

東海地域における前兆的地殻変動の検知能力 および改善法の一考察

東京大学地震研究所 小 木 田 周 三

(昭和 60 年 7 月 31 日受理)

要 旨

地震の前兆的地殻変動の機構としてフォアスリップを仮定し、東海地震の想定断層面上およびその延長上にそれが生じた場合の検知能力を推定した。さらにその改善法について検討した。異常とする地殻変動量は判定会の召集基準に準じ 2 つ設けた。東海-伊豆地域のすべての観測点 (歪計 24 点, 傾斜計 25 点, 検潮儀 7 点) による想定断層全体の平均的検知能力は、大きい方の基準に関して M_w 5.97, 小さいほうの基準に関しては 5.61 である。現在の気象庁の体積歪観測点 17 点のみのネットによる能力は、この地域のすべての観測点によるネットのそれに比して、4 倍大きなモーメントのフォアスリップを検知する能力を有するのみである。したがって、他機関のデータを参照する効果が大きいといえる。検知能力の高い領域は、御前崎から榛原にかけてと、岡部、富士川付近である。遠州灘の海側断層面の検知能力は低く、平均的に見て陸側の約 9 倍大きなモーメントのフォアスリップしか検知できない。遠州灘側の検知能力の向上が望まれる。

1. はじめに

現在東海地域では、大規模な地震の発生が予想され、その予知をめざして地震、地殻変動、その他多くの観測網が、この地域および伊豆半島に集中的に展開されている。これらの観測データのうち、地震および体積歪計のデータが気象庁にテレメータされ、常時監視されている。これらに、ある規準を越える異常が認められた場合には、判定会が招集され、来たるべき“東海地震”の前兆的現象であるかどうかを判定することになっている。地震の予知を推進する上で、これらの観測網の異常検知能力ならびに観測点ごとのそれへの寄与率に関するデータは基礎的な資料となる。

東海地域の地震の検知能力については、鶴川ら (1983), 大久保 (1984) および村松 (1984) が防災センターのネットについて、その空間的分布を求めている。このネットは関東-東海地域に対し、陸上部および駿河湾内では、深さ 0 km の M 1.0 以上の地震を、遠州灘では M 2.0 以上の地震を漏れなく震源決定できるという極めて高い検知能力をもつ。気象庁のネットに関しては、空間的分布は示されていないが、防災センターのネットに比べて感度が低く、陸上で地表付近において M 2 程度以上ならば検知できることが予想される。しかし気象庁は遠州灘に海底地震計を 4 点配置しており、その付近の海底下の検知能力は陸のそれと同等に高いと思われる。

前兆的地殻変動の検知能力を最初に求めたのは SHIMAZAKI (1985) である。“東海地震”の前兆的地殻変動が、この地震の想定断層面上、あるいはその延長部に生じるゆっ

くりとしたフォアスリップによるものと仮定し、そのモーメントと検知率との関係求めた。それによるとフォアスリップのモーメントが 2.5×10^{28} dyne·cm 以上ならば、気象庁の体積歪計のネットにより、ほぼ 100% 検知でき、 2.5×10^{25} dyne·cm 以下ならばその確率は 50% 以下であると結論した。

地震の前兆的地殻変動の機構はいまだ解明されていない部分が多く、今後の研究を待たなければならないが、現在のところ有力とされるモデルには、ダイラタンシーモデルとフォアスリップモデルがある。SCHOLZ *et al.* (1973) 等によるダイラタンシーモデルは、地殻等において未破壊領域が新たに破壊する場合を想定している。しかし、たとえば SIEH (1978) 等により始められた断層のトレンチ調査の結果、あるいは海溝沿いの歴史地震の調査結果から、大地震が多くの場合、既存の断層において繰返し起こることが知られている。東海地震の断層もこのタイプであると考えられているが、こういう場合には、地殻が新たに破壊するにあいに比べて、ダイラタンシー量が小さい、あるいは局所的であることが予想され、これによる前兆は起こりにくいと考えられる。

一方フォアスリップモデルは、こういった既存の断層が地震を生ずる場合に、それに先行し断層の強度の小さい領域、あるいは主断層の深部延長面上に沿ってゆっくりとしたすべりが発生するというものである。この考えは、KANAMORI and CIPAR (1974) がチリ地震 (1960) の前にひずみ型地震計に現れたゆっくりとした変動に関して、MORTENSEN and JOHNSTON (1976) がホルスター地震 (1974)、FUJII (1976) が新潟地震 (1964)、藤井 (1976) が浜田地震 (1872) 等に生じたとされる前兆的地殻変動に関して、地震時の主断層の深部延長面上でクリープ状に生じた可能性を述べている。室内実験では、SCHOLZ *et al.* (1972)、前田 (1977)、DIETERICH (1978)、大中 (1979)、茂木 (1981) らが、モデル地震の実験すなわちスティック・スリップの実験によってその可能性を示唆した。

このように、フォアスリップは繰返し地震を起こしている断層の有力な前兆的地殻変動の機構と考えられる。そこで SHIMAZAKI (1985) と同様に東海地震の想定断層面上、あるいはその延長上にそれが生ずると仮定し、これを検知する能力を検討する。特にその空間分布を評価し、監視する上でポイントとなる観測点を求める。さらに観測ネットの併合、観測点の増設、観測データの精度の改善等による能力の向上を見積もり、それぞれの方法の効率を検討する。これは東海地震の予知戦略を考える上で役立つであろう。

2. 断層モデルおよび検知能力推定法

想定した東海地震の断層モデルは、次の通りである。傾斜角は強化地域部会による 20° とし、長さ、幅及びくいちがい量は石橋 (1976) によりそれぞれ 115 km, 70 km, 4 m とした。スリップアングルは、MINSTER and JORDAN (1979) が求めたフィリピン海プレートとユーラシアプレートの相対運動ベクトルにより 63° とした。断層の位置は Fig. 1 に示す通りである。フォアスリップは、想定断層をさらに長さ方向に 25 km、深さ方向に 10 km 拡張した $140 \times 80 \text{ km}^2$ の領域についても、その面上に生じうると仮定した。以下これを検定断層面とよび想定断層 $115 \times 70 \text{ km}^2$ と区別する。フォアスリップは、本震と同じ傾斜角、及びスリップアングルをもつと仮定した。

前兆的地殻変動の検知能力推定法は以下の通りである。検定断層面上の任意の点を中心

としてフォアスリップを仮定し、設定した観測ネットに一定の基準を越える地殻変動量を生じる最小のモーメントを求める。検定断層面上の各点の値を KANAMORI (1977) の提唱したモーメントマグニチュード M_w に変換し、これを用いてその場所の検知能力の尺度とする。この操作を検定断層面全体について行つた。Fig. 2, 3 等はそうして求めたものに M_w 0.5 間隔でコンターを引いたものである。フォアスリップにはさらに、その大きさを単一のパラメータ M_w であらわすために、KANAMORI and ANDERSON (1975) 等で示される次のような相似則を導入した。

$$W/L=1/2 \quad \text{アスペクト比}$$

$$\mu D/W=30 \text{ bar} \quad \text{静的応力降下量}$$

ここで W , L , D は、それぞれフォアスリップの幅、長さ、くいちがい量、 μ は剛性率である。応力降下量一定の仮定はフォアスリップのくいちがい量が断層の長さに比例することを意味している。その値 30 bar はプレート間地震の平均的な値である。フォアスリップの静的応力降下量については

よく判っておらず、この仮定を採用するには疑問があるであろう。

そこで検知能力評価における応力降下量依存性を 5 節で検討する。

Table 1 にそれぞれのモーメントマグニチュードに対応したフォアスリップの空間的大きさ及びくいちがい量を示す。計算に用いる物性常数は、 V_p : 6.6 km/sec, V_s : 3.7 km/sec, μ : 3.76×10^{11} dyne/cm を仮定した。

Table 1. List of fore-slip parameters.

M_w	M_0 (dyn·cm)	L (km)	W (km)	D (cm)
4.0	1.3E22	1.13	0.56	5.28
4.5	7.1E22	2.00	1.00	9.38
5.0	4.0E23	3.56	1.78	16.7
5.5	2.2E24	6.34	3.17	29.7
6.0	1.3E25	11.3	5.63	52.8
6.5	7.1E25	20.0	10.0	93.9
7.0	4.0E26	35.6	17.8	167.
7.5	2.2E27	63.4	31.7	297.
8.0	1.3E28	113.	56.3	528.

地殻変動監視のための観測ネットは、気象庁の体積歪計のみによるものと、他の観測研究機関も含め、この地域に展開されているすべての地殻変動観測点によるものとを検討した。Fig. 1 にすべての各観測点の位置及び観測の種類を示す。これらは 国立防災科学技術センター (1982), 気象庁 (1983), 地震予知総合研究振興会 (1983), 檀原ら (1984), 野口 (私信, 1984), 笠原 (私信, 1984) による。

監視に際し異常とする地殻変動量は“東海地震”の前兆を判定する地震防災対策強化地域判定会 (以下判定会と略す) の招集基準にもとづいて設定した。招集基準には独立した 2 つのものがある。その 1 つは、気象庁の東海および伊豆地域にある体積歪観測点約 20 点のうち 1 箇所で、3 時間以内に 5×10^{-7} 以上の変化が発生し、ほぼ同時時間帯において、すくなくとも他の 3 箇所以上で明瞭な変化が発生した場合である。明瞭な変化とは、ここでは先の値の 1/5 とした。すべての観測点においてこの値が設定できると仮定し、さらにこの基準を拡張して次の基準を設けた。

