

9-3 中国・四国地方の地殻変動

Crustal Movements in the Chugoku and Shikoku Districts

国土地理院

Geospatial Information Authority of Japan

[水準測量]

第1図は室戸岬周辺の水準測量結果である。今回は、高知市から室戸岬先端部に至る西側の路線を観測した。室戸岬先端部の沈降が見られる。

第2図は、水準測量による室戸地方の上下変動の経年変化である。実線が今回測量した西側の路線で、長期的な傾向の延長上にあるように見える。

第3図は、第189回地震予知連絡会の宿題の回答である。室戸岬付近で、地震時の隆起が地震間の沈降によって相殺される年数を調査したところ、岬の先端部で年数が大きくなる傾向がみられる。

[GPS 豊後水道のゆっくりすべり]

第4～16図は、2003年以来約6年ぶりに発生した豊後水道のスロースリップイベントに関する資料である。

第4図下段の三隅固定の非定常地殻変動水平ベクトル図に示したように、豊後水道周辺において南東向きの非定常地殻変動が、2010年9月までは進行していたが、10月以降は全般的にはほぼ収まったように見える。

第5～7図は、豊後水道の周りの電子基準点を四国南西部から半時計回りの順番で、基線ベクトル3成分の時系列グラフを並べたもので、左の列が長期、右列が短期の成分変化を示す。四国南西部の観測点では2009年秋頃から南東向きの非定常地殻変動が始まり2010年2月頃から加速した。伊方（いかた）、臼杵（うすき）、米水津（よのうづ）等、プレート境界面の深さが深い場所の観測点では、2010年2月頃から非定常地殻変動が検出された。つまり、当初足摺岬付近で見られた非定常地殻変動の範囲が、その後北西側に広がった。非定常地殻変動は一部の観測点で2010年6月頃から変動速度の鈍化傾向が見られる。また、多くの観測点で10月頃からほぼ停滞している。詳しく見ると、(2)高知大月、(5)臼杵、(6)米水津では完全には停止していない。

第8～9図は、地殻変動からプレート間の滑り分布を推定した結果で、2009年9月～2010年1月頃までは四国南西部に局在していた滑りが、2010年2月以降西側の豊後水道海域、つまりプレート境界の深い側に拡大した。最新の滑りには、豊後水道南部にわずかなSSEの滑りが見られる。赤丸は低周波微動の分布を示しており、発生時期に相関がみられる。

第10図の左の列が滑り分布、右の列が積算モーメント、上段が前回の2003年、下段が今回の2010年を示している。2010年の滑りと積算モーメントは2003年のレベルを少し越え、停滞の兆しが見える。なお、積算モーメントには南東方向以外の滑りも含まれる。

第11～12図は、GEONETで観測された水平地殻変動を黒矢印、モデル計算値を赤い矢印で示した。

第13図は、座標成分時系列の観測値と計算値を比較したグラフである。

第14図は、豊後水道周辺の深部低周波微動活動と非定常的な地殻変動との時間的な関係を示し

た資料である。2003 年後半と 2010 年前半の非定常地殻変動が明瞭な時期に豊後水道の南東側で継続的な深部低周波微動の活発化がみられる。2006 年 9～11 月頃にも小規模ながら同様の相関がみられる。2010 年 10 月頃には地殻変動はほぼ終息したように見える。

[豊後水道 SSE の総括]

2010 年の SSE は、2003 年のイベントと比較して、期間も規模も若干大きい。共通して言えそうなこととして、加速期、主活動期、減速期の 3 つの期間に分けられる。加速期が約 4～7 ヶ月間、主活動期が約 5～7 ヶ月間、減速期が数ヶ月間（2003 年は約 10 ヶ月間）とみられる。つまり、それぞれの期間は 4～10 ヶ月程度。解放されるモーメントマグニチュードは $M_w=7.0\sim 7.1$ 程度。現在は、減速期とみられるが、今後の推移を見て判断する必要がある。

[八木委員からの質問に対する回答]

第 15 図は、足摺岬周辺の観測値と計算値の比較の図を、2003 年と 2010 年のイベントについて並べたものである。2003 年と 2010 年のモデルは、それぞれ同程度に観測値を再現している。

第 16 図は、異なるモデル領域を用いた場合の推定結果を示した図である。上から従来のプレート間すべり分布、2 段目が従来の地殻変動、3・4 段目がモデル領域を広げた場合のすべり分布と地殻変動である。モデル領域を拡大すると南側にすべり域が広がり、わずかであるが観測値をより良く再現する。

[GEONET による短期的 SSE の検出]

第 17 図は、GEONET による短期的スローリップイベント (SSE) 検出の改良の報告である。西南日本の短期的 SSE の検出に用いた観測点を青のドットで示した。これらの観測点で空間フィルターによるノイズ軽減を行い、深部低周波微動・地震の発生域を中心（青ドット）とした $N50^\circ W$ の方向に長さ 160km、幅 50km の領域をとって、GPS 座標値の $N50^\circ W$ （プレートの沈み込み方向）成分に有意なステップが見られるかどうかを AIC を用いて検討した。

第 18 図は、有意なステップが検出された時期と位置（経度）を示したものである。白色や赤色で示されたところは、プレートの沈み込みとは反対方向の有意なステップがあることを示し、短期的 SSE の発生が疑われる場所である。これらの時期を、防災科研 (Sekine et al., 2010) による短期的 SSE 検出時期と比較すると極めて良い対応が見られ、深部低周波微動・地震の活発化の時期とも概ね対応していることがわかった。解析期間を通して、短期的 SSE の発生が疑われる時期の地殻変動水平ベクトルを目視で確認したところ、少なくとも 62 回の短期的 SSE と思われる変動パターンを認めることができた。これらのことから、GEONET により、規模の大きな短期的 SSE の検出が可能であると考えられる。

第 19～23 図は、期間を 3 年毎に拡大して、顕著なステップが検出された時期の紀伊半島と四国付近の水平変動ベクトルを示したものである。水平変動ベクトルでは、深部低周波微動・地震の震源域を中心に南東向きの地殻変動が見られ、短期的 SSE に伴う地殻変動であることが確認できる。

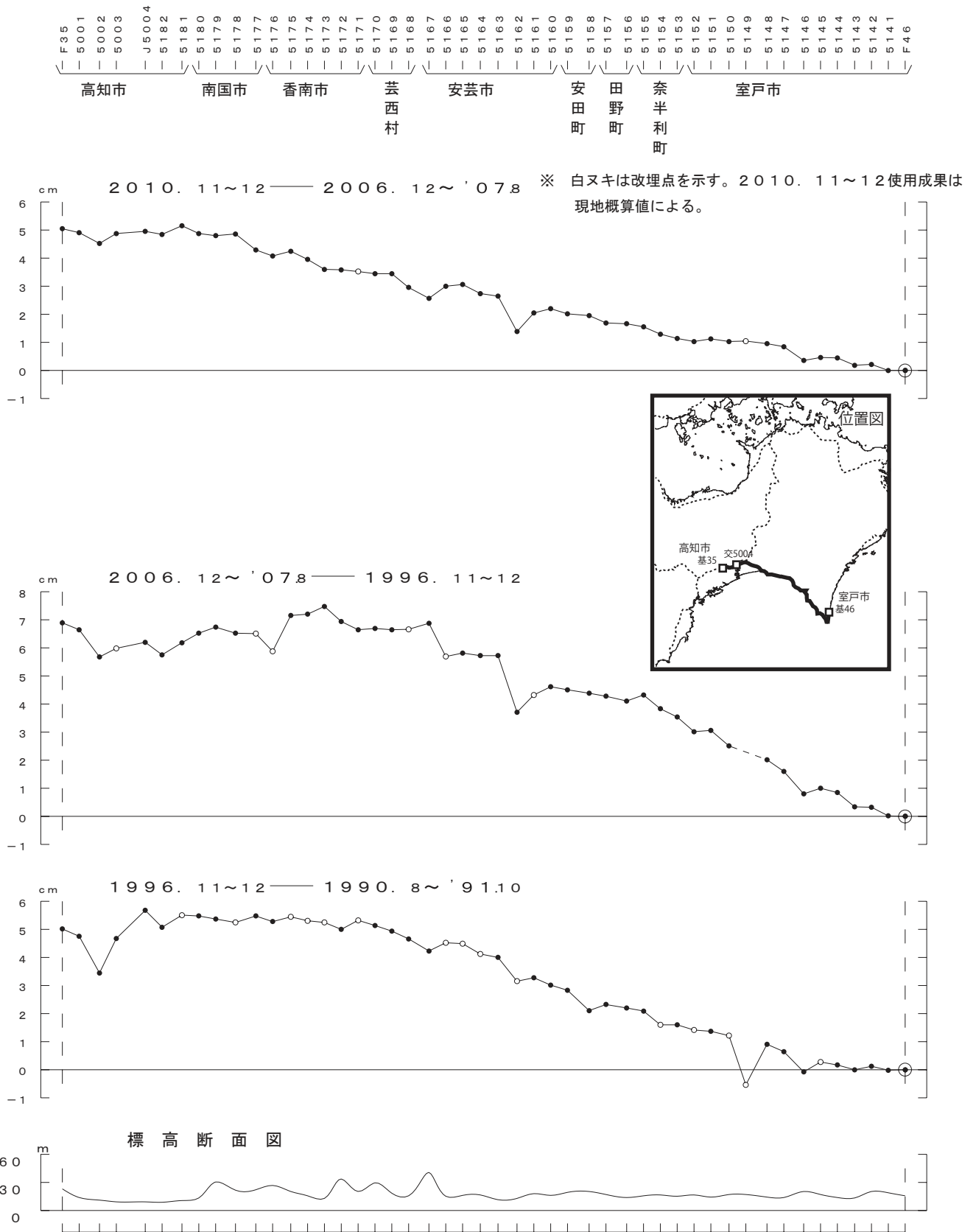
参 考 文 献

- 1) 国土地理院, 2004, 中国・四国・九州地方の地殻変動, 地震予知連絡会会報, 71, 680-694.
- 2) 国土地理院, 2004, 中国・四国・九州地方の地殻変動, 地震予知連絡会会報, 72, 552-574.

