

相対震源決定による、読み取りデータの自動修正機能を 備えた自動震源決定システム

堀内茂木・佐藤優子(株ホームサイスマータ)・飯尾能久(京都大学防災研究所)・
加藤愛太郎(東大地震研)・岡田知己(東北大学大学院理学研究科)

<https://www.homeseismo.com/html/sotajido.html>

はじめに

株式会社 ホームサイスマータは(堀内他、2009)、到着時刻の自動読み取り、震源決定システムの開発を行っており、精度の高い自動震源決定システムを構築している。しかし、各種ノイズの混入のため、全ての観測点の読み取りを正確に行うことは難しく、間違った震源を決定する場合もある。

自動震源決定では、走時残差を利用して、間違った読み取りデータの削除が行われているが、地下構造に大きな不均質性が存在するため、読み取り誤差と、不均質性による走時残差とを区別することが難しい。一方、隣接して発生する2個の地震を相対震源決定すると、不均質性の影響が相殺され、走時残差は小さくなる。従って、相対震源決定の走時残差を用いれば、自動読み取りの誤差が大きい観測点を自動検出できる可能性がある。我々は、一個の地震について、その近傍で発生するマグニチュードの大きい地震を数10個選び、一個の地震と、数10個の地震との相対震源決定を行うことにより、その地震の各観測点での読み取り誤差を検出し、自動修正を行うシステムを開発した。また、自動震源決定に適した相対震源決定手法を開発した。以下にその方法と、結果について、述べる。

2. 複数の地震の相対震源決定を用いた読み取り誤差の推定方法

隣接して発生する地震を、相対震源決定すると、パスの違いによる不均質性の影響が相殺され、走時残差を小さくすることができる。また、大きい地震のS/N比は、小さい地震のそれに比べ高く、読み取り精度は高い傾向にある。以下に、自動震源決定された地震 A_k について、その近傍に震源決定された複数の地震の到着時刻データを用いて、地震 A_k の間違った読み取りデータの検出、および、読み取りが行われなかった観測点の再読み取り方法について述べる。まず、地震 A_k の近傍に震源決定され、かつ、マグニチュードの大きい地震を M 個(B_{km})選び、 A_k との相対震源決定を行う。一般に、震源距離の近い観測点のS/Nは高く、読み取り精度が高いことから、相対震源決定では、近い観測点の重みを大きくした。また、自動震源決定では、間違った読み取りデータが混入する場合があることから、相対震源決定の残差が、残差の2乗平方誤差の2倍以上のデータを削除し、再決定するようにした。削除後の、P波、S波合わせた読み取り点数が5点以下、あるいは、走時残差が閾値を超える場合には、相対震源決定を行わないようにした。地震 A_k の観測点の読み取り値を A_{kj} 、地震 B_{km} との相対震源決定の、 j 観測点の走時残差を R_{kmj} とする。 M 個の全ての地震について、 j 観測点の到着時刻が読み取られていると、 j 観測点についての走時残差は M 個になる。次に、複数の走時残差の分布の特徴から、 A_k 地震の j 観測点の読み取り値 A_{kj} が正しいかを判定するようにした。 A_{kj} の読み取り誤差が大きい場合は、走時残差、 R_{kmj} の平均値が、0から、誤差分だけずれる。そこで、 R_{kmj} の平均値(R_{km})と、2乗平均誤差(σ_{kj})を求め、 R_{km} の絶対値が σ_{kj} の2倍以上であれば、 A_{kj} が間違っていると判定するようにした。

地震 B_{km} の観測点の読み取りに誤差がある場合は、その地震に対応する誤差が大きくなり、それが原因で、平均値や、2乗平均誤差を間違える可能性がある。そこで、 R_{kmj} が、 σ_{kj} の2倍以上であれば、そのデータは削除し、 R_{km} と R_{kmj} 、および、 σ_{kj} を再計算するようにした。 A_{kj} と、走時残差の平均値 R_{km} との差は、 A_{kj} の理論値(T_{kj})であり、2乗平均誤差は、その推定誤差を表す。

