

震源計算・発震機構解計算プログラムの改良

岡田義光*

国立防災科学技術センター

Improvement of Routine Programs for Hypocenter Determination and Mechanism Calculation

By

Yoshimitsu Okada

National Research Center for Disaster Prevention, Japan

Abstract

The former routine programs for hypocenter determination and mechanism calculation were checked and revised to install them in the newly introduced data processing system, the Analyzing System for Precursors of Earthquakes.

As to the hypocenter determination program, it was found that the efficiency of the travel time calculation was quite low and that the iteration did not work well for origin times later than 18h due to inadequate arrival time data input which were counted from 00h00m. Improvement of these two problems reduced CPU time by half.

As to the mechanism calculation program, a serious problem was found in the algorithm used to search for the best solution. This was being carried out by fine adjustment after the search using a coarse spherical grid interval and coarse rotation angle. Using a fine grid from the beginning, the revised routine was able to obtain the solution with the best score and also estimate the extent of the ambiguity of the P- and T-axes.

1. はじめに

国立防災科学技術センターの地震データ処理ルーチン作業で従来より用いられてきた震源計算及び発震機構解計算のプログラムを、新しく導入された地震前兆解析システムに移植するにあたって、そのアルゴリズムを見直し、若干の改良を行った。

*第2 研究部地震活動研究室

本稿では、旧プログラムに内在した問題点及びその改良結果について述べる。

2. 震源計算プログラム

従来のルーチン作業で使用されてきた震源計算プログラムは鶴川ら(1984)によるものであり、その中核部分のフローは図1に示すようになっている。この各部分における処理内容は以下の通りである。

①震源計算の基礎データである各観測点におけるP波、S波の着震時分秒(IH, IM, SS)を、

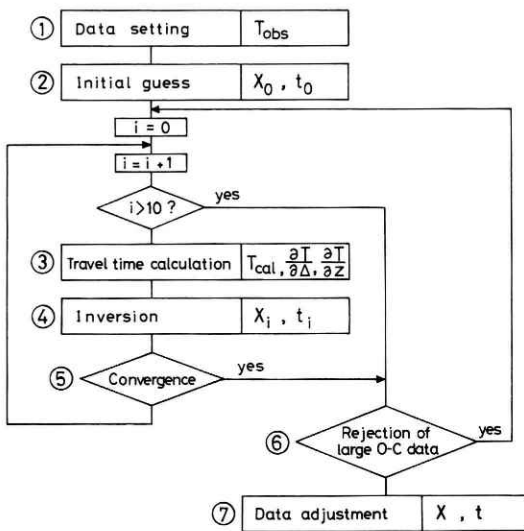


図1 震源計算プログラムの中核部分の処理フロー

Fig. 1 Flow of the main part of the hypocenter determination program.

その日の午前零時からの積算秒 $T_{obs} = IH * 3600 + IM * 60 + SS$ に変換する。

- ② 3観測点のP時刻と1観測点のS-P時間を基に、二次方程式を解いて第0近似解(震源位置 X_0 , 発震時 t_0)を求める。
- ③ 理論走時 T_{cal} 及びその震央距離 Δ , 震源の深さ Z に関する微分値を計算する。理論走時は Δ の5次式 $T_{cal} = A_0 + A_1\Delta + \dots + A_5\Delta^5$ によっており、係数 $A_0 \sim A_5$ は震源の深さ別に震央距離区間毎に表として与えられているので、任意の Z についてはこれを狭む数点の深さでの T_{cal} 及び $\partial T_{cal} / \partial \Delta$, $\partial T_{cal} / \partial Z$ を求め、多項式によるラグランジュ補間を行う。
- ④ $T_{obs} - T_{cal}$ を入力として、 $\partial T_{cal} / \partial \Delta$, $\partial T_{cal} / \partial Z$ を係数行列とする重み付き最小二乗法の計算を行い、次の逐次近似解 (X_i, t_i) に進むための修正量 $(\delta X, \delta t)$ を求める。この過程で震源の深さが負になった場合は、以下、深さを35, 25, 15, 5kmの順に固定し、収束時点で最も解の標準偏差の小さいものを選択する。

