

最大振幅情報を援用した微小地震発震機構決定の高精度化

片尾 浩

要 旨

微小地震の発震機構は初動の押し引きを基に決定されることが一般的であるが、地震の規模が小さく、読み取り観測点数が少ない場合には発震機構解を決定することは困難である場合が多い。PS振幅比を用いることで発震機構解の精度を上げる方法も使われるが、PS相の振幅を個別に読み取することはルーチン的には行われていない例が多く、あらためてそれらの験測を行うことは多大の労力を要する。本研究では、マグニチュードを求めるためにルーチン的に読み取られている最大振幅の情報を援用することによって、押し引きから求められた発震機構解の精度を向上させる方法を提案し、その有効性について検討する。

キーワード: 発震機構, 最大振幅, 微小地震, PS振幅比

1. はじめに

微小地震の発震機構データは、地震発生域における応力分布などを知る上で重要である。現在(独)防災科学技術研究所の広帯域地震観測網 F-net や高感度地震観測網 Hi-net, ならびに気象庁は、日々発生する地震のうち、中規模以上の地震については、ルーチン的に発震機構解・モーメント解を求め、ホームページ等でもその情報を公開している。また、防災科学技術研究所の AQUA システム(松村ほか, 2006)は地震発生後極めて短時間でモーメント解を含む種々のパラメータを即時かつ自動的に発信している。

ある地域の地震活動を空間的、時間的に分割して詳細な応力解析をするためには、多数の発震機構解を得る必要がある。そのためにはより小規模の地震について発震機構を求める必要が出てくる。また、特定の地震の前震や、研究上興味深い特徴を持つ地震についても、そのマグニチュード(Mの大小にかかわらず発震機構を求める必要が生じる。通常、波形インバージョンによるモーメント解法は M3 程度より小さな地震に対し用いることは困難で、微小地震に対しては初動の押し引きから発震機構を求める方法が用いられる(例えば, Maeda, 1992)。しかしながら、初動の押し引きのみから発震機構を求める場合、決定に十分な数の観測点における読み取り値が必要となり、必然的にある程度) M の大きなもので多数の読み取りが可能であることが条件となる。

多くの場合、15 点以上の押し引きデータが無ければ解を一意的に決定することは難しい。これは地震の規模だけでなく、観測網の観測点配置や密度とも密接に関わる問題である。例えば現在全国的に展開されている国の高感度基盤観測網の場合、概ね M1.5 程度が解の求まる下限と考えられ、地域・時期によっては十分な解析ができない場合が少なくない。

本来節面付近では P の振幅は小さくなるが、節面付近にデータが無ければ節面の特定が難しいというのが、押し引きによる決定の本質的なジレンマであった。それを補うために、初動の押し引きに加え PS 振幅比を援用する発震機構決定法がいくつか提案されている(例えば Hardebeck and Shearer, 2003)。P 波と S 波の放射パターンが異なることを利用して、両相の振幅比から各々の波線発射方向が節面に対して相対的にどのような位置にあるのかを推定できるとするもので、これらの方法を利用した研究例も多い。

しかしながら、定常的な観測網においては、P、S 相の振幅を個別に読み取ることがルーチン的には行われていない場合が多い。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網 SATARN(大見ほか, 1999)においても、P 相・S 相の走時の読み取りは行っているが、各相個別に振幅を計測することは行われていない。既存の振幅読み取りデータが存在しない場合、あらためて過去の地震の PS 振幅比の験測を行うには多大の労力を要する。波形データのデジタル化と計算機の高速大容量化が進んだ今日においても、多数の地震についてあらためて波形データか

ら振幅を読み直す作業は容易ではないといえる。

2. winシステムと最大振幅情報

本研究では、押し引きデータに加えて最大振幅情報を援用し、発震機構解の精度を向上させる方法を考えてみる。現在大学等の研究機関における地震観測では win システム（卜部・東田，1992）が広く利用されている。防災研究所地震予知研究センターの SATARN も、win システムを基にした微小地震観測システムのひとつである。win システムでは、ある地震の観測結果は pick ファイルというひとつのファイルにまとめられる。これには、各観測点における P, S 相の到達時刻とともに、渡辺の式による M 決定（渡辺，1971）のため、上下動成分の最大振幅がその時刻とともに記載されている（Fig. 1）。渡辺の式では、上下動速度波形の最大振幅を基にマグニチュードを計算するが、それが P 相であるか S 相であるかは問わないことになっている。しかし、最大振幅の時刻は記載されているので、それを P, S 相の到達時刻と比較することで、P, S 相のどちらが最大振幅となったかが判別できる場合がある。つまり上下動記録上で P, S どちらが大きかったかを知ることができる。これらの情報を押し引きデータに加えて

