

12-16 GPS 連続観測に基づくプレート境界面上のすべりの検知能力

Detectability of slip on a plate boundary based on GEONET

国土地理院

Geospatial Information Authority of Japan

1. はじめに

プレート境界面上のすべり（スロースリップ、前兆すべり、地震等）の検知能力に関して、GPS 連続観測網（GEONET）を基に、①空間的な検知能力：どこでどの程度の大きさで発生した場合に検知できるのか？②時間的な検知能力：すべりの時間発展によって、どの程度の時間で（大きさがなったら）検知できるのか？の2つの観点から検討した。

2. 空間的な検知能力

第1図に示す5つの領域（十勝沖周辺、宮城県沖周辺、房総半島周辺、東海地方周辺、豊後水道周辺）で、GEONET 観測点（2010年4月1日現在で稼働している点）を基に、プレート境界面上のすべり（逆断層）がどこでどの程度の大きさで発生した場合に検知できるのかを検討した。

検知能力の検討にあたって、断層すべりは矩形断層を仮定した。この場合、地殻変動の計算に必要な静的断層パラメータは、断層の位置（緯度、経度、深さ）、断層の向き（走向、傾斜、すべり角）、断層の大きさ（長さ、幅）およびすべり量の9つである。断層の位置および断層の向きに関するパラメータは領域ごとに後述する。断層の大きさおよびすべり量に関する3つのパラメータは、以下の方法で決定した。すべりの大きさをモーメントマグニチュード（以下、「 M_w 」という。）で想定し、地震のスケーリング則に基づいて、 M_w から断層の長さ、幅、すべり量を算出した（第1表）。この時、断層は長方形を仮定し、長さとの比は2:1とした。断層パラメータは「日本の地震断層パラメータ・ハンドブック」¹⁾の定義に従っている。ただし、断層の位置座標に関しては、断層上盤側からみて左上端の点ではなく、断層上端中心の点としている。断層パラメータが得られれば、断層すべりによる地殻変動が計算できる（第2図）。作成したすべてのグリッド（すべりの候補点）での断層すべりによる地殻変動を計算し、計算された各 GEONET 観測点での地殻変動量を基に、検知できる断層すべりの大きさ（ M_w ）を以下の2つで判断した。1）閾値：観測点でのシグナルとみなす変動量の大きさ。2）観測点数：シグナルとみなされる変動量が観測される観測点の数。閾値は、GEONET 観測点での平均変動速度および年周・半年周成分（2006年1月1日～2009年1月1日の3年間）の残差の rms は、おおよそ水平成分で1～2.5mm、上下成分で5～10mm 程度であることから、3mm 以上を基本とした。今回上下成分は考慮せず、水平成分のみに基づく結果である。次に観測点数は、1, 2点であると観測点の異常等が考えられること、逆に多すぎると観測点密度に依存し過ぎてしまうことから、3点以上を基本とした。観測点数3点以上として閾値を変えた結果を第8図に、逆に閾値3mm 以上として観測点数を変えた結果を第9図に示す。さらに領域ごと、観測点数3点以上として、閾値を変えた結果を第3図～第7図に示す。

フィリピン海プレートが沈み込む房総、東海、豊後水道では、検知できるすべりの大きさはおおよそ M_w 6.0 前後以上であり、場所によっては M_w 5 クラス後半でも検知可能である。一方、太平洋プレートが沈み込む十勝沖、宮城県沖では、検知できるすべりの大きさは M_w 6.5 前後以上であり、陸域から離れた海溝付近では M_w 7 クラス以上でないと検知されない。フィリピン海プレートが沈

み込む房総，東海，豊後水道では観測点のある陸域でプレート境界面が浅いが，太平洋プレートが沈み込む十勝沖，宮城県沖ではプレート境界面が深いため，検知できるすべりの大きさに差が出ていると考えられる．観測点数を固定して，閾値の値を大きくすれば，検知可能なすべりの大きさは大きくなる（第8図）．閾値を固定して，観測点数を多くしても検知できるすべりの大きさはそれほど大きくは変わらない（第9図）．今回，閾値と観測点数の違いを考慮したが，検知できるすべりの大きさは，プレート境界面モデルや断層パラメータにも依存するであろう．

3. 時間的な検知能力

2009年秋頃から豊後水道でスロースリップの発生が報告されている．このスロースリップを例にして，先述した「空間的な検知能力」の報告内容の検証と併せて，スロースリップがどの程度の時間で（大きさになったら）検知できるのか（できたのか）の検討を行った．

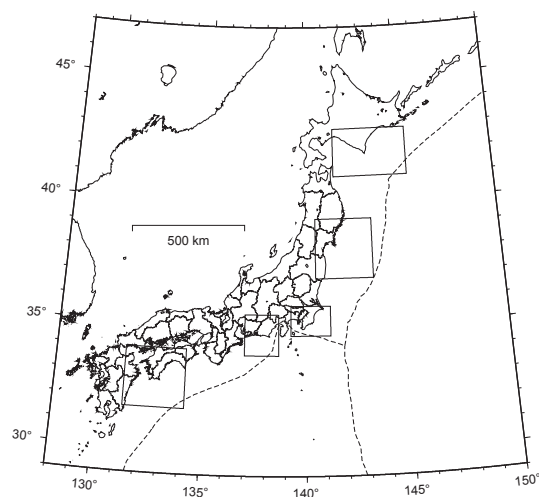
2006年1月から2009年1月の時系列データから平均変動速度および年周・半年周成分を推定し，平均変動速度のみを取り除いた（第10図）．そして，2009年10月1日から1ヶ月ごと累積の非定常地殻変動を第11図（上段）に示す．さらに，これらのデータから推定したすべり分布（スロースリップ）を第11図（下段）に示す．

宿毛の時系列（第10図）では，2010年2月頃から平均変動速度からのずれが明瞭になり始めているが，土佐清水3の時系列（第10図）では，2009年11～12月頃から平均変動速度からのずれが始まっているように見える．一方，非定常地殻変動ベクトルからは（第11図上段），2010年2月もしくは3月の段階で，およそ3～5 mm以上のスロースリップによるものと考えられる変動が見える．その時の推定すべりの大きさは（第11図下段）およそMw6.1，Mw6.4である．スロースリップの発生が2009年11月頃からと考えれば（第10図），発生から3～4ヶ月後（2010年2月～3月頃），すべりの大きさはMw6.1を超えたくらいで検知が可能であったと考えられる．

第11図上段において，全期間で3 mm以上の変動が観測されている観測点が存在する．5 mm以上の変動で見れば，（5）以降の期間（2010年3月）である．より詳細な検討が必要であるが，豊後水道のスロースリップの例では，シグナルとみなす変動量の閾値はおよそ5 mm程度が妥当であると考えられる．そして，その時のすべりの大きさは，Mw6.4程度であった．豊後水道周辺での空間的な検知能力（第7図）から閾値5 mmでの検知能力は，Mw6.0前後である．実際のデータからの検討では，Mw6.4前後と若干大きくなっているが，観測値のノイズレベルが一定ではないこと等を考慮すれば，およそ妥当な結果であると考えられる．

