

3.11 東北沖地震で stress shadow にも拘わらず誘発された

山形-福島県境群発地震活動

長谷川昭・吉田圭佑（東北大学大学院理学研究科地震・噴火予知研究観測センター）

2011 年東北沖地震後、陸域の広い範囲にわたって地震活動が誘発された。山形・福島県境で発生した顕著な群発地震活動もその一つであるが、この活動は、stress shadow に位置するにも拘わらず 7 日後から急激に活発化した。その原因を理解するために、調査を進めてきた。

その結果、以下のことが明らかになった。1) 一元化震源では、震源が 4 つのクラスターに別れ、それぞれが cloud 状にばらついた分布をしているが、波形相関を使って精度良く再決定すると、それぞれのクラスターで震源が複数枚の面上に乗る明瞭な面状構造をする。また、震源は個々の面上を移動しながら、全体として深部から浅部に向かって移動する傾向がある。2) メカニズム解から推定した断層強度は、顕著な時間変化をする。すなわち、活動開始直後が最小で、それがおよそ 50 日後まで急激に上昇し、その後はゆっくりと上昇しながら一定値に近づく (Yoshida et al., 2016)。3) スペクトル比やコーダ規格化法を使って推定した応力降下量も、断層強度と同様な時間変化をする (Yoshida et al., 2017)。4) b 値も顕著な時間変化をする。ただし、活動開始直後が 1.8~2.0 と大きく、その後約 50 日後まで急激に低下した後はゆっくりと低下し 1.1 程度の値に落ち着く。すなわち、断層強度や応力降下量と逆相関の時間変化をする (Yoshida et al., 2017)。5) 地震発生頻度も、断層強度や応力効果量と逆相関の時間変化をする。ETAS モデルを適用して求めた地震発生率 μ も同様の時間変化をする。

以上のことから、この活動は、東北沖地震の発生で東西圧縮応力が低下したため、直下の地殻下部から上昇してきた流体が引き起こしたと推定される。すなわち、上昇してきた流体が複数枚の既存の弱面に沿って移動したことによって、間隙流体圧が上昇し、そのため断層強度が低下して発生したものと推定される。1) 活動開始直後は、間隙流体圧が異常に高く、そのため断層強度と応力降下量が非常に小さく、一方 b 値と μ 値は異常に大きかった。2) その後、流体が拡散するにつれて間隙流体圧が次第に低下したことで、断層強度と応力降下量は次第に上昇し、一方、 b 値と μ 値は次第に低下し一定値に近付いたと考えれば、観測された時間変化を統一的に理解できる。

Yamagata-Fukushima border earthquake swarm induced by the 2011 Tohoku-Oki earthquake in the stress shadow

Akira Hasegawa and Keisuke Yoshida

Research Center for Prediction of Earthquakes and Volcanic Eruptions,
Graduate School of Science, Tohoku University

After the 2011 Tohoku-Oki earthquake, seismic activity was induced at many locations over a wide area of the Japan Islands. A remarkable earthquake swarm at the Yamagata-Fukushima border is one such induced seismicity. Despite being located in the stress shadow, this swarm was abruptly activated seven days after the Tohoku-Oki event. In order to understand its generation mechanism, we have been conducting detailed study on this swarm activity.

As a result, the following features were clarified. 1) In the original JMA locations, hypocenters are divided into four clusters, each having a cloud-like scattered distribution. Precise hypocenter relocations by using waveform cross-correlations, however, show that hypocenters are concentrated on a couple of thin planes in each cluster forming a clear planar structure. In addition, hypocenters tend to migrate from deep to shallow as a whole while moving on individual planes. 2) Fault strength estimated from the diversity of focal mechanisms has a significant temporal variation. It is minimal immediately after the start of activity, rapidly gets bigger up to about 50 days and then slowly rises approaching a constant value (Yoshida et al., 2016). 3) Stress drop estimated using the spectral ratio method and coda normalization method has a similar temporal variation to the fault strength (Yoshida et al., 2017). 4) b value also has a notable temporal variation. However, it is maximal immediately after the start of activity and is 1.8 to 2.0 for the following about 50 days, which are anomalously large, then it declines slowly and falls to a value of about 1.1. That is, its temporal variation has a negative correlation with the fault strength and stress drop (Yoshida et al., 2017). 5) Frequency of earthquake occurrence also has a negative correlation with the fault strength and stress drop. Background earthquake generation rate μ , obtained by applying the ETAS model for correcting the effect of triggered earthquakes, also has the same temporal variation.

The above observations show that the present activity was caused by fluids that has risen from the lower crust right below due to the decrease in east-west compressive stress by the Tohoku-Oki earthquake. The fluids rising from below move along the existing weak planes, pore pressures on those planes increase, and thus fault strengths decrease, causing many

earthquakes along those planes. Pore pressure was anomalously high immediately after the start of the activity, then it decreased rapidly at first and gradually thereafter as the fluids diffuse along the pre-existing weak planes. Such pore pressure change well explains the presently observed distinctive temporal variations of the fault strength, stress drop, b value and μ value.



