

石川県能登半島北東部の群発地震： 陸域地震観測による群発地震発生メカ ニズムの解明

吉田圭佑

(東北大・理学研究科附属 地震噴火予知研究観測センター)

謝辞：珠洲市、能登町、輪島市、石川県の行政・住民、データ提供いただいた関係者の皆様の本調査に対するご理解とご協力に感謝します。

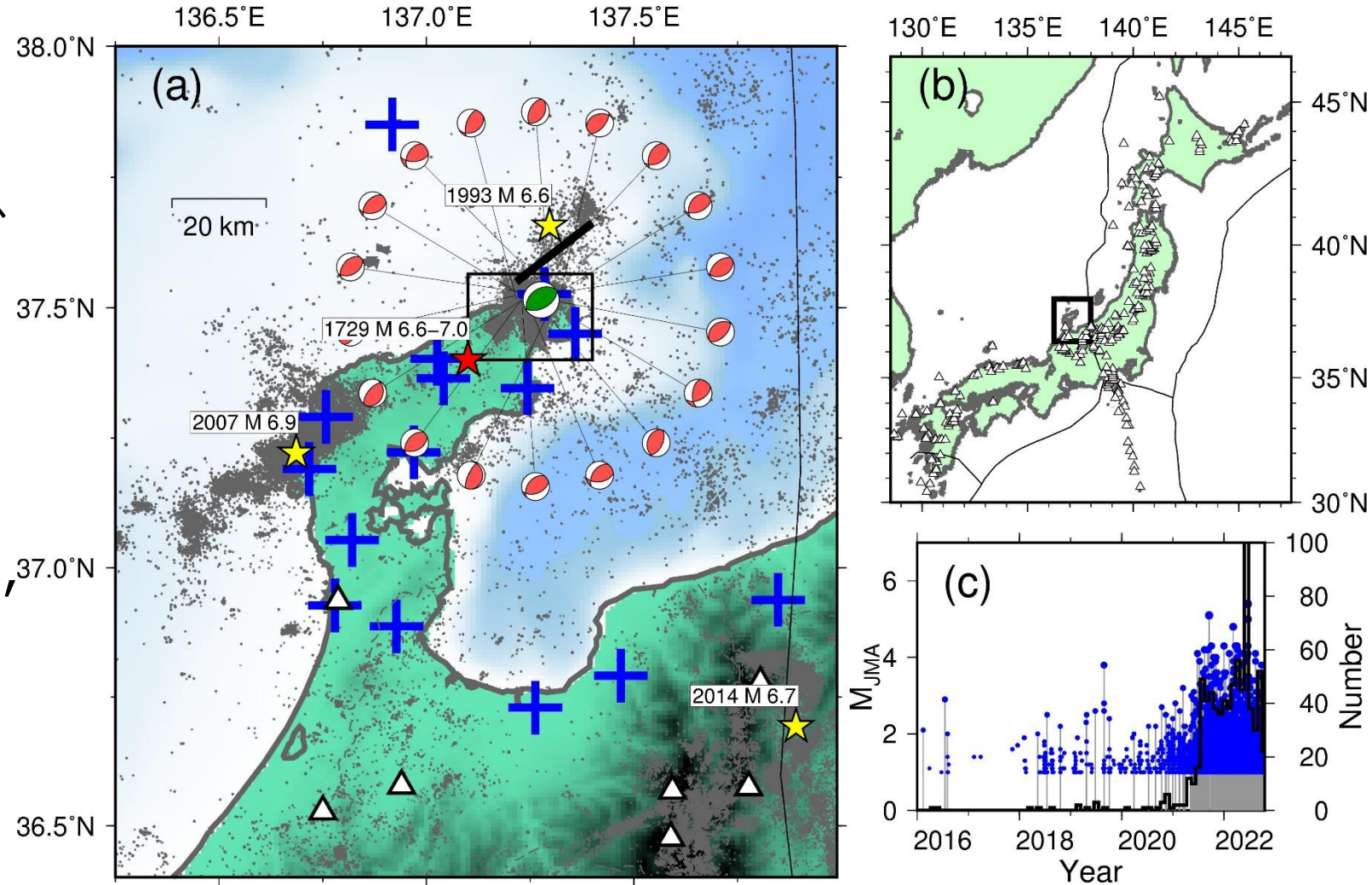
能登半島北東部で 2020年末頃から活発な群発地震活動

これまでの最大地震：
2022年6月19日M5.4地震（緑）
- 過去には 1993年にM6.6の地震、
1729年にM~6.6-7.0の地震

⇒ 今後の活動推移を考える上で発生原因の理解が重要

過去事例：地殻内の群発地震は、スラブ起源、火山活動に関係する流体に関係して発生したようにみえることが多い (e.g., Yukutake et al., 2011; Kosuga et al., 2014)

今回の活動域は、火山フロントより北側に位置し、第四紀火山や既知のカルデラは見られない



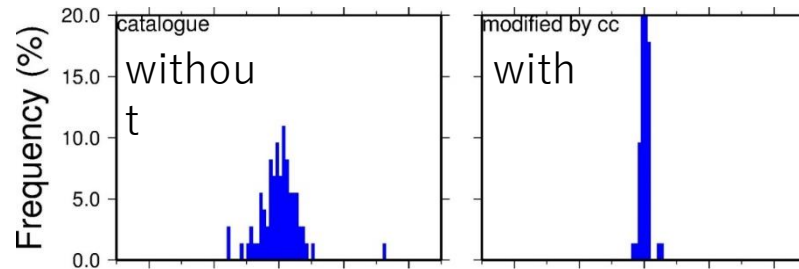
△：第四紀火山、十：観測点、●：気象庁一元化震源 (2003-)

Hypocenter relocations

Take advantage of waveform cross correlation to obtain the differential arrival time data

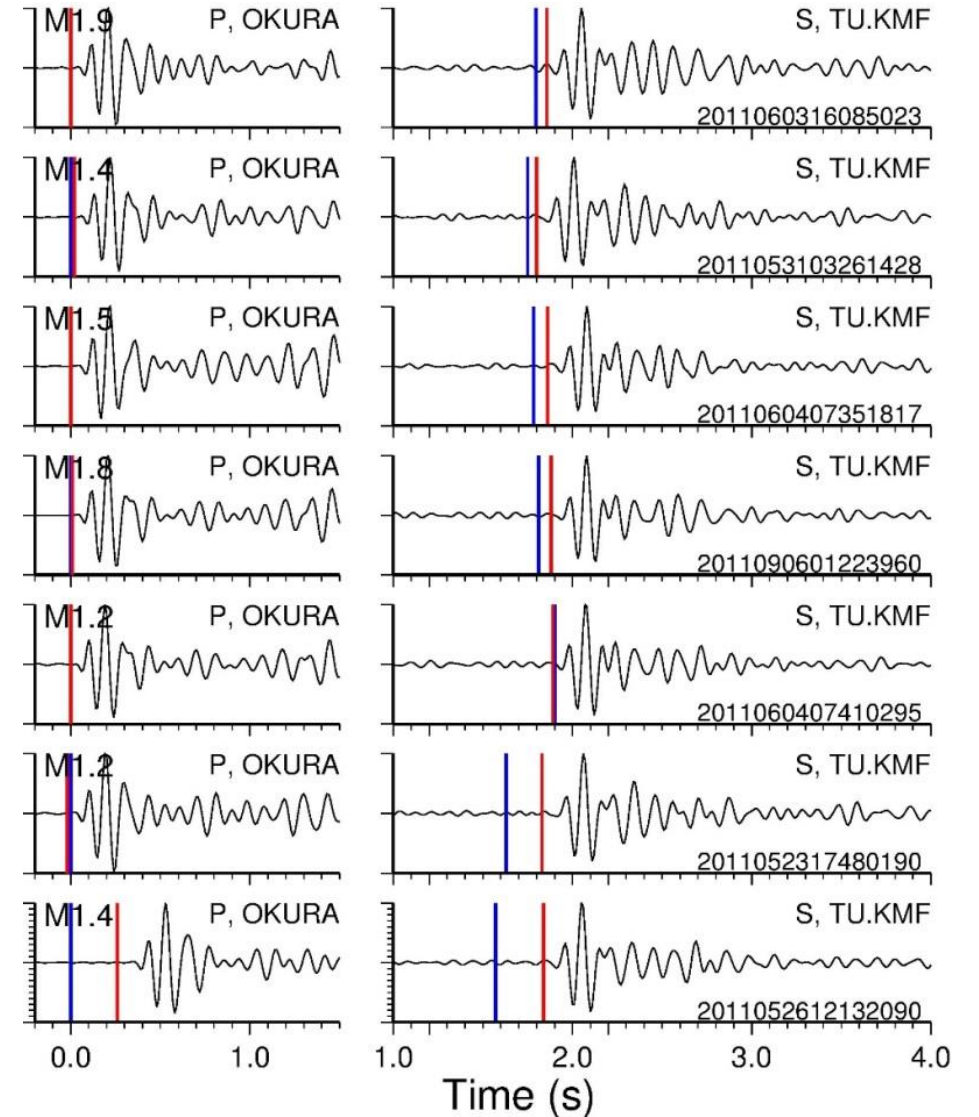
- Events: **10950** events in the JMA catalogue (2003/3-2022/9)
 - $M_{JMA} \geq 1$
- Quadratic Interpolation from 100 msec sampling to 10 msec
- Threshold of correlation coefficient: 0.8
- Number of obtained differential arrival times
 - P-wave: 280915 , S-wave: 282817
- Number of catalogue-derived differential arrival time data
 - P-wave: 26545802 , S-wave: 19922017

Examples of modification of S-P times based on the cross-correlation derived differential time



We apply the double-difference hypocenter relocation technique (Waldhauser & Ellsworth, 2000) to the differential arrival time data.

Examples of waveform Yoshida & Hasegawa (2018a)

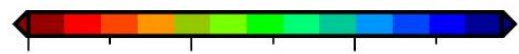


Blue : arrival times listed in the JMA unified catalogue
Red : arrival times modified by cross-correlation

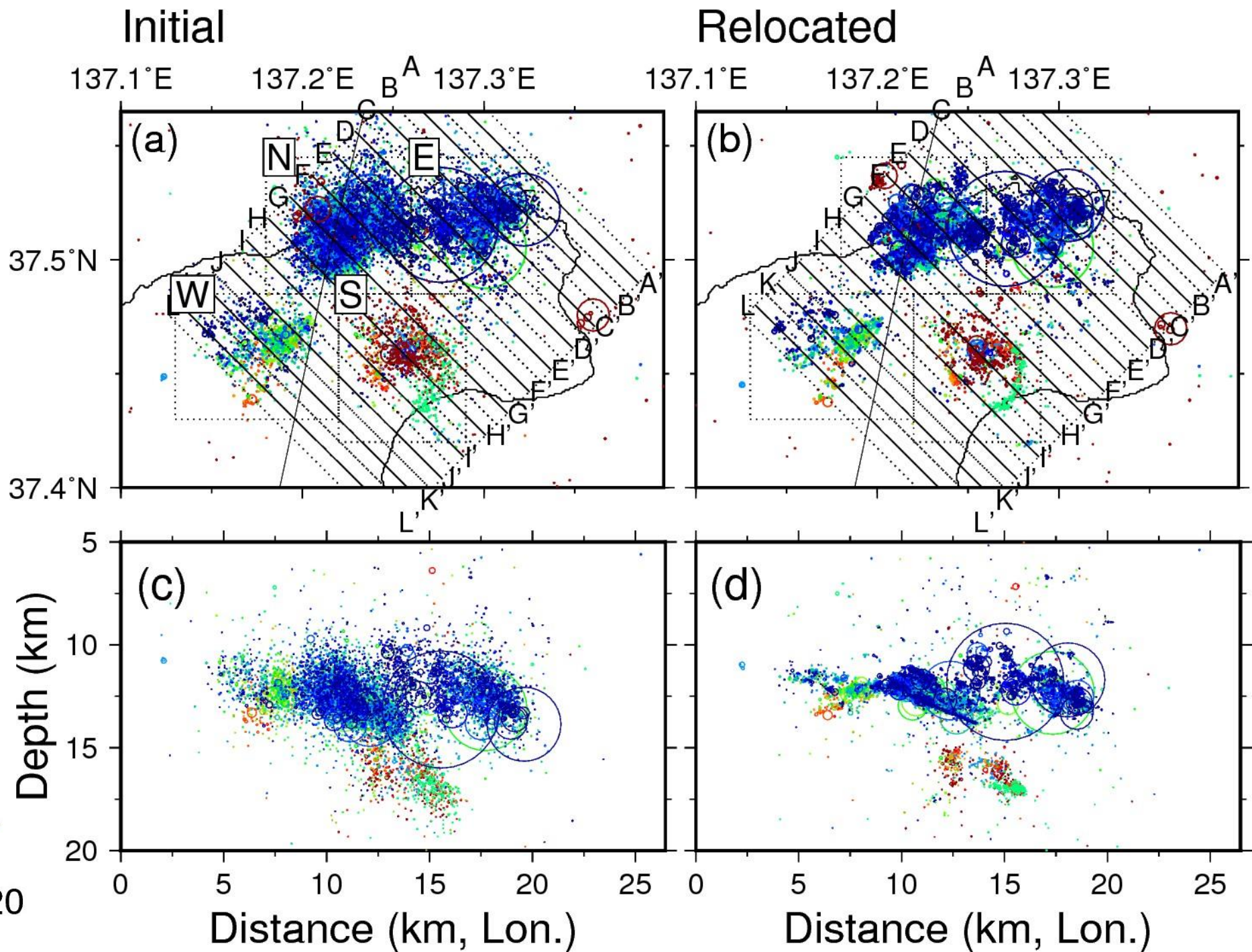
震源再決定 の結果

10950 $M_{JMA} \geq 1$ events
in the JMA catalogue
(2003/3-2022/9)

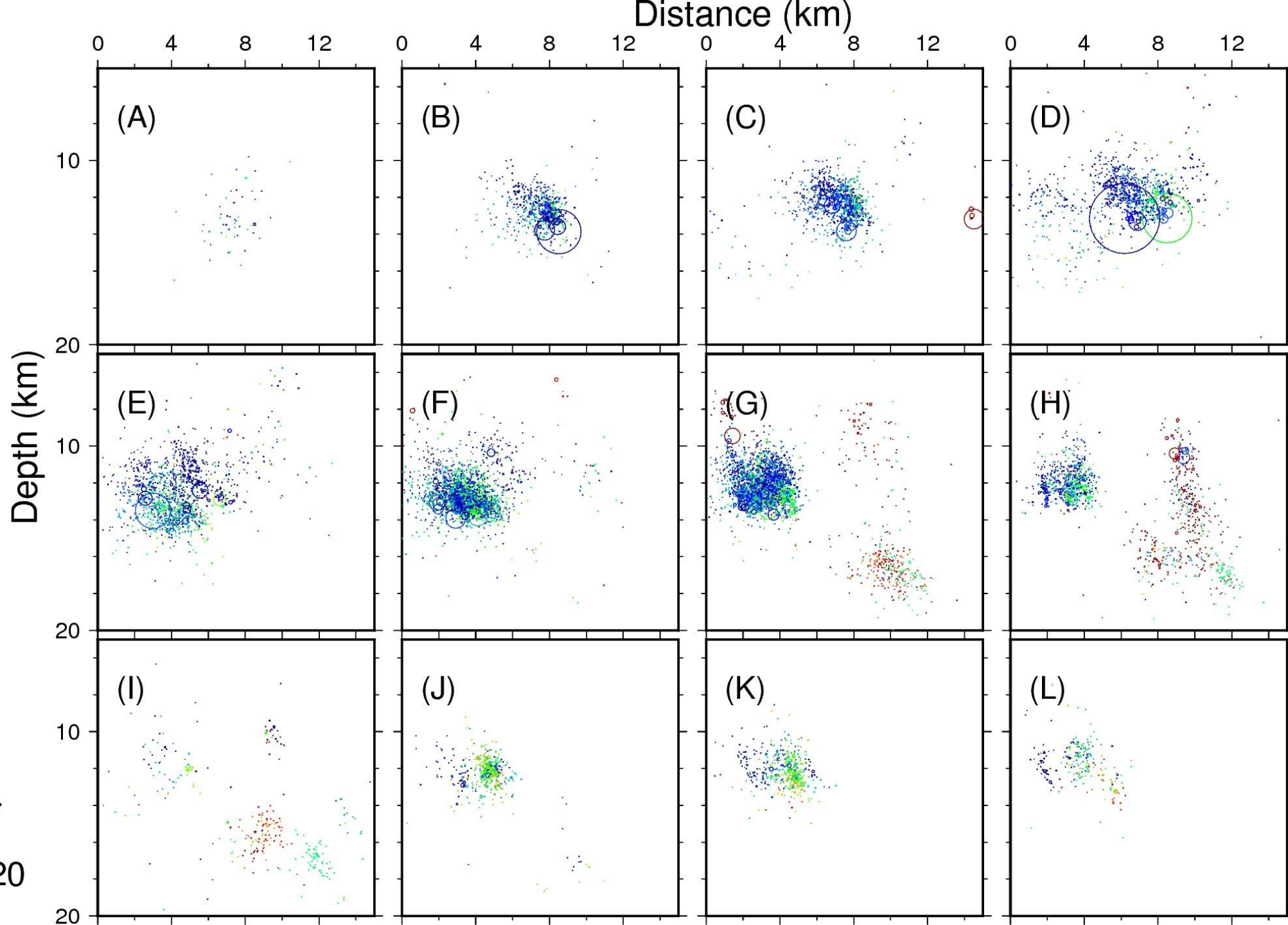
- カタログ:
 - P-wave: 280915
 - S-wave: 282817
- 波形相関:
 - P-wave: 26545802
 - S-wave: 19922017



