

# 地震災害予測のための地球観測データの デジタルアースによる可視化

井筒 潤<sup>1)</sup>・楠城一嘉<sup>2)</sup>・鴨川仁<sup>2)</sup>・織原義明<sup>3)</sup>・長尾年恭<sup>3)</sup>

Visualization of geophysical data by Digital Earth for earthquake prediction.

Jun Izutsu<sup>1)</sup>, Kazuyoshi Z. Nanjo<sup>2)</sup>, Masashi Kamogawa<sup>2)</sup>, Yoshiaki Orihara<sup>3)</sup> and  
Toshiyasu Nagao<sup>3)</sup>

## Abstract

We are assuming that the great earthquakes (ex. Nankai trough earthquake and large earthquakes hit in the southern Kanto area) will occur in near future in Japan. So, utilizing and visualization of earth science data is very important in the point of view of prediction, prevention, and mitigation of disasters.

The prediction of disaster, especially prediction of earthquake is very difficult (nearly impossible). However, there are many articles reporting possible precursory phenomena such as seismic, geodetic, electromagnetic, ionospheric, and macroscopic anomalies in the case of 2011 Tohoku earthquake.

We are developing multi-monitoring system for these possible precursors and other earth science data (seismic quiescence, *b*-value, foreshock migration, and geodetic data) in order to understand the relationship among these precursory phenomena.

## 緒言

デジタルアースとは1998年にアル・ゴア米国副大統領が提唱したもので、地球上のあらゆるデー

タを仮想的に可視化して自然活動や人間活動をモニタリング、測定、予測するためのフレームワークおよびプラットフォームである(Gore, 1998, Goodchild et al., 2012)。ほぼすべての地球上で観測されるデータは、緯度、経度、高さ(深さ)など

1) 中部大学中部高等学術研究所国際GISセンター 〒487-8501 愛知県春日井市松本町1200

International Digital Earth Applied Science Research Center, Chubu University, 1200 Matsumoto-cho, Kasugai, Aichi 487-8501, JAPAN

2) 静岡県立大学グローバル地域センター 〒420-0839 静岡県静岡市葵区鷹匠3-6-1

Global Center for Asian and Regional Research, University of Shizuoka, 3-6-1 Takajo, Aoi-ku, Shizuoka 420-0839, JAPAN

3) 東海大学海洋研究所 〒424-8610 静岡県静岡市清水区折戸3-20-1

Institute of Ocean Research Development, Tokai University, 3-20-1 Orido, Shimizu-ku, Shizuoka 424-8610, JAPAN  
(2019年8月30日受付/2019年9月14日受理)

の位置データと時間データを持っており、これらは地理空間情報として扱うことができる。例えば気象庁の地震カタログデータの地震発生の日時、緯度、経度、深さ、マグニチュードなどをもとにして、地理空間情報を表示・解析するシステムである GIS (Geographic Information System) ソフトウェアによって、2D のデジタル地図、もしくは 3D のデジタル地球儀上に震央 (震源) の空間分布、地震発生の時間変化などを表示させることができる。GIS による様々な情報の可視化、関係性の把握、情報の分析によって、対象とする地域についての把握とより深い理解が進み、社会におけるコミュニケーションの向上、最適な意思決定を図ることができる。

中部大学、静岡県立大学、東海大学が位置する東海・中部地方は、過去にも百年単位で繰り返し発生している南海トラフの地震およびその津波により、被害を大きく受けることが懸念されている。地震発生領域が陸地に近いこともあり、場所によっては地震の揺れの最中に津波が到来してしまうなど、避難する時間的な余裕がほとんどないため、最悪のケースとして 32 万人以上の死者が想定されている (南海トラフ巨大地震対策検討ワーキンググループ, 2013)。現在、東海・中部地方では避難タワーの整備や避難訓練などのハード面・ソフト面での防災・減災に取り組んでおり、それにより被害はある程度は軽減できるとはいえ限界がある。一人でも多くの人命を守るには地震の予測情報は非常に重要な情報といえる。

地震の短期予測は现阶段で非常に難しいと考えられているが、近年の様々な地球物理学的観測網の発展により、空間的に稠密なデータが入手可能となり、様々なデジタル技術の進歩に伴いデータ処理・解析が高度化したことによって、地震予知研究に大きな変化が生じつつある。2011 年の東北地方太平洋沖地震においても地震の前兆である可能性が高い様々な現象がその観測網で捉えられていた (Nagao et al., 2014)。これらの現象を中部大学のデジタルアースサーバーで常時モニタリングして可視化するサービスを開発し、日本周辺の地下の様子を知り、地震発生の危険性を把握し、その危険性を地域で共有することが本研究の目的である。

Nagao et al. (2014) では、東北地方太平洋沖地

震の前兆として、1. 長期的な地震の静穏化、2. 潮汐トリガの変化、3.  $b$  値の変化、4. 地殻変動と地震活発化、5. 前震とスロースリップ、6. 磁場の变化、7. 大気圏・電離圏の異常、8. 本震直前の GPS-TEC 異常といった現象が挙げられている。これらの現象のうち、本論文では地震活動 (静穏化、 $b$  値の変化、前震) と地殻変動の可視化の取り組みと、近年発生した複数の地震についての適用について議論する。すでに一部の内容は井筒・長尾 (2016) および長尾・井筒 (2019) で紹介済みであるが今回一連の研究として改めて議論する。

## 方法と結果

1995 年に発生した兵庫県南部地震を契機に高感度地震観測網 (Hi-net) の整備が行われた。その後、1997 年には各大学、防災科学技術研究所、JAMSTEC などの地震観測データを気象庁に集中する一元化処理が行われるようになったことにより、日本全国の地震検知能力が大幅に向上した (太田ほか, 2002)。本研究では主として気象庁の震源カタログ (暫定値) を使用しており、東京大学地震研究所の FTP サイト (<ftp.eri-u-tokyo.ac.jp>) より一日一回ダウンロードしている。気象庁の暫定値は地震発生後の 1 日後に公開されるので、前震の解析などリアルタイム性、緊急性が必要な解析については、即時性の高い防災科研の Hi-net 自動処理震源リスト (要ユーザー登録) のデータを取得して行っている。

### GoogleEarth, cesium による可視化

解析結果を GIS 上に可視化するために解析データを kml ファイル形式に書き出し、GoogleEarth 上でデータの表示を行っている。解析データの web 公開方法としては web ブラウザ上で GoogleEarth を動作させる GoogleEarth API の使用を当初計画していたが、GoogleEarth API がセキュリティ上の問題から 2017 年 1 月より使用できなくなった。そこで、GoogleEarth API の代替としてオープンソースの 3D 地図作成ライブラリである cesium を使用して解析データの web 上での表示、可視化を行った。仕様の差は一部存在するが、cesium は kml ファイルの読み込みが可能で

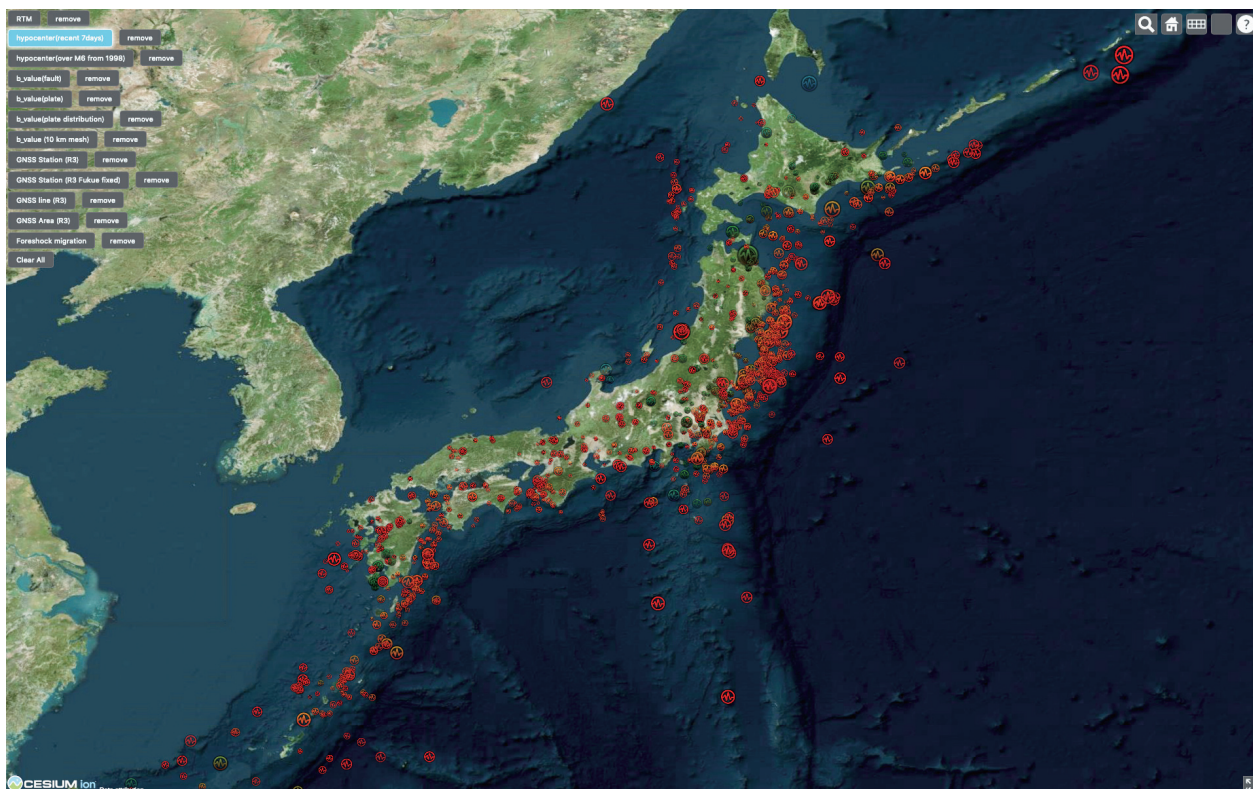


Fig. 1. A spatial distribution map of earthquakes occurred within 7 days (2019/08/09 – 2019/08/16).