クライテリオン I

歪計 5×10^{-7}

傾斜計 5×10^{-7}

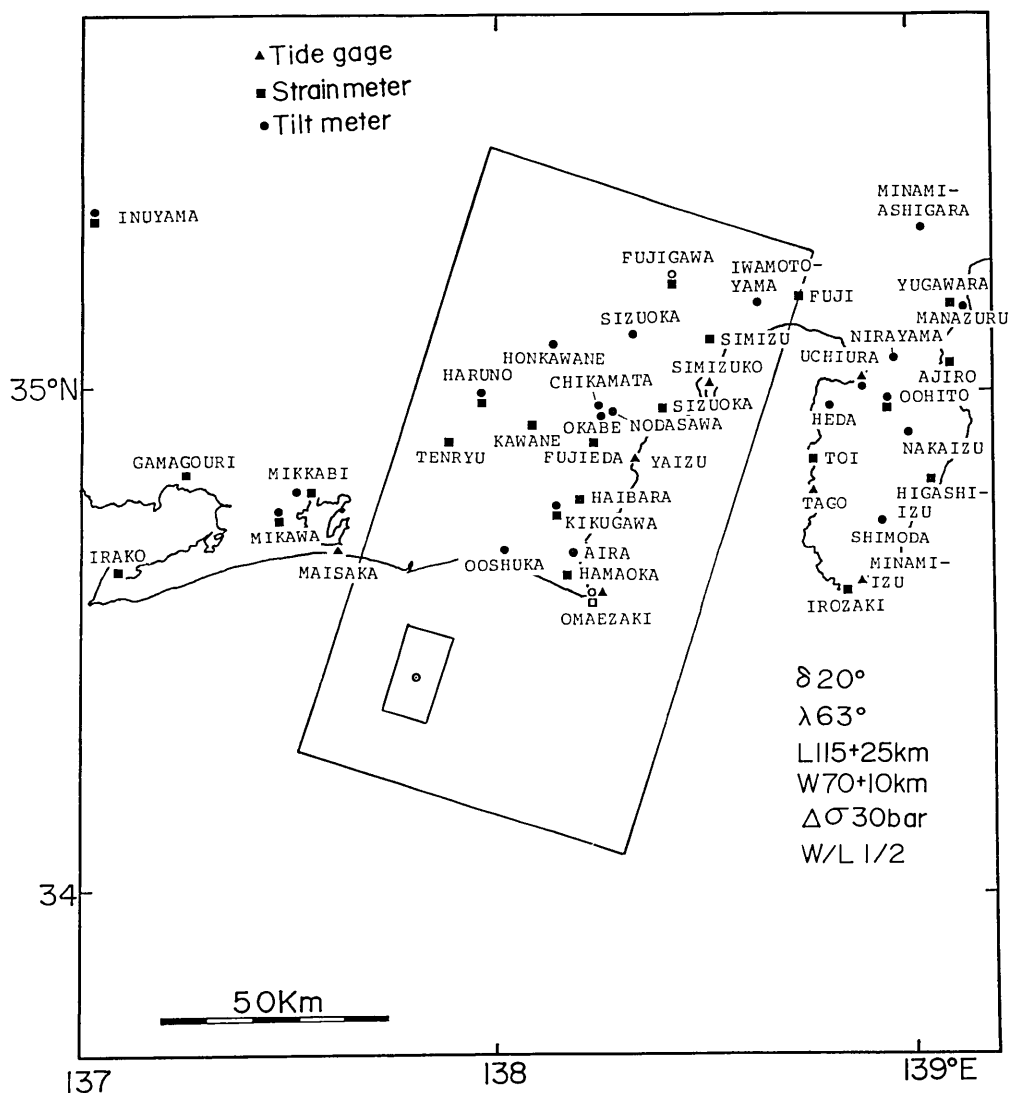


Fig. 1. Locations of the crustal movement observatories in the Tokai-Izu region.

検潮儀 3 cm

この値以上の変化が何れか1箇所、同時に

歪計 10^{-7}

傾斜計 10^{-7}

この値以上の変化が合わせて3箇所以上で発生すること。

この変動に要する時間スケールも判定会のそれと同様とした。判定会のもう1つの招集基準は、1時間にマグニチュード4以上のもの3回以上を含む10回以上の群発性地震が発生し、2時間以上続き、かつ、ほぼ同時刻ごろから気象庁の体積歪観測点のうち2箇所

以上で明瞭な変化が発生した場合である。群発性地震活動を伴った場合について、地殻変動に関し先と同様に判定会の基準を拡張し、次の基準を設けた。

クライテリオンⅡ

歪計 10^{-7}

傾斜計 10^{-7}

検潮儀 3 cm

この値以上の変化が何れか2箇所で見られること。

1つの観測点において何種類の観測を行っている場合には、歪計は体積歪計と伸縮計に、傾斜計はボアホール型傾斜計と水管傾斜計とに分類し、それぞれを独立した情報とした。正しい検知能力を求めるには、SHIMAZAKI (1985) が指摘したように観測器の力学的な増幅率を考慮にいなければならない。気象庁の体積歪計の増幅率については、FURUYA (1984) の結果を用いて補正を行ったが、それに関するデータの無い他の点については補正を行っていない。断層運動による地殻変動の計算は、SATO and MATSU'URA (1974) の表現式による。

3. 検知能力の空間分布

東海-伊豆地域に展開された、気象庁の体積歪計 17 点だけによる検定断層面上の検知能力分布を以下に示す。Fig. 2(a) は、クライテリオンⅠによる検知能力である。最も検知能力の高いのは、藤枝観測点周辺下である [観測点名は Fig. 1 を参照]。クライテリオンⅠに従って監視を行なった場合、断層面上のこの領域を中心として M_w 5.8 以上のフォアスリップが発生すれば、図上の観測点により検知できる。御前崎沖の海底下では M_w 6 から 7 であり、検定断層面の南端部では 7 以上の領域がある。以下この種類の数値は特に断らないかぎり M_w である。検定断層面全面の平均は 6.40 である。Fig. 2(b) は、クライテリオンⅡによるものである。検知能力の高いのは清水、榛原および御前崎周辺下で 5.3 程度であり、御前崎沖の海底下では 5.5 から 6.5 である。検定断層面全面の平均は 6.01、である。クライテリオンⅠに比して平均で M_w で 0.4 程度、モーメント比にして約 4 倍検知能力が高い。

気象庁の体積歪計のほか、他の観測研究機関のデータも異常監視に役立てられた場合の検知能力を次に示す。観測点は気象庁、防災センター、国土地理院、水路部、東京大学地震研究所、名古屋大学、静岡大学、静岡県等の体積歪計及び伸縮計 24 点、水管型及びボアホール型傾斜計 25 点、検潮儀 7 点の計 56 点を用いた。クライテリオンⅠによる検知能力を Fig. 3(a) に示す。最も検知能力の高いのは、各種観測器を集中的に配置している御前崎下で 4.8 程度である。駿河湾西岸では、さらに岡部、富士川を中心として 5.5 弱となるが、反対に焼津の南方、清水周辺、駿河湾北岸下では 5.5 強となり検知能力が相対的に低い。陸地下の大部分は 5 から 6 である。御前崎沖の海底下では 6.5 以上の領域が残る。検定断層面全面の平均は 5.97 であり、本震の予想されるモーメントとの比は 9.3×10^{-4} である。気象庁の体積歪計のみの場合と比較し平均的には M_w で 0.4、モーメント比にして 4 倍程度感度が高く、データの併合の効果が大きいことを示している。

Fig. 3(b) は、断層の長さ方向に沿った線上の検知可能な M_w の最大、最小及び平均

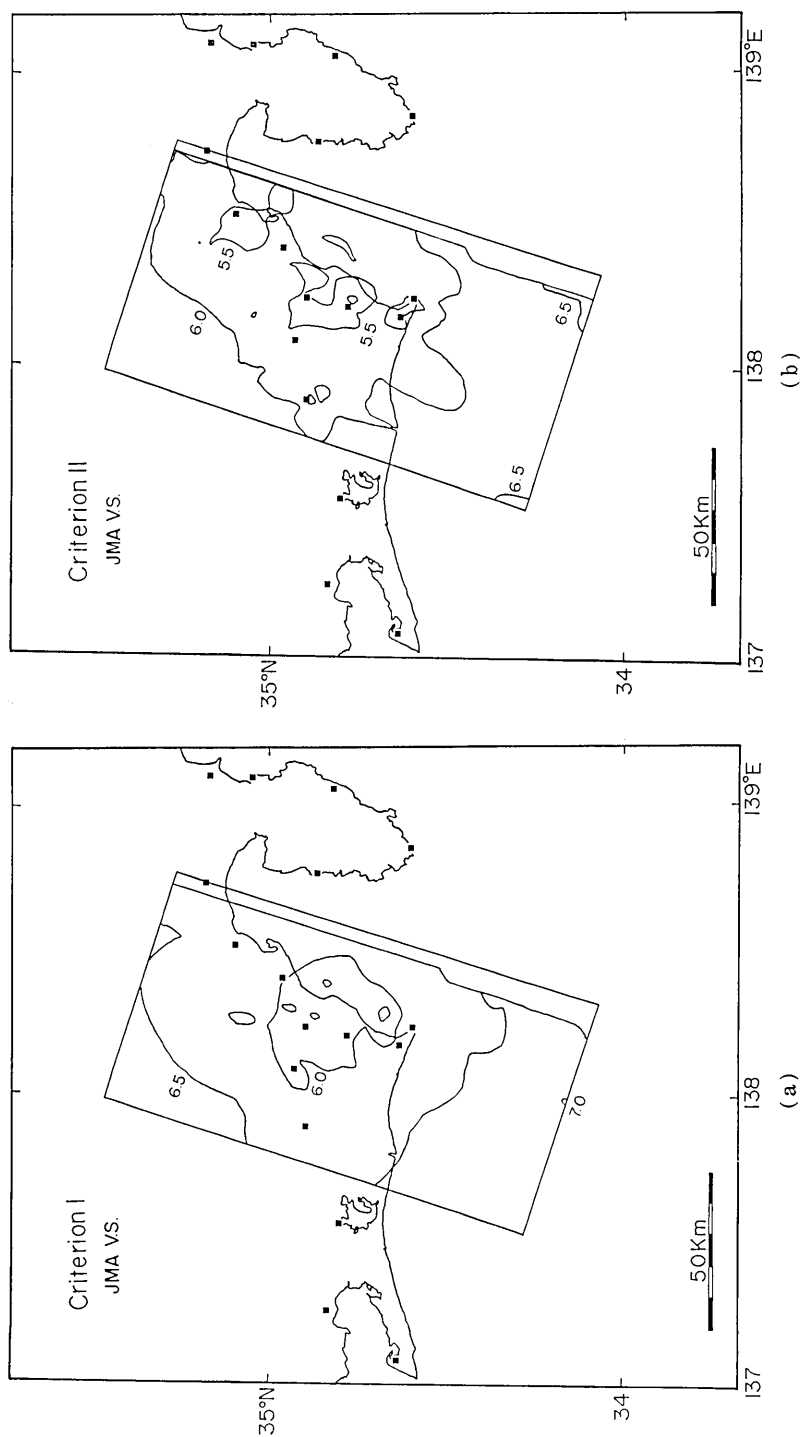


Fig. 2. (a) The detection capability of fore-slips on the enlarged anticipated Tokai earthquake fault for criterion I.
 (b) The detection capability for criterion II. Numerals on the contours show M_w which fore-slips are detected by the JMA volumetric strainmeter network.