- 3) 国土地理院, 2005, 中国・四国・九州地方の地殻変動, 地震予知連絡会会報, 73, 569-574.
- 4) 国土地理院, 2005, 中国・四国・九州地方の地殻変動, 地震予知連絡会会報, 74, 409-439.
- 5) 国土地理院, 2006, 四国・九州地方の地殻変動, 地震予知連絡会会報, 75, 509-516.
- 6) 国土地理院, 2006, 近畿・四国地方の地殻変動, 地震予知連絡会会報, 76, 496-509.
- 7) 国土地理院, 2007, 中国・九州地方の地殻変動, 地震予知連絡会会報, 77, 413-421.
- 8) 国土地理院, 2007, 中国・九州地方の地殻変動, 地震予知連絡会会報, 78, 527-532.
- 9) 国土地理院, 2008, 中国・九州地方の地殻変動, 地震予知連絡会会報, 79, 567-573.
- 10) 国土地理院, 2008, 中国・九州地方の地殻変動, 地震予知連絡会会報, 80, 467-471.
- 11) 国土地理院, 2009, 中国・九州地方の地殻変動, 地震予知連絡会会報, 82, 423-428.
- 12) 国土地理院, 2010, 中国・九州地方の地殻変動, 地震予知連絡会会報, 83, 460-461.
- 13) 国土地理院, 2010, 中国・九州地方の地殻変動, 地震予知連絡会会報, 84, 384-397.
- 14) 国土地理院, 2011, 中国・九州地方の地殻変動, 地震予知連絡会会報, 85, 318-332.

高知市～室戸市間の上下変動

室戸岬の沈降が見られる。

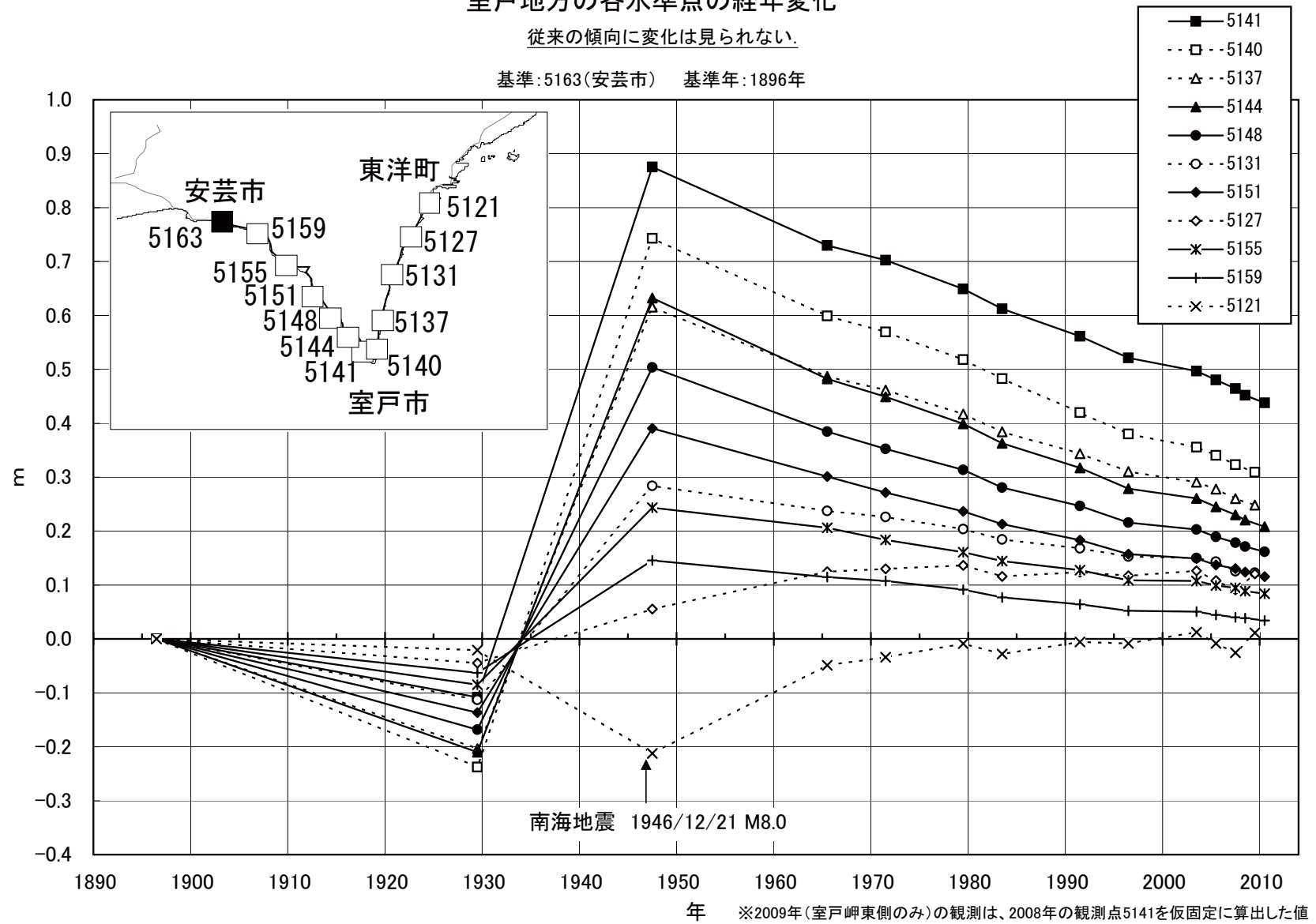


第1図 高知市～室戸市間の上下変動
Fig. 1 Results of leveling survey from Kochi city to Muroto City.

室戸地方の各水準点の経年変化

従来の傾向に変化は見られない。

基準: 5163(安芸市) 基準年: 1896年



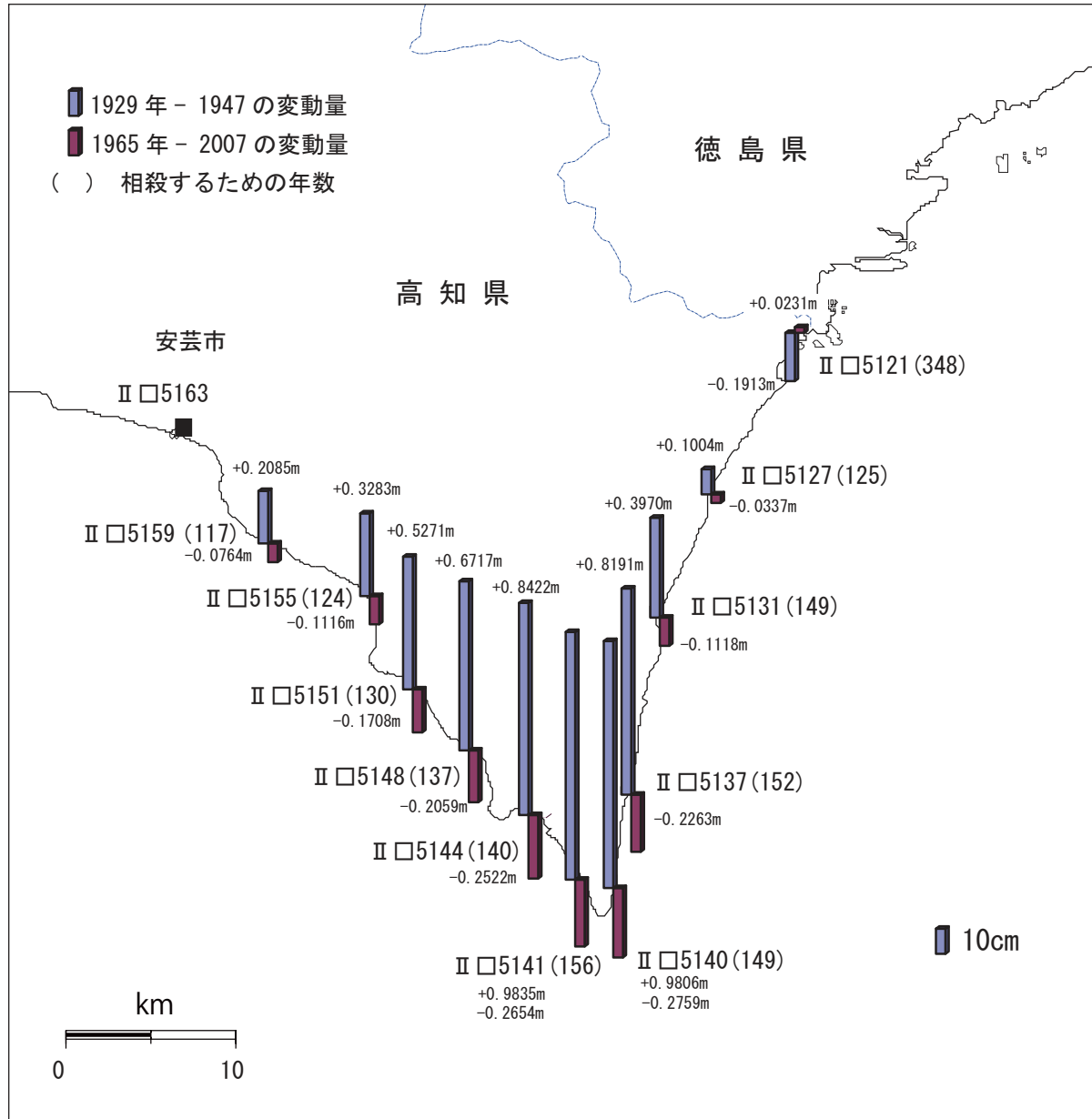
第2図 水準点 5163 (安芸市) を基準とした室戸岬周辺の各水準点の高さの上下変動時系列

Fig. 2 Time series of height changes of benchmarks along the leveling route on the coast of Muroto Peninsula from BM5163(Aki) to BM5141(Muroto) referred to BM5163(Aki).

