

温泉地学研究所リアルタイム地震情報処理の信頼性の評価

-2006年伊豆半島東方沖地震を例にして-

行竹洋平*・棚田俊收*・本多 亮*・伊東 博*・原田昌武*

Confidence of the real time earthquake information system in the Hot Springs Research Institute of Kanagawa Prefecture - In the region of earthquake swarm east off the Izu Peninsula in 2006

by

Yohei YUKUTAKE*, Toshikazu TANADA*, Ryou HONDA*, Hiroshi ITO* and Masatake HARADA*

1. はじめに

大地震や活発な群発地震活動が発生した際、地震活動の推移を迅速かつ正確に提供することは重要なことである。しかしながら、余震ならびに群発地震の発生頻度は一日あたり数 100 イベントにおよび、その処理はきわめて煩雑となる。その理由は、それらの震源位置、マグニチュードおよびメカニズム解を決定するためには、P 波・S 波の到達時刻、P 波の極性および最大振幅の読み取り(検測)を短時間で行わなければならないからである。この場合、手動によって検測処理を行うと多大な時間を要してしまうため、ルーチン化された自動検測処理が有用となる。その際、情報発信者は自動検測処理で得られた地震情報がどの程度信頼性があるのかを把握しておかなければならない。

過去に温泉地学研究所では、棚田(1999)が 1999(平成 11)年当時の観測網を用いて震源決定精度を検証した。その後、地震観測システムの更新(伊東ほか、2005)ならびに気象庁一元化協定の参入により、リアルタイムに処理できる観測点の数ならびに範囲が飛躍的に向上した(図 1、詳細は 3 章に記述)。地震観測システムが更新された後、2006(平成 18)年に伊豆半島東方沖の群発地震活動が活発化した。この群発地震の活動域は、観測点網の端に位置するが、更新された地震観測システムを用いたリアルタイム地震情報処理の信頼性を把握するのに有用と考えられる。本報告では、自動検測処理から得られた震源分布、マグニチュードならびにメカニズム解を手動検測処理から得られたそれぞれの結果と比較し信頼性を議論した。

2. 2006年伊豆東方沖地震の概要

伊豆半島東部の川奈崎沖周辺では、過去に活発な群発地震活動が頻発している。1998(平成 10)年 4 月から 2005(平成 17)年までは、比較的静穏な状態が続いていた。2006(平成 18)年になり群発地震活動が活発化し、1 月 26 日、2 月 20 日そして 3 月 30 日と 3 回の地震活動が発生し、その後活動度が次第に高くなっていった。4 月 17 日から更に活動が活発になり、4 月 21 日に川奈崎東方沖約 3km の場所で気象庁マグニチュード(以下、Mj)が 5.8 の地震が発生した。この地震により神奈川県内でも震度 4 が観測された。その後、震源分布が南南東方向へ伸び、4 月 22 日にこの地震分布の南端で Mj=4.8 の地震が発生した。4 月 30 日には、川奈崎から北へ約 10km 離れた地点で、Mj=4.5 の地震が発生し、5 月 2 日には川奈崎東方沖約 15km の場所で Mj=5.1 の地震が発生した。この地震でも、神奈川県内で震度 4 が観測された。5 月 12 日頃には、群発地震活動は静穏化した。

3. 自動検測処理システムならびに使用データ

温泉地学研究所では、1989(平成元)年よりテレメータ観測を開始した(温泉地学研究所、1999)。その後、1995(平成 7)年には、WIN システム(卜部・東田、1992)を導入して東京大学地震研究所及び防災科学技術研究所のデータと合わせて処理ができるようになった。さらにシステムの更新(伊東ほか、2005)により、地震観測処理が強化され、気象庁一元化協定にも参入した。その結果、震源決定範囲は神奈川県西部のみではなく、神奈川県全体、伊豆、相模湾まで拡大した。2006(平成 18)年からは、66 点の定常観測点(図 1)における波形データ

* 神奈川県温泉地学研究所 〒250-0031 神奈川県小田原市入生田 586
報告, 神奈川県温泉地学研究所報告, 第 38 巻, 63-68, 2006.