参 考 文 献

- 1) 佐藤良輔，1989，日本の地震断層パラメター・ハンドブック，鹿島出版会．
- 2) Hashimoto, C., K. Fukui, and M. Matsu'ura, 2004, 3-D modeling of plate interfaces and numerical simulation of long-term crustal deformation in and around Japan, *Pure appl. Geophys.*, 161, 2053-2068.
- 3) Sella, G. F., T. H. Dixon, and A. Mao, 2002, REVEL: A model for recent plate velocities from space geodesy, *J. Geophys. Res.*, 107, B4, 2081, 10.1029/2000JB000033.
- 4) 野口伸一，1996，東海地域のフィリピン海スラブ形状と収束テクトニクス，*地震* 2，49，295－325．
- 5) 原田智史・吉田明夫・明田川保，1998，東海地域に沈み込んだフィリピン海スラブの形状と地震活動，*地震研究所彙報*，73，291－304．



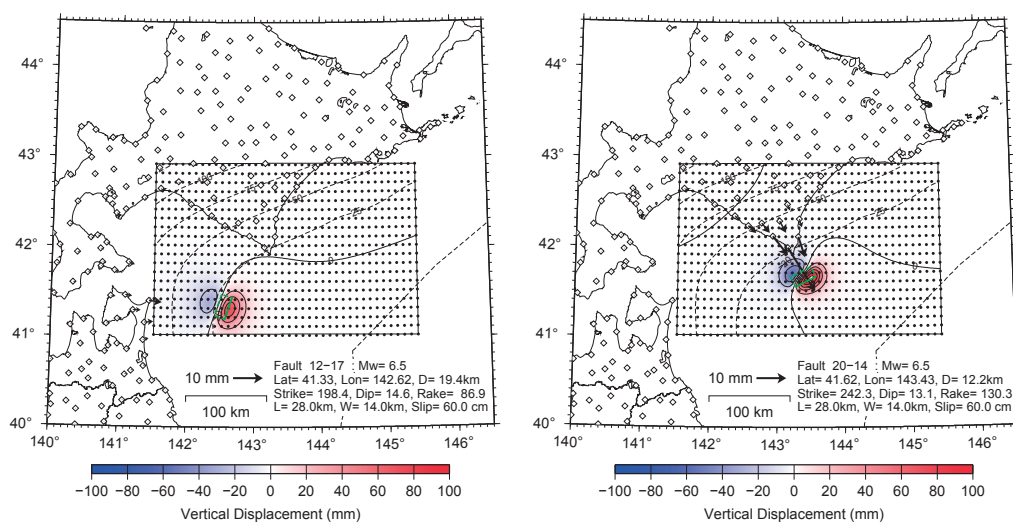
第1図 すべりの検知能力を検討した領域.

Fig. 1 Study area.

第1表 想定したモーメントマグニチュード (M_w) と断層の長さ, 幅, すべり量.

Table 1 Assumed moment magnitude (M_w), fault length, width and slip.

M_w	すべり量 (cm)	断層の長さ (km)	断層の幅 (km)	M_w	すべり量 (cm)	断層の長さ (km)	断層の幅 (km)
7.5	188.4	89.1	44.6	6.5	60.0	28.0	14.0
7.4	167.9	79.4	39.7	6.4	53.0	25.0	12.6
7.3	149.6	70.8	35.4	6.3	50.0	22.0	11.0
7.2	133.4	63.1	31.5	6.2	42.0	20.0	10.0
7.1	118.9	56.2	28.1	6.1	37.0	18.0	9.0
7.0	105.9	50.0	25.1	6.0	33.5	16.0	8.0
6.9	94.4	44.7	22.3	5.9	30.5	12.6	7.0
6.8	84.1	39.8	19.9	5.8	26.5	11.2	6.3
6.7	75.0	35.5	17.7	5.7	24.0	10.0	5.6
6.6	66.8	31.6	15.8	5.6	21.1	9.0	5.0



第2図 計算した地殻変動の例.

Fig. 2 Examples of calculated crustal deformation.

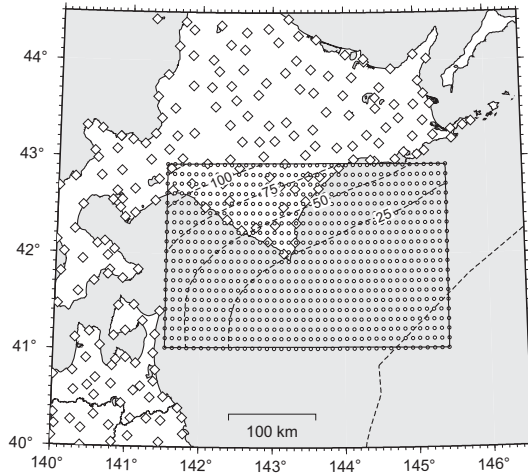


図3. 想定したすべり位置（白丸）、使用した GEONET 観測点は 203 点（白菱形）。

想定したすべりの断層パラメータに関しては、

- ・断層の位置（緯度、経度、深さ）：CAMP モデル²⁾を使用し、 0.1° 間隔（ 40×20 グリッド）。
- ・断層の向き（走向、傾斜、すべり角）：走向は傾斜方向に直交する方向、すべり角は Sella et al. (2002)³⁾ による太平洋プレートに対する北米プレートの相対運動の回転極から求めた速度ベクトルの向きとした。
- ・断層の大きさ（長さ、幅、すべり量）：Mw を仮定して地震のスケールリング則から計算（表 1 参照）。

