

# 長期の断層活動性を評価する手法の開発を目指して： 手法の紹介とその適用事例

大坪 誠<sup>1)</sup>

## 1. はじめに

活断層・火山研究部門地質変動研究グループでは、10万年～100万年という長期的な時間スケールにおける、断層活動や隆起浸食などの地質変動の調査・研究を行っています。現在、日本列島で地質変動が激しいところ、例えば新潟地域や秋田地域の日本海東縁地域のいわゆる油・ガス田地域では、人類が地球上に出現した第四紀に堆積した比較的若い地層(100万年前や200万年前の地層)が水平方向からの押しの力によって大きく“ぐにゃっ”と曲がっている様子(活褶曲変形)を観察することができます(第1図)。私たちはこのような大変形や地質変動の長時間での成り立ちを研究しています。具体的には、過去の地質変動の解析を高精度に行い、精緻な地質変動のプロセスやその要因に対する科学的な解釈を行っています。なぜなら、過去の地質変動の歴史を精度よく知ることにより、地質変動の将来予測に対する科学的信頼性の向上ができると考えられるためです。このような長期の地質変動を明らかにすることは、放射性廃棄物の地層処分、二酸化炭素の地中貯留やその他地下利用を行う際の地質環境の長期安定性を評価する上で重要です。その研究例の1つとして、筆者が中心となって研究を行っている、長期の断層活動性評価の研

究について紹介します。例えば、日本列島に存在する活断層の活動開始の時期に注目してみると、全国一斉に活断層が活動的になったわけではなく、比較的早い時期(250万年前など)に活断層が活動を開始したところもあれば、そうではなく最近(80万年前など)になって活動を開始した地域もあることが報告されています(第2図、道家ほか、2012)。プレート運動方向が変化する時間スケールの最小単位である100万年、もしくはもっと長い時間では、あるところでは断層活動のような地質変動が活動的だったとしても、違うところではそれが活動的ではないことがあるということです。第1図で紹介しました日本海東縁地域で認められる活褶曲変形は海側から陸側へその活動場が移動していることが地質学的地形学的情報から読み取れます(第3図、Otsubo and Miyakawa, 2016)。

## 2. 地殻応力の空間的な広がり把握する

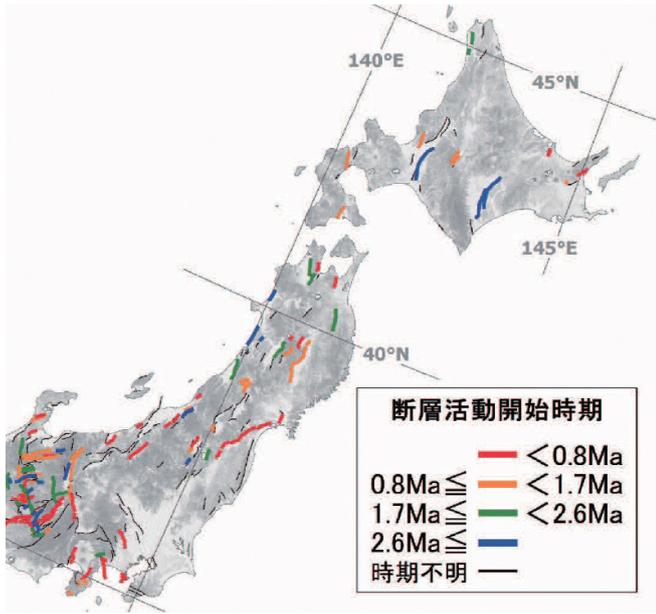
断層活動を含む地殻の変形発達的主要な源は地殻に働く応力(単位面積あたりに働く力)です。そのため、地殻に働く応力の空間的な広がりや各地域での応力の特徴をうまく理解することが必要です。応力の空間的な広がり、各地域での断層の動く方向を規制したり、後述する断層の動きや



第1図 新潟中越地域で認められる活褶曲の露頭。新潟県長岡市不動沢成出<sup>なるで</sup>。不動沢成出の渋海川<sup>しぶみがわ</sup>右岸の崖で見られるこの露頭は、第四紀に形成されつつある、いわゆる活褶曲(向斜)です。褶曲軸が北東―南西に延び、両翼が20°～40°傾斜した対称的な向斜です。200万年前～60万年前に魚沼層の浅海性～河川堆積物が堆積した後約60万年前以降に水平短縮に伴って形成され始めました。