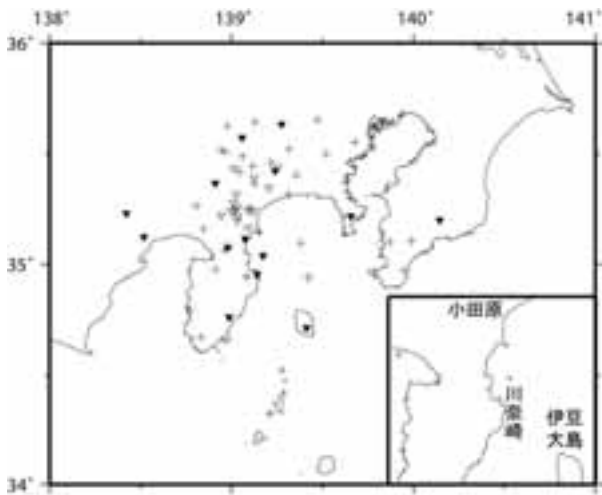


図1 使用した観測点分布. 白抜き三角は温泉地学研究所、黒三角は東京大学地震研究所、十字は防災科学技術研究所の観測点をそれぞれ示す。

を収録し、トリガー波形記録と連続波形記録を作成している。作成されたトリガー波形記録は、WINシステムの地震波形検測支援プログラムの自動検測ルーチンにより、P波・S波到達時刻、P波極性ならびに最大振幅が読み取られる。そこから暫定的な震源情報ならびにマグニチュードが決定される。震源位置は、丹沢地域の一次元速度構造モデル(平賀、1987)を用い、hypomh法(Hirata and Mastu'ura, 1987)から計算される。マグニチュードは、最大振幅から渡辺(1971)の手法により決定される。

この震源情報は、直ちにリアルタイム地震情報として、温泉地学研究所のホームページ上で公開される(本多ほか、2006)。その後、自動検測処理された全てのトリガー波形記録は、人間の目によって全観測点の波形が精査される。そこで、自動処理された結果から、地震ではない砕石発破や人工的なノイズといったものが除かれる。さらに、P波およびS波到達時刻ならびにP波極性の読み取りが適切ではないものは修正される。手動で処

理された検測値から震源位置、マグニチュードが再決定され、その際自動検測処理から得られた地震情報も修正される。

本報告では、群発地震活動が活発化した2006(平成18)年1月から静穏化した5月12日までに伊豆半島東方沖にて発生した地震イベントを用いた。

4. 震源位置およびマグニチュードの決定精度について

4.1 震源分布およびマグニチュード頻度分布の比較

自動検測処理および手動検測処理から決定された震源分布を、図2(1)および(2)にそれぞれ示す。自動検測処理では877イベントが震源決定された。一方、手動検測処理では905イベントが震源決定された。手動検測処理の方が震源決定されたイベント数が多いのは、複数のイベントがほぼ同時刻に発生した場合、一つのトリガー波形記録に複数の地震波形が記録されるからである。自動検測処理の場合、このような波形記録に対して一イベントの検測処理しか行うことができない。

川奈崎周辺における地震の分布傾向は、自動検測処理ならびに手動検測処理のどちらにおいても、大局的には違いはない。どちらの場合も、深さ5-15kmの範囲で南北方向に分布した傾向が見られる。ただし、詳細に見ていくと自動検測処理から得られた震源には、深さが0km付近に決定されたものがある(図2(1))。さらに、自動検測処理により決定された震源分布では、川奈崎周辺の群発地震発生域からはなれた領域においても、震源が決定されている(図2(1))。

次に、自動検測処理および手動検測処理により決定された震源位置の標準偏差(南北方向)の頻度分布、ならびにマグニチュードの頻度分布を図3(1)および(2)にそれぞれ示す。震源位置の標準偏差が0.6km以内の範囲を見ると、どちらの場合においても似た頻度分布が見られる(図3)。しかしながら、手動検測処理では99%の震源

