

微小地震震源決定精度のマッピング

京都大学防災研究所地震予知研究センター 片尾 浩

【はじめに～鳥取県西部地震の例～】

鳥取県西部地震が発生した時点（2000年10月6日13時30分）で、京都大学防災研究所地震予知研究センターの微小地震観測システムであるSATARN（大見ほか，1999）には大学関連の定常観測点に加え気象庁の地震観測網からのデータが伝送されていたが、震源域付近にはほとんど観測点が無かった．この時すでに防災科学技術研究所の高感度地震観測網（Hi-net）が中国地方における整備を完了していたが、大学観測網へのデータ伝送は行われていなかった．10月12日以降にHi-netの一部や大学が設置した臨時衛星テレメータ点のデータがはいってくるまでは、SATARNで決定した余震分布は中心的な深さが約10kmで、余震域北部に向かって深くなっていく傾向が見られた（図1(a)）．しかし、震源域内に観測点を設けて行った観測ではそのような傾向は見られず、むしろ余震域北部では主な余震活動は深さ約5kmの浅いところで起きていることがわかった（片尾・吉井，2001；2000年鳥取県西部地震合同精密余震観測グループ，2001）．

前回（2001年3月）のカンカンガクガクの会で紹介したように、簡単な震源決定シミュレーションにより、鳥取県西部地震の余震を大学と気象庁の観測網のみで決定すると、観測点の配置が悪いため地殻最上部での深さ精度が得られないこと、さらに余震域北部では北に向かって深く決まる傾向があることを確かめた（図1(b)）．方法は仮想的な震源を配置し各観測点への理論走時を計算し、得られた理論走時を仮想データとしてあらためて震源決定プログラムhypomh（Hirata and Matsu'ura, 1987）に入力して震源再決定を行い、最初に設定した位置からどうずれるかをみるというものである．hypomhは大学の地震観測網で用いているwinシステム（ト部・束田，1992）の内部で標準的に使用しているプログラムである．

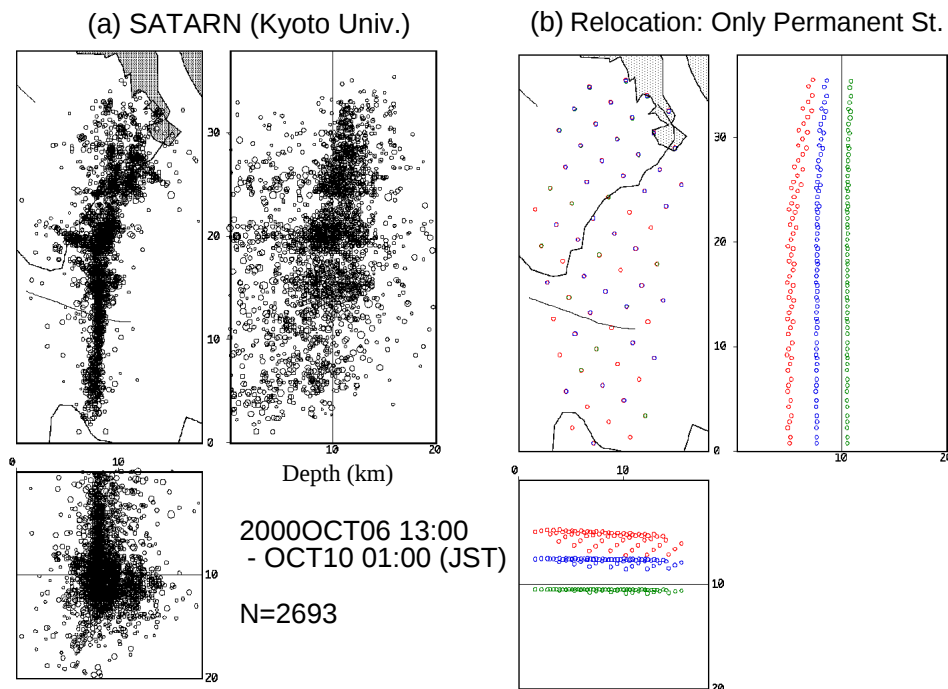


図1 (a)SATARNによる2000年10月6日から10日1時までの鳥取県西部地震の余震分布．(b)同地域で、SATARNの定常観測点のみを使い、深さ5.5km（赤）、7.5km（青）、10.5km（緑）の仮想震源を再決定したもの．