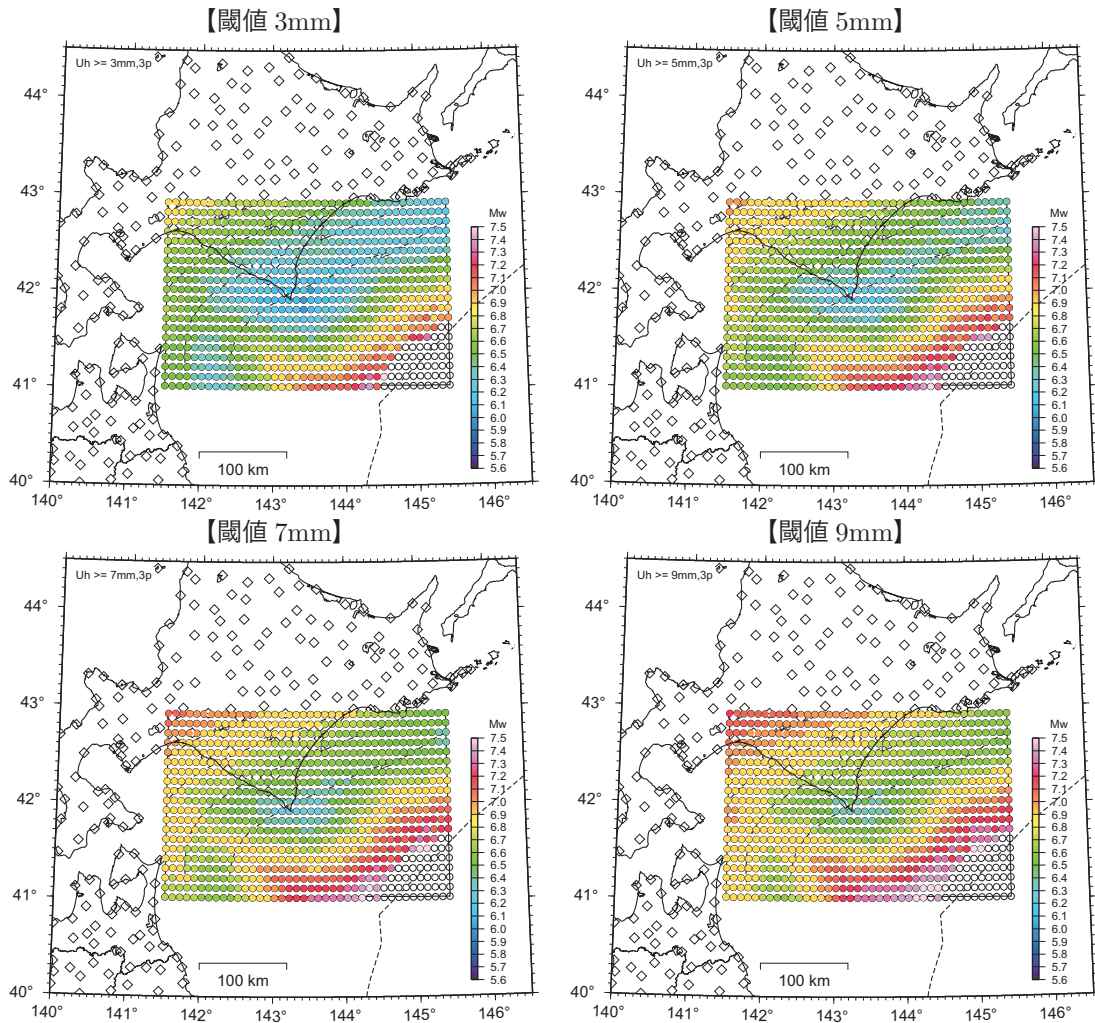


図4. 少なくとも3点以上の観測点で閾値以上の水平地殻変動が想定されるすべりの候補点での最小のすべりの大きさ（Mw）の空間分布。閾値が3，5，7，9 mm 以上の結果。

第3図 十勝沖周辺のプレート境界面上でのすべりの検知能力。

Fig. 3 Detectability of slip on a plate boundary in Tokachi area.

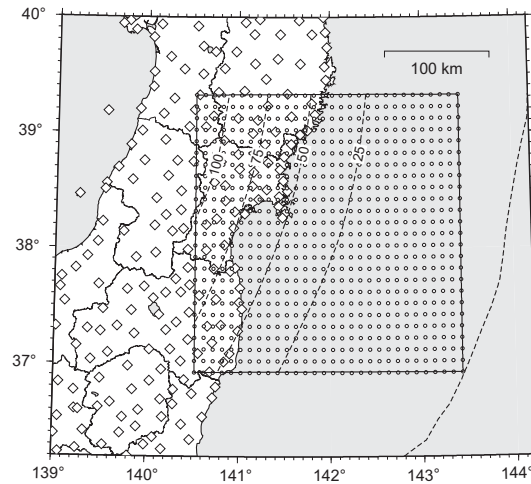


図5. 想定したすべり位置 (白丸). 使用した GEONET 観測点は 191 点 (白菱形). 想定したすべりの断層パラメータに関しては、

- ・断層の位置 (緯度, 経度, 深さ): CAMP モデル²⁾を使用し, 0.1° 間隔 (30×25 グリッド).
- ・断層の向き (走向, 傾斜, すべり角): 走向は傾斜方向に直交する方向, すべり角は Sella et al. (2002)³⁾ による太平洋プレートに対する北米プレートの相対運動の回転極から求めた速度ベクトルの向きとした.
- ・断層の大きさ (長さ, 幅, すべり量): Mw を仮定して地震のスケーリング則から計算 (表1 参照).

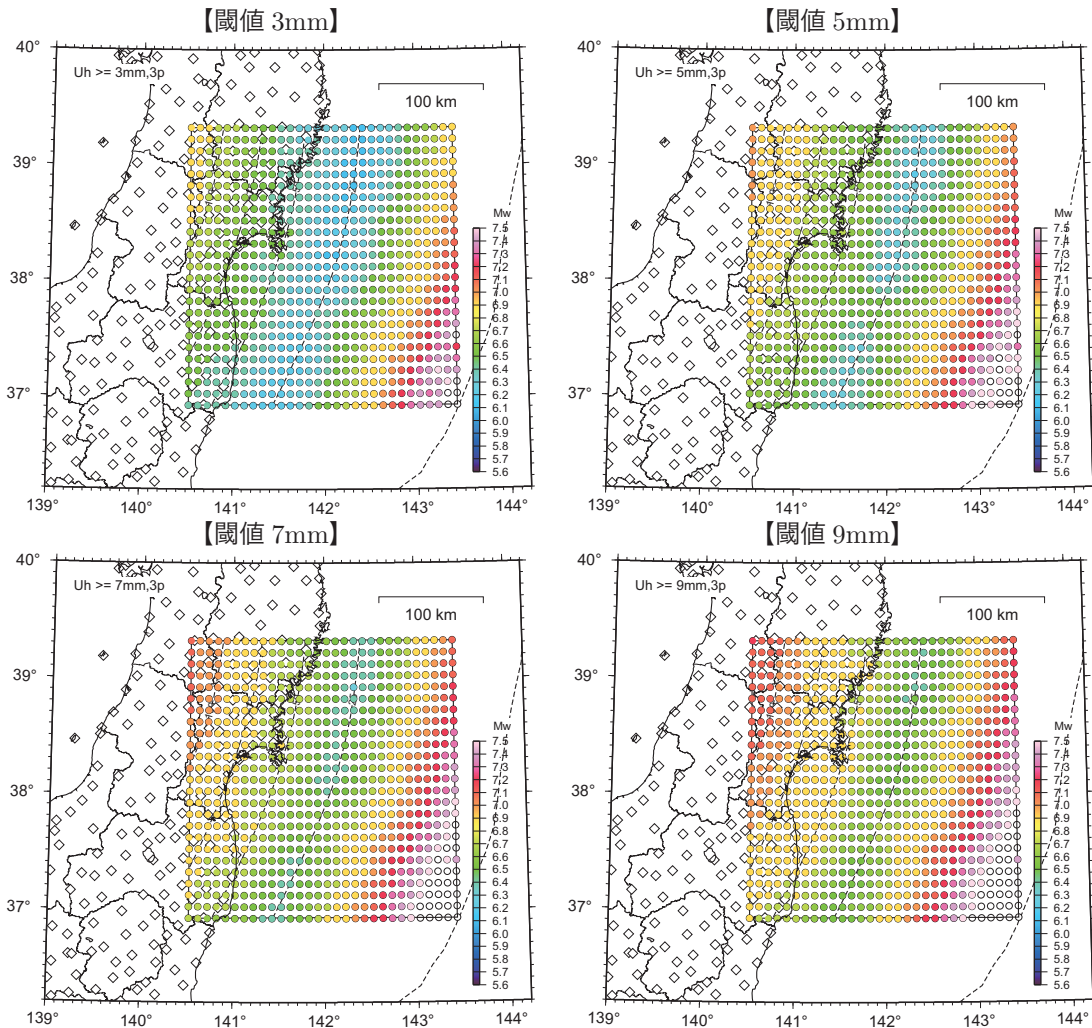


図6. 少なくとも3点以上の観測点で閾値以上の水平地殻変動が想定されるすべりの候補点での最小のすべりの大きさ (Mw) の空間分布. 閾値が3, 5, 7, 9 mm 以上の結果.

