

地震前兆解析システムにおける自動震源決定

堀 貞喜*・松村正三*

国立防災科学技術センター

Automatic Hypocenter Determination by the Analyzing System for Precursors of Earthquakes

By

Sadaki Hori and Shozo Matsumura

National Research Center for Disaster Prevention, Japan

Abstract

The automatic hypocenter determination has been employed from October, 1986 as one of the functions of the Analyzing System for Precursors of Earthquakes (APE). The onset times of *P* and *S* waves are successfully detected by applying an autoregressive process model (AR model) to the signal of a ground motion. A seismogram including both a ground noise and a seismic wave signal is divided by three windows (a window for the first model, a window for detection, and a window for the second model). The log-likelihood function of the joint model is calculated for every sampling point in the window for detection and the onset time is identified as a point where the function becomes a maximum value. Two windows for the first model and second model are defined just before and behind the window for detection. The window for detection of the *P* onset time is set by the method of level judgement and prediction error filtering. In the level judgement, ratio of short term average (*STA*) to long term average (*LTA*) of the ground motion is monitored every second. Monitoring of the prediction residual has the merit of keeping the window for detection from missetting in the case that the signal-to-noise ratio is low. The window for detection of the *S* onset time is set referring the calculated *S* arrival time obtained from *tentative* hypocenter determination using only *P* arrival time data. The width of the window for detection of *S* is varied keeping in mind that accuracy of the calculated *S* arrival time may become worse as the hypocentral distance increases. Detectability of this automatic hypocenter determination is half of the routine (man-machine) processing, but the obtained seismicity pattern is found to be well delineated.

*第2研究部地震前兆解析研究室

1. はじめに

震源の決定は、観測地震学の根幹をなす重要な作業である。近年、微小地震観測網が整備されるのに伴い、検測すべきデータ量は膨大なものになってきており、得られる地震波形データを遅滞なく処理していく作業は、各機関とも大きな負担となっている。このため、定常作業の省力化を図るため、自動震源決定、特に地震波到着時刻の自動検測のために様々な手法が考案されてきた〔例えば、渡辺・他(1975)；渡辺・黒磯(1977)；Stewart(1977)；Allen(1978)；市川(1980)；横田・他(1981)；前田(1985)〕。これらの地震波検出方法の中には、単なるフィルターとレベル判定の組合せのような単純なものから、地震波形にある種の時系列モデルを適用したものまで様々なアルゴリズムが提案されている。最近では計算機の高速化に伴い、地震波形に自己回帰過程(AR)モデルを当てはめて統計的に処理する手法〔白井・徳弘(1979)；浜口・鈴木(1979)；森田・浜口(1981)；森田・浜口(1984)〕が主流になっており、第一近似的には、ほぼ満足のいく結果が得られるようなものまでに完成度が高まりつつある。

国立防災科学技術センター(以下「防災センター」と略す)でも、昭和61年10月から自動震源計算の運用を開始した。今回の運用は、昭和60年度末に導入した、「地震前兆解析システム(APE)」〔松村・他(1987)〕の開発作業の一部である。地震前兆解析システムの中核をなすのは、計算機が自動的に地震前兆現象を検出する「地震前兆自動監視システム(以下「自動監視システム」と略す)」の部分〔堀・他(1987)〕であるが、自動震源決定は、この自動監視システムにおける地震波形データの一次処理として、b値等のような、異常監視項目についての各パラメータを計算するための基礎的なデータを作成するという役割を担っている。

本稿では、今回運用を開始した自動震源決定のアルゴリズムについて述べる。

2. 検測方法

検測には、地震波に自己回帰過程モデルを適用する方法〔森田・浜口(1984)〕を用いた。この方法ではまず地震波に対し、図1のように第1モデル区間、第2モデル区間、および両者の間に検測区間を設定する。そして検測区間を2つに分割し、前半に第1モデルを、後半に第2モデルを適用したときの対数尤度関数ないしAIC(Akaike's Information Criterion)〔Akaike(1973)〕等を判定基準とするものである。この手法が有効に使われるためには、第1モデル区間と第2モデル区間が、それぞれ位相混入時刻前と後に設定されていなければならない。従って図1でP波の到着時刻を検出する場合、第1モデルはAC、第2モデルはCBの中に設定されている必要がある。また、検測区間DEは、位相混入時刻を含むようにとらなければならないが、その幅を長くすると演算時間が長くなったり、精度が悪くなったりするた