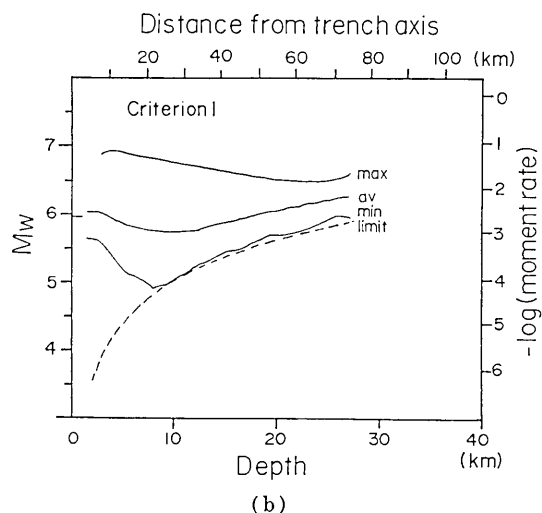
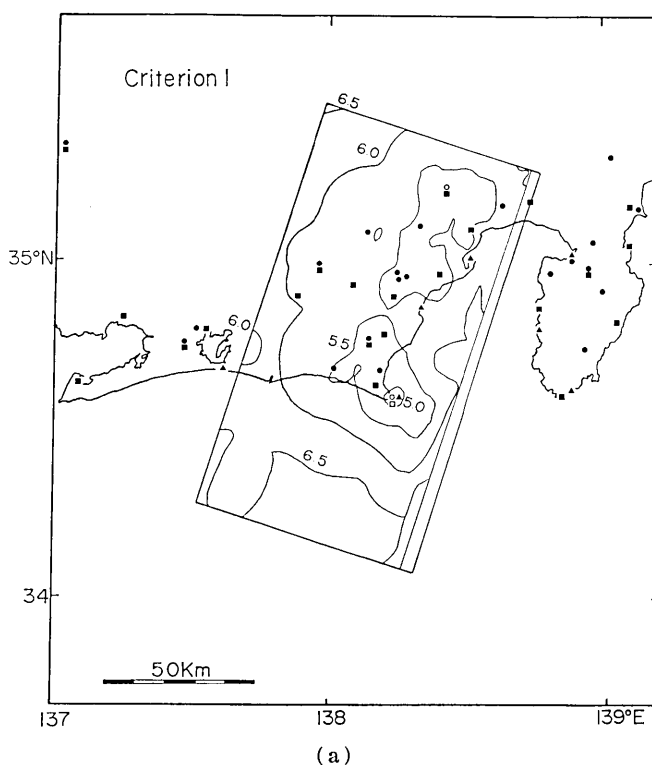


Fig. 3. (a) The detection capability of fore-slips by the network of all observation stations in this area for criterion I. (b) Relation between the detection capability of fore-slips and their depth. "max", "min" and "av" indicate the maximum, the minimum and the average values of each depths. "limit" indicates the detection capability limit when the interval of stations approaches zero. "moment-rate" in the right axis is the ratio of the moment of fore-slip to that of the main slip.

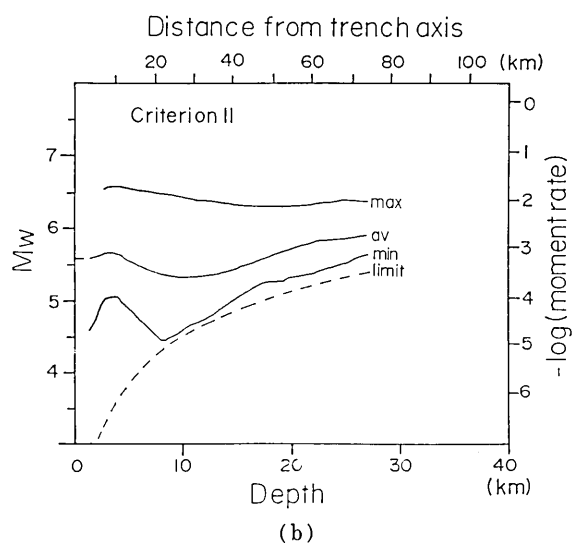
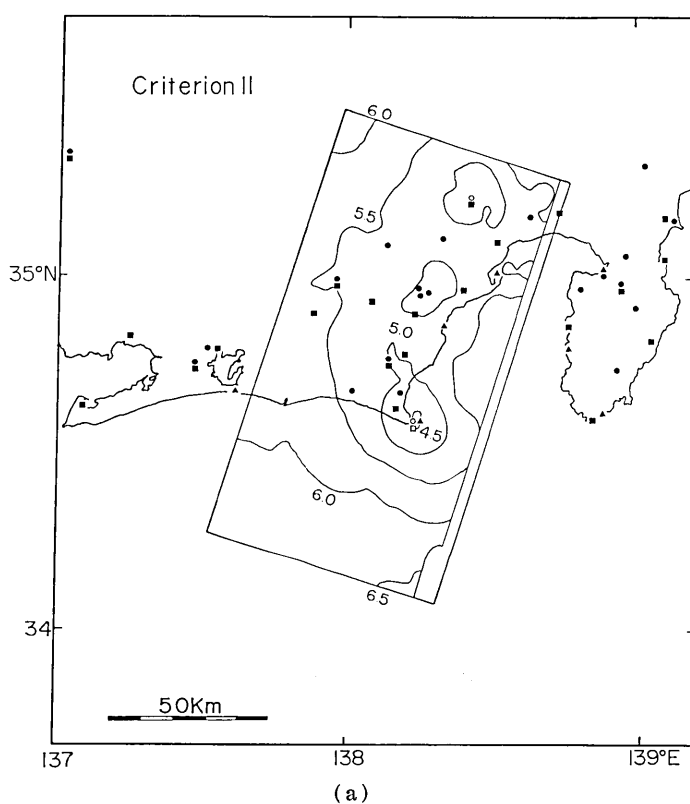


Fig. 4. (a) The detection capability of fore-slips by the network of all observation stations in this area for criterion II. (b) Relation between the detection capability of fore-slips and their depth.

値を示している. この M_w をフォアスリップの中心までの深さと, 駿河トラフからの距離に対して表した. 破線は傾斜計を隙間なく配置したとした極限の場合の値である. これは 6 節において示されるように $2 \log(h) + \text{const}$ で表される. h はフォアスリップの中心までの深さである. 深さごとの最良の検知能力 (図の “min” 曲線) は, 傾斜計を隙間なく配置した極限の能力に近く, 8 km 付近までは深さの減少と共に高まるが, それで浅では逆に低下する. 最低の検知能力 (図の “max” 曲線), これは断層の南端の能力にあたるものであるが, 深さ 27 km 付近より浅い方が深い方より能力が低い. その結果, 最高と最低の検知能力の差が最大となるのは, 深さ 8 km 付近で M_w 2 程度となる.

Fig. 4(a) はクライテリオン II による検知能力である. 最良の御前崎下で 4.5 弱, 陸地下では 4.5 から 6 程度である. 御前崎沖の海底下では 5.0 から 6.5 である. 検知能力の空間分布の特徴はクライテリオン I の場合とほぼ同様である. ただ大須賀, 天竜, 三ヶ日, 三河に囲まれた広い領域が観測点配置上の空白であり, その影響が天竜川河口付近 (舞坂の東約 15 km) およびその沖合いの検知能力が低いことに, より明瞭に現れる. この改善については 6 節で検討する.

検定断層面全面の平均的検知能力は M_w 5.60 であり, クライテリオン I に比べて M_w で 0.4 程度検知能力が高い. また平均的検知能力のモーメントは予想される本震のそれの 2.6×10^{-4} である.

陸側断層面 (駿河湾を含む御前崎以北の領域) および海側断層面 (御前崎以南の領域) の平均的な検知能力を比較すると, クライテリオン I, II 双方とも海側は M_w で 0.6, モーメント比で 9 倍程度陸側よりも能力が低い. 先の気象庁のみの場合では, M_w で 0.4, モーメント比で約 4 倍程度である. この御前崎沖の能力改善については後に検討する.

4. 異常監視に特に寄与する観測点

全観測点を併合したケースについて, 検知能力への各観測点ごとの寄与率を検討する. Fig. 5 はその観測点 1 点が存在しないとした場合に, クライテリオン I の平均的検知能力がどの程度低下するかを示している. 検潮儀について先に設定した精度 3 cm は, 2 ないし 3 時間という短期間の変動に対しては小さ過ぎる値であろう. しかしこの値を設定した場合においても, 検潮儀は他の観測器に比べて感度が小さいため, 短期的な異常検知に貢献する可能性は少ない. また伊豆半島側の観測点の貢献度も, 断層から離れていること等により少ない. 貢献度の大きい観測点は, 大須賀, 御前崎, 伊良湖, 本川根, 静岡, 岩本山, 富士川等の限られた点である. これらの点は, 主に現観測点分布上の端にある点, 他の観測点から離れている点, もしくは他より力学的増幅率の大きな体積歪計の配置点である場合もある. その値は, すべての観測点が使用できる場合の平均的検知能力値 M_w 5.97 の 0.1 から 0.35%, モーメント比で 2 から 7% 程度能力を低下させる. 遠州灘沿岸の大須賀, 御前崎, 伊良湖で特に大きい. この値は, 1 観測点による検定断層面全体の平均的検知能力に与える影響としては少なくない. これらはどの観測点が異常監視に特に寄与するかを示すものであり, その周辺の観測点の増強, 並びにデータの精度の改善が望まれる. なお, 検知能力の大きさへの寄与率が小さい点は, その大きさではなく質に貢献する可能性がある. すなわち異常が同時に多数観測点で観測される可能性を増し, 変動の異常