第4図 宮城県沖周辺のプレート境界面上でのすべりの検知能力.

Fig. 4 Detectability of slip on a plate boundary in Miyagi-Ken area.

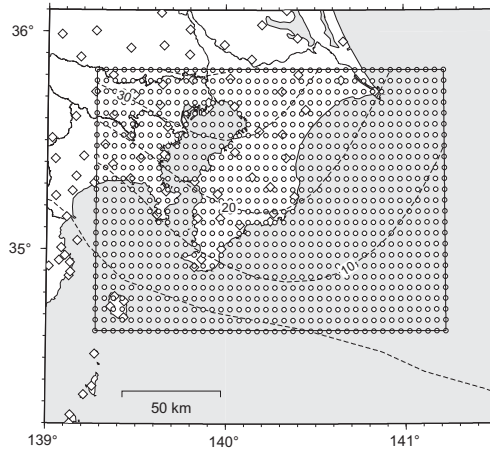


図7. 想定したすべり位置（白丸）、使用した GEONET 観測点は 82 点（白菱形）.
想定したすべりの断層パラメータに関しては、

- ・断層の位置（緯度、経度、深さ）：CAMP モデル²⁾を使用し、0.05° 間隔（40×25 グリッド）.
- ・断層の向き（走向、傾斜、すべり角）：走向は傾斜方向に直交する方向、すべり角は Sella et al. (2002)³⁾ によるフィリピン海プレートに対するユーラシアプレートの相対運動の回転極から求めた速度ベクトルの向きとした.
- ・断層の大きさ（長さ、幅、すべり量）：Mw を仮定して地震のスケーリング則から計算（表 1 参照）.

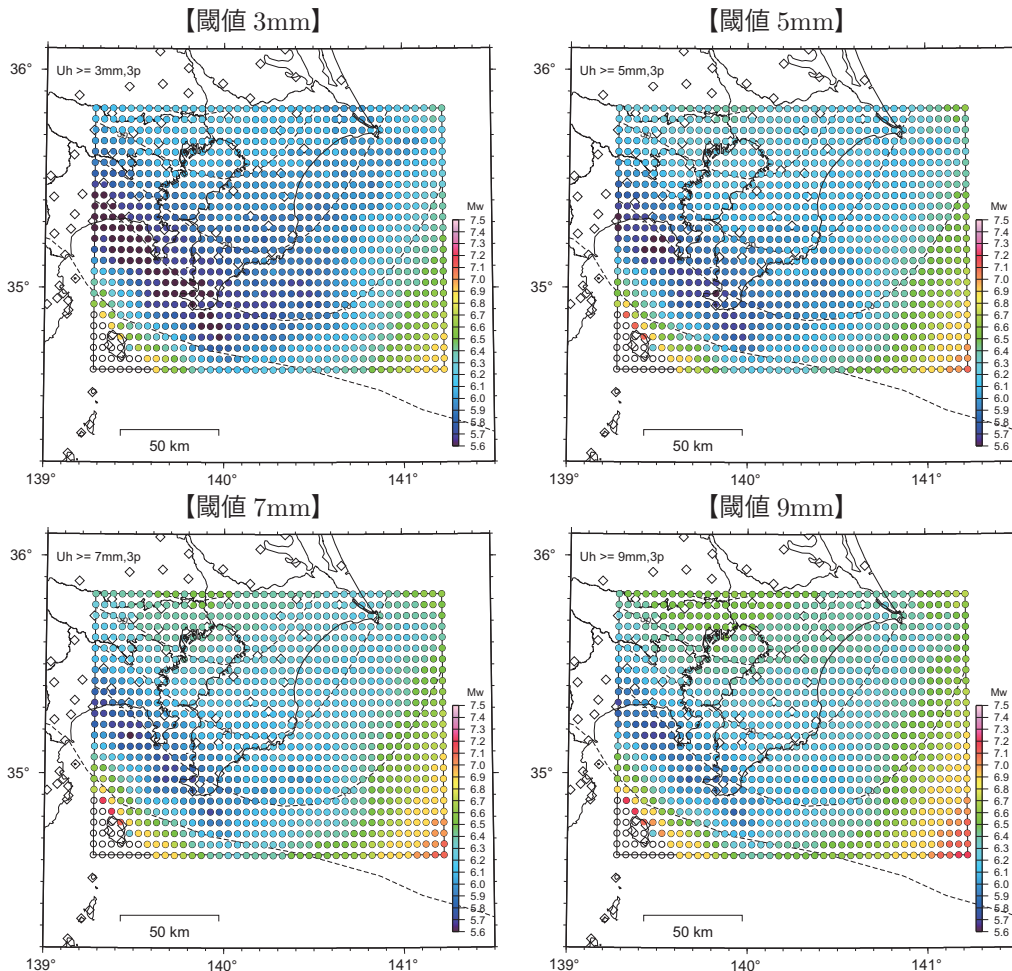


図8. 少なくとも3点以上の観測点で閾値以上の水平地殻変動が想定されるすべりの候補点での最小のすべりの大きさ（Mw）の空間分布. 閾値が3, 5, 7, 9 mm 以上の結果.

第5図 房総半島周辺のプレート境界面上でのすべりの検知能力.

Fig. 5 Detectability of slip on a plate boundary in Boso area.