- ⑤解の収束を判定する。収束条件は、緯度、経度、深さ、発震時の修正量を各々 $\delta\text{lat}(\text{deg})$, $\delta\text{long}(\text{deg})$, $\delta Z(\text{km})$, $\delta t(\text{sec})$ として、

$$\text{STPF} = 110 * |\delta \text{ lat}| + 90 * |\delta \text{ long}| \\ + 0.5 * |\delta Z| + 5 * |\delta t|$$

の値が0.05より小さくなった場合とする。これは、各量単独なら、各々50m, 50m, 100m, 0.01secの修正量に相当する。解が収束するまで、上記③～⑤は最大10回まで繰り返される。

- ⑥O-Cの大きいデータ(Pについては2秒, Sについては4秒以上)を除外して再び③からやり直す。除外するデータのない場合、または除外作業が3回繰返された場合、震源計算を終了し⑦へ進む。
- ⑦積算秒で得られた発震時を、歴年の時分秒に戻す。

これらの各部分について詳細な再検討を行った結果、以下のような問題点が判明した。

- (1) ②の第0近似解を得る2次方程式の解法にコーディングミスがあった。
- (2) ④の逐次近似解を得るための逆行列計算の過程で、対角要素が 10^{-9} を下まわった際になされる列置換にコーディングミスがあった。
- (3) 深さを固定とする時、最初の35kmについては、逐次近似の回数が最大10回ではなく、深さが負になった時点からの残り回数しか許されない。
- (4) ⑤の収束判定で δlat , δlong の単位に誤りがあった。
- (5) ⑥のデータ調整で発震時の積算秒が負になった場合、月の変り目のところでは正しい結果が得られない。

上記(1)～(5)はごく特別な場合にしか問題にならないバグであり、全体への影響は殆どない種類のものであるが、完璧を期するため修正を行った。

- (6) 震源計算全体で最も負荷率の高い③の走時計算部分の能率があまりよくない。 Δ の5次式の計算が直接 $A_5 * \Delta * * 5 + A_4 * \Delta * * 4 + \dots$ となっていたのを $(A_5 * \Delta + A_4) * \Delta + \dots$ のような形に改め、ラグランジュ補間の定式化についても割算の回数を大幅に減らす等して簡潔な形に改めた。この結果、1984年の1年分約15000件の震源計算処理に、従来プログラムでは38分44秒のCPU時間を要していたのが27分24秒に短縮された。
- (7) 解が収束するまでの逐次近似の回数の分布を、1984年分について発震時別に調べた結果を図2の実線で示す。通常は4回前後で収束しているが、18時以降になると、最大の10回まで繰返されて計算が打切られる例が急増する。これは、①で震源計算の入力データをその日の午前零時からの積算秒としたことに問題がある。⑤の収束判定で、発震時単独ならその修正量は0.01秒以下になる必要がある。しかし1日は86400秒であるため、遅い時刻では、発震時の修正量が32ビット単精度浮動小数点データの精度である10進7桁から外れ、逐次近似が働かなくなってしまう。そこで、時間の積算基準をその日の午前零時ではなく最寄りの時分とするように改良して、同様に発震時別の逐次近似回数分布

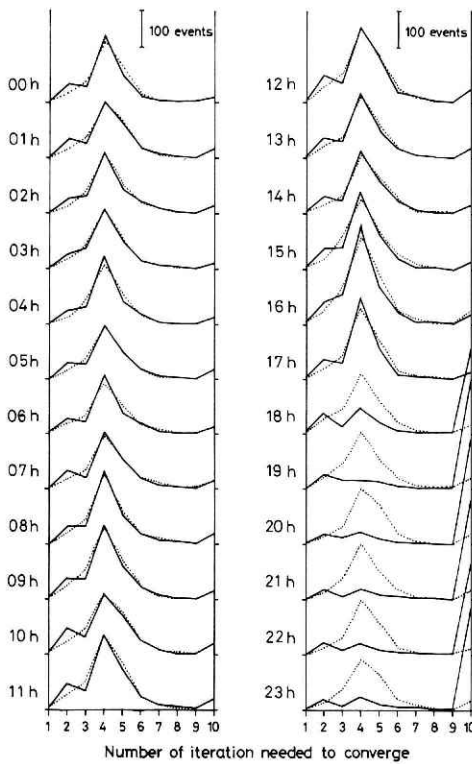


図2 解収束に要した逐次近似回数の発震時別分布. 実線は従来ルーチン, 点線は改良ルーチンによる(データは1984年の1年分)

Fig. 2 Hourly distribution of the number of iteration needed to converge in 1984. Solid lines are due to the former routine while dotted lines are due to the revised routine.