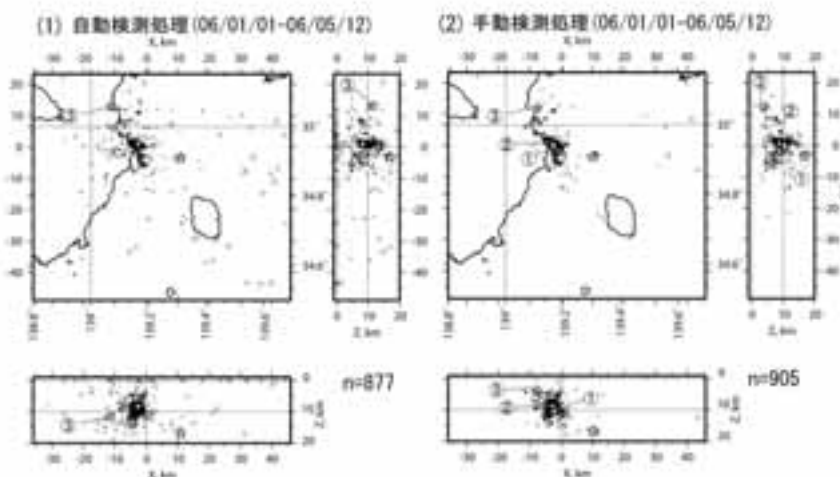


図2 (1) 自動検測処理ならびに(2) 手動検測処理によって決定された震源分布. 白抜き丸はM4.0より小さなイベント、星印はM4.0以上のイベントの震源位置をそれぞれ示す。

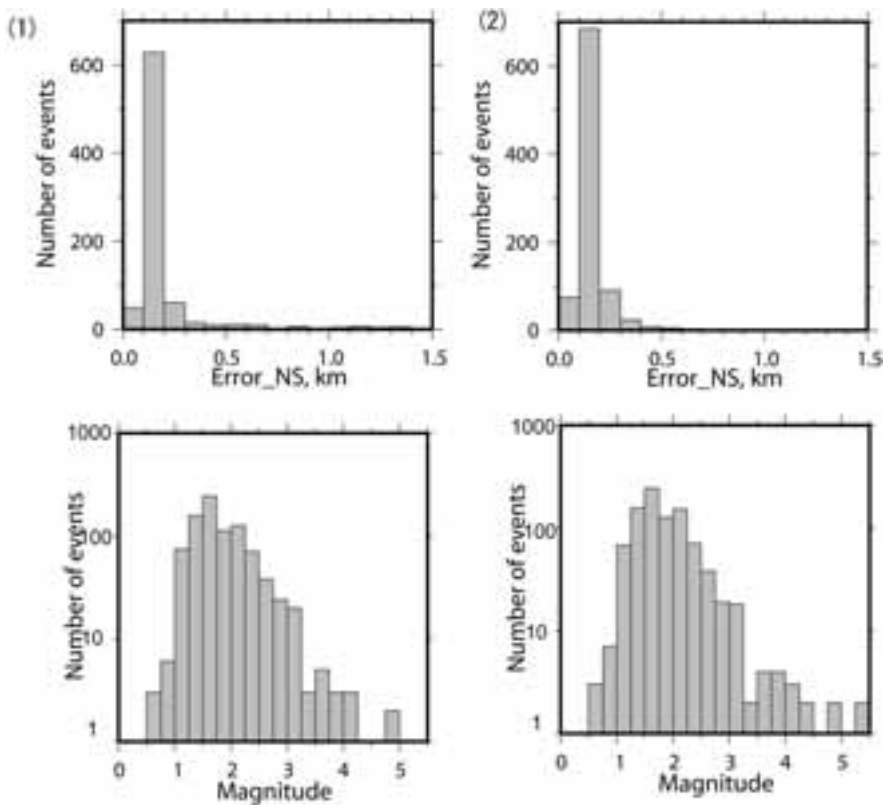


図3 (1) 自動検出処理ならびに(2) 手動検出処理によって決定された震源位置の標準偏差、ならびにマグニチュードの頻度分布。(上) 南北方向の標準偏差、(下) マグニチュード頻度分布