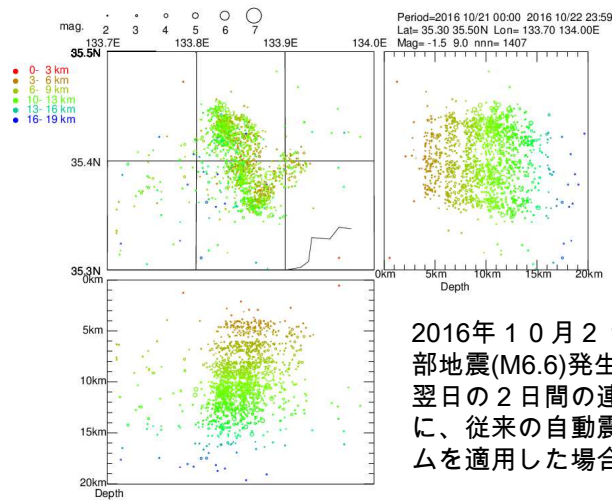
A_k 地震の観測点の読み取り値 A_{kj} が存在しない場合で、地震 B_{km} の観測点の読み取り(B_{kmj})が存在する場合は、相対震源決定を行うことにより、地震 B_{km} の地震毎に、観測点の到着時刻の理論値を求めることができる。 A_{kj} の到着時刻が存在する場合と同様に、個々に求められる理論値から、到着時刻の理論値 T_{kj} と、その2乗平均誤差を求めた。

上述の方法で、 A_{kj} の理論値及び、その2乗平均誤差(σ_{kj})を求め、間違っていると判断された読み取り値、あるいは、読み取りが行われていない観測点の場合は、 A_{kj} が存在する時間範囲が、(理論走時 $-2\sigma_{kj}$) \sim (理論走時 $+2\sigma_{kj}$)の時間区間であるとして、その区間内に、顕著な位相が存在すれば、自動読み取りを行うようにした。

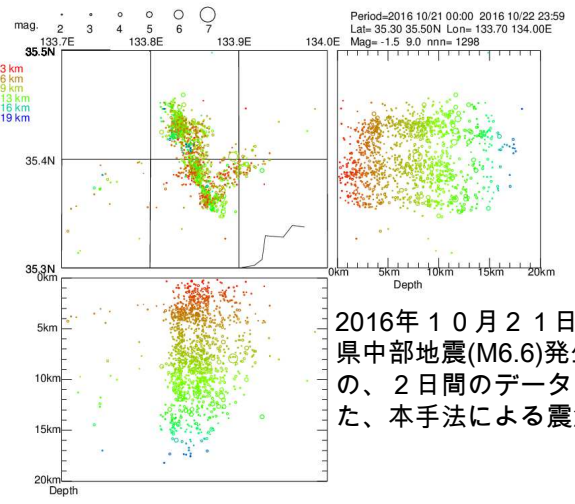
3. 相対震源決定

Waldhauser & Ellsworth (2000)によるHypoDDは、解析する全領域で発生する全地震の相対震源決定の誤差が最小となるように震源決定する方法である。自動震源決定は、日本列島全域で発生する地震を対象に行う場合もある。また、地震は、毎日発生することから、地震が発生する度に、過去に遡って、HypoDDを行うと、計算機の負荷は膨大になる。そこで、ここでは、上記 M 個の地震 B_{km} の震源位置をレファレンスとして、 M 個の地震 B_{km} との相対震源決定の走時残差の2乗和を最小となるよう、 A_k の震源位置を求めるようにした。すべての A_k について、この震源決定を行うと、 B_{km} に属する個々の地震も、同様に、周りで発生する M 個の地震で相対震源決定される。この操作を2回繰り返して、相対震源決定された B_{km} の地震位置をレファレンスとして、 A_k の地震の相対震源決定を行うことも可能である。