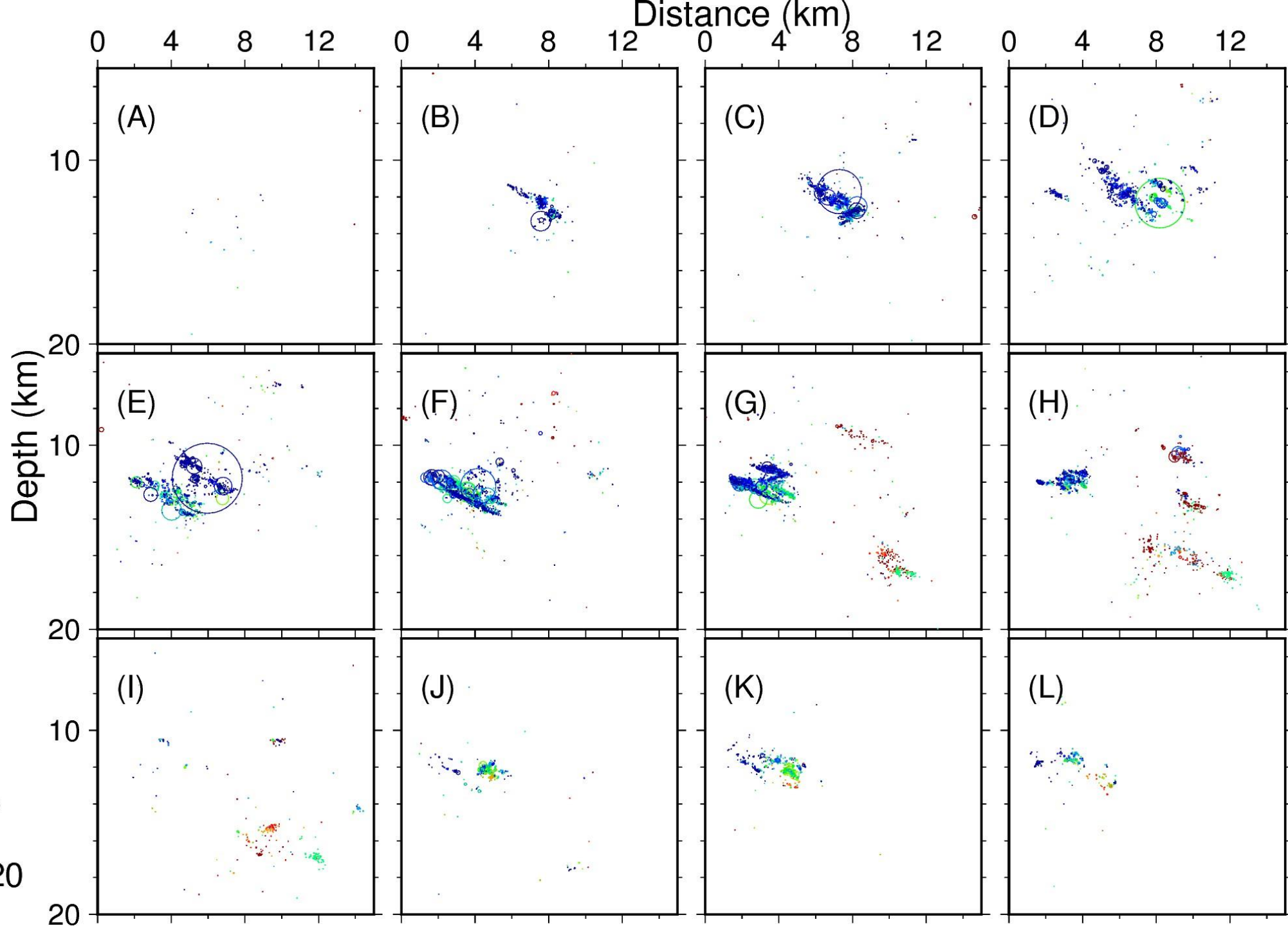
Days after Dec. 1, 2020



初期震源 では雲状 の分布

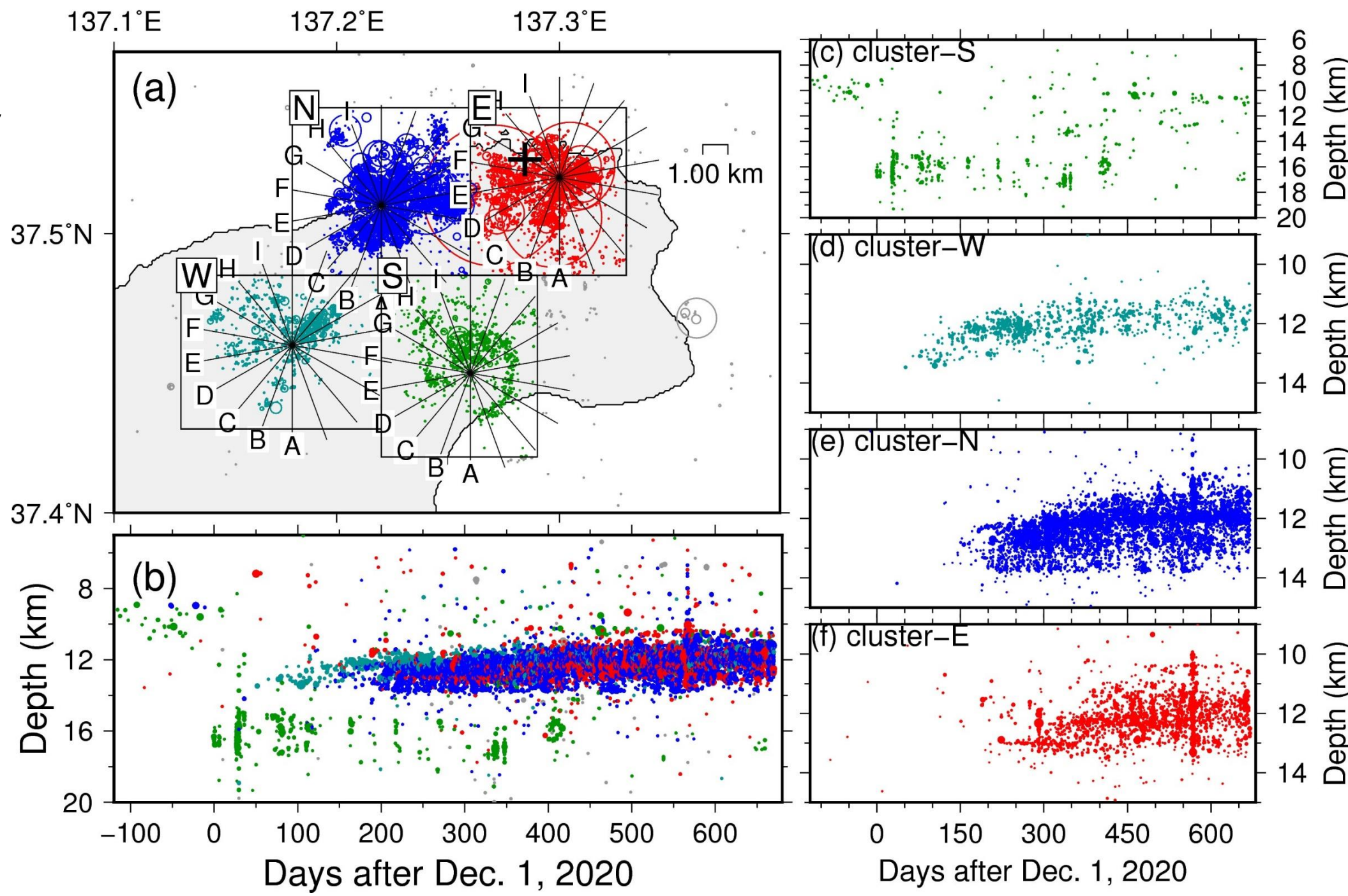


再決定後、
平行や共
役に配列
する微細
な面構造
が見られ
るように



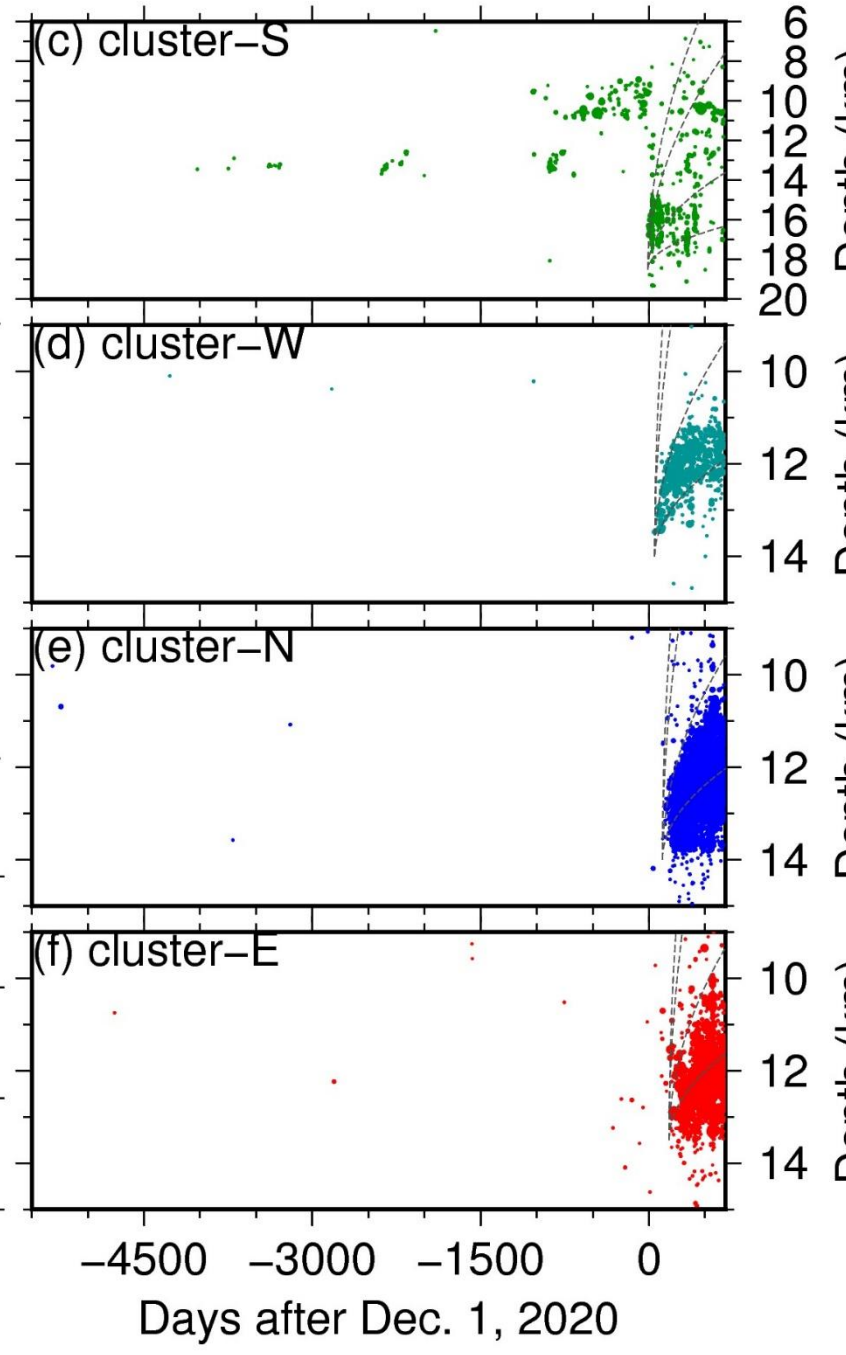
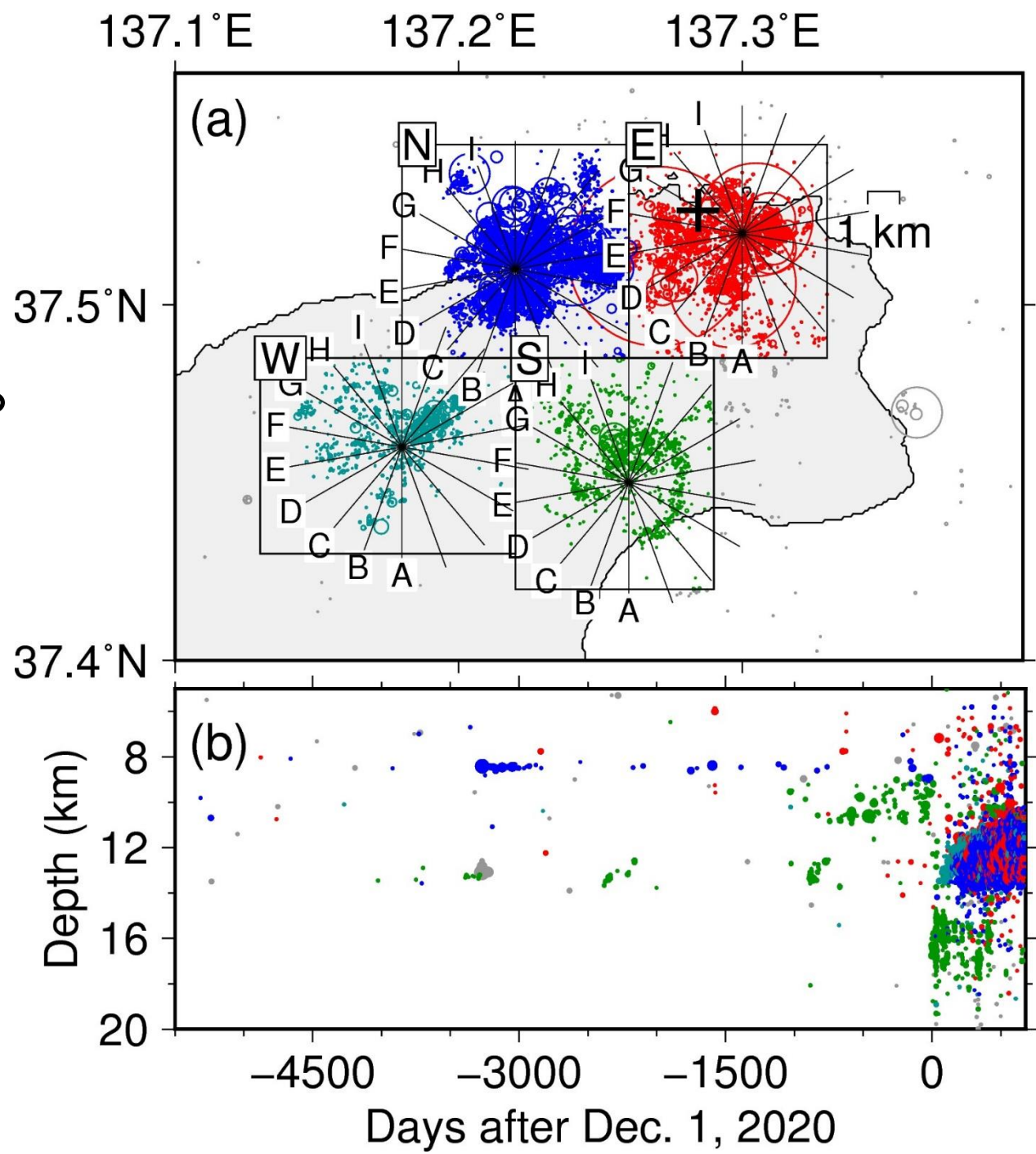
震源域は、
各クラス
ターで、
全体とし
て深部側
から浅部
側へ拡大

Cluster Sでは、
2018年頃から
z=13 km程度で
活発化。今回の
活発化前まで継
続。



クラスタ
Sの過去の
活動は
より浅部。
そこでも
更に浅部
に拡大傾
向

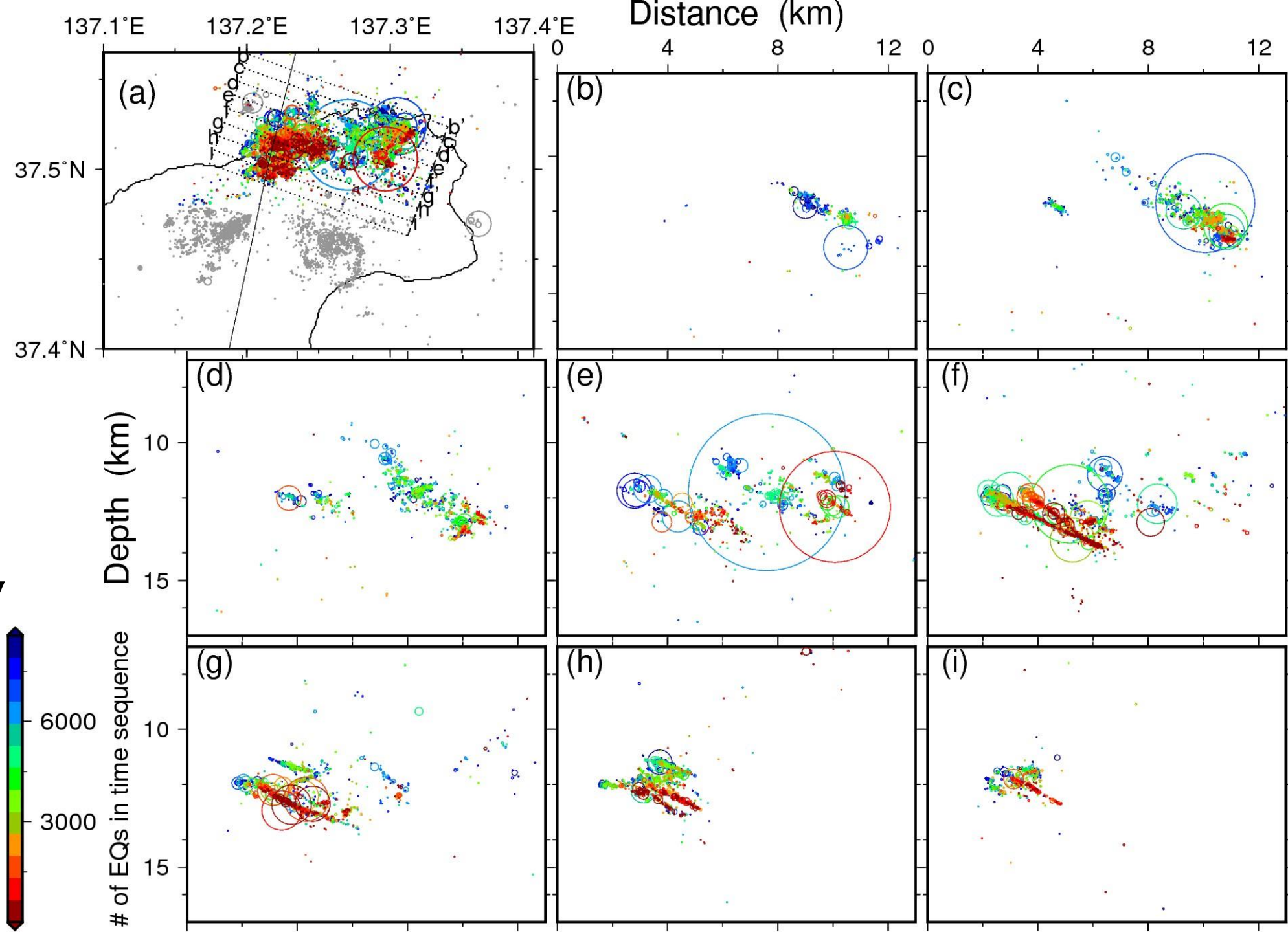
Cluster Sでは、
2018年頃から
z=13 km程度で
活発化。今回の
活発化前まで継
続。