が標準偏差 0.6km 以内に決定されているのに対して、自動検出処理では 84% の震源が標準偏差 0.6km 以内に決定されている。東西および深さ方向の震源位置標準偏差にも、同様の傾向が見られた。

マグニチュード頻度分布は自動処理および手動処理どちらの場合においても、同じ傾向が見られる(図3)。ただし、M4 以上のイベントの数は自動検出処理の方が 2 イベント少ない。これは 4 月 21 日 2:50 および 23:17 に川奈崎沖約 3km(139.17°E、34.94°N) 付近に発生したイベント①および②に対応する(図2(2))。また 4 月 30 日に川奈崎から北へ約 10km の領域(139.15°E、34.95°N 付近)に発生したイベント③の深さは、自動検出処理では手動検出処理と比較して 7km 深く決定された(図2)。これらの原因については、以下に詳しく議論する。

4.2 考察

自動検出により決定された震源のうち、南北方向、東西方向および深さ方向標準偏差が 0.6km 以下に決定することができた震源のみを図4に示す。その結果、川奈崎周辺では深さが 0km 付近に決定されたイベントは少し残るが、図2(1)に見られた川奈崎周辺から離れて決定された震源はほとんど除去された。この結果は、川奈崎周辺からは離れて決定されたイベントの多くは、自動検出処理のなかで不適切な P 波および S 波の読み取りがされたため、真の震源位置とは離れた領域に決定されたことを示唆している。このため、震源位置の標準偏差

は、自動検出処理により決定された震源の中から誤った P 波ならびに S 波の読み取りが行われたイベントを取り除くための条件として有用であると考えられる。

4 月 21 日に発生したイベント①および②のマグニチュードが自動検出処理では低く見積もられた。この理由は、ほぼ同時刻に別の地震が発生し、適切な検出処理が行われなかったからである。4 月 30 日に発生したイベント③の深さが手動より深く推定された理由も同様に、約 10 秒前に別の地震が発生し、自動検出ではそのイベントの P 波 S 波到達時刻が読み取られたからである。ただしこの場合、最大振幅はイベント③のフェーズが読み取られており、マグニチュードは適切に(M=4.2) 見積もられている。

5. 初動メカニズム解の決定精度について

地震メカニズム解は、震源位置ならびにマグニチュード情報と同様に地震活動の推移を把握するための有用な情報である。我々は、メカニズム解から断層の方向及びすべり方向を知ることができる。それらは、震源周辺の地殻応力状態を推定するための重要な情報である。また、地震のメカニズム解から推定される静的な応力変化(Δcff)は、地震活動の推移を予測するための重要な情報となる。実際に過去の研究例では、大きな地震の静的な応力変化により、余震が誘発されたことが報告されている(例えば、Das and Scholz, 1981、King et al., 1994)。

