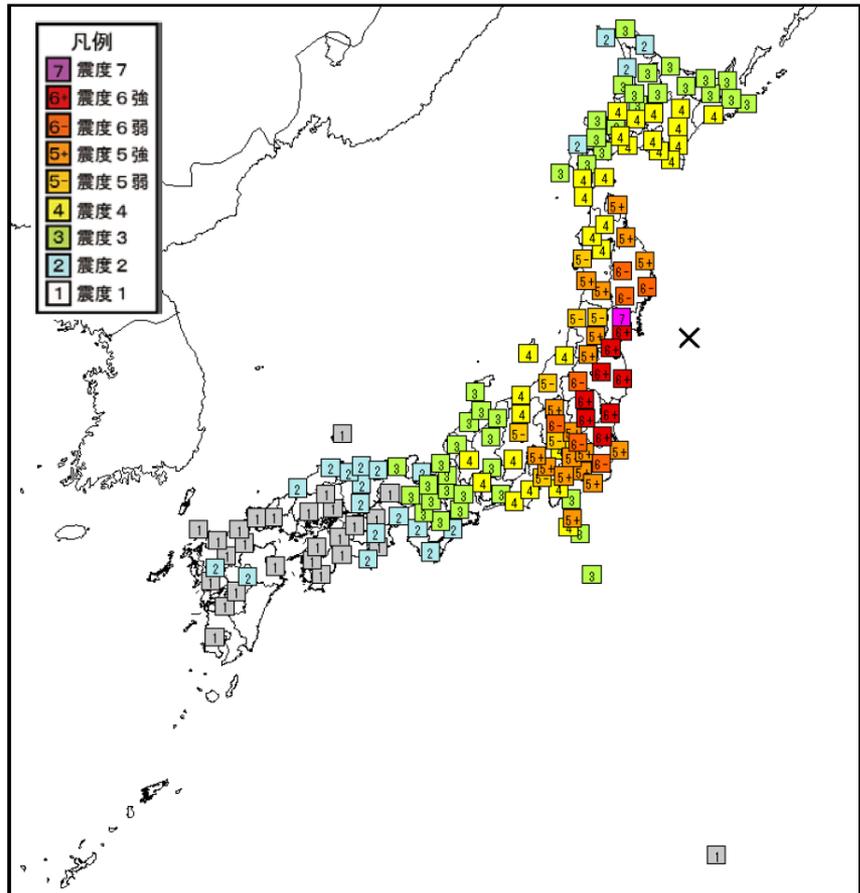
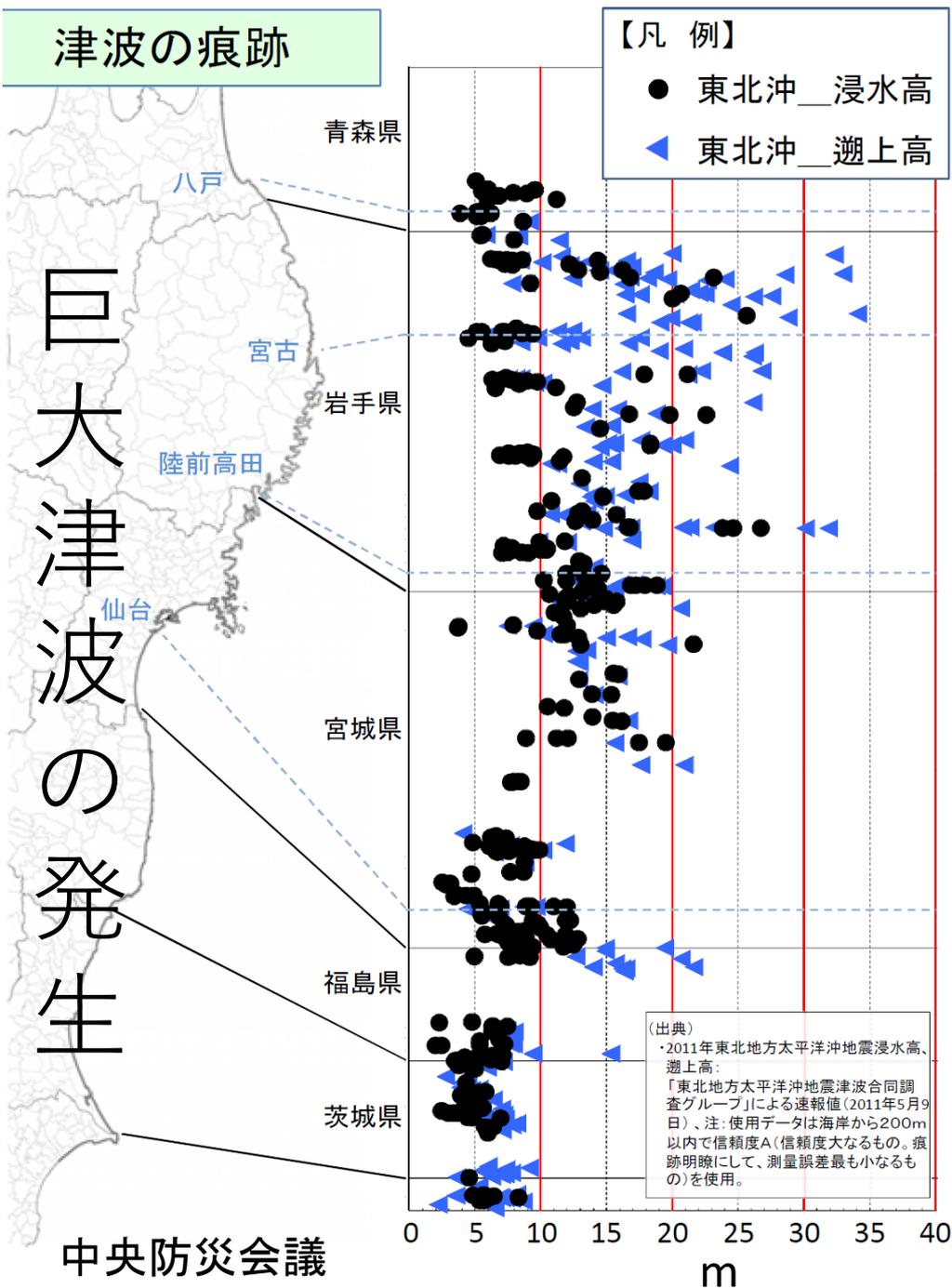


図1-1 本震の地域震度分布 (×印は震央)

気象庁



中央防災会議

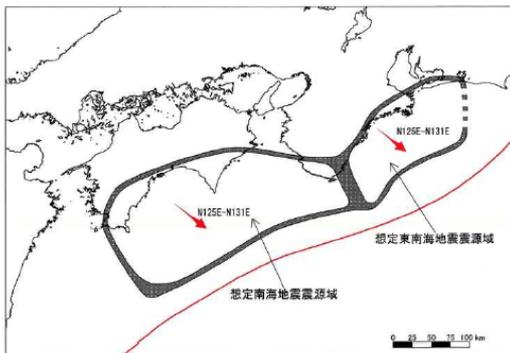
レベル1地震・津波

レベル2地震・津波

前回の評価

(平成13年9月27日公表)

震源域の考え方



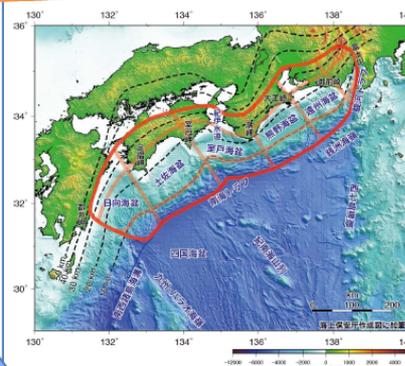
- 観測データが揃っている近年の地震から、震源域を評価
- 各領域(東部・西部)で、ほぼ同じ大きさ、ほぼ同じ繰り返し間隔で地震が発生

次に発生する地震

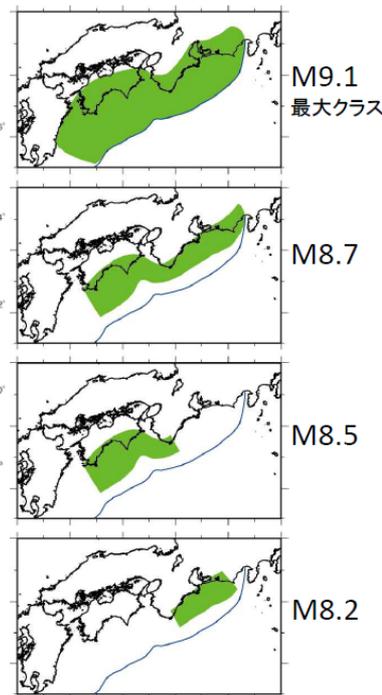
	規模	30年確率
東南海地震	M8.1前後	50%程度 (70~80%)
南海地震	M8.4前後	40%程度 (60%程度)

領域ごとに規模、発生確率を評価
()内は、従来の手法でH25年1月時点での確率を計算

今回の評価



地形、歴史記録、地震活動等から、震源域となり得る領域を評価



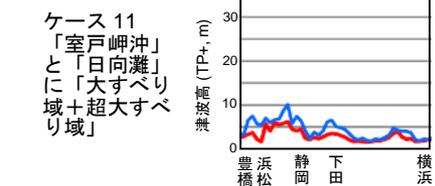
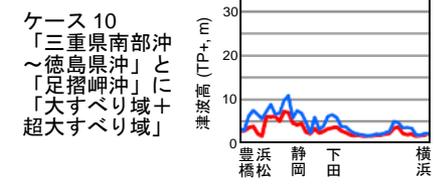
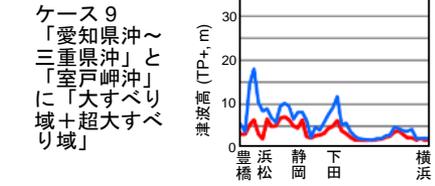
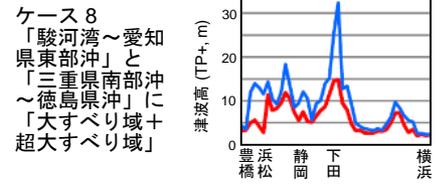
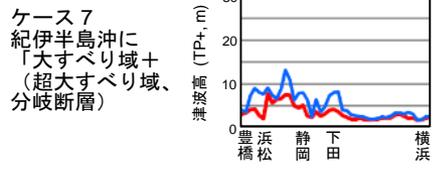
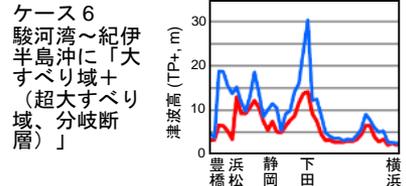
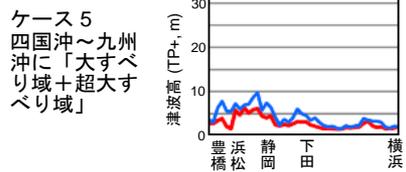
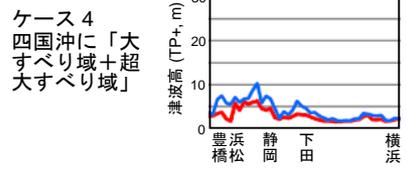
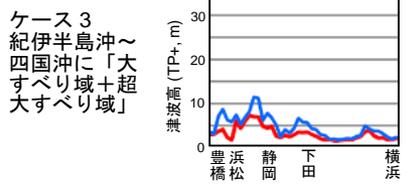
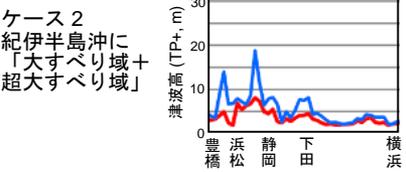
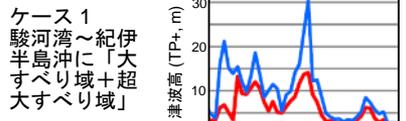
多様なパターンの地震が発生

	規模	30年確率
南海トラフの地震	M8~M9クラス	60~70%

南海トラフ全域で、規模、発生確率を評価

「レベル2津波」

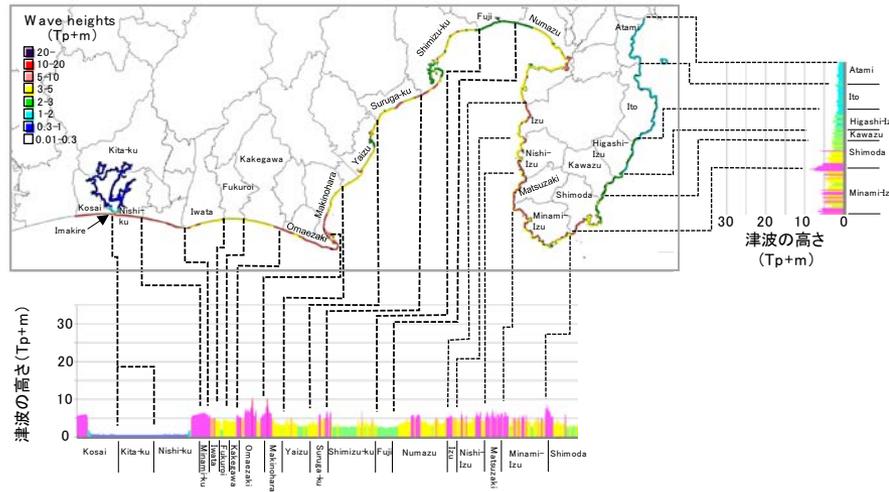
発生頻度はレベル1の
一桁以上低い



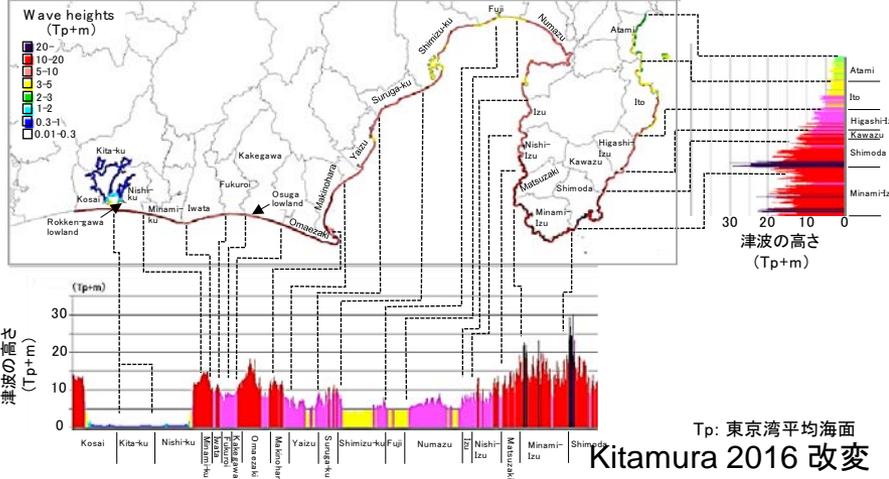
— 平均値
— 最大値
TP 東京湾平均海面

Kitamura 2016 改変

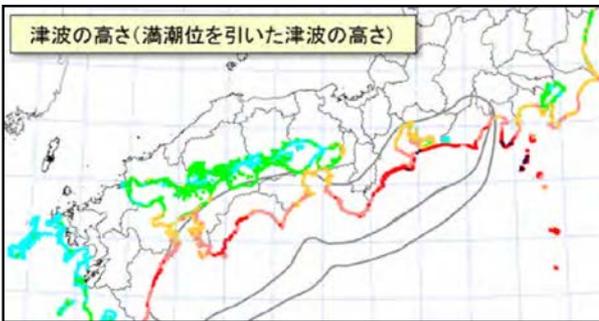
レベル1津波



レベル2津波(ケース1)