震源域北部の拡大図

複数の面を用いて震源が深部側から浅部側に移動

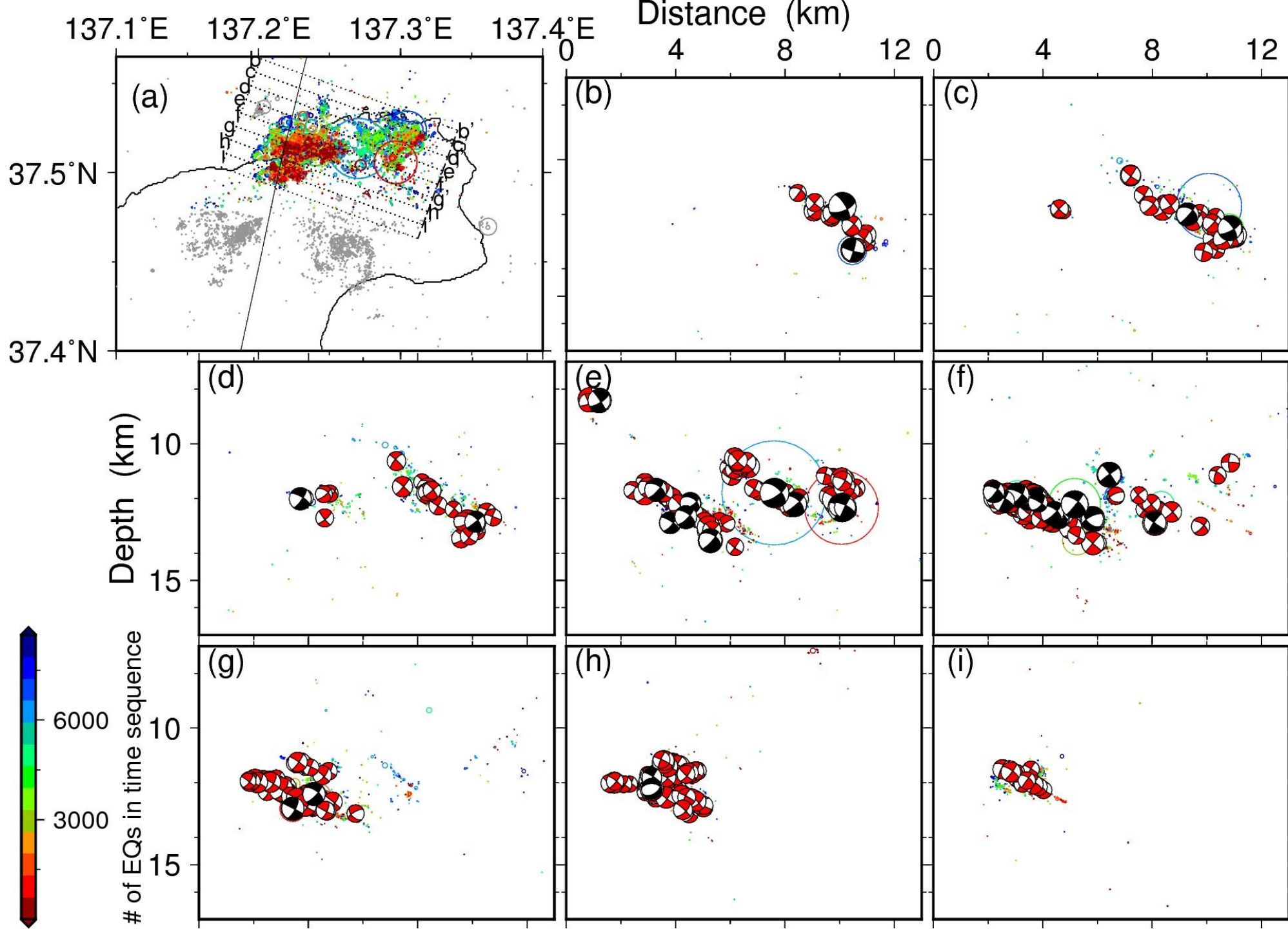
M5.4地震は、西側と東側のクラスタの間で発生



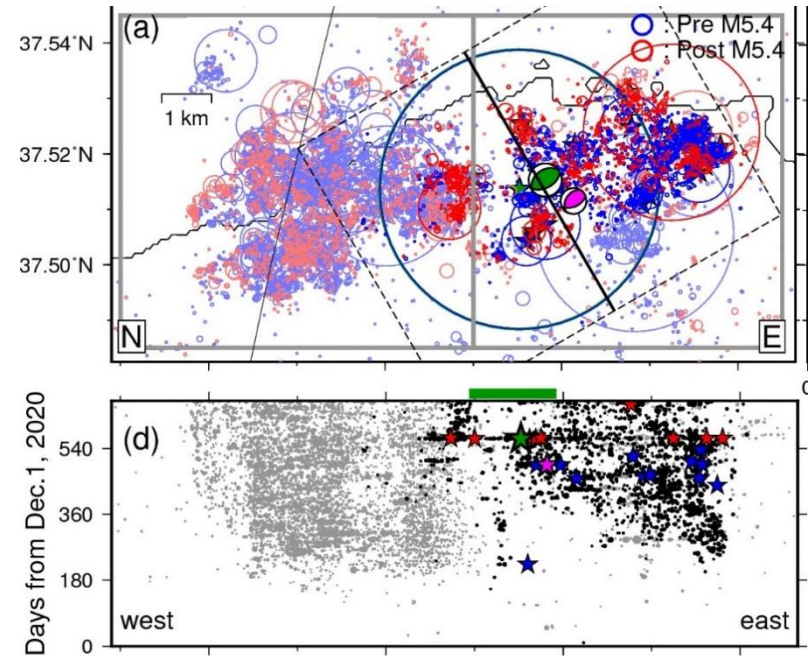
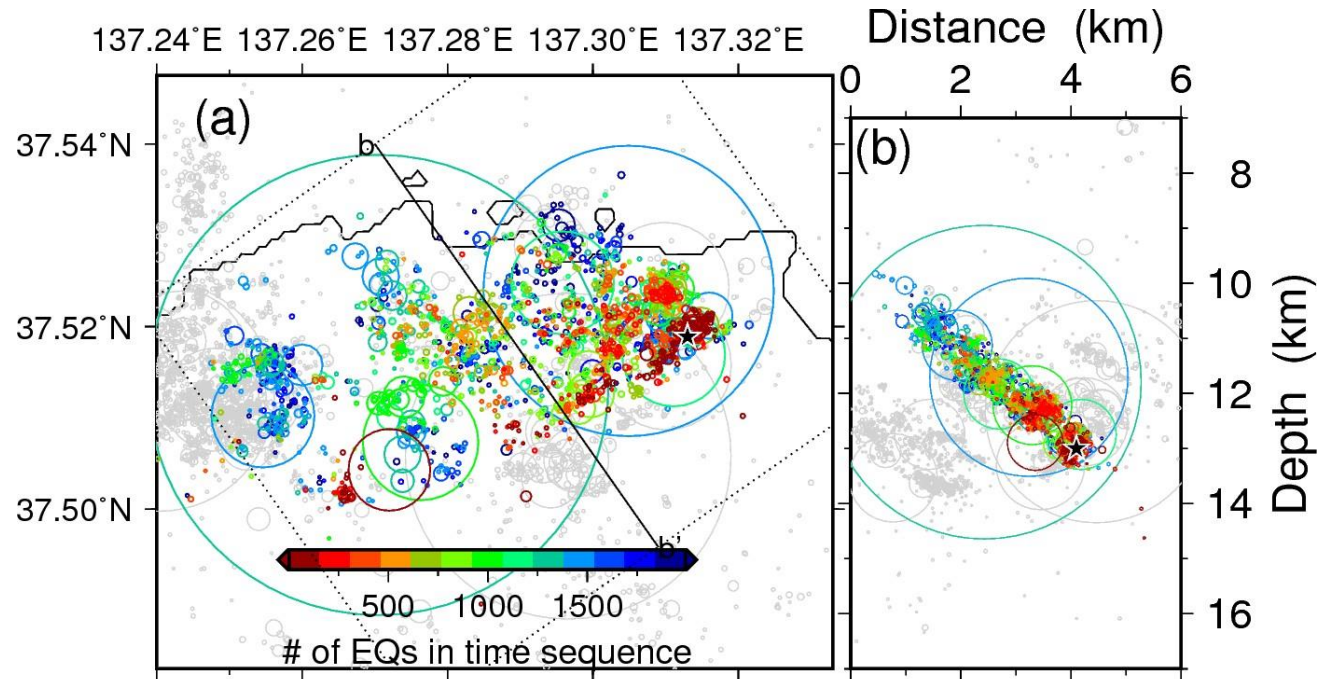
震源分布は 個々の地震 のメカニズム 解とも調 和的

黒： F-net moment
tensor解

赤： F-net解との振
幅比に基づき推定
(方法：Yoshida et
al., 2019, Tectono.)



M5.4地震の震源西側は直前まで空白域。同じ断層帯で東側クラスタが徐々に M5.4震源付近まで拡大していた

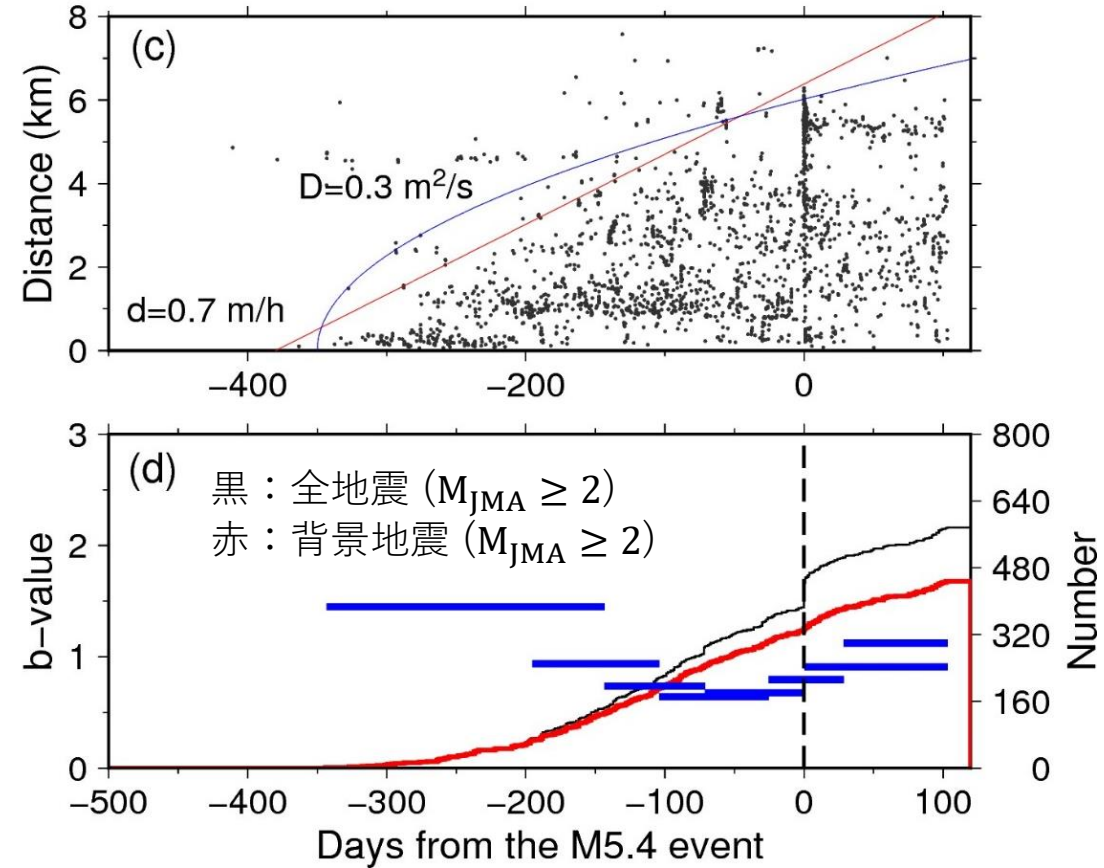
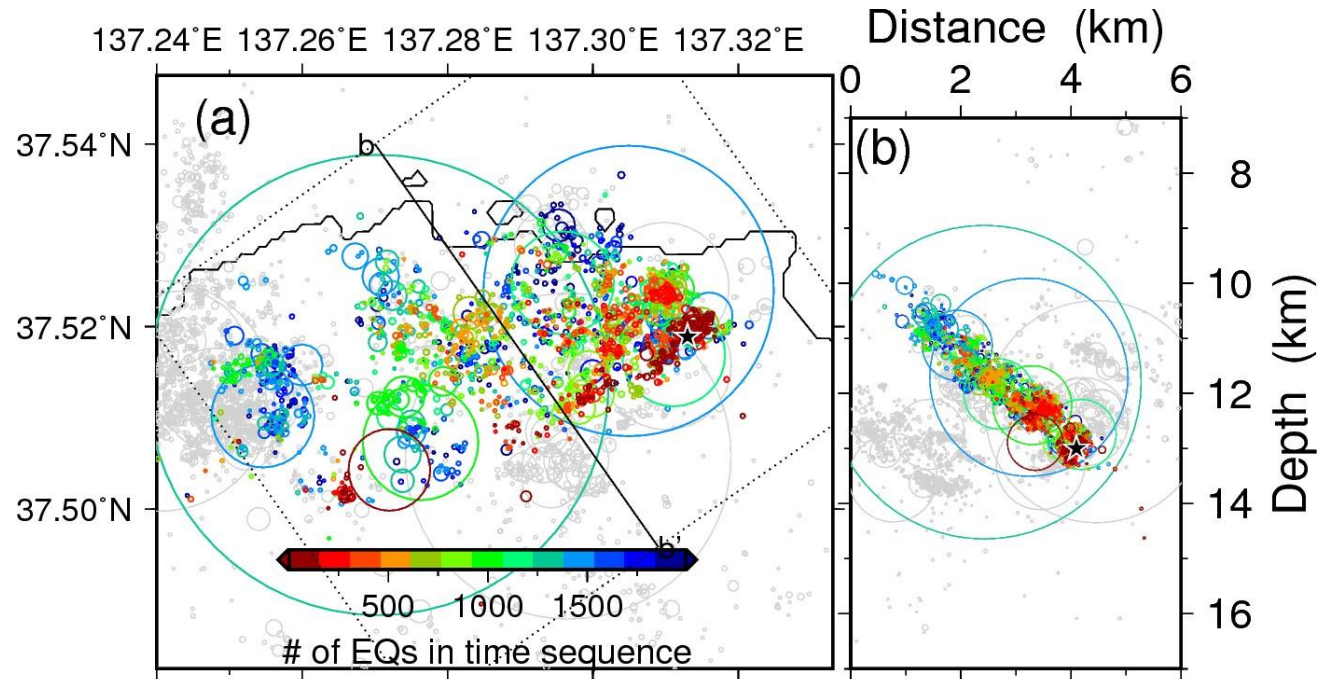


M5.4地震の断層帯上の活動のみ取り出し (薄色は面外)

流体拡散や非地震性すべり (流体誘発 / 核形成過程)に起因する可能性

- ・ 近年までに、群発地震活動中に地殻変動が生じたという報告が蓄積してきている (e.g., Lohman & McGuire, 2007; Takada & Furuya, 2010; Wicks et al., 2011; Himematsu & Furuya, 2015; Wei et al., 2015; Ruhl et al., 2016; Gualandi et al., 2017; Jiang et al., 2021; Martínez-Garzón et al., 2021; Sirorattanakul et al., 2022; Yukutake et al., 2022)
- ・ 主として、非地震性滑りと解釈されている。間隙圧増加に起因する非地震性すべりに注目が集まっている (e.g., Cornet et al., 1997; Guglielmi et al., 2015; Wei et al., 2015)