南海地震の地震時地殻変動と地震間の変動速度の比

室戸岬周辺では、水準測量により南海地震(1946年)に伴う隆起と地震間の沈降が観測されている。ここでは、1929-1947年の変動を地震時の変動、1965-2007年の変動を平均的な地震間の変動として、地震時の隆起が地震間の沈降によって相殺される年数を調べた。下の図及び表に示したように、相殺するための年数は、水準点5141で156年と最長となり、岬の先端部で大きくなる傾向があった。

この傾向は、地震時のアスペリティに近い室戸岬周辺では、地震間のひずみが地震時に大きく解消されるのに対し、そこから離れるにつれて地震間のひずみが地震時だけでなく余効変動でも解消されていることを表している可能性がある。



	5159	5155	5151	5148	5144	5141	5140	5137	5131	5127	5121
1929-1947の変動量(m)	0.2085	0.3283	0.5271	0.6717	0.8422	0.9835	0.9806	0.8191	0.3970	0.1004	-0.1913
1965-2007の変動量(m)	-0.0746	-0.1116	-0.1708	-0.2059	-0.2522	-0.2654	-0.2759	-0.2263	-0.1118	-0.0337	0.0231
相殺するための年数	117	124	130	137	140	156	149	152	149	125	348

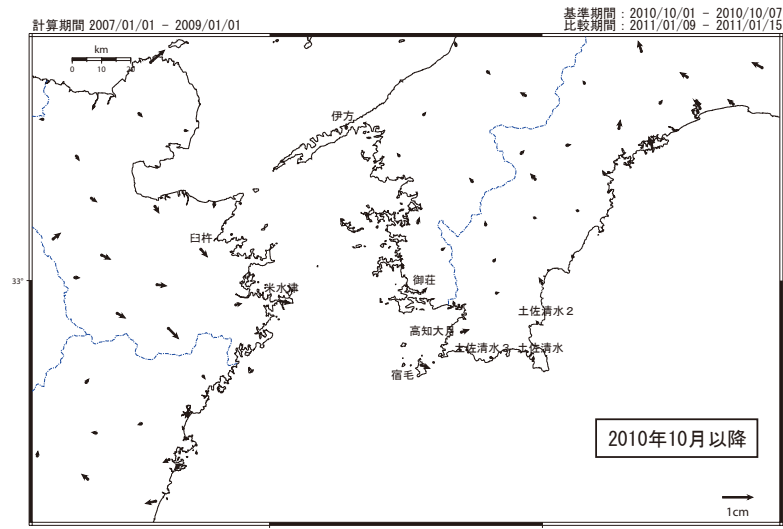
第3図 南海地震の地震時地殻変動と地震間の変動速度の比

Fig. 3 Ratio of interseismic displacement rate and coseismic displacement of the 1946 Nankai earthquake.

豊後水道周辺の非定常的な地殻変動 (1)

豊後水道周辺で2009年秋頃から見られている非定常的な地殻変動は、
全般的にはほぼ収まったように見える。

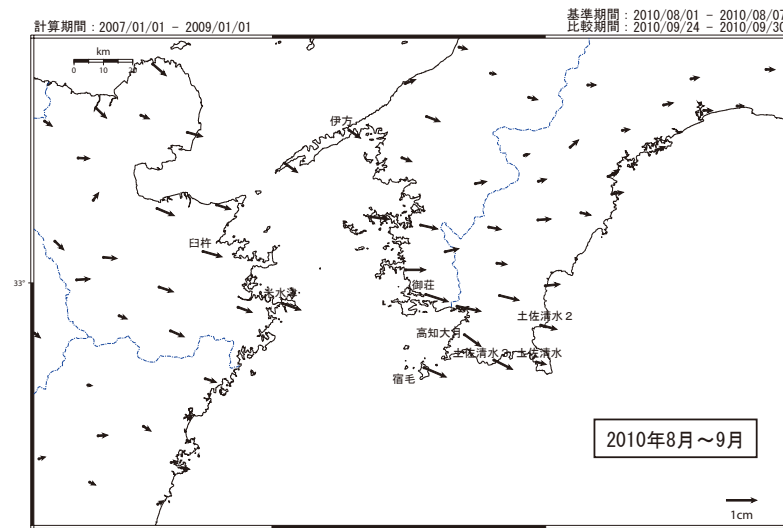
1次トレンド・年周・半年周成分除去後 変動ベクトル図 (水平) (2010年10月1日~2011年1月15日)



[F3最終解]

☆観測局: 三隅 (950388)

1次トレンド・年周・半年周成分除去後 変動ベクトル図 (水平) (2010年8月1日~2010年9月30日)



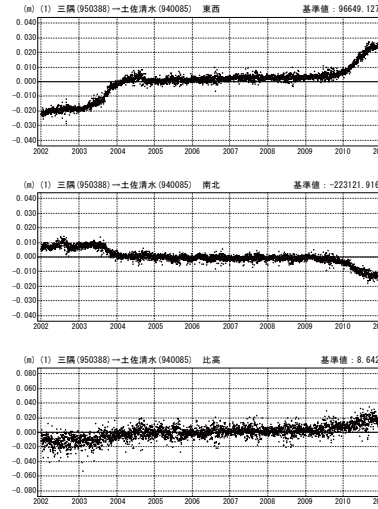
[F3最終解]

☆観測局: 三隅 (950388)

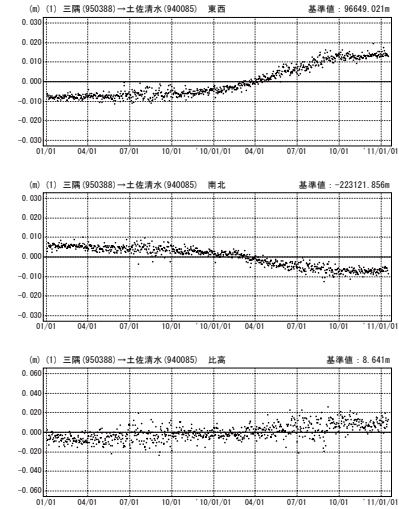
豊後水道周辺の非定常的な地殻変動 (2)

豊後水道周辺で2009年秋頃から見られている非定常的な地殻変動は、
全般的にはほぼ収まったように見える。

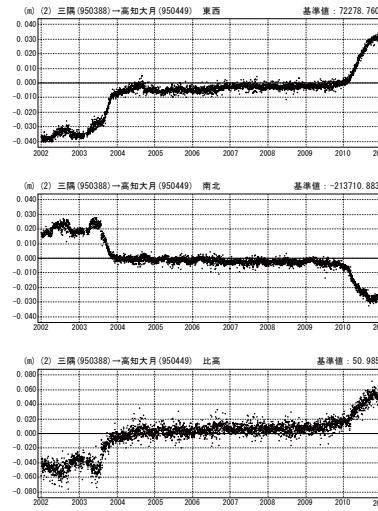
1次トレンド・年周・半年周成分除去後グラフ
期間: 2002/01/01~2011/01/15 JST



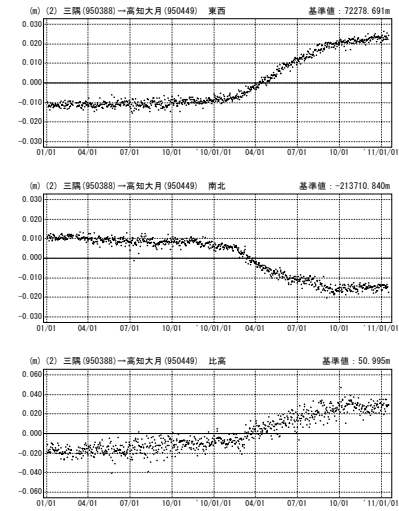
1次トレンド・年周・半年周成分除去後グラフ
期間: 2009/01/01~2011/01/15 JST 計算期間: 2007/01/01~2009/01/01



1次トレンド・年周・半年周成分除去後グラフ
期間: 2002/01/01~2011/01/15 JST



1次トレンド・年周・半年周成分除去後グラフ
期間: 2009/01/01~2011/01/15 JST 計算期間: 2007/01/01~2009/01/01



● ---[F3:最終解]

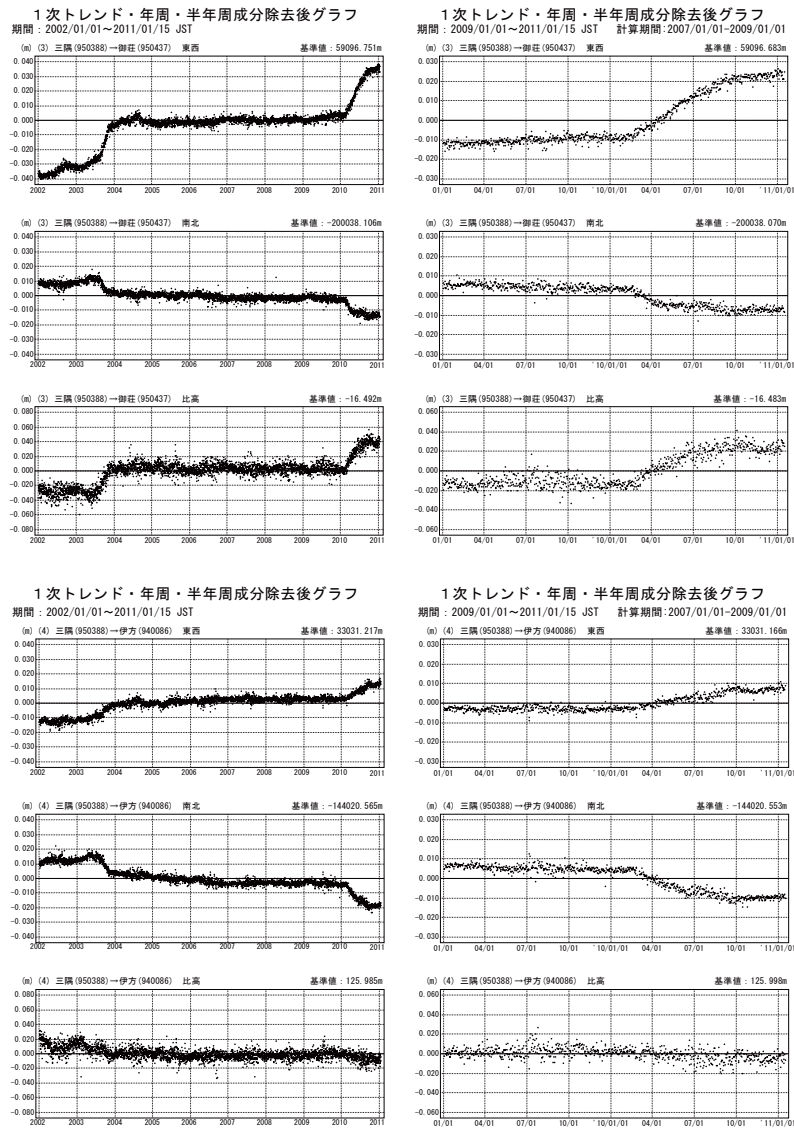
第4図 豊後水道周辺の非定常的な地殻変動

Fig. 4 Transient horizontal and vertical deformation in the Bungo channel area (1/4).