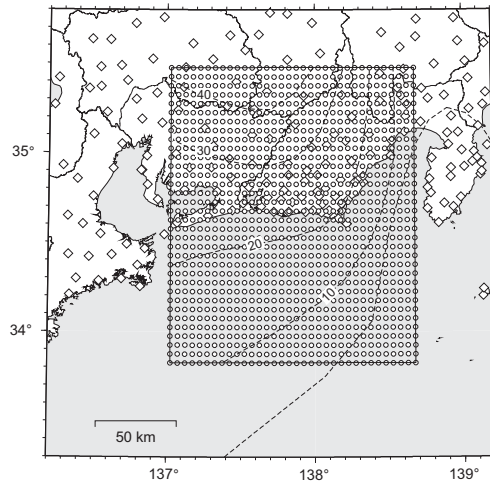


図9. 想定したすべり位置（白丸）、使用した GEONET 観測点は 179 点（白菱形）．
 想定したすべりの断層パラメータに関しては、

- ・断層の位置（緯度、経度、深さ）：気象庁の東海地域のプレート形状モデル（野口，1996⁴）；原田・他，1998⁵）を使用し，0.05° 間隔（34×34 グリッド）．
- ・断層の向き（走向，傾斜，すべり角）：気象庁の東海地域のプレート形状モデルを使用．
- ・断層の大きさ（長さ，幅，すべり量）：Mw を仮定して地震のスケーリング則から計算（表1 参照）．

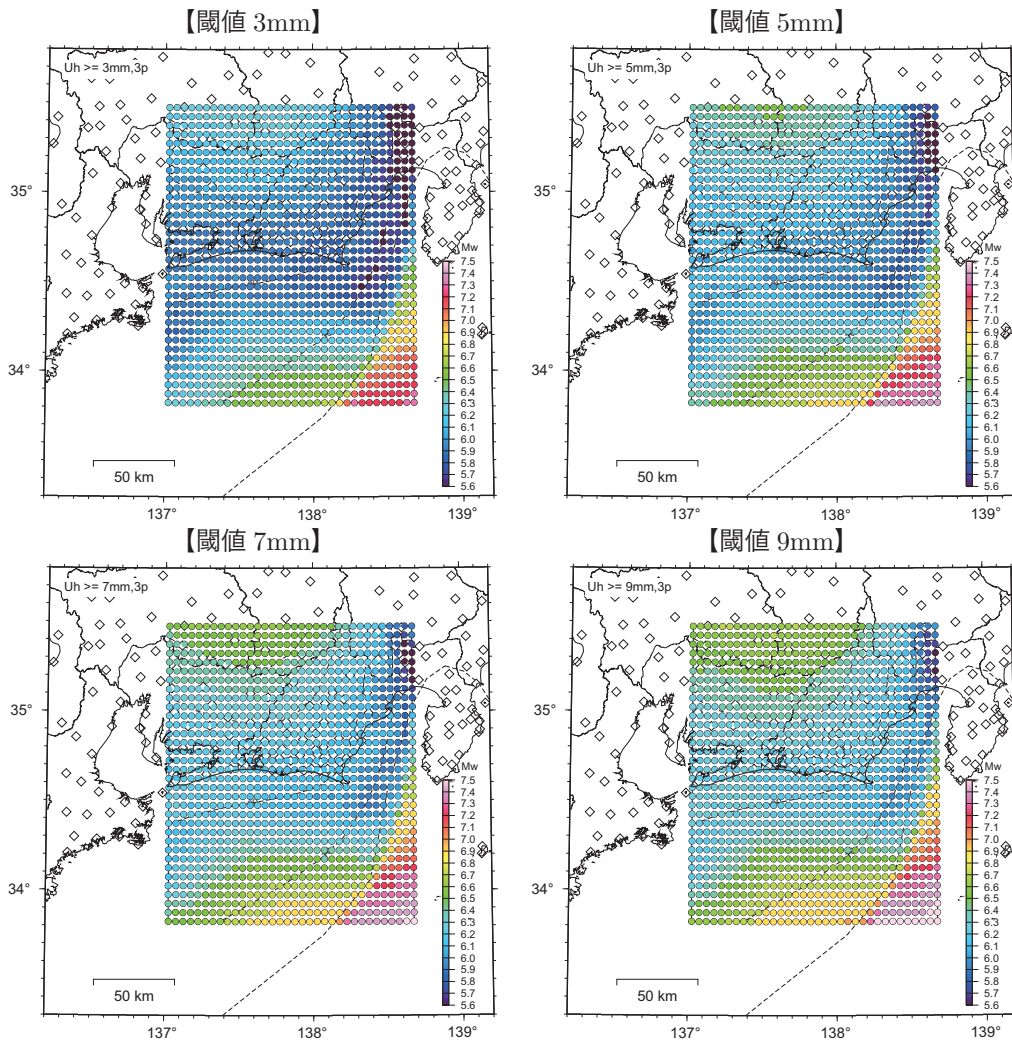


図10. 少なくとも3点以上の観測点で閾値以上の水平地殻変動が想定されるすべりの候補点での最小のすべりの大きさ（Mw）の空間分布. 閾値が3，5，7，9 mm 以上の結果.

第6図 東海地方周辺のプレート境界面上でのすべりの検知能力.
 Fig. 6 Detectability of slip on a plate boundary in Tokai area.

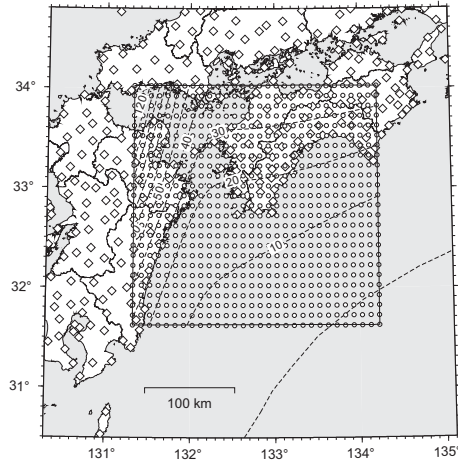


図 11. 想定したすべり位置（白丸）、使用した GEONET 観測点は 273 点（白菱形）、想定したすべりの断層パラメータに関しては、

- ・断層の位置（緯度、経度、深さ）：CAMP モデル²⁾を使用し、0.1° 間隔（30×25 グリッド）。
- ・断層の向き（走向、傾斜、すべり角）：走向は傾斜方向に直交する方向、すべり角は Sella et al. (2002)³⁾ によるフィリピン海プレートに対するアムールプレートの相対運動の回転極から求めた速度ベクトルの向きとした。
- ・断層の大きさ（長さ、幅、すべり量）：Mw を仮定して地震のスケージング則から計算（表 1 参照）。