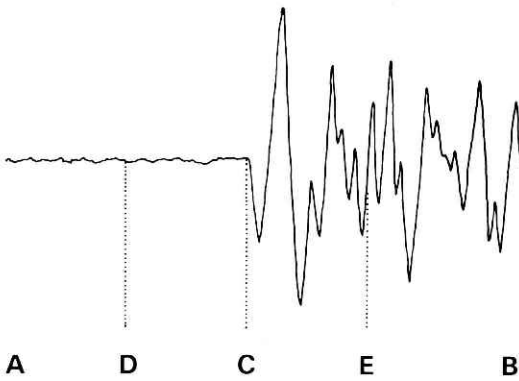


図1 AR法を説明するための模式的な地震記象. AD: 第1モデル区間. DE: 検測区間. EB: 第2モデル区間. C: 地震波の立ち上がり

Fig. 1 Schematic illustration of a seismogram to explain the AR method. AD: Window for the first model. DE: Window for detection of an onset time. EB: Window for the second model. C: Onset of a seismic wave.

め, DEをどう設定するかによって検測結果が左右されることになる. そこでまず, 今回適用した検測区間設定のためのアルゴリズムについて説明することにする.

2.1 P波の検測

P波初動到着時刻を推定するための検測区間は, 通常トリガオンとなった時刻付近に設定される. 地震前兆解析システムでは, 以下のようなトリガオンロジックを用いている. まず, 入力される地動信号 $\{x(n)\}$ に対して, 1秒間ずつ以下のような短時間平均STA(k)と長時間平均LTA(k)を計算する.

$$STA(k) = \sum_{i=0}^{\Delta} |x(n-i) - x(n-\tau-i)| + \sum_{i=0}^{2\Delta} |x(n-i) - x(n-\xi-i)| \quad (1)$$

$$LTA(k) = LTA(k-1) + C \{STA(k) - LTA(k-1)\} \quad (2)$$

ただし, $\Delta (=80)$ は, 1秒間のサンプリング回数である. また, STA(k)を計算するときの差分のラグ τ , ξ と, 時定数Cはそれぞれ, $\tau=2$, $\xi=160$ 及び, $C=0.0167$ に設定している. なお, (1)の第2項は深発地震のような長周期の地震波をも検出するためのものである. そして, この短時間平均と長時間平均との比 $\alpha(k) = STA(k)/LTA(k)$ があるスレシヨールド γ (経験的に多くの観測点に対して2.5と設定している)に達し, かつこの状態が3秒以上持続した場合, 最初にスレシヨールドを越えた時をトリガオンの時刻としている. 多くの場合, トリガオンとなる時刻の直前, またはその時刻を含む1秒間の内にP波初動が到着しているが, 雑音レベルが相対的に高い場合は, $\alpha(k)$ の立ち上がりが鈍くなるため, P波の到着後数秒経過してからトリガオンとなったり, 時にはS波の到着時にトリガオンとなる場合がある. データの収録という点では, 60秒間分の遅延バッファがあるため, このような場合でもほとんど問題はないが, 検測区間の設定には支障をきたす. 従ってトリガオンロジックとは別の検測区間設定のためのアルゴリズムを導入する必要がある. まず新たなスレシヨールド $\gamma_0 (< \gamma)$ を用

いることが考えられる。しかし単にスレショールドを下げただけでは、検測区間が雑音部分にまぎれてしまうケースが増えることも考えられる。そこで以下のような予測残差 $E(k)$ を1秒間ずつ計算することにする。

$$E(k) = \left\{ 1/(\Delta - m) \right\} \cdot \sum_{i=0}^{\Delta - m - 1} \left\{ x(n-i) - \sum_{j=1}^m a(j) \cdot x(n-i-j) \right\}^2 \quad (3)$$

ただし、 $\{a(j); j=1, \dots, m\}$ は、データ先頭の1秒間で推定したAR係数、 m はAR次数である。実際の地震波形と $STA(k)$ 及び $E(k)$ の例を図2に示す。ただし、ここでは、簡単のため $STA(k)$ は(1)における第1項だけで計算している。また、両者とも最初の1秒間の値で正規化して表している。図では $STA(k)$ 、 $E(k)$ とも0～250の範囲だけ表してあるが、 STA

