

近接型相似微小地震対における相対震源座標推定法の理論的検討

その他（別言語等）のタイトル	Theoretical Analysis on Relative Source Location of Proximate Overlapping Similar Seismic Events
著者	永野 宏治, 田村 弘貴
雑誌名	室蘭工業大学紀要
巻	66
ページ	39-49
発行年	2017-03-24
URL	http://hdl.handle.net/10258/00009176

近接型相似微小地震対における 相対震源座標推定法の理論的検討

永野 宏治*1, 田村 弘貴*2

Theoretical Analysis on Relative Source Location of Proximate Overlapping Similar Seismic Events

Koji NAGANO and Hiroki TAMURA

(原稿受付日 平成 28 年 11 月 10 日 論文受理日 平成 29 年 2 月 10 日)

Abstract

We can use geothermal energy by obtaining steam and/or hot water that are in subsurface fracture. Therefore, we should understand geometrical, mechanical, and chemical properties of the subsurface fracture so that we can use the geothermal energy. We can estimate location and structure of subsurface fracture by measurement of microseismic events that are emitted at the subsurface fracture. We have studied overlapping similar microseismic events. If a second event, with a similar waveform to an earlier event, arrives before complete attenuation of that earlier event, the two events overlap each other. We call the overlapping similar microseismic events "Proximate Microseismic Doublets". In this paper, we examine a theoretical method on relative source location of the proximate microseismic doublets

Keywords : Microseismic event, Relative source location, Geothermal energy, Geothermal reservoir

1 はじめに

地熱エネルギーは、地下亀裂が作る地熱貯留層に蒸気・熱水として蓄えられている。したがって、地熱エネルギーを地下から工学的に抽出するには、地下亀裂の位置や構造、力学的・化学的性質を把握する必要がある。

地下亀裂の位置や構造を測定する手法には、音響学的手法、電磁気学的手法、化学的手法等がある。音響学的手法の一つに、微小地震法がある。微小地震法では、地下亀裂が動く時に発生する微小地震を

*1 室蘭工業大学 しくみ情報系領域

*2 室蘭工業大学 情報電子工学系学科

解析して、地下亀裂の位置や構造を評価する。

微小地震法の中で特殊な解析手法に、相似微小地震対の解析がある。相似微小地震対とは、波形の相似な微小地震の組である。組を構成するイベントが 2 つの場合ダブルット解析、3 つ以上の場合マルチプレット解析とも呼ばれる。相似微小地震は波形が相似のため、その微小地震は同じ震源メカニズムに発生し、しかも震源間の距離が極めて短い。そして、相似微小地震対の波形における微小な違いを解析して、震源の相対座標を高精度で推定できる。相似微小地震対の相対震源座標は、微小地震を個々に独立して震源標定するよりも高い。

近接型相似微小地震対とは、発生時間間隔が 1 イベントの継続時間と同等あるいは継続時間より短く、波形が相似な微小地震の対である⁽¹⁾⁽²⁾。通常の微小地震対の解析では、その発生間隔が数十秒から数日の相似微小地震対を解析対象にしている。地熱貯留層では、蒸気・熱水の移動があり、それに伴い地下亀裂が動く。地下亀裂の動きによって、地熱貯留層近傍における地下の速度構造は変化すると考えられる。微小地震の発生時刻が大きく異なると、その間に地下の速度構造が亀裂の動き等により変化する可能性がある。伝播媒質の変化は、震源標定の誤差の要因になる。近接型相似微小地震対は、入力時間差が短いため、その間に伝播媒質の変化は少ない。したがって、発生時間差の長い相似微小地震対に比べて、近接型相似微小地震対を解析することにより、相対震源をより正確に求められることが期待される。

本論文では、近接型相似微小地震対の相対震源座標の推定方法を述べる。近接型相似微小地震対の相対震源座標は、マスターイベント法を使って第 1 震源からの相対的差として推定する。マスターイベント法では、観測点における入力時間差を観測点間で比較して、相対震源座標と発生時間差を推定する。この解析では、震源における微小地震の発生順と観測点における入力順が同じことが前提になっている。しかし、近接型相似微小地震対は発生時間差が極めて短いため、観測点における入力順と震源における発生順が逆転する場合がある。本論文では、近接型相似微小地震対の相対震源座標の推定において、このような順が逆転する場合も考慮して推定する手法を述べる。本論文では、地熱フィールドで実際に観測した近接型相似微小地震対を使って、近接型相似微小地震対の相対震源座標の推定法を検討する。