あり、移行作業は比較的スムーズに行うことができた。現在、<http://strain.isc.chubu.ac.jp/>にて試験公開中である。

Fig. 1 は日本周辺の直近1週間(2019年8月9日から8月16日)の地震活動を cesium 上で表示させたものである。アイコンの大きさは地震のマグニチュード、アイコンの色は震源の深さ(赤が浅く、青が深い)を示し、アイコンの透過度で地震発生時からの経過時間を示している(古い地震ほど薄く表示されている)。

### 地震活動静穏化

第2種地震空白域など大地震の前には地震活動が相対的に低下する現象は古くから指摘されている。地震活動静穏化の指標として、RTL法(Sobolev and Tyupkin, 1997)およびRTM法(Nagao et al., 2011)と呼ばれるアルゴリズムを使用している。

RTL法、RTM法のRは距離(Region)、Tは

時間(Time)、Lは断層長(Length)、Mは地震の規模(Magnitude)の頭文字で、それぞれのパラメータは過去一定期間のバックグラウンドからの差分で示される。それぞれのパラメータの積の値(RTL法であれば $R \times T \times L$ 、RTM法は $R \times T \times M$ )が正であれば地震活動活発化、負であれば地震活動静穏化を示している。それぞれのパラメータは以下の式で計算される。

$$R(t) = \left[ \sum_{i=1}^n \exp\left(-\frac{r_i}{r_0}\right) \right] - R_{bk}(t)$$

$$T(t) = \left[ \sum_{i=1}^n \exp\left(-\frac{t-t_i}{t_0}\right) \right] - T_{bk}(t)$$

$$L(t) = \left[ \sum_{i=1}^n \left(\frac{l_i}{r_i}\right) \right] - L_{bk}(t)$$

$$M(t) = \left[ \sum_{i=1}^n (M_i) \right] - M_{bk}(t)$$

ここで、 $R_{bk}$ 、 $T_{bk}$ 、 $L_{bk}$ 、 $M_{bk}$ はそれぞれのバック



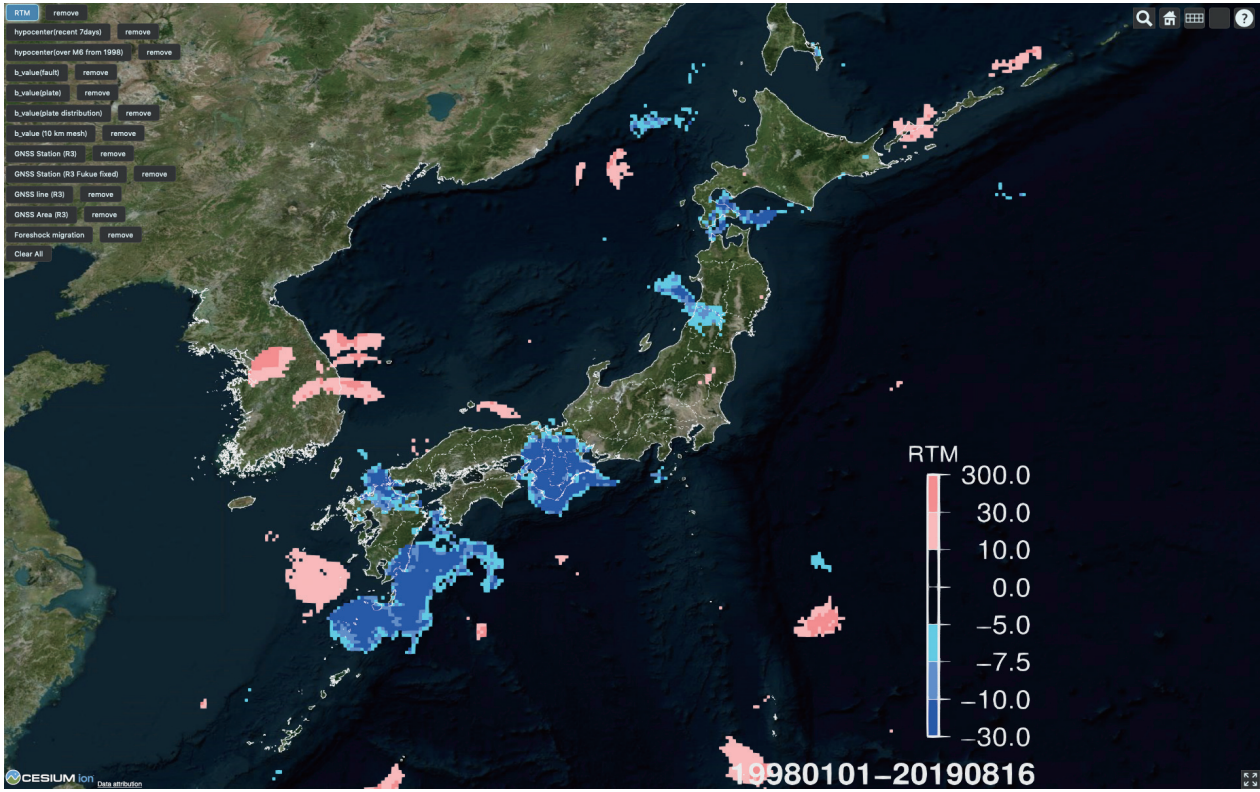


Fig. 2. A spatial distribution map of seismic quiescence in RTM algorithm (on 2019/08/16).

クグラウンド（線形回帰した際のトレンド）を示す。 $n$ は解析する地震の数で $r_i$ ,  $t_i$ ,  $l_i$ ,  $M_i$ はそれぞれ $i$ 番目の地震の、解析対象地点までの震源距離、地震発生時刻、震源断層長、マグニチュードを示す。また、 $r_0$ :特性距離（重みが $1/e$ になる距離）、 $r_{max}$ :計算を打ち切る距離（ $r_i > r_{max}$ となる地震は解析に使用しない）、 $t_0$ :特性時間（重みが $1/e$ になる時間）、 $t_{max}$ :計算を打ち切る時間（ $t_i > t_{max}$ となる地震は解析に使用しない）、 $M_{min}$ :下限マグニチュード（ $M_i < M_{min}$ となる地震は解析に使用しない）などのパラメータは可変であり、様々な組み合わせで計算が可能である。RTL法はLのパラメータに距離 $r_i$ があることにより解析対象地点周辺の局所的な地震活動の変化（特に活性化）について検出能力が高く、RTM法はRTL法よりも地震活動静穏化の抽出能力が、多くのパラメータセットによる事例計算の結果、高い事がわかっている（Nagao et al., 2011）。

Fig. 2は、1998年1月1日から2019年8月16日までの地震データ（ $M2.0$ 以上、深さ100 km以

浅）を使用し、RTMアルゴリズムを用いて示した日本近海全域の静穏化マップである。緯度経度0.1度ごとにRTMを計算しcesium上にマッピングしている。赤は地震活動活発化、青は地震活動静穏化を示している。長尾・井筒（2019）で指摘した大阪北部の地震（2018年6月18日）前後の近畿地方の静穏化はいまだに終息していない。また、2018年中頃から九州沖に大きな静穏化領域があり、この領域では2019年1月8日に種子島近海で $M6.0$ 、2019年5月10日には日向灘に $M6.3$ の地震が発生しているが、九州沖全体を見れば静穏化はまだ継続中である。

### b 値の分布と変化

地震の発生頻度はマグニチュードの増大とともに指数関数的に減少し、その経験式はグーテンベルグ・リヒターの式と呼ばれており（Gutenberg and Richter, 1944）、その傾きが**b**値である。一般に**b**値は1前後の値を取るが、地震の前には**b**