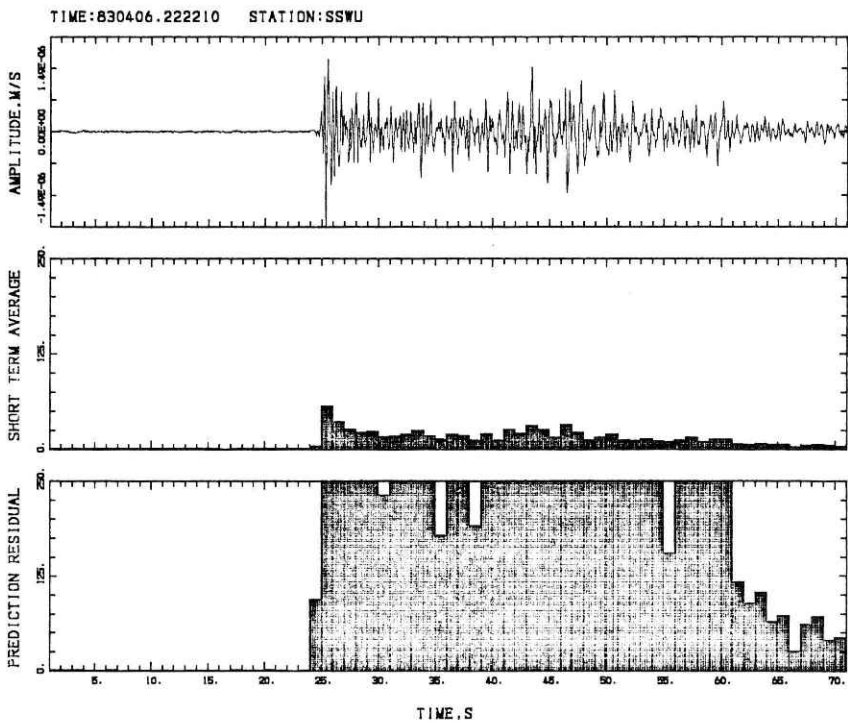


図2 短時間平均 $STA(k)$ と予測残差 $E(k)$ の時間変化。 $E(k)$ はP波及びS波到着時刻付近で、このスケールでは飽和している。

Fig. 2 Temporal change of the short term average $STA(k)$ and prediction residual $E(k)$. Note that $E(k)$ saturates in this scale in the vicinity of P and S arrivals.

(k)は最大でも50程度であるのに対し、 $E(k)$ は最大で約5000にも達している、このスケールでは飽和している。このように、予測残差は短時間平均よりも、位相混入に対してはるかに敏感である。多くの場合、 $STA(k)$ は初動到着時でデータ先頭部分の数倍から十数倍であるのに

対し、 $E(k)$ は、数十倍から、数百倍にも達する。そこで、これら $STA(k)$ と $E(k)$ にスレシヨールド γ_s と γ_e をそれぞれ設定し、データ先頭部分での短時間平均 S_0 と予測残差 E_0 に対し、共に2秒間連続してその比がスレシヨールドを越える場合、つまり、

$$STA(l)/S_0 > \gamma_s, \text{ and } STA(l+1)/S_0 > \gamma_s \quad (4)$$

$$E(l)/E_0 > \gamma_e, \text{ and } E(l+1)/E_0 > \gamma_e \quad (5)$$

となる時刻 l を中心とする2秒間を検測区間として採用している。具体的な γ_s と γ_e の値は経験的に、

$$\gamma_s = 2.0 \quad (6)$$

$$\gamma_e = 10.0 \quad (7)$$

に設定している。また、第1モデルと第2モデルは検測区間をはさんで直前と直後の1秒間とし、AR次数は8とした。このような設定の仕方だと、S-Pが1秒程度またはそれ以下の場合、第2モデルにS波が混入してしまって検測値が悪くなる場合も考えられるが、実際の震源計算には複数点のデータを用いるため、深刻な問題は生じていない。