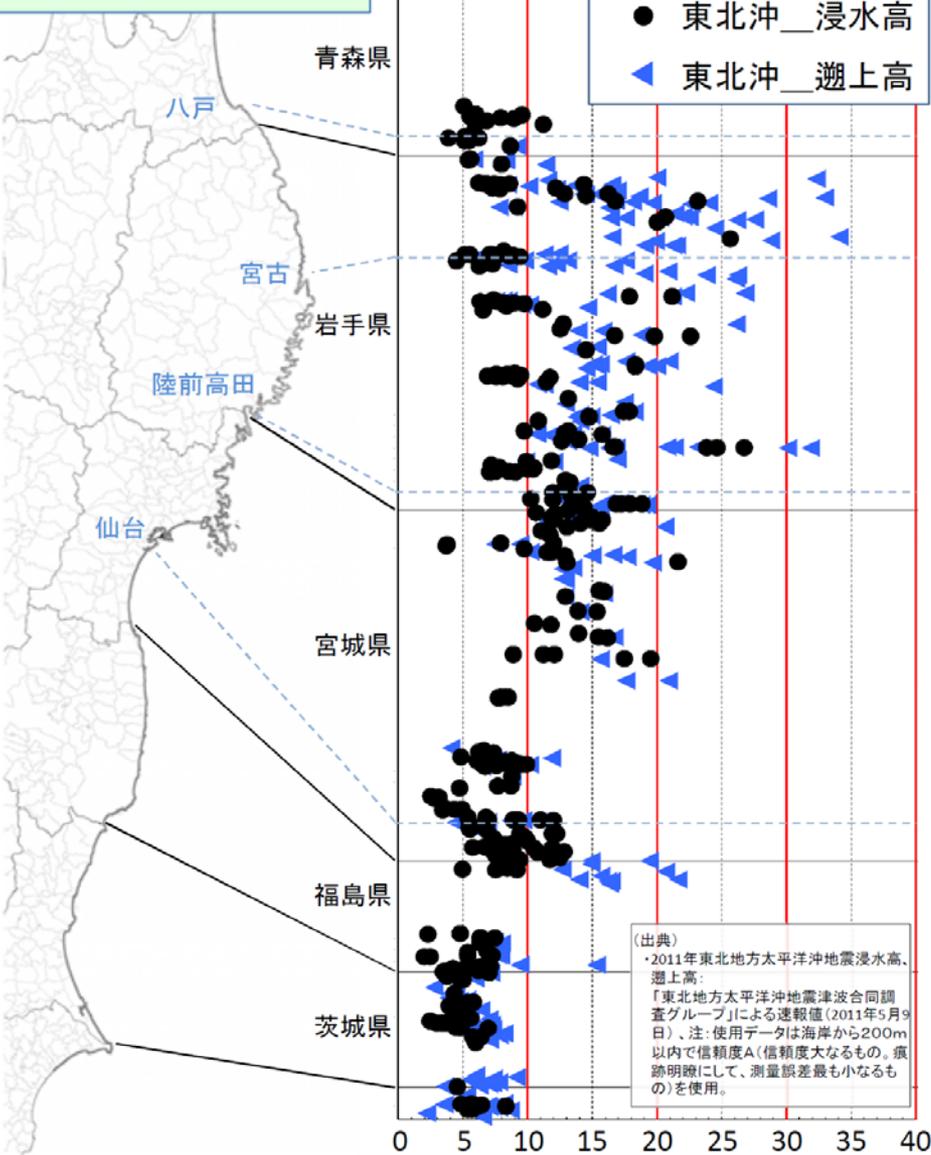


TP: 東京湾平均海面
Kitamura 2016 改変

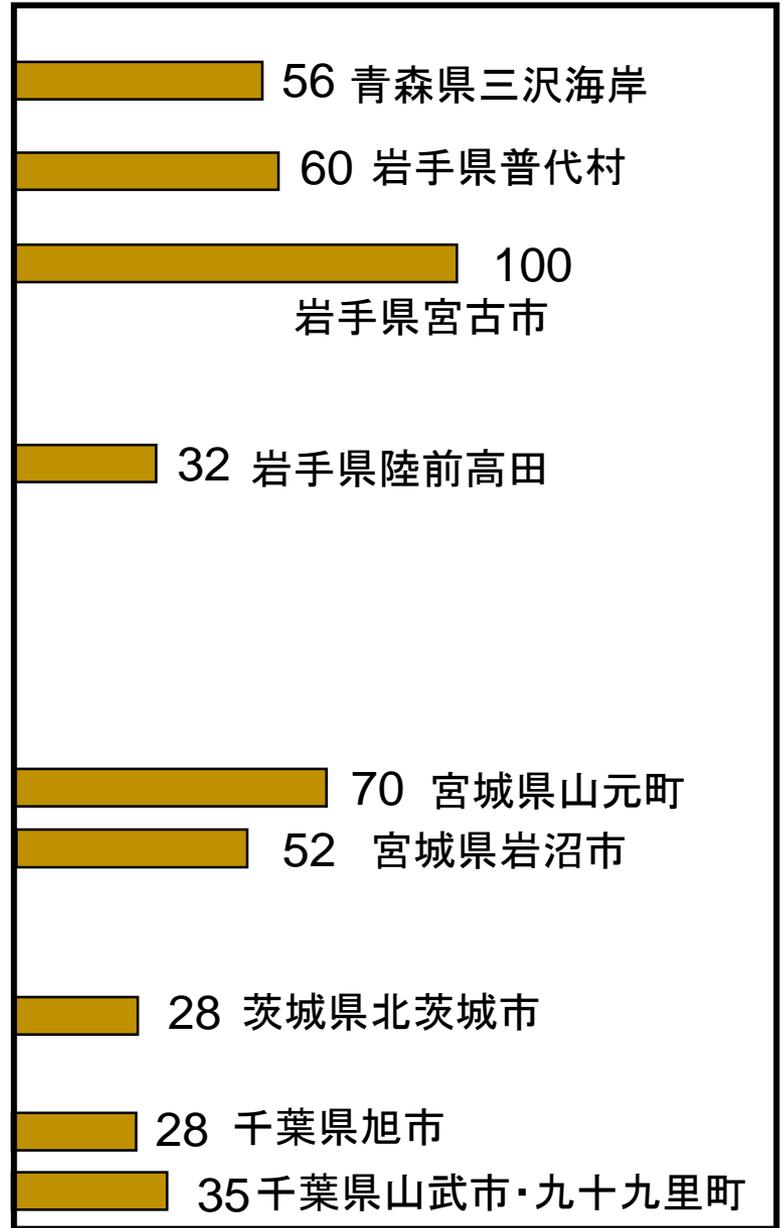


内閣府

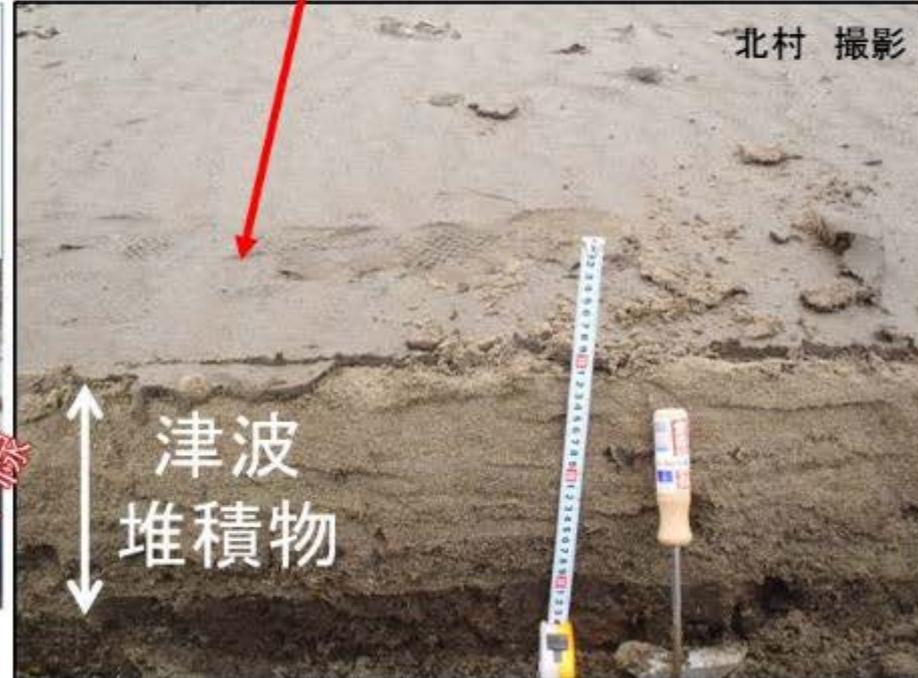
津波の痕跡



津波堆積物の最大層厚 (cm)

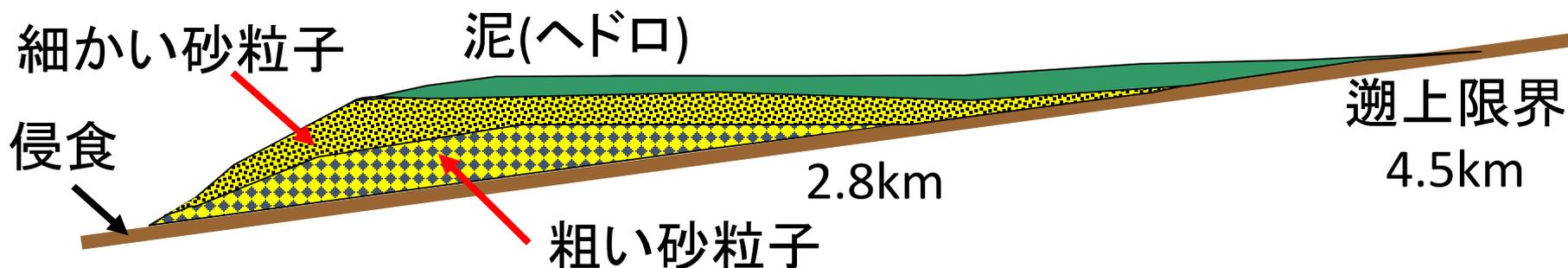


東北地方太平洋沖地震に伴う津波堆積物



東北地方太平洋沖地震の巨大津波の津波堆積物

- ・側方変化: 内陸へ向かって薄層化・細粒化
- ・基底面は侵食面
- ・垂直変化: 上方へ向かって細粒化
- ・一方向流からの堆積を示す構造が発達
- ・層厚30cm程度.



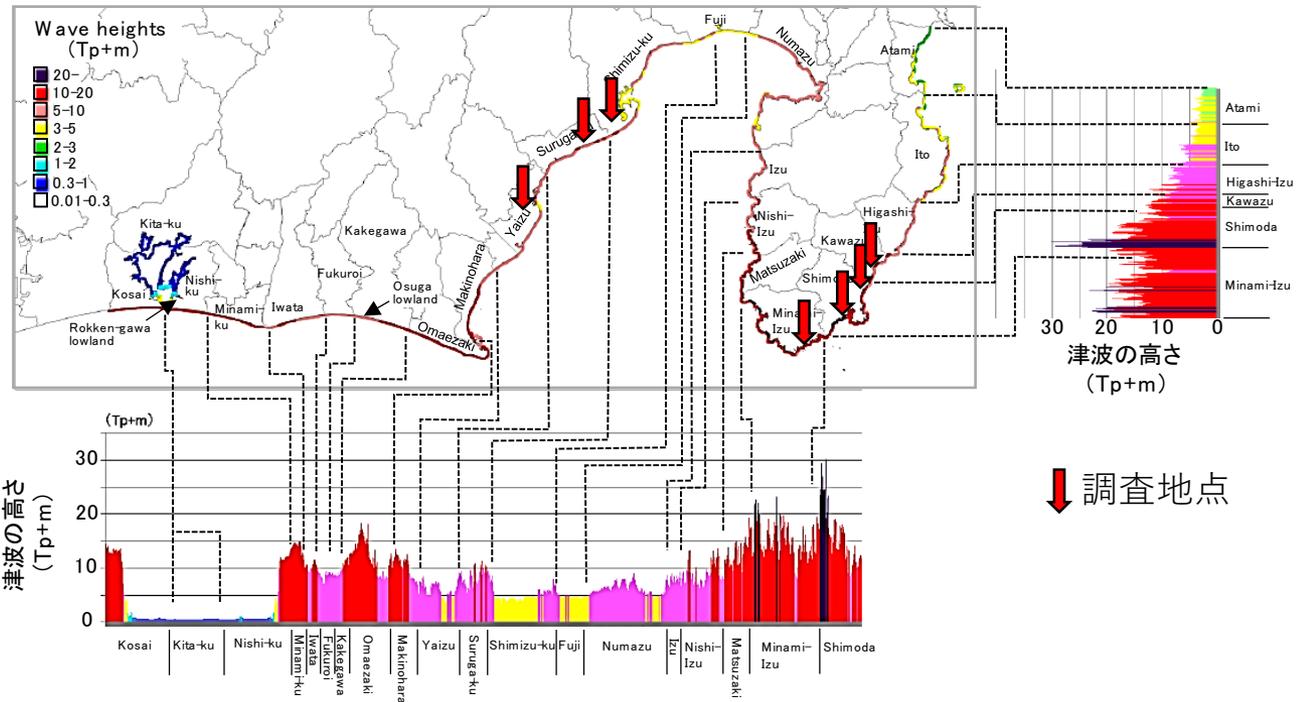
津波堆積物の供給源は、砂粒子は海浜と砂丘で、泥粒子は水田の土壌(Szczuciński *et al.*, 2011; Takashimizu *et al.*, 2012). 沖合の堆積物の津波堆積物への寄与はほとんどない。津波堆積物は海底の堆積物に由来する微化石や海水起源物質がほとんど含まない(Szczuciński *et al.*, 2012; Chagué-Goff *et al.*, 2012).

北村が行った静岡県 中・東部の津波堆積物の 調査地域と条件

1. 北村・小林小夏, 2014. 地学雑誌, 123, 813-834.
2. 北村・板坂孝司・小倉一輝・大橋陽子・斉藤亜妃・内田絢也・奈良正和, 2013. 静大地研報, 40, 1-12.
3. 北村・川手繁人, 2015. 静大地研報, 42, 15-23.
4. Kitamura & Kobayashi, 2014. The Holocene, 24, 814-827.
5. Kitamura, Fujiwara, Shinohara, Akaike, Masuda, Ogura, Urano, Kobayashi, Tamaki & Mori, 2013. The Holocene, 23, 1682-1696.
6. 北村・鈴木孝和・小林小夏, 2015. 静大地研報, 42, 1-14.
7. 北村・三井雄太・石橋秀巳・森 英樹, 2018. 伊豆半島南東部静岡県河津町の海岸低地における津波堆積物調査. 静大地研報, 45, 1-16.

地点	堆積環境	津波堆積物	¹⁴ C年代試料	火山灰	文献
河津町	後背湿地	なし	植物片	なし	7
下田市 (白浜)	後背湿地	なし	葉, 植物片	アカホヤ	1
下田 市街地	溺れ谷～ 後背湿地	可能性あり1層 (1地点)	葉, 植物片, 貝類	カワゴ平 (1地点)	1
南伊豆町	溺れ谷～ 後背湿地	なし	葉, 植物片, 貝類	カワゴ平 (1地点)	2, 3
清水平野 (沿岸部)	溺れ谷～ 後背湿地	少なくとも 4層	植物片, 貝類	なし	4
静岡平野 (大谷)	後背湿地	少なくとも 3層	植物片, 種子	アカホヤ	5
焼津平野	後背湿地	なし	葉, 植物片, 貝類	カワゴ平 (2地点)	6

レベル2 津波(ケース1)



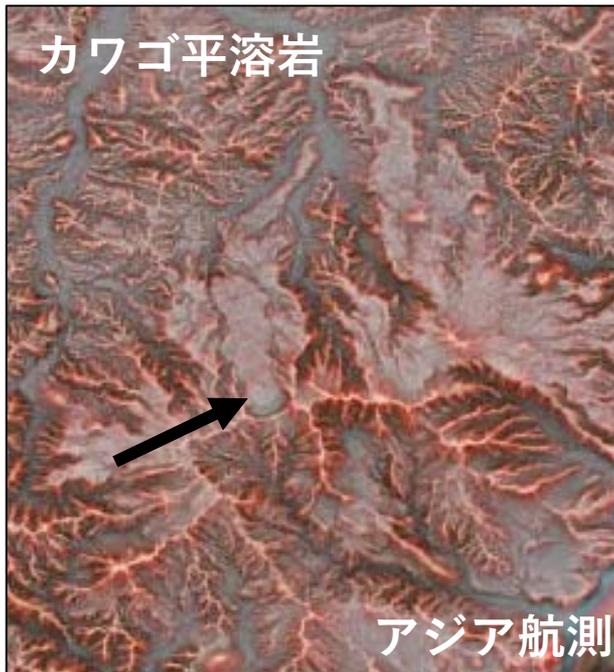
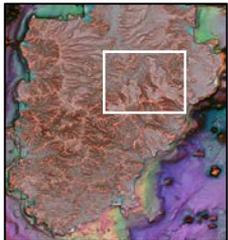
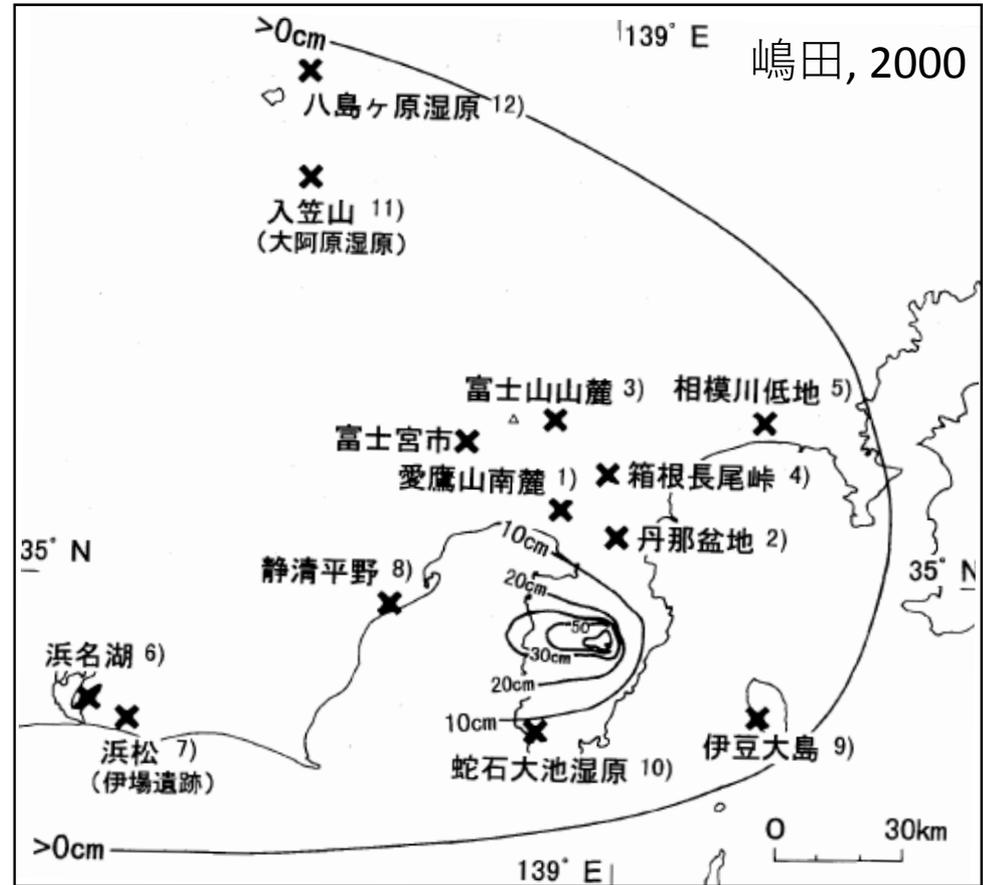
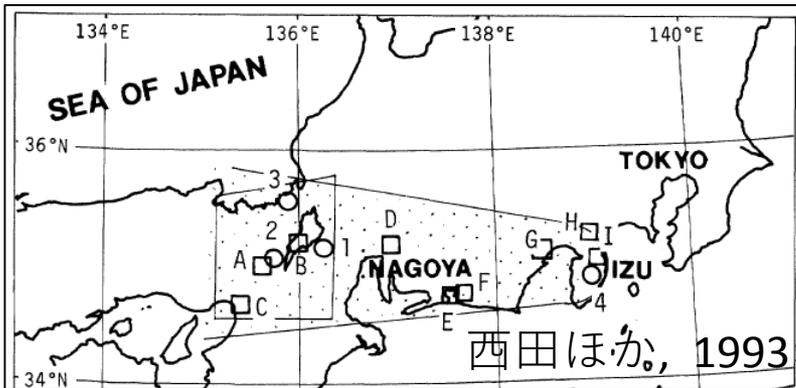
日本海溝沿いの低地と南海トラフ沿いの低地の人間攪拌の差