4. 2016年鳥取県中部地震の結果

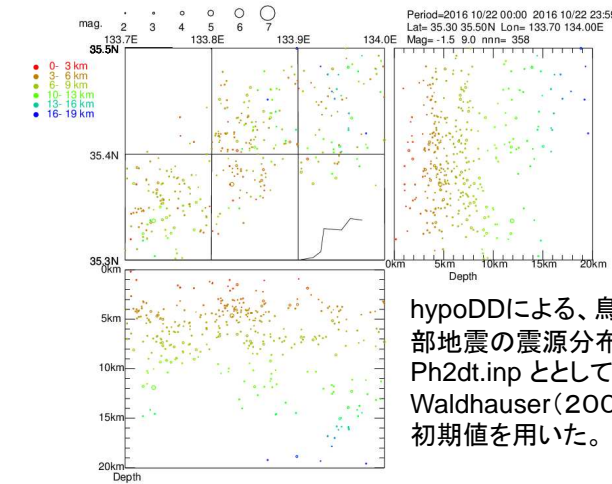


2016年10月21日、鳥取県中部地震(M6.6)発生当日と、その翌日の2日間の連続波形データに、従来の自動震源決定システムを適用した場合の震源分布

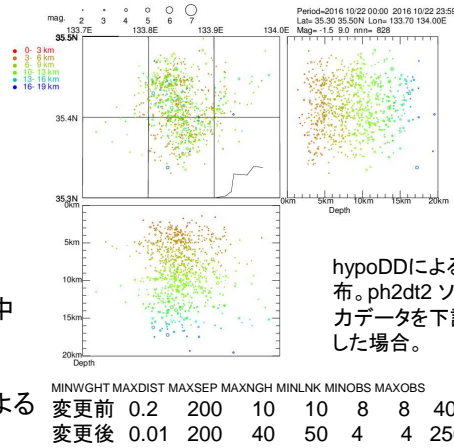


2016年10月21日、鳥取県中部地震(M6.6)発生翌日の、2日間のデータを用いた、本手法による震源分布

京大・九大・東大地震研合同余震観測班(llo et al.,2020)による地震観測データを使わせて頂きました。

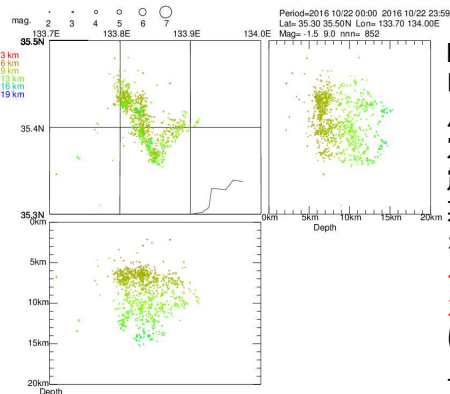


hypoDDによる、鳥取県中部地震の震源分布。Ph2dt.inp として、Waldhauser(2001)による初期値を用いた。

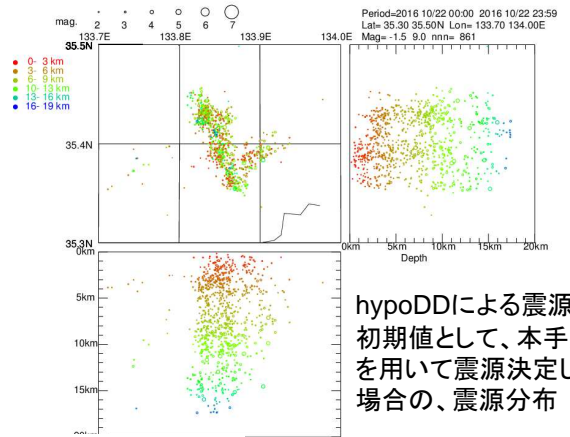


hypoDDによる震源分布。ph2dt2ソフトの入力データを下記に変更した場合。

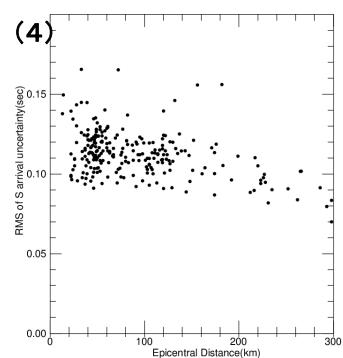
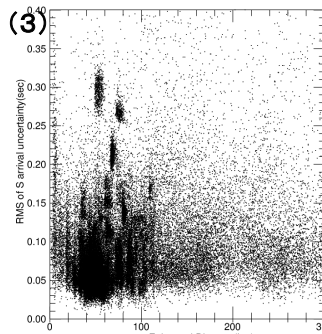
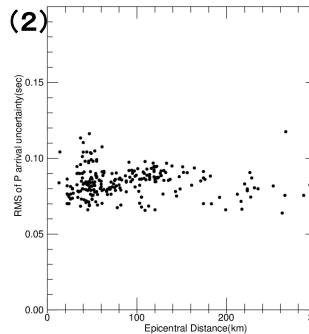