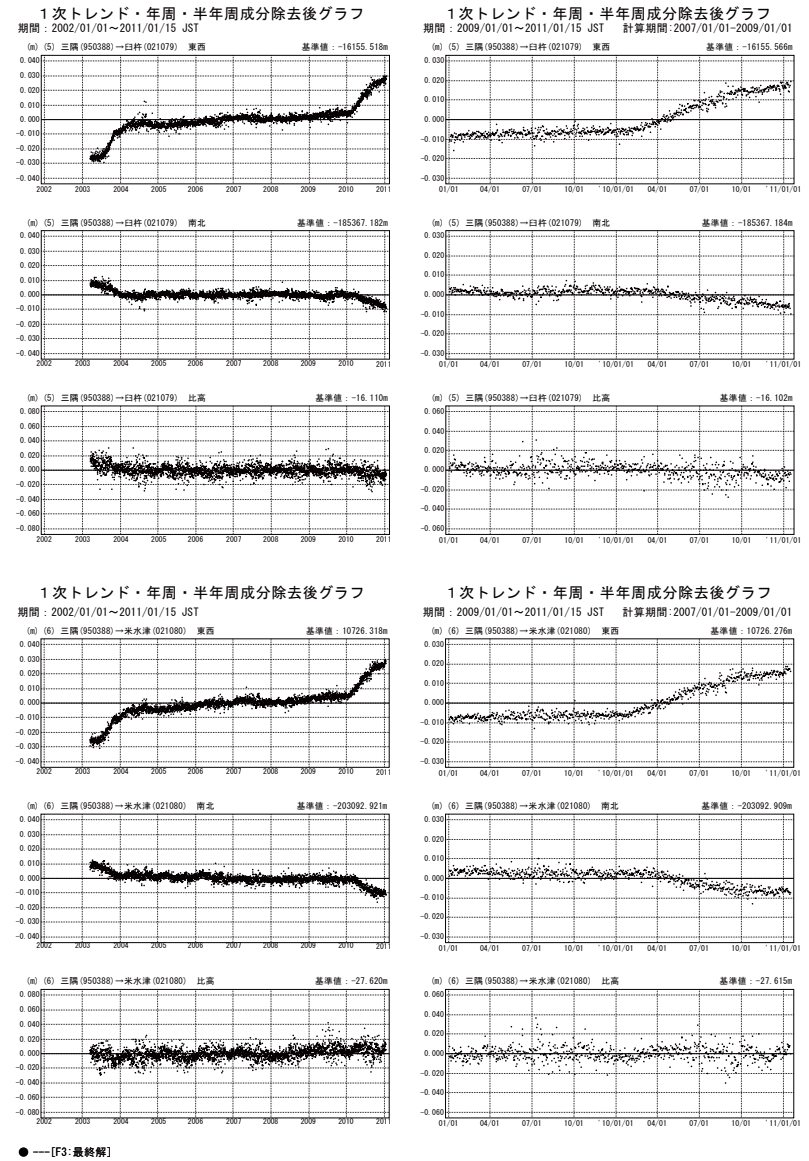
第5図 豊後水道周辺の非定常的な地殻変動

Fig. 5 Transient horizontal and vertical deformation in the Bungo channel area (2/4).

豊後水道周辺の非定常的な地殻変動（3）



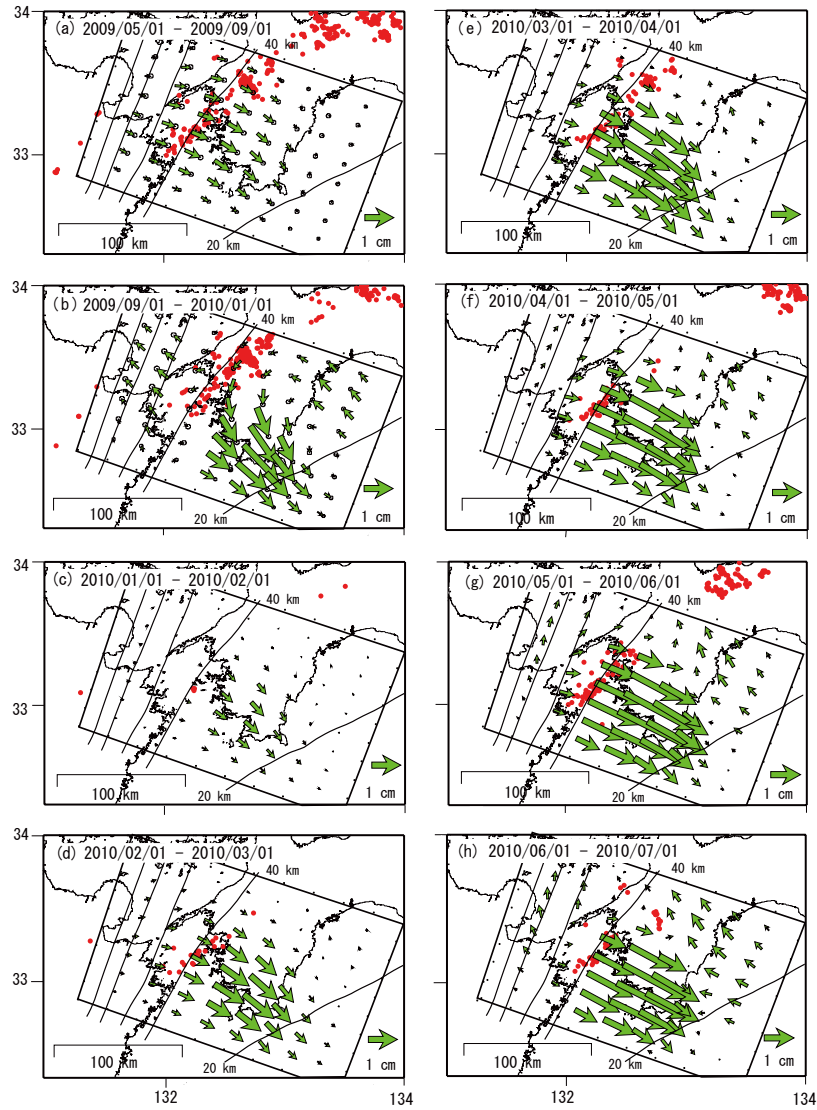
豊後水道周辺の非定常的な地殻変動（4）



第6図 豊後水道周辺の非定常的な地殻変動
Fig. 6 Transient horizontal and vertical deformation in the Bungo channel area (3/4).

第7図 豊後水道周辺の非定常的な地殻変動
Fig. 7 Transient horizontal and vertical deformation in the Bungo channel area (4/4).

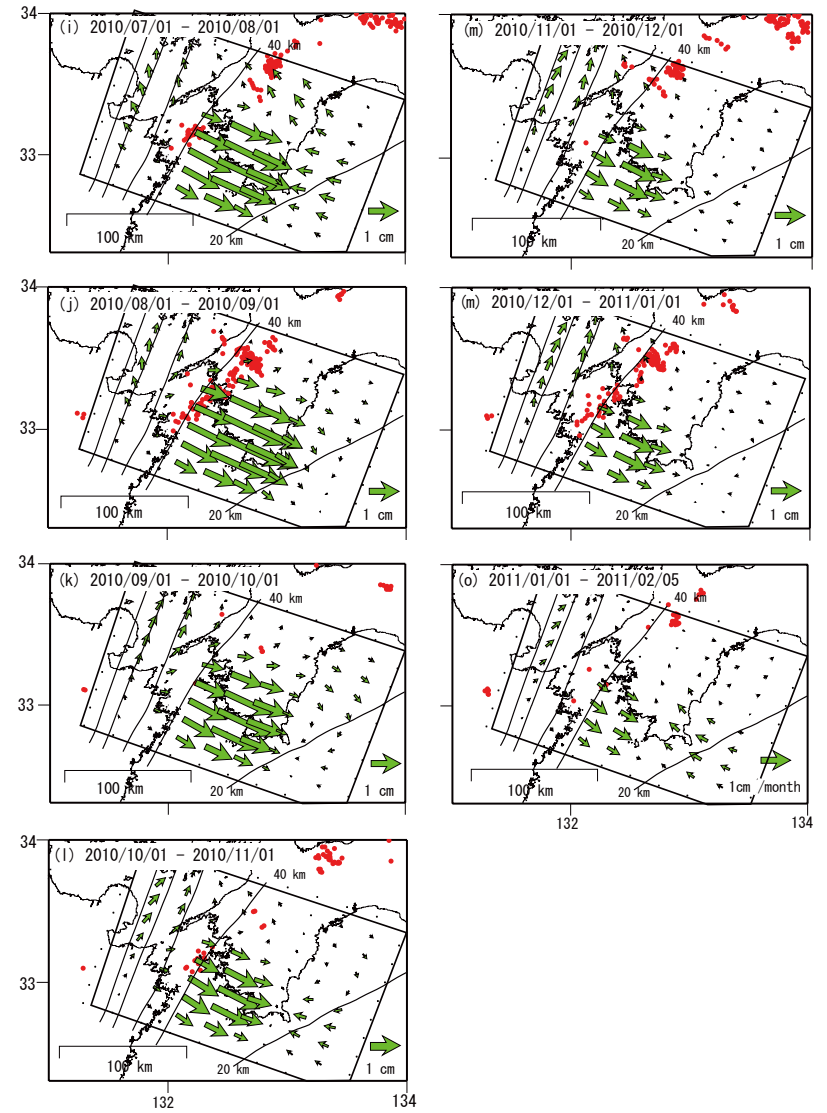
豊後水道・四国南西部の推定プレート間すべり分布 (1)



※ 赤丸は低周波地震（気象庁データより）

第8図 豊後水道・四国南西部の推定プレート間すべり分布
Fig. 8 Estimated slip distribution of Bungo channel and south-western Shikoku district (1/2).

豊後水道・四国南西部の推定プレート間すべり分布 (2)



※ 赤丸は低周波地震（気象庁データより）

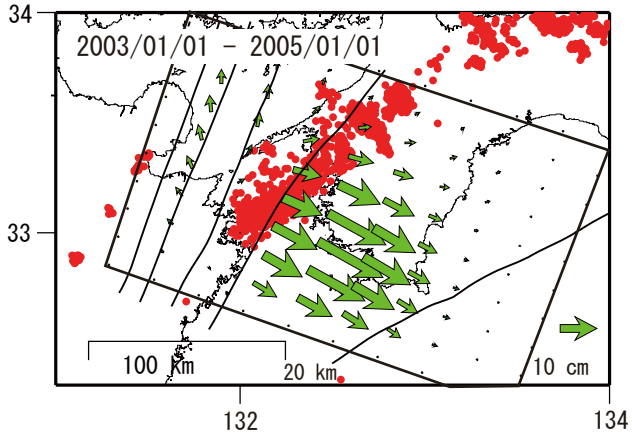
第9図 豊後水道・四国南西部の推定プレート間すべり分布
Fig. 9 Estimated slip distribution of Bungo channel and south-western Shikoku district (2/2).