【兵庫県北部地震の例】

仮定する速度構造が震源決定精度に与える影響を考察するために、2001年1月からの兵庫県北部の群発的活動の例を紹介する．SATARNで利用している定常観測点は活動域を取り囲むようにKSMI（気象庁）、OYT、CZT、TTT（以上京大防災研）の4点があり、いずれも活動域からは20km近く離れている．本震から1月末までの間、SATARN鳥取観測所系のルーチン観測による震源の深さは主に3～8kmの範囲に分布していた．しかも浅い地震は深さ3kmの速度構造モデルの境界付近にトラップされているように見える．1月末、活動域直上に臨時テレメータ観測点を気象庁と京大防災研が各1点設置し震源決定に利用するようになった．臨時観測点設置後は、鳥取観測所系SATARNの震源の深さは主に5～10kmの

範囲に急変した。

鳥取西部と同様のシミュレーションを定常点のみの観測点配置と、震源域直上の臨時点2点を加えた配置で行った。理論走時計算および再震源決定には鳥取観測所系ルーチン観測に使用している1次元速度構造（尾池(1975)：地殻最上部のP波速度5.5km/s層の厚さが3km。その下は6.05km/s。S波速度はP波の $\sqrt{3}$ 分の1）を用いた。臨時点を含む配置では、仮想震源と再決定震源の深さはほとんど一致するが、定常点のみの配置では仮想震源が7kmより浅いものは深めに再決定される。しかし、これは臨時点設置前のほうが浅いという観測事実と一致しない、したがって、兵庫県北部地震における『深さの急変』は、観測点配置のみが原因ではないことがわかる。

そこで、地殻構造の不適合による可能性をみるために、理論走時は最上部の5.5km/s層の厚さが1kmしかない構造で、再決定は鳥取のルーチン速度構造（5.5km/s層の厚さが3km）で計算した。臨時点を含む配置では、地殻最上部を除き仮想震源と再決定震源の深さは概ね一致する。定常点のみの配置では深さ7~15kmの仮想震源は2~3km浅く再決定され、7kmより浅い仮想震源はすべて深さ3kmの鳥取ルーチン構造の境界面付近にトラップされる。これは臨時点設置前のほうが浅く、3kmあたりでトラップがみられるという観測事実の特徴とよく一致する。（図2）おそらく実際にこの地域の実速度構造は、鳥取観測所系ルーチンの構造よりも地殻最上部層が薄い構造をしているのであろうと推測できる。この兵庫県北部の例では、観測点配置に加え、速度構造の不整合も大きく影響していることがわかった。

なお、これらの結果は観測点配置、速度構造、hypomhのアルゴリズム、winシステム内でのhypomhへの初期値の与え方などの総合的な効果として現われてくるもので、観測点配置や速度構造単独での効果ではないことに注意されたい。