仙台平野

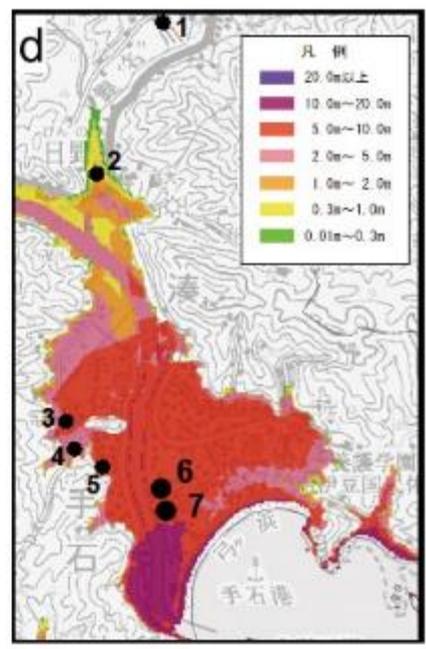
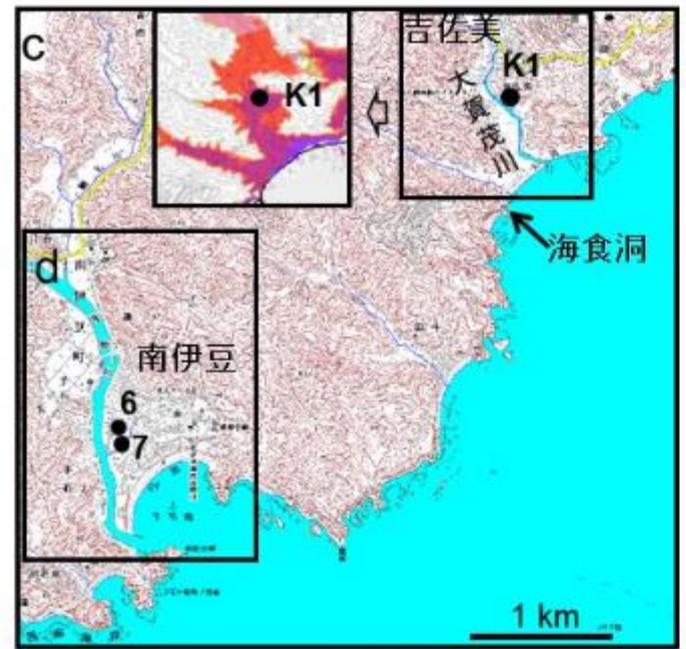
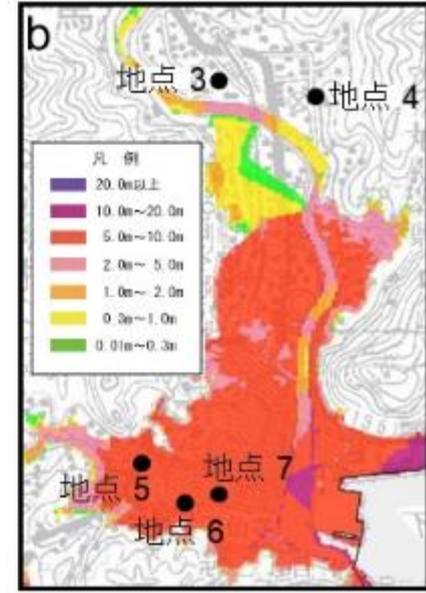
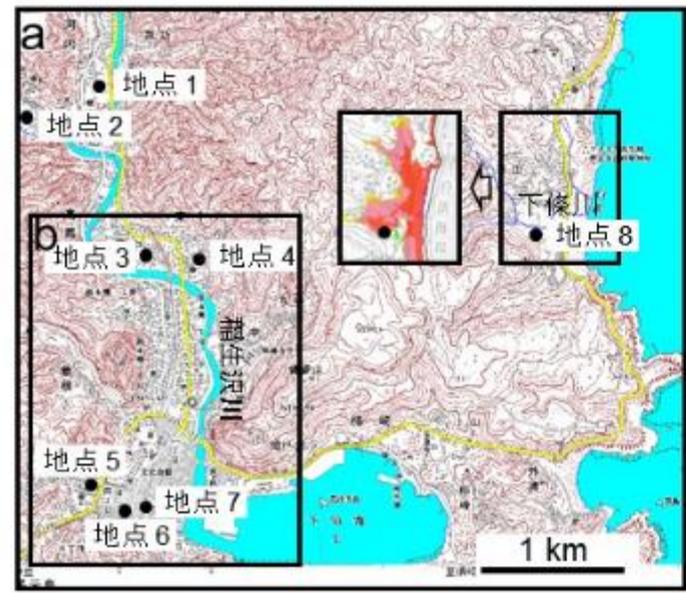
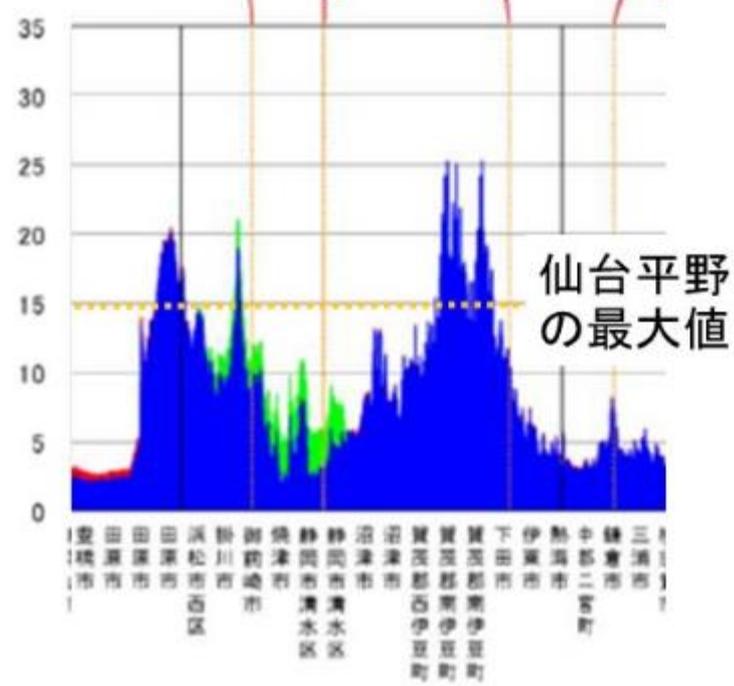


	南海トラフ	日本海溝
古文書 記録	684年の白鳳 地震・津波	869年の貞観 地震・津波
津波堆 積物の 調査	困難 ・人為攪拌 ・火山灰層極く わずか	普通 ・人為攪拌なし ・火山灰層多い

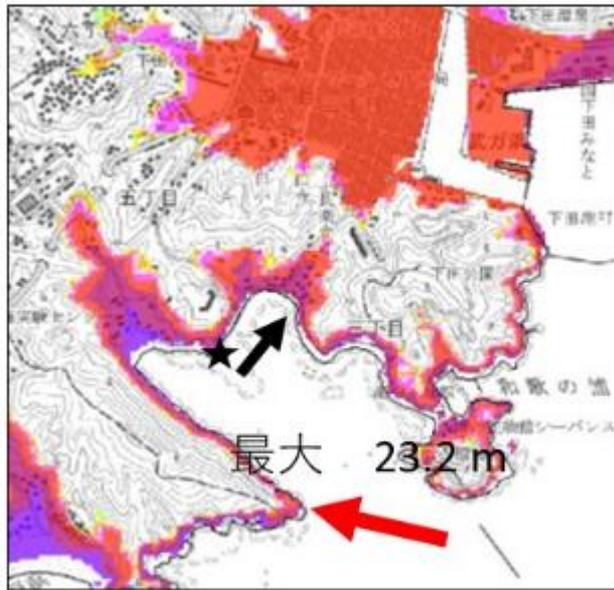
カワゴ平軽石 紀元前1210-1187



下田周辺

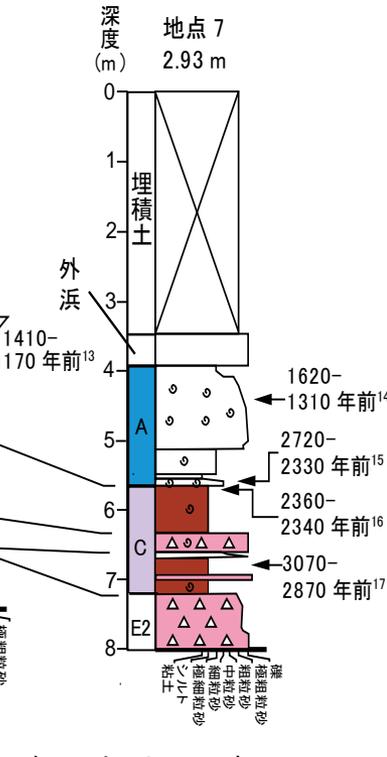
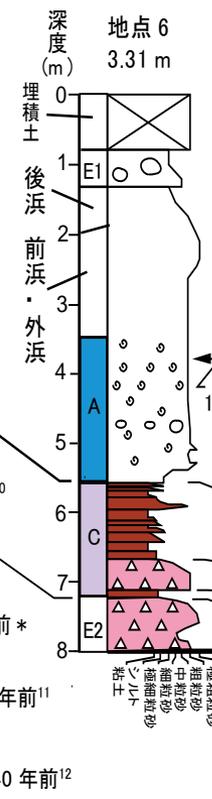
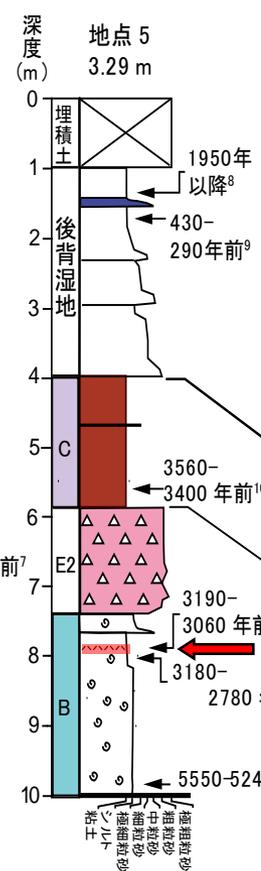
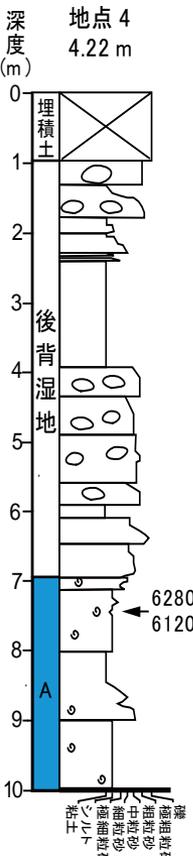
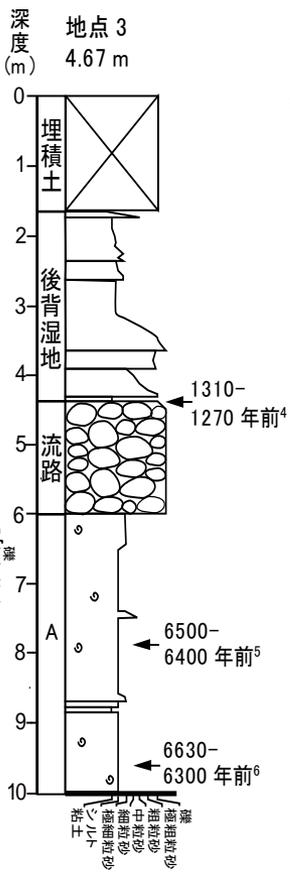
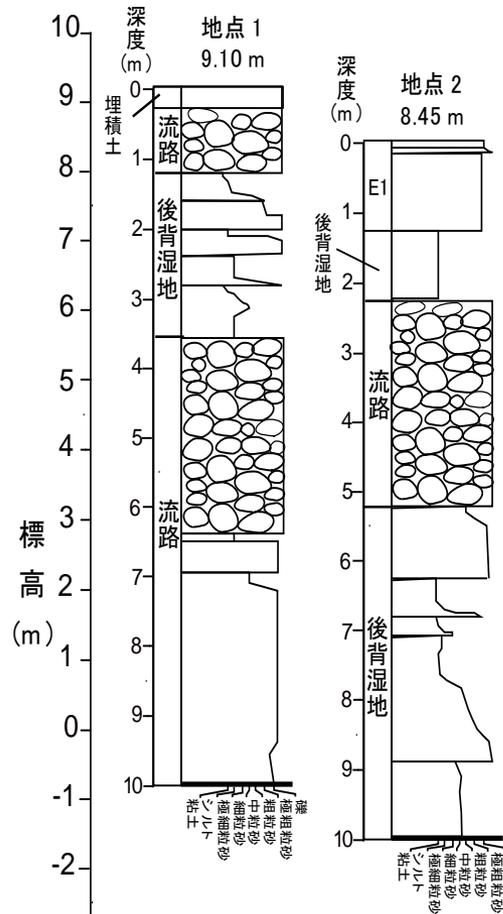


● 北村ほか(2013), 北村・小林(2014), 北村・川手(準備中)の調査地点



海岸低地には津波で運搬されたと思われる巨礫は見られない。

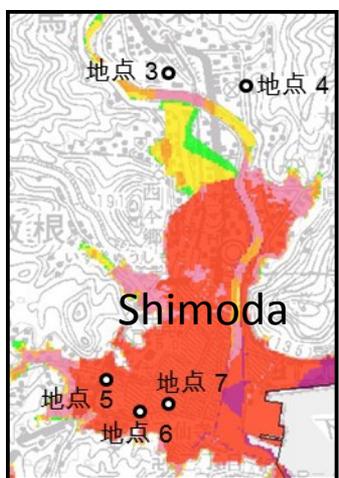




	有機質粘土	A 内湾の潮間帯
	貝化石	B 内湾の潮間帯から水深10m
	火山灰	C 閉塞的な内湾の潮間帯から水深10m
	軽石	E1 土石流堆積物あるいは堤防決壊堆積物
	中・大礫	E2 大量流入した白色軽石層

6500-6400年前⁵ 放射性炭素年代(2σ)
3190-3060年前* カワゴ平火山灰

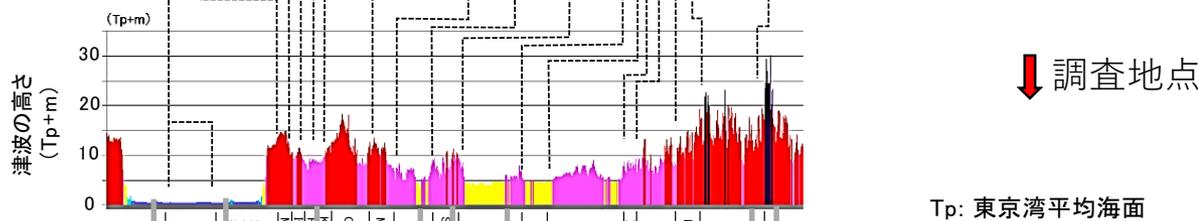
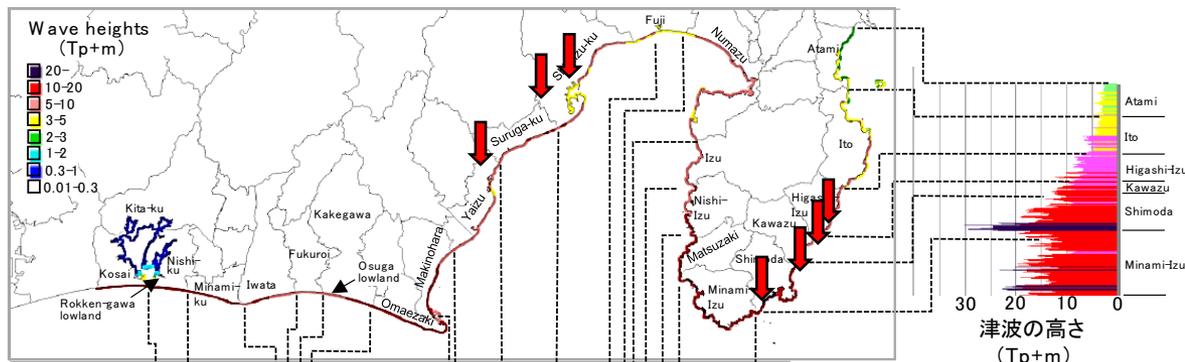
北村・小林, 2014



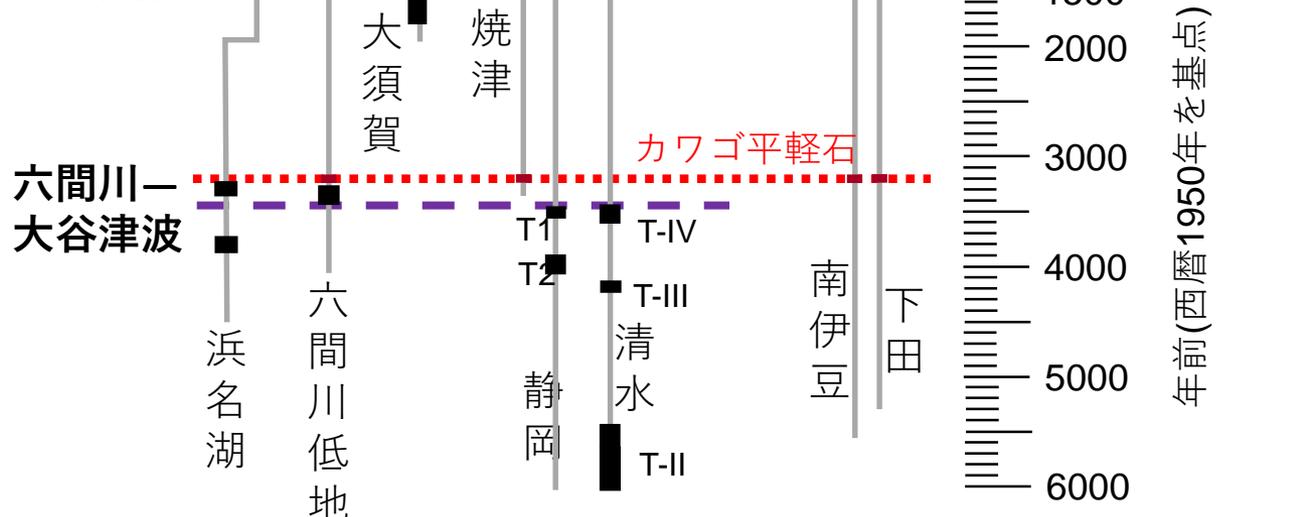
津波堆積物の可能性のあるイベント層は1枚

← カワゴ平火山灰(軽石)