を求めてみると、図2の点線のようになった。今度は発震時による系統的なエラーがなくなると同時に、以前に存在した、やはり何らかの計算不安定性に起因したと思われる、収束回数が2回のところのピークも消えている。

以上の処置に加え、P波、S波について同じ処理が重複してなされていた部分の整理等、細かい改良を行った結果、前記1年分の震源計算処理に要するCPU時間は更に18分29秒に短縮された上、震源決定数の増大、深さ固定となった数の減少等、若干の精度向上も得られた。従来のルーチンと最終的な改良ルーチンとの処理性能の比較を表1に示す。

3. 発震機構解計算プログラム

従来のルーチン作業で使用されてきた発震機構解計算プログラムは、堀内ら(1972)と同様のグリッドサーチ方式によるものであり、図3に示すようなフローとなっている。この各部分における処理内容は以下の通りである。

- ① 極性読取数Nが10個以上ある場合のみを計算の対象とする。

表1 震源計算プログラムの従来ルーチンと改良ルーチンとの処理性能比較
 Table 1 Comparison of the performance of hypocenter determination program between the former and the revised routines.

Data in 1984	Former Routine	Revised Routine
CPU time (using M360)	38m44s	18m29s
not determined	5262	5223
hypocenter determined	10275	10314
depth fixed among above	1258	1245

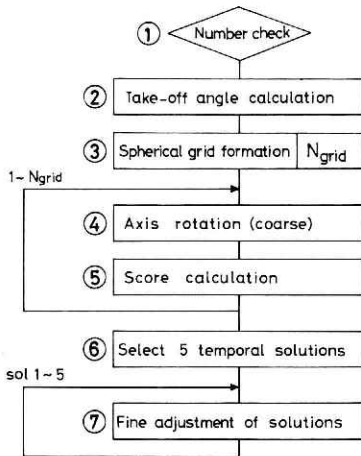


図3 発震機構解計算プログラムの中核部分の処理フロー(従来ルーチン)

Fig. 3 Flow of the main part of the mechanism calculation program (the former routine).

- ② 震源から各観測点への射出角を、震源の深さと震央距離別に与えられた表からの1次内挿により求める。
- ③ 半球面上に格子点網を設定する。極性読取数Nが45未満なら15°メッシュの85格子点、45以上なら10°メッシュの145格子点をとる。
- ④ 上で設定された各格子点にB軸を置き、そこを中心にP・T軸を回転させた時の極性一致数の変化を見る。回転の刻みはデータ数が45未満なら10°、45以上なら5°とし、極性一致数の列を作る。
- ⑤ 上記の列のうち、最初に現れる極性一致数最大の並びの中間点にあたる回転角に相当する解をその格子点での最良解とみなし、そこでのスコア $SC = (\text{極性一致数}) + \sum l_i r_i / N$ を求める。ここで、 l_i は極性一致なら+1、不一致なら-1をとり、 r_i はradiation patternに

よる係数である。

- ⑥ 全格子点について上記の④⑤を行った結果を基に、次の様に5つの仮解を選択する。第1の仮解は上記スコアの最大値を与える格子点、第2の仮解は極からサーチしていった最初に見つけた最大極性一致数の点、第3の仮解は赤道からサーチしていった最初に見つけた最大極性一致数の点、第4、第5の仮解は再び極及び赤道から同様にサーチを行う。
- ⑦ 上で得られた各仮解のまわりで解の微調整を行う。データ数が45未満の場合、まず仮解の周囲に7.5°離れた6つの副格子点を設け、そこをB軸として5°刻みの回転を行わせ、⑤と同じくスコアを算出する。仮解よりも大きいスコアを与える副格子点があった場合、仮解をそこに移す。次に、その周囲に3.75°離れた6つの副格子点を設け、2.5°刻み回転による同様の微調整作業を行って最終解を確定する。データ数が45以上の場合も全く同様に〔5°離れた副格子点、5°刻み回転〕による第1次微調整、〔2.5°離れた副格子

