

東海地方のプレート間すべり推定ツールの開発

中村 浩二*・竹中 潤*

The support software for estimation of interplate Slip

Koji NAKAMURA and Jun TAKENAKA

(Received November 13, 2003 : Accepted January 27, 2004)

1. はじめに

現在までの地震学の知見によれば、地震の発生前には、①断層面での応力集中、②断層面の一部の破壊開始（破壊核の形成）③破壊核の成長、④破壊核が臨界の大きさに達して加速的に破壊成長（地震発生）という過程があると考えられている。プレスリップというのは、この②、③の段階で断層面の一部がゆっくりすべる現象のことを言う。

現在の地震学と観測技術のレベルでは、このプレスリップの現象を高感度の地殻変動観測で検出することができる場合のみ、東海地震の直前予知は可能であると考えられている。そのために、東海地域には高感度の体積ひずみ計、傾斜計、三成分ひずみ計などが設置され、気象庁は24時間体制でこれらの観測データを監視している。

ひずみや傾斜はプレスリップ以外の要因（地震の断層運動による変動、潮汐、降水、工事、機器故障等）でも常に変化している。したがって、東海地域の地殻変動観測データに変化が現れた場合には、その変動がプレスリップによるものか、他の要因によるものかを判定する必要がある。地震による影響については、周辺の地震活動状況から、影響を及ぼすようなある程度大きな地震の有無を調査することによって判断できる。潮汐や降水などによる影響については、理論潮汐による補正や降水応答補正などを行って除去することが可能である。これら補正可能な要因を取り除いた上で、なお変動が認められる場合には、それがプレスリップである可能性を検討する必要がある。なお、工事・機器故障などの要因については、一般的に現地調査等が

必要であるため、変動が認知された段階で即座に判断することはできない。したがって、以下に示すプレスリップの検討と同時進行で確認作業が行われることになる。

東海地震の場合は、想定震源域がおかれているフィリピン海プレートのモデル（原田ほか,1998）が既に設定されており、そのプレート上ですべりが起きた場合に、各地殻変動観測点でどのような変化が起きるかを理論計算することができる。したがって、何か地殻変動データに異常な変動が見られた場合、東海地震の想定震源断層上のいろいろな場所にすべりを仮定して、観測された変動を説明できるプレート間のすべりがないかどうかを検索することができる。その検索作業の結果、想定震源断層上に観測データの変動と整合するすべりが見つかった場合には、実際にプレート間ですべりが起きている可能性が高いことになる。一方で、観測データの変動と一致するプレート間のすべりの例が無い場合は、その変動は他の要因によるものであると判断できることになる。

気象庁では、この考え方に基づき、東海地震の想定断層上に設定した一定間隔の格子点位置ですべりが起きた場合に各観測点で観測される地殻変動をあらかじめ計算し、プレート間すべりと地殻変動の対応をデータベース化した。そして、観測された変動からこのデータベースを検索するツール（第一世代ツール）の運用を2002年6月から始めた。さらに、2003年6月からは、より検索条件の設定の自由度を高めるなど機能強化をしたツール（第二世代ツール）の運用を始めた。