レベル2 津波(ケース1)



西暦684年
白鳳地震



Kitamura 2016 Progress in Earth and Planetary Science. 3:12
DOI: 10.1186/s40645-016-0092-7を改変

・北村・小林(2014)が命名した**六間川-大谷津波**の津波堆積物は、浜松市から静岡市まで分布する可能性があり、分布範囲が最も広い。

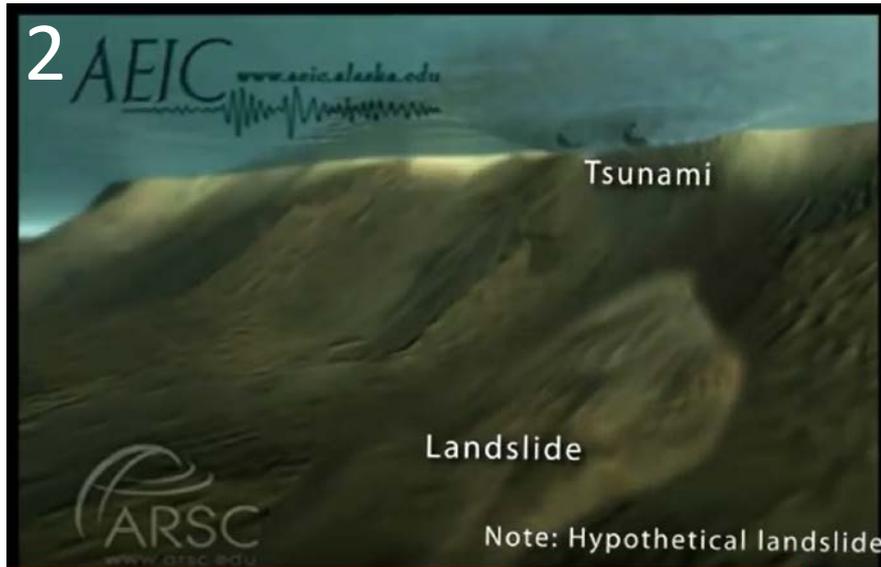
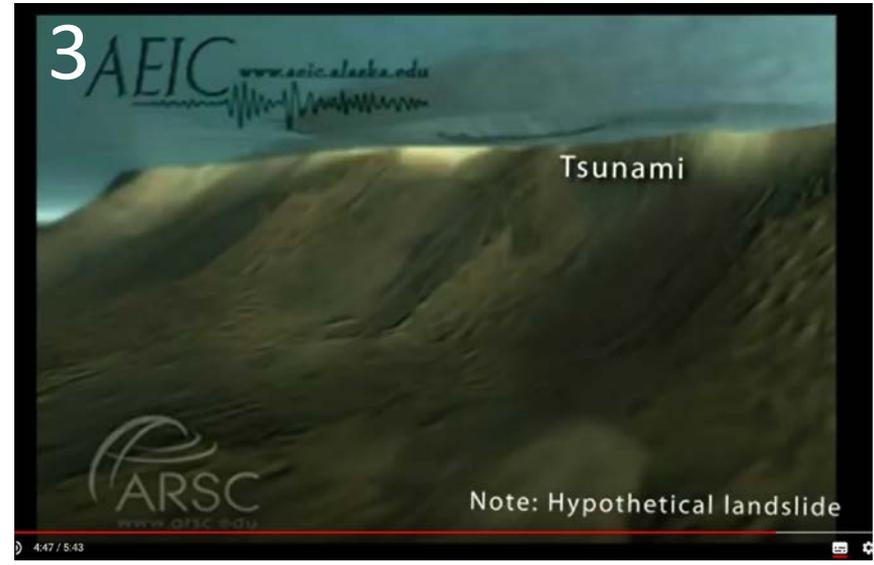
・レベル2津波は、下田市・南伊豆町沿岸の津波の波高は、六間川低地、静岡平野、清水平野よりも10m余り高いにも関わらず、六間川-大谷津波による津波堆積物や津波石などは検出されない。

・六間川-大谷津波はレベル2津波には相当しない。

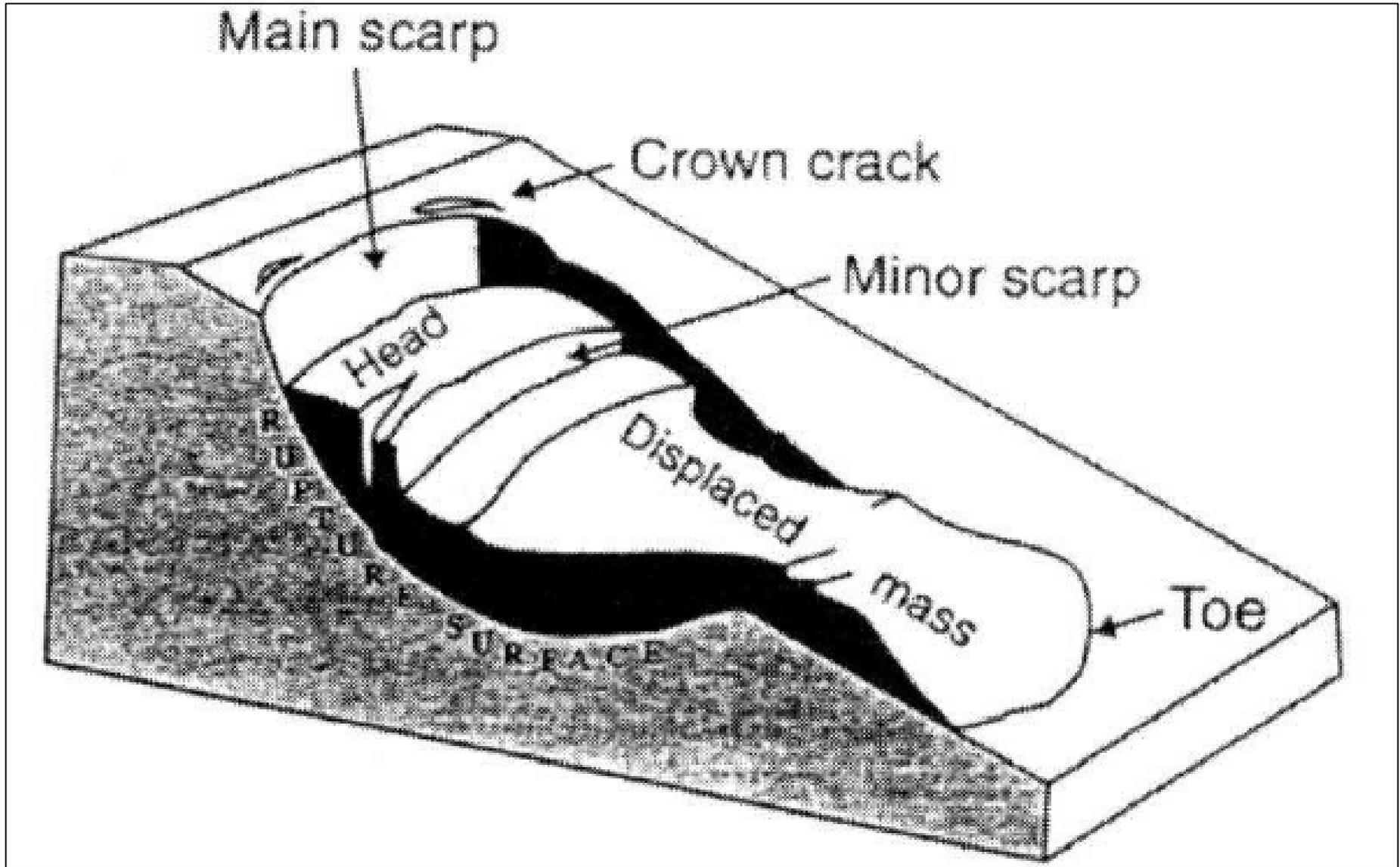
・静岡県沿岸地域では、過去4千年間にレベル2津波の痕跡はない。

今後の課題

レベル1と海底地滑りの複合津波(“レベル1.5”)



海底地滑り



歴史地震で誘発された海底地滑りの検出

海底地滑りに伴う海岸線の後退

表1 地震により海岸近くで起きた海底地滑りの諸条件

海底地すべり発生箇所	発生地	発生日	地すべり発生原因	震源からの距離	水深	勾配	地すべり土塊の規模	移動量	岸をどのくらい含んで滑ったか	地形	土質と層構造	人的・構造物被害
Helice	ギリシャ	紀元前373年	大地震									
瓜生島(沖ノ浜)	大分県別府湾	慶長元年閏7月12日(西暦1596年9月4日)	M=7.5と推定される大地震と、それに伴った津波		---	局部的には6~15°内外の急傾斜			東西約3.9km、南北約2.2kmと言われている瓜生島(沖ノ浜)全体	大分川により堆積した沖積砂層	表層から順に、沖積層上部砂層、沖積層上部粘層、沖積層下部砂層、沖積層火山灰、洪積層	家屋・神社などの流出、人的被害は数知れず
Valdez	アラスカ	1964年3月27日	アラスカ地震(M=8.3) Mw=9.2に修正	約64km	---	14~20°	7000万m ³ 深さ60m	数100m	奥行150m。(海岸から約1km以上の陸地が海に向かって移動)	デルタ地形	粗砂、礫層の間にシルトおよび細砂層を挟む	2つの船着場150mとそこに建てられていた建物や倉庫、いた人30人
Seward	アラスカ	1964年3月27日	アラスカ地震(M=8.3)	約140km	---	15~20°	最大深さ約35m		約1.2kmに渡る海岸線。海岸から内陸へ最大約150m	デルタ地形	砂及び礫	船着場一帯(船渠、倉庫、燃料タンク)
Klamoth川デルタ	カリフォルニア州北部	1980年11月8日	地震(M=6.5)	約50km	30~70m	0.25°	20kmx2km 深さ5~15m	不明	なし	デルタ地形	砂およびシルト粘土	なし
Eratini湾	ギリシャ	1995年6月15日	Aegion地震(Ms=6.2)	震源域		12~18%	深さ6~10m	不明	海岸が5~15m流失		緩い沖積層(シルト質砂および粘土の互層)	護岸破壊
Degirmendere	トルコ	1999年8月17日	トルコ・コジャエリ地震(M=7.8)	約10km	海岸線から約240mで-40m	約9°			奥行100m程度、間口250~300m程度	扇状地性堆積物	(10mm程度の礫を多く含む)砂礫。	4階建てホテル、レストランと、そこにいた多くの人

國生剛治・堤 千花・池原 研(2002), 地震動による海底地滑りの発生メカニズムに関する地盤工学的検討. 中央大学理工学研究所年報, 第9号, 18-24.

http://dl.ndl.go.jp/view/download/digidepo_8813585_po_200102kokusho.pdf?contentNo=2&alternativeNo=

1999 Kocaeli (Izmit)-Turkey earthquake (Mw 7.4)

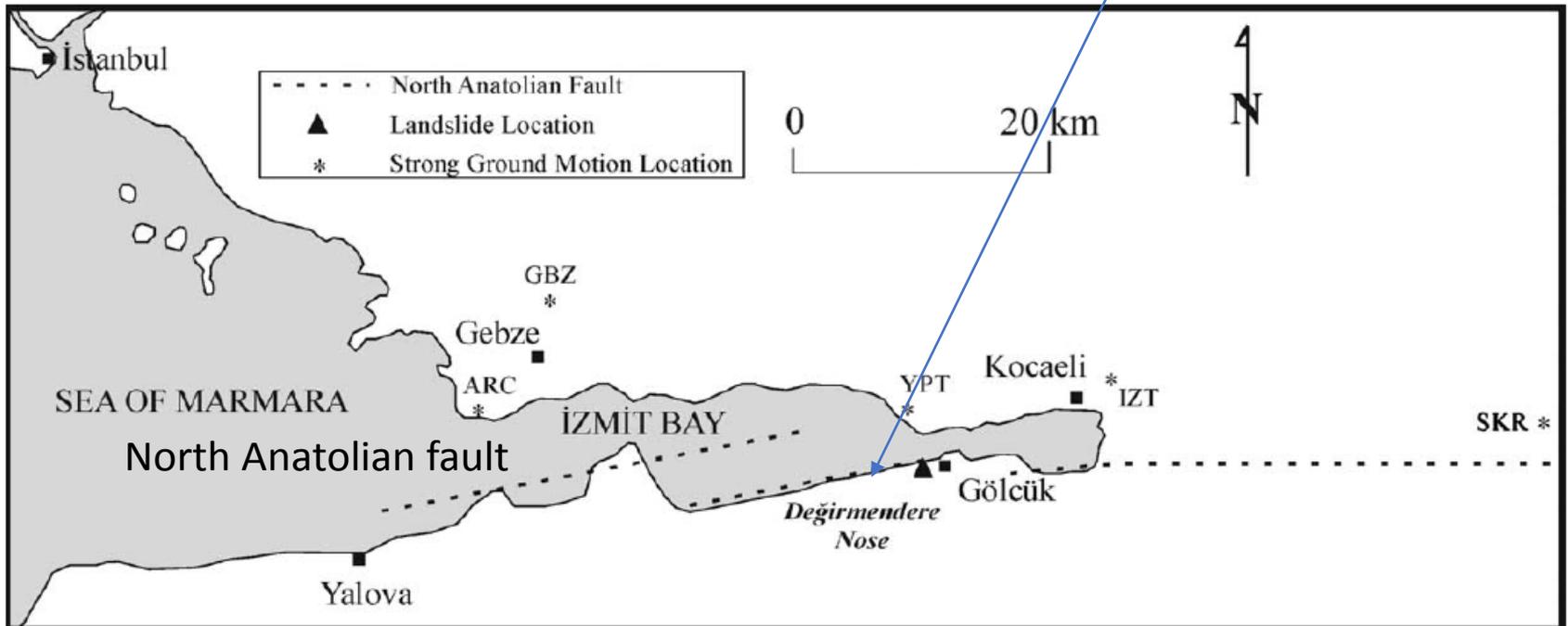
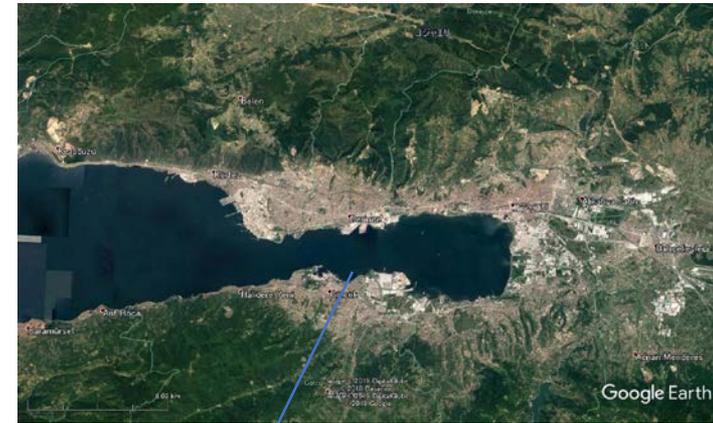


Fig. 1. Case history site map.

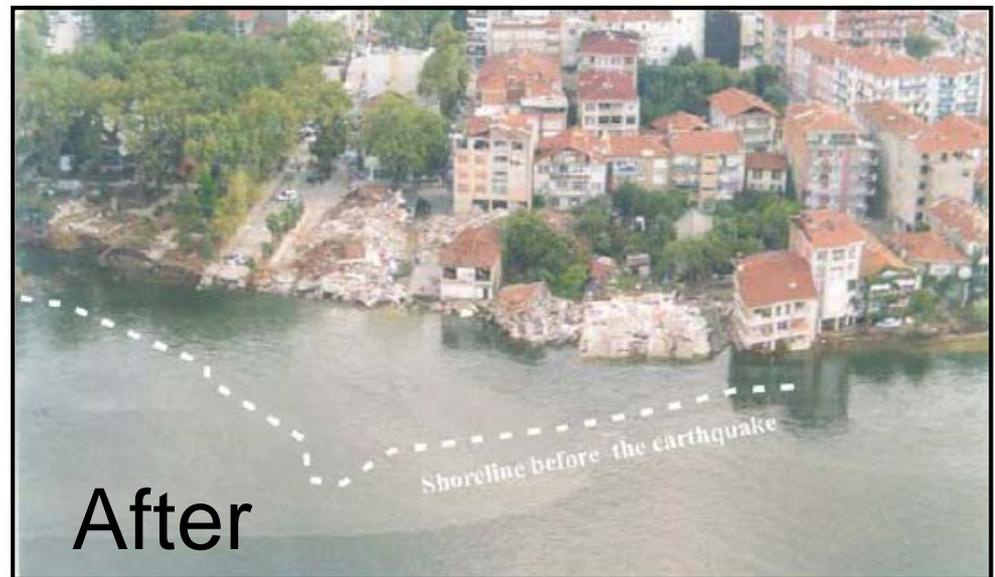
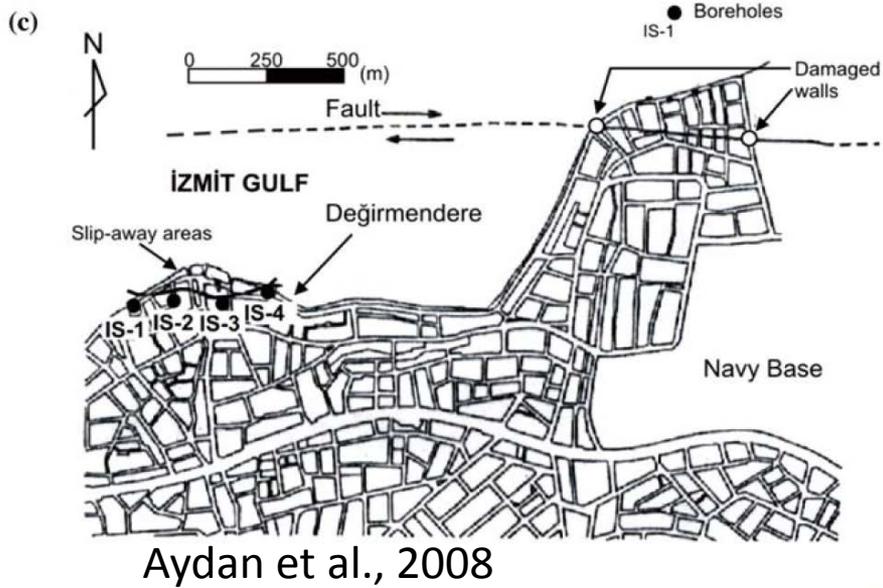


Fig. 3. View of Degirmendere Nose before the earthquake.