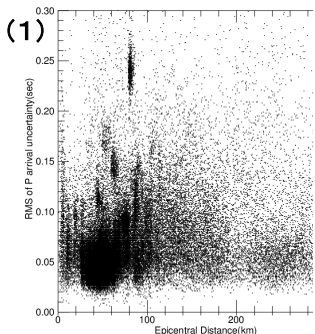
	MINWIGHT	MAXDIST	MAXSEP	MAXNGH	MINLNK	MINOBS	MAXOBS
変更前	0.2	200	10	10	8	8	40
変更後	0.01	200	40	50	4	4	250



HypoDDによる震源分布。相対走時データの切り出しに、ph2dt2を用いなくて、本研究の相対震源決定で用いた、大き目で、近傍の地震50個を用いた。震源位置の初期値は、本手法の震源決定で得られたものを用いた。hypoDDによる震源は、pair地震の取り方で、大きな影響を受ける。この震源では、深さ5km以下の浅い地震が見られない。



hypoDDによる震源を初期値として、本手法を用いて震源決定した場合の、震源分布



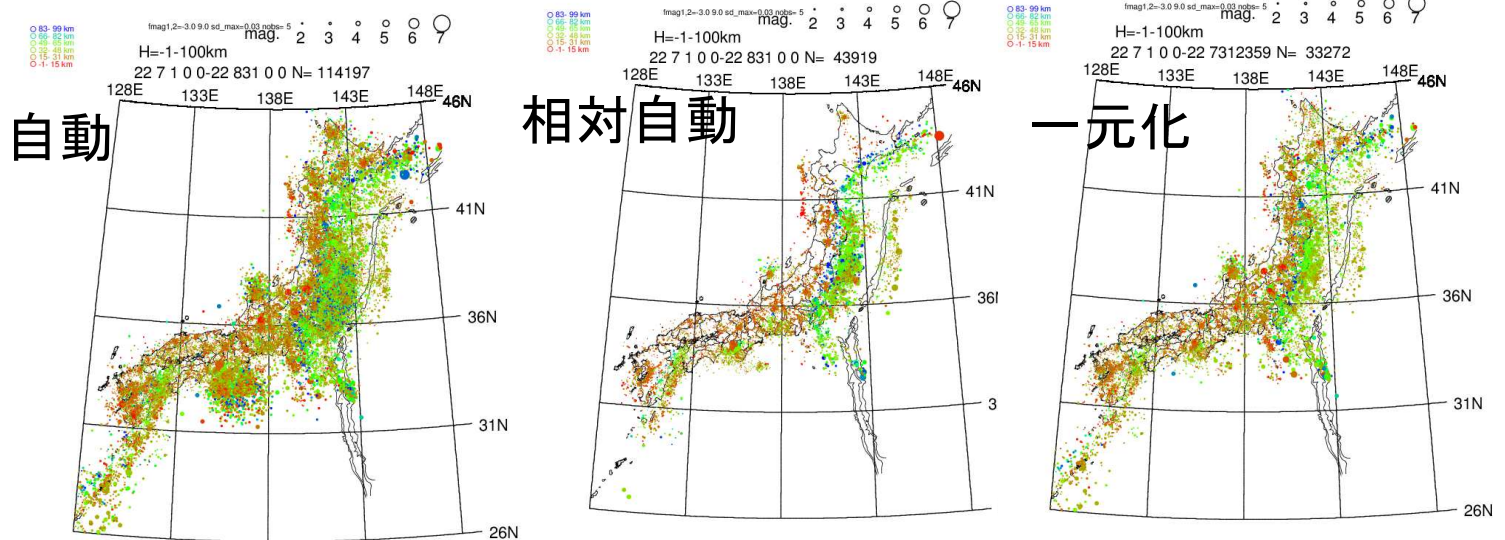
P波、S波到着時刻が読み取れなかった観測点、及び、読み取り誤差が大きい観測点について、50組の相対震源決定のP波理論走時のばらつきのRMS分布(1)と、その、震央距離1km毎の平均値(2)、S波のRMS分布(3)と、その1km毎の平均値(4)。自動震源決定では、ノイズや別の地震の到着時刻を読み取る場合があるが、数10の地震と相対震源決定を行うことで、読み取り誤差が大きいデータを0.1秒程度の精度で自動検出することが可能である。