本報告書では、各観測点で観測された P 波初動の押

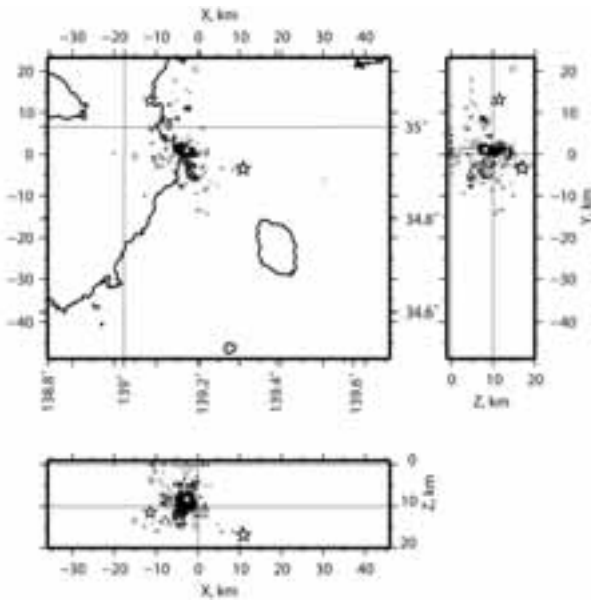


図 4 自動検測処理によって、南北あるいは東西あるいは深さ方向の標準偏差が 0.6km 以内に決定された震源分布。星印は M4.0 以上のイベントを示す。

し引き(極性)、ならびに震源決定の際に得られた方位角と射出角から、岡田(1988)の手法を用いてメカニズム解を決定した。この手法では、最適なメカニズム解を中立軸(B軸)ならびに節面方向を決める回転角に対してグリットサーチすることにより決定する。決定された最適なメカニズム解の精度を評価するために、P軸ならびに引っ張り軸(T軸)方向の標準偏差を計算した。

5.1 メカニズム解の比較

自動処理ならびに手動処理検測データをもとに決定したメカニズム解 P 軸の標準偏差の頻度分布を、図 5 に示す。どちらの場合においても P 軸の標準偏差が 20°~30° の範囲に頻度分布のピークが見られ、ほとんどのイベントの P 軸標準偏差が 20° 以上ある。本報告書では T 軸の標準偏差の頻度分布に関しては、P 軸のそれとよく似た分布をしているため、図の記載を省略する。伊豆半島当

方沖地震の場合、P 軸ならびに T 軸標準偏差が 20° 以上であるメカニズム解の多くは、節面が一つの方向に決定できなかった。また、P 軸ならびに T 軸標準偏差が 20° 以下に決定されたメカニズム解でも、P 波初動の極性の数が少なくかつ観測点配置が悪い場合、節面の方向の信頼性が低くなる。さらに、マグニチュードの小さなイベントは振幅が小さくなり、極性の読み取りが難しくなる。これらの理由から、節面が一方に決定できたメカニズム解のみを選び出すために、以下の条件を設けた。P 軸ならびに T 軸の標準偏差が 20° 以下であること。P 波初動の極性の数が 10 点以上であること。マグニチュードが 2.0 以上であること。さらに、震源位置もメカニズム解の精度に影響を与えるため、震源位置の標準偏差が 0.6km 以内という条件を設けた。上記の条件を満たしたメカニズム解を持つイベントの割合は、自動検測処理ならびに手動検測処理どちらの場合においても、総イベント数の 5%、M2 以上のイベントの 19% であった。

上記の条件を満たすメカニズム解のうち、自動ならびに手動で検測処理された 35 イベントを図 6 に示す。自動ならびに手動検測処理で決定されたメカニズム解との間に大きな違いはない。ほとんどの場合において節面が一方に決定されている。ただし、イベント No.11 や 18 のように、上記の条件を満たしていても節面の方向が十分に制約されなかったイベントも含まれる。イベント No.14、15、16 および 22 では、節面が一方に決定されているが、観測点配置が他のイベントと比較すると偏在している。このようなイベントは、上記の条件を満たす他のイベントと比較してメカニズム解の信頼性は低いと考えられる。