*地震火山部地震予知情報課

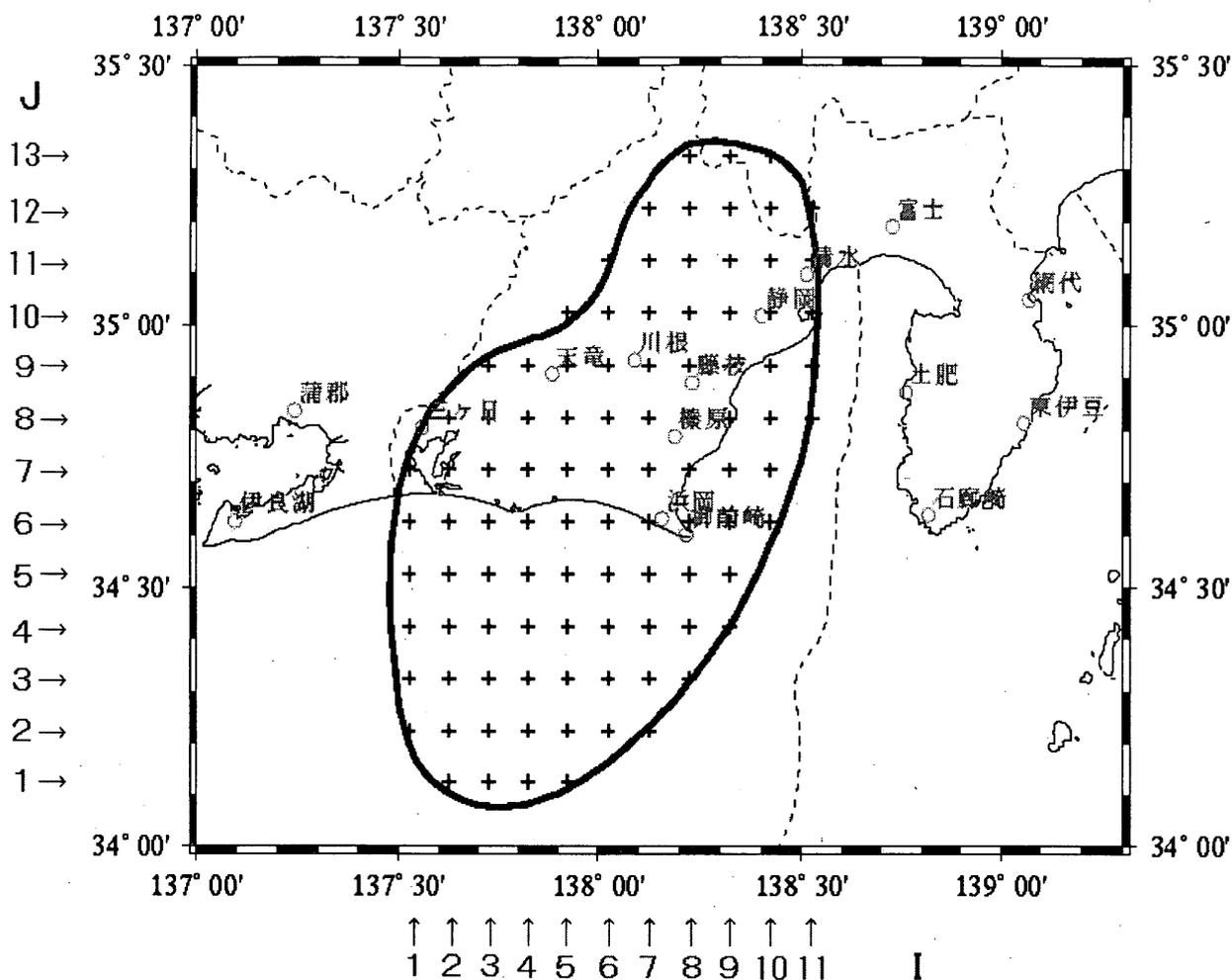


Fig.1 データベースに登録された格子点

2. 第一世代のプレート間すべり推定ツール

第一世代のプレート間すべり推定ツールは、あらかじめ計算されたプレート間すべりと地殻変動との対応データベースと、それを検索する Excel のマクロ機能で構成される。データベースは、Fig.1 に示す想定震源域内の格子点上で、Mw5.5,6.0,6.5 の 3 つの規模ですべりを生じさせた場合の地殻変動を、半無限弾性体の理論地殻変動の計算方法 (Okada,1992) を用いて計算し、東海地域の体積ひずみ計 (16 点) にそれぞれどのような変化が現れるかを算出したものである。

このデータベースを Excel のマクロ機能を使って検索する。検索条件は、各観測点での体積ひずみ変化の

最小値と最大値で、実際に体積ひずみ計で観測された変化量をもとに、体積ひずみ計の感度やデータベースの格子点間隔などを考慮してある程度の幅をもって設定する (Fig.2)。そして、検索を実行すると、データベースの中にこの最大値と最小値の間に入る事例があるかどうかを検索され、結果が表示される (Fig.3)。

従来、何か変動が観測された場合には、個別に試行錯誤的に地殻変動の計算をすることでプレート間すべりの可能性を検討していたが、このツールの整備により、系統的かつ速やかにプレート間すべりの可能性の可否を判断できるようになった。



Fig.2 検索条件（最大値，最小値）入力画面

Microsoft Excel - 東海プレスリップソース推定ツール.xls

MSゴシック 11

75%

		①検索条件入力		②抽出		③リセット		★操作方法		伊良湖	浜部	三ヶ日	天竜	川根	浜岡	
								最大値 [strain]	最小値 [strain]	100	100	1.0E-06	100	100	100	
								★ソース位置		-00	-00	1.0E-07	-00	-00	-00	
推定されるプレスリップソースの履歴・位置																
6	No.	Mag	I	J	経度 [deg]	緯度 [deg]	深さ [km]	走向 [deg]	傾斜角 [deg]	滑り角 [deg]	伊良湖	浜部	三ヶ日	天竜	川根	浜岡
8	2	1	3	137.525	34.325	17.118	259.820	9.429	132.820	2.3E-07	1.2E-07	1.1E-07	6.9E-09	-6.4E-09	-5.5E-08	
9	3	1	4	137.525	34.425	18.938	259.820	9.429	132.820	2.6E-07	1.9E-07	1.4E-07	-2.2E-09	-1.6E-08	-8.6E-08	
15	9	2	3	137.825	34.325	16.852	259.817	9.430	132.817	1.6E-07	1.1E-07	1.4E-07	2.2E-08	-1.4E-09	-7.0E-08	
16	10	2	4	137.625	34.425	18.671	259.817	9.430	132.817	1.9E-07	1.6E-07	2.0E-07	2.1E-08	-1.1E-08	-1.2E-07	
23	17	3	3	137.725	34.325	16.595	259.524	10.229	126.524	1.1E-07	8.7E-08	1.5E-07	3.8E-08	5.3E-09	-8.7E-08	
24	18	3	4	137.725	34.425	18.403	259.809	9.431	132.809	1.3E-07	1.3E-07	2.3E-07	5.4E-08	7.1E-10	-1.6E-07	
25	19	3	5	137.725	34.525	20.274	260.159	10.479	133.159	1.2E-07	1.7E-07	2.0E-07	4.1E-08	-2.4E-08	-2.4E-07	
32	26	4	3	137.825	34.325	15.608	235.933	12.404	108.933	7.3E-08	7.2E-08	1.4E-07	5.2E-08	1.1E-08	-1.1E-07	
33	27	4	4	137.825	34.425	17.670	241.066	12.564	114.066	8.7E-08	9.8E-08	2.2E-07	7.8E-08	8.1E-09	-2.5E-07	
34	28	4	5	137.825	34.525	19.928	259.356	12.224	132.356	8.0E-08	1.2E-07	2.5E-07	9.4E-08	-4.0E-09	-2.4E-07	
41	35	5	3	137.925	34.325	14.688	235.833	12.223	128.833	5.1E-08	5.4E-08	1.3E-07	7.8E-08	8.4E-08	-4.2E-08	
42	36	5	4	137.925	34.425	17.121	260.009	12.675	133.009	5.5E-08	7.2E-08	2.0E-07	1.3E-07	4.6E-08	-2.2E-07	
43	37	5	5	137.925	34.525	19.579	260.231	12.532	133.231	5.3E-08	8.7E-08	2.4E-07	1.6E-07	4.0E-08	3.9E-08	
44	38	5	6	137.925	34.625	21.898	258.045	11.685	131.045	4.7E-08	9.5E-08	1.7E-07	-8.7E-09	-3.5E-08	3.2E-07	
50	44	6	3	138.025	34.325	13.826	228.575	15.806	101.575	4.2E-08	4.6E-08	1.1E-07	8.1E-08	4.0E-08	-1.4E-08	
51	45	6	4	138.025	34.425	16.188	228.584	15.806	101.584	4.4E-08	5.8E-08	1.5E-07	1.3E-07	5.8E-08	-3.9E-07	