2.2 S波の検測

P波は通常雑音の中から開始するため、データの前頭部分からレベルを調べていくだけでもある程度その立ち上がり部分を抑えることができる。それに対してS波は、P波のコーダ部分から開始するため、単なるレベル判定だけではその立ち上がり部分を検測することができない場合が多い。それだけでなく地震記象には、P波とS波の他に変換波や反射波等、地球内部の不均質構造による様々な位相が存在する。これらの位相の中には、S波到着時刻のかなり近い部分に顕著に現れてくる場合もある。また、S波自体も明瞭な振幅差を持って現れてこない場合もある。従ってS波の自動検測においてはその検測区間、すなわちS波の立ち上がりを含む数秒間を設定する場合、かなり注意が必要となる。実際、自動震源計算を実用化している機関では、失敗する確率の高いS波の検測を行わず、P波のみを用いて震源を計算している例が多い。一般的に言って、震源計算にS波の検測値を用いないと、微小地震の検知能力が低下するだけでなく、決定された震源、特に深さの信頼度がかなり悪くなることが経験的に知られている。しかし、防災センターの関東・東海地域微小地震観測網は世界でも有数の高密度高感度観測を誇っており、少なくとも観測網の中で発生する地震についてはP波の検測値だけを用いてもかなりの精度で震源を決定することが可能である。これらを踏まえて最終的に我々が採用した自動震源計算の手順では、図3に示すアルゴリズムに従い、まずP波の検測

震源決定のアルゴリズム

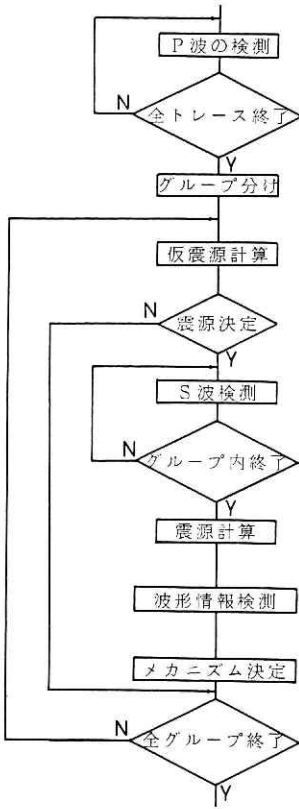


図3 自動震源決定のフローチャート

Fig. 3 Flow chart of the automatic hypocenter determination.

1に示すように5段階に分けて変化させた。震源距離が短い場合、P波の立ち上がりも鮮明であり、S波の計算走時の位置はかなり実際の開始位置に近いので、検測区間を短くすることにより演算時間を短縮することができる。また、このように計算走時によりS波の検測区間を設定することで、例えばP波の検測に失敗した場合でも、多数の観測点で良好なP波の検測値が得られていさえすれば、少なくともS波の検測が

値のみで仮の震源を決定し、次にこれを用いて、結果の信頼性を向上させるためS波の検測を行っている。最初にP波の検測値に対してグルーピングを行う。グルーピングの方法は、P波の検測値を時間順に並べ替え、隣同士の検測値が30秒以上離れている場合、別の地震として分類していただく。単純な方法ではあるが、これによって1収録データ中に複数の地震が含まれる場合、分離が良好に行われることが、すでに定常的な運用の中で確かめられている。仮震源計算はグルーピング分けされたそれぞれの地震の検測値に対して行われる。ここで震源が決定されなかった地震に対してはS波の検測は行わない。従って計算結果が出力されるためには、最低でも4観測点でP波の検測が行われていなければならない。震源が決定されれば、仮定している地下の速度構造から理論的なS波の到着時刻が求められる。そこで、S波の検測区間をこの理論走時の周辺に設定することにした。ただ、P波の検測が如何に良好に行われていても、特に遠方の観測点では、地球内部の水平的不均質性によって実際のS波の到着時刻が計算走時から大きくずれてくることが考えられる。従って検測区間の幅は、P波のみで決定された結果から震源距離に応じて、最大3秒までの範囲で、表

Table 1 Width of the window for detection of the onset time S wave.