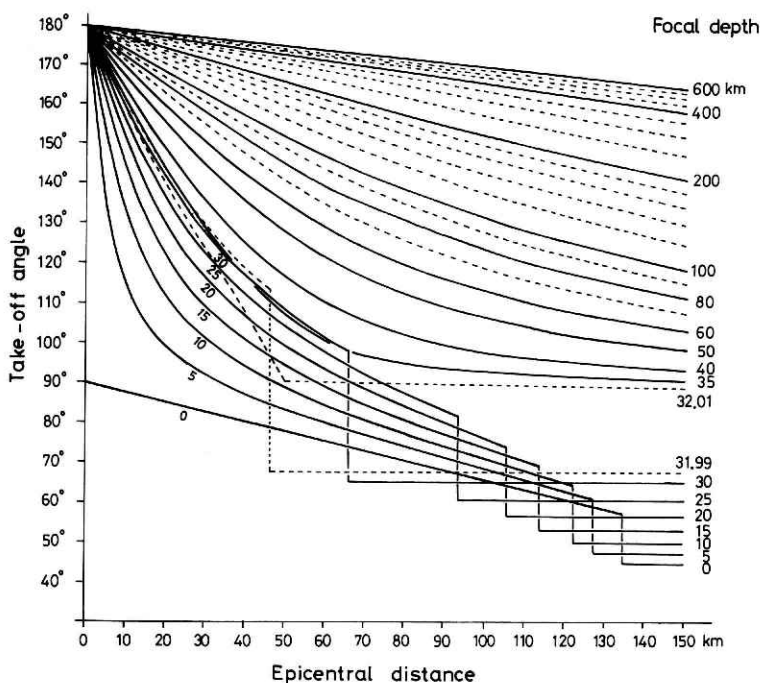


図4 震源の深さをパラメータとした、震央距離と射出角との関係。実線は従来ルーチンのもの、点線は改良ルーチンで付け加えられた部分

Fig. 4 Relation between take-off angle and epicentral distance at different focal depths. Solid lines are defined in the former routine and dotted lines are added in the revised routine.

点, 2.5° 刻み回転) による第2次微調整を実施する。

これらの各部分について詳細な再検討を行った結果, 以下のような問題点が判明した。

- (1) ①で極性読取数は10個以上に限っているが, もっとデータが少なくても, 観測点配置が良好なら発震機構解をかなりよく推定できる場合がある。
- (2) ②で射出角を計算する基として用いられていた表は, 図4の実線で示す如く, 深さについては40kmまで5km刻み, それ以深は50, 60, 80, 100, 200, 400, 600kmの各深度で与えられている。ここから射出角を内挿する場合, 震源の深さが30~35kmで震央距離が約70km以上の場合, 及び震源の深さが5km未満で震央距離も数km以内の場合には, いずれも内挿値が不安定となる。
- (3) ③で作る半球面グリッドのうち, 赤道におかれたものの半数(データ数45未満のときは12個, 45以上のときは16個)は, 発震機構解の問題の球対称性により, 余分なものである。このため, 計算の重複がみられると同時に, ⑥で5つの解を選択する際に, 第3, 第5の仮解が全く同一のものになる場合が多い。
- (4) ⑤で計算されるスコアは, 必ずしもその格子点にB軸を置いた際の最良のものではない。このため, ⑥で選択を行う第1の仮解は, 各格子点の代表者でないもの同士を比較していることになる。
- (5) ③④で粗い格子点間隔と回転角刻みでサーチしたのち, 最後に⑦で解の微調整を行っているが, このような方式で最良解にたどりつける保証はない。1984年1月分のデータで極性読取数15以上の27件について, 格子点間隔を 2° , 5° , 10° , 15° の4通り, 回転角刻みを 0.2° , 0.5° , 1° , 2° , 5° , 10° の6通りにとって, その各組合せでサーチを行った場合の最小極性不一致を調査し, 図5に示した。ここで, 従来のルーチン作業で使用されていた組合せは各図における1番右下に相当するが, 半数近い例で最良の極性不一致数を見つけられないことがわかる。また, その格子点のまわりの微調整によって, 必ず最良の所にめぐりあえるとは限らない。

以上のように, 従来のルーチンプログラムについては色々と問題点の多いこと, そして1つの地震について5つの可能な解が与えられるだけでその信頼度の指標がないのは, データベース化する上で具合が悪いこと等から, 発震機構解計算についてはプログラムを全面的に改訂することとした。改良ルーチンのフローを図6に示すが, その各部分の処理内容は以下の通りである。