Fig.3 プレスリップの検索結果が表示された状態

3. 第二世代のプレート間すべり推定ツール

第一世代のプレート間すべり推定ツールは2002年6月から運用を始めた。そして、後述する2003年4月の三ヶ日観測点で変動が見られた事例では、このツールによるプレート間のすべりの検討が行われ、解説情報

発表の際の参考となった。

しかし、第一世代のプレート間すべり推定ツールについては、三ヶ日の事例等を含めた経験から次のような問題点が指摘された。第一の問題点は、データベースの事例が想定震源域内のみ限定されているため、

想定震源域の外側の事例を検討することができないことである。想定震源域は確定的なものではなく、この境界の外でプレート間のすべりが発生する可能性はゼロではないため、想定震源域の外のすべりの事例をデータベースに加える必要性があった。第二の問題点は、事前に設定した格子点上の定められた規模 (Mw5.5,6.0,6.5) に相当するすべりの事例しかデータベースになかったことである。実際に発生しうる様々な事例に対応するためには必ずしも十分でなく、より細かな格子点設定、規模設定でデータベースを拡充する必要があった。第三の問題点は、体積ひずみ計のみを対象としていたため、東海地域の監視に導入されている三成分ひずみ計や傾斜計のデータが利用できないことである。

以上のような問題点は、検索機能の点では第一世代のデータベースの拡充でも対応可能である。しかし、データベースが大規模になった場合に生じる問題点 (検索結果が大量になった場合の表示と利用方法、新規に観測点、観測項目を追加する際のデータベース再構築にかかるコスト等) を考慮して、以下のような改善を行った新たなプレート間すべり推定ツールを開発した。

- ① 固定したデータベース方式ではなく、解析時に検索領域、格子点設定、規模設定を行って、それに基づくプレート間のすべりの事例の計算、検索を逐次、動的に行う。
- ② 従来の体積ひずみ計だけではなく、三成分ひずみ計、傾斜計、水位計なども地殻変動の項目に加えて検索機能を強化。
- ③ 検索結果の表示機能を強化し、結果は表形式の他に地図上に表示。

このプレート間すべり推定ツールは、東海地域のプレートモデル (原田ほか,1998) と理論的な地殻変動の計算機能を内蔵している。使用されるプレートモデルは、北緯 33.825~35.475 度、東経 137.025~138.675 度の領域内で、緯度、経度それぞれ 0.05 度間隔の格子点上に、その点でのフィリピン海プレート上面の深さと断層パラメータ (走向/傾斜角/すべり角) の形で与えられている。すべりを検索する際には、メニュー画面で検索する範囲 (緯度、経度) と格子点間隔、すべりの規模 (相当マグニチュード) の範囲などの基本的

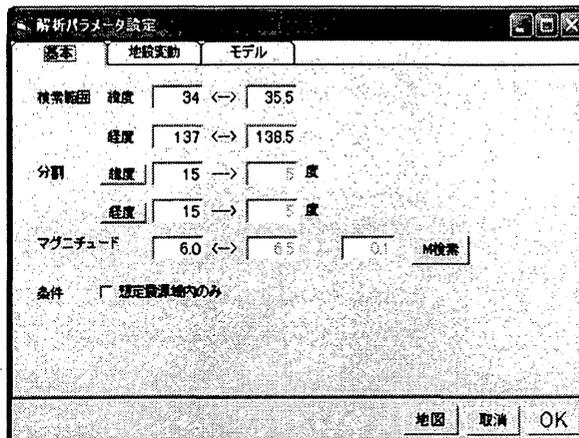


Fig.4 解析パラメータ設定画面
プレスリップの検索範囲や格子点間隔、マグニチュードなどを設定する。

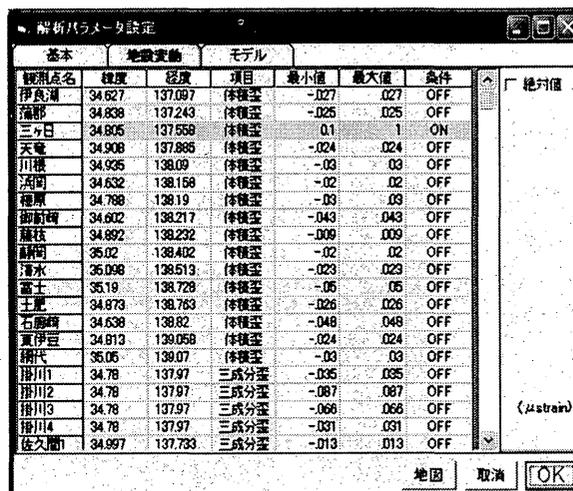


Fig.5 地殻変動データ設定画面
各観測点の変動量の最大値、最小値を設定する。

なパラメータ (Fig.4) の設定を行う。また、各観測点の変動量の最大値、最小値を別のメニュー画面 (Fig.5) で設定する。検索を実行すると、設定したすべり条件の範囲にある各事例について、内蔵した地殻変動計算機能で、各観測点の地殻変動量を計算し、変動量の条件を満たすかどうかをチェックして、条件を全て満たすものを候補として出力する。なお、検索条件で設定できる位置の格子間隔は任意であるが、プレートモデルは、0.05 度間隔でしか与えられていないため、モデルが与えられていない位置に設定された格子点では、一番近接するモデルの格子点のパラメータを使って地殻変動の計算を行う。