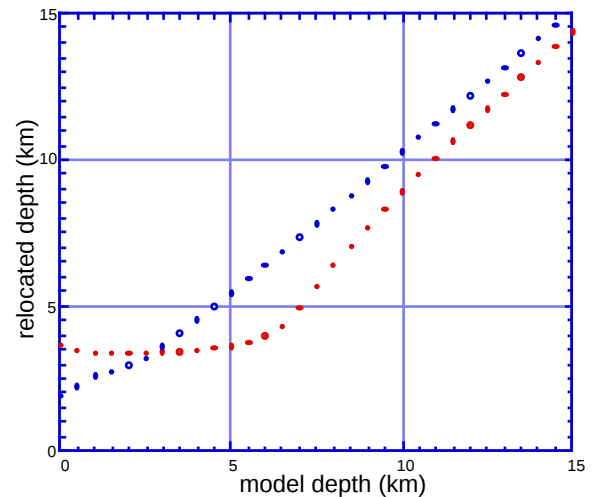


図2：兵庫県北部における例。横軸は仮想震源の深さ。縦軸は再決定された深さ。赤丸は定常点4点のみによる結果。青丸は臨時点2点を加えた結果。

【中国地方における深さ精度のマッピング】

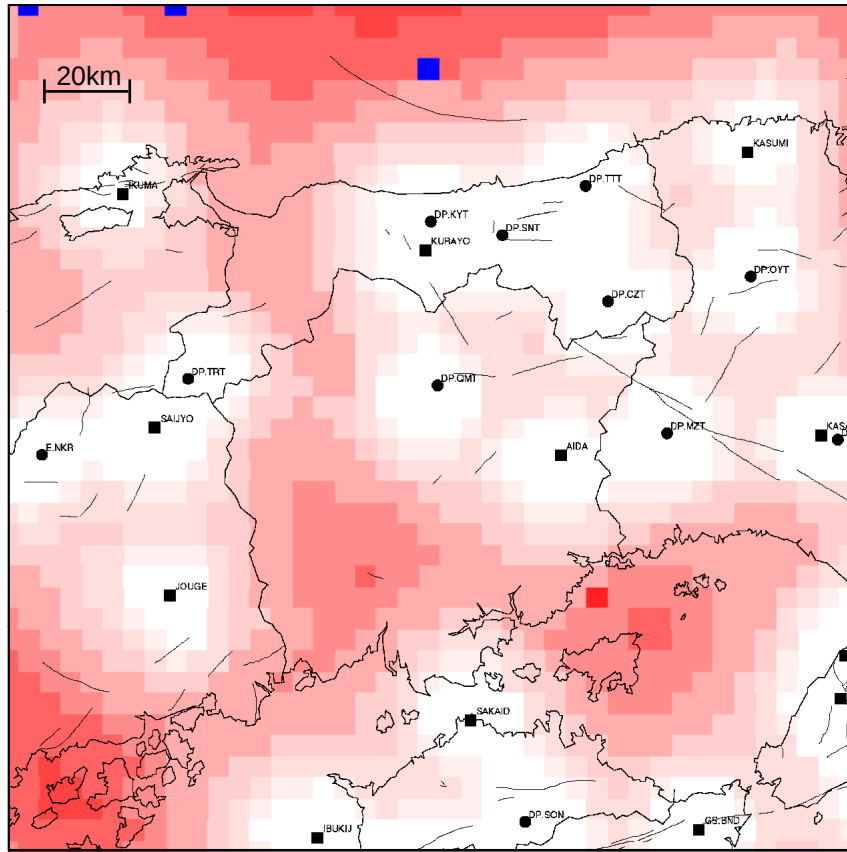
同様のシミュレーションをやや広域で行い、震源決定精度（特に浅い地震の深さ精度）のマッピングを試みた。中国地方に5km間隔でグリッドを置き、各グリッド点で深さ0kmから10kmまで0.5kmきざみで仮想震源を置き、震源の再決定を行った。10km以深では多くの場合仮想震源と再決定震源の一致はよいので、今回のシミュレーションでは計算していない。理論走時計算および再震源決定には鳥取観測所系ルーチン観測に使用している1次元速度構造を用い、各グリッド点に最も近い6観測点を計算に用いることとした。シミュレーションの結果、図2のようなグラフが各グリッド点で作成できる。以下深さ精度に注目していくつかの例を示す。

大学および気象庁の観測点のみを使った例（いわゆる1997年の1元化以降を想定した配置）を示す。図3上は、深さ5kmに設定した仮想震源が、再決定後真の深さからどれくらいずれたかを表したものである。図3下は同様に深さ3kmの仮想震源について示したものである。観測点の近傍では深さのずれはほとんどないが、遠ざかるにつれ深めに決まる傾向があることがわかる。とくに深さ3kmの場合そのずれが大きい。図4は、特定の深さにトラップされる傾向があるかどうかをみるため、各グリッド点における0から10kmまでの仮想震源のうち最も浅く再決定されたものの深さをマッピングしたものである。観測点から10km以上離れると深さ3kmの速度境界にトラップされることがわかる。図5は、全体的な傾向をみるために、各グリッド点における0から10kmまでの全計算で仮定した深さからのずれのRMSの分布を示したものである。当然ながら各観測点近傍での精度はよいが、観測点が希薄なところではずれが大きく十分な深さ精度がないことがわかる。上述の鳥取県西部地震と兵庫県北部地震は、皮肉なことに観測点配置から深さ精度が期待できない場所をわざわざ選んで起きたようにみえる。以上の図では、いずれも観測点近傍20km以内では深さ精度が保証されるが、その外側では地殻最上部の深さ精度を得ることが困難であることがわかる。