- ① 半球面上に格子点網を設定する。格子点の粗さについては, 図5に示した調査結果, 及び5件のサンプル実行に要したCPU時間が, 5° 間隔だと0分54秒, 3° 間隔だと3分11秒, 2° 間隔だと7分10秒になったことを勘案して, 3° 間隔を採用し, 赤道上での対称点60個を除いた1801個よりなる格子点網を設定する。
- ② 極性読取数Nが6個以上ある場合を計算の対象とする。

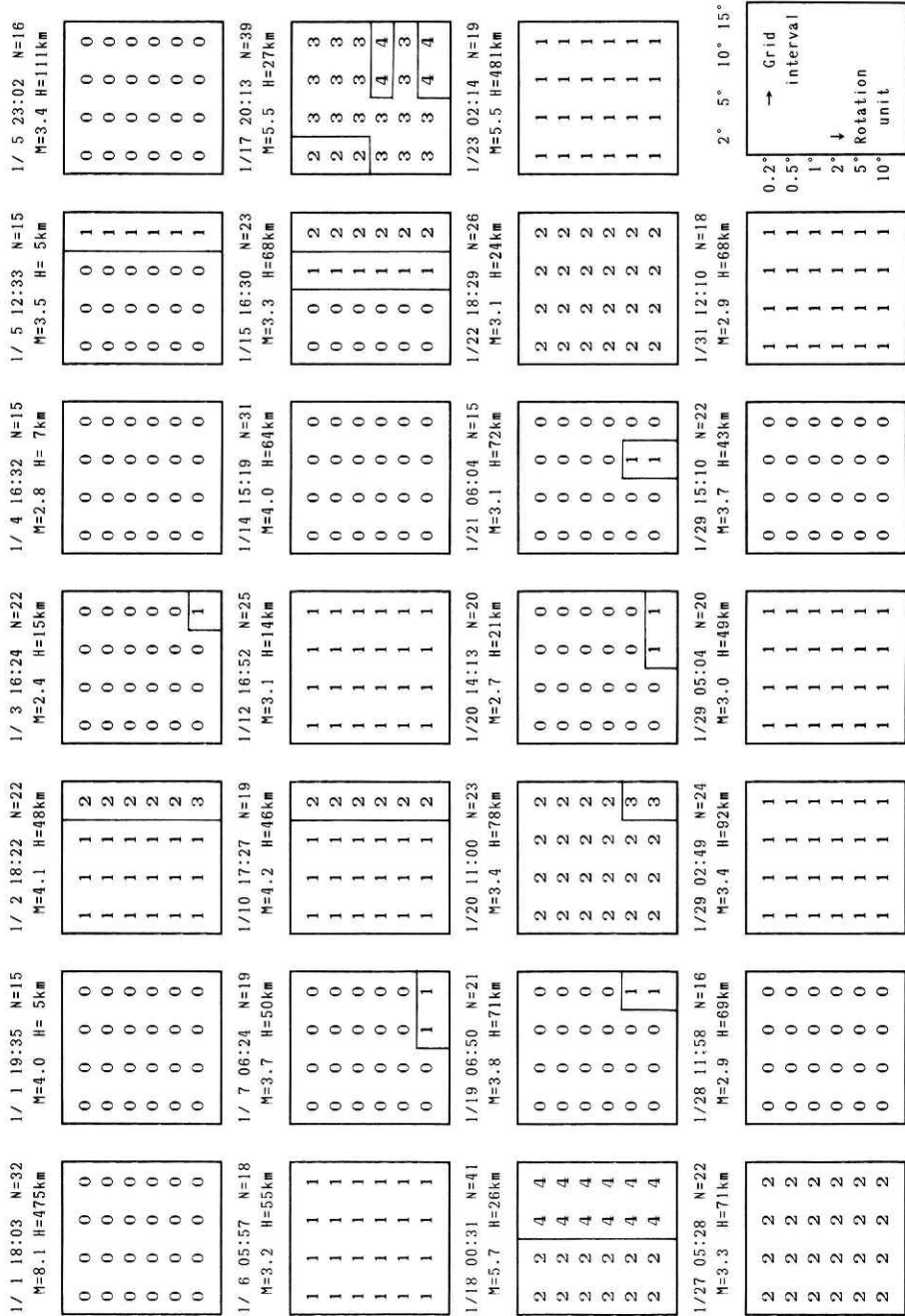


図5 格子点間隔および回転角刻みを変えた場合の、最小極性不一致数の変化(1984年1月の例)。N：極性読取数，M：マグニチュード，H：震源の深さ

Fig. 5 Change of the minimum number of polarity-inconsistent data as a function of spherical grid interval and rotation unit in Jan., 1984. N : number of polarity reported data, M : magnitude, H : focal depth.