表1 S波検測区間の幅。

Hypocentral distance (km)	Width of window (s)
<30.0	1.00
30.0~ 50.0	1.25
50.0~100.0	1.50
100.0~200.0	2.00
200.0~300.0	2.50
300.0≤	3.00

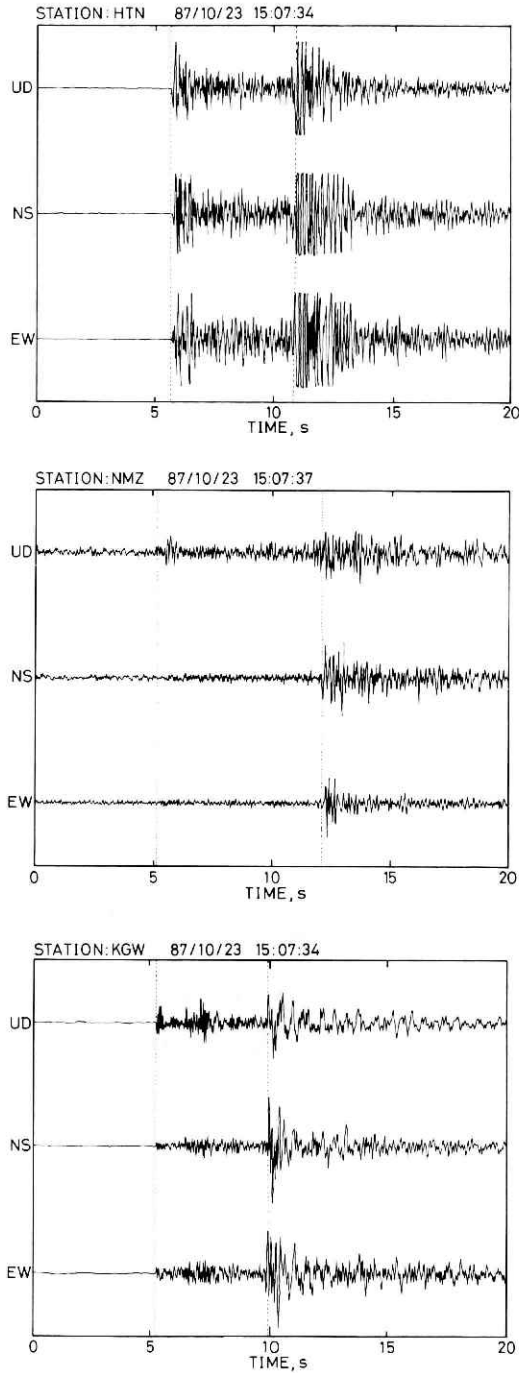


図4 地震記象と自動検出結果の例。検出位置を点線で示す。

Fig. 4 Examples of seismograms and results of automatic detection. Detected P and S onset times are indicated by dotted lines.

けは正しく行われるケースもあり得る。図4 a~cに、実際の検測結果例を示す。図4 aは、S/N比が良く、しかもS-Pが短い場合なので、良好な検測結果が得られている。一方、図4 bのようにS/N比が悪くても、予測残差を判別用いたことによって、P波初動の検測に成功している。また、図4 cのようにPとSの間にX相が存在する場合でも、S波の検測区間の設定に計算走時を用いたことによって誤ってX相をS波初動と誤読することから免れている。図には示していないが、読み取り観測点数が少なく、しかも誤ったP波の検測値が混入している場合には、S波の計算走時が正しくない位置になるため検測区間も誤って設定され、結果的にS波の検測に失敗することもある。それぞれの検測値には、定常処理と同一アルゴリズム〔松村・岡田・堀(1987)〕を用いて読み取り精度にランク付け(A, B, C, Dの4段階)を行っているが、このような場合には大抵Dランク、すなわち震源計算には用いないランク付けがなされるので、最初の検測の失敗が最終結果にまで悪影響を及ぼすことは少ない。