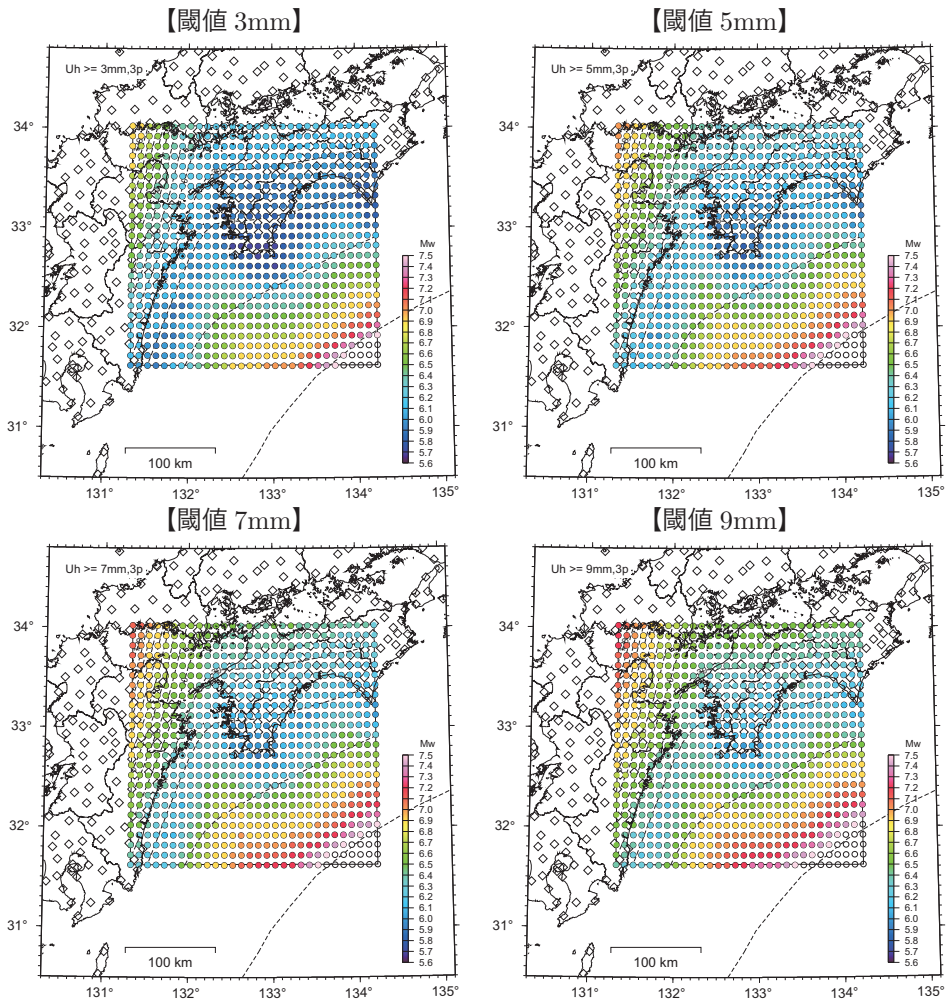


図 12. 少なくとも 3 点以上の観測点で閾値以上の水平地殻変動が想定されるすべりの候補点での最小のすべりの大きさ（Mw）の空間分布。閾値が 3, 5, 7, 9 mm 以上の結果。

第 7 図 豊後水道周辺のプレート境界面上でのすべりの検知能力。

Fig. 7 Detectability of slip on a plate boundary in Bungo area.

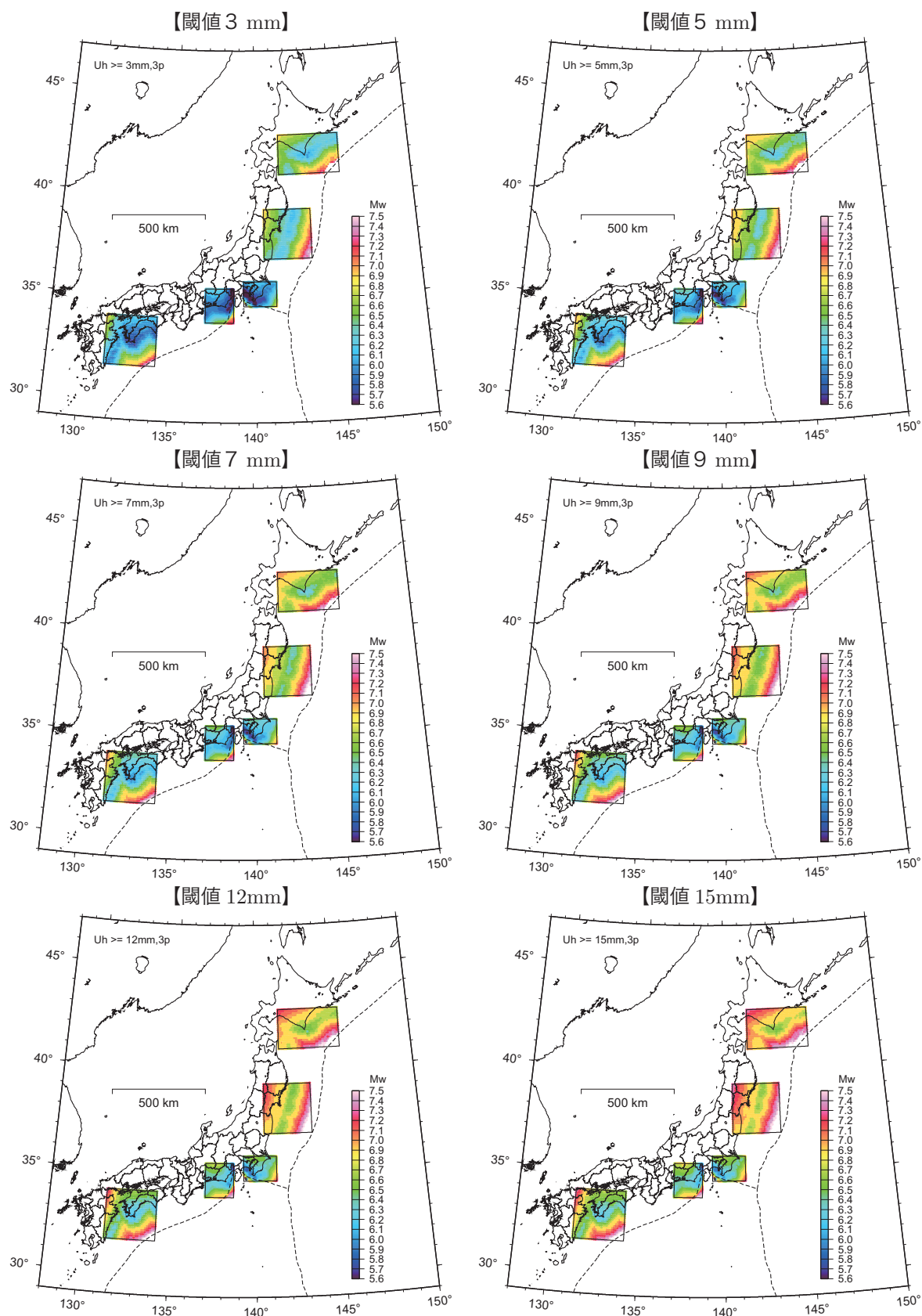


図 13. 少なくとも 3 点以上の観測点で閾値以上の水平地殻変動が想定されるすべりの候補点での最小のすべりの大きさ (Mw) の空間分布. 閾値が 3, 5, 7, 9, 12, 15mm 以上の結果.

第 8 図 プレート境界面上のすべりの検知能力 (観測点 3 点以上).
Fig. 8 Detectability of slip on a plate boundary (sites 3 or more).