M5.4地震の震源西側は直前まで空白域。同じ断層帯で東側クラスタが徐々に M5.4震源付近まで拡大していた

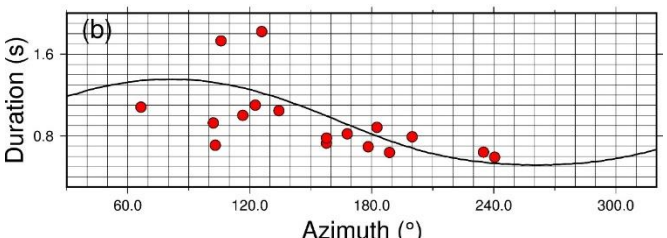
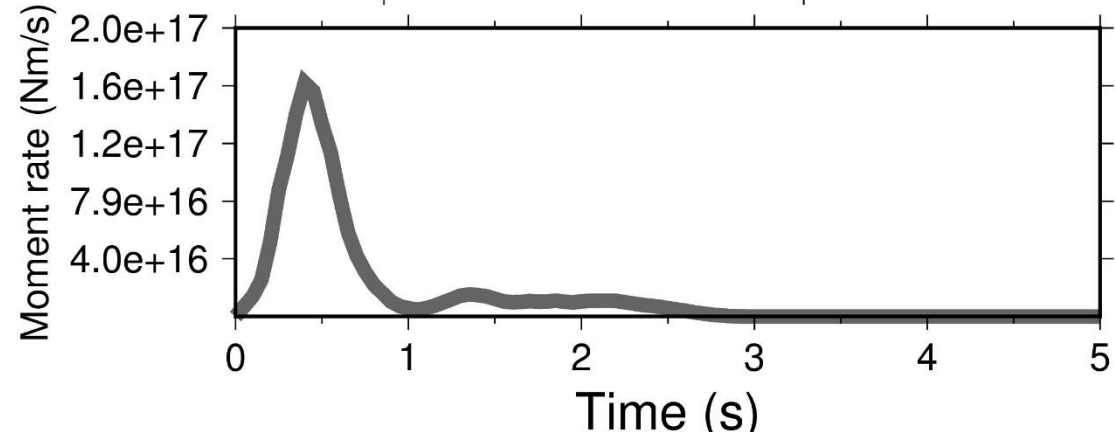
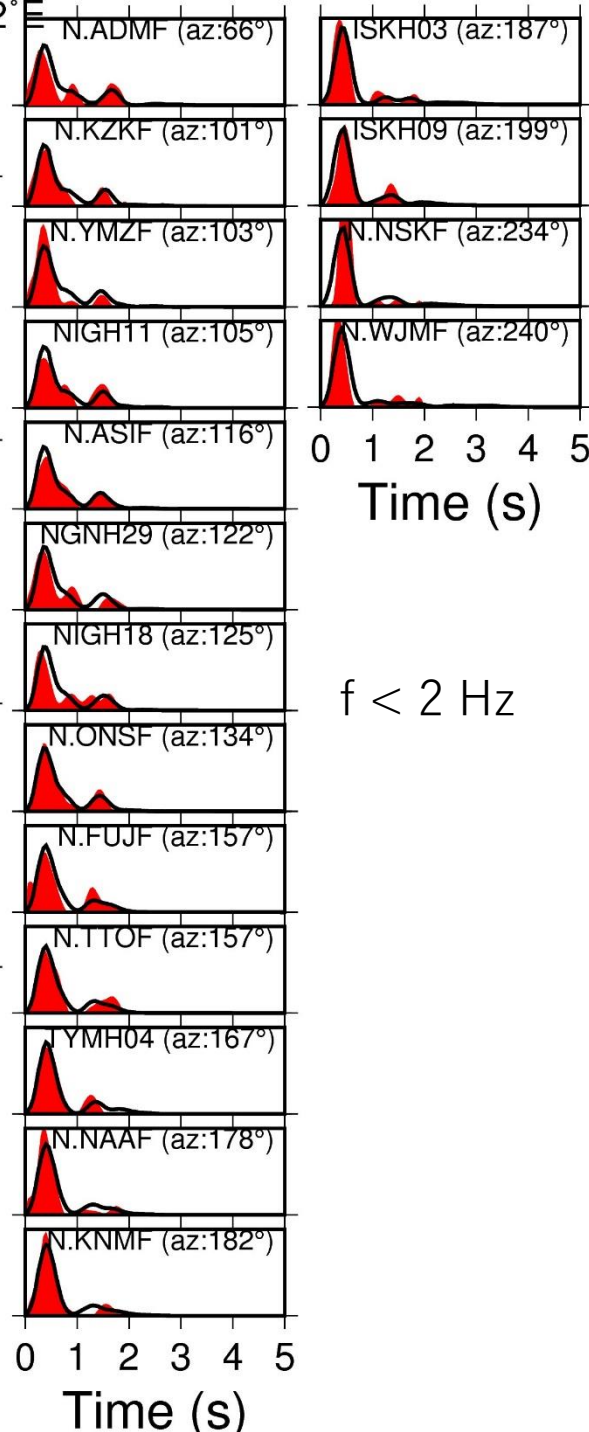
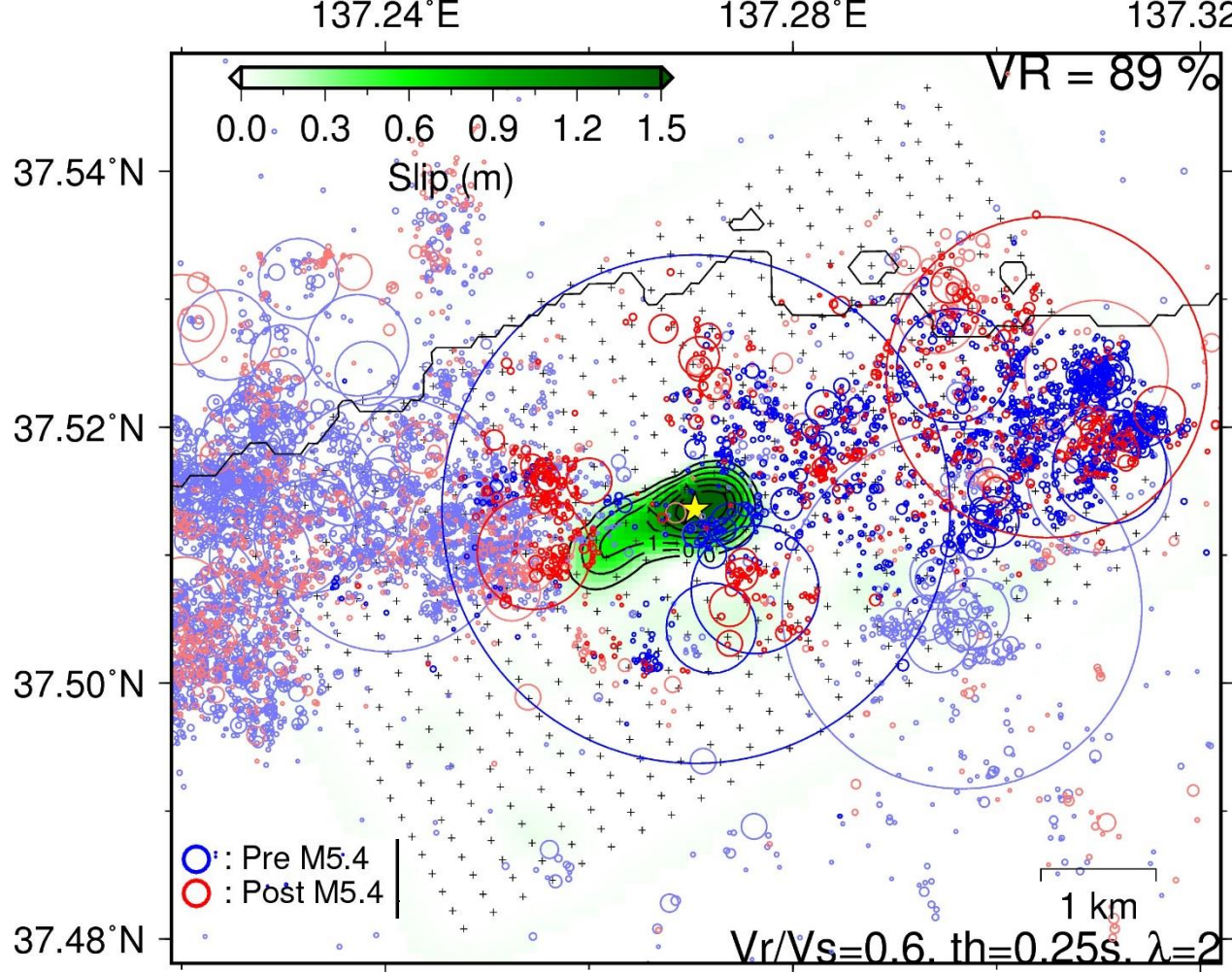


- Frontより後ろ側でも地震は起こり続けている。
- 背景地震活動度 (赤)は、M5.4地震直前での地震活動の加速は示さない。
- b値は本震前に低下しているようにも見える。
 - e.g., 差応力が高かった M5.4地震破壊域に地震活動が入ってきた？

M5.4地震破壊は更に西側に伝播。クラスタ E と N の間の領域を破壊

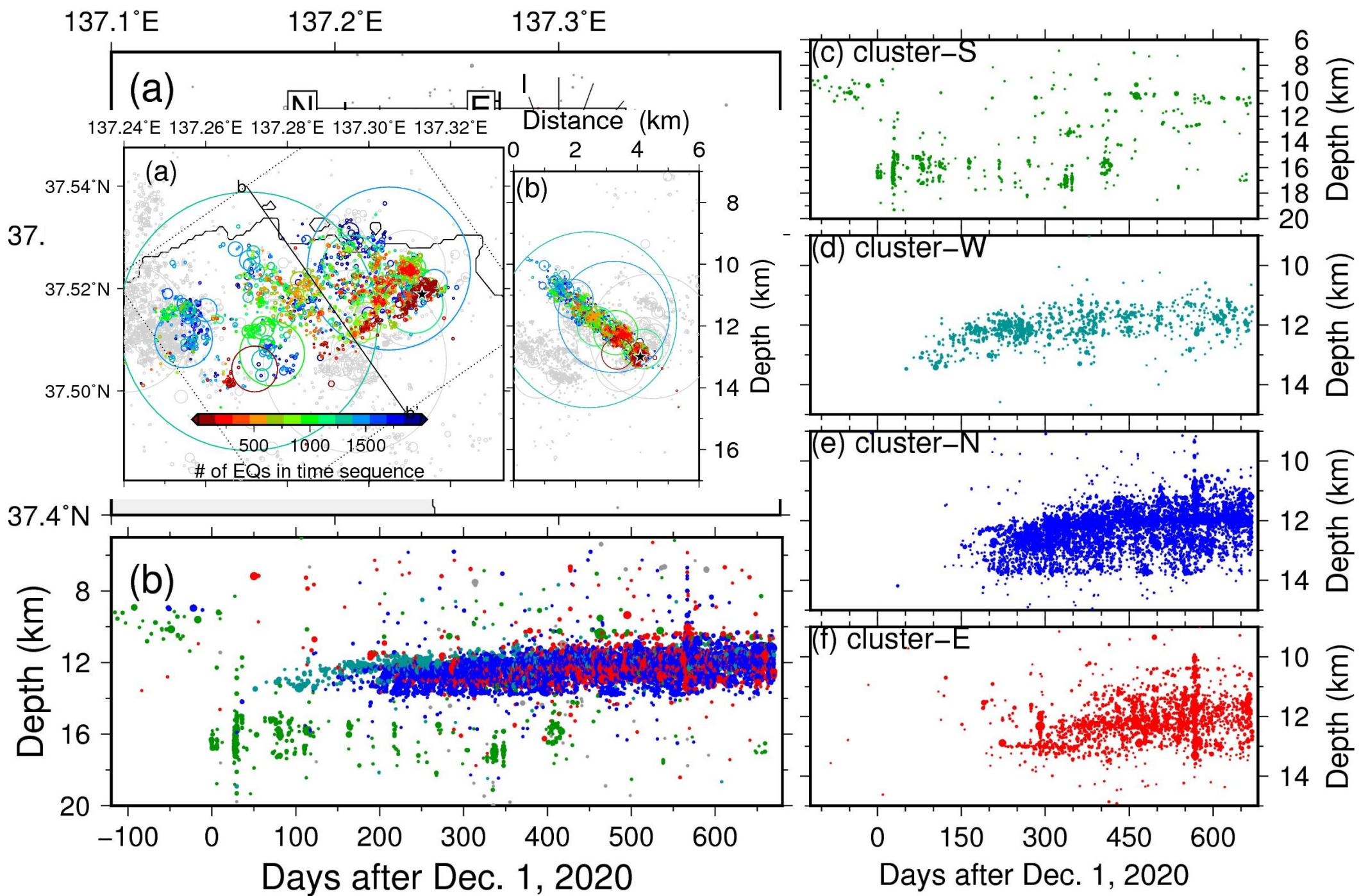
余震は主に破壊域の端付近で発生

Haskell model (1964)でも同様の結果; 破壊伝播方位: 260°, 破壊域 1.9 km



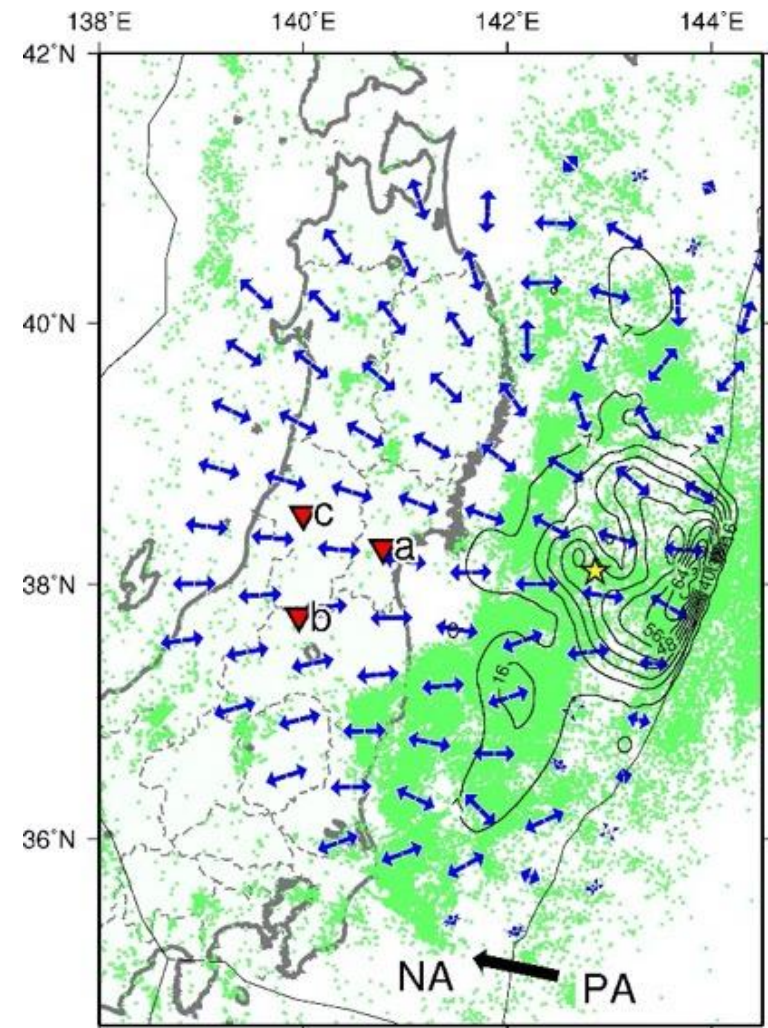
再掲

震源域は、
各クラスターで、
全体として、
深部側から浅部側へ拡大



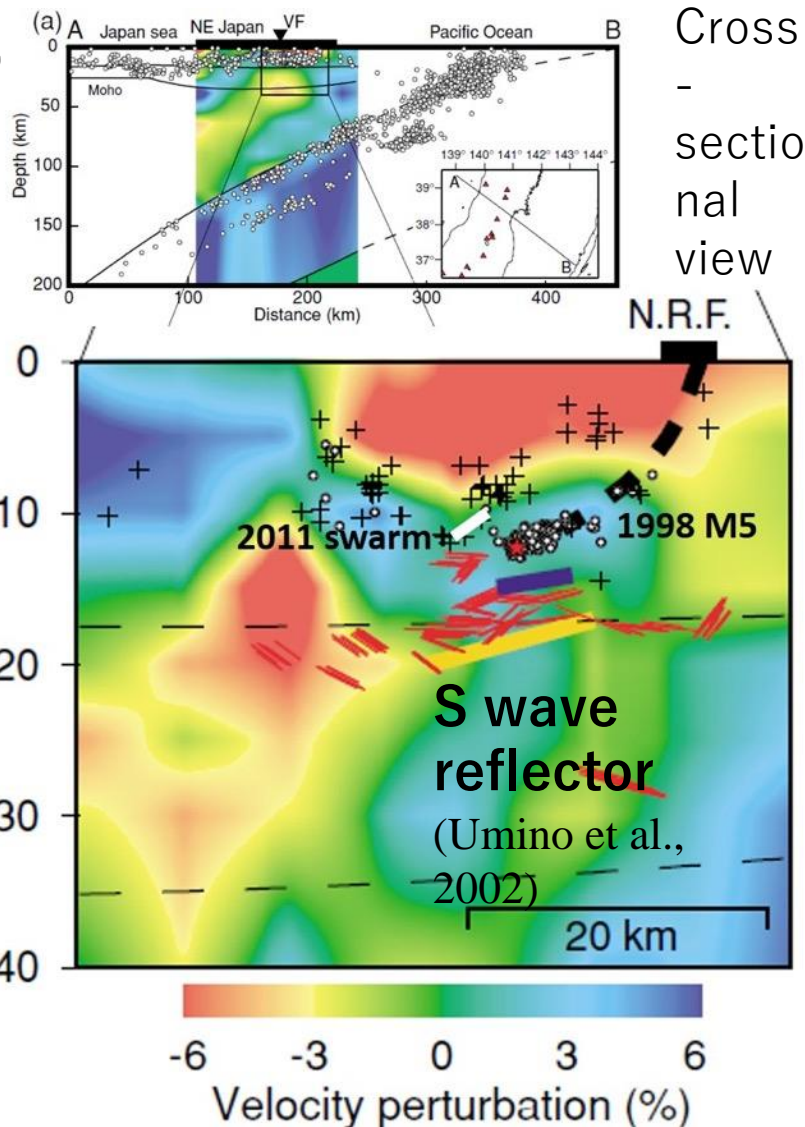
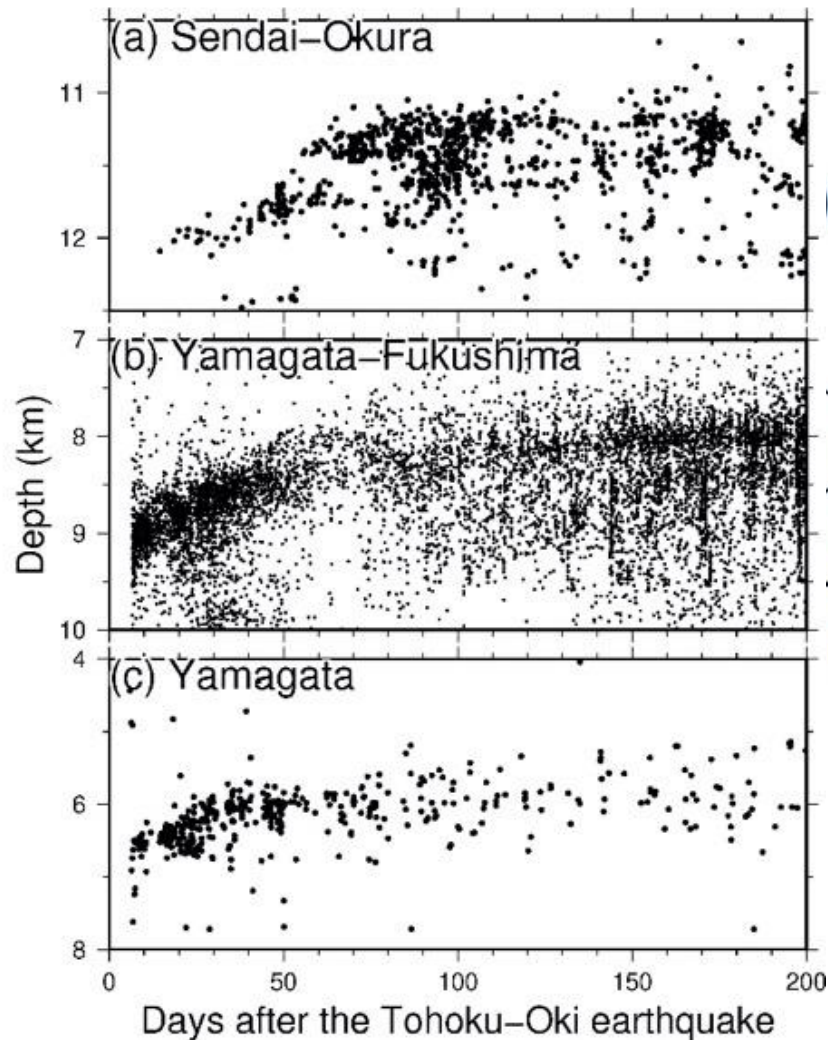
Cluster Sでは、
2018年頃から
z=13 km程度で
活発化。今回の
活発化前まで継
続。