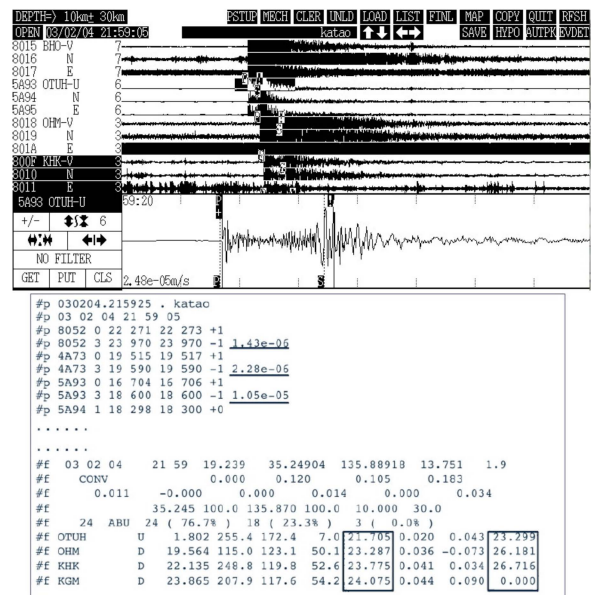


Fig. 1 (Above) Screen shot of the program “win”. (Below) the “pick file” including the information about the maximum amplitude and P/S arrival times.

やることで、M が小さいため発震機構解を限定し難い地震についても、その決定精度を向上させ得る可能性がある。

Pickファイルそのものは、数十キロバイトのテキ

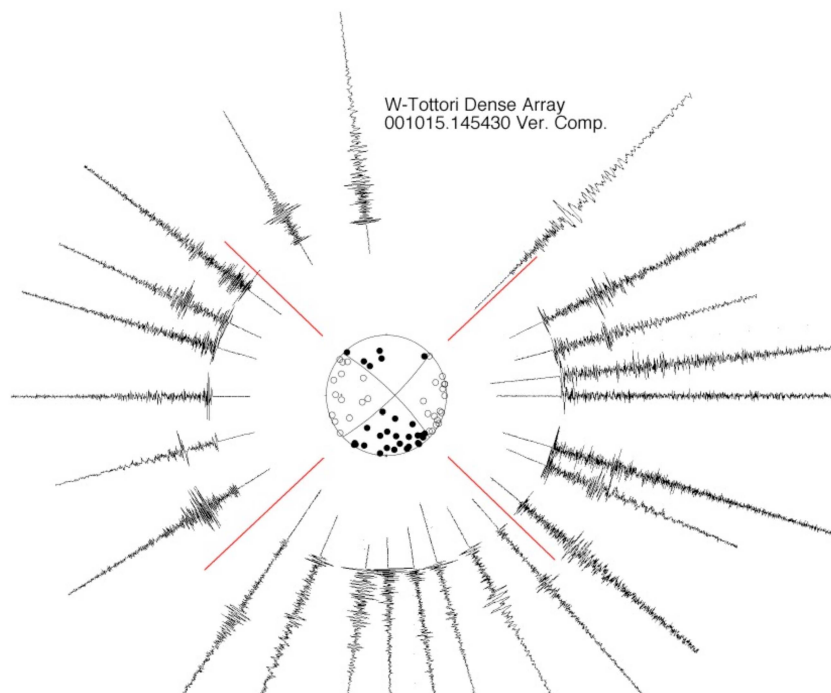


Fig. 2 Focal mechanism and seismogram of vertical component at each stations.