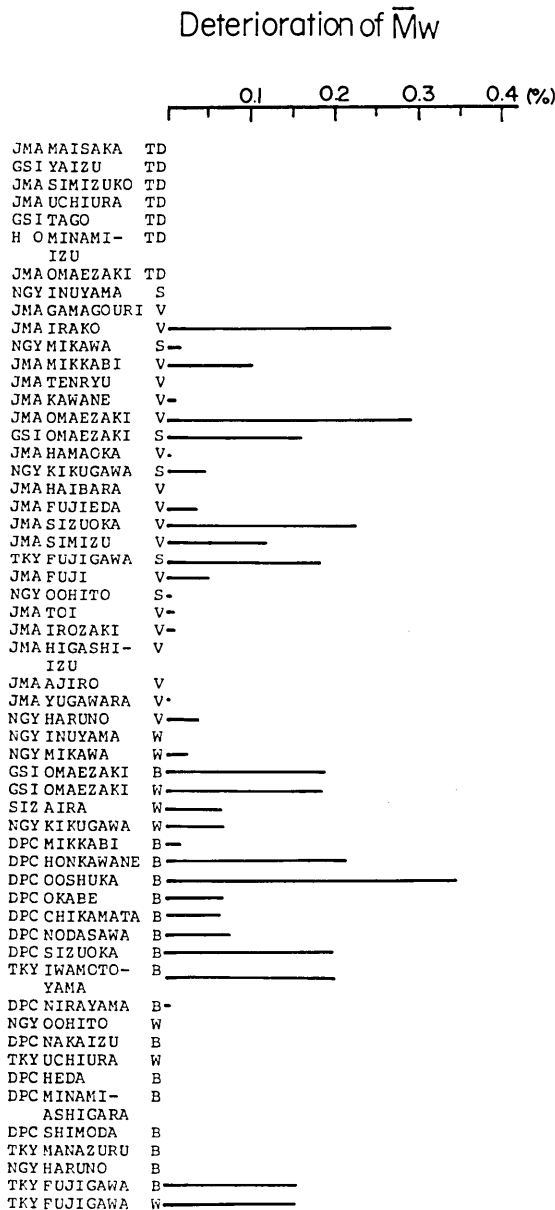


Fig. 5. Contribution of each station to the detection capability shown in \bar{M}_w . "TD", "S", "V", "W", "B" indicate tidal gage, strainmeter, volumetric strainmeter, borehole-type tiltmeter and watertube-type tiltmeter.

を認識するうえで、その信頼性を高める効果が期待される。

5. 検知能力のパラメータ依存性

検知能力を求める際に、先に設定した想定断層ならびに、フォアスリップのパラメータを用いた。しかし、それらのパラメータには必ずしも確たる根拠のないものもある。そこで、変動量の大きいことが予想される幾つかのパラメータについて検知能力推定に与える影響を検討した。Fig. 6(a) は、フォアスリップの静的ストレスドロップを 1 bar に設定した場合、すべての観測点による、クライテリオン I の検知能力の空間的分布である。30 bar に設定した場合と比べて分布に大きな違いは無い。ただ、浅い方の端部に、検知できる最小のフォアスリップが、その場所で起こりうるフォアスリップの大きさを越える領域が現れる。それはフォアスリップによる変形の計算をポイントソースではなく有限の大きさの断層面によるとしたためである。すなわち同じモーメントの場合、仮定した相似則により、応力降下量が小さい方が相対的に断層面積が大きい。このため、浅い領域において検知できる最小のフォアスリップがその場所で起こりうる大きさを越える可能性が現れることになる。Fig. 6(b) は、この影響の現れる領域を除くために断層の深い方 1/2 領域の平均的検知能力を、設定したストレスドロップに対して示した。フォアスリップのストレスドロップが

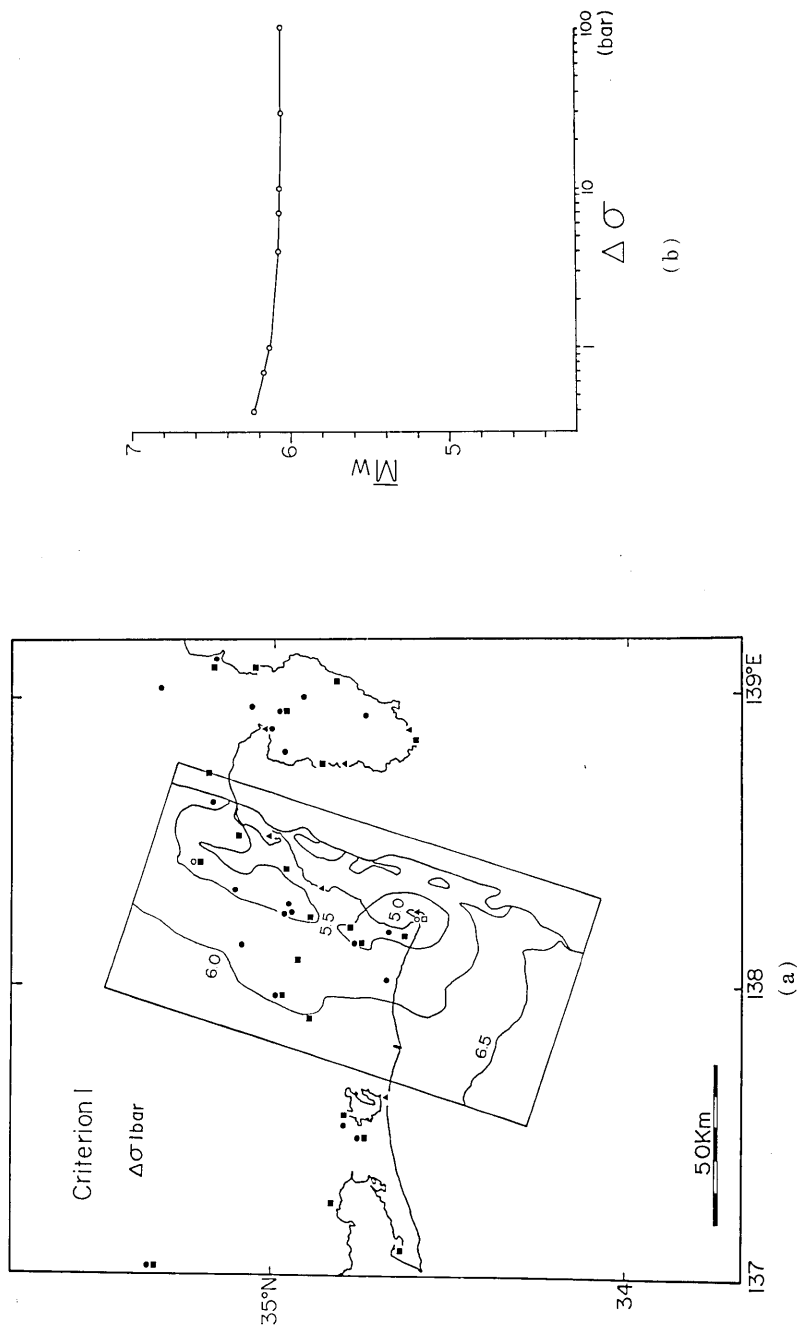


Fig. 6. (a) The detection capability by the network of all observation stations in this area for criterion I, when the static stress drop of fore-slips is 1 bar. (b) Relation between the static stress drop of the fore-slips and the average detection capability of the deeper half fault plane.

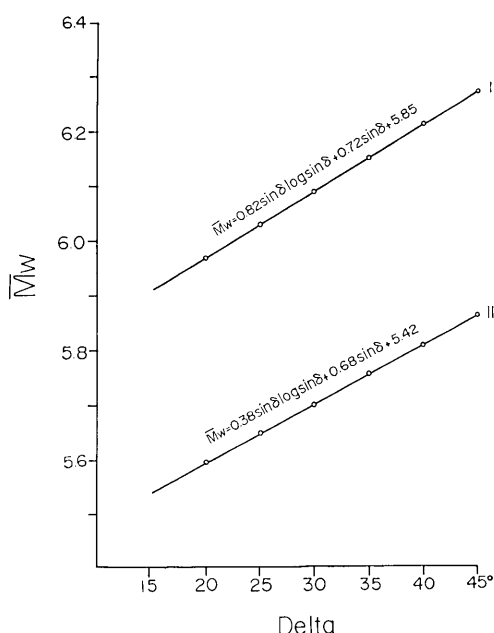


Fig. 7. Relation between the average detection capability and the dip angle of fault plane.

の式で表され補正可能である。

$$M_w = 0.82 \sin \delta \log (\sin \delta) + 0.72 \sin \delta + 5.85 \quad (\text{クライテリオン I})$$

$$M_w = 0.38 \sin \delta \log (\sin \delta) + 0.68 \sin \delta + 5.42 \quad (\text{クライテリオン II})$$

なおこれらの式は、数値実験による。

6. 効率的な増設点

推定された検知能力分布にもとづいて、さらにその向上法を検討する。4節で示したように、推定された検知能力の空間分布は一樣ではなく、観測点分布の不均一性の影響が現れている。現在の段階では、前兆的変動を生じる可能性が高い領域はどこかという問題についての手掛りはほとんど無いので、どこで前兆的変動が生じても良いような対応を取らなければならない。そこで以下では前兆的変動を生じる可能性は断層面上で一樣であると仮定し、検知能力分布の均一化を図り、さらに断層面全体の検知能力向上について検討する。また必要とされる検知能力の大きさについてもほとんど判っていない。これもこれからの研究が待たれる問題である。ここでは、それぞれの方法と改善率の関係を求め、その効率を比較するに留める。

検知能力を改善する方法の一つは観測点を増設することである。ここでは気象庁の体積歪計網をベースに他機関の稼働中のすべての観測点を併合したと仮定した上で検討した。実際このような併合を行った場合、平均的検知能力はクライテリオン I 及び II 双方ともモーメント比にして4倍程度改善され、大きな効果があることを先に示した。ここで増設す

数 bar 以上であれば、推定される平均的検知能力の大きさはストレスドロップによらない。このことよりさらに前震に伴うストレインステップについても、検定断層面上に同様の傾斜角及びスリップアングルで生ずるものについては、同じ検知能力をもつことが期待される。

東海地震の傾斜角はここでは 20° と仮定したが、石橋 (1976) は 34° と推定しており、この値は今後さらに検討する必要がある。Fig. 7 は、傾斜角の設定値を変えた場合の、すべての観測点による平均的検知能力を示した。 20° と 34° では、クライテリオン I で M_w 0.17, クライテリオン II で 0.15 程度異なる。傾斜角の違いによる平均的検知能力は、次