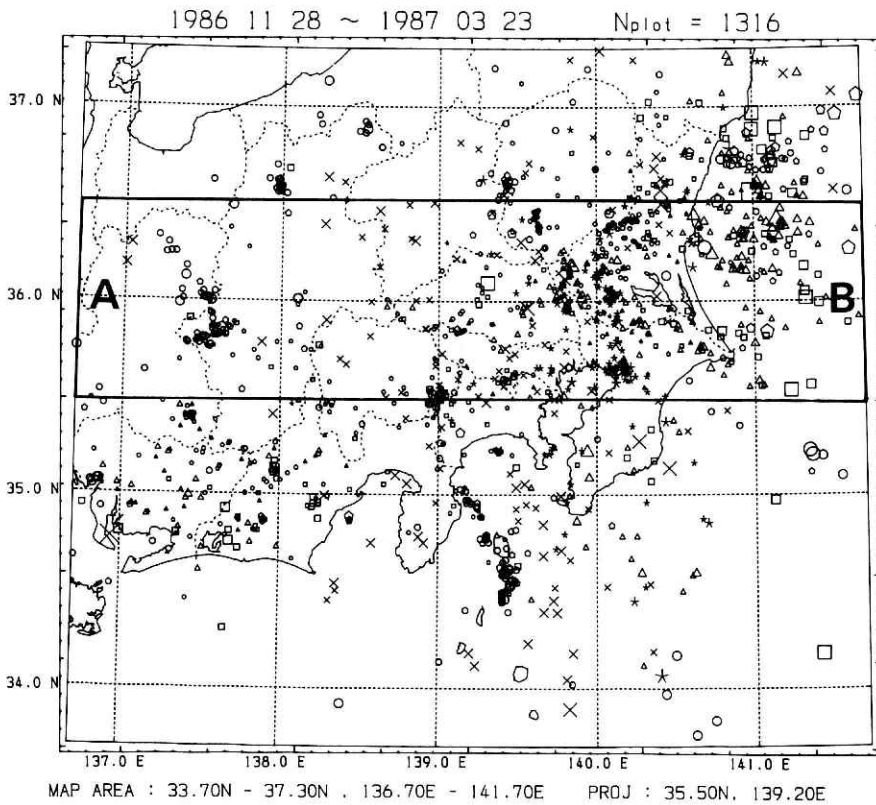


図5(a) 震央分布図
自動処理結果

Fig. 5a Epicentral distributions determined by automatic processing.

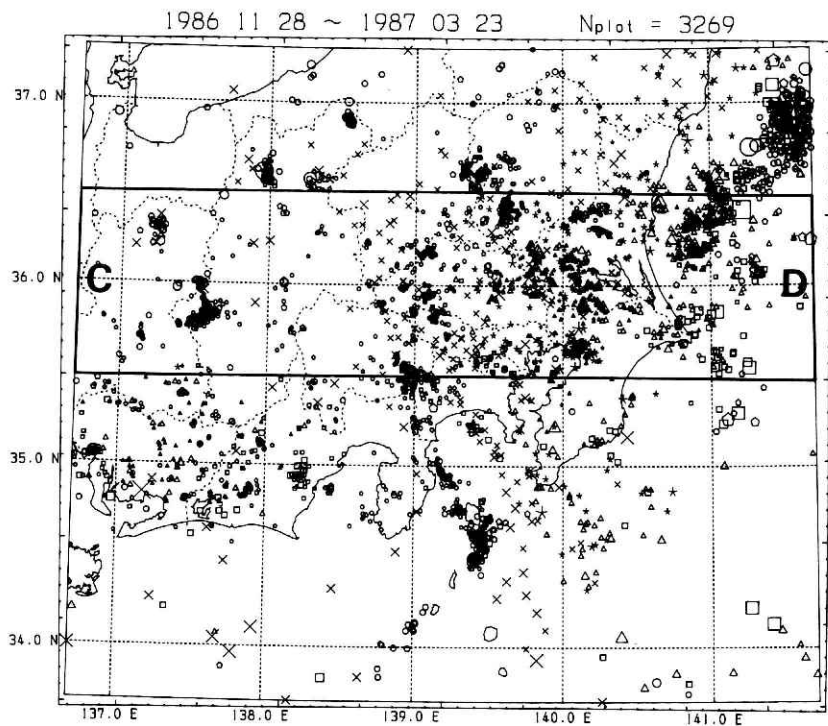


図5 (b) 震央分布図
会話式による定常処理結果

Fig. 5b Epicentral distributions determined by man-machine processing.