東北沖地震後の流体移動により発生した東北日本の誘発地震活動と非常に良く似る



and the low velocity region

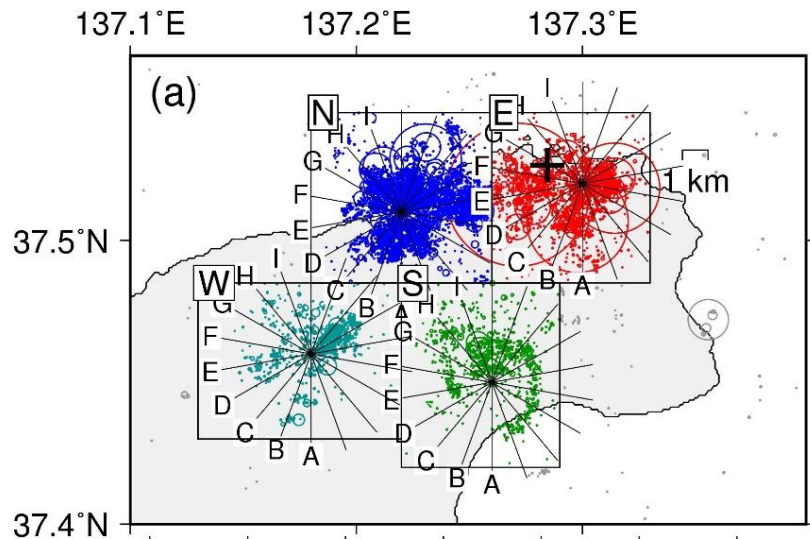
Distance (km)



Yoshida & Hasegawa (2018 Tectono.) after Nakajima et al. (2004)

地震波反射面の検出

クラスタ Nを近傍観測点
(N.SUZH)で調べると、孤立した
反射波がみえる

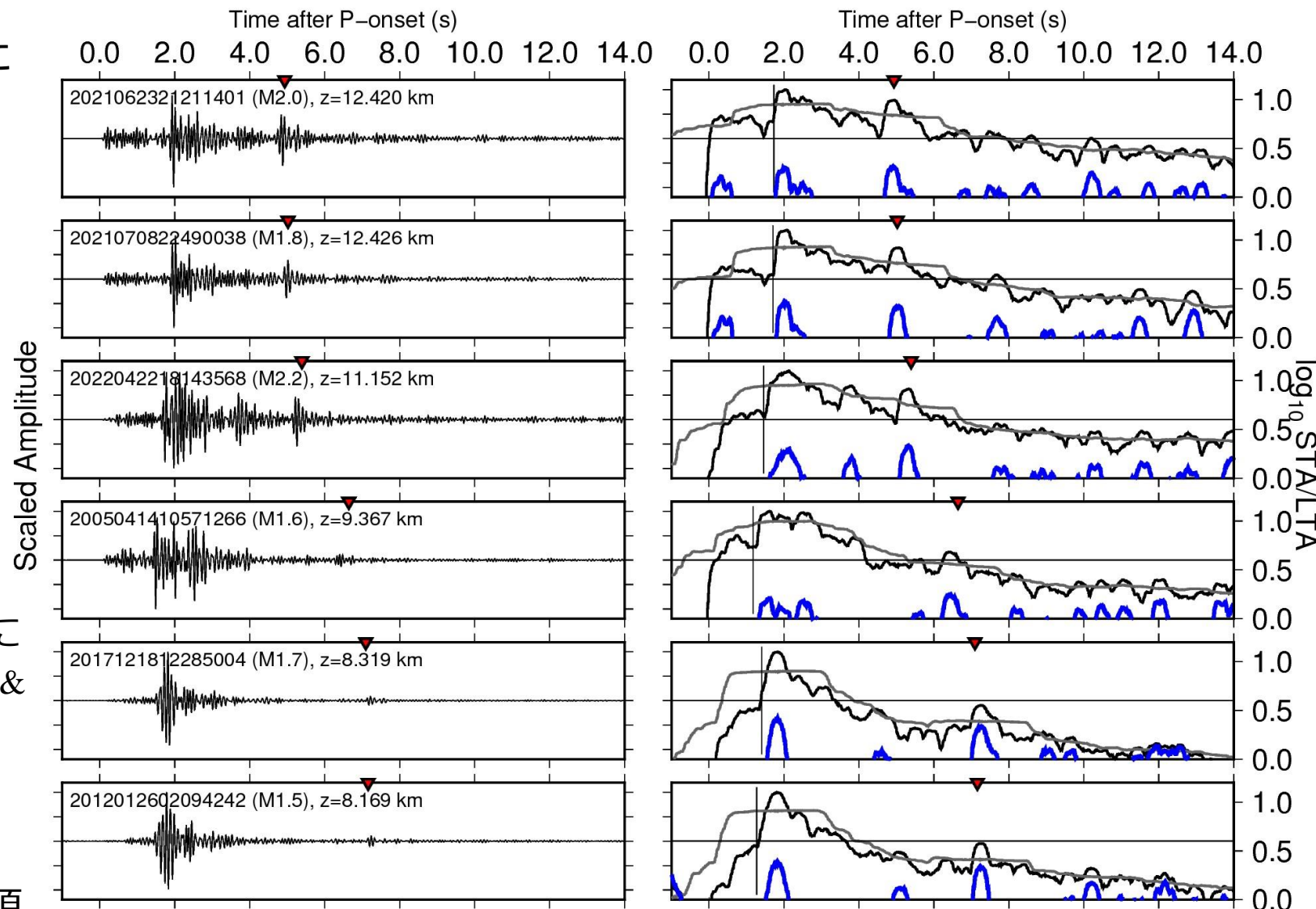


日本では反射波を用いた構造推定が活発に行われている (Inamori et al., 1992; Matsumoto & Hasegawa, 1996; Doi & Nishigami, 2007; Kosuga, 2014; Aoki et al., 2016)

SxS反射を仮定して、back projectionにより反射点を探索 (Kosuga, 2013)
クラスタ Nの1203個 (M_{JMA})の再決定震源を使用

短期平均エンベロップ (黒; 0.33 s)と長期平均エンベロップ (灰; 2.67s)の差を用いて反射波を強調 (青)。

周波数帯域: 8- 16 Hz

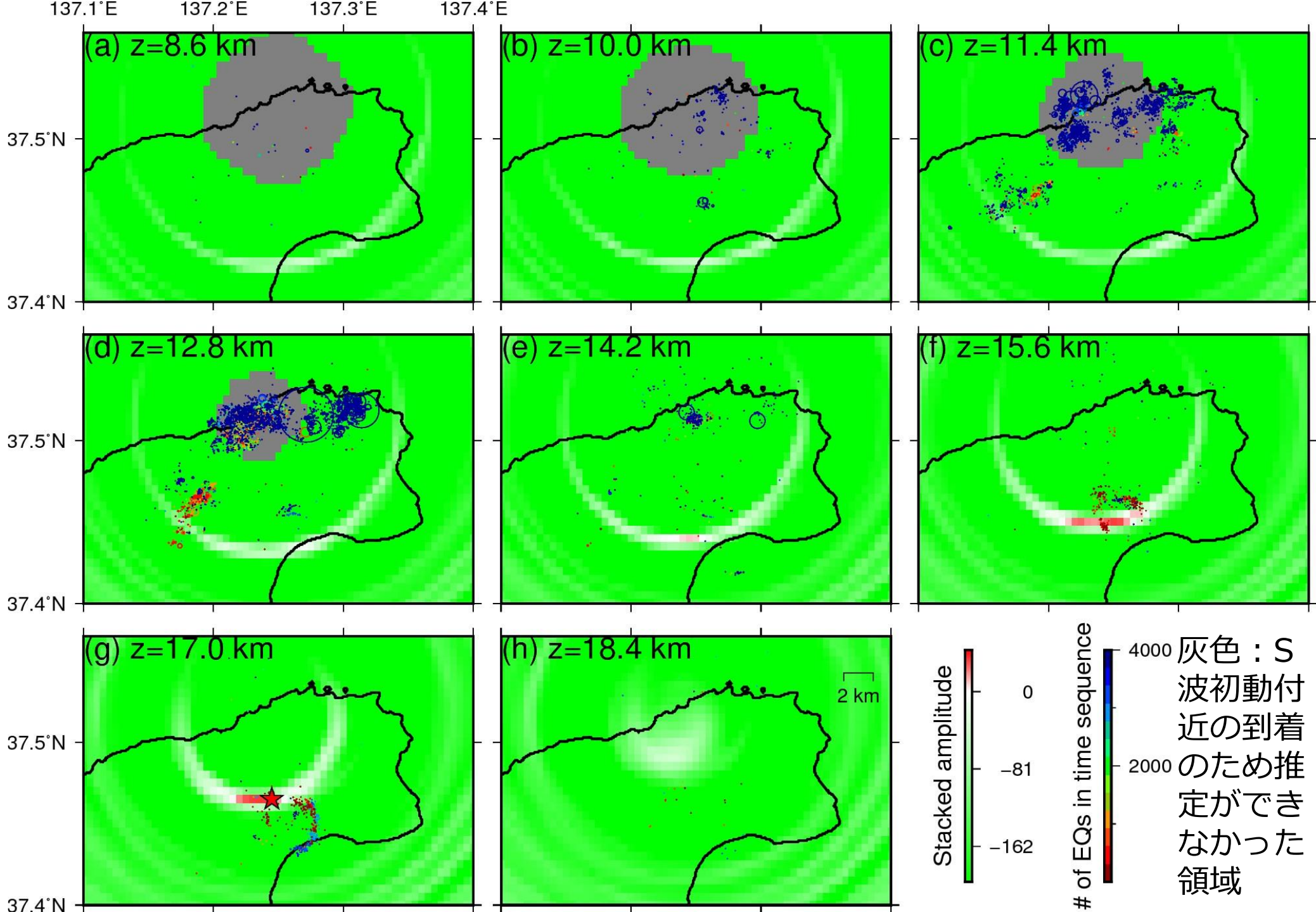


赤三角：推定した点で反射が起こった場合の反射波の到着時刻

一連の地震活動が開始したクラスタ S 最深部付近に反射点

クラスタ Sでは他クラスタよりも深部で地震が発生しており、直径4 km程の特徴的な環状分布

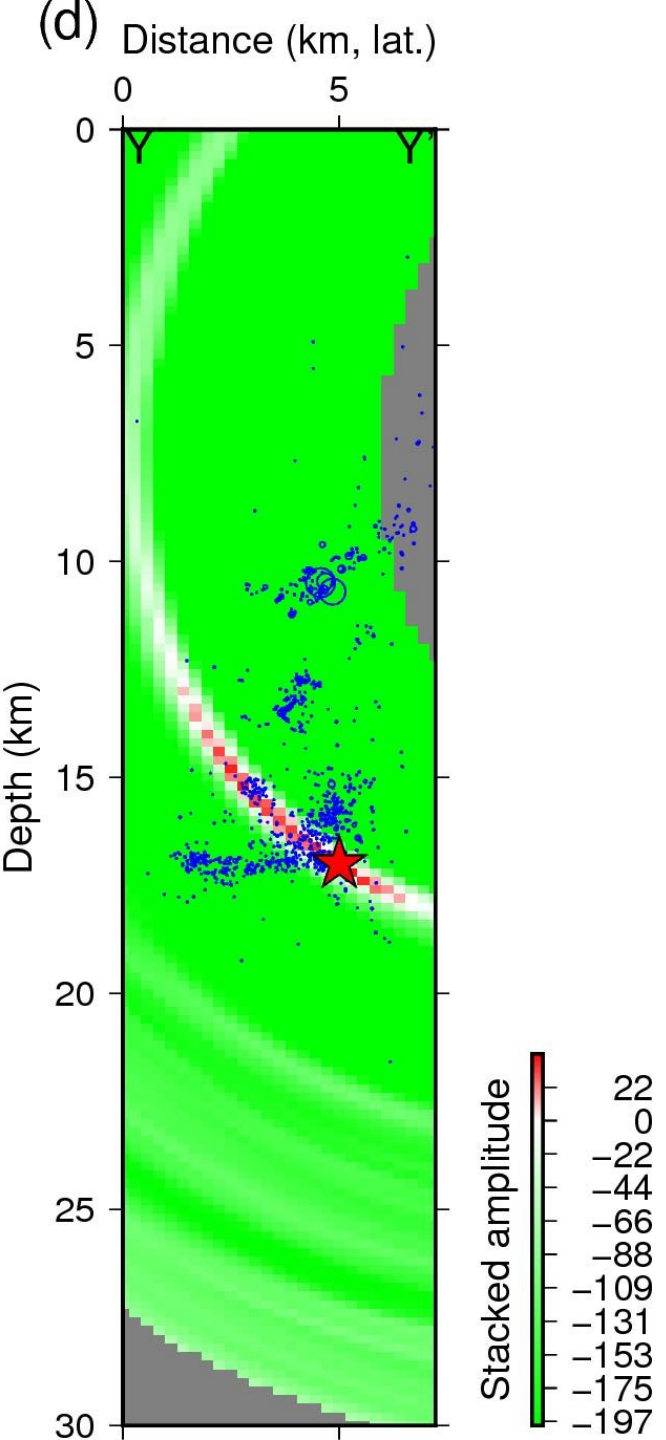
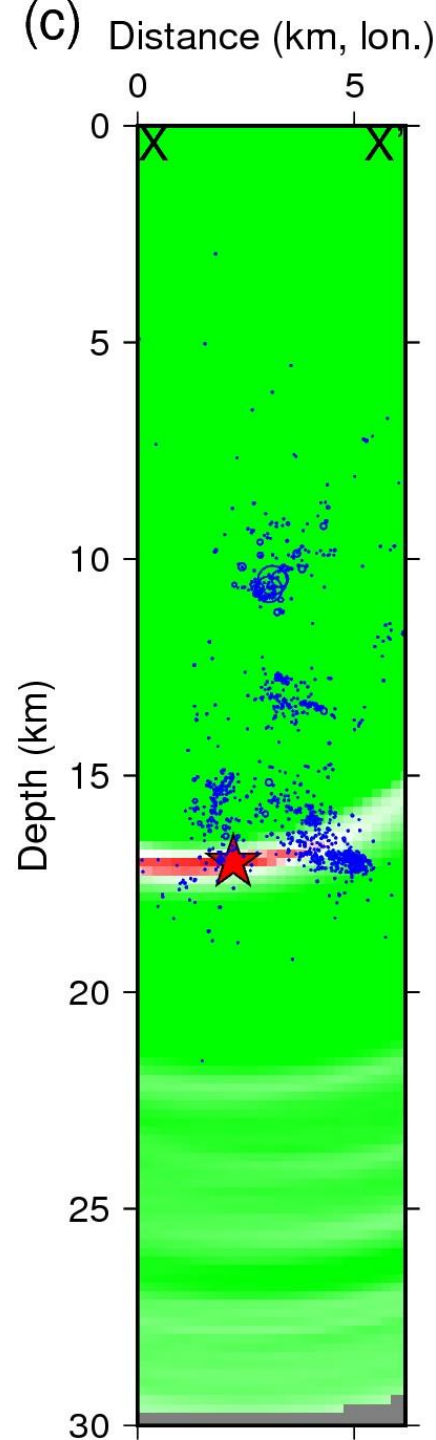
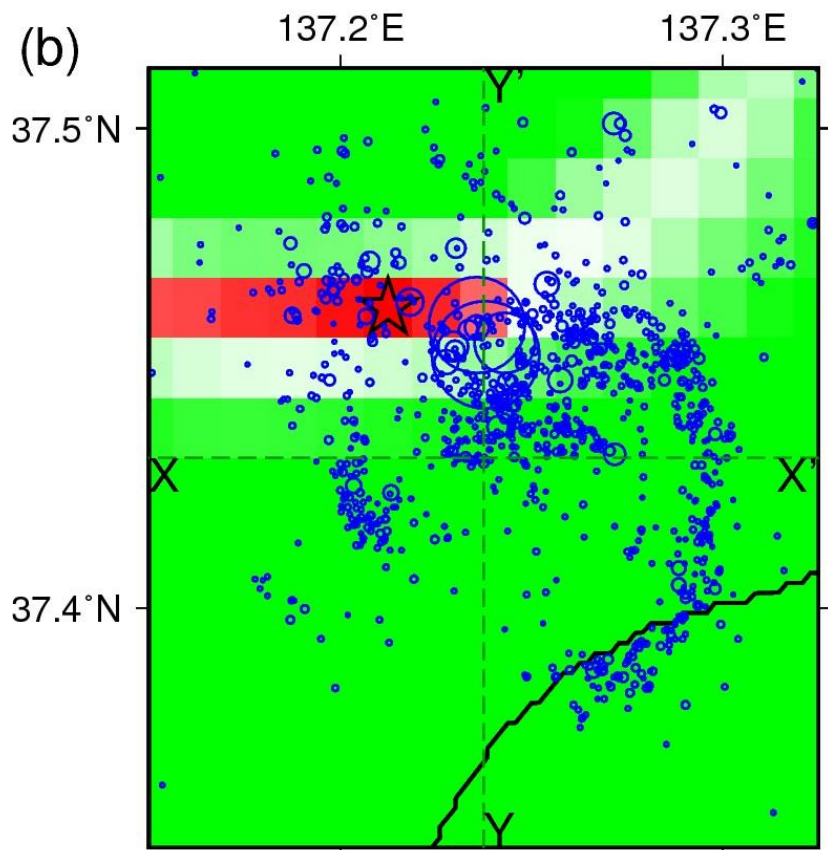
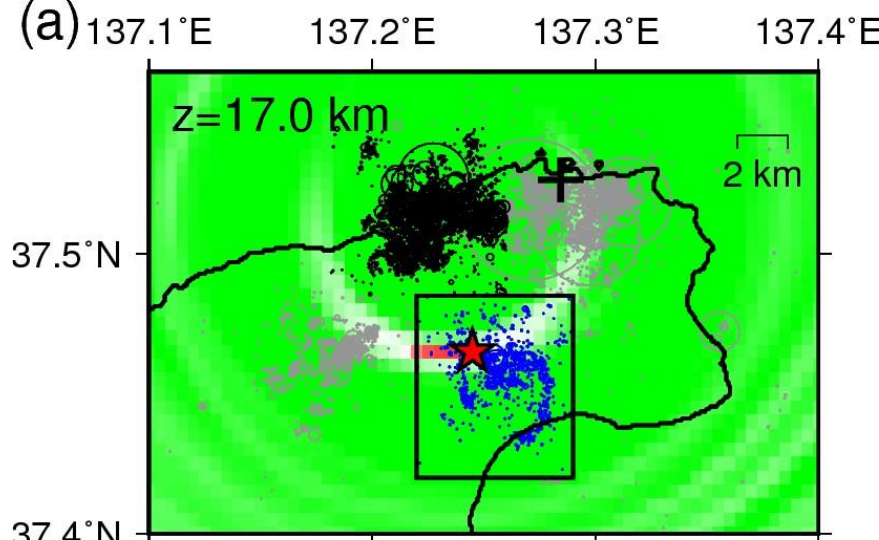
⇒ マグマ貫入に関する構造？