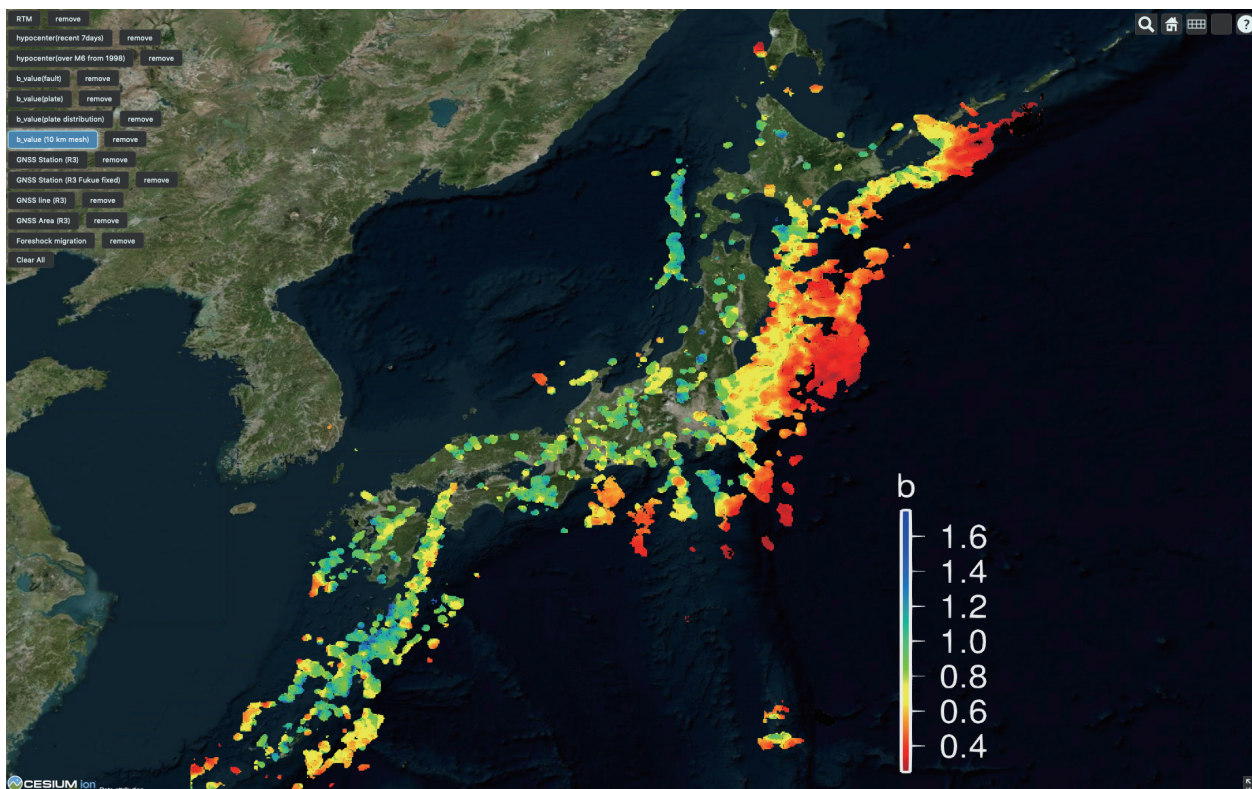


Fig. 3. A spatial distribution map of  $b$  value.

値が小さくなることが数多く指摘されており、2004年スマトラ地震及び2011年東北地方太平洋沖地震で本震のすべり分布が大きいエリアで数年前から  $b$  値の低下が観測されている (Nanjo et al., 2012)。

$b$  値の計算方法はすでに井筒・長尾 (2016) で示しているように、宇津 (1965) で提唱された最尤法を用いている。解析領域、解析期間において、マグニチュード  $M_c$  以上の地震は漏れなく観測されている ( $M_c$  をコンプリートネスマグニチュードと呼ぶ) とするとき、マグニチュード  $M$  の平均値を  $\bar{M}$  とすると、 $b$  値の最尤推定値は

$$b = \frac{\log e}{\bar{M} - M_c}$$

となる。実際のコンプリートネスマグニチュードは、観測網の分布などによって一様ではないが本研究では、内陸の地震に対しては  $M1.0$ 、プレート境界など海域の地震に対しては  $M2.0$  を  $M_c$  と仮定している。なお、気象庁のカタログのマグニ

チュードは  $0.1$  刻みで記録されており、 $M1.0$  は  $M0.95$  から  $M1.05$  を意味しているので、上記の式の  $M_c$  には  $M0.95$ ,  $M1.95$  を代入して計算している。

まず、日本近海全域の  $b$  値のモニタリングとして、緯度経度  $0.04$  度ごとの格子点を考えて、各格子点周辺の地震を用いて  $b$  値の空間分布の計算を行った。Fig. 3 は日本周辺の  $b$  値の分布を示したものである。この図では  $M_c=2.0$  として、格子点周辺  $10$  km 以内に  $M2.0$  以上の地震が  $50$  個以上ある点のみ  $b$  値の計算を行っており、地震活動が活発でない場所は  $b$  値が計算されていない。  $1$  よりも低い  $b$  値の領域は赤系統の色で、  $1$  よりも高い  $b$  値の領域は青系統の色で表示されている。今回は自動化・単純化のために日本近海では  $M2.0$  以上の地震はすべて記録されていると仮定したが、実際には沖合の領域などは気象庁等が設置している地震計から離れているため、マグニチュードの小さい地震は記録されておらず、不完全な地震カタログデータのまま  $b$  値を計算していることになる。そのため沖合の領域は  $b$  値がかなり低く計算され

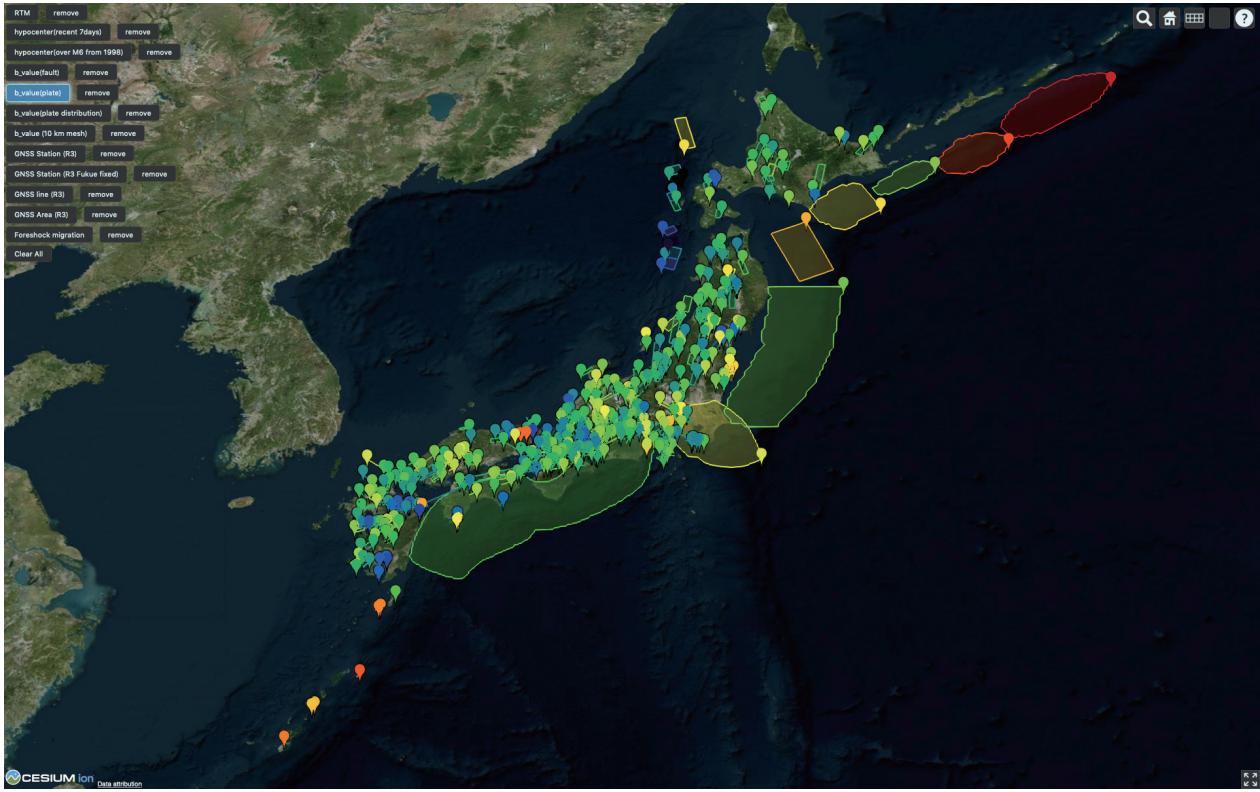


Fig. 4. A spatial distribution map of inland and plate boundary faults. The  $b$  value is represented by color of pins and polygons. The color scale of  $b$  value is same as Fig.3.