1) 産総研 地質調査総合センター活断層・火山研究部門

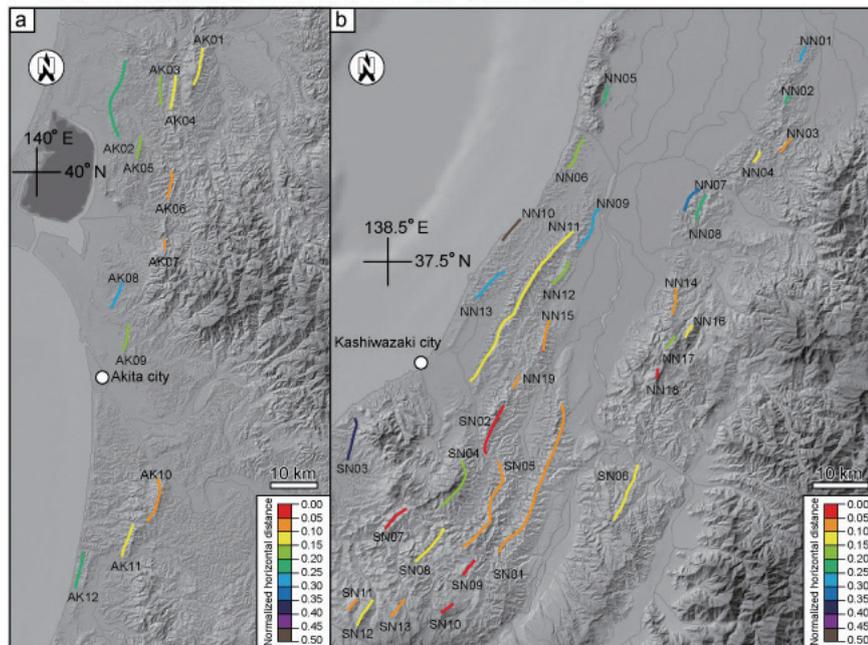
キーワード：活断層、地質断層、再活動、応力、スリップテンデンス、内陸地震、変形、地殻



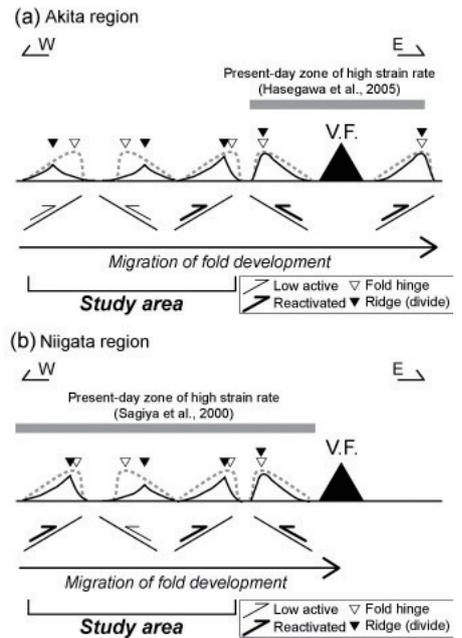
第2図 既存情報に基づく活断層の活動開始時期の分布(道家ほか, 2012)。ここでは中部地方より東の地域の結果を示しています。活断層を線で示し、線の色が暖色系になればなるほど、断層活動開始時期が若いことを示します。

すさに影響を与えたりします。各地域の現在の応力の情報は地震データなどから統計解析によって求めることができます。これまで多くの地震学者が求めた現在の応力の情報を使って、例えばある活断層周辺の地殻に働く現在の応力の空間的な広がりを検討することが可能です。応力は“テンソル”という物理量ですが、ここでは各地域間でのその物理量の「近さ(類似性)」を評価することが鍵となります。その際には応力に対して統計解析を行って、その結果を地図上に表示します(Otsubo *et al.*, 2013a)。岐阜県飛騨高山地域にある活断層である跡津川断層周辺での応力の空間的な広がりを研究した例を紹介します。跡津川断層は、1858年4月9日(安政5年2月26日)にマグニチュード7.0から7.1と推定される飛越地震を引き起こしたと考えられています。まず、最大圧縮の応力方向と跡津川断層の断層面のなす角度(Reference stress)が30°となるような横ずれ断層を生成する応力(跡津川断層が相対的にすべりやすい応力)を基準応力とします。この基準応力と跡津川断層周辺の地震データ(Katsumata *et al.*, 2010)から明らかになった応力との「近さ」を評価してみると、跡津川断層周辺の応力の空間的な広がりが一様でないことがマッピングを通して見えてきます(第4図)。第4図の色