5.2 考察

自動検測処理ならびに手動検測処理どちらの場合においても、ほとんどのイベントのメカニズム解を精度良く決定することができなかった。主な原因として、群発地

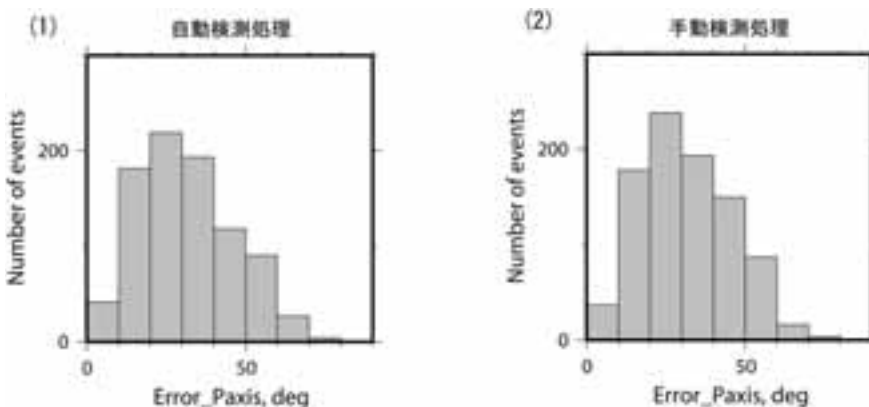


図 5 (1) 自動検測処理ならびに (2) 手動検測処理によって決定されたメカニズム解 P 軸標準偏差の頻度分布 (上半球投影)。

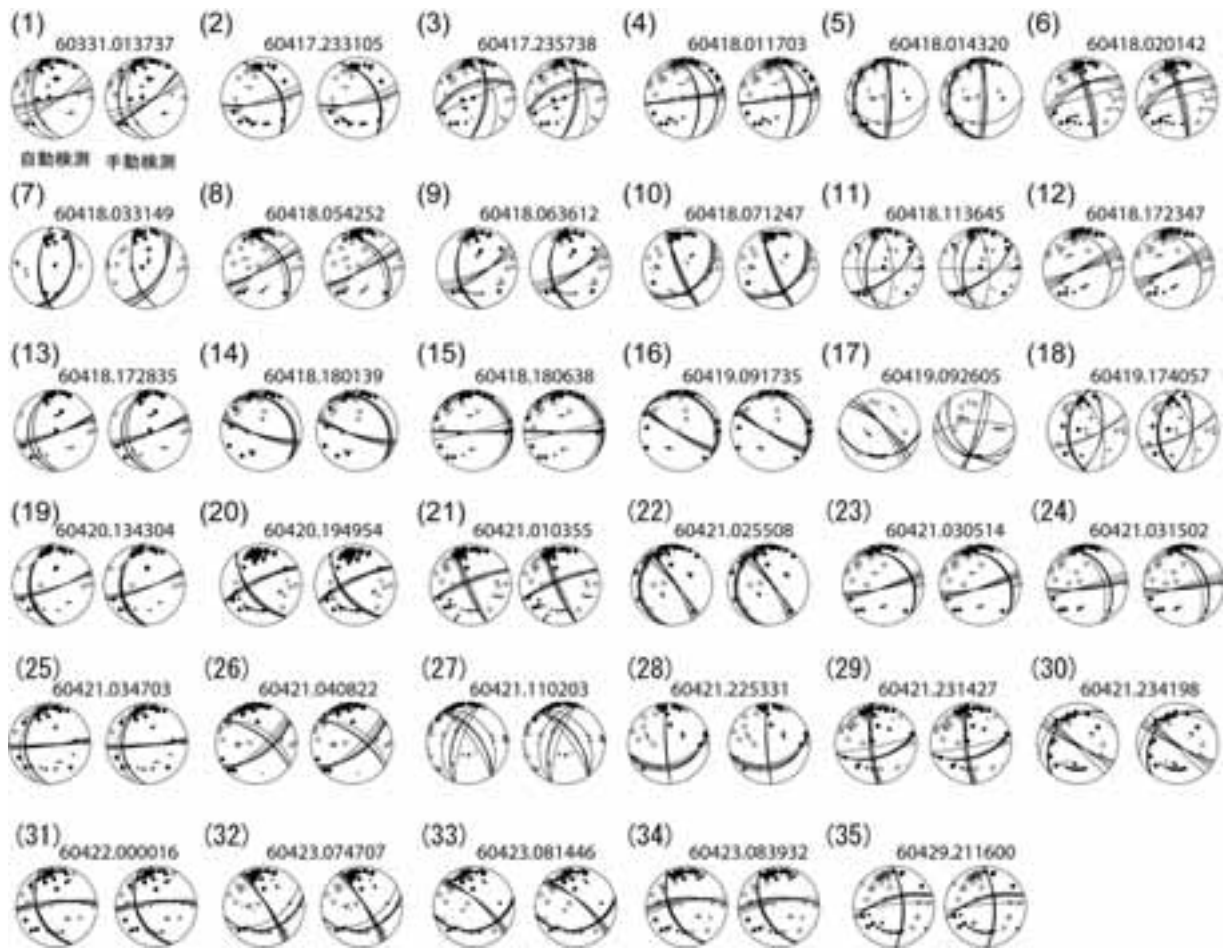


図6 自動検測処理ならびに手動検測処理によって決定されたメカニズム解のうち、設定された4条件（詳細は本文参照のこと）すべてを満たすメカニズム解。左側は自動検測処理、右側は手動検測処理から得られたメカニズム解を表す。なおメカニズム解の上に表示された数字は、発震時刻（年月日・時分秒）を示す。

震域が観測点網（図1）から離れており、観測点配置が偏在するためであると考えられる。設定された4条件を満たすイベントは川奈崎を中心とする半径10kmの円内に分布している。これらのメカニズム解の多くは、自動検測処理ならびに手動検測処理した場合で大きな違いはなく、節面が一方方向に精度良く決定されている（図6）。伊豆半島東方沖で発生したイベントの場合、これらの条件を満たすイベントに関しては自動検測処理で決定されたメカニズム解でも、そのほとんどはリアルタイムに提供できると考えられる。

ただし、これらの条件を満たすイベントの中でも、観測点配置が良くないため、相対的に信頼性が低いイベントは存在する。図7において、震源が深さ0km付近に決定されたイベントも含まれる（図7）。手動検測処理でこのイベントの深さは8kmに決定されている。このイベントのメカニズム解の信頼性は、震源精度が良く決定されていないため低いことが考えられる。我々は、設定された条件を満たしても信頼性が低いメカニズム解が含まれる可能性があることに注意しなければならない。P