図6は、1元化観測点にHi-netを加えた場合で、気象庁にとっては2001年10月以降の状況を、大学にとっては2002年3月以降に予定されている状況を想定してシミュレーションした例である。図5と同じく、各グリッド点における0から10kmまでの全計算で仮定した深さからのずれのRMSの分布を示した。Hi-netの導入により、陸域全体で深さ精度が向上していることがわかる。しかし、日本海の沖合いや瀬戸内海の一部では、精度のない場所があることがよくわかる。このような精度の悪い箇所をカバーするためには、今後島嶼部に観測点を増強したり、海底地震計の設置を検討する必要がある。

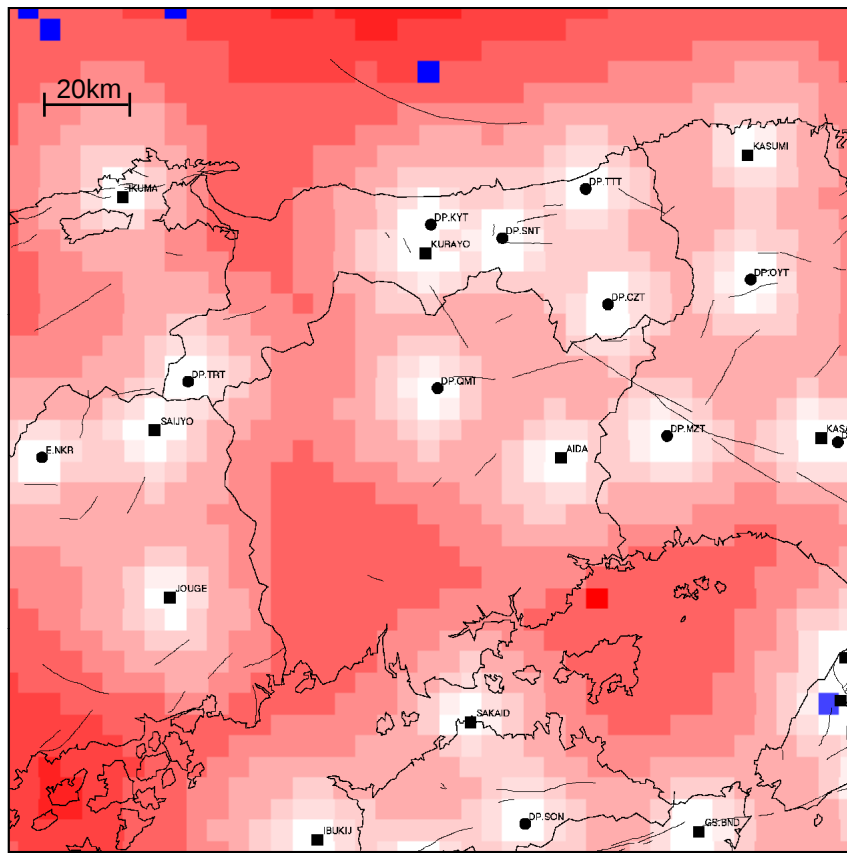
JMA+UNIV.

depth_{reloc.}(5km)-5.0



JMA+UNIV.

depth_{reloc.}(3km)-3.0



depth_{reloc.} - depth_{model}(km)

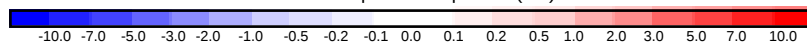


図3 (上) 深さ3kmに設定した仮想震源が再決定された深さ。(下) 同じく深さ5kmの仮想震源の再決定された深さ。いずれも仮想震源との深さの差をカラーコンターで示す。黒丸および黒四角は観測点の位置を示す。