検索結果は、画面の地図上に表示され、ひと目ですべりの候補地点の場所が分かるようになっている (Fig.6)。

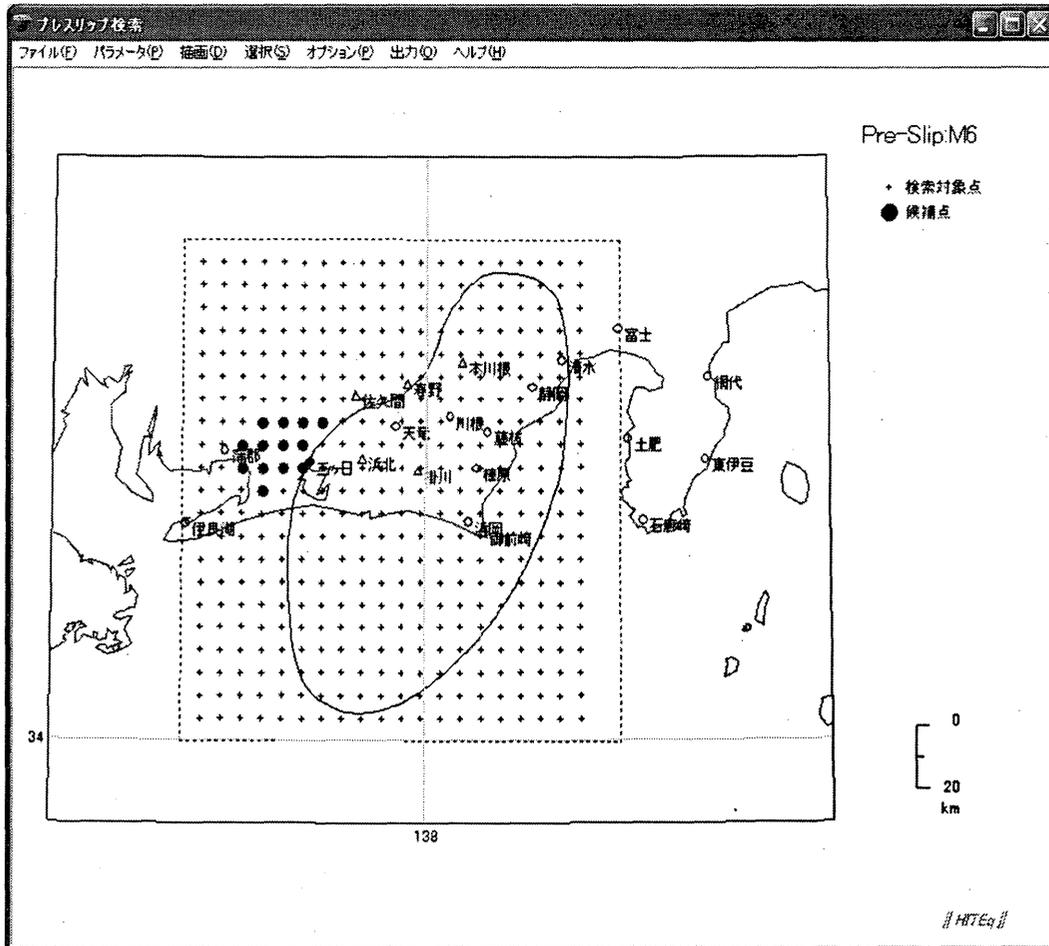


Fig.6 プレスリップの検索結果
丸印がプレスリップの候補点

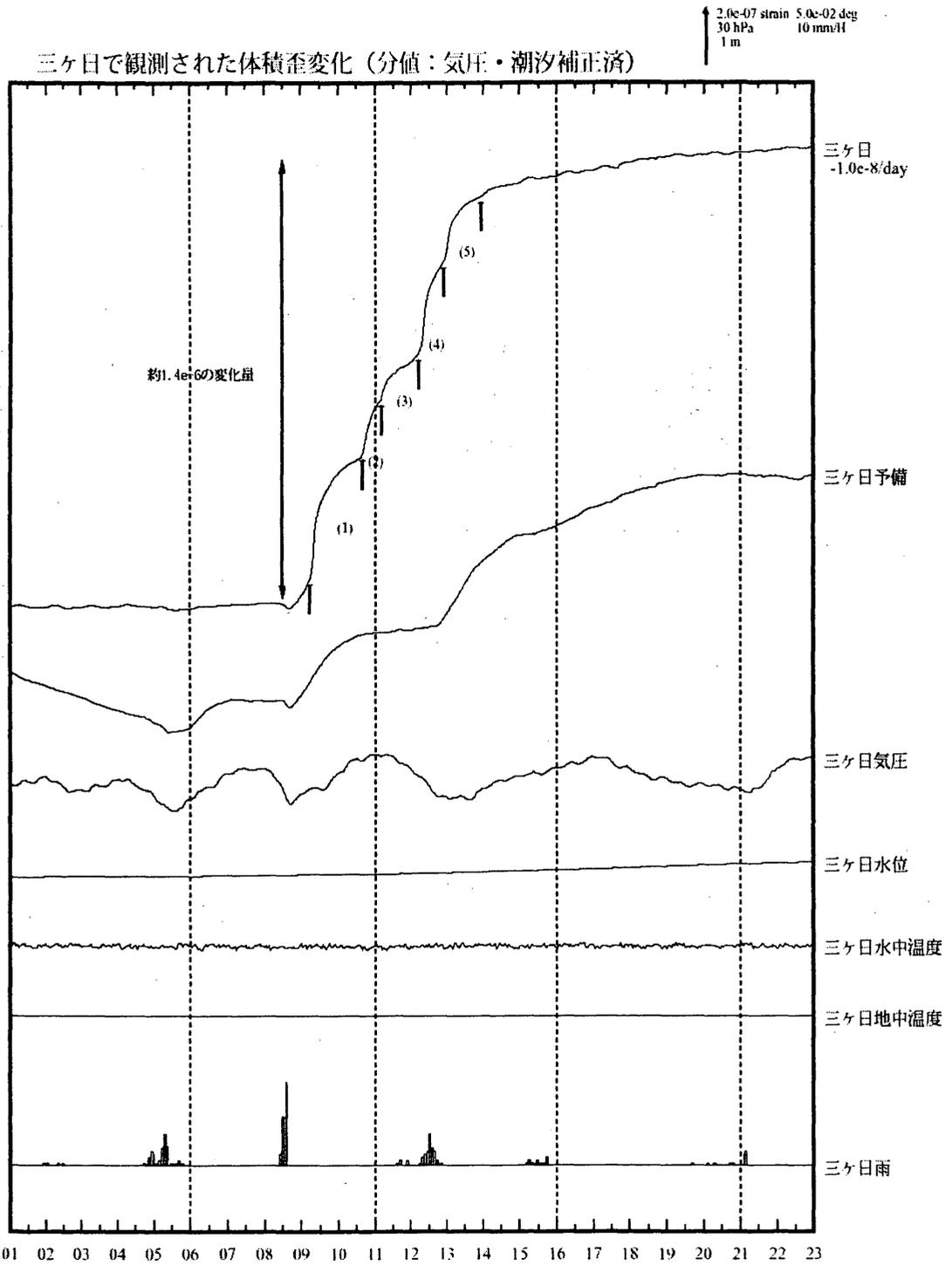
4. 三ヶ日事例の検討

2003年4月8日に、静岡県の三ヶ日に設置された気象庁の体積ひずみ計に大きな変化が現れ始めた (Fig.7). 変化速度は大きく、監視レベルの3 (ノイズレベルの2倍) を超えた. この変動は三ヶ日にだけ出現したが、近接した三ヶ日観測点の二つの体積ひずみ計のいずれにも変化が現れているため単純な機器故障によるものとは考えられず、プレスリップによる変動をとらえた可能性も考えられた.

そのため、プレート間すべり推定ツール (第一世代) によって、この三ヶ日のひずみ変化に関する検討が行われた. その具体的な内容について4.1に示す. また、同時に仮に三ヶ日のひずみ変化に関する検討を第二世代のプレート間すべり推定ツールを使った場合にどうなるかを4.2に示し、ツールの機能強化による効果を示す.

4.1 第一世代ツールの活用 (事例)

三ヶ日の体積ひずみ計は、4月8日に降雨によるものと見られる縮み変化の後に、伸び変化を示し始めた (Fig.7). 通常、降雨があった場合には、体積ひずみ計は最初に縮み変化を示し、その後に伸び変化を示してもとの状態に戻る. しかし、今回の事例では、伸び変化が時間とともに大きくなり、通常の降雨による変化の範囲を超えた. そのため、この変化の要因は降雨以外であることが明らかであった. また、図中に三ヶ日の他に、三ヶ日予備という項目の変化が示されている. これは、三ヶ日観測点から約80mの位置に設置された体積ひずみ計で、それぞれのひずみ計の設置深度は、三ヶ日が深さ約210m、三ヶ日予備が深さ50mである. この三ヶ日予備のデータにも三ヶ日と同様の変化が現れていることが図からわかる. したがって、この変化の要因は、三ヶ日の体積ひずみ計自身の問題 (機器故障等) に帰することができないことがわかった.



* 三ヶ日はトレンド変化量 $-1.0e-8/day$ を除去している
 * 図中 (1)~(5) はデータのフィテイングに用いた区間を示す

Fig.7 三ヶ日の観測データ (4/1 から 4/23)