豊後水道SSE 2003年と2010年との比較

2010年のすべりと積算モーメントは2003年とほぼ同程度となっている。

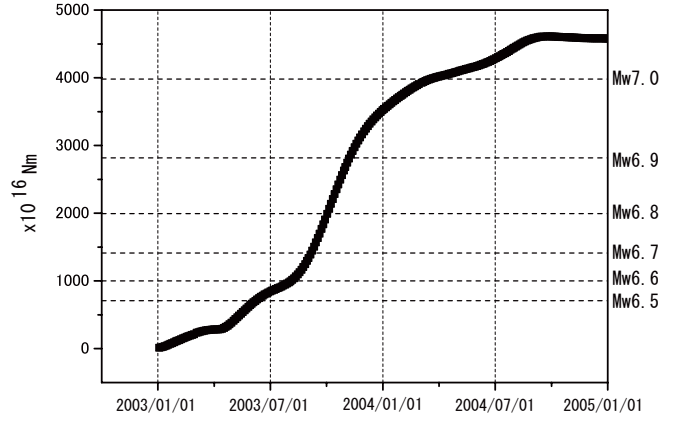
推定プレート間すべり分布

2003年



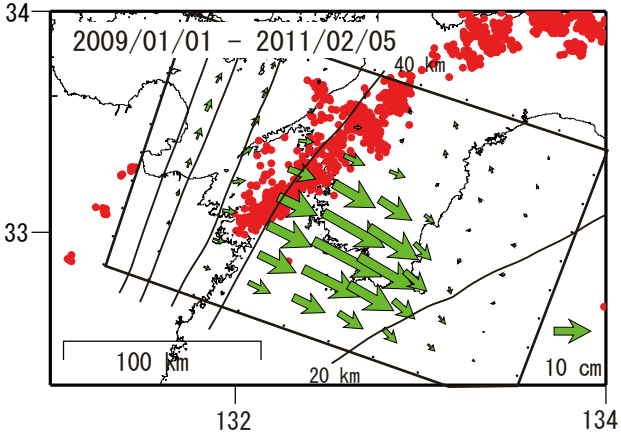
推定すべりの積算モーメント

2003年

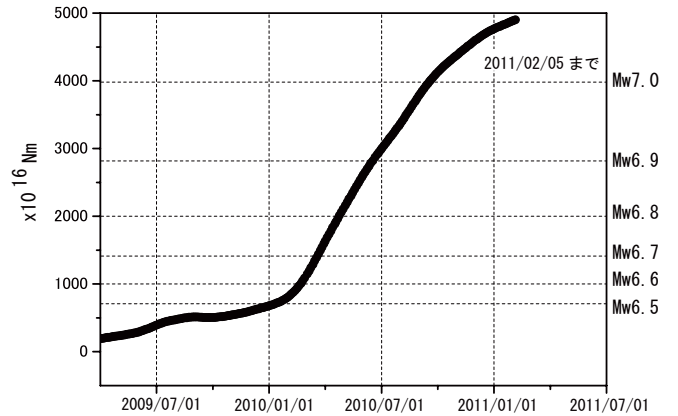


※ 2004年9月5日に発生した紀伊半島南東沖の地震時の地殻変動の影響を取り除いている。

2010年



2010年

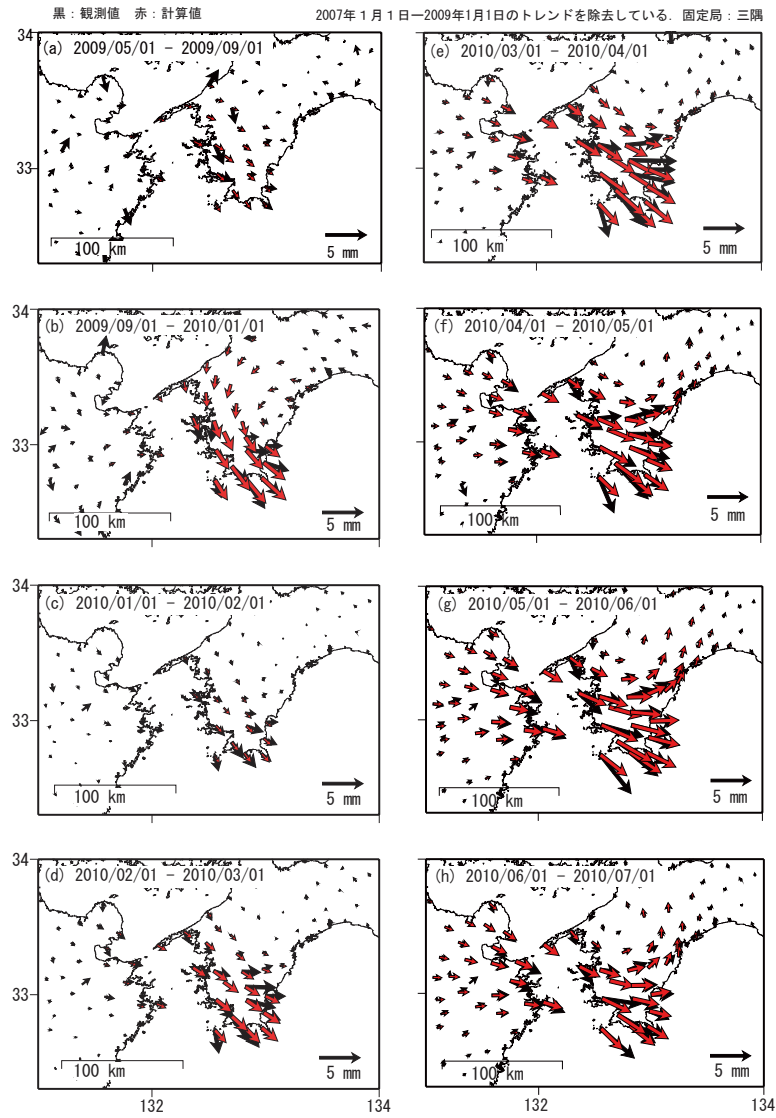


※ 赤丸は低周波微動（気象庁データより）

第10図 豊後水道2003年と2010年の比較

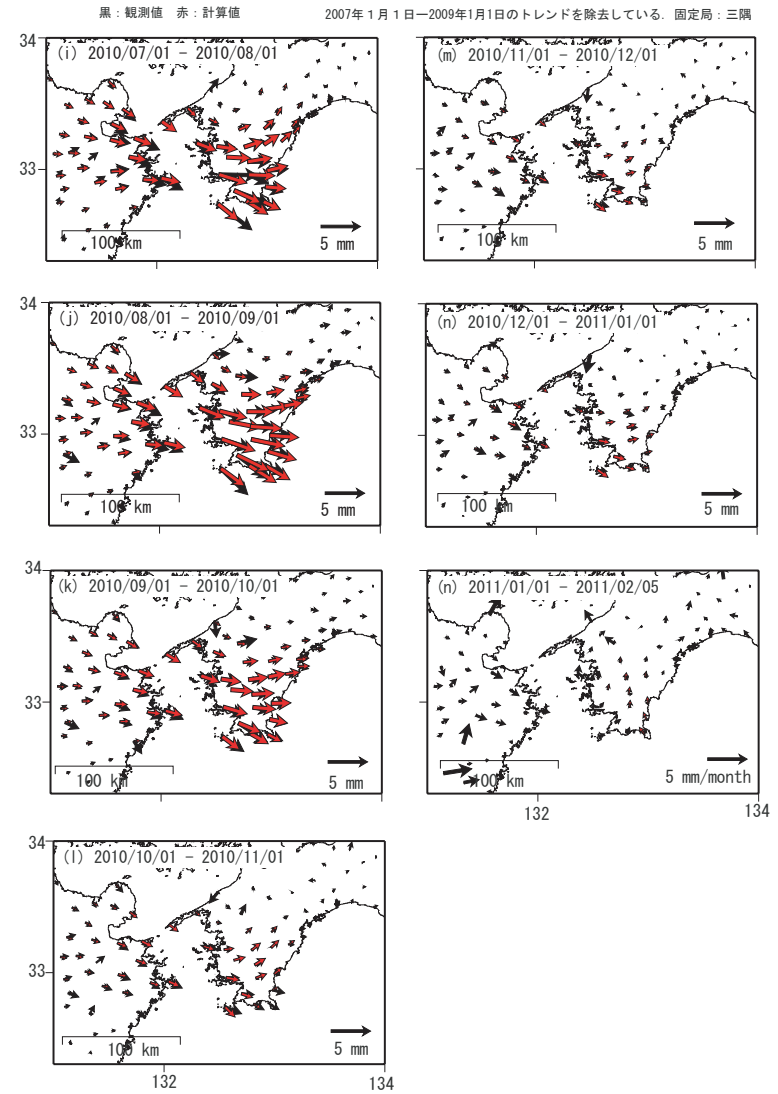
Fig. 10 Comparison between the 2003 and the 2010 Bungo channel slow slip.

水平地殻変動 観測値と計算値の比較 (1)



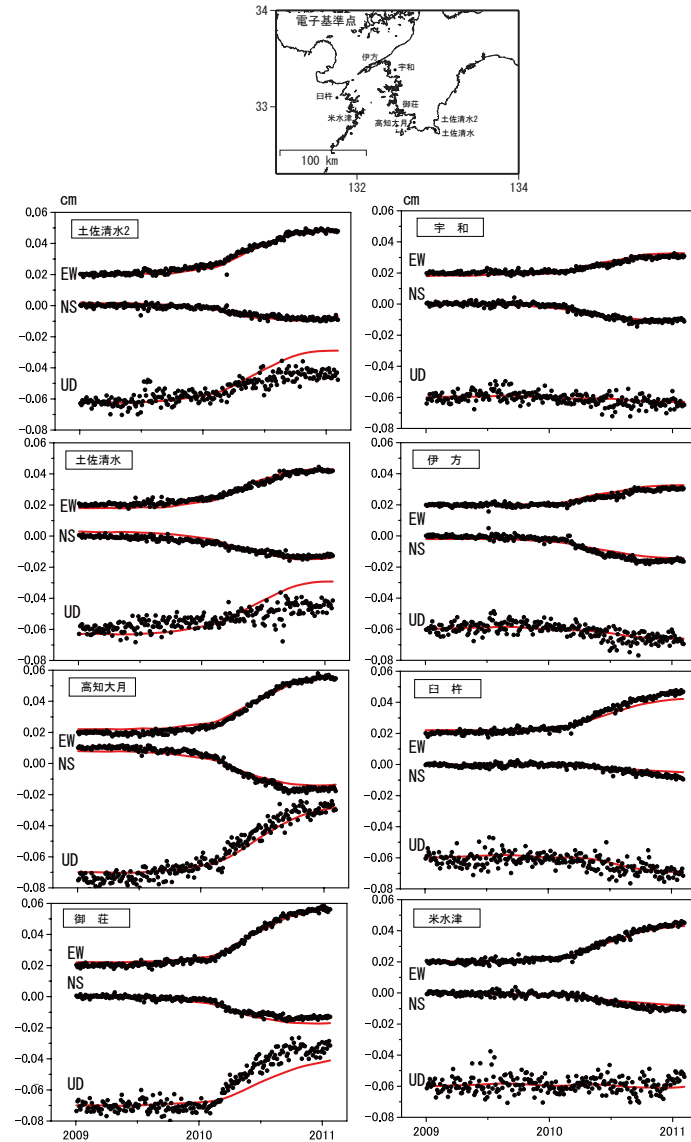
第11図 水平地殻変動 観測値と計算値の比較
Fig. 11 Comparisons of horizontal displacements between GPS observation and model calculation (1/2).