JMA+UNIV. Minimum depth_{reloc.}

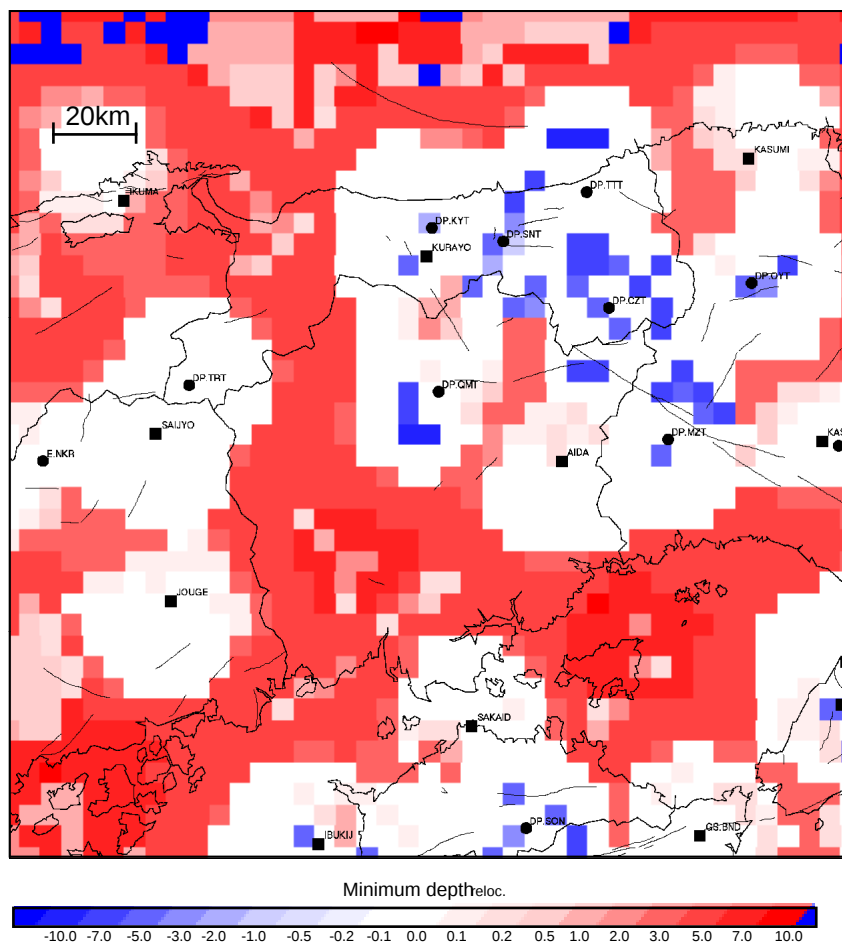


図4 深さ0～10kmの仮想震源のうち最も浅く再決定されたものの深さ。

JMA+UNIV. RMS depth_{model}-depth_{reloc.} (0-10km)