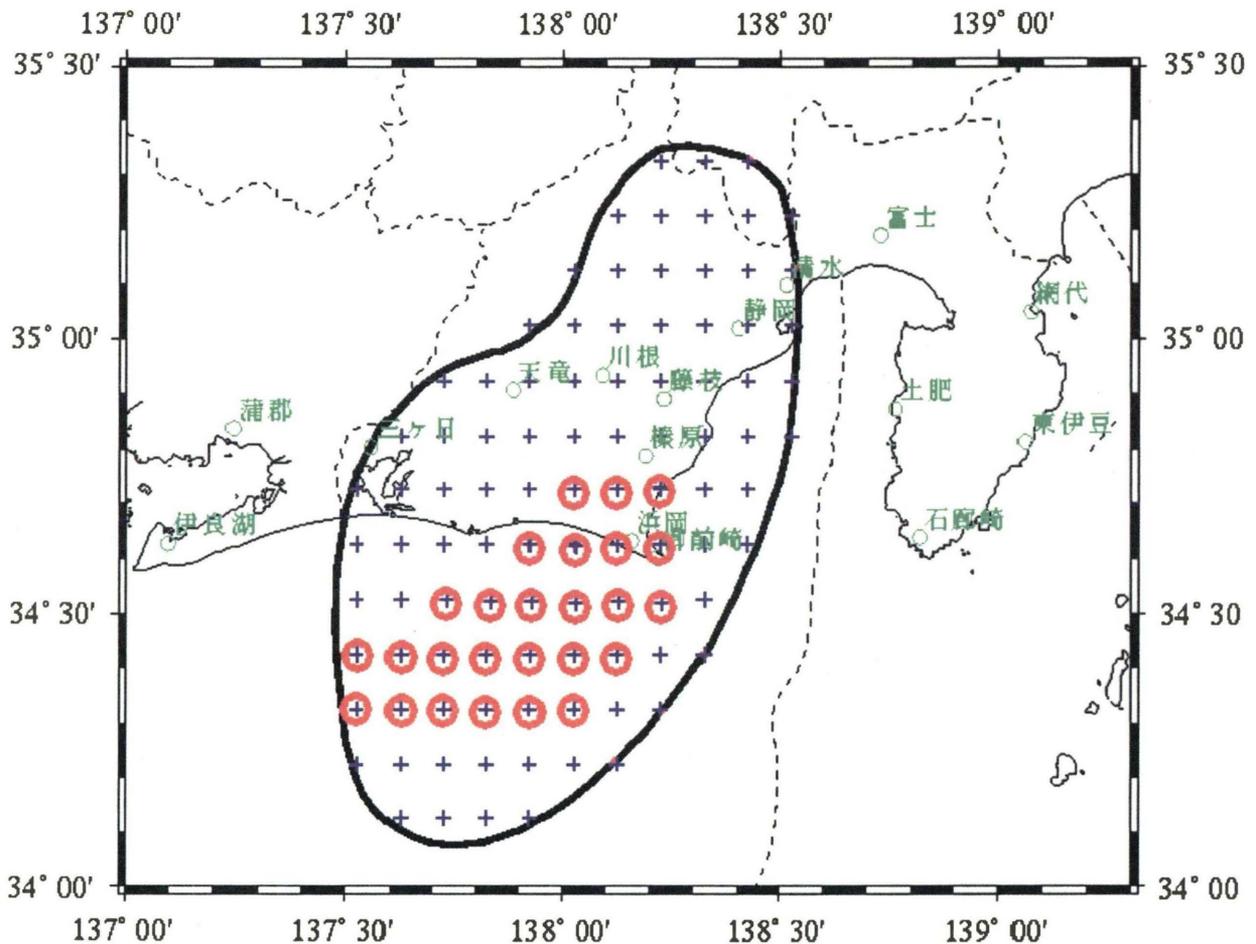


Fig.8 三ヶ日の体積ひずみ変化を条件としたプレスリップの検索結果
プレスリップの候補は丸印で示されている。

以上のことから、三ヶ日の体積ひずみ計に現れた変化が東海地震のプレスリップである可能性の検討が必要となった。

4月9日朝の時点での三ヶ日（および三ヶ日予備）の体積ひずみ変化はおよそ 2×10^7 strain 程度の伸びであった。また、気象庁で監視している東海地域の他の体積ひずみ計、三成分ひずみ計には、この変化と同期する変化は観測されていなかった。

まず、プレート間すべり推定ツールで、三ヶ日の実際の変動量に対して幅を持たせた、最小値 $+1 \times 10^7$ 、最大値 $+1 \times 10^6$ （プラスは伸びに対応）という条件を設定してすべりの事例の検索を行った。この結果、Fig.8 に示す赤丸の地点がすべりの起きた場所の候補としてリストアップされた。いずれもすべりの規模は Mw6.5 である。今回の事例が三ヶ日だけで観測されていることを考慮すると、すべりは三ヶ日観測点の近傍

にあって規模も小規模であることが予想されるが、リストアップされた結果は、図に示すようにいずれも三ヶ日からはなれた海域から御前崎周辺に広く分布している。

そこで、次に三ヶ日に設定した条件はそのまま、他の三ヶ日に近接する観測点（伊良湖、蒲郡、天竜）に変動が現れていないという条件（最大値、最小値は各観測点のノイズレベル）を追加して再検索を行った。その結果、すべりのデータベースに該当事例がないことが分かった。これにより、三ヶ日で観測された変化は、想定震源域内で発生したすべりである可能性が低いことが判明した。