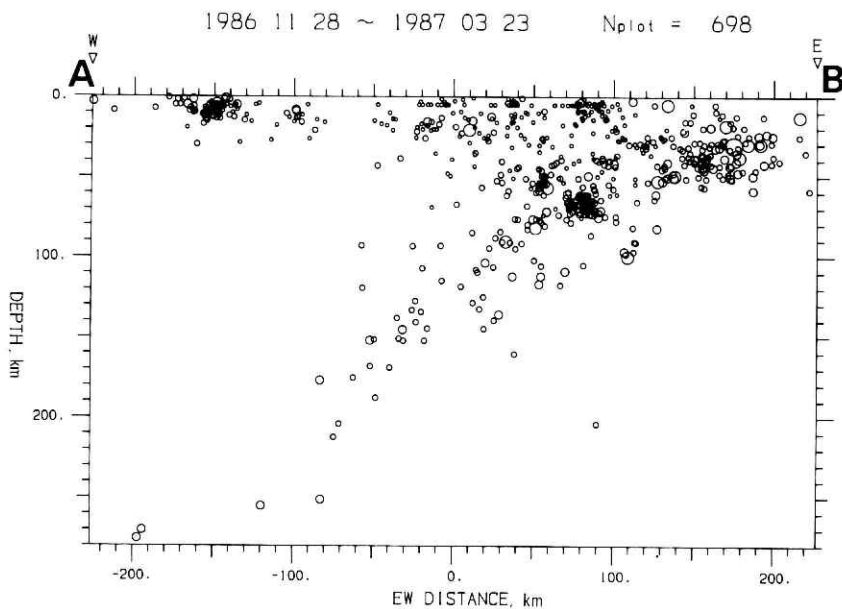


図6 (a) 図5中ABの断面図

Fig. 6a Vertical section of AB of Fig. 5.

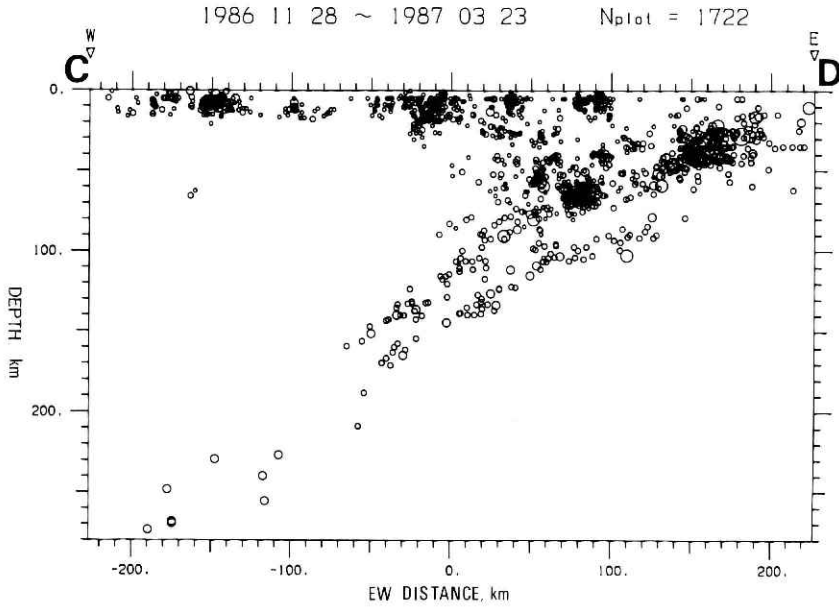


図6 (b) 図5中CDの断面図
 Fig. 6b Vertical section of CD of Fig. 5.

3. 自動震源計算結果の評価

図5及び図6に1986年11月28日～1987年3月23日に関東・東海地域で発生した地震の震央分布と断面図を、自動震源計算とオペレータによる定常検測処理によるそれぞれの結果について示す。全体的にみると、同一期間での決定震源数は自動処理は定常処理の半分以下である。これは定常処理で震源の決定される極微小地震の多くは3観測点の読み取りしか存在せず、自動処理におけるP波だけの仮震源決定ができないことが原因として考えられる。地域別にみると、福島県や茨城県沖の地震に対しては震源が観測網の外に出るため、自動処理結果による検知能力はかなり低い。しかし、長野県西部及び北部、山梨県東部、栃木・群馬県境、さらに伊豆大島周辺などの、浅い地震に対しての震源密集域のパターンは、自動処理結果は定常処理による結果とよく一致している。また、やや深い地震でも、千葉県北部から茨城県南西部にかけて列状に分布する震源密集域もよく識別でき、断面図においても、太平洋プレートの沈み込みに伴う西方へ傾斜した震源の分布がうまく決定されている。