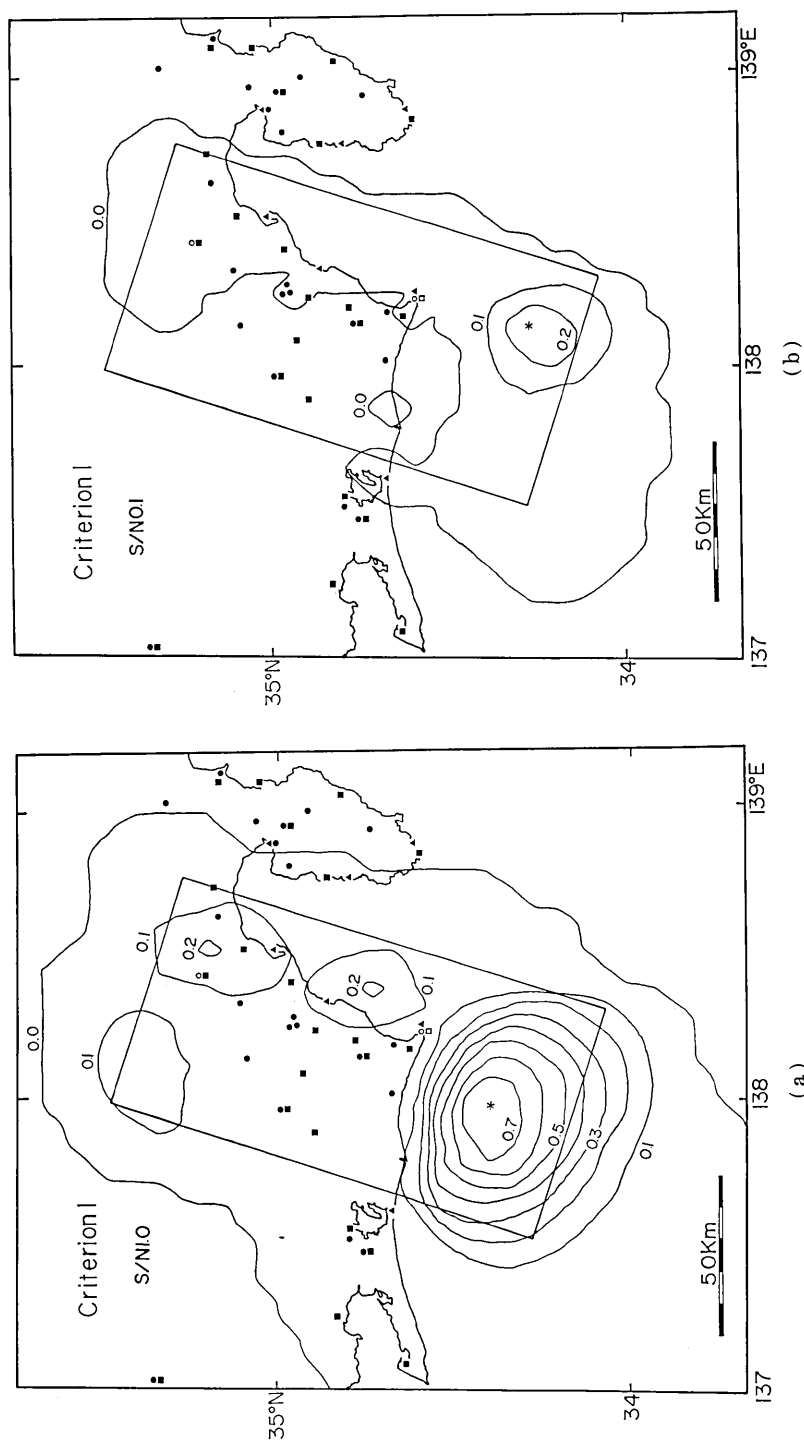


Fig. 8. (a) Improvement of detection capability for criterion I by addition of a tiltmeter (accuracy 10^{-7}). (b) Improvement when the accuracy is 5×10^{-7} .

る機種としては、傾斜計を考えたが、実際に観測器を設置する場合には、設置地点や目的によって適当な観測器を選定すべきであろう。しかし、以下におこなう効率的な増設点の位置、必要とされる増設点数、精度の改善の効果等についての議論ではその種類に大きく依存することはない。

現在、坂田ら (1981)、坂田・島田 (1984) により、海底傾斜計の開発が進められている。それは日本に被害を及ぼす地震の多くが海底下に震央をもつが、その短期・直前予知をおこなうには、たとえ多少ノイズが大きいとしても、前駆的変動の大きい可能性の高い震央付近において観測することが重要と考えられ、海底傾斜計はそれに適しているからである。東海地震の想定断層面の $1/3$ 以上は海底下にあるが、先に示したように、平均的には御前崎沖の海底下では陸側と比較してモーメント比で 9 倍大きいものしか検知できない。そこで御前崎沖の断層面に関しては、海底傾斜計の設置による改善も検討した。

先に設定した異常とする地殻変動量の最小値は 10^{-7} であった。各観測点ではこの値以上の精度が要求されている。そこで Fig. 8(a) は、この精度をもつ傾斜計を一点置いた場合に、クライテリオン I に対し検定断層の平均的検知能力を M_w で何%改善できるかを示したものである。これは断層面上の検知能力分布において、相対的に低い領域をどの程度カバーし改善できるかを示している。

陸上部では、清水の北方に M_w 0.2% (モーメントにして 4%, 以下カッコ内の数値は

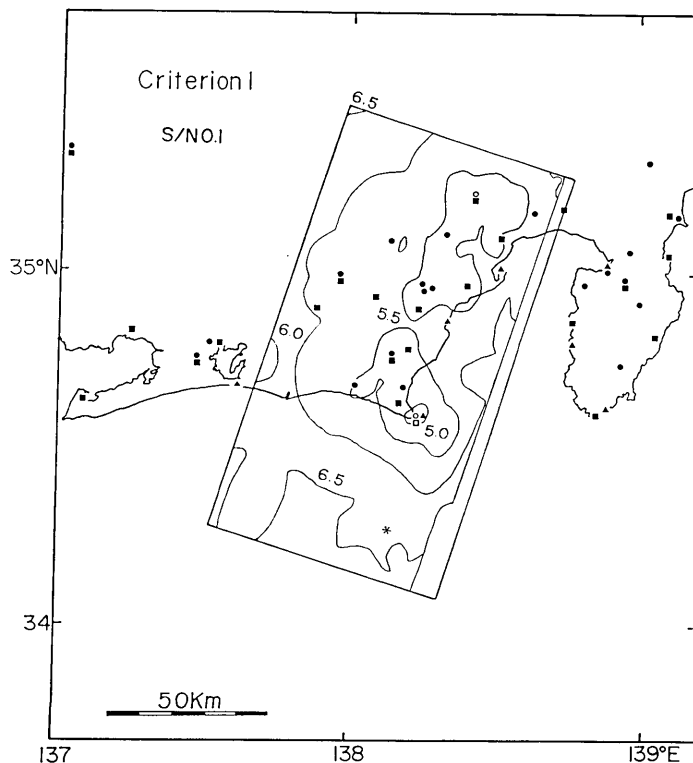


Fig. 9. The detection capability for criterion I after setting a best positioned ocean bottom tiltmeter with accuracy of 10^{-6} .

同様) 強の領域がある. また焼津付近, 断層の北側深い方の端部上に M_w 0.1% (2%) 強の領域がある. それらの点に観測点を設置した場合に, 断層面上において最もその効果が現れるのは, 設置点下の領域であるが, その値はモーメントにして 13% から 15% であり, 設置場所によらずほぼ一定である.

天竜川河口付近では, M_w 0.1% のコンターと海岸線とが交わる. これは先に述べた観測点空白域による影響を改善する陸上の増設点である. ただし実際には沖積層が厚いことにより設置環境が悪いことが予想される地域である.

海底下では, M_w 0.7% (14%) 強の非常に効率的な領域が存在する. しかしこの場合に想定した傾斜計の精度は 10^{-7} である. そこで Fig. 8(b) に, 坂田・島田 (1984) の海底傾斜計で達成されている精度 10^{-6} をもつ傾斜計を配置した場合の改善率を示す. 改善に有効な設置領域は, 先の精度の場合に比較して極めて狭い範囲に限られている. この場合の最も効率の良い点は, 御前崎南方沖約 35 km で, 改善率 M_w 0.28% (5.6%) である. Fig. 9 は, その点に海底傾斜計を設置し, 改善された後の検知能力の空間分布である. 設置点の周り半径 30 km 程度の領域において改善されることになる. しかし能力

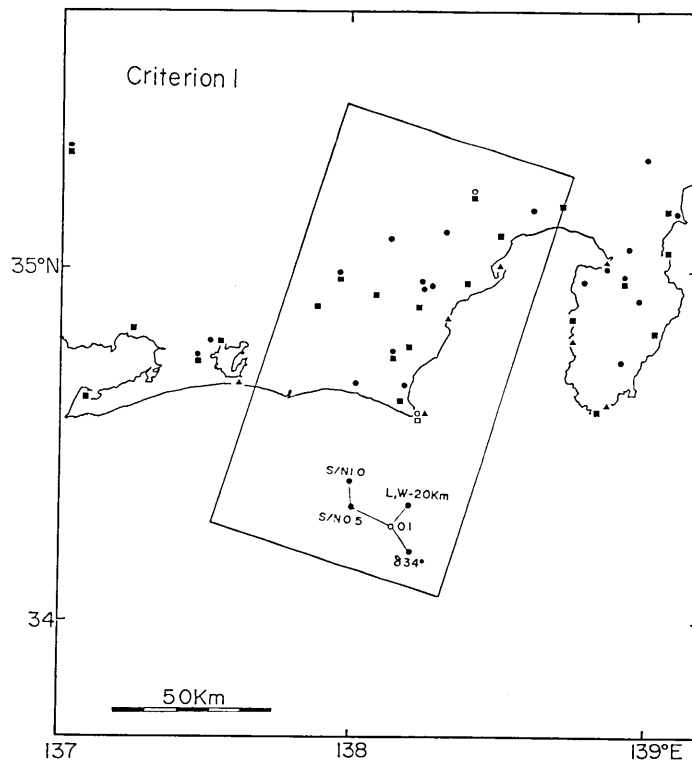


Fig. 10. Most effective position of an ocean bottom tiltmeter for different accuracies of its and different fault models. "S/N=1.0", "0.5" and "0.1" indicate the cases with accuracies of 10^{-7} , 5×10^{-7} and 10^{-6} respectively. " $\delta 34^\circ$ " indicates the case where the fault model has a dip angle of 34° , and "L, W=20 km" indicates the case of a fault model of L 100 km and W 60 km.