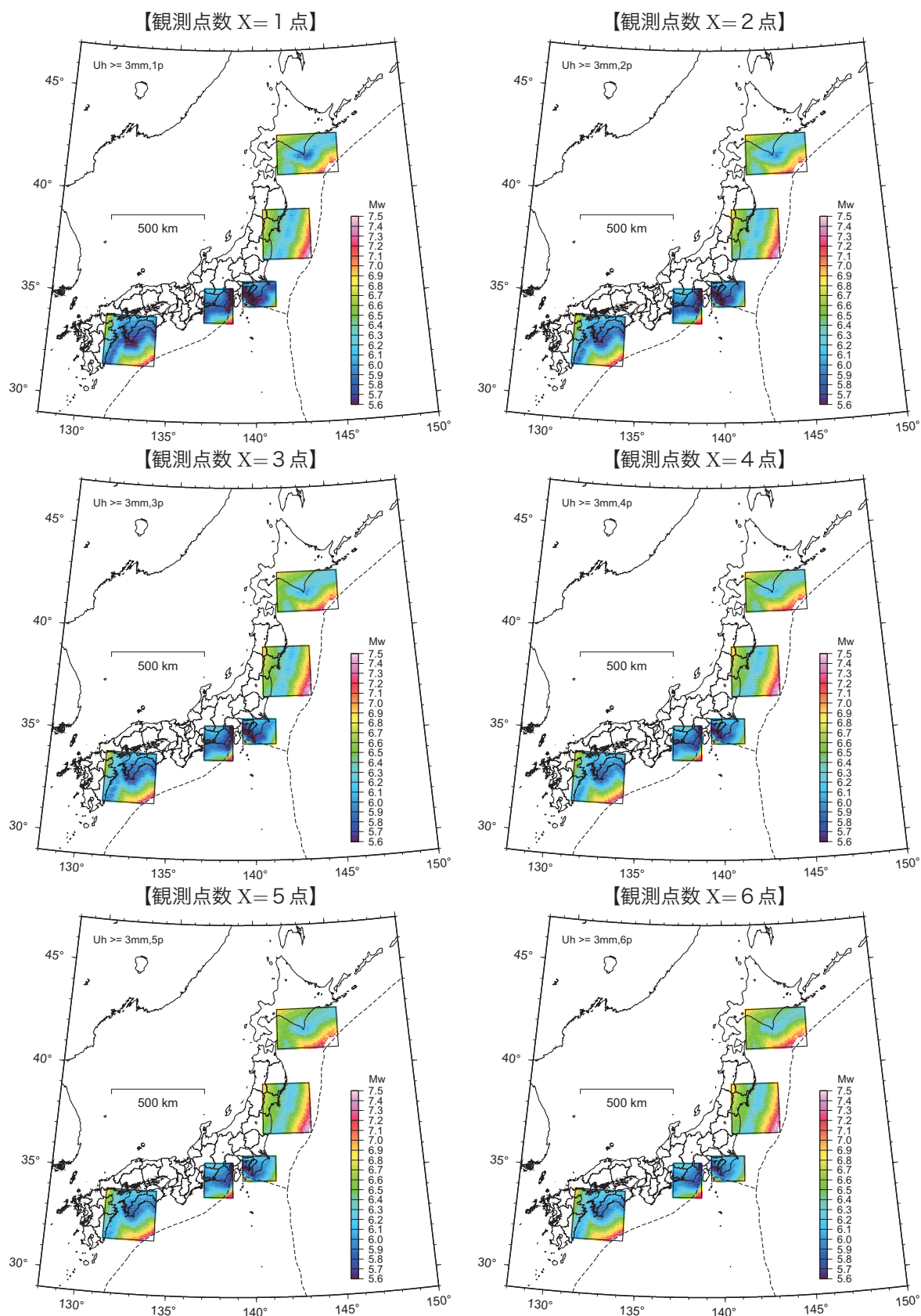


図 14. 少なくとも X 点以上の観測点で 3mm 以上の水平地殻変動が想定されるすべりの候補点での最小のすべりの大きさ (M_w) の空間分布. 観測点数 X が 1, 2, 3, 4, 5, 6 点の結果.

第 9 図 プレート境界面上でのすべりの検知能力 (閾値 3 mm 以上).

Fig. 9 Detectability of slip on a plate boundary (threshold 3mm or more).

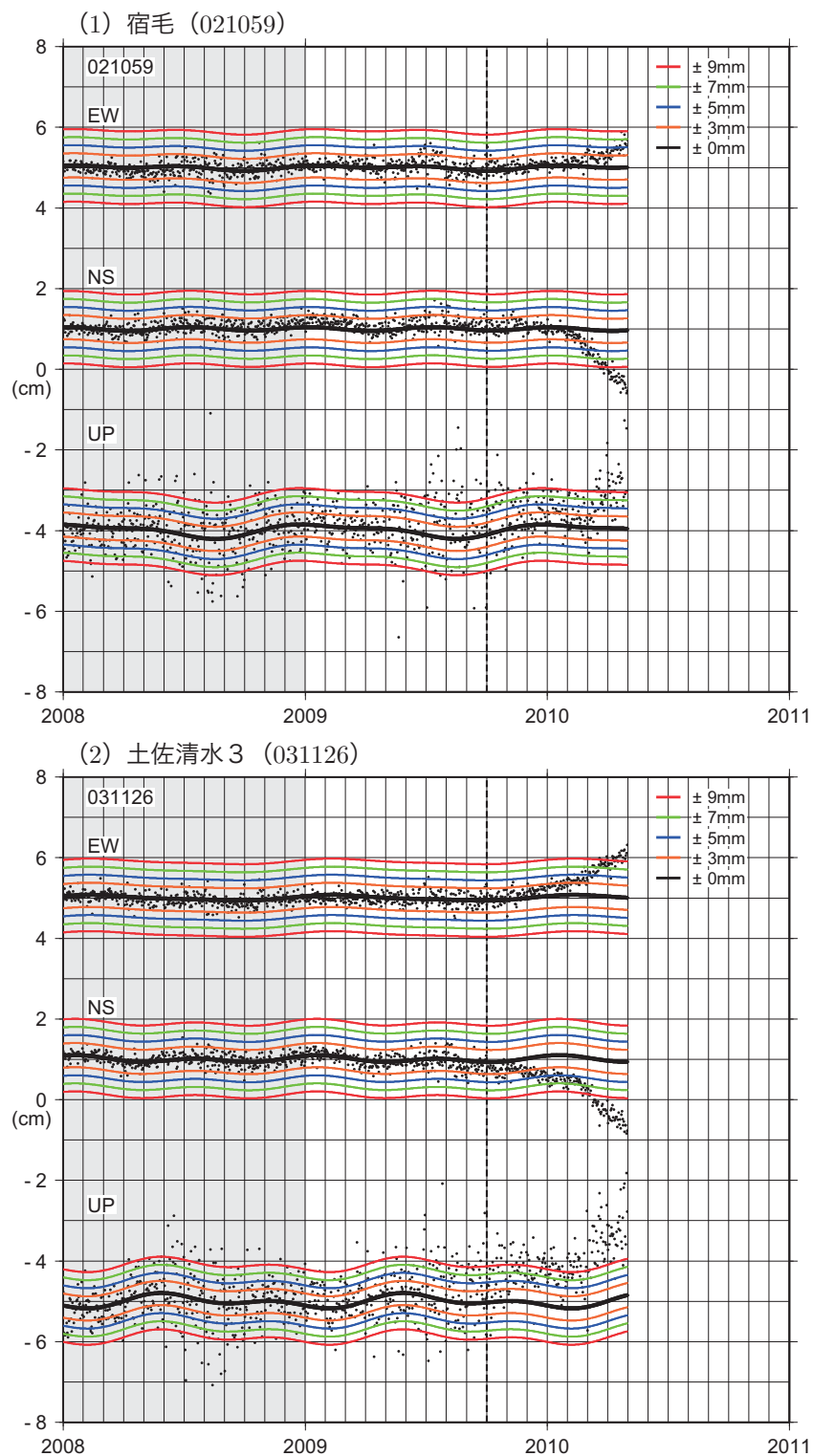


図 15. 非定常地殻変動時系列 (黒丸). 2006 年 1 月～2009 年 1 月のデータから平均変動速度と年周/半年周成分を推定して、平均変動速度のみを除去している。黒、橙、青、緑、赤線はそれぞれ推定した年周/半年周成分の $\pm 0\text{mm}$, 3mm , 5mm , 7mm , 9mm の線。縦の太点線は 2009 年 10 月 1 日。観測点の位置は次ページの赤丸。

第 10 図 豊後水道周辺の非定常地殻変動時系列.