しかしながら、変化が観測された三ヶ日観測点が想定震源域の境界域に位置するため、すべりのデータベースに含まれない想定震源域の外側にプレート間のすべりが位置する可能性が残った。また、すべりの規模

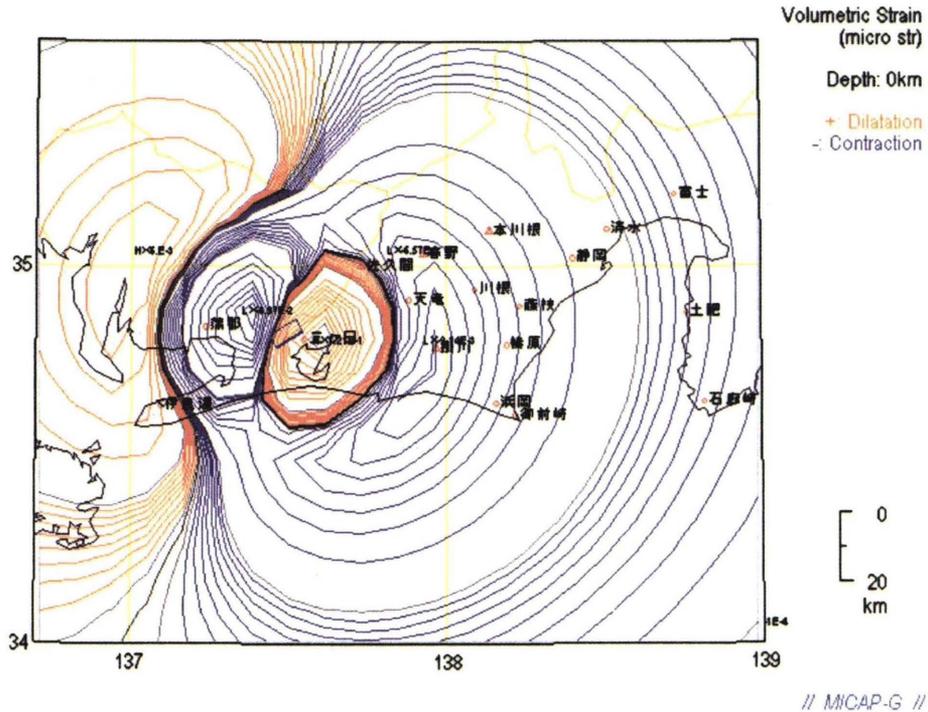


Fig.9 MICAP-G での検討

三ヶ日近傍にプレスリップを置いた場合、小規模でも蒲郡などにも検知可能な変動が出る

が小規模な場合には、想定震源域内でも、データベースに登録された格子点以外の場所で小規模なすべりが起こった可能性についても完全には否定できなかった。

そのため、残った可能性について検討するため、地殻変動解析支援プログラム MICAP-G(内藤・吉川,1999) を使って、三ヶ日近傍に小規模 (Mw5.5 程度) なすべりを置いた場合の地殻変動パターンとその変動量を推定した。Fig.9 はその一例で、三ヶ日のすぐ西側にプレスリップがあると、三ヶ日付近を極大値とした体積ひずみが伸びになる狭い領域があることが分かる。この事例では、三ヶ日に設定した体積ひずみの変動の条件の他、他の多くの観測点で変動が出ていないという条件も同時に満たされている。しかしながら、このような事例の場合、Fig.9 を見て分かる通り、三ヶ日の西方に位置する蒲郡でも、必ず検知可能レベル以上の体積ひずみ変化 (縮み) が現れる。しかし、実際には蒲郡ではこれに対応するような変化は観測されていない。このような検討を経て、最終的にプレート間のすべりの可能性がないことを確認した。

以上のような検討結果と、他の補足的な観測データ (他機関の傾斜計データなど) を総合して、今回の変動が東海地震の発生とは関係ないと判断し、4月9日

午後に東海地域の地震・地殻活動に関する情報第 4 号 (解説情報) を発表した。

4.2 第二世代ツールの活用 (仮想)