分布の変化は緩やかなものである。海底傾斜計の精度が向上がなされ、それに従って異常とする地殻変動量を変更した場合の効果についてはさらに後に検討するが、Fig. 10 に、精度が改善された場合について、それぞれの精度における最も効率的な増設点を先に示す。精度は、現在の陸上に配置されている傾斜計で達成されていると考えられる精度 10^{-7} との比をとり S/N で表した。先に示したように海底傾斜計の精度が 10^{-6} である現在の状態（図中“ $S/N 0.1$ ”で示す点）では、断層の南側で浅い領域上に最良点がある。精度が向上し 2×10^{-7} (“ $S/N 0.5$ ”), 10^{-7} (“ $S/N 1$ ”) と陸上の観測精度に近づくにつれ、最良点は海側断層面の中心上に移動し、1点で海側断層面全体をカバーするようになる。

同じく Fig. 10 に海底傾斜計の精度は現在のそれとして、断層モデルを幾つか変更した場合の最良点を示した。フォアスリップの起こりうる領域が、長さ方向に片側 20 km ずつ狭く、幅も深い方が 20 km 短いモデル（図中の“ $L, W-20$ km”の点）では、さきの位置より 10 km ほど北東側になる。このモデルは、ほぼ強化地域部会が想定した本震の断層面に等しく、石橋 (1976) のそれよりは小さい。また傾斜角を石橋 (1976) の 34° にしたモデルでは（図中の“ $\delta 34^\circ$ ”）では 12 km ほど南東側になる。このように断層モデルによる効率的な設置点の違いは比較的小さい。

7. 精度の向上による検知能力の改善

検知能力を改善するもう 1 つの方法は、観測点の精度を向上させ、異常とする地殻変動の基準値 (*threshold*) を変更することである。この地域の地殻変動観測データに気圧、温度、潮汐、降雨の補正等を加えた後において、どの程度のバックグラウンドの変動が存在するかについては明確な結論が得られているわけではない。しかし、多点で同時に現れるという条件により、現在の基準より小さくできる可能性はあると考えられる。

Fig. 11 (a) は、気象庁の体積歪計のみのネット、およびすべての観測点によるネットに対して各観測点の精度が一様に改善できると仮定し、クライテリオン I の基準値を変更した場合の平均的検知能力を示している。Fig. 11 (b) は、同様にクライテリオン II に関する平均的検知能力を示している。どのネットに対しても、また、どちらのクライテリオンに対しても、 $0.67 \log (\text{threshold})$ の項をもつ。このことは、精度を 1 桁向上させることができれば M_w で 0.67、モーメントでは 1 桁小さなフォアスリップを検知できることを意味する。この効果は、検定断層面全体にわたってほぼ一様に作用するため、観測点の無い海底下の能力改善にもつながり重要である。

8. 観測点間隔と検知能力との関係

先に有効な増設点を検討し、1点による検知能力の改善量を求めたが、さらに点数を増した場合についての改善量を見積もる。先に観測点の平均的配置間隔 i と検知能力 M_w の一般的な関係を求めることにする。これにより、どのような観測点配置が効果的かを知らることができる。

深さ h に対応する想定断層上の点を取り、その地表投影点を中心として、辺長 i の正三角形エレメントを多数置き、それぞれの頂点に傾斜計を配置する。そして中心の周りの最も近い 6 点の観測点に囲まれた領域の内側 $1/4$ 領域を断層面に再投影し、その部分の平均

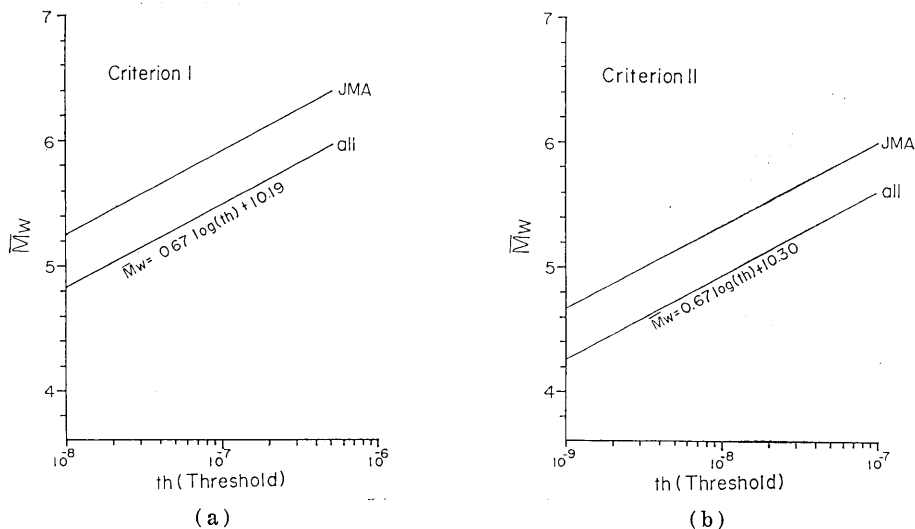


Fig. 11. (a) Relation between the detection capability and the threshold of abnormal crustal deformation for criterion I by the network of JMA and by all observation stations in this area. (b) Same relation for criterion II.

的検知能力 M_w をもって間隔 i のときの、深さ h のフォアスリップに対する検知能力の尺度とする。この値は数値計算によつて求めた。それは以下の最小二乗法により求めた近似式で表わされる。

$$M_w = 0.485 i/h + 2 \log(h) + 2.980 \quad (1)$$

Fig. 12 に数値実験的に求めた値を実線で、最小二乗法によってフィットした値を破線で示した。ここで $2 \log(h) + \text{const}$ の項は、Fig. 13 に示される観測点を隙間なく配置することによる検知能力の限界である。検知能力には観測点間隔に比例し、深さに反比例する項がある。このことより、一般にある傾斜角をもつ逆断層あるいは正断層において、断層面全体の平均的検知能力を向上させるには、断層面までの深さに比例した間隔で観測点を配置するのが最も合理的であると考えられる。このとき検知能力は、観測点を隙間なく配置することによる検知能力の限界に深さによらない一定のオフセットが加わったものになる。このオフセット量をどの程度許容するかについては、費用等の間

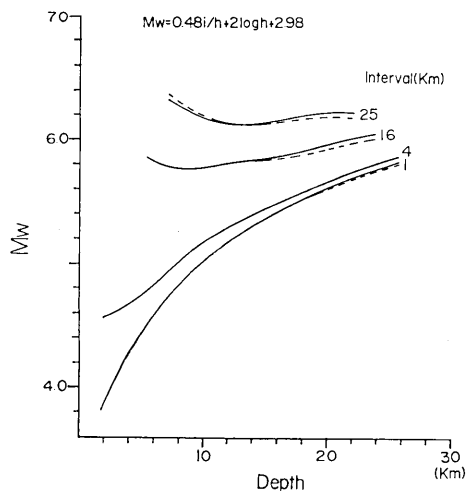


Fig. 12. Relation between the detection capability and depth of fore-slips for different station intervals. Solid lines are derived from numerical experiment and broken lines are from their least square fit.

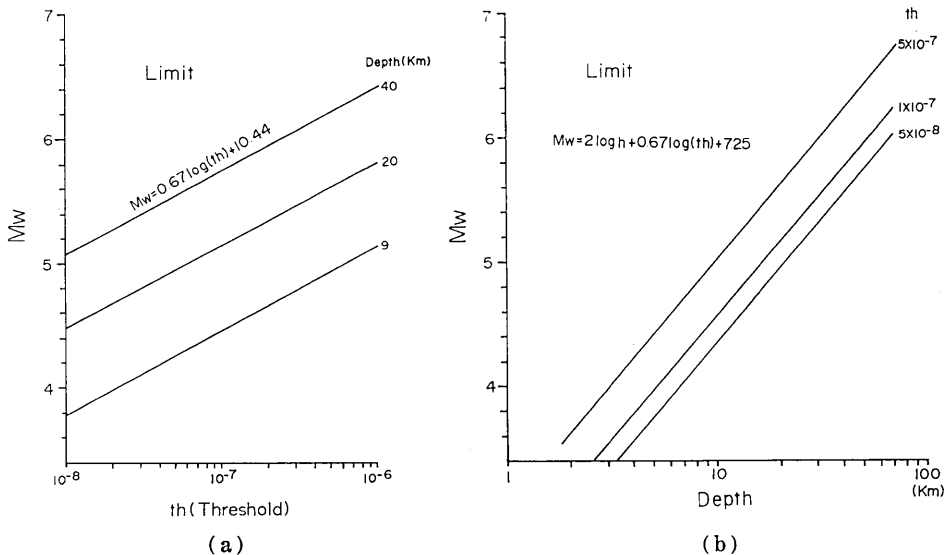


Fig. 13. (a) Relation between the detection capability and threshold of abnormal crustal deformation for criterion I in cases where the station interval is zero. (b) Relation between the detection capability and depth of fore-slips.