日本海東縁地域を含む歪み集中帯での褶曲地形発達度



地殻短縮場(褶曲発達場)の移動モデル



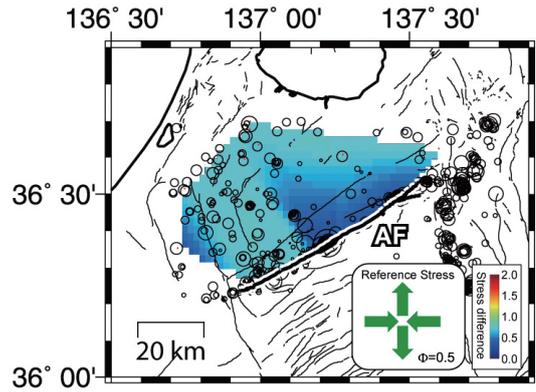
第3図 日本海東縁地域(秋田地域および新潟地域)での(左)褶曲の褶曲軸と地形的稜線のズレと、(右)両者のズレから推定される褶曲発達場の移動モデル(Otsubo and Miyakawa, 2016)。V.F.は火山フロント。この地域での第四紀堆積層は地下の逆断層活動によって褶曲変形します(上に凸となります)。褶曲変形が低調になると侵食作用が優勢となり、稜線と褶曲軸のズレが拡大します。ここでは、稜線と褶曲軸のズレを褶曲発達度合いの指標として、ズレの小さい方が褶曲発達中であることを示します。左図では各褶曲軸にズレの程度を着色しています。暖色はズレが小さいことを示します。このズレは、おおむね海側が大で、陸側が小となっています。これは変形場が海側から陸側への移動を示唆しています(右図)。

の広がりか応力の空間的な広がりを示して、ここではより寒色の領域が設定した基準応力に近い応力(跡津川断層が相対的にすべりやすい応力)が広がる領域となります。このことは、一つの活断層に対して、跡津川断層では、東西で異なる応力が働いていた可能性を示すものです。また、応力の把握に関しては、地震のデータから時間的空間的に変動する地下の応力状態をきめ細かく把握することが可能となる応力推定法(Otsubo *et al.*, 2008)や、ボーリングコアを切る断層面を用いた応力推定法(大坪ほか, 2009)を開発して、応力の時間的空間的な変化における断層の再活動性の検証なども行っています。

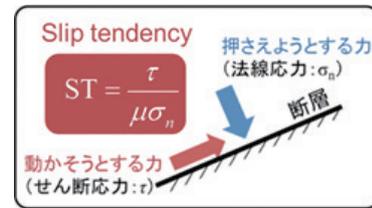
### 3. 力学的な基準によって断層の活動性を評価する

地殻に働く応力の情報を用いて、力学的な基準による断層活動性を評価する手法の開発を目指した研究を行っています。ここでの研究のミソは、「現在の応力の下で動きやすい断層が活断層であって、現在の応力の下で動きにくい断層は活断層ではないかもしれない」という考え方です。力学的な基準による断層活動性評価の利点は、現在取得可能な力学的パラメータにより活動性を評価できることです。断層の活動性評価に関して、国内では、第四紀堆積物や変動地形を指標に活断層の抽出とその活動度評価が広く行われてきました。しかし、活断層の活動時期を把握するための堆積物が欠如する場合や低活動性断層を対象とする場合には、これらの手法による評価が難しい場合があります。力学的評価手法は、堆積物などの上載地層を欠き活動履歴が不明な場合や変動地形が不明瞭な場合であっても、断層の活動性を評価できる可能性があります。また、従来の活断層で想定されるような数万年の時間を超える活動の再来周期を有する断層においても、活動性を評価できる可能性があります。今回紹介する手法では、空間的な広がりをもつ応力および断層形状をもとに、各断層面に作用する応力を計算し、その応力下での断層の姿勢に対する動きやすさを表すスリップテンデンス(Morris *et al.*, 1996)を計算します。3つの主応力(最大, 中間, 最小の圧縮応力)軸の方向と応力比から断層面に働くせん断応力 $\tau$ と垂直応力 $\sigma_n$ の比を計算することができて、それがスリップテンデンス(略してSTと呼ぶことにします)という値です( $0 \leq ST \leq 1$ で規格化することがあります)(第5図)。