て赤く表示されている。今後は各領域での地震観測データの完全性（コンプリートネス）を考慮に入れた解析システムを開発する予定である。

井筒・長尾（2016）では2014年長野県神城断層地震の事例をもとに、活断層ごとの $b$ 値の時系列変化が重要であることが明らかになったので、内陸の活断層およびプレート境界領域の周辺（10 km 以内）の地震のみを用いた断層ごとの $b$ 値の時間変化と空間的な分布の計算を行った。

内陸の活断層およびプレート境界のデータは防災科学技術研究所が提供する地震ハザードステーション（J-SHIS）の断層パラメータを使用している。内陸の主要活断層およびその他の活断層（推定活断層を含む）合計約450区間、およびプレート境界領域の20領域について調査した。

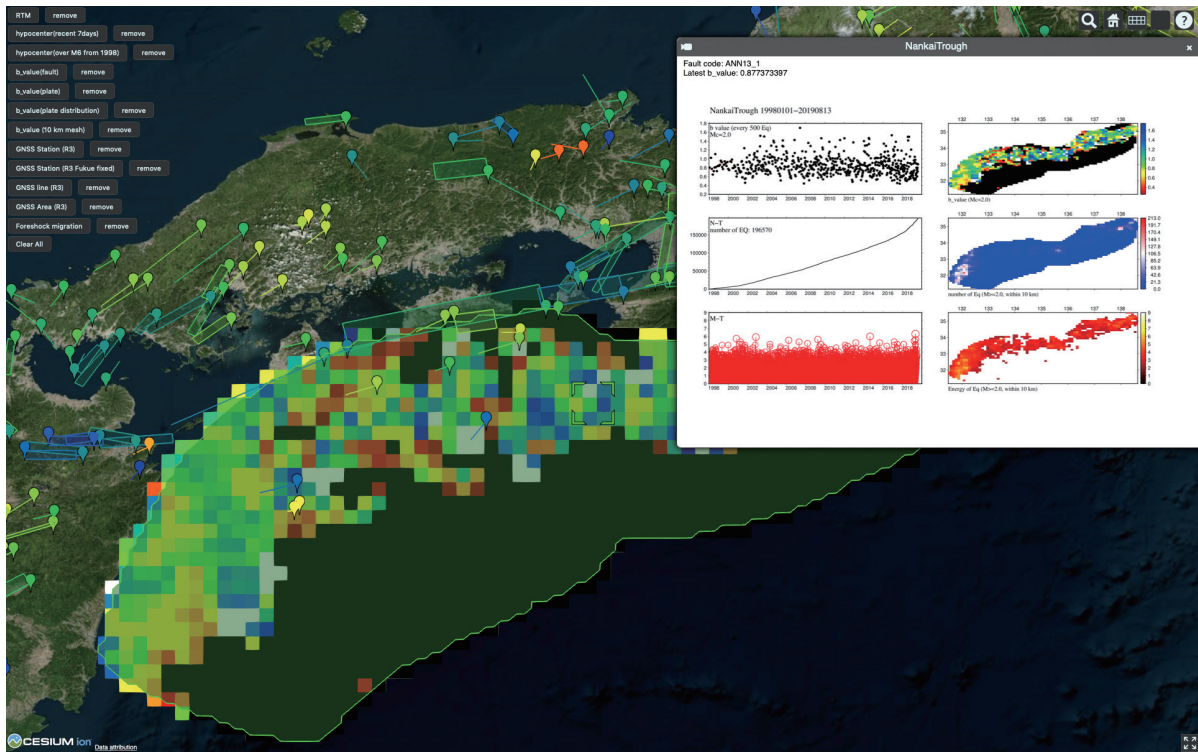
内陸の活断層と一部のプレート境界領域（三陸沖北部・北海道西方沖・北海道南西沖・青森県西方沖・山形県沖・新潟県北部沖）の推定断層面は矩形断層の集合で表現されている。J-SHISのデータシート上に矩形断層については断層基準点の緯

度経度、断層上端深さ、矩形断層長さ、矩形断層幅、走向角、傾斜角が定義されている。これらのデータから断層面の三次元的な位置座標を取得し、断層面上に1 km 間隔の格子点を想定し、各格子点から10 km 以内の地震のみをそれぞれ抜き出し、断層面上の格子点ごとの $b$ 値を計算し地震断層面上の $b$ 値の分布を求めている。

また、一部のプレート境界領域（択捉沖・色丹島沖・根室沖・十勝沖・東北地方太平洋沖・相模トラフ・南海トラフ）の推定断層面は矩形でなく、おおよそ5 km 間隔の断層構成点の集合で地震断層面を表現している。南海トラフなど地震発生のパターンが複数（東海・東南海・南海・日向灘・海溝軸周辺などが連動するかどうか等）想定されている場合は、最も広域の想定震源領域のものを採用し、上述の断層構成点から10 km 以内の地震を抽出して断層構成点ごとに $b$ 値を計算した。断層によっては地震活動の分布が偏ることがあるので、各格子点および断層構成点で $b$ 値を計算する際に使用した地震の数と、マグニチュードから換



a)



b)

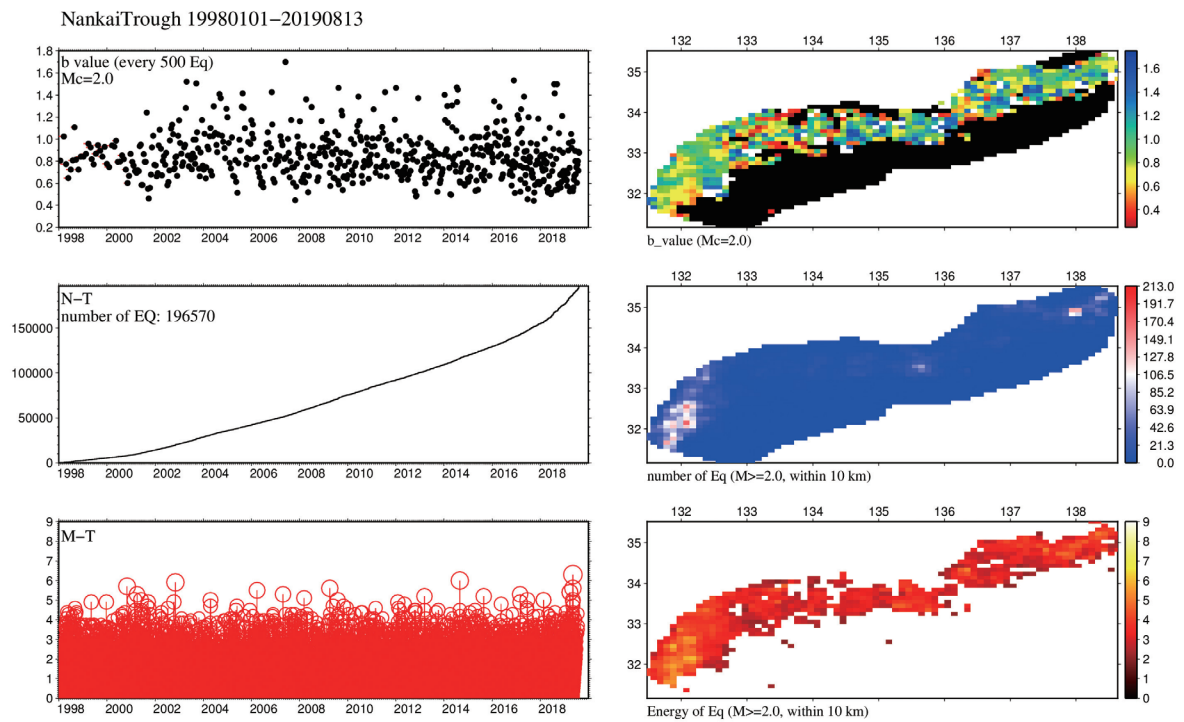


Fig. 5. a) An overlaid distribution map of  $b$  value at the Nankai trough.  
 b) An infobox window shows the time variance and spatial distribution of earthquake activity near the fault.