Fig. 4. View of Degirmendere Nose after the earthquake.

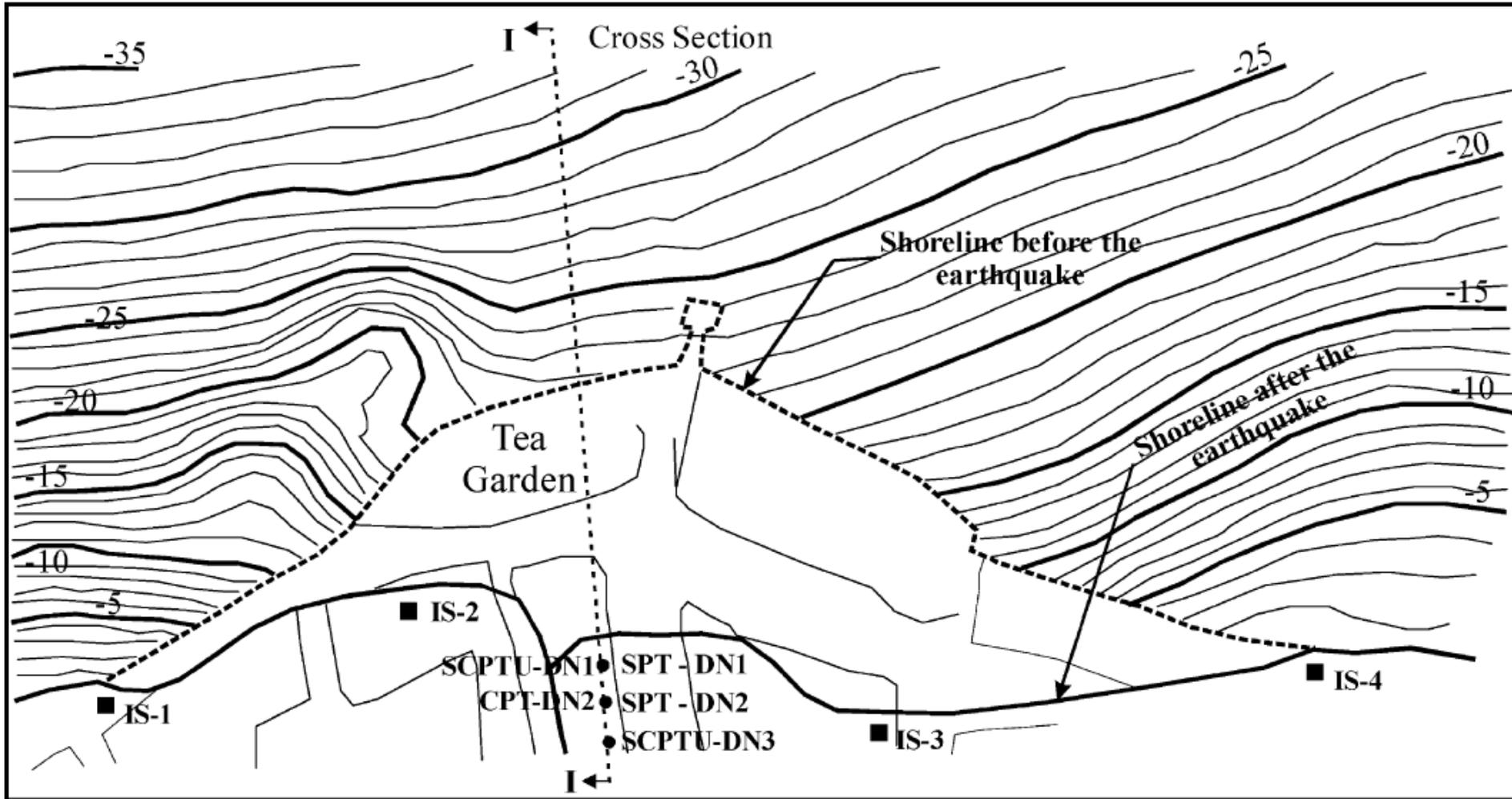
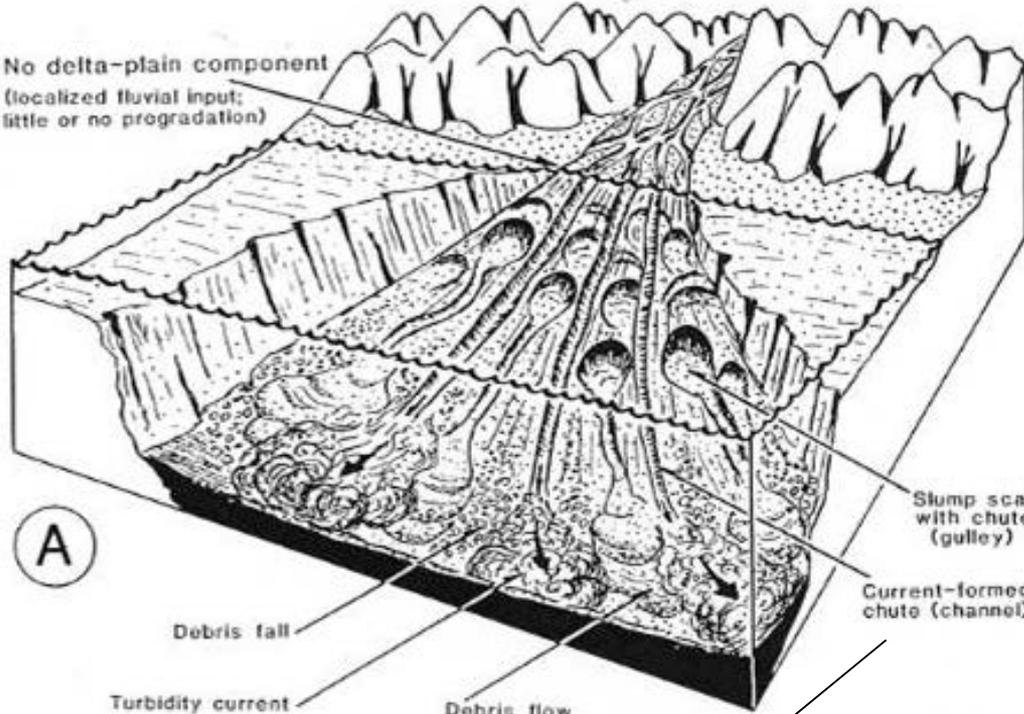
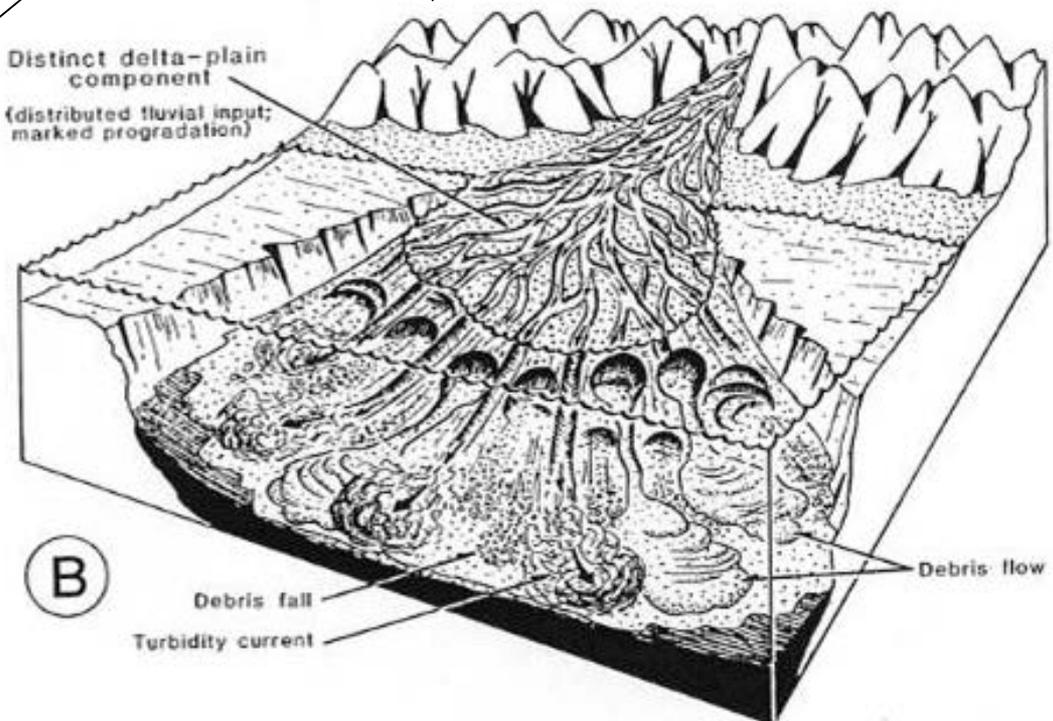
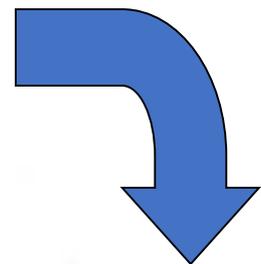


Fig. 5. Bathymetry map of Degirmendere Nose.



静岡平野

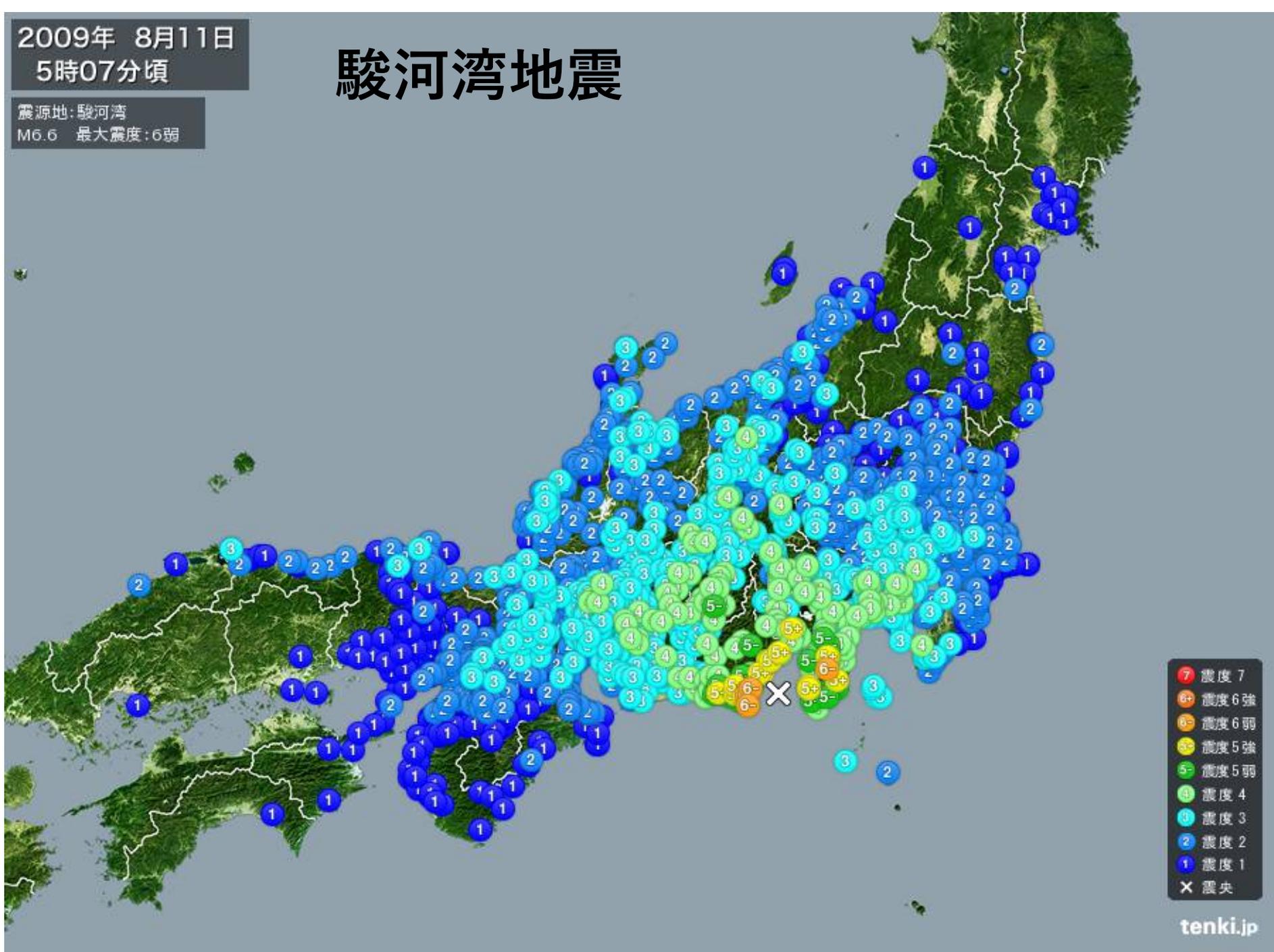


ファンデルタ

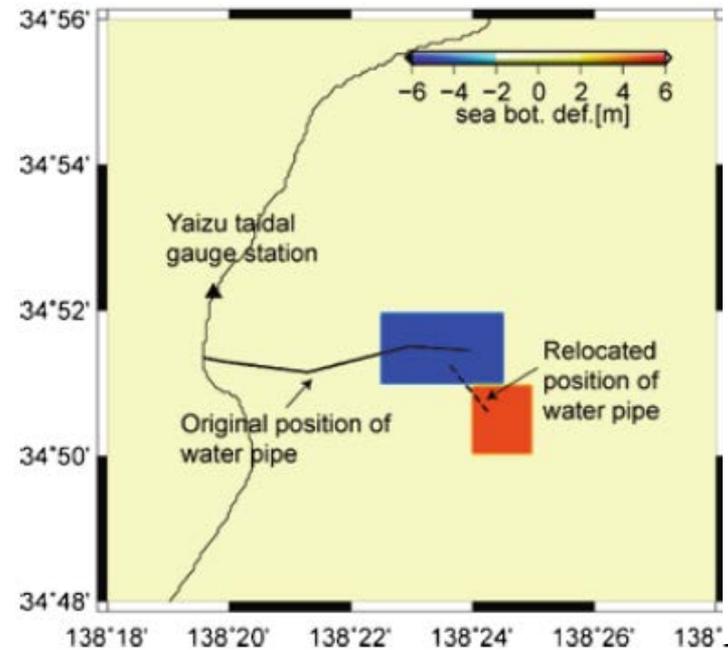
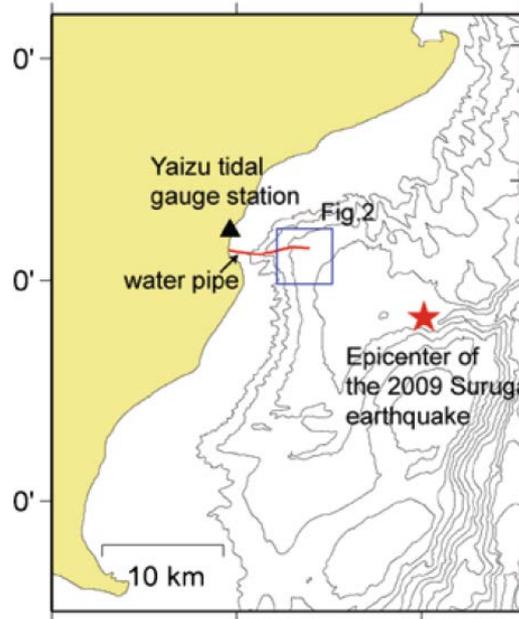
2009年 8月11日
5時07分頃