一連の地震活動が開始した
クラスタ S最
深部付近に反
射点

クラスタ Sで
は他クラスタ
よりも深部で
地震が発生し
ており、直径
4 km程の特徴
的な環状分布

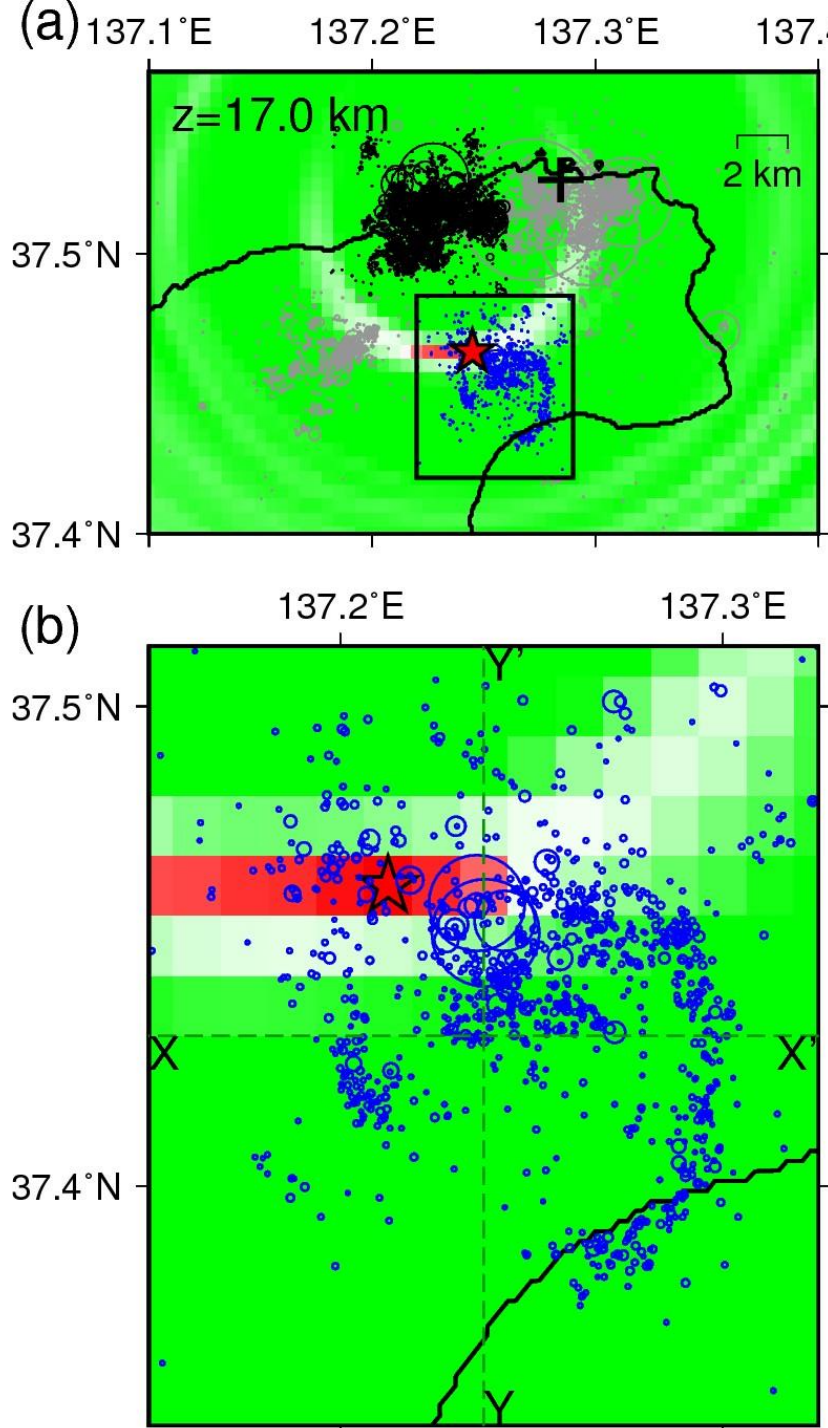
⇒ マグマ貫入
に関係した構
造？



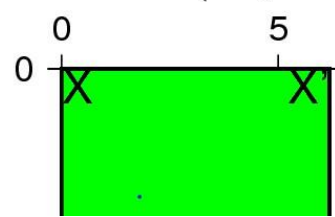
一連の地震活動が開始したクラスタ S 最深部付近に反射点

クラスタ Sでは他クラスタよりも深部で地震が発生しており、直径4 km程の特徴的な環状分布

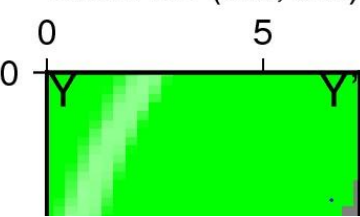
⇒ マグマ貫入に関連した構造？



(c) Distance (km, lon.)



(d) Distance (km, lat.)



Ring Dike and Cone Sheet (Rich, 2016)

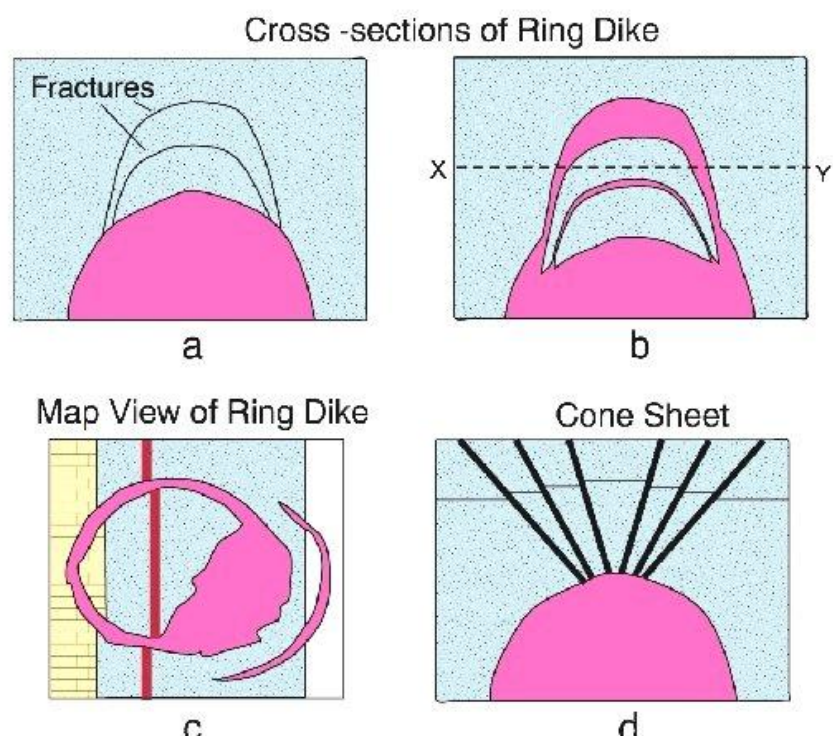
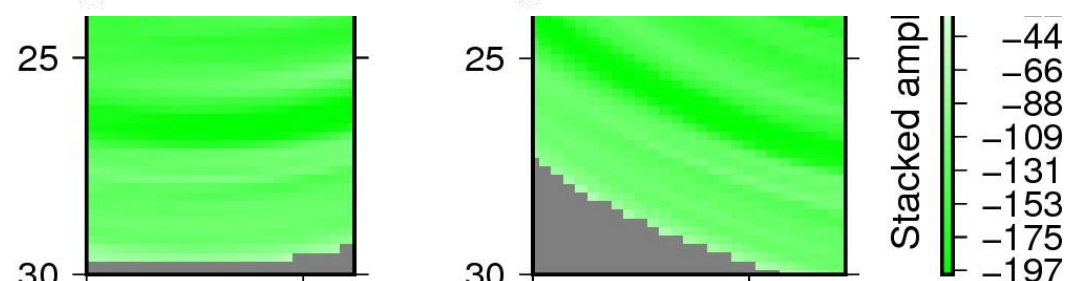
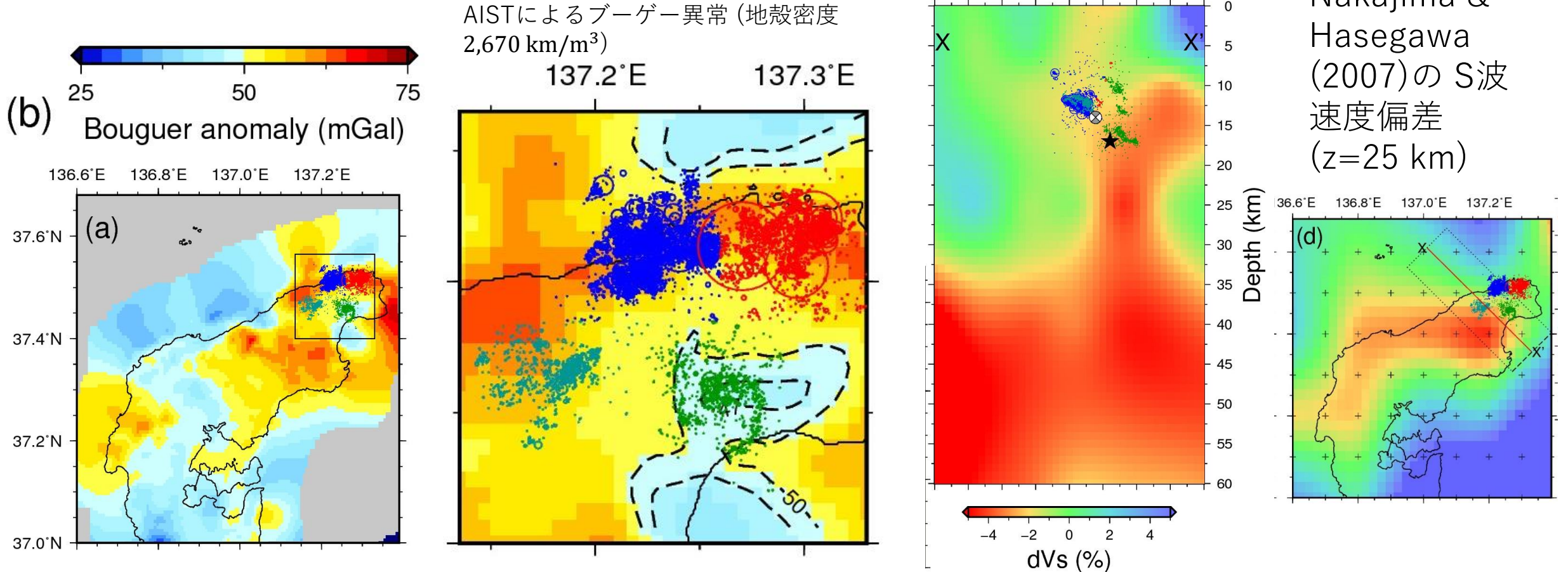


Figure 4-23. The formation of ring dikes and cone sheets. **a.** Cross section of a rising pluton causing fracture and stopping of roof blocks. **b.** Cylindrical blocks drop into less dense magma below, resulting in ring dikes. **c.** Hypothetical map view of a ring dike with N-S striking country rock strata as might result from erosion to a level approximating X-Y in (b). **d.** Upward pressure of a pluton lifts the roof as conical blocks in this cross section. Magma follows the fractures, producing cone sheets. Original horizontal bedding plane shows offsets in the conical blocks. (a), (b), and (d) after Billings (1972), *Structural Geology*. Prentice-Hall, Inc. (c) after Compton (1985), *Geology in the Field*. © Wiley, New York.



群発地震の開始地点で環状構造をなすクラスタ S直上に局所的な負の重力異常域・深部に低速度域

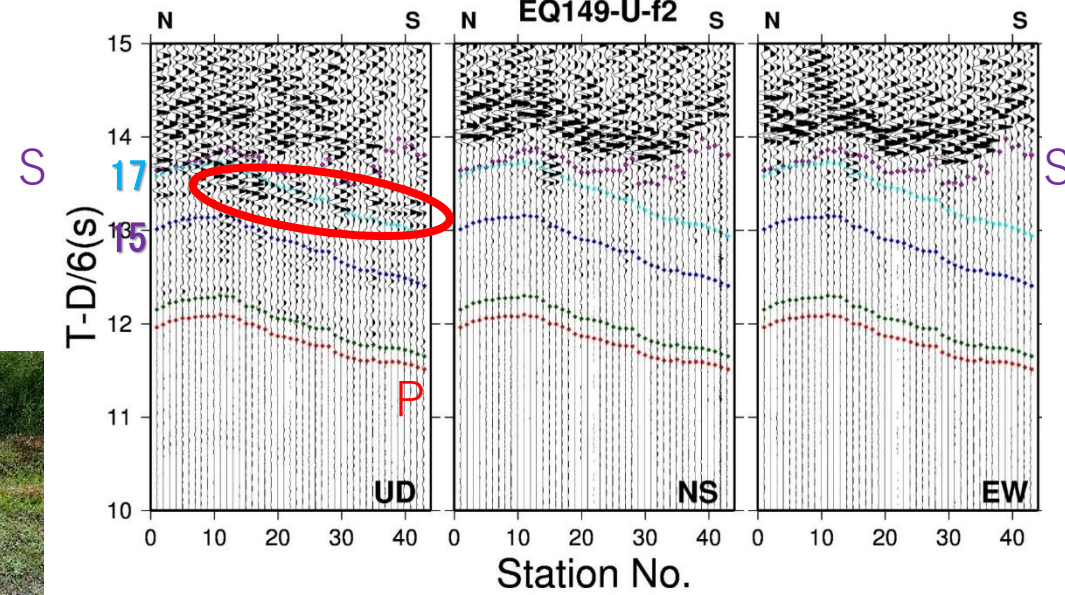
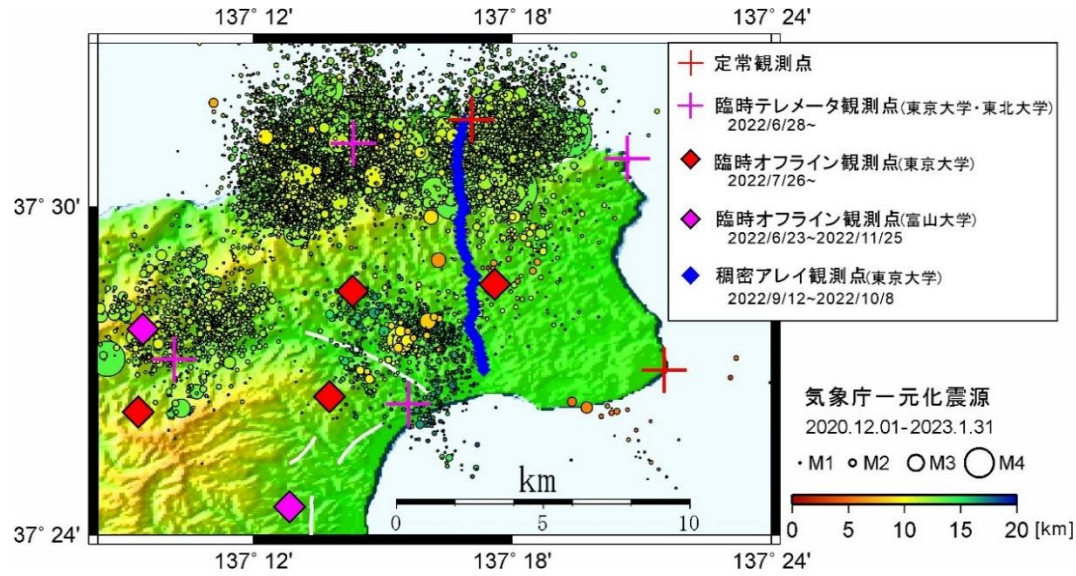