ストファイルに過ぎないので、多数の地震について扱うことは、波形データの操作に比べはるかに容易である。

3. 観測例とデータに関する諸問題

Fig. 2は、ある地震の初動押し引きによる発震機構解を中央に置き、周囲に各観測点で得られた上下動成分の波形を配したものである。この地震は2000年鳥取県西部地震の余震で、大学合同稠密余震観測 (Shibutani et al., 2005) により多数の臨時観測点が展開され、東西圧縮の横ずれ型の発震機構であることが精度よく求まっている。各観測点の波形を観察すると、単純に上下動記録のみを見た場合でも、節面付近では初動のP波が小さくS波が大きいことや、節面から離れるに従ってPの振幅が増大しSの振幅が減少するという放射パターンの特徴がよく現れていることが分かる。

Fig. 3の左側は、同じく鳥取県西部地震の2つの余震について、初動押し引き分布を示したものである。黒丸が押しで、白丸が引きであり Maeda (1992) の方法で求めた発震機構解の節面が示されている。多数の観測点があるため精度がよく、押し引き分布を満足する解はいずれもただひとつだけ決まっている。各々に対応する右側の図は、上下動成分におけるP相、S相のうち、Pの方が大きい観測点を黒丸で、

Sの方が大きい観測点を白丸で表したものである。やはり、節線付近ではPよりSの方が大きいなど理論的な放射パターンに近い結果が得られていることがわかる。これらにより、上下動最大振幅がP相であるかS相であるかという情報が、発震機構解の決定に有用であることが確認できる。

既存の地震波形に立ち戻ってPS振幅比を読み直すことができるのであれば、本来の振幅比を利用した解法を採ればよい。本研究では、波形データに立ち戻って作業することなく、pickファイルに記載されているデータのみを使って、簡便に発震機構決定の高精度化をめざす。もちろん、元となるデータ (観測システム) はwinシステムに準拠したものであることが前提となる。

一般に、人の手により手動検測が既に行われている場合は震源決定の精度も高く、発震機構決定の上でも有利である。しかし、手動検測では意図的な操作が行われている場合が有り注意が必要である。例えば、経年的なマグニチュードシフトを避けるために特定の観測点でしか最大振幅を読み取らないことにしているとか、不必要なS相の検測が省略されるといったケースである。このような場合には、最大振幅について十分な情報が得られず、PS相の比較が困難な場合もあり得る。ただし、震源が確定していれば、理論的なS走時はpickファイルの情報だけでも計算可能ではある。理論走時を基に、波形ファイルから自動的にPS振幅比を読み取ることも可能であるが、それは波形データを扱わない簡便な「裏ワザ」としての本研究の方向性から外れるものと言えよう。

上のような事情を考えると、むしろ計算機による自動処理結果に適用するのがよいのかもしれない。Winシステムの自動処理では、読み取り可能な観測点すべてで、P、S、最大振幅が読みとられるからである。初動の押し引きについては、ノイズがある時など自動処理結果をそのまま信頼できないケースもあるが、震央距離の短い確実なものだけを用いることとすれば、将来的にはこの方法を実際の定常・臨時地震観測データに応用できる可能性がある。

また、pickファイルに記載されている最大振幅はPまたはS相以外である場合もある。反射波、表面波など何らかの後続波が最大振幅となることも稀にあるし、電気的あるいは人工的な地動ノイズが読み取られることもある。余震観測等では連続して起きた他の地震の振幅を読み取ってしまうこともある。これらは、逐一波形を見ながら検測を行わず、pickファイルの処理だけを行う場合には注意が必要である。PもしくはSの理論走時から大きく外れるものは除外するといった工夫が必要である。また、過去のデータにはシステムのダイナミックレンジが狭いため飽

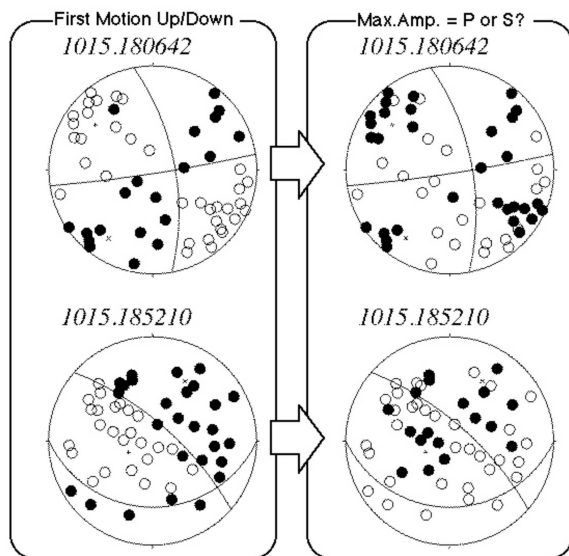


Fig. 3 (Left) Focal mechanisms determined by up/down of P phases. (Right) Solid circles show that maximum phase on vertical component is P; Open circles show that maximum phase on vertical component is S.