ここで2つ事例を紹介します。まず東北地方における活断層にSTによる活動性評価を実施した例を紹介します。研究の結果、東北地方における活断層のSTは現在の応力(東西方向の最大圧縮をもつ応力)の下で全体的に高



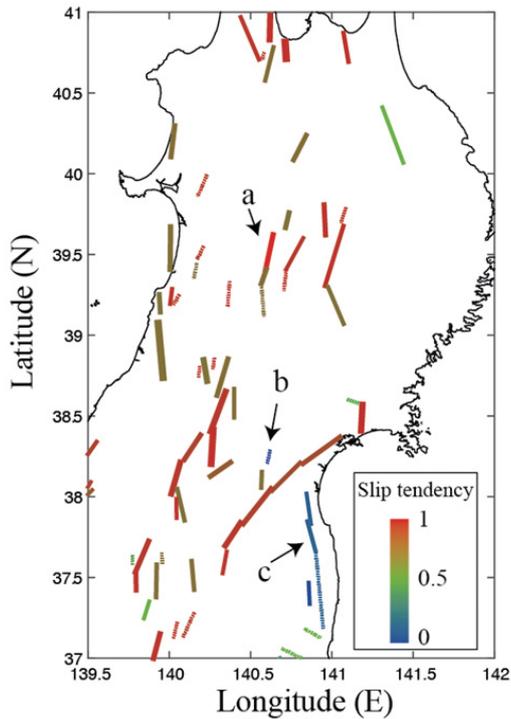
第4図 岐阜県飛騨高山地域にある跡津川断層(この図でのAF)周辺の地下8~20 kmでの応力の空間的な広がり。右横ずれの活断層である跡津川断層の北西側領域での応力の空間的な広がりを検討しました。色が塗られた領域が寒色系になればなるほど、ここでは跡津川断層が相対的に活動しやすい応力であることを示します。



第5図 スリップテンデンス(ST)の概念図。

いことが分かりました(第6図; Miyakawa and Otsubo, 2015a)。東北地方における活断層の多く(全体の約80%の活断層)が0.7を超える高いSTの値(高い活動度)を示します。このことから、STの値に基づく断層活動性評価手法により、活断層のほとんどを“活動的”と適切に評価できる可能性を示しました。STの値が小さい活断層に関しては、①局所的な応力、②地下深部での断層姿勢、③間隙水圧の寄与、などが原因と考えています。

次に、一つの活断層に注目して詳しくSTを検討した例を紹介します。ここでは2011年4月11日に福島県いわき市周辺で発生した福島県浜通りの地震(Mw = 6.6)を扱います。この地震は2011年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震(Mw = 9.0)の一月後に発生し、井戸沢断層および湯ノ岳断層沿いで地表に最大約2 mの垂直変位をもつ地震断層が露出しました(第7図; Otsubo *et al.*, 2013b)。この内陸地震が発生したいわき市周辺は、地形に明瞭な断層変位がこれまで認められなかった地域であり、かつ地震活動が活発ではない地域でした。これまでの研究で、いわき地域での東北地方太平洋沖地震発生直前の応力場と東北地方太平洋沖地震発生直後から2011年4月11日の福島県浜通り地震発生直前の応力場が推定されて

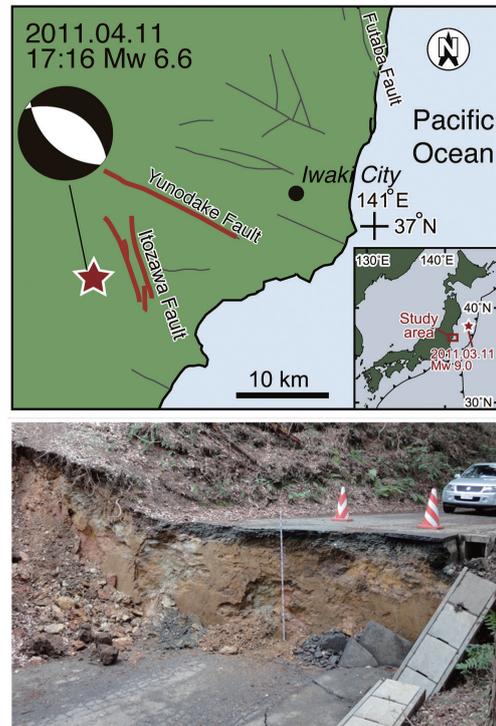


第6図 東北地方の活断層に対するスリップテンデンス(ST)による活動性評価 (Miyakawa and Otsubo, 2015a). 活断層を線で示し、線の色が暖色系になればなるほどSTの値が高いことを示します。