Fig. 10 Time series of transient crustal deformation in Bungo area.

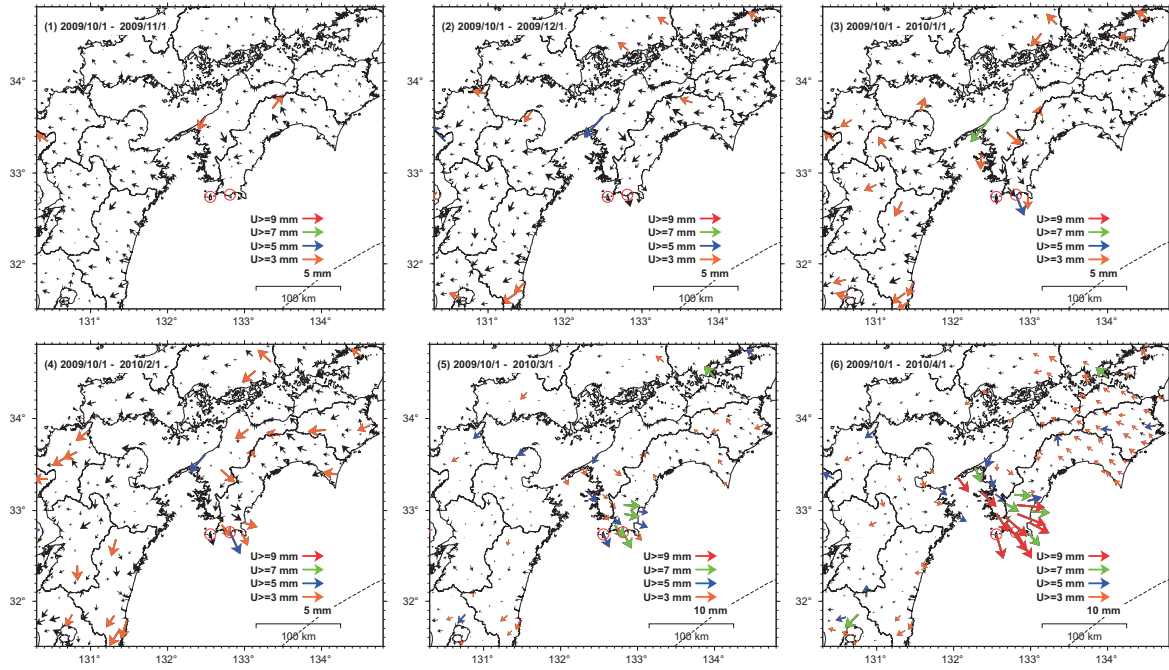


図 16. 2009 年 10 月 1 日から 1 ヶ月ごとの累積の非定常地殻変動. 色の矢印は, それぞれ赤 9mm, 緑 7mm, 青 5mm, 橙 3mm 以上の変動量を表示している. (1) ~ (4) と (5) ~ (6) はスケールが異なる.

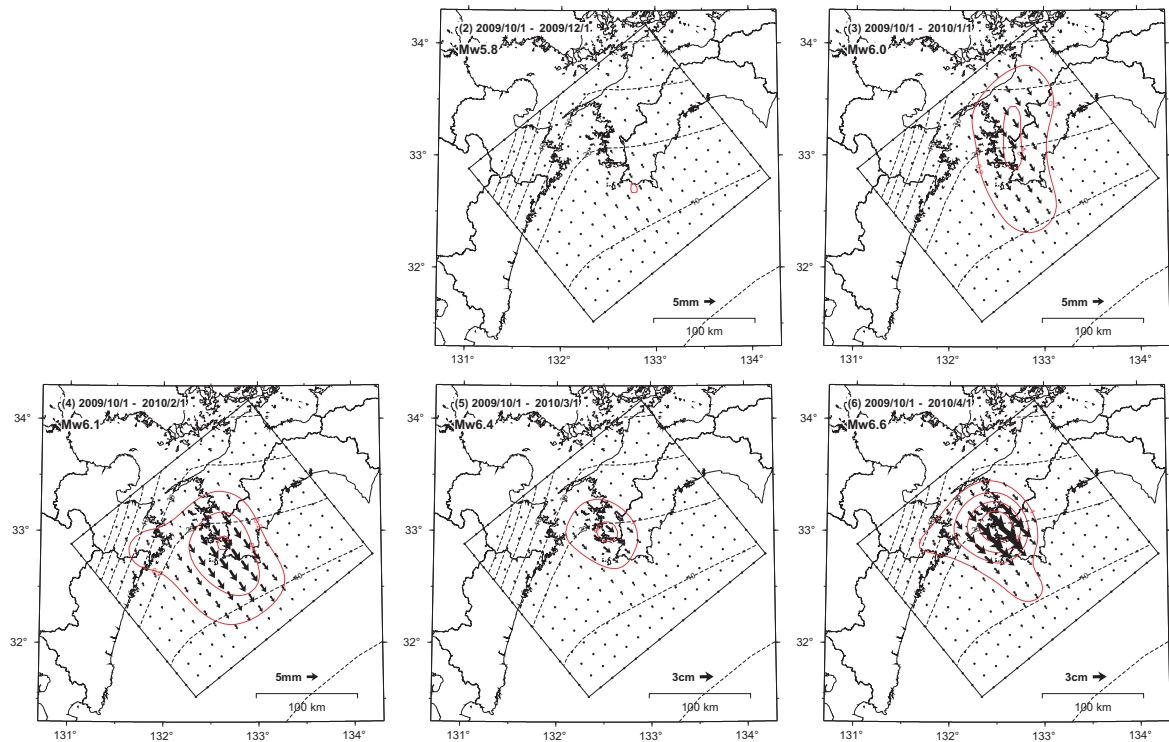


図 17. 2009 年 10 月 1 日から 1 ヶ月ごとの累積のすべり分布. (2) ~ (4) と (5) ~ (6) はスケールが異なる.

第 11 図 豊後水道周辺の非定常地殻変動と推定すべり分布.

Fig. 11 Transient crustal deformation and estimated slip distribution in Bungo area.