和した波形で最大振幅が読み取られている場合も考えられる。

振幅を厳密に扱う場合、観測点直下の浅い速度構造や地震波の入射角など考慮すべき要因は多い。また、観測点固有の補正值を持たせて精度を上げるといった操作もよく用いられるが、本研究ではその簡便さに存在意義を求めているので、これらも考慮しない。

4. 発震機構試算例と考察

本研究の方法の有用性を実証するため、以下のような実験を行った (Fig. 4)。まずいくつかのM2.0以上の地震 (近年の基盤観測網では20点以上の押し引きデータが得られる) で押し引き分布により確実に発震機構が求められている地震を選び出す (Fig. 4左上)。ここではpickファイルから直接、押し引き、発射方位、発射角などを読み込んで、Maeda(1992)の方法に従って発震機構を決定する方法をとった。それらの読み取り値 (pickファイル) から、震央距離の遠い観測点から順にデータを削除しながら、押し引きによる発震機構決定を繰り返していく。観測

点が10点余りになると解が不安定となり、特定の発震機構に限定できなくなる。これは発震機構を押し引きだけでは決められないMの小さい地震をシミュレートしたものになる。(「正しい答」は最初に決めた発震機構である。) 押し引き分布を満足する節線の組は多数引けるようになる。Fig. 4では右上の図のように多数の節線が引かれ「毛糸玉」の様に表されている。そこで、残った観測点の最大振幅情報とP、Sの到達時刻を比較し、最大振幅はどちらの相かを判断する。多数候補として残っている解の各々について理論的にPSどちらが最大振幅となるべきかを計算してやり、もっとも適合率のよいものを採用することで、発震機構解をしぼり込むことができる (Fig. 4右下)。結果的に、少ない観測点数しかない条件下でも、最大振幅情報を援用することで、押し引きだけから求められた多数の解の候補から、「正解」に近い解を選び出すことに成功した。

Fig. 5は、実際のM1程度の地震に対して本研究の方法を適用した例である。上の地震では、押し引きだけでは、限定できなかった多数の解の候補から2つにしぼることに成功している。とくに、横ずれ型や逆断層型など多くの解の中から、横ずれ型のも

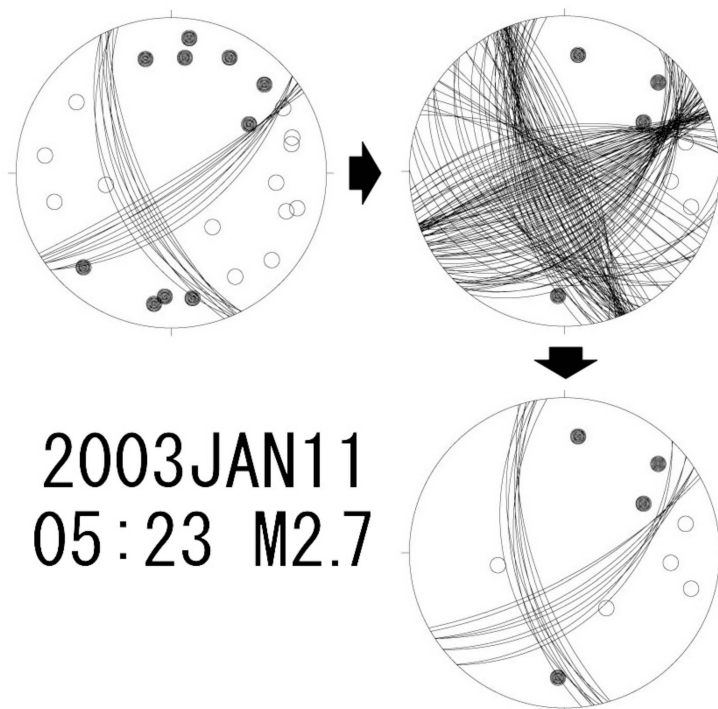


Fig. 4 (Left) Focal mechanisms determined by up/down of P phases only. (Right Above) Focal mechanisms determined by up/down of P phases. Only based on smaller number of stations. (Right Below) Best solutions are selected using the maximum amplitude information.