次に、第二世代の推定ツールによる機能強化の効果を示すため、三ヶ日の事例の際に第二世代のツールがあったとして、プレート間すべりの判定を仮想的に行った場合について述べる。

まず、プレート間すべり推定ツールで、三ヶ日のみに最小値 $+1 \times 10^7$ 、最大値 $+1 \times 10^6$ という条件を設定する。この部分は第一世代のツールと同様である。次に検索領域として、Fig.10 のように想定震源域を含む広い矩形領域 (図中の破線) を設定する。プレート間のすべりを検索する格子点はある程度細かく (図では緯度、経度それぞれ検索領域を 20 分割) 設定し、プレート間すべりの規模についてもモーメントマグニチュード 5.5~6.5 の範囲を 0.1 単位で検索するように設定する。

以上の条件設定で検索した場合、Mw5.6~6.5 の範囲で 100 例以上のプレート間のすべりの候補がリストアップされた。Fig.10 にはこのうち Mw6.5 の場合を図示した。Mw の小さいものは、三ヶ日近傍の想定震源域外に位置する事例が多い。

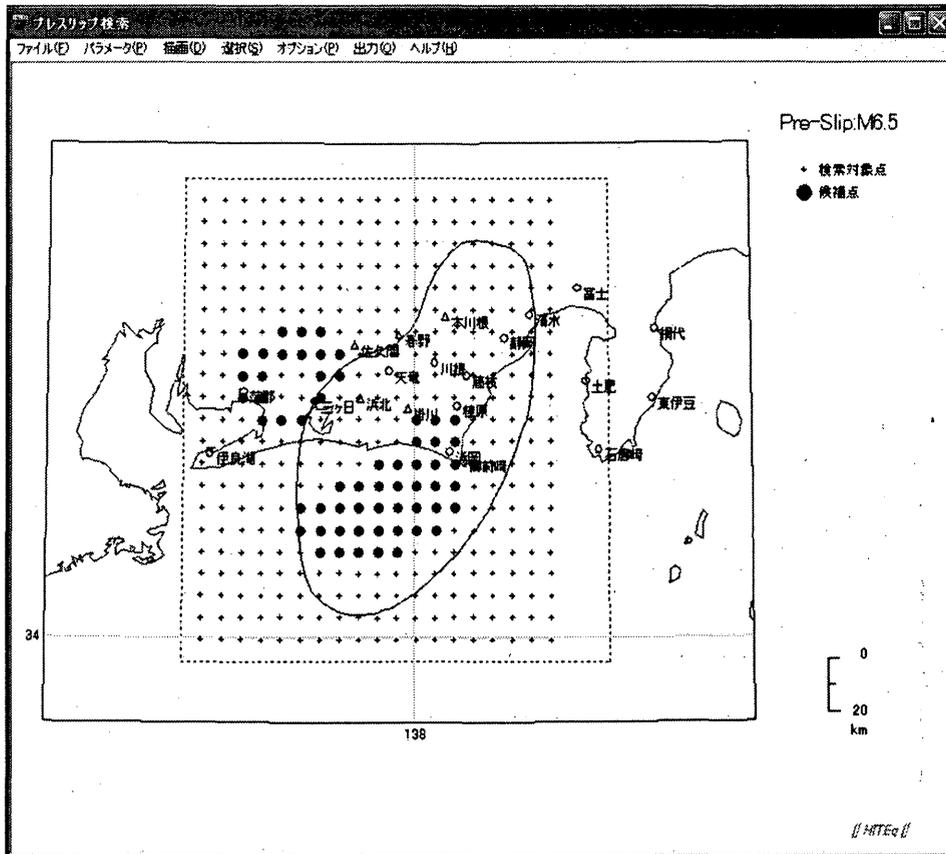


Fig.10 プレスリップ検索結果 (Mw6.5 の場合)

次に、4.1 のケースと同様に他の三ヶ日に近接する観測点（伊良湖，蒲郡，天竜）に変動が現れていないという条件（最大値，最小値は各観測点のノイズレベル）を追加して再検索を行った。その結果，Mw6.0～6.1 の範囲で 3 例のプレート間のすべりの候補点が残った。Fig.11 には Mw6.0 の例を示した。いずれも想定震源域外に位置している。4.1 で述べたように第一世代の推定ツールを使った場合には，データベースが想定震源域内だけだったため，この段階で推定ツールによるプレート間すべりの候補は無くなったが，ここで示されたように実際には想定震源域外に可能性のある事例が残っていた。第一世代のツールでは，このような残された事例の可能性を検討するために MICAP-G を使った検討を加える必要があった。

第二世代の推定ツールでは，これらの残りの事例の可否を判定するためにさらに検索条件を追加して検討を行うことができる。ここでは，さらに三成分ひずみ計の佐久間，掛川の観測点の各成分の変動がノイズレベル程度という条件を追加して，再検索を行った結果，該当するプレート間のすべりが無くなった。

さらに念のため三ヶ日近傍のごく小規模なプレート間のすべりの可能性を検討するために，三ヶ日を中心にした局所的な矩形領域（Fig.12）を設定し，細かい格子点設定をした。そして，プレート間のすべりのマグニチュード範囲を 5.0～6.0 とし，各観測点の条件は同じにして検索を行った。その結果，該当するプレート間のすべりはなく，三ヶ日近傍のごく小規模なプレート間のすべりについても，その可能性がないことが示された。

以上のように，2003 年 4 月の三ヶ日の事例に関して，第二世代のプレート間すべり推定ツールを使って，いろいろな条件設定でプレート間のすべりの検索を行い，最終的にプレート間のすべりの可能性を否定できることが分かった。