駿河湾地震

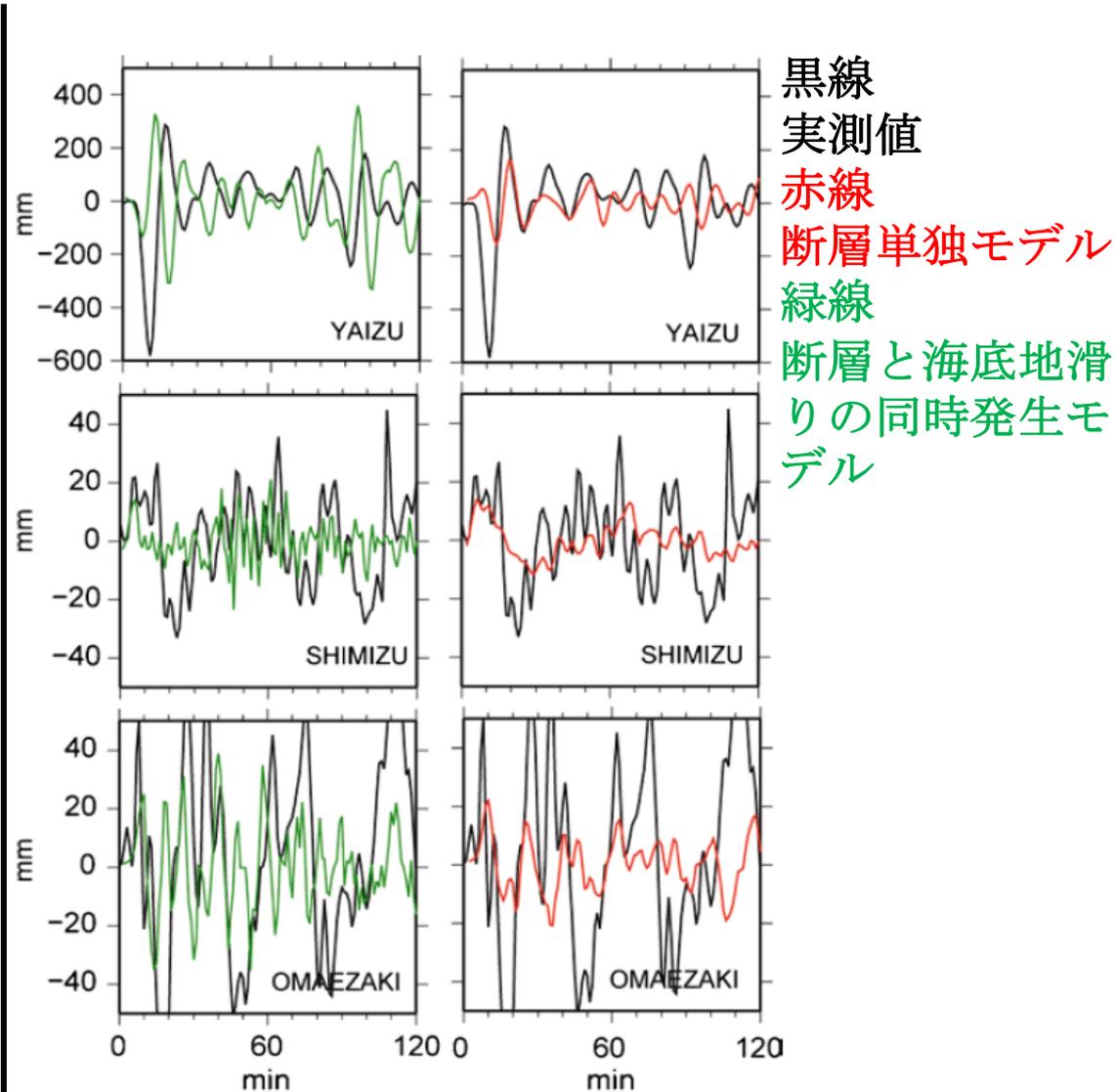
震源地: 駿河湾
M6.6 最大震度: 6弱

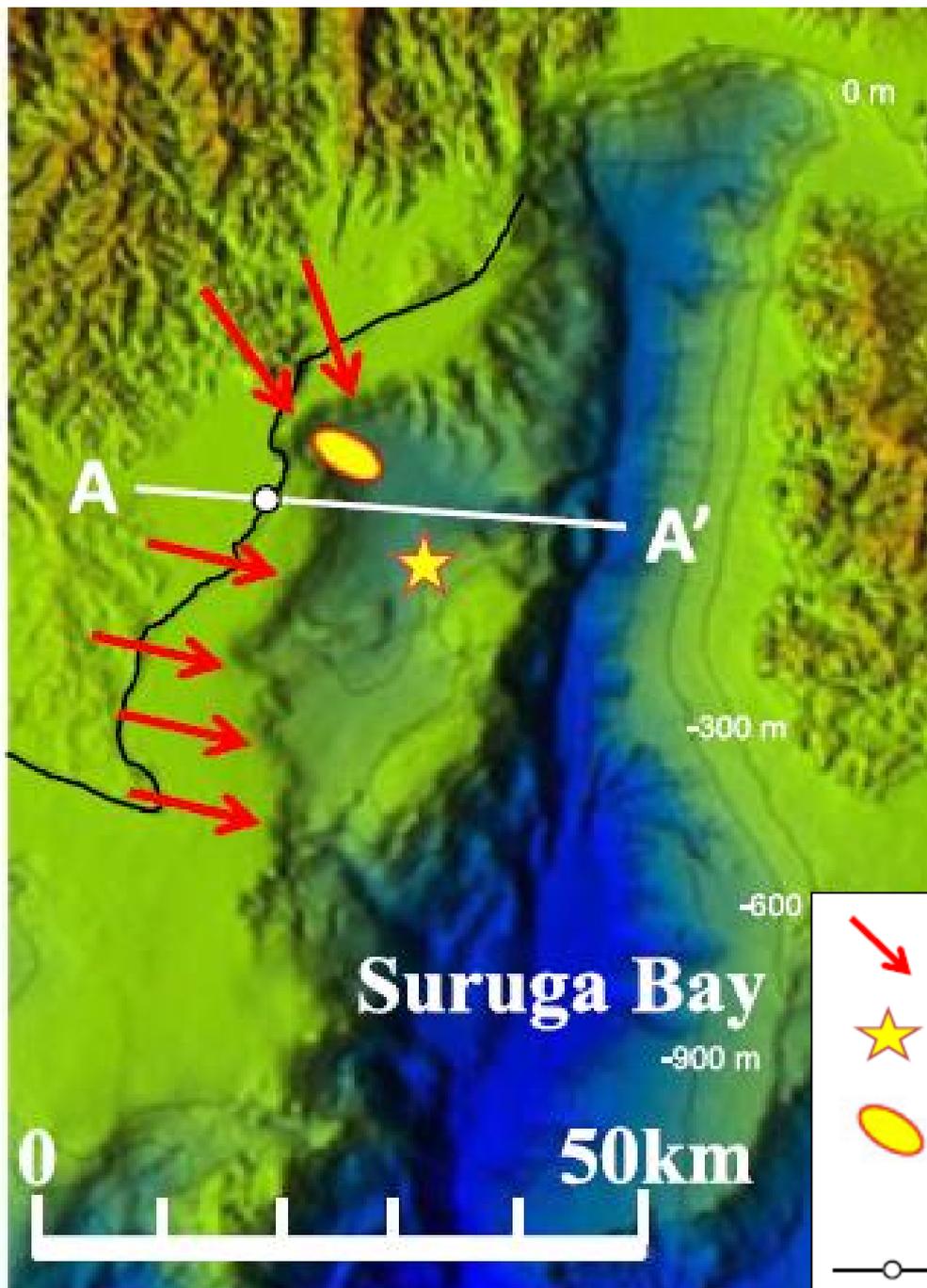


2009年8月11日5時7分頃，深さ23 kmで
マグニチュード6.4の地震が発生.



深層水取水管の破損・移動



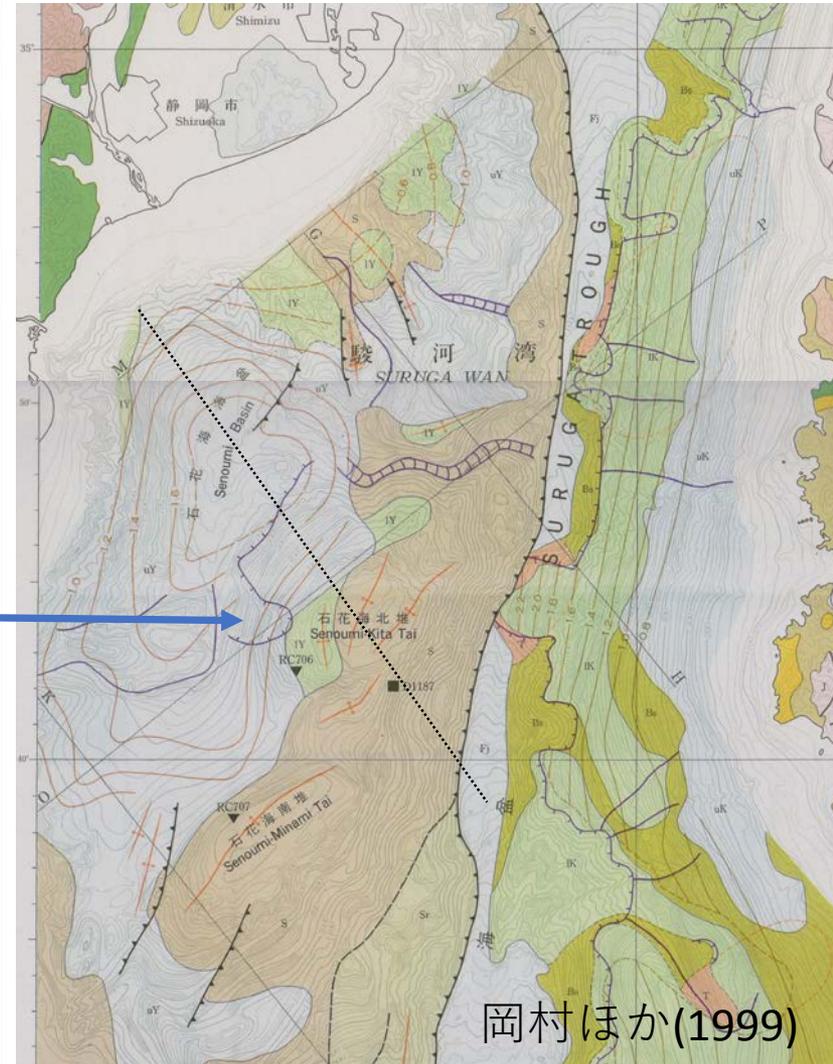
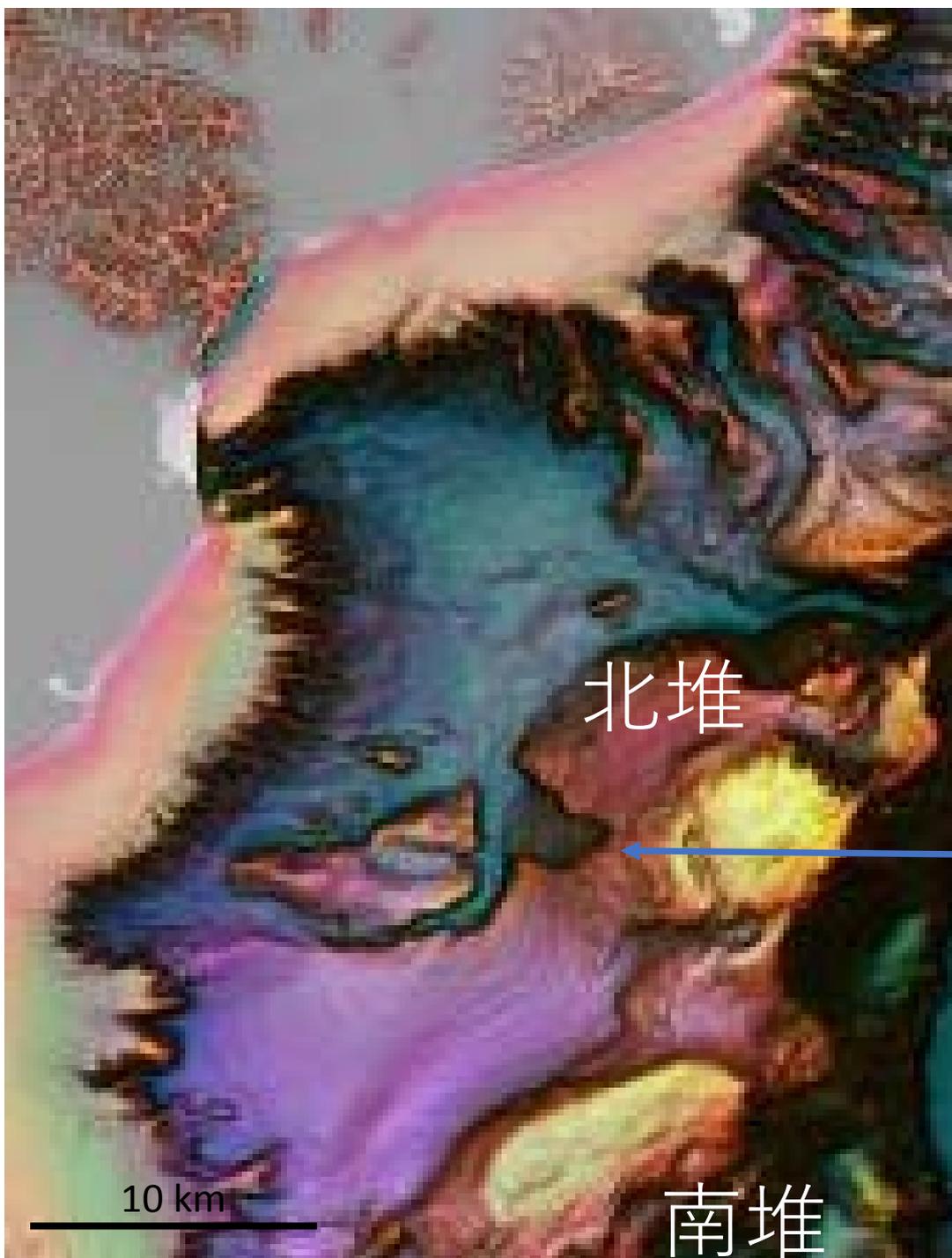


-  Possible border of head scarp of landslide
-  Epicenter of 2009 Suruga bay earthquake
-  Submarine landslide induced by the earthquake which caused a small scale Tsunami
-  Coast line

Sassa (2012)

海底地滑り地形

石花海(せのうみ)北堆



石花海北堆

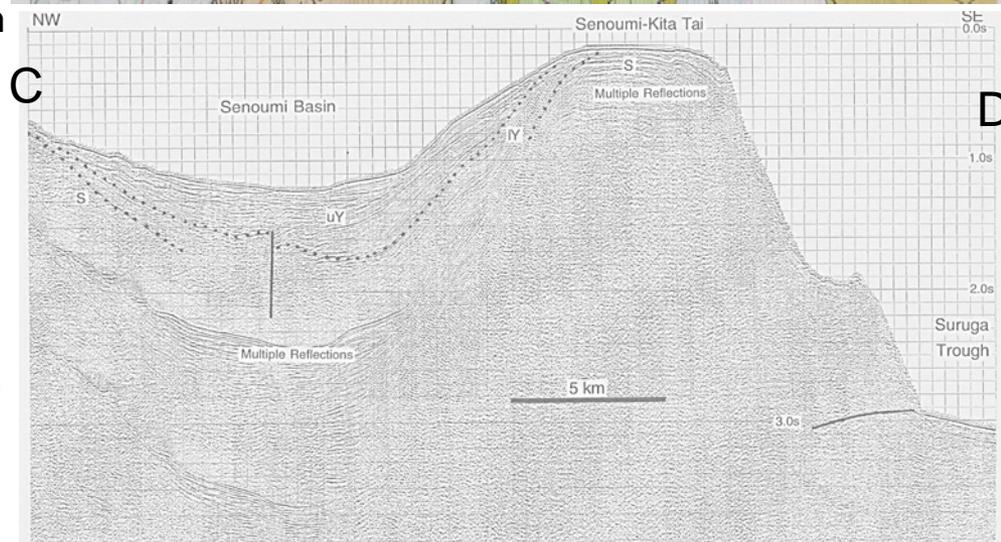
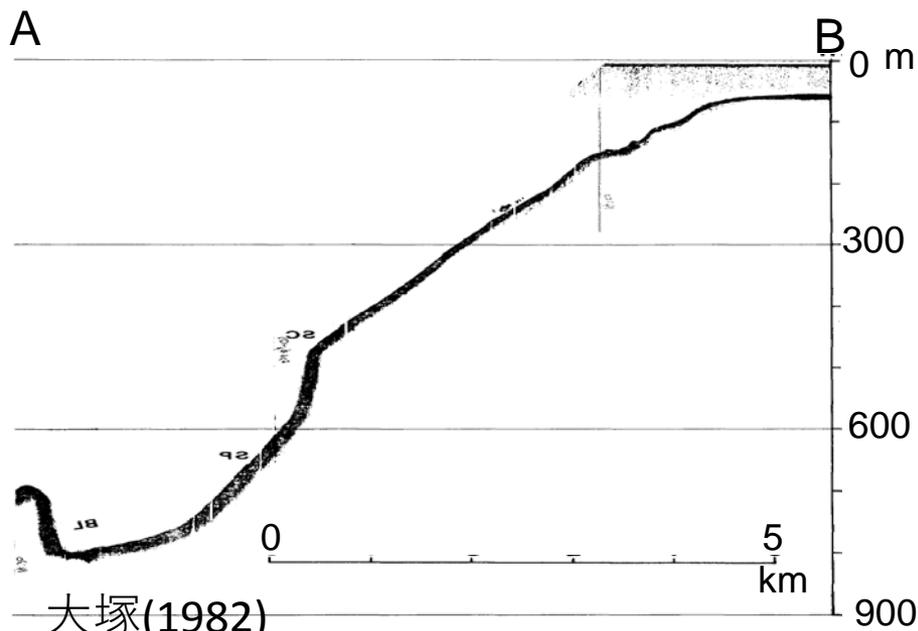
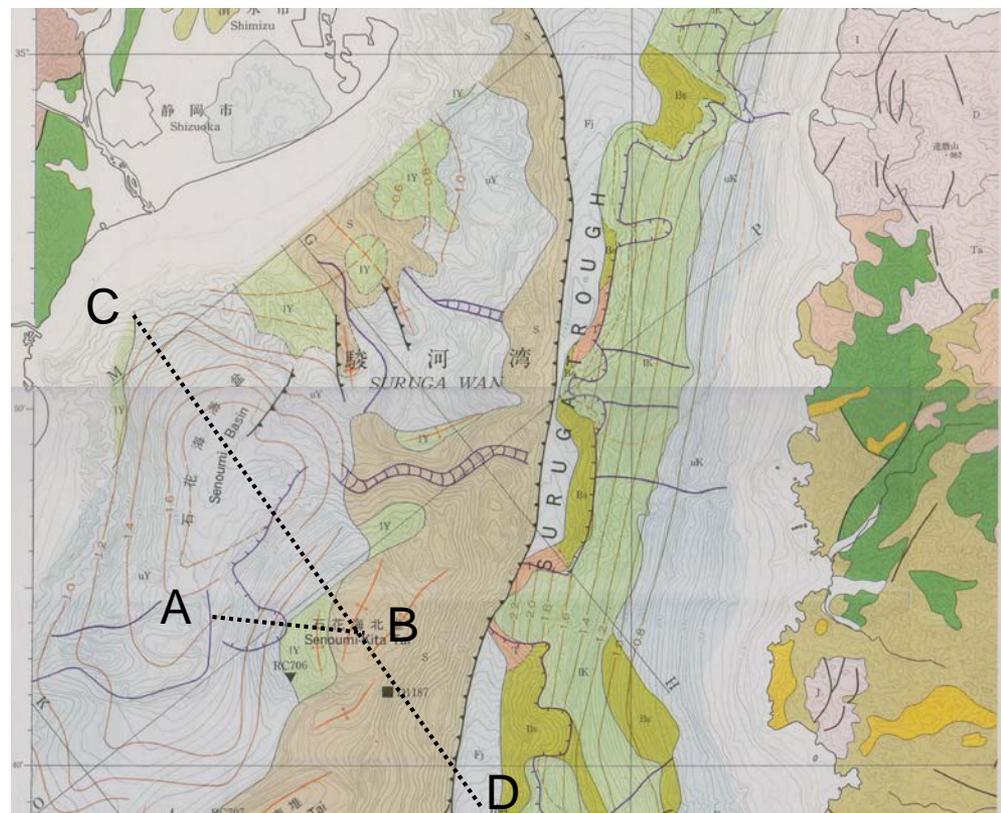
uY 焼津沖層群上部層