東北大学



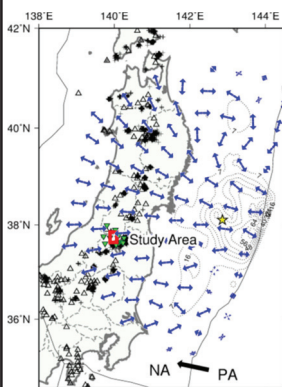
3.11東北沖地震で stress shadow にも拘らず誘発された 山形・福島県境群発地震

東北大学大学院理学研究科 地震・噴火予知観測センター
長谷川 昭・吉田 圭佑

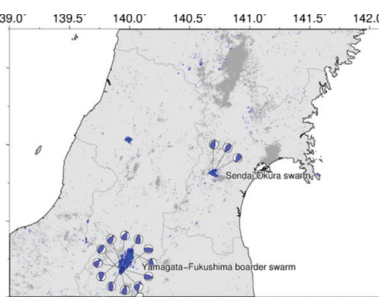
2018.1.31-2.1 地殻活動研究会
東濃地震科学研究所会議室

山形・福島県境群発地震： Stress shadow

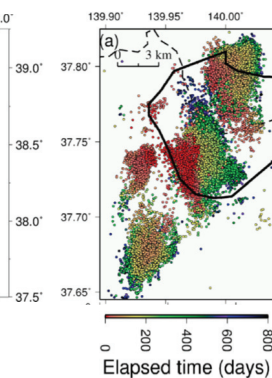
東北沖地震による静的応力変化
 σ_3 軸の方向



東北沖地震前(灰色)と東北沖地震後(青)
の震央分布



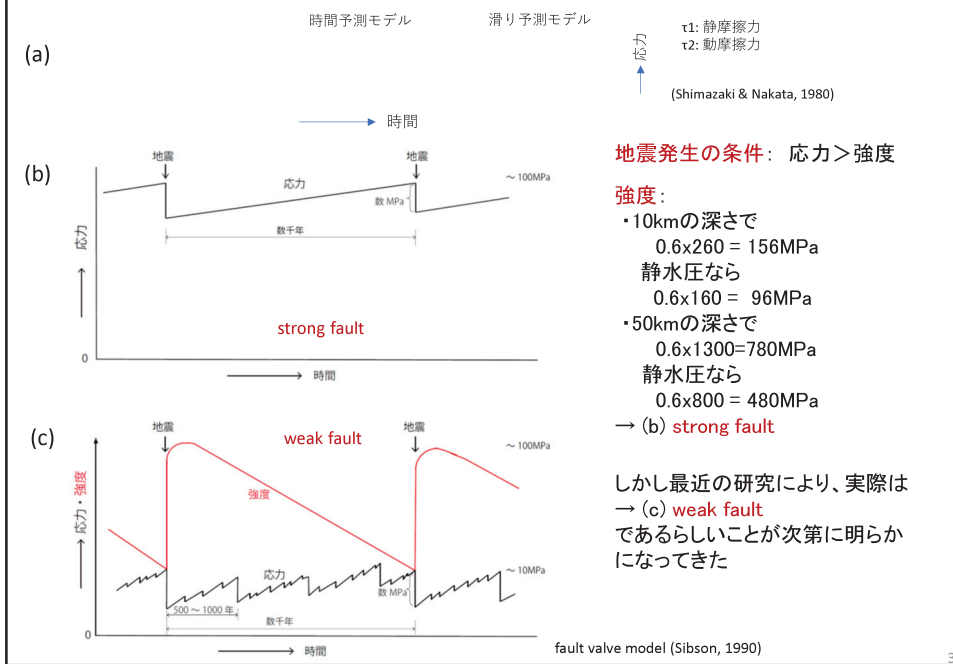
山形・福島県境群発地震
震央分布



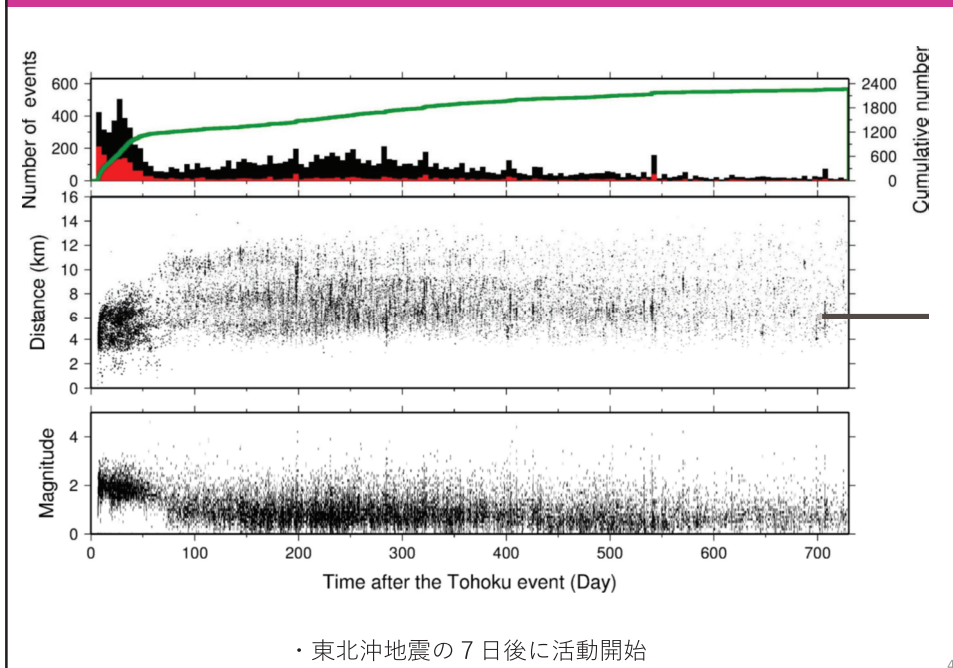
- 1) Yoshida & Hasegawa, Hypocenter migration and seismicity pattern change in the 2011 Yamagata-Fukushima border, NE Japan, earthquake swarm caused by fluid movement and pore pressure change, submitted to *J. Geophys. Res.*
- 2) Yoshida et al., Temporal changes in stress drop, frictional strength, and earthquake size distribution in the 2011 Yamagata-Fukushima, NE Japan, earthquake swarm, caused by fluid migration, *J. Geophys. Res.*, 2017
- 3) Yoshida et al., Temporal variation of frictional strength in an earthquake swarm in NE Japan caused by fluid migration, *J. Geophys. Res.*, 2016