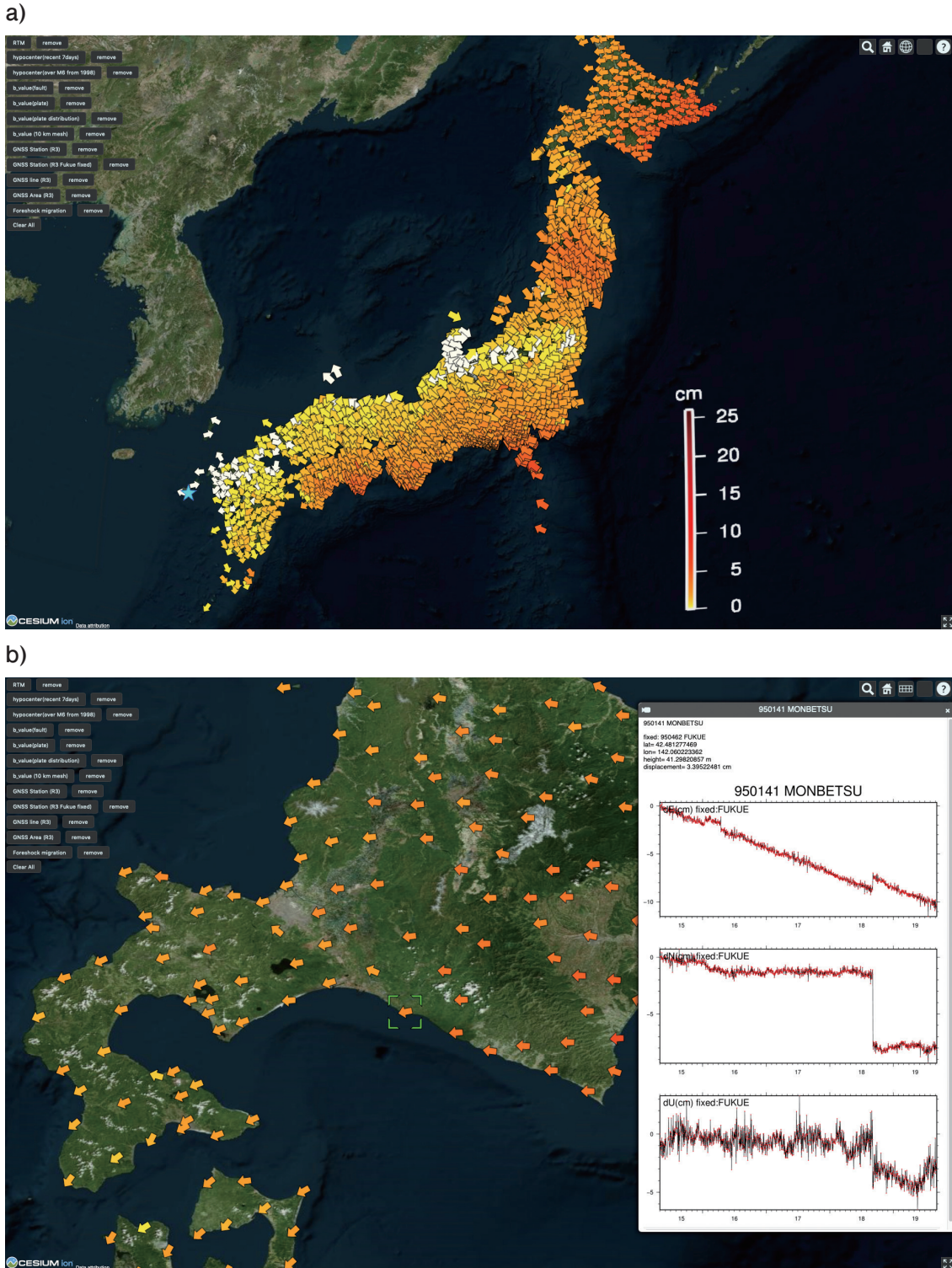


Fig. 6. a) A spatial distribution map of GNSS stations. Arrows show the direction and length of the horizontal displacement (a red arrow shows a large displacement) in one year. The sky-blue star shows the location of the fixed station (Fukae).  
 b) The 3 displacement components (EW [top graph], NS [middle graph], and UD [bottom graph]) of Monbetsu GNSS station before and after the 2018 Hokkaido Eastern Ibari earthquake which occurred on 6 September 2018.

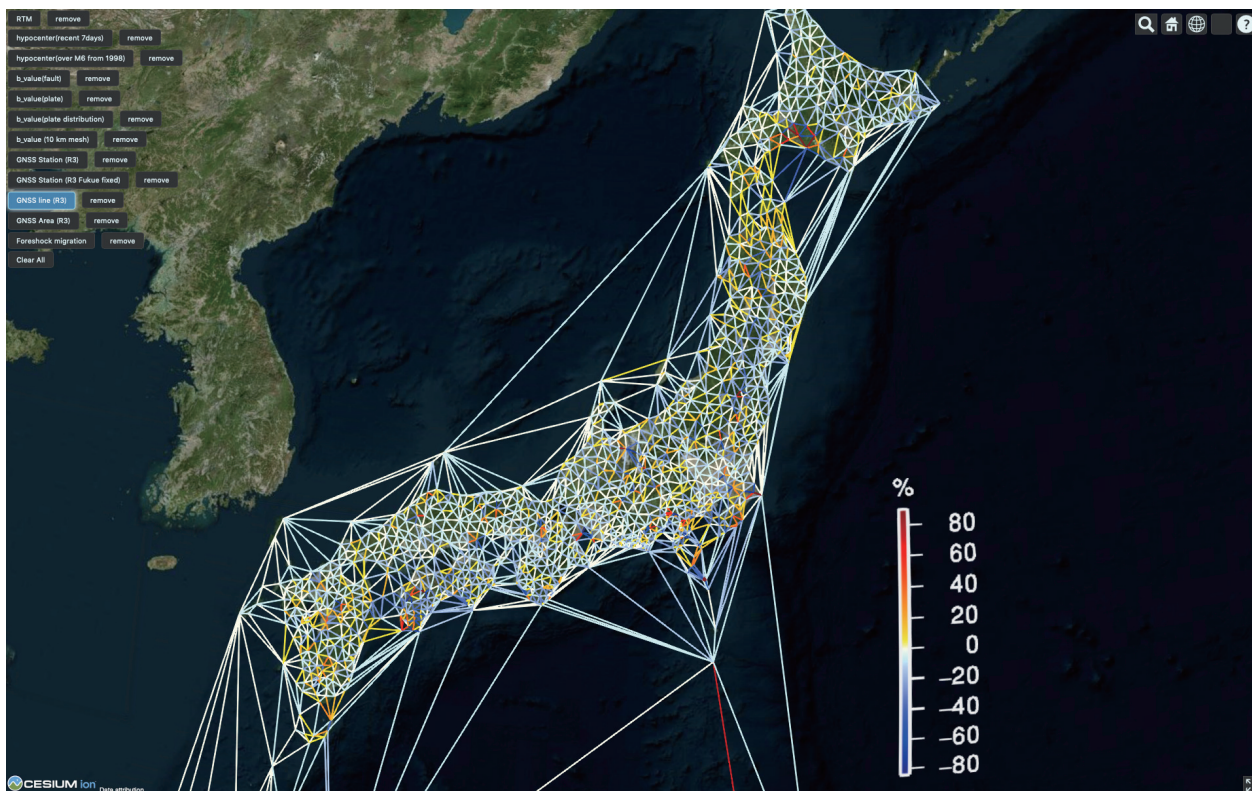


Fig. 7. A distribution map of baselines between two GNSS stations. The change of distance between two stations is shown by color. Blue line shows shortened baseline and red line shows extended baseline.

算した地震のエネルギーの積算も併せて計算し可視化した。

Fig. 4はJ-SHISの断層パラメータをもとに地図上に断層面を投影した活断層マップであり、断層を地上に投影した多角形および断層の基準点を示すピンの色はそれぞれの活断層周辺の地震活動から計算した $b$ 値を示している。断層をクリックすることで情報ウィンドウが開き各断層での解析結果が表示される。Fig. 5aは南海トラフ領域の拡大図であり、情報ウィンドウを開いた際の表示例である。情報ウィンドウに示されるグラフの拡大図をFig. 5bに示す。J-SHISにおける断層コード、断層名、断層全体の $b$ 値に加え、地震500個ごとに計算した $b$ 値の時間変化(左上)、時間と地震積算数のグラフである $N$ - $T$ 図(左中央)、時間とマグニチュードのグラフである $M$ - $T$ 図(左下)、および断層面上での $b$ 値分布(右上)、地震断層面上における地震発生数の分布(右中央)、地震断層面上における発生した地震のエネルギーの分布(右下)などが表示される。プレート境界型の地震断

層に関しては、断層面上の $b$ 値分布はFig. 5aで示すように地図上に投影できるようになっており、具体的な地域の地震活動の状況をモニタリングできるようにしている。Fig. 5aの南海トラフの $b$ 値分布に着目すると四国周辺に赤系統の色で示す低 $b$ 値領域がみられる。これはフィリピン海プレートのすべり欠損値の大きい領域(Yokota et al., 2016)と調和的であり、プレート境界領域の応力の状態をモニタリングしている可能性を示している(Nanjo and Yoshida, 2018)。