軸およびT軸の標準偏差、マグニチュードおよびP波極性の数の条件をそれぞれ緩和させた場合、節面が制約されないメカニズム解が多数混入してくる。従って、精度良く決定されたメカニズム解をできるだけ多数選び出すための条件設定は妥当であると考えられる。

6. まとめ

本報告書では、更新された地震観測網を用いたリアルタイム地震情報処理システムの信頼性を評価するため、2006年伊豆半島東方沖地震を例にした。そして、自動検測処理ならびに手動検測処理にて得られた震源分布、マグニチュード頻度分布ならびにメカニズム解をそれぞれ比較した。その結果、自動検測処理によって得られた地震情報の信頼性について、下記のことが明らかになった。

- 1) 川奈崎周辺の震源分布は、自動処理および手動処理の場合で、大局的には違いは見られなかった。ただし自動処理の場合、誤って決定されたイベントが川奈崎周辺

- の群発地震域から離れた領域や深さ 0km 付近にあった。
- 2) 震源位置の標準偏差は、自動検出処理により決定された震源の中から誤った読み取りが行われたイベントを取り除くための条件として有用である
 - 3) マグニチュードの頻度分布はほとんど同じである。ただし自動検出処理のマグニチュードは、震源位置と同様に、2つのイベントがほぼ同時に起こった場合には誤って推定される。
 - 4) メカニズム解の精度は、震源が川奈崎東方沖 10km 以上になると、自動処理および手動処理とも悪くなった。これは、観測点配置の偏在に起因していた。
 - 5) 精度良く決定することができたメカニズム解を選び出すための有効な条件は、P 軸 T 軸の標準偏差が 20° 以下、P波極性の数が 10 点以上、マグニチュードが 2.0 以上、震源位置の標準偏差 0.6km 以内である。