2

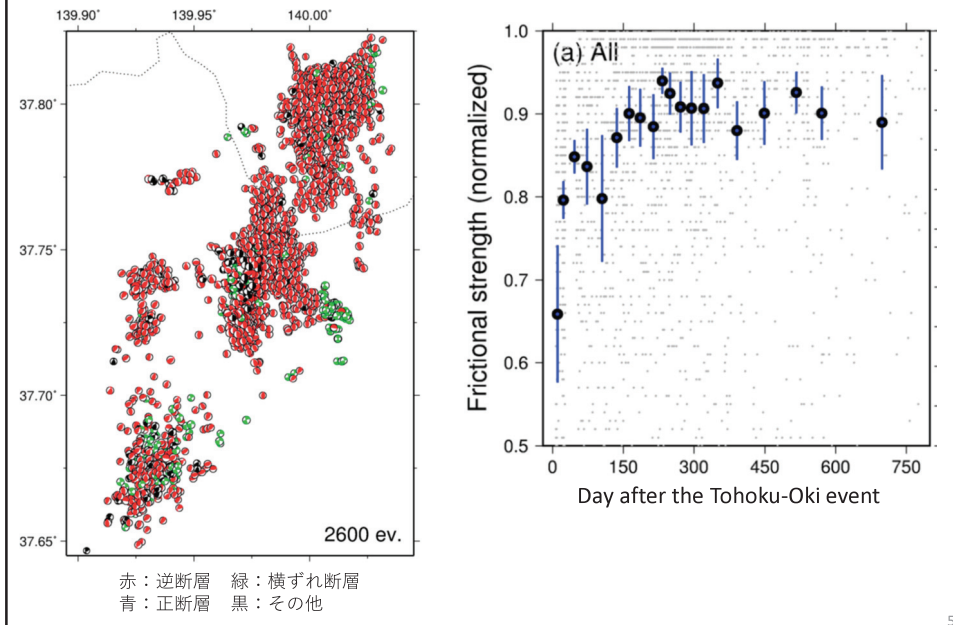
地震サイクル: strong fault? or weak fault?