結論

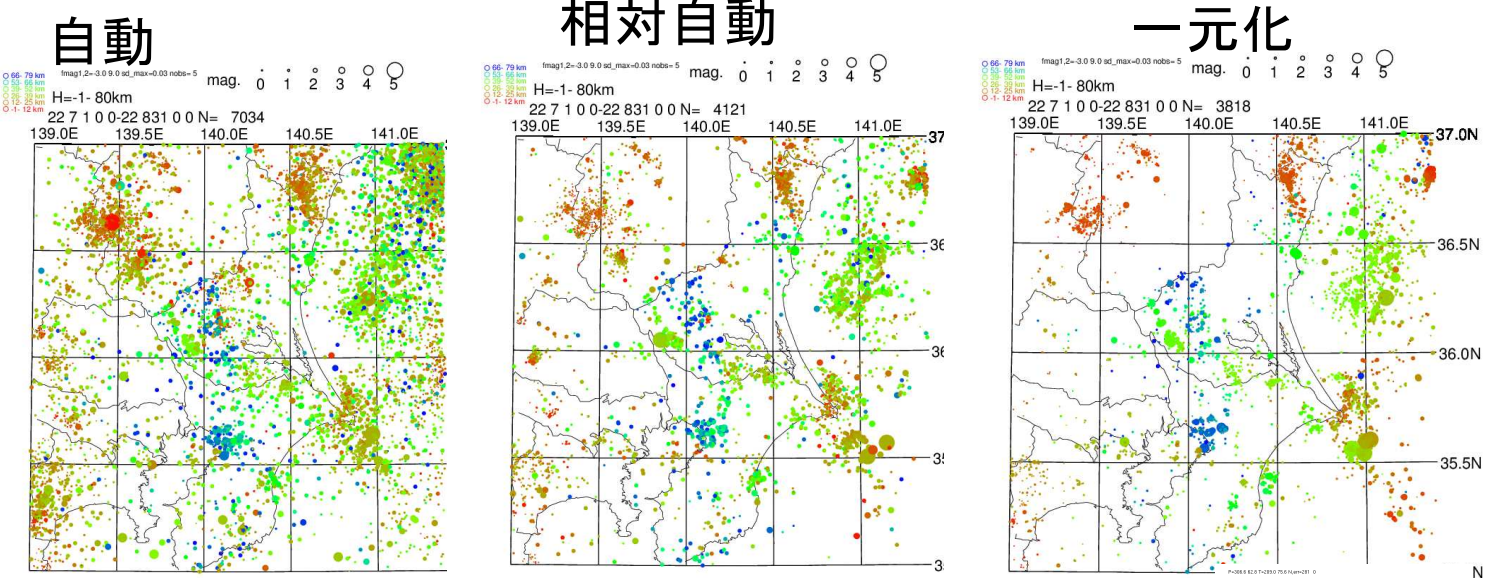
- 各地震毎に、近傍で発生する、大き目の地震、数10個と相対震源決定を行うことにより、読み取り誤差の大きい観測点や、読み取りが行われていない観測点の到着時刻を、高精度(0.1秒程度)で、予測可能である。
- 本手法に適用により、P波、S波の到着時刻の存在時間範囲を0.1秒程度の狭い時間範囲に推定できることから、自動読み取りソフトの開発が容易になると期待される。
- HypoDDによる震源決定は、大きな初期値依存性があるが、本手法での震源決定法は、初期値依存性がすくない。また、全ての地震を用いる必要がないことから、ルーチンでの震源決定に適している。