IV 焼津沖層群下部層

更新世後半

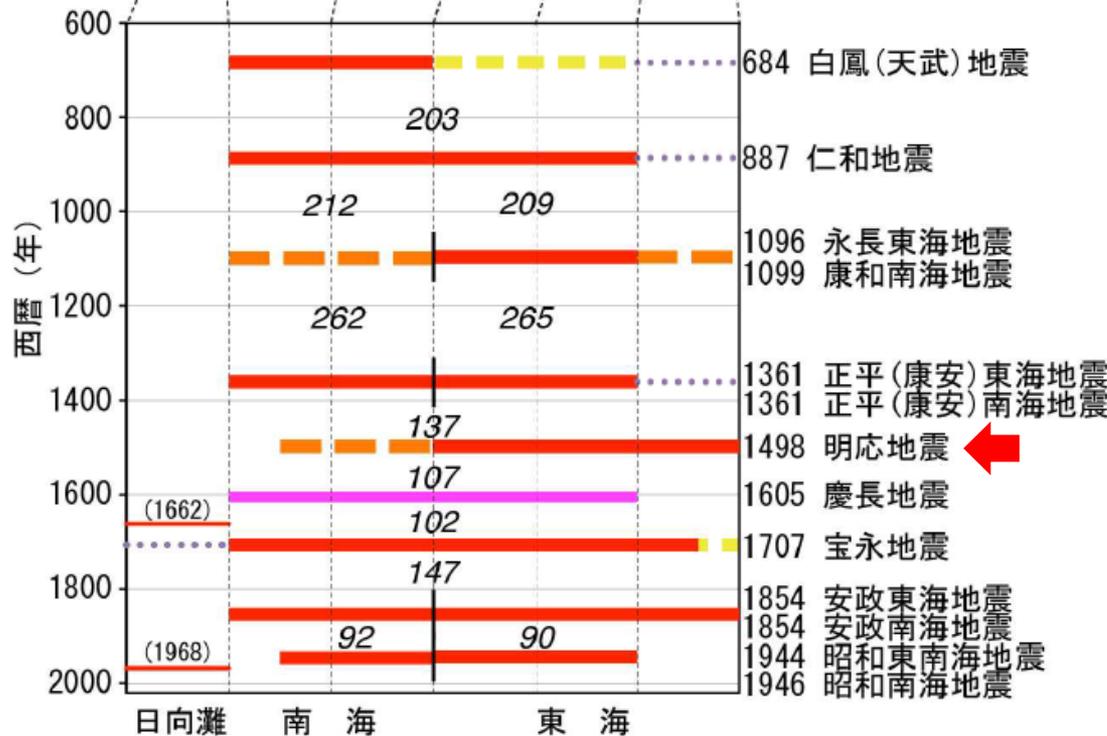
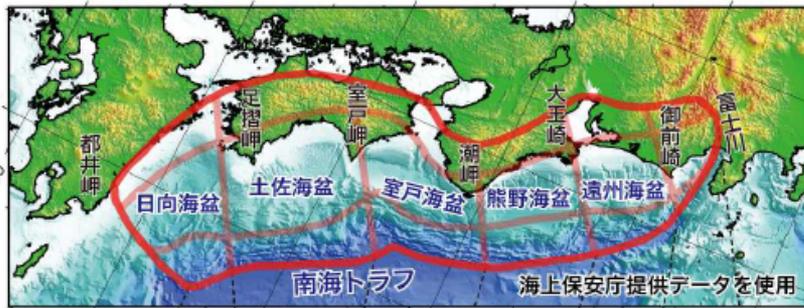
外縁隆起帯

石花海北堆・南堆は中期更新世以降隆起，有度丘陵は10万年以降隆起

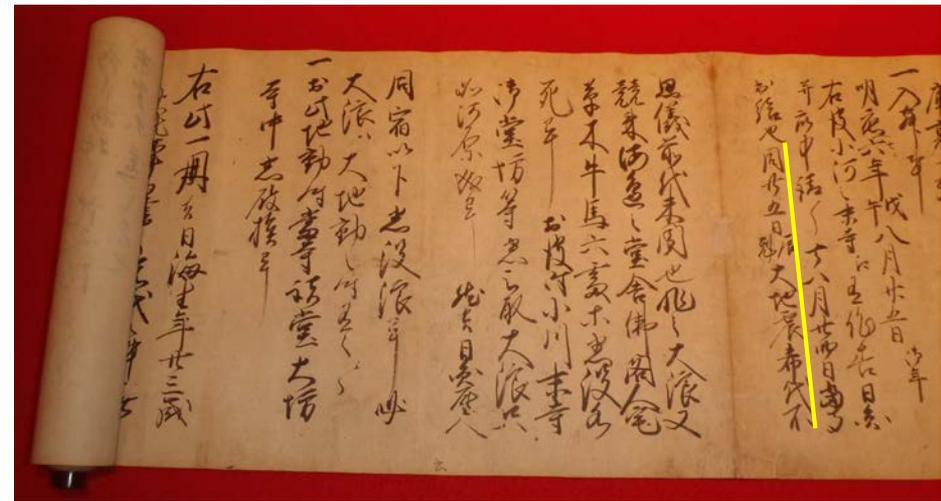


第20図 石花海海盆から石花海北堆を横断するマイグレーション処理したSCSプロフィール
石花海北堆では石花海層群とそれを覆う焼津沖層群が大きく隆起している。IV：焼津沖層群下部層，uY：焼津沖層群上部層，S：石花海層群，位置は第6図に示す。

1498年明応地震



南海トラフの地震活動の長期評価(第二版)概要資料
平成25年5月 地震調査研究水深本部



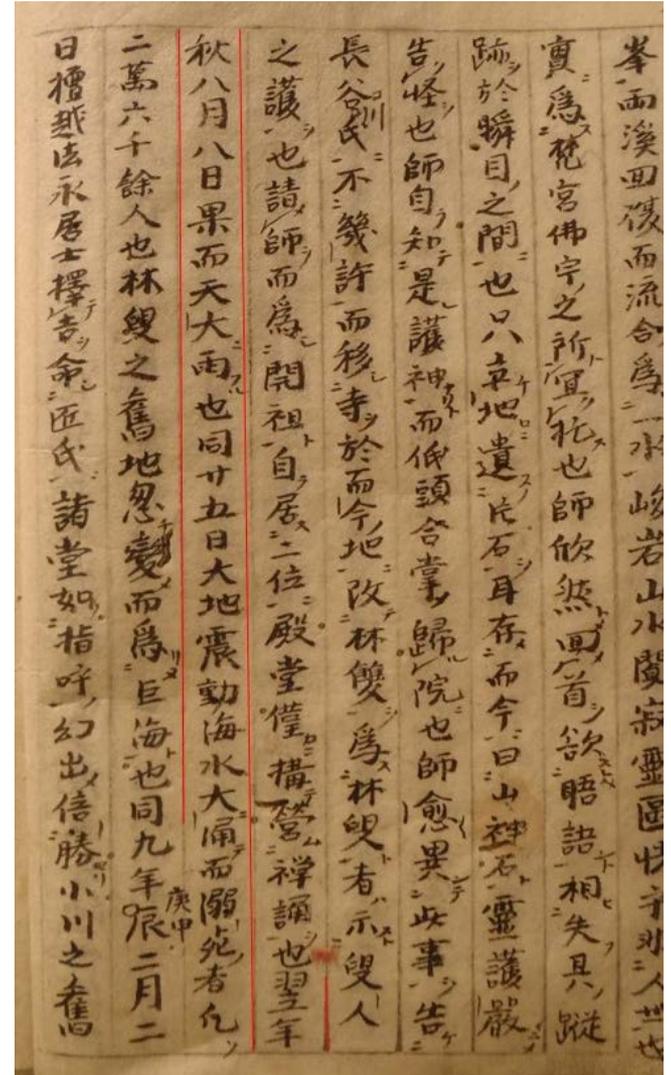
海長寺の日海記

翌日25日午前8時頃、前代未聞の大きな地震があった。まもなく大波が襲ってきて、海辺の寺院の建物、庶民の家、草木、牛馬などがすべて水に没した。このとき、小川の末寺や御堂はみな大波に持ち去られた。あとには何もなくて河原のようであった。都司(2012)

林叟院の海没（林叟院創記抄寫）

明応7年8月に大雨， および大地震があつて津波が起き， 2万6千人の溺死者が出た． 寺が元あった場所は大海に成ってしまった(都司ほか， 2013, 津波工学研究報告第30号， 123-141).

北村 撮影



わが国における地震時の海岸変状の事例調査

東京電機大学 学生員○風見 健太郎

東京電機大学 正会員 安田 進

東京電機大学 佐野 秀紀 鈴木 宏和

3. 海底地すべりに伴う海岸変状の事例

(1) 1498年明応大地震の事例

1498年に駿河湾沖を震源として発生した明応大地震では、地形変化を多く生じた地震であることがわかった。そのなかでも代表的なのが、現在の静岡県焼津市小川港付近にあったといわれている林叟院という寺院が海没した事例である。海没した原因として海底谷の存在が挙げられる。そこで、小川港付近の海底地形図を図2に示す。地形図を見る限り小川港付近は陸地から500m足らずで急深の海底谷となっていることがわかる。江戸時代から明治期にかけて数百mの海進があったという事実があり、海底谷のすぐ近くに海岸があったと考えられる。また、林叟院の跡地は陸地から300~400mのところであり、急深の海底谷が100~200m程度のところにせまっておき、地震動により何らかの原因で海に引きずり込まれて海没したと推定される。現地調査を行ったところ、この付近の海岸は直径が10mm程度の礫により覆われており、この付近を覆っているのは瀬戸川や大井川から運ばれた扇状地堆積物であると思われる。したがって、谷地形に堆積していた砂礫が地震によりすべり破壊を生じたのではないかと考えられる。

図1 琵琶湖周辺の水没地域と断層

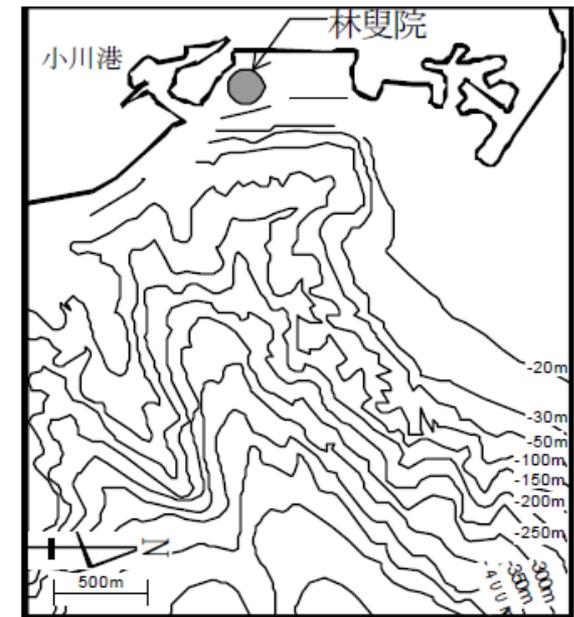
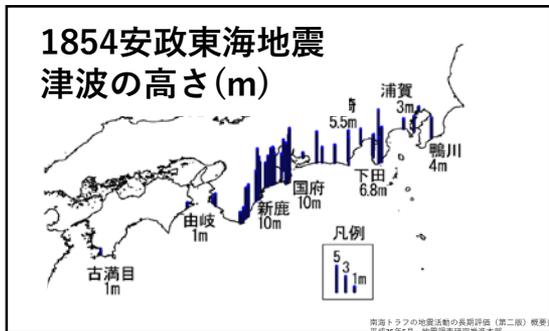
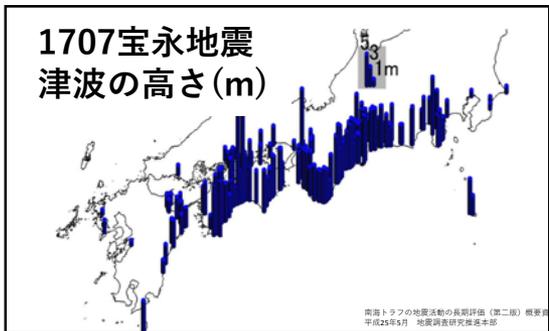
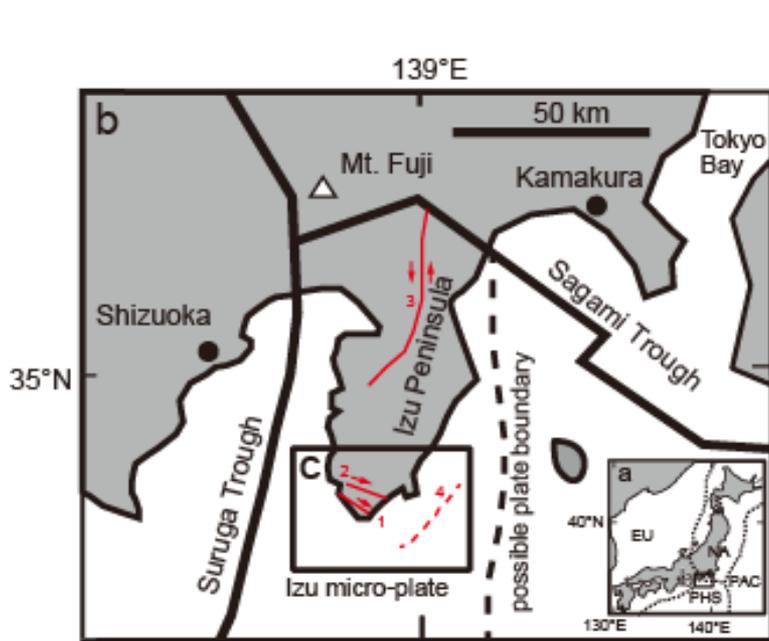


図2 小川港付近の海底地形図

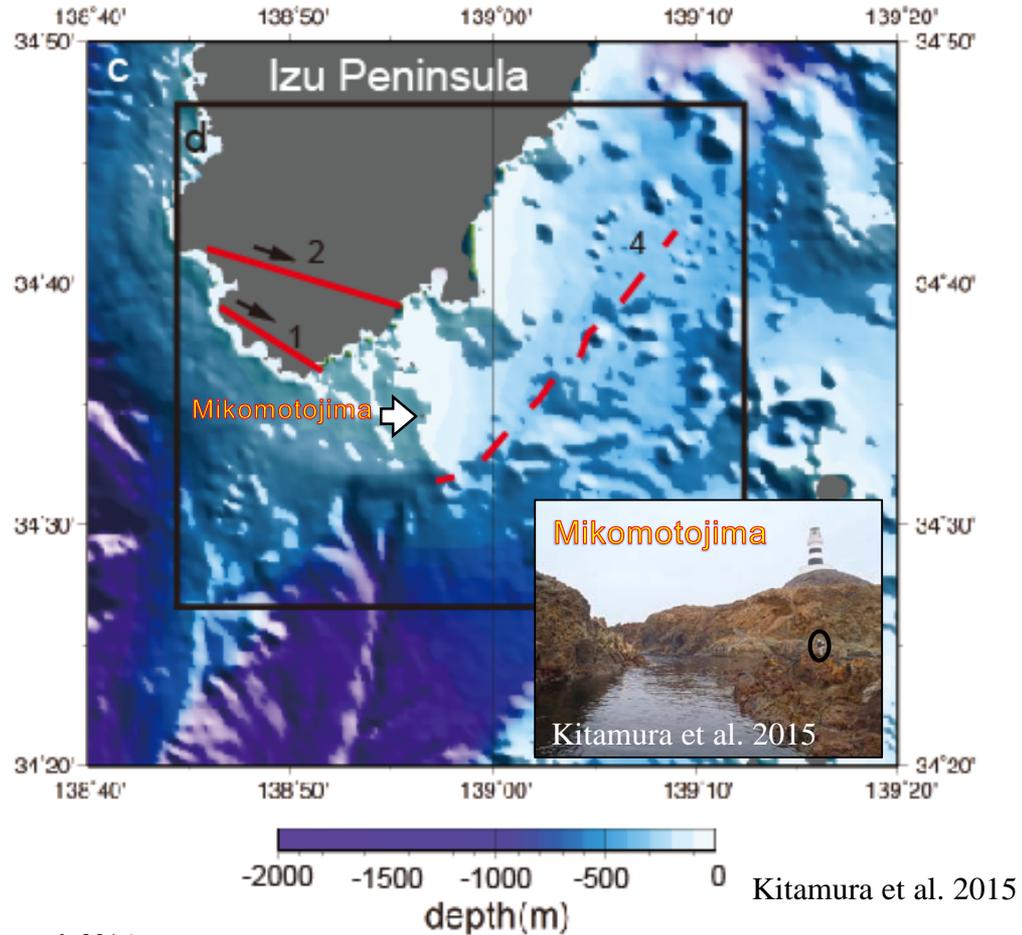
明応東海地震の津波の高さの推定値



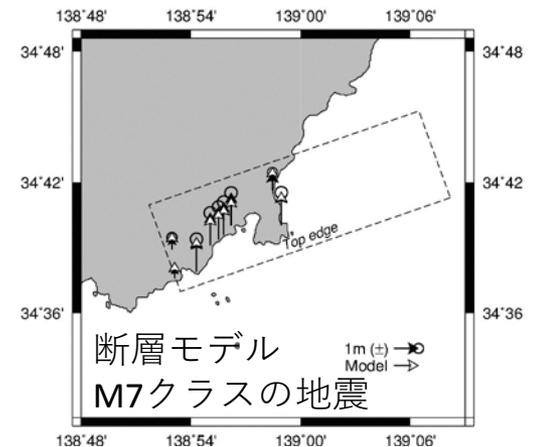
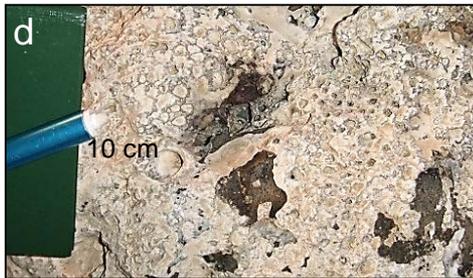
- ### 明応東海地震の前後の出来事
- 1477年 応仁の乱の終結
 - 1491年 北条早雲が伊豆を攻略
 - 1492年 コロンブスの新大陸発見
 - 1495年 北条早雲が小田原城を奪取
 - 1497年 毛利元就誕生
 - 1519年 今川義元誕生
 - 1521年 武田信玄誕生
 - 1530年 上杉謙信誕生
 - 1534年 織田信長誕生
 - 1543年 徳川家康誕生



1: Irozaki Fault, 2: Kamigamo Fault, 3: Tanna Fault,
4: inferred active fault proposed by Kim et al. (2012).