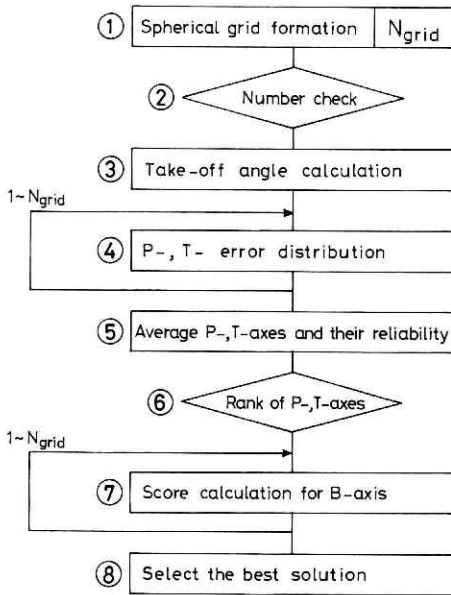


図6 発震機構解計算プログラムの中核部分の処理フロー(改良ルーチン)

Fig. 6 Flow of the main part of mechanism calculation program (the revised routine).

- ③ 震源から各観測点への射出角を求める。内挿に用いる表は、図4の点線で示すように、深さ31.99km及び32.01kmに対応する射出角データを加えると同時に、震源が深い場合のデータも補充した。また、震源の深さ及び震央距離がともに5km未満の場合には、表からの内挿ではなく、震源と観測点の位置から直接に射出角を計算する方式に改めた。
- ④ 各格子点にP軸またはT軸を置き 0.2° 刻みの回転を行った際に得られる最良の極性不一致数を求める。
- ⑤ P軸、T軸の各々について、最小の極性不一致数を与える格子点の分布の平均方向及びその標準偏差

$$\sigma = \sqrt{(\sum \alpha_i^2) / (N-1)}$$

を求める。ここで、 α_i は、平均方向と該当格子点方向とのなす空間角である。

- ⑥ 上記の σ が 5° 、 10° 、 20° 未満の場合、そのP軸またはT軸方向の信頼性をランクA、B、Cと定義し、 20° 以上の場合はDと格付けする。なお、 σ_P 、 σ_T が共に 40° を超える場合は、解不能として発震機構解計算を打切る。
- ⑦ 各格子点にB軸を置き 0.2° 刻みの回転を行った際に得られる最良のスコアを計算する。
- ⑧ 全格子点のうちで最大のスコアを与える格子点の方向をB軸とし、該当する回転角に対応したP軸・T軸を有する解を最良の発震機構解として採用し、上記⑤で得られた σ_P 、 σ_T を解の信頼度として付与する。

9. おわりに

改良された震源計算プログラムについては、現方式でもっとも能率の良いアルゴリズムのものが出来上がった。今後は、観測点補正值の導入、3次元速度構造の配慮といった質的向上が望まれるところである。一方、発震機構解計算プログラムについては、信頼性の高いアルゴリズムに基づいた改良ルーチンが得られたものの、計算時間が非常に多くかかる難点がある。極性読取データの位置がアナログ的に分布する以上、グリッドサーチの格子点間隔はいくら密にしてもきりが無い。今後は、青木(1986)の試みのように、何か違ったアプローチから、よりスマートに発震機構解を求めるためのアルゴリズムを考案する必要があるだろう。

本改良作業にあたっては、当センター第2研究部鶴川元雄、石田瑞穂、松村正三の各氏に色々と御教示を戴いた。ここに記して謝意を表する。

参 考 文 献

- 1) 青木治三(1986)：フーリエ解析による地震メカニズム解。地震学会講演予稿集, No1, 283.
- 2) 堀内茂木・江村欣也・平沢朋郎(1972)：気象庁観測網を用いる場合のP波による発震機構決定の精度。地震, 25, 92-104.
- 3) 鶴川元雄・石田瑞穂・松村正三・笠原敬司(1984)：関東・東海地域地殻活動観測網による震源決定方法について。国立防災科学技術センター研究速報, 53, 88pp.

(1987年11月13日 原稿受理)