地震数, 最初の地震からの距離, Mの時間変化

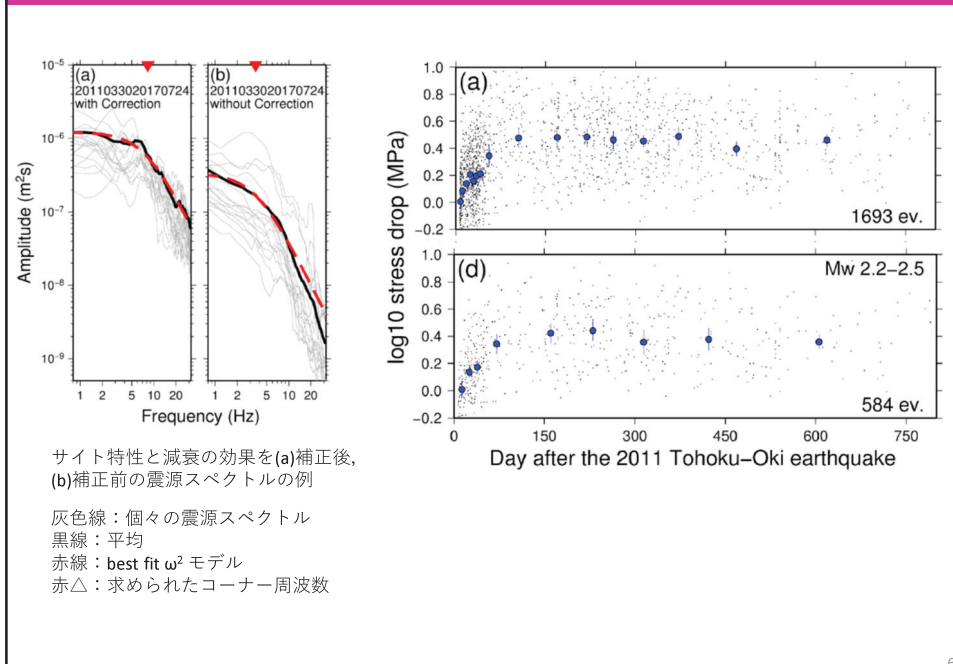


断層強度の時間変化



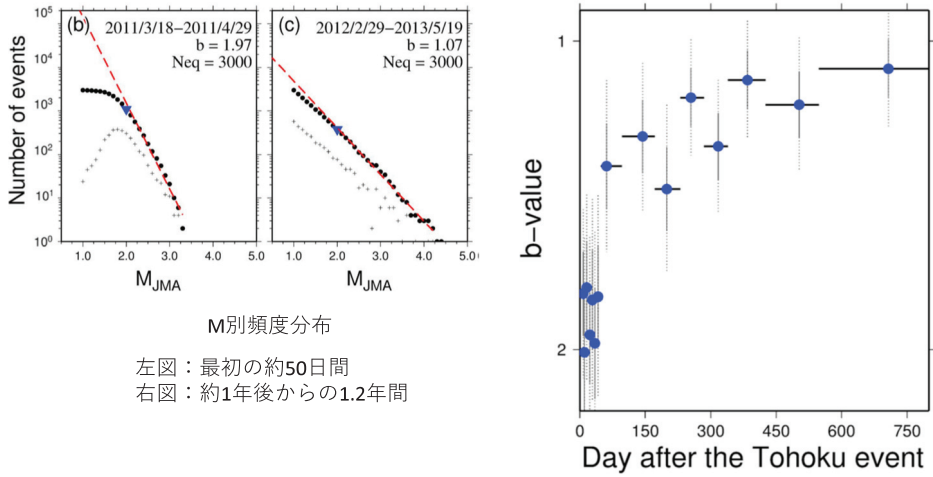
5

応力降下量の時間変化



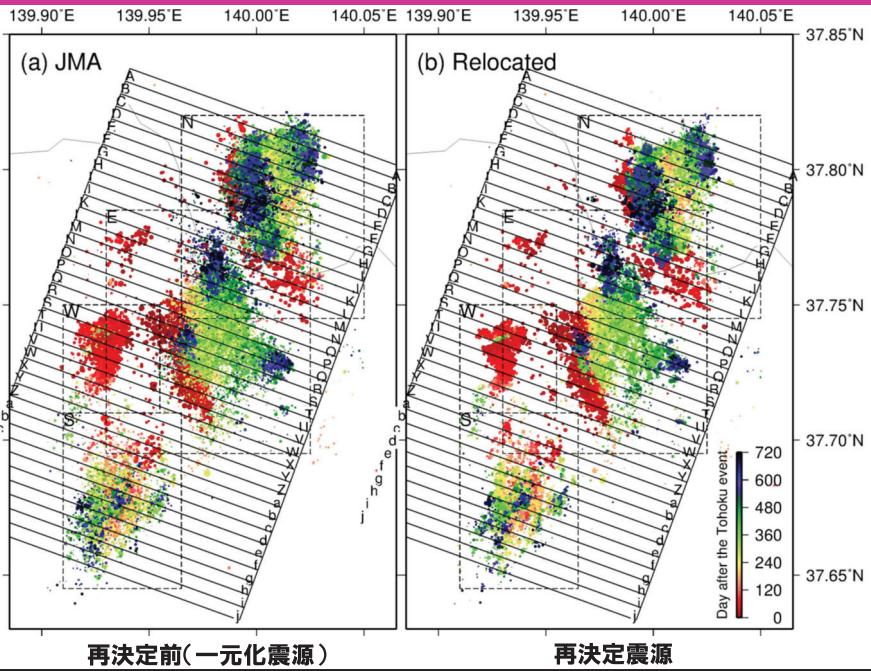