題がでてくるであろう。しかし観測点間隔を断層面までの深さに比例して配置し次のように置いた場合

$$i = c \cdot h \quad (c: \text{constant})$$

検知能力はモーメントで表すと先のオフセットの項により

$$M_0 \propto 10^{0.73c}$$

と指数関数で表される。したがって指数は1以下、すなわち c は 1.4 程度以下である必要があると思われる。ちなみにこの値を東海地域に適用すると観測点間隔は、御前崎付近において 10 km、天竜川河口付近において 30 km である。

深い方の検知能力は低い、観測点数を多くしても改善の効果は小さい。従って、高精度の観測を実施する必要がある。もし検知能力が深さによらず一定であることを要求するならば、異常とする地殻変動の基準値を観測点から断層面までの深さ h の3乗に反比例させ、深い観測点において小さくする必要がある。その理由は次の通りである。異常とする地殻変動量を変更することによる検知能力向上の効果は、7節で示した通り $0.67 \log(\text{threshold})$ で表される。これを (1) 式に加え、断層面までの深さに比例した間隔で観測点を配置すると仮定し、 $i = c \cdot h$ と置くと題意より

$$0.67 \log(\text{threshold}) + 2 \log(h) = \text{const}$$

$$h^2 (\text{threshold})^{2/3} = \text{const}$$

従って $\text{threshold} \propto h^{-3}$ となり、先の結論が得られる。

さらに観測点の平均間隔と断層の平均的検知能力との関係を次節以下の議論のため求め

ておく。(1) 式は断層の長さ方向の平均を含むので、これまで平均的検知能力を求めてきた深さ $80 \sin 20^\circ$ から $4 \sin 20^\circ$ まで平均し、全体の平均的検知能力に対応させる

$$\begin{aligned}\bar{M}_w &= 1/(80-4)/\sin 20^\circ \left[\int_{4 \sin 20^\circ}^{80 \sin 20^\circ} 0.485 i/h + 2 \log h + 2.980 dh \right] \\ &= 0.0362 i + 5.123\end{aligned}$$

精度の改善による効果を加えると

$$\bar{M}_w = -0.667 \log S_n + 0.0362 i + 5.123 \quad (2)$$

である。ここで S_n は精度の改善率を表し、現在設定している異常とする地殻変動量 10^{-7} と改善の結果新たに設定できる値との比である。

9. 改善法の比較

(1) 改善量の見積もり

検定断層を御前崎を境にそれより北側を陸側断層面 ($89 \times 80 \text{ km}^2$)、南側を海側断層面 ($51 \times 80 \text{ km}^2$) とし、(2) 式を用いて観測点の増設と精度の向上による検知能力の改善量をクライテリオン I について見積もる。増設点数が多いときには、陸側の平均的検知能力 \bar{M}_{LA} は次のように置くことができる。

$$\bar{M}_{LA} = -0.667 \log S_n^{LA} + 0.0362 i + 5.123$$

S_n^{LA} ; 陸側観測点の S/N 比改善率

現在即ち増設点数 0, $S_n^{LA}=1$ のときの陸側 $89 \times 80 \text{ km}^2$ の平均は 5.753 であるから陸側の観測点の平均間隔を i_{LA} とすると

$$i_{LA} = 17.40$$

である。陸側の増設点数を N_{LA} , N_{LA}^0 を陸側の相当既設点数とすると

$$i^2 = 89 \times 80 / (N_{LA}^0 + N_{LA})$$

$N_{LA}^0 = 7120 / i_{LA}^2$ より

$$i = 1 / \sqrt{1/17.40^2 + N_{LA}/7120}$$

i を \bar{M}_{LA} に代入すると

$$\bar{M}_{LA} = -0.667 \log S_n^{LA} + 0.0362 / \sqrt{1/17.40^2 + N_{LA}/7120} + 5.123 \quad (3)$$

となる。同様に海側 ($51 \times 80 \text{ km}^2$) の平均 \bar{M}_{OB} は

$$\bar{M}_{OB} = -0.667 \log S_n^{OB} + 0.0362 i + 5.123$$

S_n^{OB} ; 海側観測点の S/N 比改善率

とおくことができる。また、現在即ち増設点数 0 のときの海側の平均は 6.361 であるが、これは陸側観測点による効果である。これは次のようにあらわされる。

$$\bar{M}_{OB} = -0.667 \log S_n^{LA} + 6.361 \quad (4)$$

従って先の二式から陸側観測点による効果に相当する海側の観測点の平均間隔 i_{OB} は

$$i_{OB} = 18.42 \log S_n^{OB} / S_n^{LA} + 34.20$$

である。海側の増設点数を N_{OB} , N_{OB}^0 を陸側観測点による海側の相当既設点数とすると

$$\begin{aligned} i^2 &= 51 \times 80 / (N_{OB}^0 + N_{OB}) \\ i &= 1 / \sqrt{1/i_{OB}^2 + N_{OB}/4080} \end{aligned}$$

これを \bar{M}_{OB} 代入すると

$$\bar{M}_{OB} = -0.667 \log S_n^{OB} + 0.0362 / \sqrt{1/i_{OB}^2 + N_{OB}/4080} + 5.123 \quad (5)$$

検定断層面全体の平均は

$$\begin{aligned} \bar{M}_w &= (7120 \bar{M}_{LA} + 4080 \bar{M}_{OB}) / 140/80 \\ &= -0.424 \log S_n^{LA} + 0.0230 / \sqrt{1/17.40^2 + N_{LA}/7120} \\ &\quad - 0.243 \log S_n^{OB} + 0.0132 / \sqrt{1/i_{OB}^2 + N_{OB}/4080} + 5.123 \end{aligned} \quad (6)$$

である。

(2) 結果と議論

Fig. 14(a) は, (3) 式により現在と同じ精度をもつ傾斜計を増設した場合について, 陸側断層面の平均的検知能力 (左の縦軸) と傾斜計の増設点数 N_{LA} との関係を表す. さらに既に稼働中の観測点の精度を向上させ, 異常とする地殻変動量の基準値を変更する効果と比較するために, 図の右側に陸側断層面の平均的検知能力と異常とする地殻変動量の基準値 th (land) との関係を横棒で示した. 断層面全体の平均では既存の観測点の精度を改善し, 基準値を 1/2 にすることは, 傾斜計を 30 点増設することに匹敵する. 陸上において, 確かに先に示した比較的効率的な増設点, 及び海側の能力を高めるため必要な遠州灘に面した地域では増設の効果が期待できる. しかし観測点の増設により陸側断層面全体の検知能力向上をめざすのは, 既存の観測点の精度の向上による方法より効率が悪いように思われる.

海側の断層面については次の通りである. Fig. 14(b) は (4), (5) 式により, 幾つかの異なつた精度をもつ海底傾斜計を設置した場合に, 海側断層面の平均的検知能力 (左の縦軸) と海底傾斜計の増設点数 N_{OB} との関係を示す. さらに先と同様既設の陸側の観測点の精度を向上させる効果との比較のために右側には海側断層面の平均的検知能力と陸上観測点の異常とする地殻変動量の基準値 th (land) との関係を横棒で示す. 陸上の傾斜計において設定されているものより, 1桁低い 10^{-6} の精度をもつ海底傾斜計を 30 点を増設することと, 既存の陸側の観測点に設定する基準値を 1/2.2 にすることが対応する. Fig. 8(b) に示したように, この場合には改善に有効な設置領域が限られ, 1点でカバーできる範囲も狭い. これらのことから, 現在の精度 10^{-6} では, 海側全体の能力を向上させるには効果が大きいとは言えない. 先の比較的効率的な増設領域に絞って配置するのが有効であろう.

海底傾斜計は, 底層流や設置面が柔らかい堆積層であることなどの設置環境が悪く, 陸上と同様の精度を望むのは困難かもしれない. しかし, 海底傾斜計の精度を向上させることの効果は明らかに大きい. 精度が 5×10^{-7} では 30 点設置することと, 既存の陸側の観測点に設定する基準値を 1/10, 10^{-7} では 1/18 にすることに匹敵する. すなわちそれぞれ 1/10, 1/18 のモーメントのフォアスリップを検出できる. しかしこのように多点配置しなくとも, 10^{-7} の精度に向上できれば, 5点設置することにより現在の 1/4.8, 10点では 1/8.2 のモーメントのフォアスリップを検出できるようになる.

茂木 (1977, 1982) は, 石廊崎断層を延長した線上にしばしば微小地震が配列すること

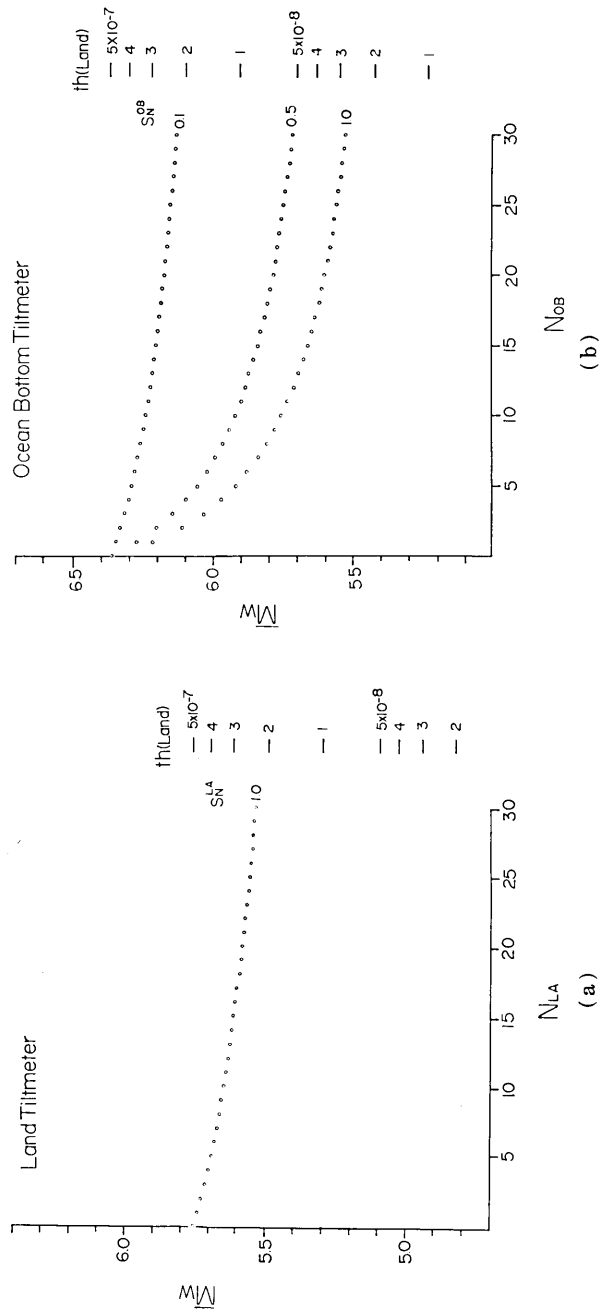


Fig. 14. (a) Relation between average detection capability of landward fault plane and the number of additional tiltmeters. The right bars show the effect of threshold change of stations which already exist. (b) Relation between average detection capability of oceanward fault plane and the number of additional ocean bottom tiltmeters; the right bars are the same as before.