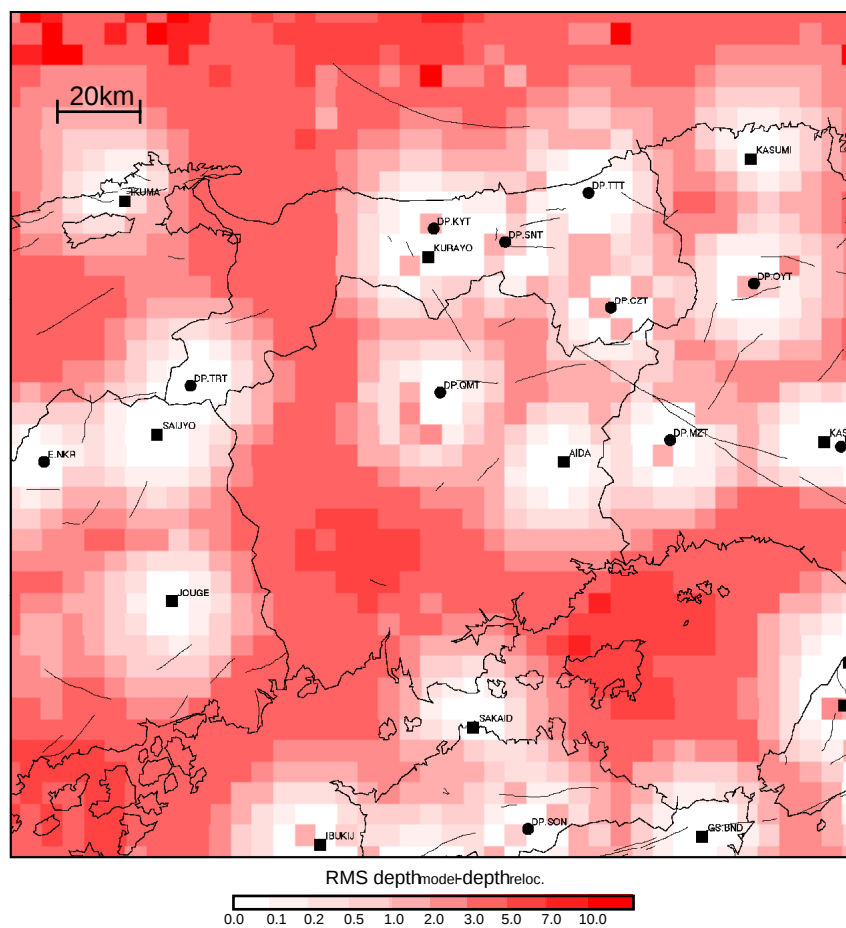


図5 深さ0～10kmの仮想震源と再決定後の深さの差のRMS。

RMS depth_{model}-depth_{reloc.}
(0-10km)

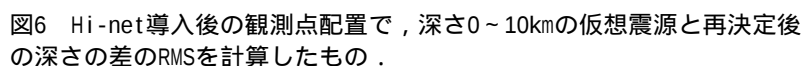
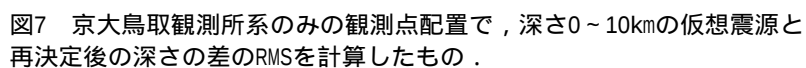
RMS depth_{model}-depth_{reloc.} (0-10km)

図7は、大学の観測点のみ、しかも観測所間のデータ交換もリアルタイムには行えなかった状況（1995年以前を想定）として京大防災研鳥取観測所系の10点のみを使った場合のシミュレーション結果である。鳥取平野周辺では精度は十分であるが、鳥取県西部域ではほとんど精度が期待できない状況であることが分かる。また、山崎断層周辺の一部では精度の悪い地域があることがわかる。このような地域で過去の震源データを解析する際には注意が必要であろう。

【おわりに】

以上のシミュレーションでは走時データとしては理論走時をそのまま（数字の桁落ちはあるが）与えて再決定を行っており、積極的に「読み取り誤差」や「観測点固有の残差」は想定していない。実際上はこれらの効果もあるので、さらに結果は悪い方にでるかもしれない。また、今回はほとんど無視できた震央位置のずれも生じてくる可能性がある。広域マッピングでは「地殻構造の不適合」は無いものと仮定しているので、兵庫県北部の例のように真の地殻構造が震源計算に用いるモデルと食い違う場合はもっと複雑なパターンがみられるものと思われる。

これと同様のシミュレーションは、過去の震源データの深さ精度を考察する際、また特定地域の震源決定精度向上のためどう観測点を増強するか計画する際の参考にできる。Hi-netの整備がすすみ、陸上には微小地震観測点の極端に希薄な地域は無くなりつつあるが、海陸境界域における震源決定精度の吟味や、効果的な海底地震計配置を計画する場合などには特に有用と思われる。

文 献

- 2000年鳥取県西部地震合同稠密余震観測グループ，2001，稠密余震観測による2000年鳥取県西部地震の余震分布とメカニズム解について，日本地震学会ニュースレター，13，3，23-27.
- 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, 50-61.
- 片尾 浩・吉井弘治，2001，鳥取県西部地震直後の緊急余震観測による震源分布，京都大学防災研究所年報，44，B-1，283-292.
- 尾池和夫，1975，鳥取微小地震観測所の震源表について，地震，2，28，331-346.
- 大見士朗・渡辺邦彦・平野憲雄・中川 渥・竹内文朗・片尾 浩・竹内晴子・浅田照行・小泉 誠・伊藤 潔・和田 博夫・澁谷拓郎・中尾節郎・松村一男・許斐 直・近藤和男・渡辺 晃，1999，微小地震観測網SATARNシステムの現状と概要，京都大学防災研究所年報，42，B-1，45-60.
- ト部 卓・束田信也，1992，win-微小地震観測網波形験測支援のためのワークステーション・プログラム（強化版），地震学会講演予稿集，No.1，C22-P18.