### 地殻変動

国土地理院は約1300点の電子基準点からなるGNSS連続観測システム(GEONET)を運営している。電子基準点のデータは国土地理院のFTPサイト(要ユーザー登録ftp.terras.gsi.go.jp)からR3解(速報解)およびF3解(最終解)を入手している。R3解は観測日から2日後、F3解は2週間以上後に入手可能となり、解析手法が異なるため



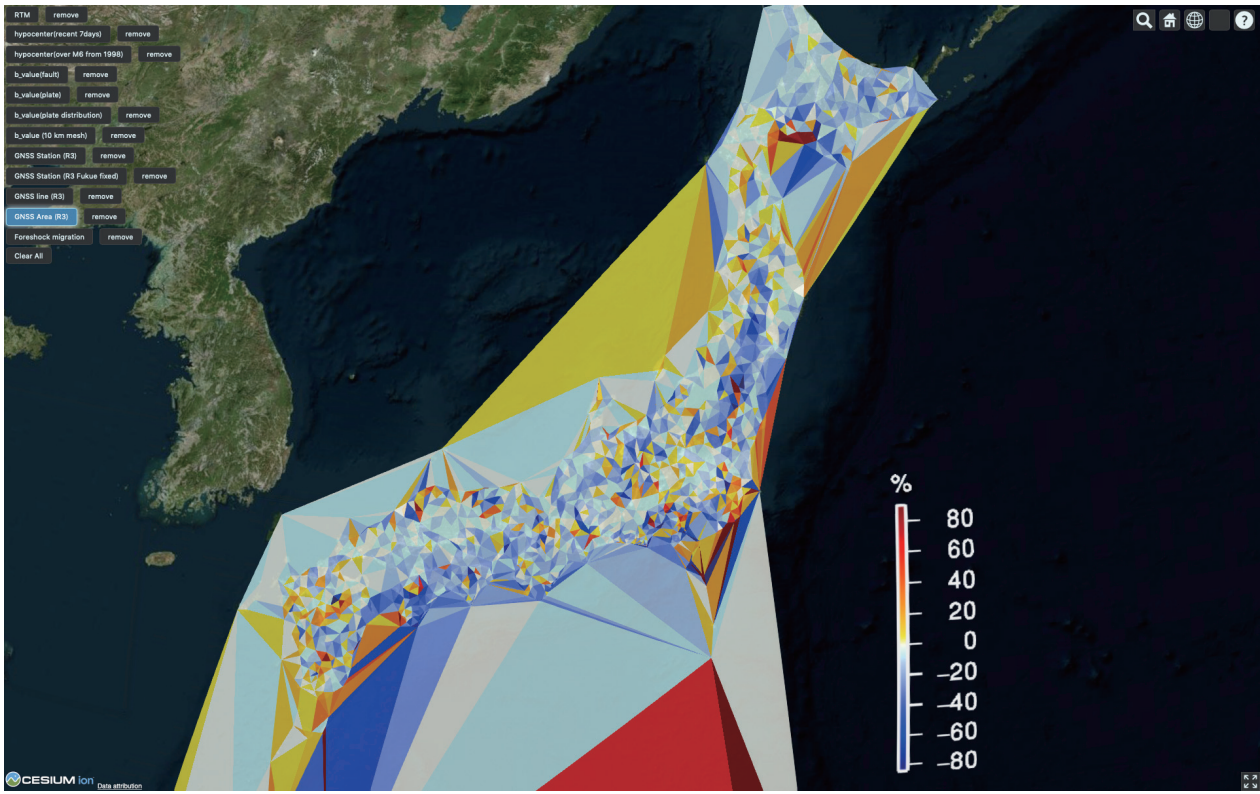


Fig. 8. A distribution map of triangles by three GNSS stations. A change of the area of the triangle is shown by color. Blue triangle shows shrunk area and red triangle shows extended area.

R3解とF3解には系統的な座標のずれがあり、解析期間のタイムウィンドウやリアルタイム性に依じてそれぞれ使い分ける必要がある。また、人為的な要因（アンテナ交換や周辺の木々の伐採など）でデータにオフセットが生じることがあり、国土交通省のサイト（<http://mekira.gsi.go.jp/JAPAN/NESE/corr30.dat>）でオフセット量が公開されており、これをもとに補正している。

地殻変動の可視化の手法として、各観測点（電子基準点）の座標変動、2観測点の距離の変化（基線長変化）、3観測点で作成される三角形の面積の変化の3種類の手法を採用した。

Fig. 6aは電子基準点の座標変動を示している。各観測点の日々の座標値から東西方向の変位・南北方向の変位・上下方向の変位を計算し1年前との座標と比較してどの方向へどのくらい変動したかを矢印の向きと色（赤色に近いほど大きく変位している）で表現している。地殻変動を見るために、長崎県五島列島の深江を固定点としている（図中の水色の星印）。Fig. 6bでは2018年9月6

日に発生した北海道胆振東部地震の震源に近い門別の時間変動を示している。電子基準点の位置をクリックすることで情報ウィンドウが開き、その電子基準点の名前と緯度経度、一年間での変動量と東西方向、南北方向、上下方向の変動の時間変動のグラフが表示され、地震の発生に伴って大きく変動していることが分かる。

Fig. 7は2点間の距離の変化を、Fig. 8は3観測点による三角形の面積の変化を示している。基線長変化、および三角形の面積の変化についてはすべての観測点の組み合わせを表現するのは不可能なので、観測点を離散的な点の分布と考えると、それらを頂点とするドロネー三角形分割を行った。三角形の辺の長さを基線長の長さとしてその時間変動を、三角形の面積は単純のためにヘロンの公式を用いて三辺の長さから求め、その時間変動を示した。二点間の長さはヒュベニの式を用いて計算しており、それぞれ一年前の基線長、面積と比較して縮小した場合は青で、拡大した場合は赤で示している。



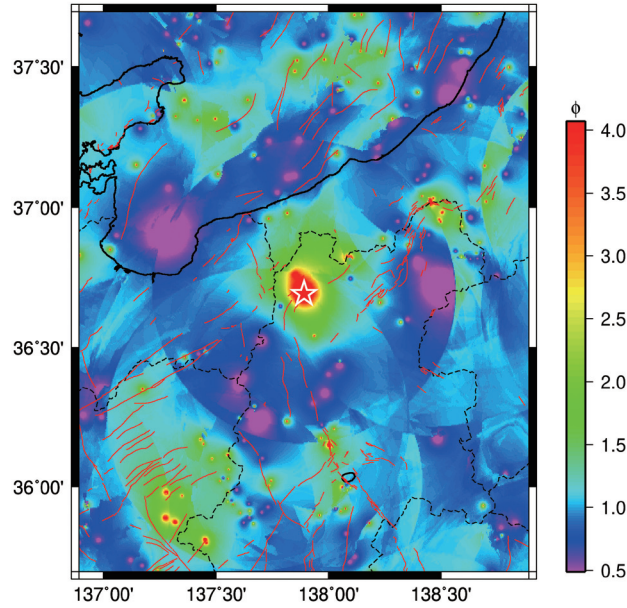


Fig. 9. A distribution map of parameter  $\phi$  just before the 2014 Nagano earthquake. White-lined star shows the epicenter of the earthquake.