水平地殻変動 観測値と計算値の比較 (2)



第12図 水平地殻変動 観測値と計算値の比較
Fig. 12 Comparisons of horizontal displacements between GPS observation and model calculation (2/2).

座標時系列の観測値と計算値との比較

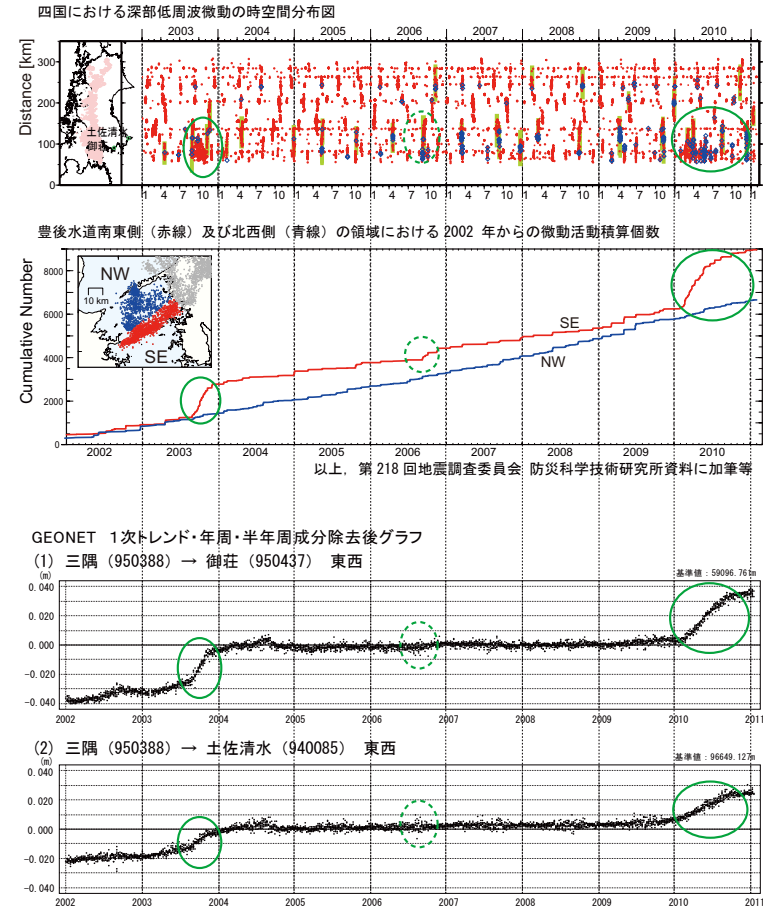


・ 2007年1月1日-2009年1月1日のトレンドを除去している
 ・ 黒丸が観測値、赤線が計算値。EW、NS、UDは東西、南北、上下変動を示す。

第13図 座標時系列 観測値と計算値の比較
 Fig. 13 Comparisons of time series plots between GPS observation and model calculation.

豊後水道周辺の深部低周波微動活動と非定常的な地殻変動

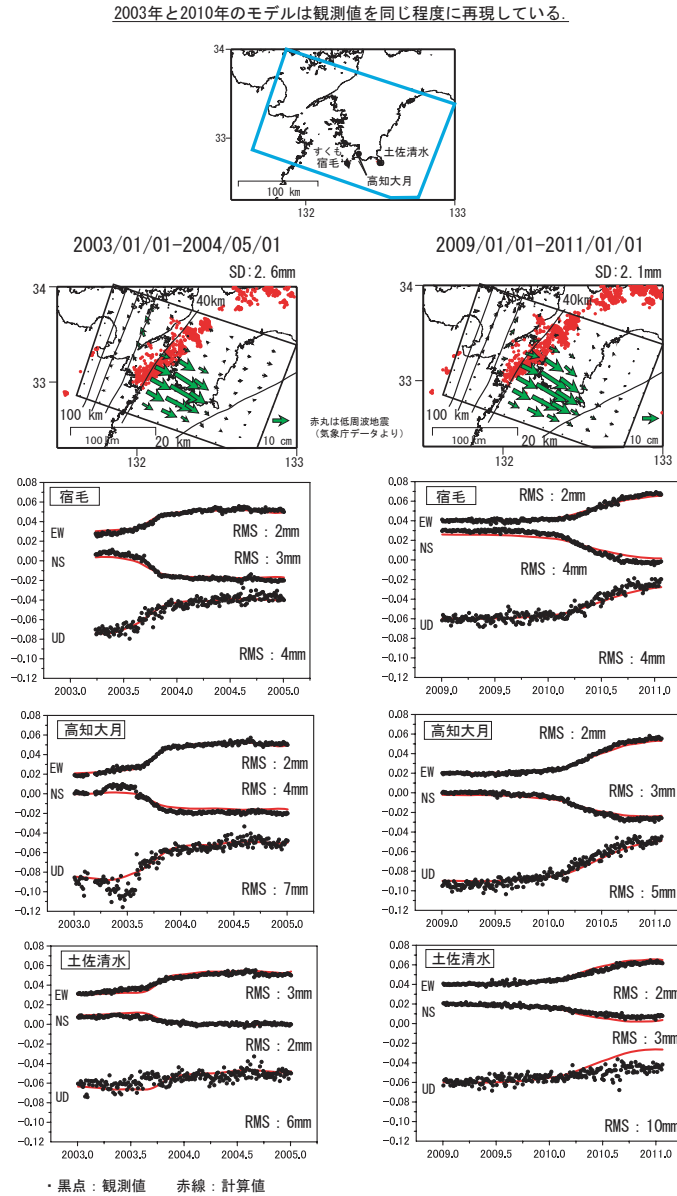
2003年後半と2010年前半の非定常地殻変動が明瞭な時期に四国西部の南東側に継続的な深部低周波微動の活発化が見られる。2010年10月頃には地殻変動はほぼ終息した。



以上、第18回地震調査委員会 防災科学技術研究所資料に加筆等

第14図 豊後水道周辺の深部低周波微動活動と非定常な地殻変動
 Fig. 14 Low-frequency tremors and transient crustal deformation in the Bungo channel area.

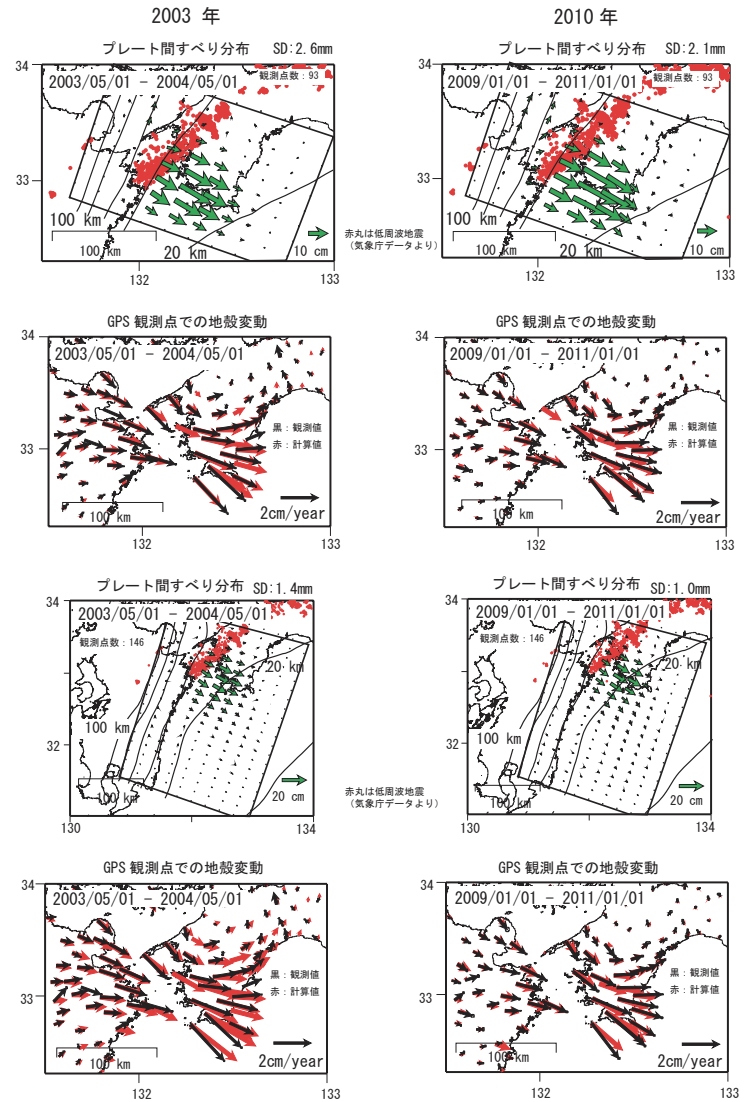
豊後水道スロースリップに伴う足摺岬周辺の観測値と計算値



第15図 豊後水道スロースリップに伴う足摺岬周辺の観測値と計算値
 Fig. 15 Observed and calculated displacements near cape Ashizuri associated with the Bungo slow slip event.