います (Imanishi *et al.*, 2012; Otsubo *et al.*, 2013b). また、福島県浜通り地震時に活動した井戸沢断層および湯ノ岳断層の地下での深部形状が推定されています (Fukushima *et al.*, 2013). 以上の応力および断層形状をもとに、各断層面に作用する応力とSTを計算しました (第8図; Miyakawa and Otsubo, 2015b). 計算されたSTから、東北地方太平洋沖地震の前後で、井戸沢断層および湯ノ岳断層の活動性の变化が明らかになりました。東北地方太平洋沖地震前の応力場では、井戸沢断層および湯ノ岳断層はいずれも低いSTの値を示し、活動性が低かったと推定されます。一方、東北地方太平洋沖地震後の応力場では、井戸沢断層 (第8図のIEおよびIW) および湯ノ岳断層 (第8図のYd) はいずれも高いSTの値 (約0.7~0.8) を示し、活動性が高かったと推定されます。これは東北地方太平洋沖地震発生によって、いわき地域周辺下の地殻では井戸沢断層と湯ノ岳断層が動きやすい応力状態に変化したことを示します。

#### 4. おわりに

本断層活動を含む地殻の変形に関して、地殻に働いている応力の空間的な広がりや断層の活動性評価の研究を紹介

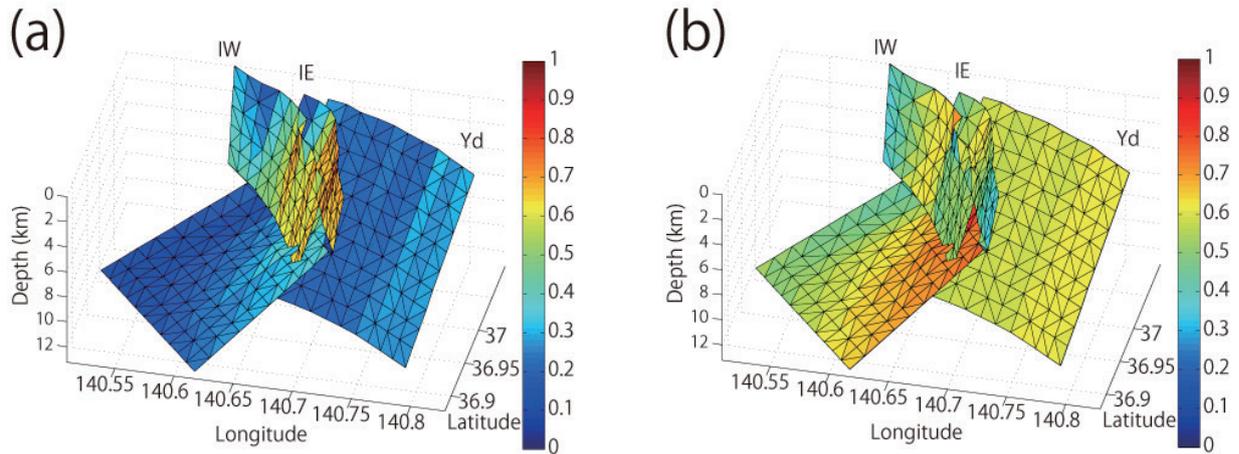


第7図 2011年福島県浜通りの地震 (Mw = 6.6, 上図) で地表に露出した地震断層 (下図, 井戸沢断層の一部). 写真手前側 (上盤) が西で奥側 (下盤) が東です。この断層は手前側が西へ落ちる正断層です。地震発生後の道路復旧工事により、現在はこの断層露頭は観察できません。

しました。地震や火山の活動が活発である日本列島において、「なぜそこが変形するのか? (逆に変形しないのか?)」や「なぜそこで断層が動くのか? (逆に動かないのか?)」などの問題を明らかにするには、10万年~100万年という長期の視点に立って、これまでの理論やモデルが正しいかどうかを現場 (野外) で検証し、その検証結果を理論やモデルに反映させることが必要です。また、その際には実験を行いながら確かめていく必要があります。そのため今後も、私たちは研究で①野外調査、②理論構築、③実験をバランスよく行い、長期的な地質変動を明らかにしていきたいと考えています。また、一つの専門分野に偏らず、幅広い専門性をもつことを意識し、国内外研究者と連携をとりながら研究を行うことが重要と考えています。