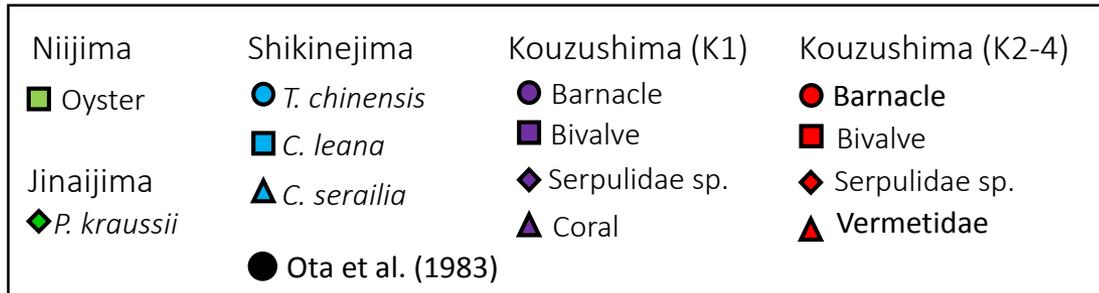


Kitamura et al. 2016

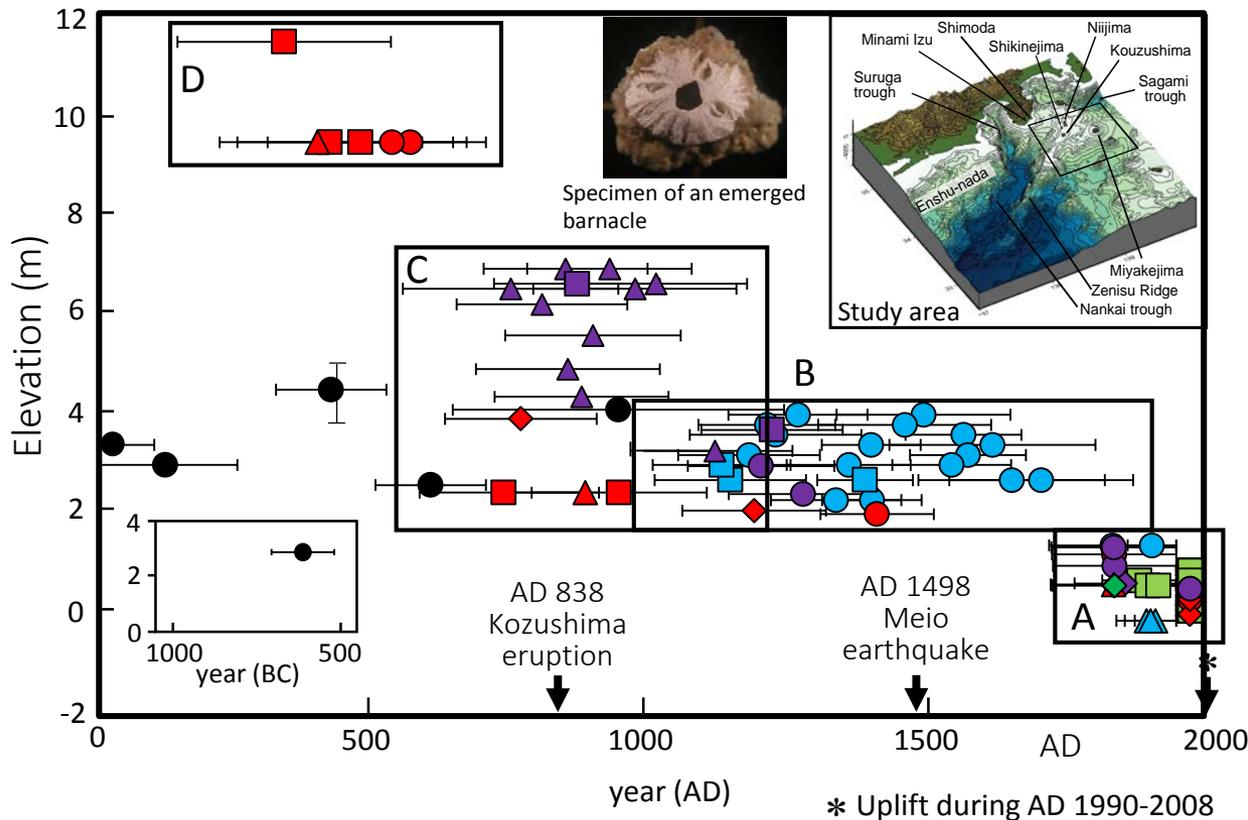


下田の隆起貝層 紀元前1256-950年, 西暦1000-1270年, 西暦 1430-1660年,
西暦1506-1815年に突発的隆起があり, その原因は下田沖の海底断層の活動
(M7クラスの地震)による (Kitamura et al., 2014; 2015; 2016).

新島・式根島・神津島の隆起貝層



隆起イベント	最小隆起量 (m)	発生年代 (西暦)
1	0.5 新島 0.6 式根島 1.0 神津島	1950以降
2	2.7 式根島 2.4 神津島	786-1891
3	~3.6 神津島	600-1165
4	3.3-8.1 神津島	161-686



4回の隆起イベントが識別された。隆起の主因は火山活動や中規模地震と考えられるが、イベント2が明応地震の証拠である可能性は残された(Kitamura et al., 2017).

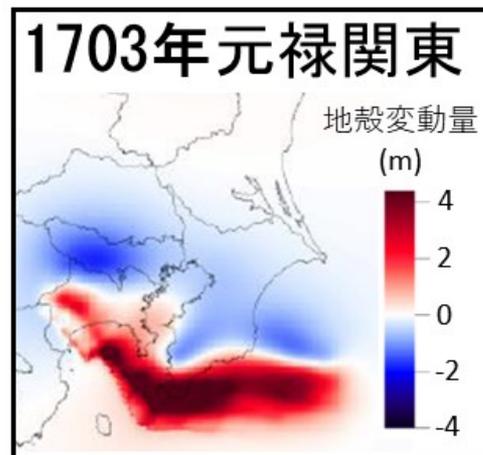
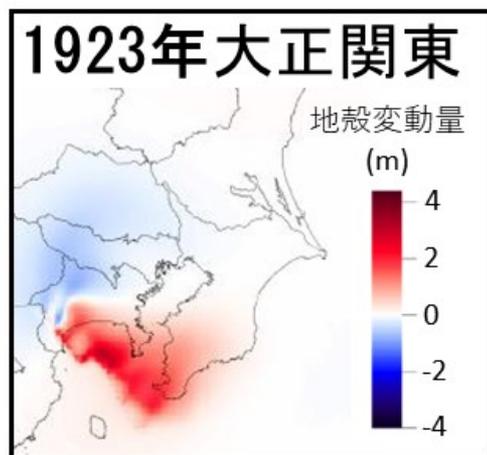
Elevations and ages of emerged sessile assemblages at the Izu Islands on the northern Zenisu Ridge off Central Japan.

1495年明応関東地震？

静岡県伊東市宇佐美遺跡の標高7.9 mの所に津波堆積物(下図の4~5)があり，遺物から15世紀末．鎌倉大日記の1495年の地震津波に対応．隆起現象(段丘など)が未検出．



大正関東地震 と元禄関東地震 の地殻変動



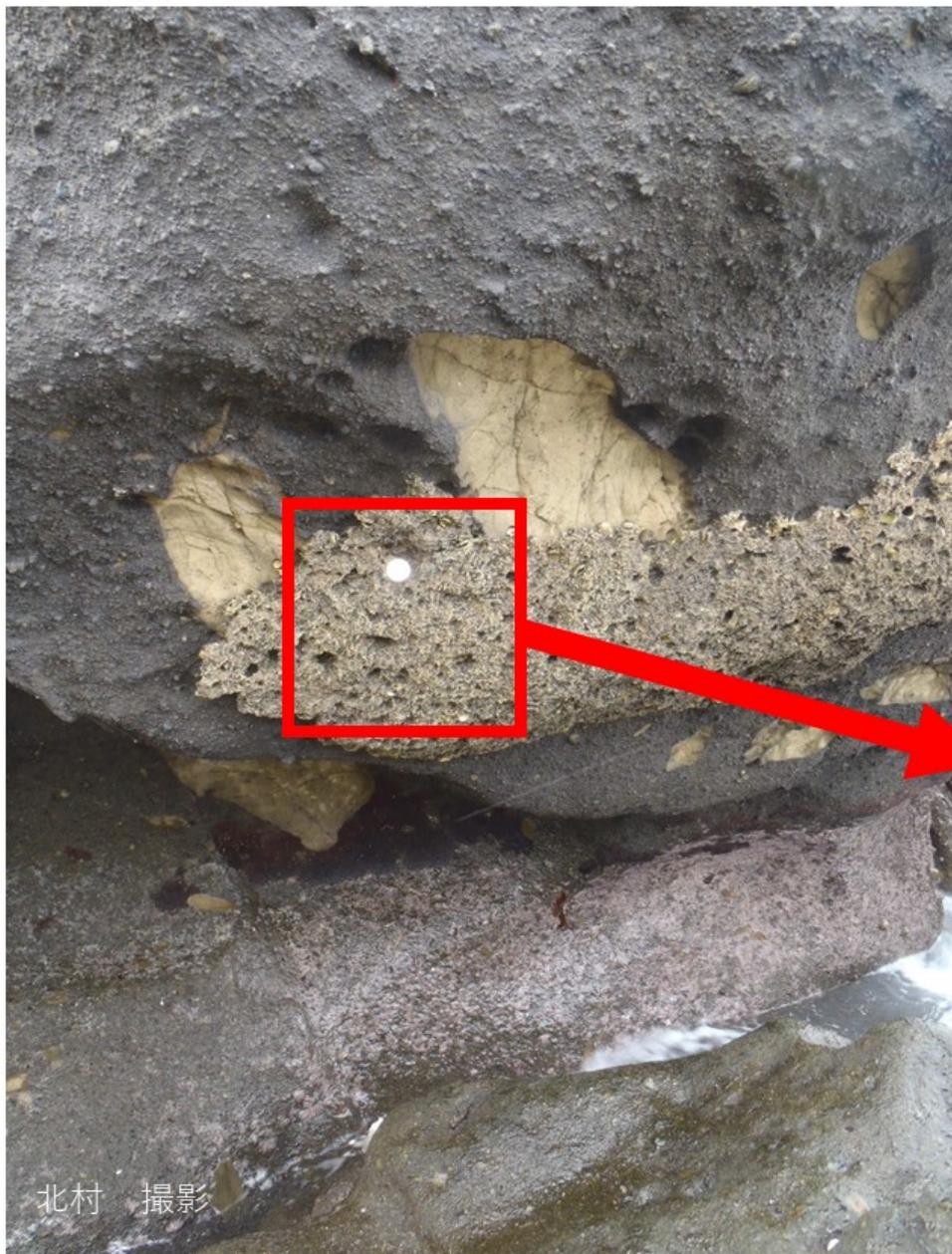
平成25年12月
首都直下地震
モデル検討
会・資料の図
32, 35を改変

千葉県館山市



第四紀学会パンフレット「第四紀とは」を改変

千葉県館山市

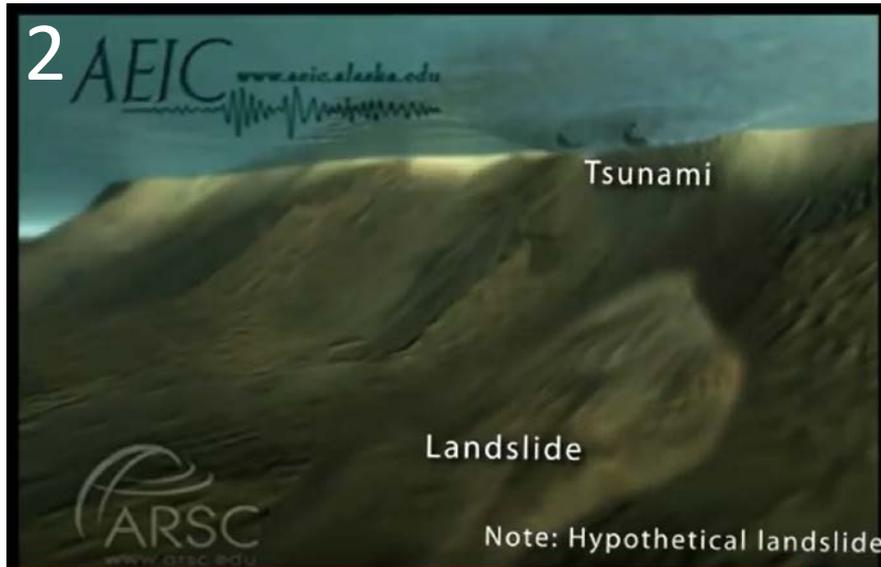
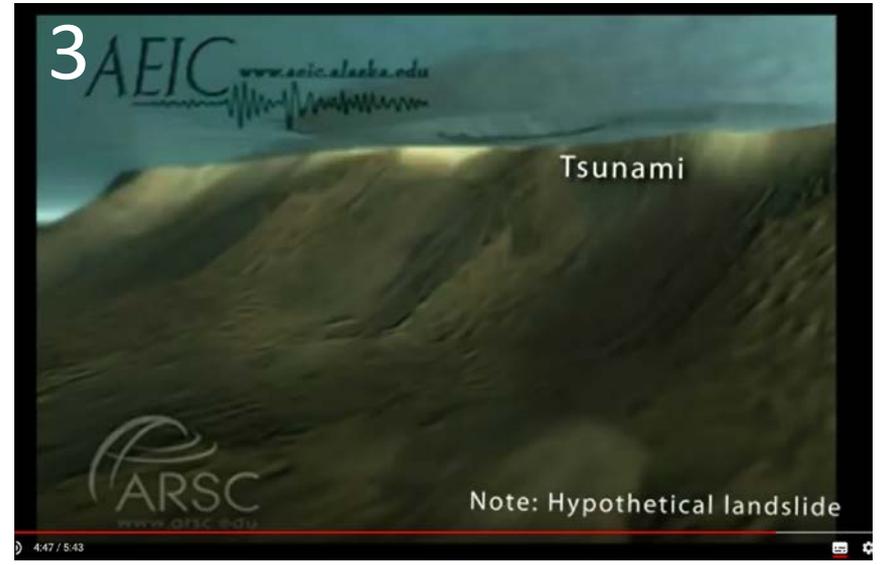


隆起した固着動物化石の種組成と ^{14}C 年代測定から隆起量・発生年代を推定



今後の課題

レベル1と海底地滑りの複合津波(“レベル1.5”)



静岡県

・ Kitamura, A., 2016. Examination of the largest-possible tsunamis (Level 2 tsunami) generated along the Nankai and Suruga troughs during the past 4000 years based on studies of tsunami deposits from the 2011 Tohoku-oki tsunami. *Progress in Earth and Planetary Science*. 3:12 DOI: 10.1186/s40645-016-0092-7

伊豆半島

・ Kitamura, A., Mitsui, Y., Kawate, S., Kim, H. Y., 2015. Examination of an active submarine fault off the southeast Izu Peninsular, central Japan, using field evidence for co-seismic uplift and a characteristic earthquake model. *Earth, Planets and Space*. 67:197 DOI 10.1186/s40623-015-0367-z

・ Kitamura, A., Ohashi, Y., Ishibashi, H., Miyairi, Y., Yokoyama, Y., Ikuta, R., Ito, Y., Ikeda, M., Shimano, T., 2015. Holocene geohazard events on the southern Izu Peninsula, central Japan. *Quaternary International*, 397, 541-554 Open Access <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1040618215004231>

・ Kitamura, A., Koyama M., Itasaka K., Miyairi Y., and Mori, H., 2014. Abrupt Late Holocene uplifts of the southern Izu Peninsula, central Japan: Evidence from emerged marine sessile assemblages. *Island Arc*, 23, 51–61. DOI: 10.1111/iar.12059

・ 北村晃寿・大橋陽子・宮入陽介・横山祐典・山口寿之, 2014. 静岡県下田市海岸から発見された津波石. *第四紀研究*, 53, 259-264.

・ 北村晃寿・小林小夏, 2014. 静岡平野・伊豆半島南部の中・後期完新世の古津波と古地震の地質学的記録. *地学雑誌*. 123, 813-834.

御前崎

・ Kitamura, A., Seki, Y., Kitamura, Y., Haga, T., 2018. The discovery of emerged boring bivalves at Cape Omaezaki, Shizuoka, Japan: evidence for the AD 1361 Tokai earthquake along the Nankai Trough. *Marine Geology*, 405, 114-119.

伊豆七島

・ Kitamura, A., Imai, T., Mitsui, Y., Ito, M., Miyairi, Y., Yokoyama, Y. Tokuda Y. 2017. Late Holocene uplift of the Izu Islands on the northern Zenisu Ridge off Central Japan. *Progress in Earth and Planetary Science*. <https://doi.org/10.1186/s40645-017-0146-5>

清水平野

・ Kitamura, A. and Kobayashi, K., 2014. Geologic evidence for prehistoric tsunamis and coseismic uplift during the AD 1854 Ansei-Tokai earthquake in Holocene sediments on the Shimizu Plain, central Japan. *The Holocene*, 24, 814–827. DOI: 10.1177/0959683614530447

静岡平野

Kitamura, A., Fujiwara, O., Shinohara, K., Akaike, S., Masuda, T., Ogura, K., Urano, Y., Kobayashi, K., Tamaki, C. and Mori, H., 2013. Identifying possible tsunami deposits on the Shizuoka Plain, Japan and their correlation with earthquake activity over the past 4000 years. *The Holocene*, 23, 1682-1696. DOI: 10.1177/0959683613505345

石垣島

・ Kitamura, A., Ito, M., Ikuta, R., Ikeda, M., 2018. Using molluscan assemblages from paleotsunami deposits to evaluate the influence of topography on the magnitude of late Holocene mega-tsunamis on Ishigaki Island, Japan. *Progress in Earth and Planetary Science*. 5:41. <https://doi.org/10.1186/s40645-018-0200-y>

・ Kitamura, A., Ito, M., Sakai, S., Y. Yokoyama, Miyairi, Y., 2018. Identification of tsunami deposits using a combination of radiometric dating and oxygen-isotope profiles of articulated bivalves. *Marine Geology* 403, 57–61. <https://doi.org/10.1016/j.margeo.2018.04.003>

Ando, M., Kitamura, A., Tu, Y, Ohashi, Y., Imai, T., Nakamura, M., Ikuta, R., Miyairi, Y., Yokoyama Y. and Shishikura, M. 2018. Source of high tsunamis along the southernmost Ryukyu trench inferred from tsunami stratigraphy. *Tectonophysics*, 722, 265-276.