6

b値の時間変化



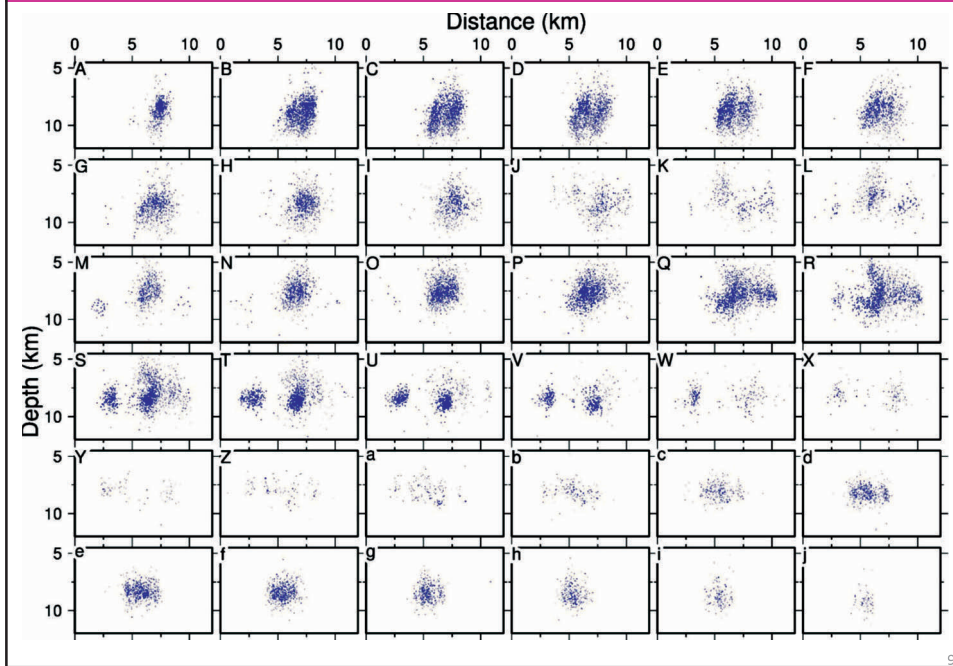
7

波形相関を用いた震源再決定：震央分布

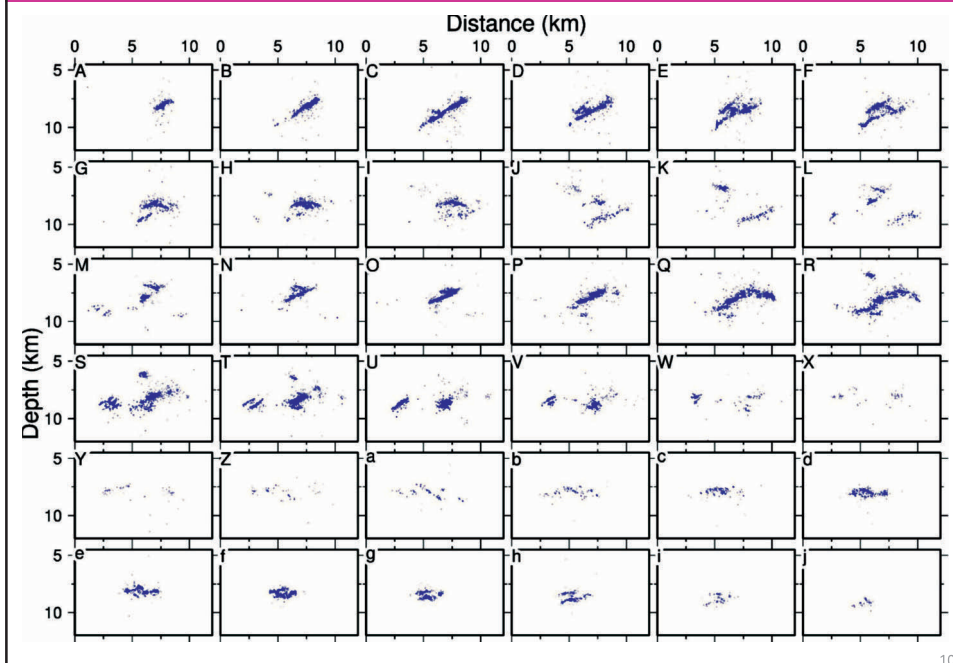


8

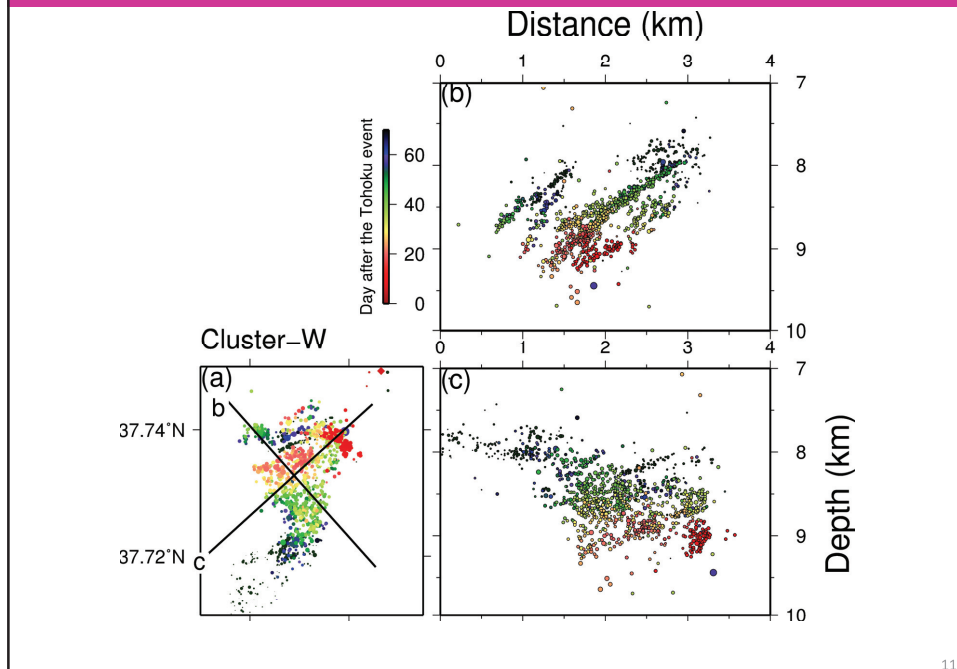