より、この線上に構造線を想定し、これより北側ではフィリピン海プレートの沈み込みは顕著ではなく、衝突型に移行しており、きたるべき東海地震では取り残され、沈み込みが明瞭であると考えられる南側単独（大部分は海底下）で発生する可能性もあったとした。また MOGI (1969) は、プレートのもぐり込みに関連して生じる巨大地震の多くの前震及び本震の位置は、それより先に発生した巨大地震側の端であることを指摘した。さらに KELLEHER *et al.* (1973) 及び井元 (1976) によれば、それは深い方の端であることが多い。これらのことから、来たるべき東海地震では、先に発生した東南海地震 (1944) 側で、深い方の端で前兆の変動が生じる可能性が考えられる。このことから、地震を予知するには遠州灘の海底下の検知能力を向上させることが重要であり、海底傾斜計の実用化が待たれる。

10. ま と め

以上、述べてきたことをまとめると次のようになる。地震の前兆的地殻変動の機構としてフォアスリップを仮定し、東海地震の拡張した想定断層面上にそれが生じた場合の検知能力を推定した。東海-伊豆地域のすべての観測点（検潮儀 7 点、歪計 24 点、傾斜計 25 点）による想定断層全体の平均的検知能力はクライテリオン I に関して M_w 5.97, II に関しては M_w 5.61 である。これは予想される本震のモーメントのそれぞれ 9.3×10^{-4} , 2.6×10^{-4} である。御前崎から榛原にかけてと、岡部、富士川付近にそれぞれ検知能力の高い領域がある。遠州灘の海側断層面の検知能力は低く、平均的にみて陸側のその M_w で 0.61, モーメント比にして約 9 倍大きなフォアスリップしか検知できない。

現在の気象庁の体積歪観測点 17 点のみのネットでは、この地域のすべての観測点によるものより、クライテリオン I 及び II 双方とも平均でモーメント比にして約 4 倍程度検知能力が低い。従って、他機関のデータを参照する効果は大きい。

すべての観測点によるネットにおいて、検知能力への寄与が大きい観測点は、主に現観測点配置上の周辺部にある点であり、大須賀、御前崎、伊良湖、静岡、本川根等では、それ 1 点が使えないことで想定断層面全体の平均でモーメントにして 4~7% 検知能力が低下する。これはまた、検知能力の向上にどの地点での観測が有効かを示しており、これらの観測点の精度の向上、及び観測点の増強が望ましい。

前兆的変動の生じる可能性が、断層面上で一様であるとして、陸上において検知能力の改善に役立つ効率的な増設点は、清水の北方、焼津、天竜川河口付近、および断層の北側で深い方の端部上付近であり、1 点増設することにより全体の平均でモーメントにして 2% 程度検知能力を向上できる。しかし、断層面全体の検知能力を増設によって向上するには多数点必要であり、既存の観測点の精度の改善が重要であると考えられる。

遠州灘と陸側との検知能力の大きな差は重要な問題である。これは既設の観測点の精度の向上と、遠州灘に面した海岸線に沿う地域、とりわけ天竜川河口付近への観測点の増設が有効である。またこの能力向上を海底傾斜計によって図る場合、現在の精度 10^{-6} では海側の断層面全体の能力を向上させるには精度が低いようである。この精度においては、御前崎の南 35 km にモーメントにして 5.6% 改善できる比較的効率的な領域があり、この領域に絞って配置する必要がある。しかし精度の改善がなされ 10^{-7} の精度が達成され

るならば、検知できる領域が拡大し、5点設置することにより海側の断層面全体の平均で1/4.8、10点では1/8.2のモーメントのフォアスリップを検出できるようになり大きな効果が期待できる。

11. おわりに

本研究ではすべての観測点に、同一の異常とする地殻変動量及び変動の時間スケールを設定した。しかし、検知能力の向上に観測精度の改善が最も有効であることは、先に示した通りである。したがって、これは各観測点ごとのデータを自動的に補正し、S/N比を改善したうえで、おのこの精度に合わせて設定すべきである。それには各観測点ごとの気温、気圧、潮汐、降雨さらにはセンサーと周りの岩盤との結合度、観測点の周りの局所的変動の特性に関するデータが必要であり、今後の課題と思われる。

謝 辞

今回の研究にあたり、御指導くださった地震研究所茂木清夫教授に感謝します。同島崎邦彦、阿部勝任両助教授、および地震活動ゼミ関係諸氏との討論は有益でした。宮武隆博士には色々な助言をいただきました。ここに記して感謝します。

文 献

- 国立防災科学技術センター, 1982, 関東・東海地域における最近の地殻傾斜連続観測 (1981年11月～1982年4月), 地震予知連絡会会報, **28**, 150-157.
- 檀原 毅・遠山忠昭・井野盛夫・岩田孝仁, 1984, 静岡県相良町に設置した長距離水管傾斜計連続観測システムの紹介, 地震学会講演予稿集, No. 2, 109.
- DIETERICH, J. H., 1978, Preseismic fault slip and earthquake prediction, *J. Geophys. Res.*, **83**, 3940-3948.
- FUJII, Y., 1976, Seismic crustal movement and associated gravity change, *J. Geod. Soc. Japan*, **22**, 308-310.
- 藤井陽一郎, 1976, 地震とプレスリップ, 地震予知シンポジウム, 127-137.
- FURUYA, I., 1984, Characteristics of borehole volume strainmeter and its application to seismology, Ph. D. dissertation, Tokyo Univ., Tokyo, Japan.
- 井元政二郎, 1976, 1969年北海道東方沖地震の初期破壊過程, 地震 **2**, **29**, 1-13.
- 石橋克彦, 1976, 東海地方に予想される大地震の再検討——駿河湾大地震について, 地震学会講演予稿集, No. 2, 30-34.
- 地震予知総合研究振興会, 1983, 地震予知観測網図表集.
- KANAMORI, H., 1977, The energy release in great earthquakes, *J. Geophys. Res.*, **82**, 2981-2987.
- KANAMORI, H., and J. J. CIPAR, 1974, Focal processes of the great Chilean earthquake May 22, 1960, *Phys. Earth Planet. Int.*, **9**, 128-136.
- KANAMORI, H. and D. L. ANDERSON, 1975, Theoretical basis of some empirical relations in seismology, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **65**, 1073-1095.
- KELLEHER, J., L. SYKES and J. OLIVER, 1973, Possible criteria for predicting earthquake locations and their application to major plate boundaries of the Pacific and the Caribbean, *J. Geophys. Res.*, **78**, 2547-2585.
- 気象庁, 1983, 地震月報, 1月.
- 松村正三, 1984, 微小地震観測網の検知能力の評価について——国立防災科学技術センター 関東・東海地殻活動観測網, 地震 **2**, **37**, 475-489.

- 前田 函, 1977, スティックスリップ運動に伴うプレシヨックとプレスリップ及びそれ等に対する時間的効果, 地震 2, 30, 55-72.
- MINSTER, J. B. and T. H. JORDAN, 1979, Rotation vectors for the Philippine and Rivera plates, *Trans. Am. geophys. Union*, 60, 958.
- MOGI, K., 1969, Relationship between the occurrence of great earthquakes and tectonic structures, *Bull. Earthq. Res. Inst., Univ. Tokyo*, 47, 429-451.
- 茂木清夫, 1977, 伊豆・東海地域の最近の地殻活動の一解釈, 地震研究所彙報, 52, 315-331.
- 茂木清夫, 1981, 地震予知と岩石力学, 材料, 30, 105-118.
- 茂木清夫, 1982, 日本の地震予知.
- MORTENSEN, C. E. and M. J. S. JOHNSTON, 1976, Anomalous tilt preceeding the Hollister earthquake of November 28, 1974, *J. Geophys. Res.*, 81, 3561-3566.
- 大久保正, 1984, 地震の規模別頻度分布による防災センター観測網の震源決定能力の推定, 地震学会講演予稿集, No. 2, 260.
- 大中康豊, 1979, 地震モデルとしてみた stick-slip の断層近傍における歪及び変位変化の測定, 地震学会講演予稿集, No. 2, 150.
- 坂田正治・島田誠一・浜村武重, 1981, 海底傾斜計の開発 (1), 測地学会誌, 27, 75-84.
- 坂田正治・島田誠一, 1984, 海底傾斜計の開発 (2), 測地学会誌, 30, 50-58.
- SATO, R. and M. MATSU'URA, 1974, Strains and tilts on the surface of a semiinfinite medium, *J. Phys. Earth*, 27, 353-372.
- SCHOLZ, C. H., L. R. SYKES and Y. P. AGGARWAL, 1973, Earthquake prediction: A physical basis, *Science*, 181, 803-810.
- SCHOLZ, C. H., P. MOLNAR and T. JOHNSON, 1972, Detailed studies of frictional sliding of granite and implications for the earthquake mechanism, *J. Geophys. Res.*, 77, 6392-6406.
- SHIMAZAKI, K., 1985, Observability of a foreslip on a hypothesized fault of the anticipated Tokai, Japan earthquake, *Earthq. Pred. Res.*, 3, 637-649.
- SIEH, K. E., 1978, Prehistoric large earthquake produced by slip on the San Andreas fault at Pallet creek, California, *J. Geophys. Res.*, 83, 3907-3939.
- 鶴川元雄・石田瑞穂・松村正三・笠原敬司, 1983, 防災センターにおける定常震源決定, 地震学会講演予稿集, No. 2, 109.
-

*Investigation of the Detection Capability of Premonitory
Crustal Deformation in the Tokai District*

Shuzo KOGITA

Earthquake Reserch Institute, University of Tokyo

In the Tokai area, a large earthquake is anticipated, and for the purpose of detecting the possible signs of imminent precursors various instruments have been installed. An attempt is made to assess the detection capability of crustal deformation caused by a fore-slip in this area. An investigation is also made to improve this capability. Fore-slips are assumed to take place on the hypothetical anticipated Tokai earthquake fault plane and its lateral and deep extentions. Following the Earthquake Prediction Council, two criteria of anomalous crustal deformation are set up. Average detection capability on this enlarged fault plane is 5.97 in M_w for the first criterion, the ratio of the moment of the fore-slip to the anticipated main earthquake is 9.3×10^{-4} . Average detection capability for the second criterion with swarm is 5.61 in M_w and the ratio of the moment of the fore-slip to the anticipated main earthquake is 2.6×10^{-4} . Higher detection capability areas in this region are the Omaezaki-Haibara, Okabe and Fujigawa areas. The detection capability of the JMA volumetric strainmeter network is 4 times less than that of the network of all observation stations in this area. In the case of the network of all observation stations, there are some stations that have a large effect to the capability along the Enshunada coastline. Improving the accuracy at these stations is desired. The average detection capability in the ocean is 9 times in moment less than on land. It is very important to improve the capability in the ocean. The ocean bottom tiltmeters may be very effective for this purpose if their accuracy is improved to 10^{-7} .