厚い中期～後期中新世海成層に覆われているため認知されていなかった埋没カルデラ構造または新しいマグマ活動起源構造が存在する可能性。

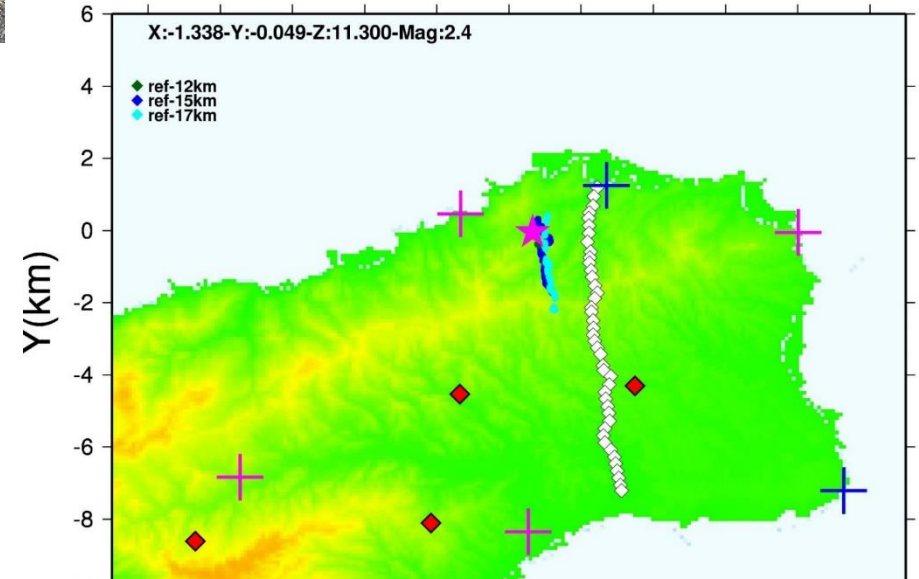
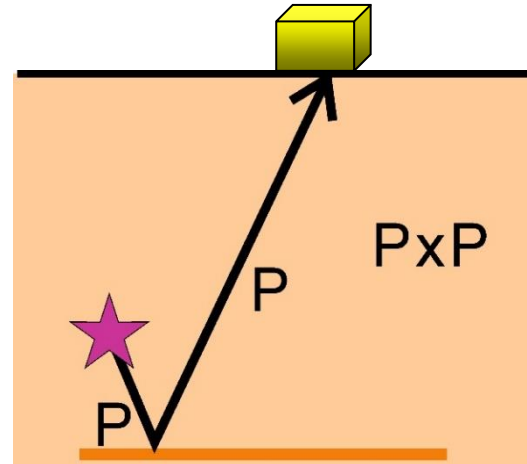
- 前期～中期中新世 (15-20Ma) の日本海拡大期には、活発な珪長質火山活動 (Shimazu et al., 1993; 尾崎、2010)。最後の火山活動は、中期中新世 (15.6Ma) 粟蔵層の流紋岩質火山活動
- 周辺域には温泉や、高ヘリウム同位体比 ($^3\text{He}/^4\text{He}$)の領域も存在 (Umeda et al., 2009)

臨時観測アレイを用いた流体を起源とする地殻内反射面の推定 (東大・蔵下さんら)

観測点配置



(東北大学, 東京大学)



PxP波を仮定した時の反射点位置 青：深さ15km, 水色：深さ17km

反射面が深さ15kmから17kmに存在する可能性を示唆

震源域に卓越する低角な南東傾斜断層：日本海拡大時に形成されたリストラック断層の深部付近を反映？

浅部で高角傾斜になっているとすると逆断層地震は起こりづらいことになるが、高間隙水圧下では地震が発生できる可能性も (e.g., Sibson, 1985)

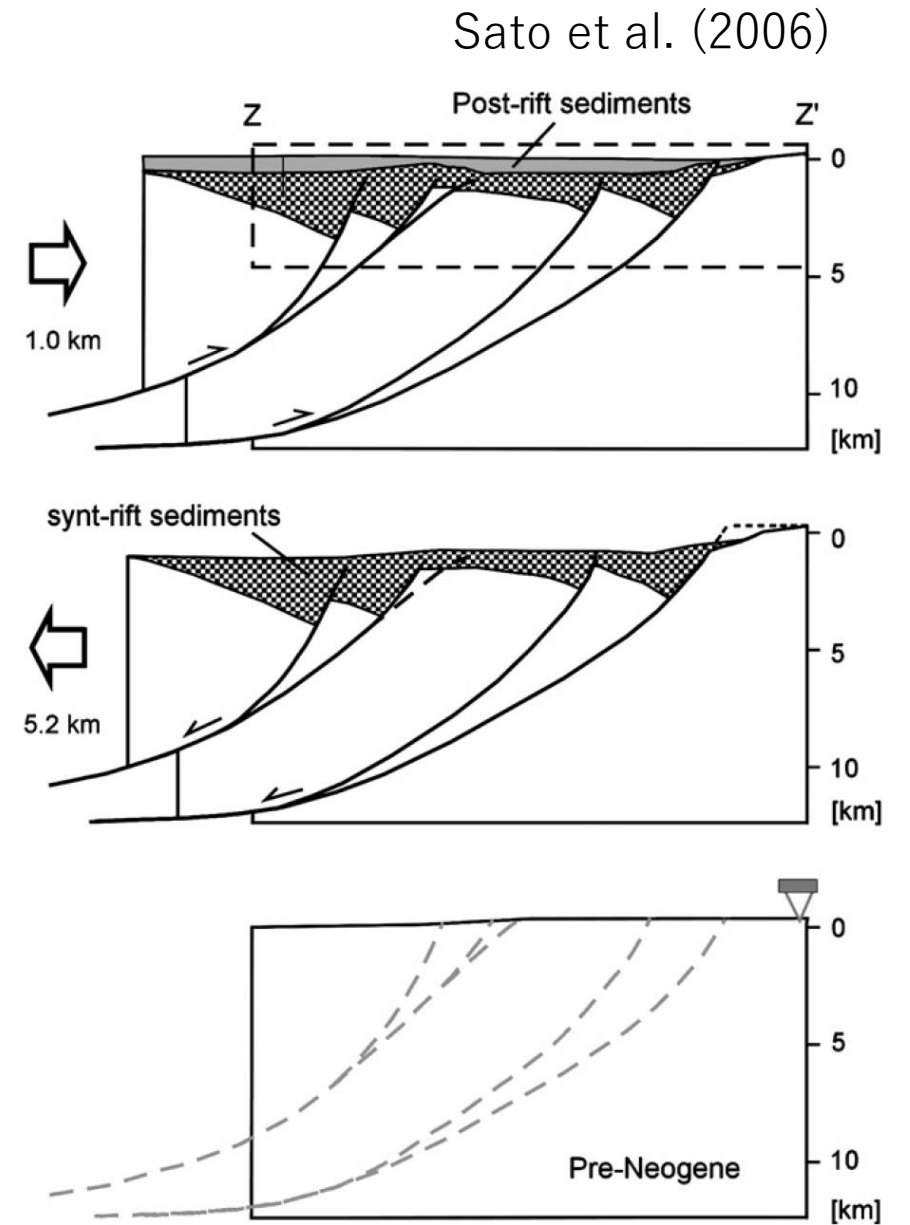
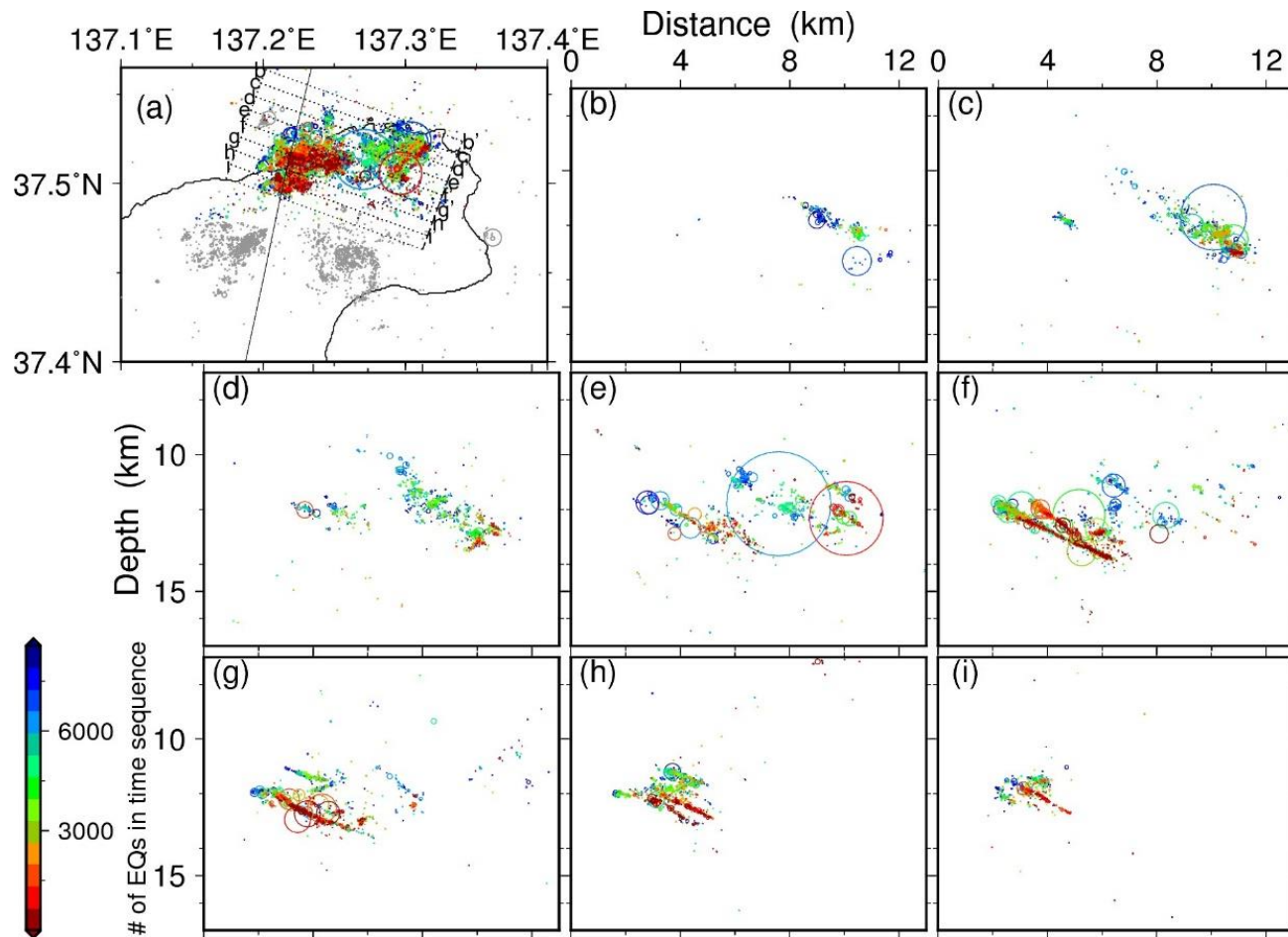


Fig. 9. Balanced geological cross section showing the evolution of the Kitakami fault system in the Mizusawa area. The rectangular boxes near broken line correspond to the seismic section shown in Fig. 8(b). V:H = 1:1.

結論

能登半島北東部で発生している群発地震の震源の時空間変化および S波反射面を調べた。その結果、

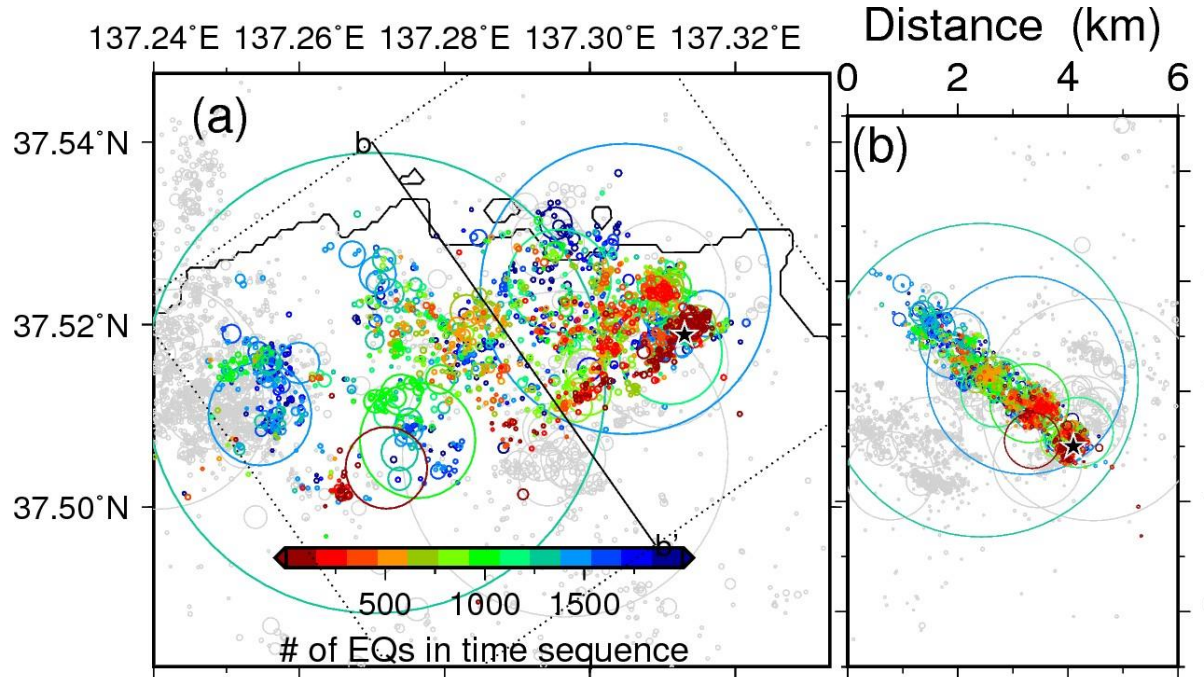
- (1) 地震活動は概ね 4つのクラスターに分かれ、**複数枚の面構造に集中して発生しており、大局的に深部から浅部に向かって migration**していること、
- (2) 最大地震 (M5.4)は、北部東側クラスターが西側へ拡大する中でフロント付近で発生し、更に西側伝播して、西側のクラスターとの間の領域を破壊したこと、
- (3) **最初に活動が活発化した局所的に深い地震群 ($z \sim 18\text{km}$) のすぐ近くにS波反射面が分布しており、更にその深部には地震波の低速度域が分布**していること、
- (4) S波反射面近傍の震源分布が特徴的な環状構造を示しており、直径 20 km程の環状の重力正異常域に囲まれた負の重力異常域の分布と良く対応していることが分かった。

クラスター Sの最深部直下に過去あるいは新たなマグマだまりが存在し、この非火山地域での流体供給源になっている可能性

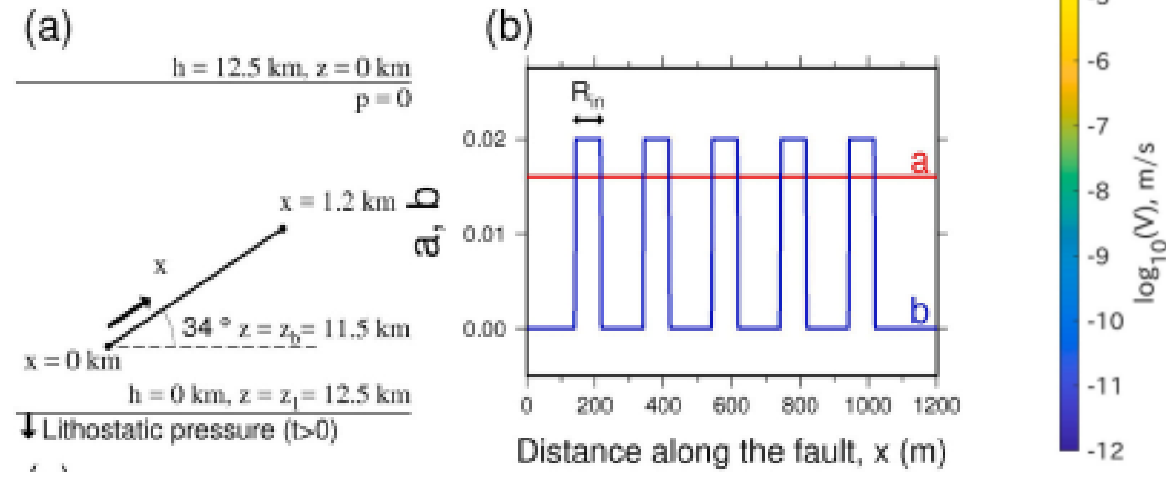
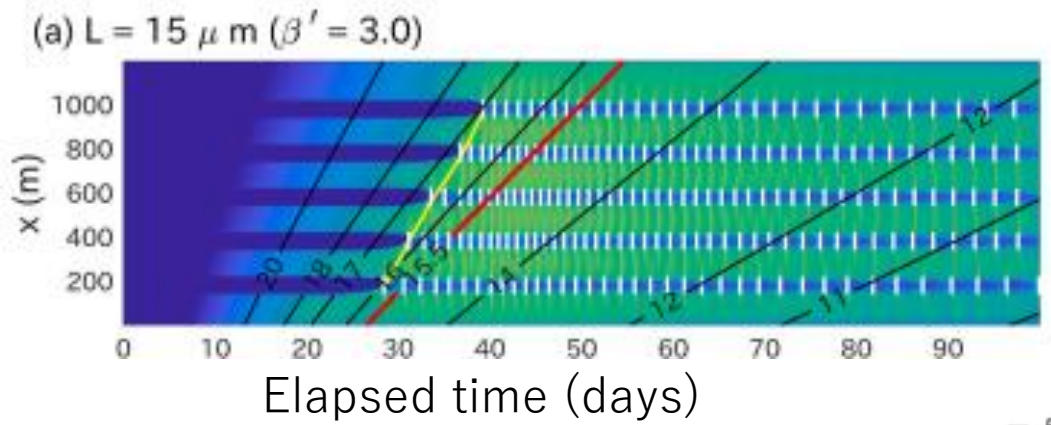
⇒ そこから流体が深部から浅部へ移動することにより、群発地震活動が発生するとともに、非地震性の変形も生じさせ、地殻変動・地震発生の原因にもなった可能性