再決定前の一元化震源：鉛直断面



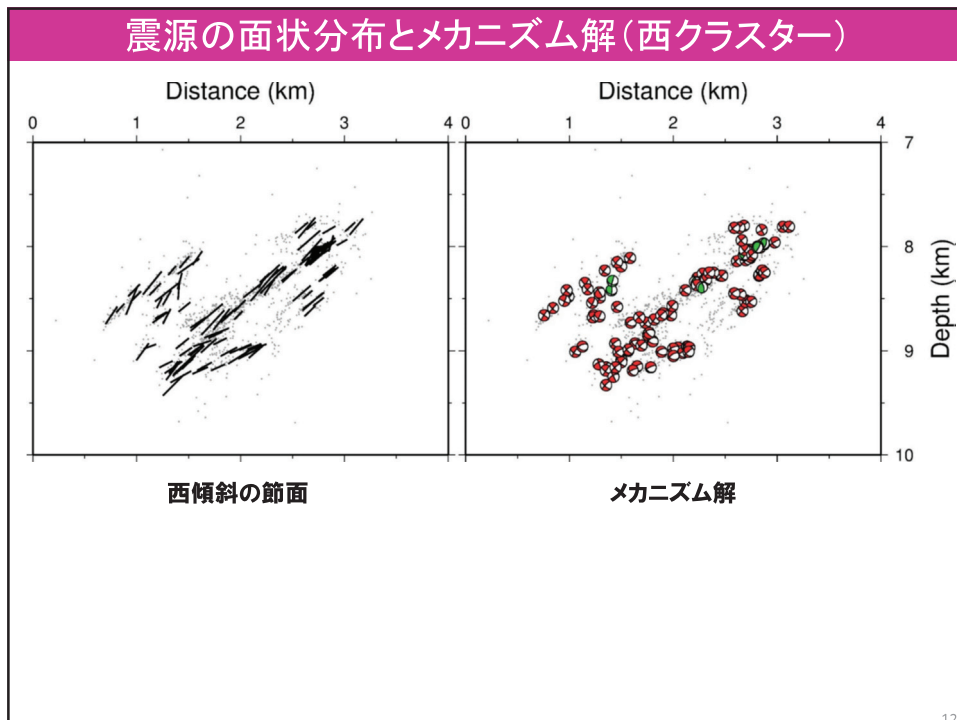
波形相関を用いた再決定震源：鉛直断面



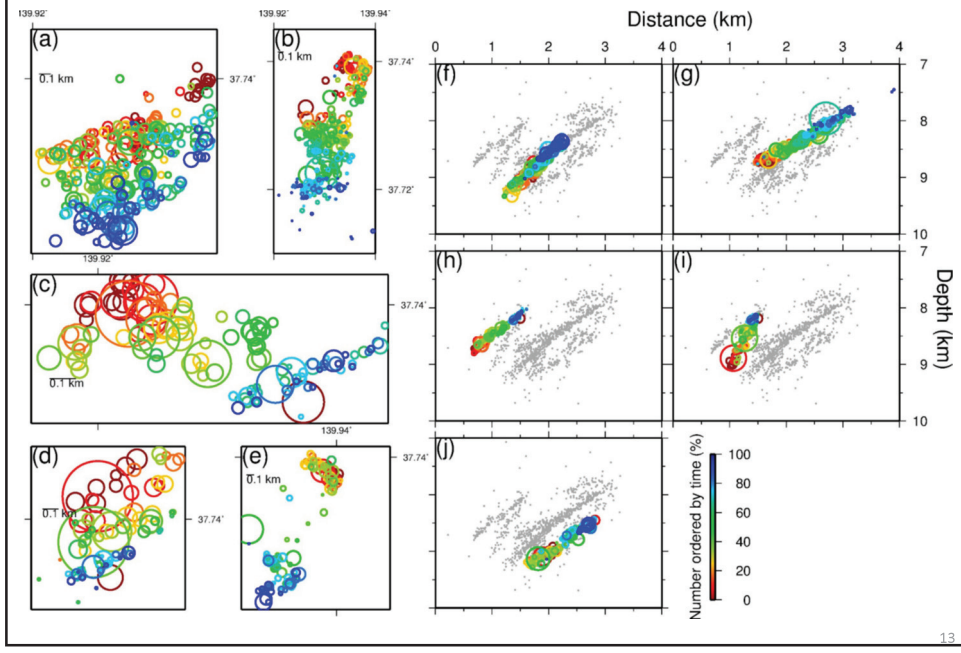
拡大した震源分布と震源の移動(西クラスター)



震源の面状分布とメカニズム解(西クラスター)