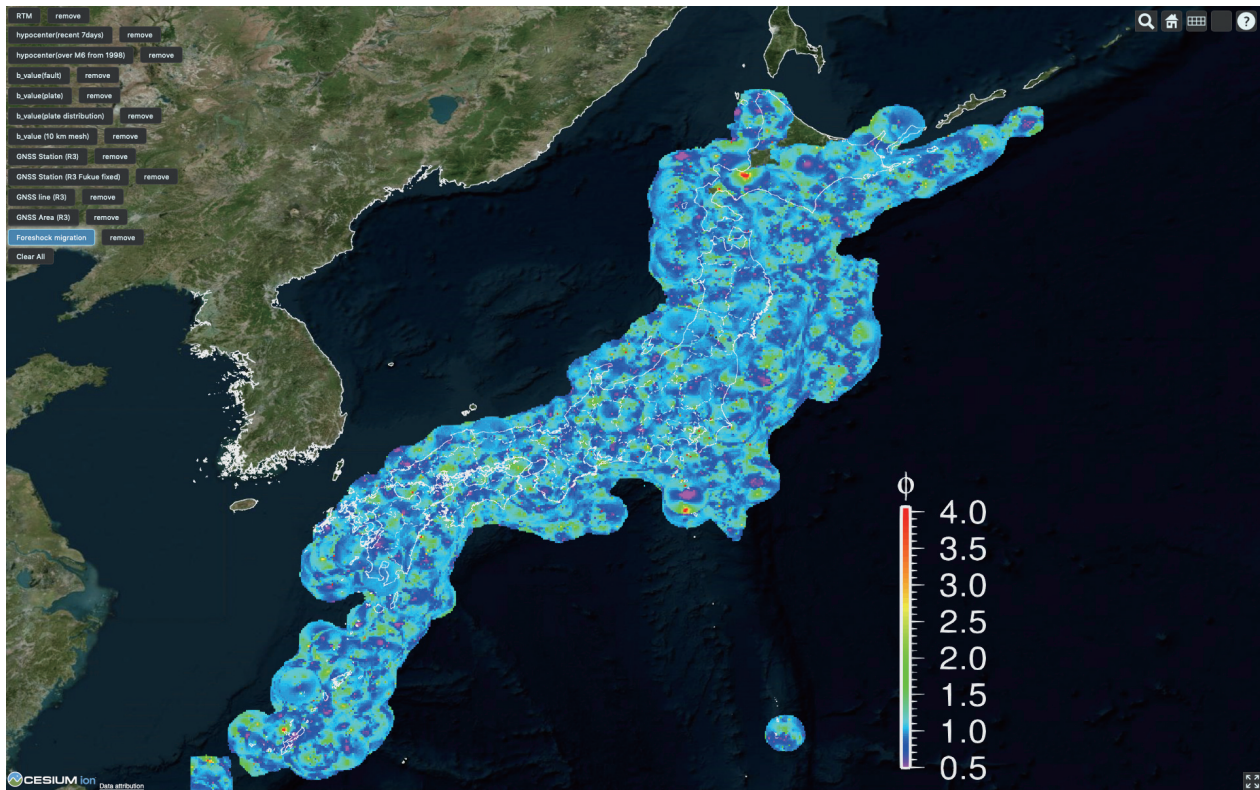


Fig. 10. A distribution map of parameter  $\phi$  around Japan.

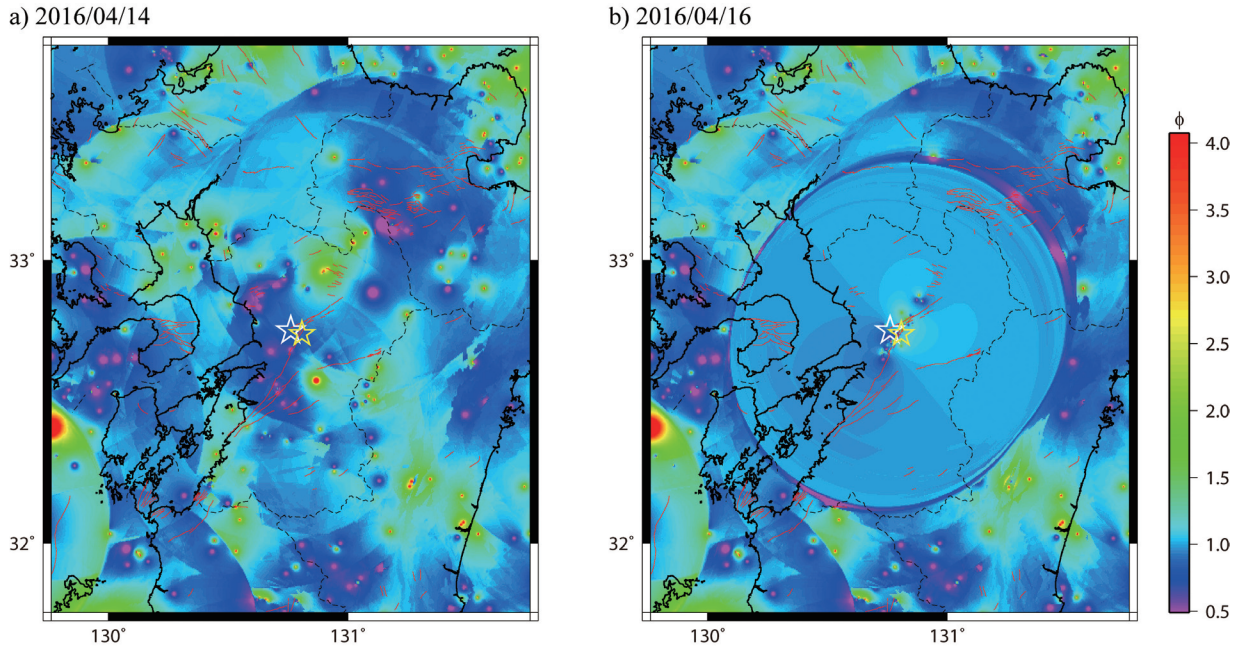


Fig. 11. a) A distribution map of parameter  $\phi$  just before the foreshock (2016/04/14) of the Kumamoto earthquakes.  
 b) A distribution map of parameter  $\phi$  just before the main shock (2016/04/16) of the Kumamoto earthquakes.  
 White-lined star shows the epicenter of the main shock and yellow-lined star shows the epicenter of the  $M6.5$  foreshock.

### 前震の時空間分布変化

一連の地震活動の中で、最も大きな地震を本震と呼び、本震の震源域周辺で本震より前に発生し、本震よりも小さい地震を前震と呼ぶ。Lippiello et al. (2012) はアメリカの西海岸の  $M6$  以上の地震に対して、前震の時空間分布変動を調査したところ、 $M6$  以上の地震の発生時刻に近づくにつれ、前震の発生位置が本震の震央付近に集中してくるということを示し、地震活動の集中度合いを示すパラメータ  $\phi$  を計算し、ETAS モデルに適用することで、地震発生の予測精度を有意に上昇させることができることを示した。

地震集中度  $\phi$  の計算は以下の様に計算している。緯度経度  $0.04$  度ごとの格子点を考えて、各格子点から半径  $60$  km 以内で発生した  $M1.0$  以上の地震を抽出し、その中で最新の地震を  $1$  番目として  $2n$  番目の地震までをリスト化する (本研究では  $n=50$

とした)。次に  $i$  番目の地震の位置と格子点までの距離  $d_i$  をそれぞれ計算し、その逆数  $1/d_i$  を計算する。そして地震リスト  $1$  番目から  $n$  番目の地震の距離の逆数  $1/d_i$  の平均  $D^{-1}(t)$  と、 $n+1$  番目から  $2n$  番目の地震の距離の逆数  $1/d_i$  の平均  $D^{-1}(t_a)$  の比がパラメータ  $\phi$  ( $\phi = D^{-1}(t)/D^{-1}(t_a)$ ) である。ここで  $t$  は  $1$  番目の地震の発生時刻、 $t_a$  は  $n+1$  番目の地震の発生時刻である。 $\phi$  は距離の逆数の比であるので、対象とする格子点に地震が近寄ってくると  $\phi$  は大きく ( $\phi > 1$ ) なり、逆に格子点から離れていくように地震が発生すると  $\phi$  は小さく ( $\phi < 1$ ) なる。Fig. 9 は  $2014$  年  $11$  月  $22$  日に発生した長野県神城断層地震 ( $M6.7$ ) の直前において緯度経度  $0.04$  度ごとにパラメータ  $\phi$  を計算して分布を示したものである。地震がその地点に集中してきていることを示す  $\phi > 1$  の領域は赤・緑系統で、地震がその地点から遠ざかっていることを示す  $\phi < 1$  の領域は青・紫系統の色で示している。赤い星は本震の位置を示しており、本震発生直前の時点で、震央周辺の領域から震央に近づくよう



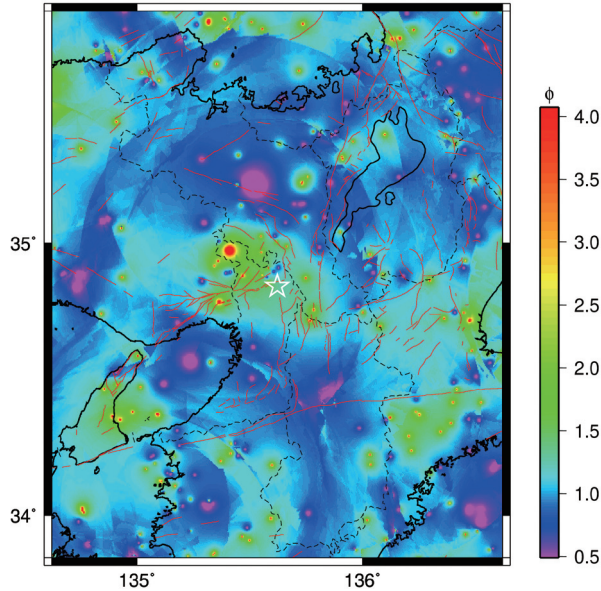


Fig. 12. A distribution map of parameter  $\phi$  just before the 2018 Osaka earthquake. White-lined star shows the epicenter of the earthquake.