2 近接型相似微小地震対の入力順

地熱フィールドで観測した近接型相似微小地震対の波形を図 1 に示す。近接型相似微小地震対では、最初に入力した微小地震が十分に減衰する前に、次の微小地震が入力する。したがって、2 つの微小地震の波形が重畳している。

近接型相似微小地震対は、2 つの微小地震の発生時間差が極めて短いため、震源における発生順と観測点への入力順に逆転が発生する場合がある。発生順と入力順の関係は発生時間差と伝播距離により決まる。発生時間差と各観測点の入力時刻の関係を図 2 に示す。震源において最初に発生した微小地震の震源をマスタ震源、次に発生した微小地震の震源をスレーブ震源と呼ぶことにする。マスタ震源から観測点 j までの距離 R_{mj} 、スレーブ震源から観測点 j までの距離 R_{sj} 、地下は等方均質とし、地下の P 波伝播速度を V_p とする。観測点 j において、マスタ震源で発生した信号の入力時刻 τ_{mj} とスレーブ震源で発生した信号の入力時刻 τ_{sj} は、それぞれ

$$\tau_{mj} = \frac{R_{mj}}{V_p} + \tau_{m0} \quad (1)$$

$$\tau_{sj} = \frac{R_{sj}}{V_p} + \tau_{s0} \quad (2)$$

になる。

観測点 j において、スレーブ震源で発生した微小地震が、マスタ震源で発生した微小地震より早く入力することは、

$$\tau_{mj} > \tau_{sj} \quad (3)$$

である。式(1)と式(2)を式(3)に代入し整理すると、

$$V_p(\tau_{s0} - \tau_{m0}) < R_{mj} - R_{sj} \quad (4)$$

になる。つまり、式(4)の場合、観測点への入力順は震源における発生順の逆になる。

例えば、 $R_{mi} = 2800\text{m}$ 、 $R_{si} = 2780\text{m}$ 、 $V_p = 5850 \text{ m/s}$ の時の震源における発生時間差と、観測点における 2 つの微小地震の入力時刻の関係を図 3 に示す。同図では、横軸が表す震源における発生時間差が約 0.003m より短い時、スレーブ震源で発生した微小地震がマスター震源で発生した微小地震より早く観測点に入力している。図 4 に、 $V_p = 5850 \text{ m/s}$ の時、震源における発生順と観測点における入力順の関係を、2 つの微小地震の伝播距離の差と発生時間差を使って示す。同図の下半分の領域において、震源における発生順と観測点における入力順が逆転する。

3 P 波入力時間差の検出

近接型相似微小地震対の相対震源座標は、近接型相似微小地震対の 2 つの P 波の入力時間差を観測点間で比較すると決定できる。なお、震源座標の推定には、2 つの S 波の入力時間差も使える。しかし、本論文では、説明を簡略化するためと、S 波の伝播速度が P 波の伝播速度に比べて精度低い点を考慮して、震源座標には P 波の入力時間差のみを使うことにする。

相似な 2 つの波形が重なった信号のケプストラムは、その入力時間差にピークを示す⁽³⁾⁽⁴⁾。近接型相似微小地震対には、相似な波形が P 波と P 波、S 波と S 波の 2 組がある⁽²⁾。したがって、近接型相似微小地震対のケプストラムは、それら 2 つの入力時間差にピークを示す。しかし、近接型相似微小地震対のケプストラムの単純な解析では、2 つのピークそれぞれが P 波の入力時間差あるいは S 波の入力時間差のいずれかを示しているかを判定できない。

近接型相似微小地震対の P 波入力時間差は、時間-ケフレンシ解析を使って検出する⁽²⁾。時間-ケフレンシ解析の概念を図 5 に示す。時間-ケフレンシ解析では、第 2 の S 波を削除した近接型相似微小地震対のケプストラムを解析する。第 2 の S 波を削除した場合その削除した波形には第 1 の S 波の相似波形がないため、S 波の入力時間差に対応するピークがケプストラムには現れず、P 波の入力時間差に対応するピークだけがケプストラムに現れる。