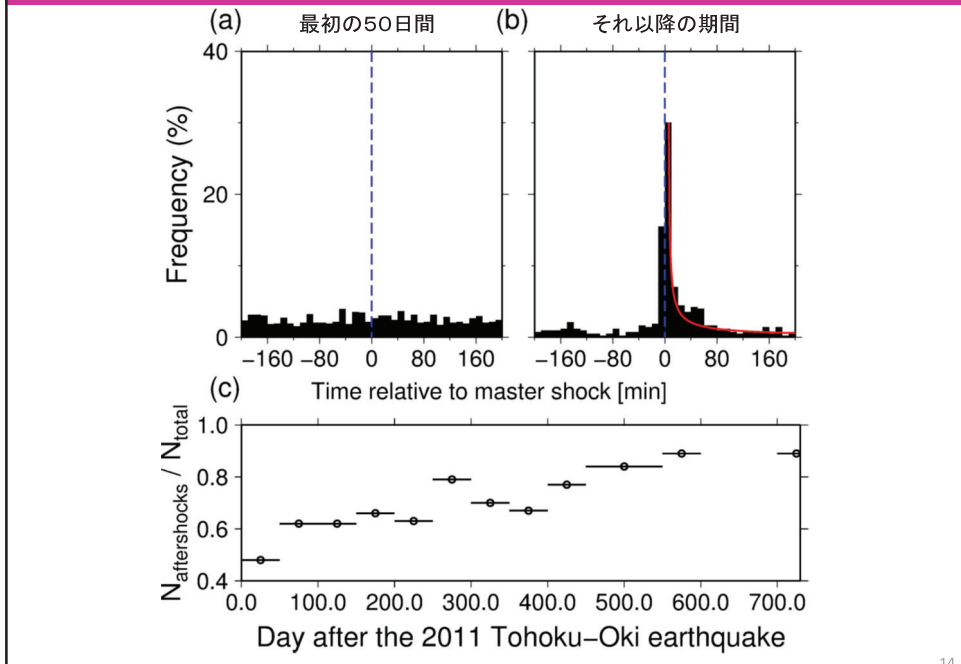


震源の移動:各面に沿う震源の移動



13

比較的大きな地震前後の地震数の分布



14

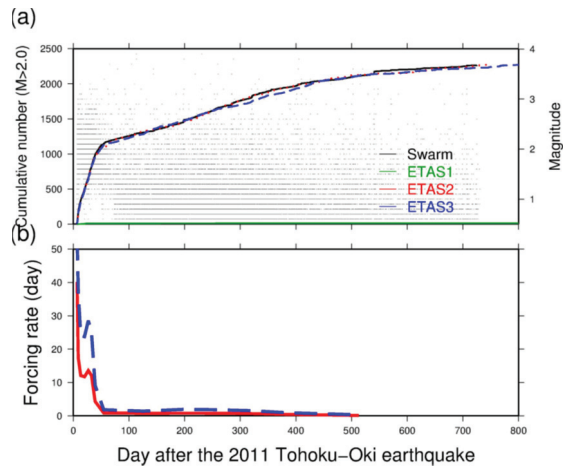
ETASモデルによるフィッティングと forcing rate μ

ETAS model :
 seismicity rate =
 background rate λ_0
 +
 aftershocks triggered by
 each event $\lambda_i(t)$

$$\lambda(t) = \lambda_0 + \sum_{i:t_i < t} \lambda_i(t)$$

aftershocks =
 modified Omori law

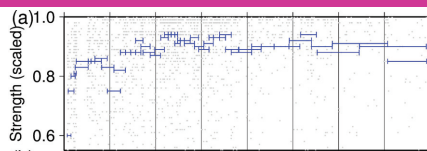
$$\lambda_i(t) = \frac{K_0}{(c + t - t_i)^p} e^{\alpha(M_i - M_{\min})}$$