#### 文献

道家涼介・谷川晋一・安江健一・中安昭夫・新里忠史・梅田浩司・田中竹延 (2012) 日本列島における活断層の活動開始時期とその傾向. 活断層研究. 37, 1-15.  
 Fukushima, Y., Takada, Y. and Hashimoto, M. (2013) Complex ruptures of the 11 April 2011 Mw 6.6 Iwaki Earthquake triggered by the 11 March 2011



第 8 図 2011 年東北地方太平洋沖地震 ( $M_w = 9.0$ ) 前後の井戸沢断層および湯ノ岳断層の断層面におけるスリップテンデンシー (ST) の値 (Miyakawa and Otsubo, 2015b). (a) 東北地方太平洋沖地震前の ST の値. (b) 東北地方太平洋沖地震後の ST の値. 色の意味については、第 6 図と同じです.

Mw 9.0 Tohoku Earthquake, Japan. *Bulletin of the Seismological Society of America*, **103**, 1572–1583.

Hasegawa, A., Nakajima, J., Umino, N. and Miura, S. (2005) Deep structure of the northeastern Japan arc and its implications for crustal deformation and shallow seismic activity. *Tectonophysics*, **403**, 59–75.

Imanishi, K., Ando, R. and Kuwahara, Y. (2012) Unusual shallow normal-faulting earthquake sequence in compressional northeast Japan activated after the 2011 off the Pacific coast of Tohoku earthquake. *Geophysical Research Letters*, **39**, L09306.

Katsumata, K., Kosuga, M. and Katao, H. The Japanese University Group of Joint Seismic Observations at NKTZ (2010) Focal mechanisms and stress field in the Atotsugawa fault area, central Honshu, Japan. *Earth, Planets and Space*, **62**, 367–380.

Miyakawa, A. and Otsubo, M. (2015a) Effect of a change in the state of stress on inland fault activity during the Mw 6.6 Iwaki earthquake resulting from the Mw 9.0 2011 Tohoku earthquake, Japan. *Tectonophysics*, **661**, 112–120.

Miyakawa, A. and Otsubo, M. (2015b) Applicability of slip tendency for understanding long-term fault activity: a case study of active faults in northeastern Japan. *Journal of JSCE*, **3**, 105–114.

Morris, A., Ferrill, D. and Henderson, D. (1996) Slip-tendency analysis and fault reactivation. *Geology*, **24**, 275–278.

Otsubo, M. and Miyakawa, A. (2016) Landward migration of

active folding based on topographic development of folds along the eastern margin of the Japan Sea, northeast Japan. *Quaternary International*, **397**, 563–572.

Otsubo, M., Miyakawa, A. and Kubo, A. (2013a) Spatial stress heterogeneity imaging by using difference between reduced stress tensors detected from earthquake focal mechanisms. *Proc. the 6th International Symposium on In-situ Rock Stress (RS2013)*, 1123–1128.

Otsubo, M., Shigematsu, N., Imanishi, K., Ando, R., Takahashi, M. and Azuma, T. (2013b) Temporal slip change based on curved slickenlines on fault scarps along Itozawa fault caused by 2011 Iwaki earthquake, northeast Japan. *Tectonophysics*, **608**, 970–979.

大坪 誠・重松紀生・北川有一・小泉尚嗣 (2009) 南海トラフ沈み込み帯前弧陸域での応力場変遷：熊野市井内浦および紀北町海山観測井コアをきる断層面を用いて. *地質学雑誌*, **115**, 457–469.

Otsubo, M., Yamaji, A. and Kubo, A. (2008) Determination of stresses from heterogeneous focal mechanism data: An adaptation of the multiple inverse method. *Tectonophysics*, **457**, 150–160.

Sagiya, T., Miyazaki, S. and Tada, T. (2000) Continuous GPS array and present-day crustal deformation of Japan. *Pure and Applied Geophysics*, **157**, 2303–2322.

OTSUBO Makoto (2016) Approaches to evaluate fault activities for long-term.

(受付：2016 年 3 月 31 日)