異なるモデル領域を用いた場合の推定結果の比較

モデル領域を拡大すると、わずかにすべり域が南部に広がり観測値をよりよく再現できる。



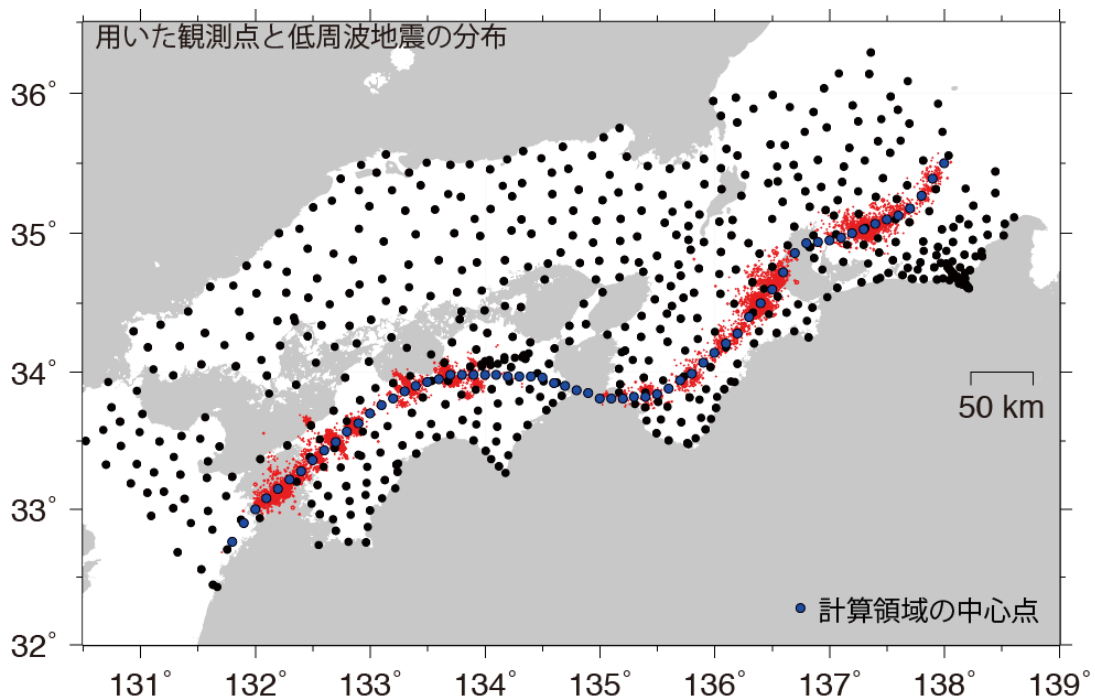
第16図 異なるモデル領域を用いた場合の推定結果の比較
 Fig. 16 Comparison between two different geometry models.

GEONET によって検出された短期的スロースリップイベント (SSE) に伴う地殻変動

第 188 回地震予知連絡会重点検討課題で報告したように¹⁾, GEONET でも規模の大きな短期的 SSE の検出は可能であることが明らかになった. ここでは, 短期的 SSE に伴う地殻変動を検出するための解析手法に改良を加え, 地殻変動の発生地域を特定できるようにした解析結果について報告する. 解析対象領域は, 従来報告した紀伊半島から東海地方に中国・四国地方を加え, 解析対象期間についても 1996 年 3 月 20 日から 2011 年 3 月 10 日までとして, GEONET 観測点の日座標値 (F3) を用いて, 短期的 SSE に伴う地殻変動の検出を行った. プレート収束方向とみなした $N50^{\circ}W$ 成分の時系列に対してステップを仮定した場合と仮定しない場合の AIC の差について, 時間と位置 (東経) に対してプロットしたところ, ステップを仮定した方が良く考えられる時間と位置が散発的に見受けられた. これらの AIC が大きな期間について, 目視により短期的 SSE に特徴的な変動パターンが認められるかどうか確認したところ, 15 年間に少なくとも 62 回の短期的 SSE と思われる変動パターンを確認した.

参考文献

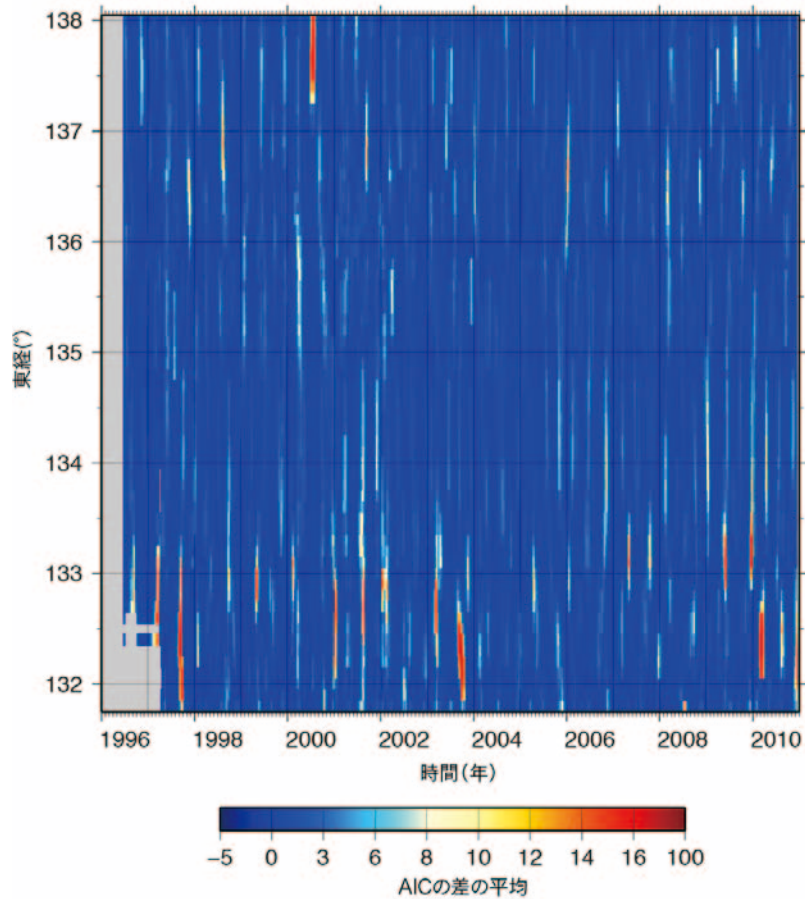
- 1) 国土院 (2011), GPS による短期的スロースリップイベント (SSE) 検出の可能性, 地震予知連絡会会報, 85, 510-516.



第 1 図 用いた観測点の分布及び AIC を計算した領域の中心点. 赤点は, 気象庁一元化震源による低周波地震の震央. $N50^{\circ}W$ 方向に長さ 160km, 幅 50km の領域をとって, AIC の計算を行った.

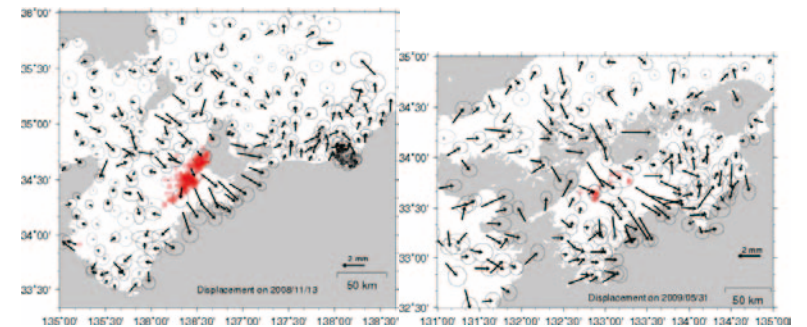
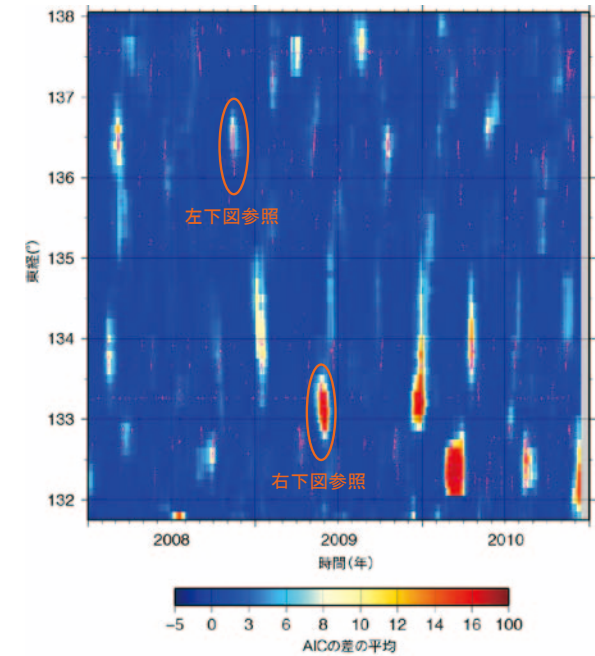
第 17 図 用いた観測点の分布及び AIC を計算した領域の中心点. 赤点は, 気象庁一元化震源による低周波地震の震央. $N50^{\circ}W$ 方向に長さ 160km, 幅 50km の領域をとって, AIC の計算を行った

Fig. 17 Distribution of used GPS sites and central points for areas to calculate AIC. Red points are epicenters of low-frequency earthquakes determined by JMA.



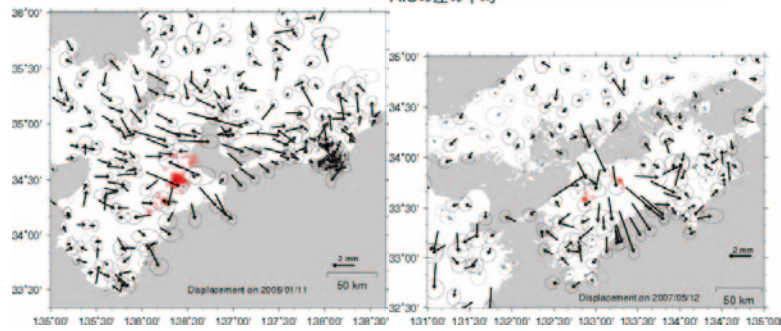
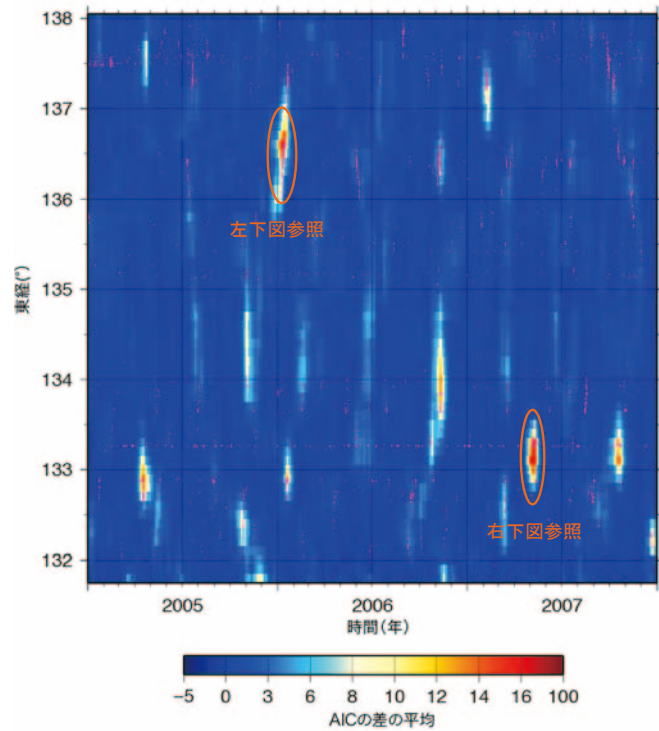
第2図 ステップを仮定した場合と仮定しない場合の1次関数をフィッティングしたときのAICの差。AICの差が大きい場合ほど、ステップを仮定した方がよいことを表す。四国西部や紀伊半島北部などに多数のイベントが見られる。

第18図 ステップを仮定した場合と仮定しない場合の1次関数をフィッティングしたときのAICの差。AICの差が大きい場合ほど、ステップを仮定した方がよいことを表す。四国西部や紀伊半島北部などに多数のイベントが見られる。
 Fig. 18 Difference of AIC between linear functions with and without a step. A large AIC difference means that the function with a step is better. Many events in western Shikoku and northern Kii Peninsula can be recognized.