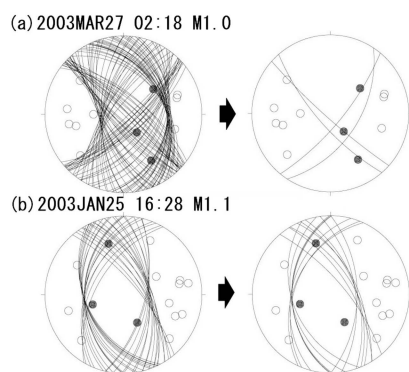


Fig. 5 Example for small earthquakes. (Left) Focal mechanisms determined by up/down of P phases only. (Right) Focal mechanisms determined by up/down of P phases and the maximum amplitude information.

の選出できたことが評価できる。一方 Fig. 5下の地震では、押し引きで得られたバラつきのある解の範囲をしぼりこむことはできていない。

振幅を直接計測する方法では振幅比が実数データであるのに対し、本研究で扱っている最大振幅情報はPかSかの2値情報にしかなり得ないのは大きな弱点である。すなわち「PとSがほぼ同じ振幅」といった有用な情報も表現できないし、本来同程度の振幅をPSどちらかに決めてしまうことによる支障も生じる可能性がある。

押し引きのみによる方法同様、決定精度に対して観測点配置が大きく影響することが考えられる。また、震源決定や波線の発射角の計算に用いる速度構造モデルが、現実のものと相違している場合、解の精度が低下する（とくに逆断層解の場合影響が大きい）といったことは、押し引きによる決定と共通している弱点である。

今後さらに多くのデータセットに本研究の方法を適用し、アルゴリズムの改良、問題点の洗い出し等を行っていく。

5. まとめ

winシステムにおいて、pickファイルの記載内容から、上下動成分において最大振幅となったのはP相であるかS相であるかを知ることができる。微小地震の発震機構決定において、従来の初動の押し引きに加えて、最大振幅情報を援用することで、解が不安定な極微小地震でも安定した解を得る可能性を示した。

この方法で実際の地震データを与えて発震機構決定を試みたら、基盤観測網におけるM1.0程度の地震においても発震機構決定精度が改善される例が多くあった。将来、この方法を既存の読み取りデータに適用し、多くの発震機構データを得られる可能性がある。

参考文献

- ト部 卓・東田信也（1992）：win-微小地震観測網波形観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.
- 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.
- 松村稔・伊藤嘉宏・木村尚紀・小原一成・関口渉次・堀貞喜・笠原敬二（2006）：高精度即時震源パラメータ解析システム（AQUA）の開発，地震，2, 59, 167-184.
- 渡辺 晃（1971）：近地地震のマグニチュード，地震，2, 24, 189-200.
- Hardebeck, J. L. and P. M. Shearer (2003): Using S/P amplitude ratio to constrain the focal mechanisms of small earthquakes, Bull. Seism. Soc. Am., 93, 2434-2444.
- Maeda, N.(1992): A method of determining focal mechanisms and quantifying the uncertainty of the determined focal mechanisms for microearthquakes, Bull. Seism. Soc. Am., 82, 2410-2429.
- Shibutani, T., H. Katao and Group for the dense aftershock observations of the 2000 Western Tottori Earthquake (2005): High resolution 3-D velocity structure in the source region of the 2000 Western Tottori Earthquake in southwestern Honshu, Japan using very dense aftershock observations, Earth Planets Space, 57, 825-838,.

Determination of the Focal Mechanisms Using Maximum Amplitude for Microearthquakes

Hiroshi KATAO

Synopsis

In many case, the focal mechanisms of microearthquakes are derived from observed P-wave first motion polarities. However the P/S amplitude ratio is useful to improve the precision of the mechanism determination, the measurements of the P and S amplitude are not performed in routine work. We introduce a new method to determine the focal mechanisms using the information about the maximum amplitude, which is observed routinely to determine the magnitude.

Keywords: focal mechanism, maximum amplitude, microearthquake, P/S amplitude ratio