考察にも述べたように、震源位置ならびにメカニズム解決定精度は、検測の正確さによる問題だけではなく伊豆半島東方域が観測点網の端にあたることによる影響を受けていると考えられる。その影響を定量的に見積もるため、今後箱根火山周辺のような観測点配置が良い領域における群発地震活動を例に取り、リアルタイム地震情報処理の信頼性を評価することが必要ある。

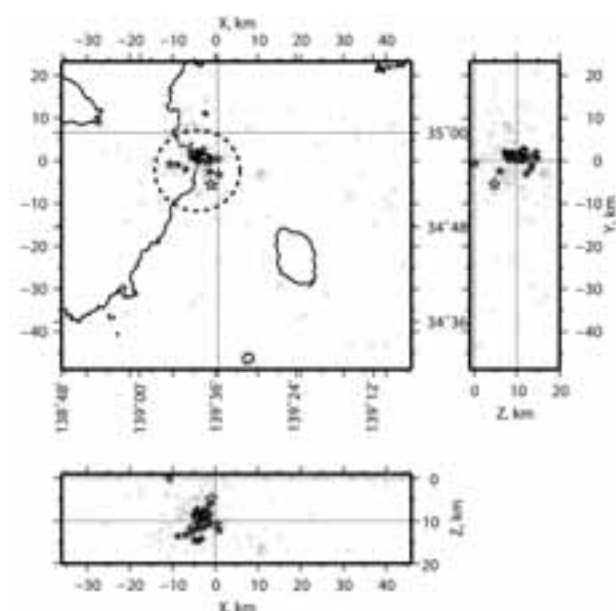


図7 自動検出処理によって決定されたメカニズム解のうち、設定された4条件（詳細は本文参照のこと）すべてを満たすイベントの震源分布（星印）。灰色の丸は、4条件を満たさなかったイベントの、震源位置を示す。点線は川奈崎を中心とする、半径 10km の円を示す。

謝辞

本研究を行うにあたり、東京大学地震研究所ならびに防災科学技術研究所の波形データを使わせていただいた。防災科学技術研究所の岡田義光理事長には、メカニズム解計算プログラムを使用させていただいた。

参考文献

- 卜部 卓・東田進也 (1992) win-微小地震観測網波形検測支援のためのワークステーションプログラム（強化版），地震学会予稿集，C22-P18.
- 岡田義光 (1988) 震源計算・発震機構解計算プログラムの改良，国立防災科学技術センター研究報告，41，153-162.
- 温泉地学研究所 (1999) 温泉地学研究所における「神奈川県西部地震」のとりくみ，温地研報告，29，3-40.
- 伊東 博・宮下雄次・棚田俊收・代田 寧・倉石隆介・加藤正造 (2005) 新たな総合研究システムについて，温地研観測だより，55，23-32.
- King, G. C. P., Stein, R. S., Lin, J. (1994) Static stress changes and the triggering of earthquakes. *Bull. Seimol. Soc. Am.* 84, 935-953.
- Das, S. and Scholz, C. H. (1981) Off-fault aftershock clusters caused by shear stress increase?. *Bull. Seismol. Soc. Am.* 71, 1669-1675.
- 平賀士郎 (1987) 箱根火山と箱根周辺海域の地震活動，温地研報告，18(4)，125p.
- Hirata, N. and Matsu'ura M. (1987) Maximum-likelihood estimation of hypocenter with origin time eliminated using nonlinear inversion technique, *Phys. Earth Planet. Inter.* 47, 50-62.
- 本多 亮・丹保俊哉・原田昌武・伊東 博・板寺一洋・棚田俊收 (2006)，ウェブ上でのデータ公開用サブシステムの開発，温地研報告，38，53-62 .
- 棚田俊收 (1999) 温泉地学研究所の地震観測網における震源決定精度と検知能力，温地研報告，29，47-54.
- 渡辺 晃 (1971) 近地地震のマグニチュード，*地震* 2，24，189-200.