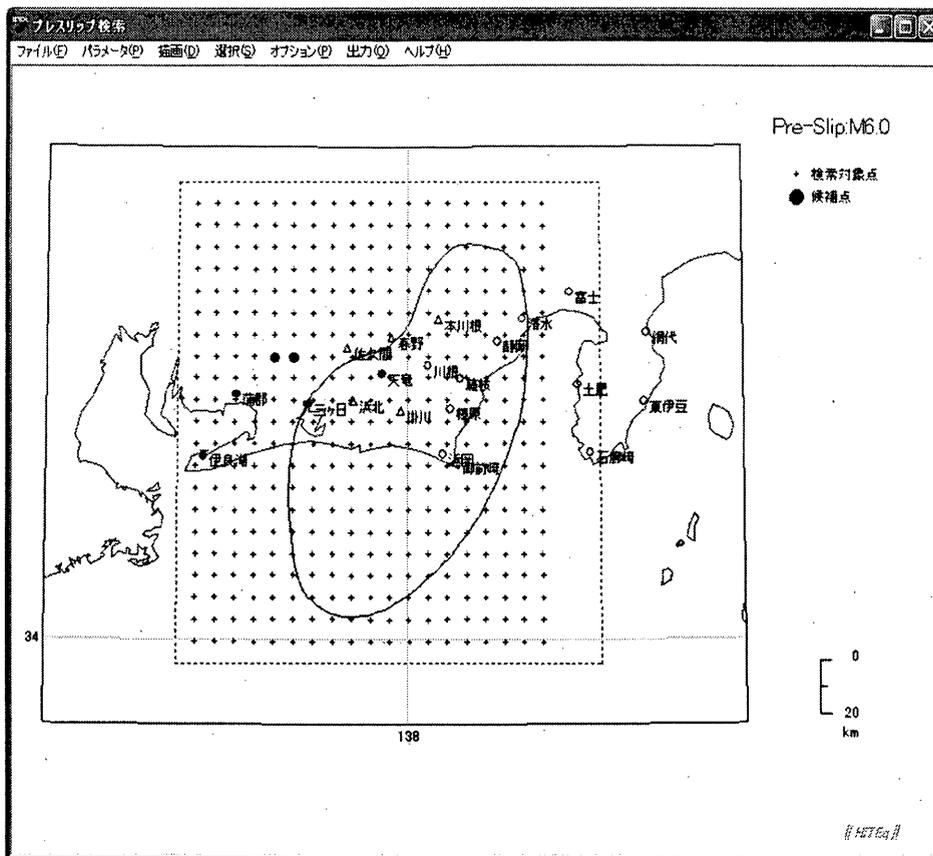


Fig.11 伊良湖，蒲郡，天竜を追加して検索した結果 (Mw6.0 の場合)

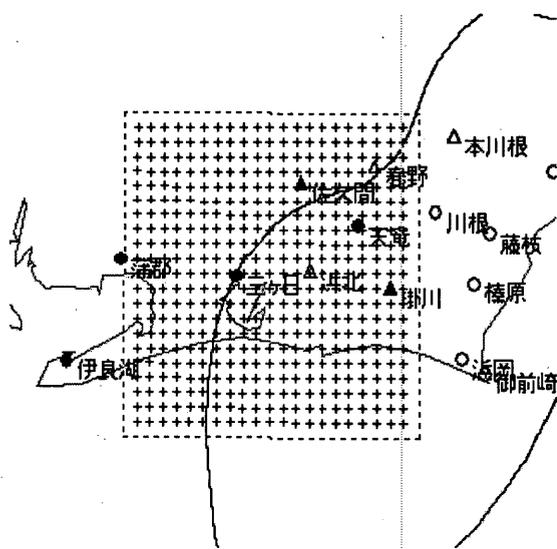


Fig.12 解析領域を限定して再検索した結果 (プレスリップ候補はなし)

5. まとめ

2003年7月28日に東海地震に関する情報発表の体系の改訂が発表され、2004年1月5日からはこの新しい情報体系による情報発表が始まった。新たな情報発表体系では、東海地震予知情報の前の段階に東海地震注意情報が設定され、この情報によって従来よりも早い段階で各機関が防災準備行動を開始することになった。この東海地震注意情報は、今までの地震学で得られた知見によって地震のプレスリップに関する理解が深まったことと観測技術が向上したことによって、従来よりも早い段階で高い精度でプレスリップの検出が行えることを前提としている。

ここで紹介したプレート間すべり推定ツールは、東海地域で異常な地殻変動が観測された場合に、速やかにプレスリップの検討を行うことを可能にし、今後も東海地震に関する情報発表に大きく役立つことが期待される。

一方で、現在のプレート間すべり推定ツールは一つの場所でプレスリップが起きることを前提としているが、プレスリップが複数の場所もしくは広域で進行す

る可能性も指摘されている (Linde and Sacks,2002)。そのような事態が発生した場合には、現在のプレート間すべり推定ツールだけでは現象の特定は困難になるかもしれない。実際に異常な変動が検出された場合には、プレート間すべり推定ツールを活用しつつ、さらにこのような可能性についての検討も必要になる。

また、このツールは各観測点でのひずみ変化量がプレート間のすべりで説明できるかどうかを検討できるだけで、プレスリップの判定に重要なひずみの時間変化の性質については検討を行うことができない。これについては、現在、ひずみ変化の時系列フィッティングツールが開発中で、2004年中には実用化される予定である。

6. 謝辞

ここで紹介したプレート間すべり推定ツールが使用する東海地域のプレートモデルは原田ほか (1998) のモデルをもとに内閣府と気象庁が数値化したものを使用している。また、理論地殻変動の計算には Okada(1992) の方法にもとづくプログラムを使用している。データ作成ならびにプログラム作成に関わられた方々に感謝する。また、匿名の差読者による意見は原稿を改善するために大いに役立った。あわせて感謝する。

参考文献

- 内藤宏人・吉川澄夫 (1999):地殻変動解析支援プログラム MICAP-G の開発, 地震 2, **52**, 101-103.
- 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プレートの形状と地震活動, 地震研究所彙報, **73**, 291-304.
- Linde, A.T. and I. S. Sacks (2002): Slow earthquakes and great earthquakes along the Nankai trough, Earth and Planetary Science Letters, **203**, 265-275.
- Okada, Y. (1992): Internal deformation due to shear and tensile faults in a half-space, Bull. Seism. Soc. Am., **82**, 1018-1040.