に地震が発生したことがわかる。

Fig. 10 は日本近海全域の地震活動集中度  $\phi$  の分布を cesium 上で表現した図である。緯度経度 0.01 度ごとの格子点で  $\phi$  を計算しているが、地震活動が活発でない場所（周囲 60 km 以内の直近 1 年間における  $M1.0$  以上の地震発生数が  $2n$  未満（100 個未満）の場所）は計算を行っていない。

### 議論・結論

以上のように地震前兆の可能性のある様々な手法の可視化を行っているが、実際の地震での異常の有無を調査した。特に同じ地震カタログを使用している地震静穏化、 $b$  値、前震の時空間分布変化の 3 つの解析手法を近年発生した内陸地震（2014 年長野県神城断層地震、2016 年熊本地震、2018 年大阪北部の地震）で比較した。

2014 年 11 月 22 日に発生した長野県神城断層地震 ( $M6.7$ ) は 4 日前の 11 月 18 日から 11 月 19 日にかけて  $M2$  程度の大きさの前震活動が活発であった（地震調査委員会、2014）ことより、Fig. 9 に示すように地震活動集中度が地震前に震源領域で集中的に大きくなっている。地震前の  $b$  値の変

動については地震の 20 か月前から微小地震が増えたことにより  $b$  値は高くなり、地震の直前で急減している（井筒・長尾、2016）。RTM 法では上記の微小地震の増加より前の 30 か月前ごろから本震発生時まで地震活動の活発化が検出されている。

2016 年 4 月に発生した熊本地震は 4 月 14 日に  $M6.5$  の地震が発生し、その 28 時間後の 16 日に  $M7.3$  の地震が発生したことにより、16 日の地震が本震、14 日の地震が前震となった。熊本地震の直前の段階で前震および本震の震源領域の  $b$  値が非常に低くなっており、また 2 年ほど前より九州西方海域の広い領域で地震静穏化が発生しており、薩摩半島西方沖地震（2015 年 11 月 14 日、 $M7.1$ ）と熊本地震に対応していることが示されている（Nanjo et al., 2016）。Fig. 11a は 2016 年 4 月 14 日の熊本地震の前震直前の地震活動集中度の震源周辺の分布図である。白い星は本震の震央、黄色い星は 4 月 14 日の前震の震央を示している。14 日の前震 ( $M6.5$ ) の前震は特別見られなかった。Fig. 11b は 4 月 16 日の本震直前での地震活動集中度の分布図である。14 日の前震から 16 日の本震までの間に震源周辺で約 2000 個の地震が観測さ



れていることから、震源周辺の広い範囲で $\phi \approx 1$ の領域が広がっている。震源付近では $\phi$ の値にわずかな揺らぎがあるが、明確な地震活動の集中はみられない。

2018年6月18日に発生した大阪北部の地震については、地震の静穏化が発生しており(長尾・井筒, 2019), Fig. 2で示すように現在も継続中である。しかしながら地震前の $b$ 値の低下は見られず、地震集中度の変化も見られなかった(Fig. 12)。大阪北部の地震では本震の7時間前に $M0.9$ の非常に小さな地震が本震の震源付近で発生しており、これが前震であると考えられるが、今回の解析では $M_c=1.0$ と仮定して $M1.0$ 以上の地震のみを解析に用いているので反映されていない。上述した $b$ 値と同様に、解析対象エリアや時間で、正確な $M_c$ を考慮した解析が今後必要であると考えられる。また、前田・弘瀬(2016)によると本震前に前震が起きやすい場所、起きにくい場所があり、2014年の長野県神城断層地震が発生した長野県北中部は前震が起きやすい領域であることが指摘されている。

以上のように、地震の発生に伴い地震静穏化、 $b$ 値、前震などの前兆がすべて出現するとは限らないので、様々な解析手法を同時に行い、常にそれぞれをモニタリングすることが大切である。本研究で開発したデジタルアースによるモニタリングシステムが非常に効果的である。

## 謝 辞

本研究は中部大学問題複合体を対象とするデジタルアース共同利用・共同研究(IDEAS201812)の全面的な支援および東海大学海洋研究所、2017/2018年度コアプロジェクトの一部支援を受けて実施されました。また、ご多忙にかかわらず査読をしていただき、貴重な助言、ご指摘をいただきました東海大学海洋学部海洋地球科学科馬場久紀准教授に謹んで感謝いたします。

## 参考文献

Gore, A., The Digital Earth: Understanding our planet in the 21st Century, Speech at opening of the California Science Center, Los Angeles, California, on January 31, 1998. [http://portal.opengeospatial.org/files/?artifact\\_id=6210](http://portal.opengeospatial.org/files/?artifact_id=6210) (閲

覧日: 2019年8月27日)  
 Goodchild, M. F., H. Guob, A. Annonic, L. Biand, K. de Biee, F. Campbell, M. Cragliac, M. Ehlersg, J. van Genderene, D. Jacksonh, A. J. Lewisi, M. Pesaresic, G. Remetey-Fülöppj, R. Simpsonk, A. Skidmoref, C. Wangb, and P. Woodgatel, Next-generation Digital Earth, PNAS July 10, 2012 109 (28) 11088-11094; <https://doi.org/10.1073/pnas.1202383109>  
 Gutenberg, B. and C. F. Richter, Frequency of earthquakes in California, Bulletin of the Seismological Society of America, vol. 34, pp. 185-188, 1944.  
 井筒潤・長尾年恭, 地震災害予測のための $b$ 値の空間分布マッピングと時系列変化, 東海大学海洋研究所報告, vol. 37, pp. 21-28, 2016.  
 地震調査委員会, 2014. [https://www.static.jishin.go.jp/resource/seismicity\\_annual/major\\_act/2014/20141122\\_nagano.pdf](https://www.static.jishin.go.jp/resource/seismicity_annual/major_act/2014/20141122_nagano.pdf) (閲覧日: 2019年7月31日)  
 Lippiello, E., Marzocchi, W., Arcangelis, L., Godano, C., Spatial organization of foreshocks as a tool to forecast large earthquakes, Scientific reports, 2, 846, 2012.  
 前田憲二・弘瀬冬樹, 前震活動に基づく地震発生の経験的予測, 地震予知連絡会会報, 95, 415-419, 2016.  
 Nagao, T., A. Takeuchi and K. Nakamura, A new algorithm for the detection of seismic quiescence: introduction of the RTM algorithm, a modified RTL algorithm, Earth Planets Space, 63, 315-324, 2011.  
 Nagao, T., Y. Orihara, and M. Kamogawa, Precursory Phenomena Possibly Related to the 2011 M9.0 Off the Pacific Coast of Tohoku Earthquake, Journal of Disaster Research, Vol.9, No.3, pp. 303-310, 2014.  
 長尾年恭・井筒潤, 2018年6月に発生した大阪北部地震(M6.1)に先行した地震活動の静穏化異常, 東海大学海洋研究所報告, vol. 40, pp. 18-24, 2019.  
 Nanjo, K. Z., N. Hirata, K. Obara, and K. Kasahara, Decade-scale decrease in  $b$  value prior to the M9-class 2011 Tohoku and 2004 Sumatra quakes, Geophysical Research Letters, VOL. 39, L20304, doi:10.1029/2012GL052997, 2012.  
 Nanjo, K. Z., J. Izutsu, Y. Orihara, N. Furuse, S. Togo, H. Nitta, T. Okada, R. Tanaka, M. Kamogawa and T. Nagao, Seismicity prior to the 2016 Kumamoto earthquakes, Earth, Planets and Space, 68:18, DOI 10.1186/s40623-016-0558-2, 2016.  
 Nanjo, K. Z., A. Yoshida, A  $b$  map implying the first eastern rupture of the Nankai Trough earthquakes, Nature Communications, vol. 9, 1117, DOI: 10.1038/s41467-018-03514-3, 2018.  
 南海トラフ巨大地震対策検討ワーキンググループ, 南海トラフ巨大地震対策について(最終報告), 2013, [http://www.bou-sai.go.jp/jishin/nankai/taisaku\\_wg/pdf/20130528\\_honbun.pdf](http://www.bou-sai.go.jp/jishin/nankai/taisaku_wg/pdf/20130528_honbun.pdf) (閲覧日: 2019年9月11日)  
 太田健治, 藤原義寿, 前田憲二, 気象庁の地震検知能力の時空間的变化, 験震時報, vol. 65, 111-122, 2002.  
 Sobolev, G. A., and Y. S. Tyupkin, Low-seismicity precursors of large earthquakes in Kamchatka, Volcanol. Seismol., 18, 433-446, 1997.  
 宇津徳治, 6. 地震の規模別度数の統計式 $\log n = a - bM$ の係数 $b$ を求める一方法, 北海道大学地球物理学研究報告, 13, pp. 99-103, 1965.  
 Yokota, Y., T. Ishikawa, S. Watanabe, T. Tashiro and A. Asada,

Seafloor geodetic constraints on interplate coupling of the Nankai Trough megathrust zone, *Nature*, Vol. 534, pp. 374-377, 2016.