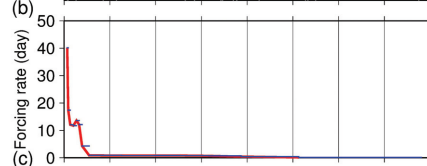
15

断層強度, forcing rate μ , 応力降下量, b 値の時間変化

断層強度

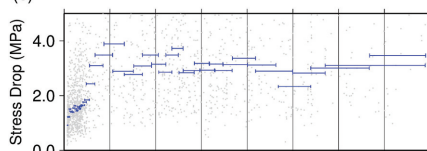


Forcing rate μ

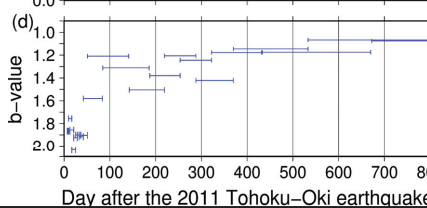


← pore pressure
 の変化に対応？

応力降下量

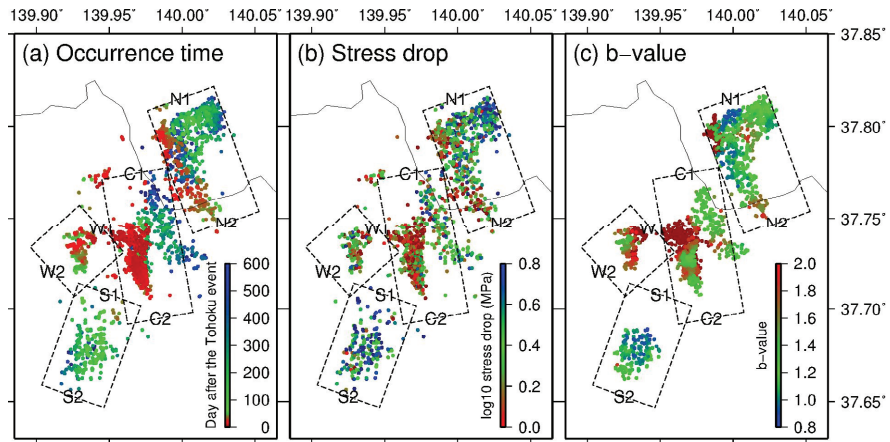


b 値



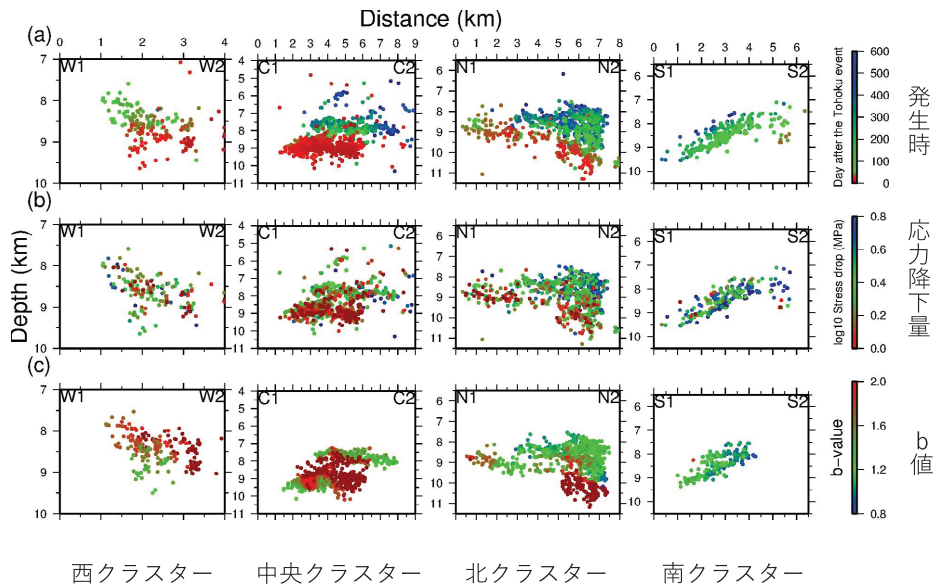
16

地震発生時, 応力降下量, b 値の空間分布(平面図)



17

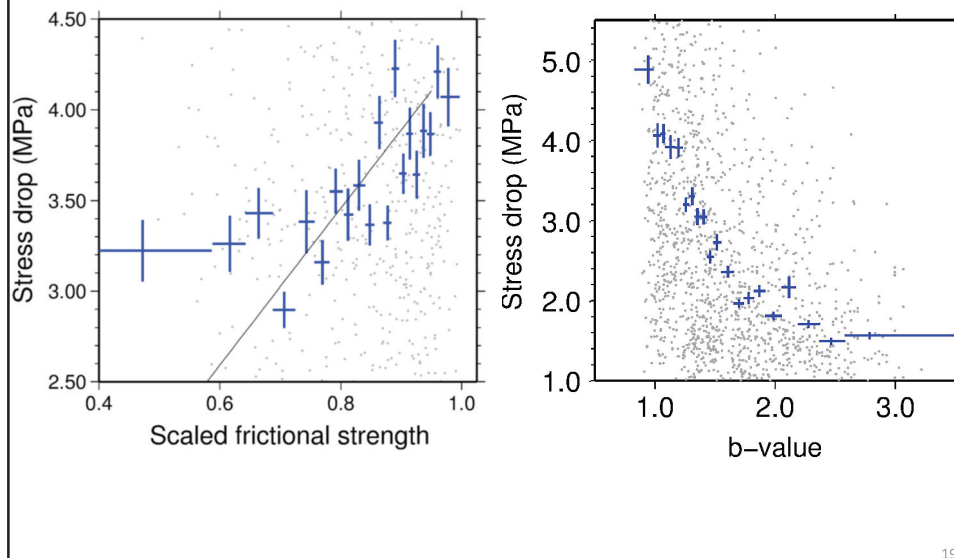
地震発生時, 応力降下量, b 値の空間分布(鉛直断面)



西クラスター 中央クラスター 北クラスター 南クラスター

18

断層強度, 応力降下量, b 値の関係



19

まとめ

- 1) **震源**: 複数枚の面上に分布. 個々の面上を深部から浅部に移動
- 2) **断層強度, 応力降下量**: 活動開始直後最小、~50日後まで急激に上昇、その後ゆっくりと上昇しながら一定値に近づく
- 3) **b値, μ 値**: 断層強度や応力降下量と逆相関の時間変化



東北沖地震で東西圧縮応力低下、直下から流体上昇、流体は複数枚の既存の弱面に沿って移動、間隙流体圧上昇、断層強度低下 → 地震発生

活動開始直後は間隙流体圧が非常に高く、その後流体が拡散するにつれて間隙流体圧が次第に低下したことで、**断層強度、応力降下量、b値、 μ 値の時間変化も統一的に理解**できる

一般的に、**群発地震の原因**は、高間隙流体圧？

群発地震: 震源の移動がみられ、火山フロント付近で発生、大きいb値. とりわけ火山性地震は b値が大きく2を超えることがある → **高間隙流体圧で説明可能**

20