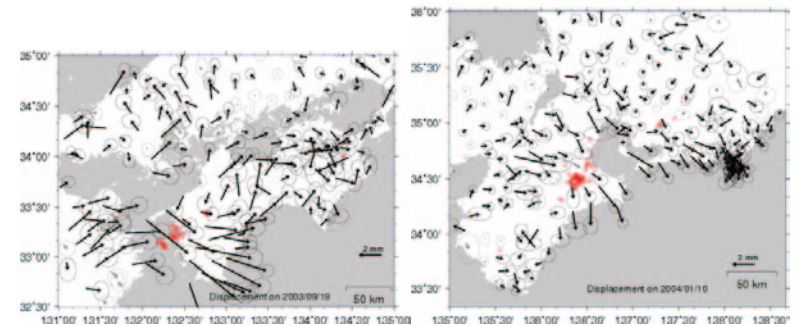
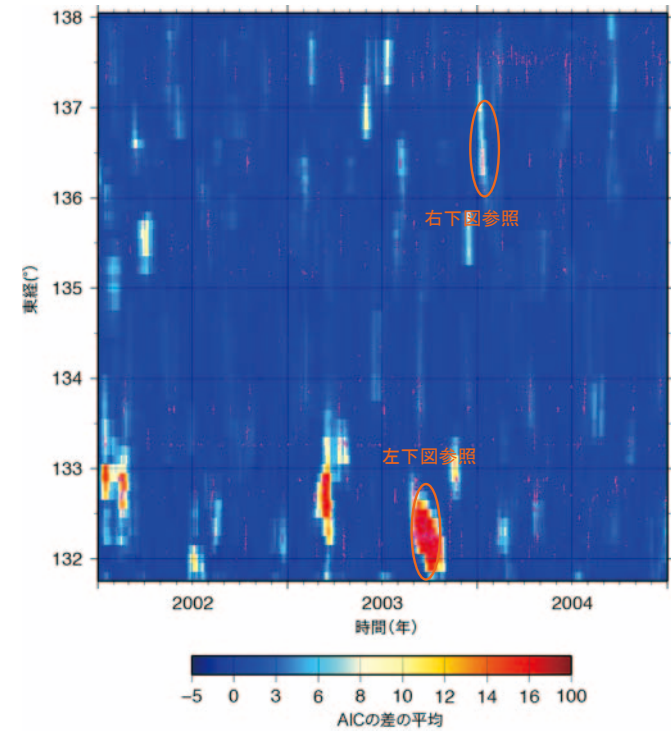


第3図 2008-2010年のAICの差(上)と特徴的な期間における水平変動ベクトル図(下)。上図の紫点及び下図の赤丸は、気象庁一元化震源による低周波地震。下図の低周波地震は、図中に示した変動日の前後5日間分を表示した。

第19図 2008-2010年のAICの差(上)と特徴的な期間における水平変動ベクトル図(下)。上図の紫点及び下図の赤丸は、気象庁一元化震源による低周波地震。下図の低周波地震は、図中に示した変動日の前後5日間分を表示した。
 Fig. 19 AIC difference for 2008-2010 (Upper figure) and horizontal displacement vectors for selected periods (lower figure). Purple dots in the upper figure and red dots in the lower figures are epicenters of low-frequency earthquakes determined by JMA.



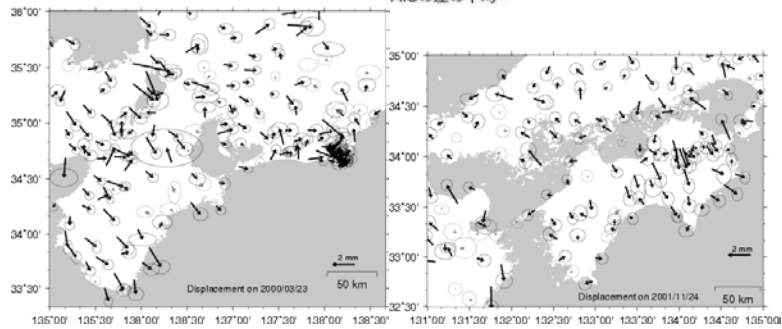
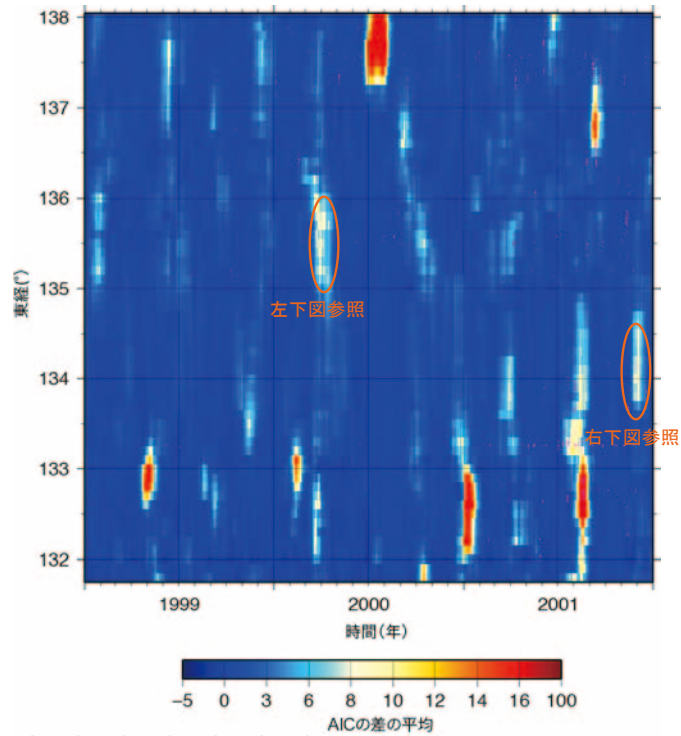
第4図 2005-2007年のAICの差(上)と特徴的な期間における水平変動ベクトル図(下)。図の説明は第3図と同じ。



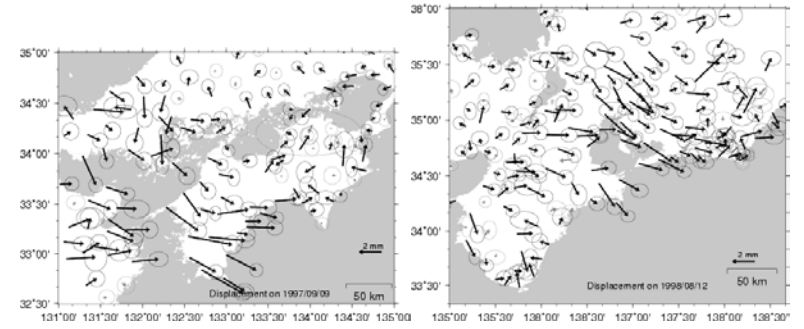
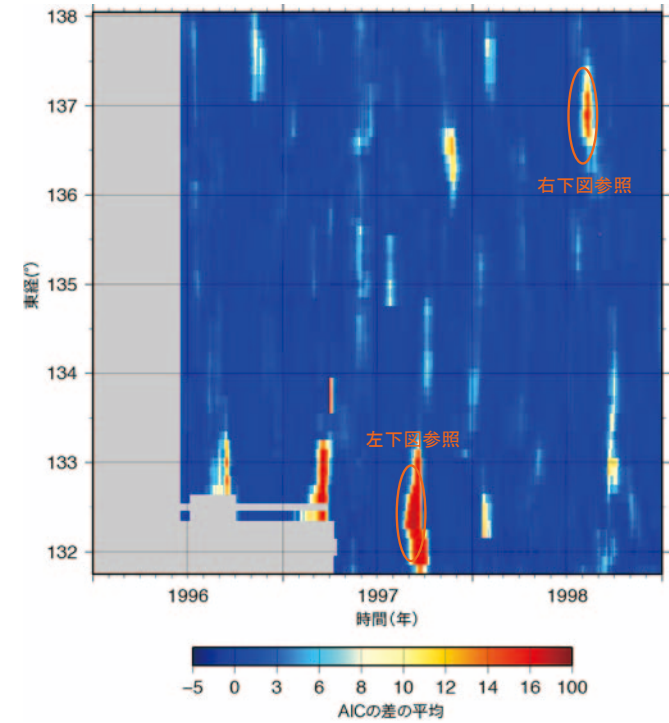
第5図 2002-2004年のAICの差(上)と特徴的な期間における水平変動ベクトル図(下)。図の説明は第3図と同じ。

第20図 2005-2007年のAICの差(上)と特徴的な期間における水平変動ベクトル図(下)。図の説明は第19図と同じ。
 Fig. 20 AIC difference for 2005-2007 (Upper figure) and horizontal displacement vectors for selected periods (lower figure). Purple dots in the upper figure and red dots in the lower figures are epicenters of low-frequency earthquakes determined by JMA.

第21図 2002-2004年のAICの差(上)と特徴的な期間における水平変動ベクトル図(下)。図の説明は第19図と同じ。
 Fig. 21 AIC difference for 2002-2004 (Upper figure) and horizontal displacement vectors for selected periods (lower figure). Purple dots in the upper figure and red dots in the lower figures are epicenters of low-frequency earthquakes determined by JMA.



第6図 1999-2001年のAICの差(上)と特徴的な期間における水平変動ベクトル図(下)。図の説明は第3図と同じ。



第7図 1999-2001年のAICの差(上)と特徴的な期間における水平変動ベクトル図(下)。図の説明は第3図と同じ。

第22図 1999-2001年のAICの差(上)と特徴的な期間における水平変動ベクトル図(下)。図の説明は第19図と同じ。
 Fig. 22 AIC difference for 1999-2001 (Upper figure) and horizontal displacement vectors for selected periods (lower figure). Purple dots in the upper figure and red dots in the lower figures are epicenters of low-frequency earthquakes determined by JMA.

第23図 1996-1998年のAICの差(上)と特徴的な期間における水平変動ベクトル図(下)。図の説明は第19図と同じ。
 Fig. 23 AIC difference for 1996-1998 (Upper figure) and horizontal displacement vectors for selected periods (lower figure). Purple dots in the upper figure and red dots in the lower figures are epicenters of low-frequency earthquakes determined by JMA.