速度状態摩擦構成則に基づくシミュレーション: pore pressure migrationに伴い非地震性滑りが加速し、両方の効果が地震発生と migrationを促進

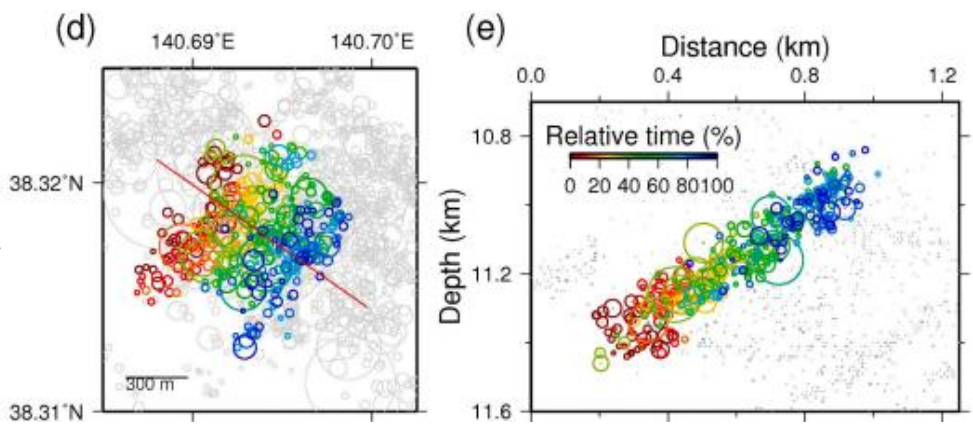
(Yoshida, Noda et al., 2021; Tectono.)



間隙水圧増加により速度強化域での滑り速度が増加し、速度弱化パッチの応力を増加。間隙水圧のみの効果よりも地震を促進

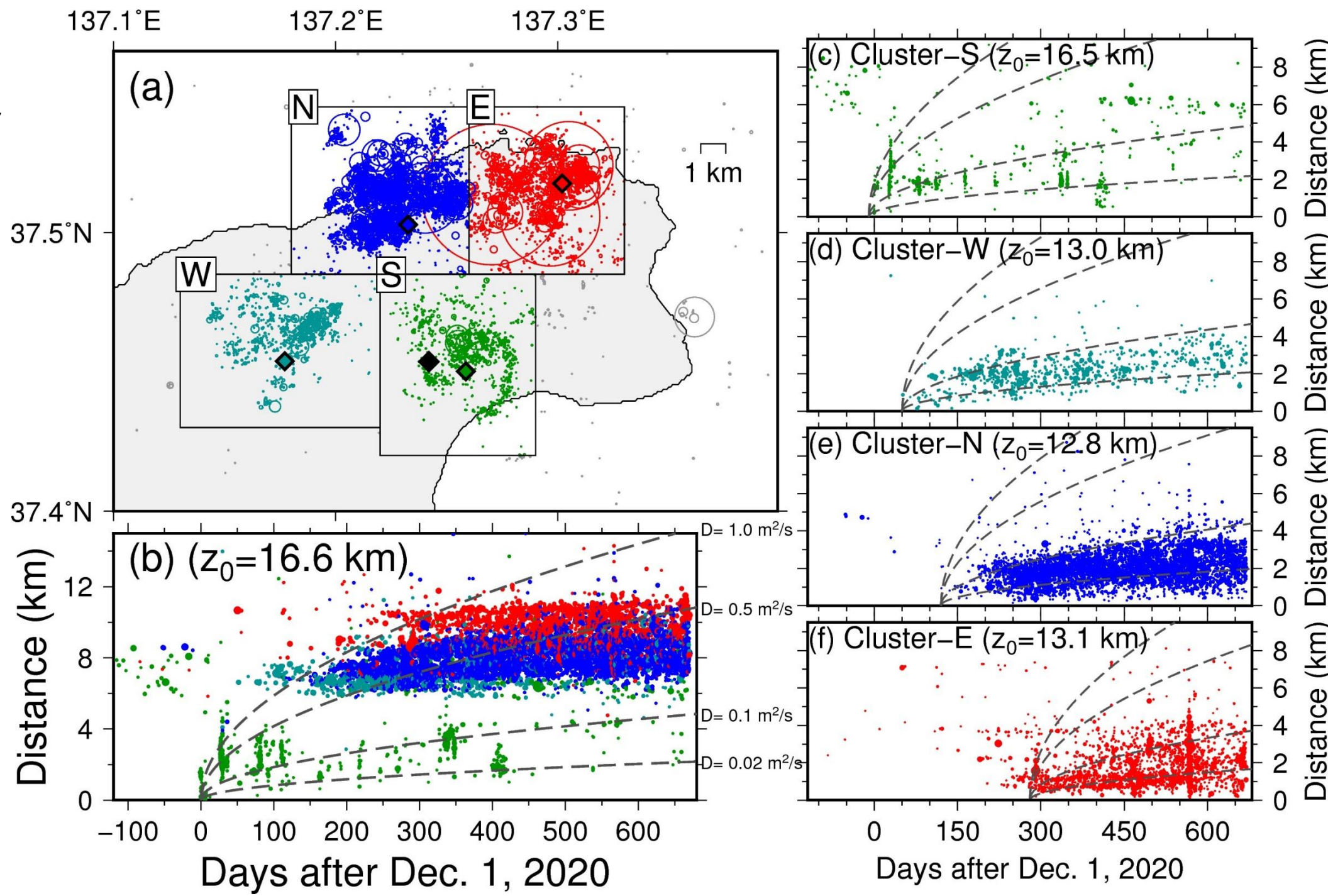


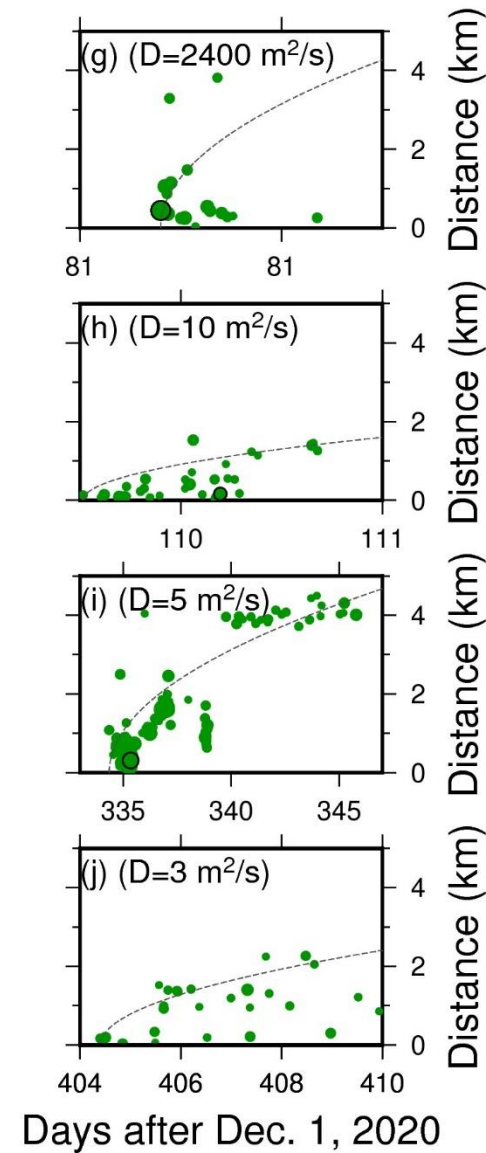
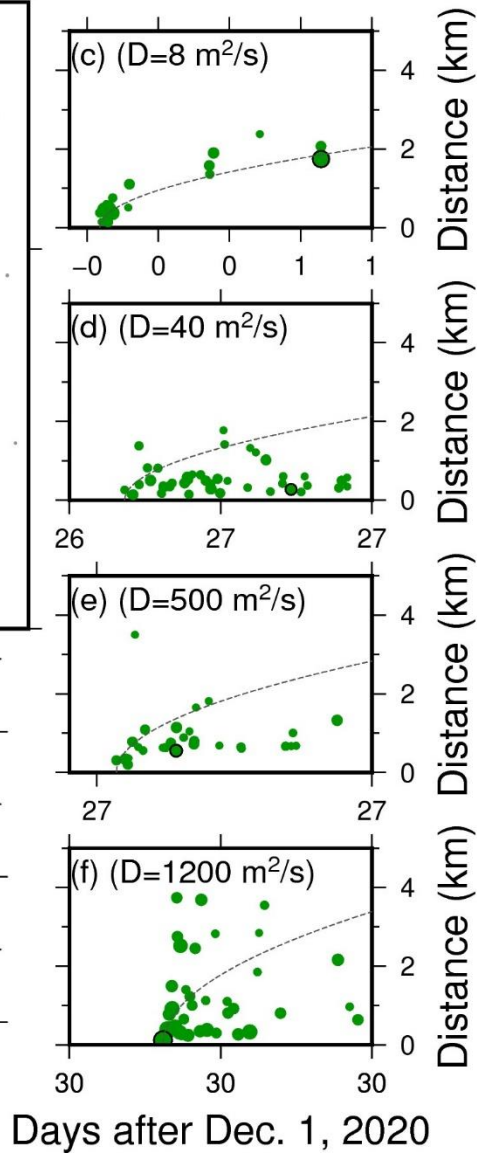
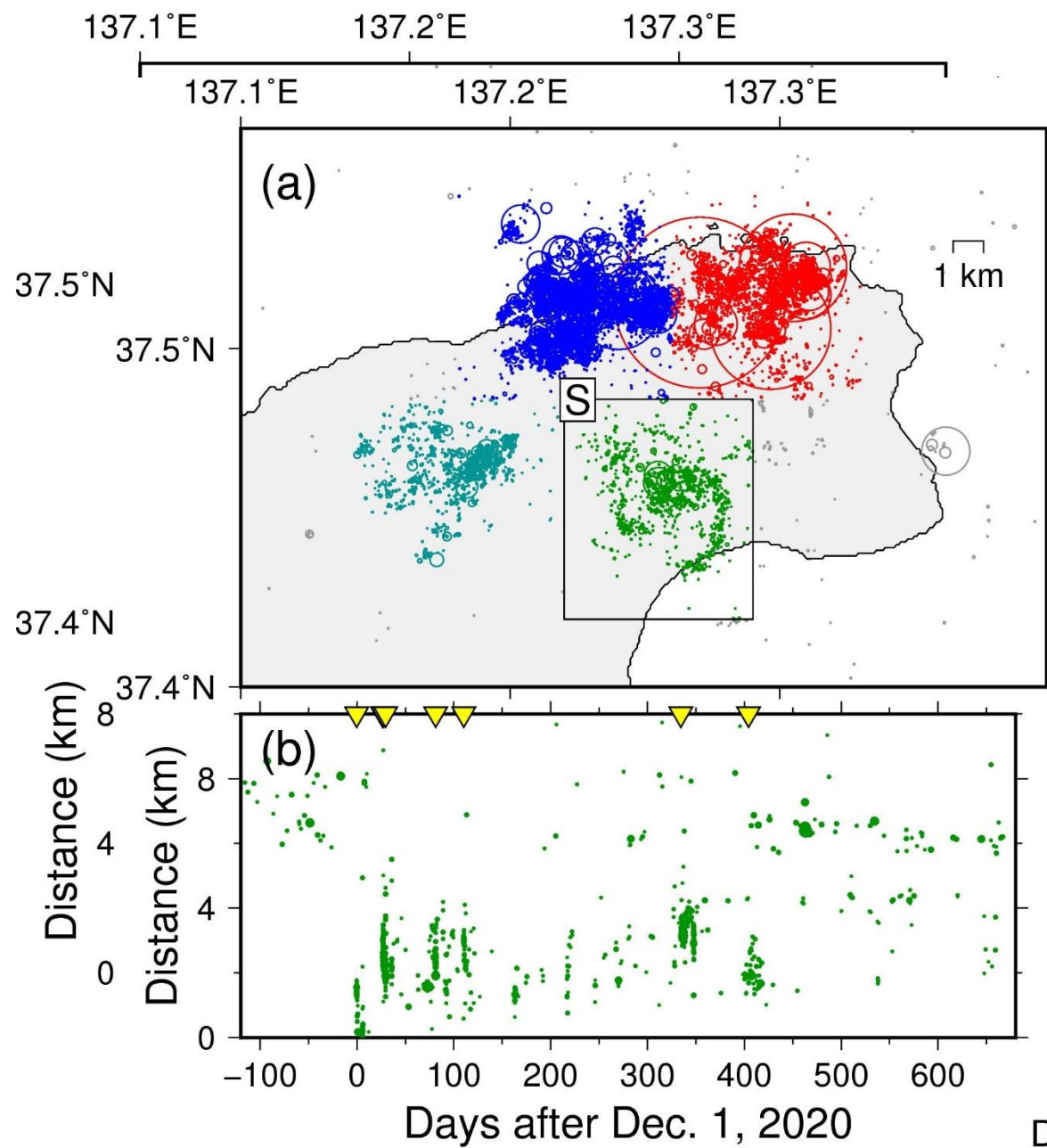
仙台の群発地震 (Yoshida & Hasegawa, 2018)



震源域は、
各クラス
ターで、
全体とし
て深部側
から浅部
側へ拡大

Cluster Sでは、
2018年頃から
 $z=13$ km程度で
活発化。今回の
活発化前まで継
続。





反射点の推定

SxS反射を仮定して、
back projectionにより
反射点を探査

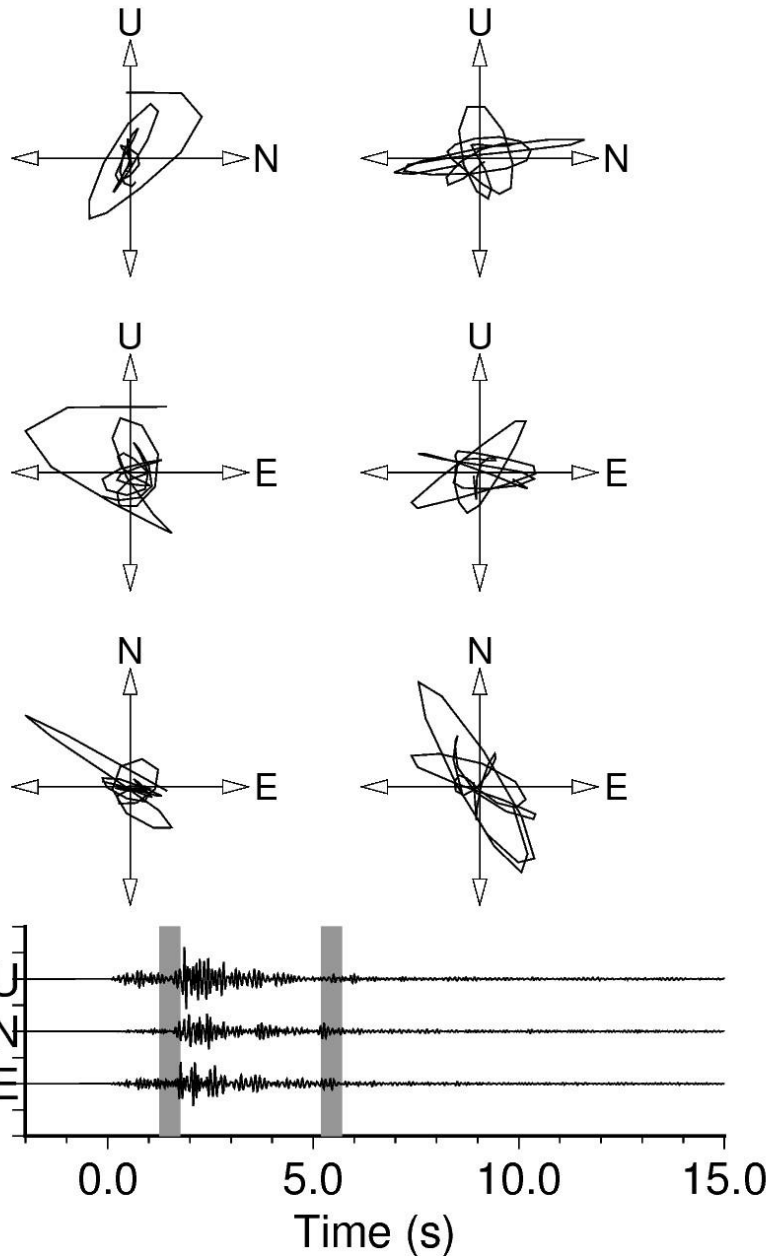
クラスタ Nの1203
個 (M_{JMA})の再決定
震源を使用

日本では反射波を用いた構造
推定が活発に行われている
(Inamori et al., 1992;
Matsumoto & Hasegawa,
1996; Doi & Nishigami,
2007; Kosuga, 2014; Aoki
et al., 2016)

2022042218143568

Direct S (t=1.46s)

Reflected S (t=5.3926s)



2017121812285004

Direct S (t=1.41s)

Reflected S (t=7.0969s)