4. 議 論

自動震源決定は、最近では微小地震観測網を持つほとんどの機関で、普通に行われるようになってきた。地震発生直後にその震源の位置、メカニズム等がおおよそ分かれば、津波などによる災害を未然に防ぐことにも貢献できよう。その意味では、現在でも自動震源決定は、基本的な目標は達成されているとあって良いであろう。しかし、より広範な解析のための基礎データという意味では、自動処理結果にはまだ問題も多く、多くの研究者はその精度に対して不信感を拭いきれずにいる。実際どの機関でも、自動処理とは別に、人間の手による再検出処理を行っているのが現状である。しかし、これからさらに観測点数が増えたり、あるいは他機関とのデータ交換が始まり処理すべきデータ量がさらに増大することになった場合、もはや人間の手による処理では間に合わなくなるという事態も予想される。その意味では、計算機による自動処理が完全に人間の手による処理にとって代わるまで、その信頼性を向上させる努力を続ける必要がある。特に、APEの場合、自動震源決定は、そのみで閉じたものではなく、その後さらに自動で行われる地震前兆監視のための基礎データを提供するという役目も担っており、より高い精度が要求されている。今回導入した自動震源決定は、その検出能力という点では、定常処理の2分の1程度であり、また、震源の決まった個々の地震についてみても、中にはかなり誤った結果を出しているものもある。今後は計算機の能力等が向上することも考慮に入れ、より人間の処理に近いものへと改善していくことが期待されている。

謝 辞

自動震源決定のシステム開発は小西秀之氏をはじめ富士通株式会社のスタッフの精力的な作業に負うところが少なくない。ここに厚く謝意を表する。

参 考 文 献

- 1) Akaike, H (1973): Information theory and an extension of the maximum likelihood principle, 2nd International Symposium on Information Theory, eds. B.N. Petrou and F. Csaki, Akademia Kiado, Budapest, 267-281.
- 2) Allen, R.V. (1978): Automatic Earthquake Recognition and Timing from Signal Trace, Bull. Seism. Soc. Am., **68**, 1521-1532.
- 3) 浜口博之・鈴木次郎(1979): 微小地震P波初動の自動検出とその信頼性について, A-54-2, 62-83.
- 4) 堀 貞喜・松村正三・井元政二郎・島田誠一・大久保正・岡田義光・大竹政和・浜田和郎(1987): 地震前兆解析システムにおける自動前兆監視, 国立防災科学技術センター研究報告, **41**, 101-114.
- 5) 市川政治(1980): 地震記録自動処理装置, 験震時報, **44**, 55-74.
- 6) 前田直樹(1985): 地震波自動処理システムにおける読み取り及び評価, 地震2, **38**, 365-379.

- 7) 松村正三・岡田義光・堀 貞喜(1987):地震前兆解析システムにおける地震データ(高速採取データ)の処理, 国立防災科学技術センター研究報告, **41**, 45-64.
- 8) 松村正三・岡田義光・島田誠一・堀 貞喜・大久保正・井元政二郎・大竹政和・浜田和郎(1987):地震前兆解析システムの機能と構成, 国立防災科学技術センター研究報告, **41**, 35-44.
- 9) 森田裕一・浜口博之(1981):2次元自己回帰過程によるS波初動の自動検測, 地震**2**, **34**, 223-240.
- 10) 森田裕一・浜口博之(1984):自己回帰過程による地震波初動の自動検測とその信頼区間, 地震**2**, **37**, 281-293.
- 11) 白井克彦・徳弘一路(1979):地震波初動の自動検出, 地震**2**, **32**, 141-148.
- 12) Stewart. S.W. (1977):Real Time Detection and Location of Local Seismic Events in Central California, Bull. Seism. Soc. Am., **67**, 433-452.
- 13) 渡辺 晃・黒磯章夫(1977):阿武山地震観測所における微小地震の自動処理について, 地震**2**, **50**, 115-118.
- 14) 渡辺一郎・菅原正己・福井隆文・勝山ヨシ子(1975):微小地震の自動検出方法について, 国立防災科学技術センター研究報告, **15**, 33-47.
- 15) 横田 崇・周勝 奎・溝上 恵・中村 功(1981):地震波データの自動検測方式とオンライン処理システムによる稼働実験, 地震研究所集報, **55**, 449-484.

(1987年11月16日 原稿受理)