5. Hi-netデータを用いた相対自動震源決定

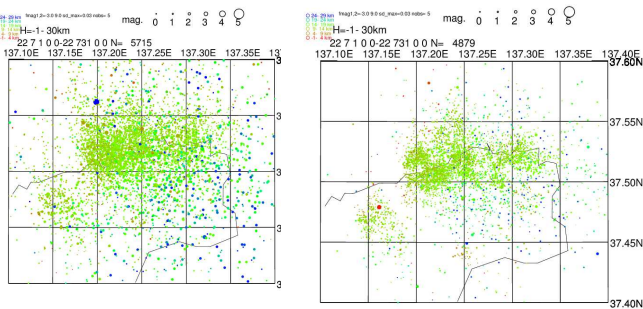
Hi-net観測網の2022年7月—8月の連続波形データを用いて、Hi-netを用いたルーチン処理に、相対自動震源決定を組み込むための開発を行った。



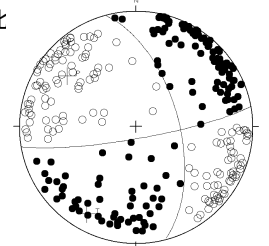
従来の自動震源決定(左)、相対自動震源決定(中)、気象庁一元化震源(右)による、日本全域の、2カ月間の震央分布の比較。従来の震源決定では、多くの地震の震源を決定するように、パラメータ設定されている。従来のシステムでは、多くのエアガンによる震源が決定されているが、相対震源決定では、それらは、ほぼ削除されている。両者の比較、及び、気象庁一元化震源との比較から、相対自動震源決定を行うことにより、決定精度は大幅に高められていると思われる。



従来の自動震源決定(左)、相対自動震源決定(中)、気象庁一元化震源(右)による関東地方の2カ月間の震央分布の比較



能登半島付近の地震の自動震源決定結果(左)と、相対自動震源決定結果(右)との比較



自動震源システムには、P波極性を読み取り、発震機構解を決定する機能も含まれている。

相対震源決定ソフトの入出力データ

(1) 入力データ

- 1) Winフォーマットチャンネルデータ
- 2) 速度構造
- 3) 相対震源決定に用いる約10万個の地震の震源リストとWinフォーマットピックファイル
- 5) Winフォーマット、ピックファイルと、トリガー波形

(2) 出力データ

- 1) Winフォーマットピックファイル
- 2) 震源リスト

相対震源決定ソフトの操作の流れ

1. 最初に、解析領域全域をカバーする大き目の震源リスト、及び、そのwinフォーマットpickファイルを作成する。大き目の地震の基準は、P波、S波読み取り数が約10個以上程度。本計算では、2ヶ月間の自動読み取りによるピックファイルを用いた。
2. リアルタイム処理の場合は、従来の自動震源決定システムで、pickファイル、および、トリガー波形が作成されたら、1. のリストを用いて、近傍で発生する地震を50個選び、相対震源決定、ピックファイルの修正を行う。そのイベントが大き目の地震であれば、1. の震源リストに追加し、最新のイベントを用いて、相対震源決定が行えるようにする。
3. ディスクに保存されたデータを用いて、相対震源決定を行う場合は、地震毎に、pickファイルと、トリガー波形を読み取り、2. と同様に、相対震源決定を行う。