近接型相似微小地震対の時間-ケフレンシ解析では、窓関数を使って第 1 のイベントの波形と第 2 の P 波の波形を取り出す。その窓関数の長さを徐々に長くして、第 2 の S 波もケプストラム解析できるように解析区間を徐々に長くする。そして、その窓関数のそれぞれの長さでケプストラムを計算し、図 5 のように、横軸が窓関数の長さ、縦軸がケフレンシ、等高線の高さがケプストラムの等高線図で、時間-ケフレンシ解析の結果を表現する。この等高線表示されたケプストラムにおいて、窓関数の長さを短くしていく時(同図の右側から左側へ)に、長く続くピークが P 波入力時間差を表している。第 2 の S 波が入力している区間には第 2 の P 波も入力しているため、第 2 の S 波が入力した区間の波形を削除すると第 2 の P 波の後半部分も削除してしまう。そのため、P 波入力時間差を表すケプストラムも変化する。時間-ケフレンシ解析では、P 波入力時間差に対応するケプストラムと S 波入力時間差に対応するケプストラムを適切に判別するために、図 5 のように等高線のピークのつながりを解析する。ただし、近接型相似微小地震対に対して、この解析で得られる P 波の入力時間差が、震源における発生時間差とは一致しない場合がある。時間-ケフレンシ解析では、あくまでも、最初に観測した P 波と次に観測した P 波の入力時間差を検出する。

4 相対震源の標定法

P 波の入力時間差を観測点間で比較して、震源間の相対座標を推定する。相対震源座標の推定は、赤尾の手法を使う⁽⁵⁾。ただし、近接型相似微小地震対の相対震源座標では、観測点への入力順が震源における発生順と一致しない場合がある。

図 2 に示すように、マスター震源とスレーブ震源の座標をそれぞれ $x_m = (x_m, y_m, z_m)$ 、 $x = (x, y, z)$ 、マスター震源からスレーブ震源の相対座標を $(\Delta x, \Delta y, \Delta z)$ とする。つまり、 $(x, y, z) = (x_m + \Delta x, y_m +$

$\Delta y, z_m + \Delta z$)である。観測点*i*の座標を (X_i, Y_i, Z_i) とする。また、震源における微小地震の発生時間差を $\tau_{ms} = \tau_{s0} - \tau_{m0}$ とする。観測点*i*におけるマスタ震源からの信号とスレーブ震源からの信号の入力時刻をそれぞれ、 τ_{mi} 、 τ_{si} とし、P波入力時間差を

$$\Delta T_i = \tau_{si} - \tau_{mi} \quad (5)$$

とおく。第2節で述べたように $R_{mi} < R_{si} + V_P \tau_{ms}$ の時 $\Delta T_i > 0$ であり、震源における発生順と観測点*i*における入力順は一致する。一方、 $R_{mi} > R_{si} + V_P \tau_{ms}$ の時 $\Delta T_i < 0$ になり、震源における発生順と観測点*i*における入力順は逆転する。観測点*i*におけるP波の入力時間差 ΔT_i は、

$$\begin{aligned} \Delta T_i &= \tau_{si} - \tau_{mi} \\ &= (\tau_{si} - \tau_{s0}) - (\tau_{mi} - \tau_{m0}) + (\tau_{s0} - \tau_{m0}) \\ &= \frac{R_{si}}{V_P} - \frac{R_{mi}}{V_P} + \tau_{ms} \end{aligned} \quad (6)$$

のように表せる。

地下の伝播媒質は等方均質とする。マスタ震源 x_m およびスレーブ震源 x から座標 (X_i, Y_i, Z_i) にある観測点*i*までの距離 R_{mi} 、 R_{si} は、

$$R_{mi} = \sqrt{(x_m - X_i)^2 + (y_m - Y_i)^2 + (z_m - Z_i)^2} \quad (7)$$

$$R_{si} = \sqrt{(x - X_i)^2 + (y - Y_i)^2 + (z - Z_i)^2} \quad (8)$$

である。スレーブ震源の座標 x と、マスタ震源とスレーブ震源の発生時間差 τ_{ms} を未知変数として、式(6)の右边を

$$f_i(x, y, z, \tau_{ms}) = \frac{R_{si}}{V_P} - \frac{R_{mi}}{V_P} + \tau_{ms} \quad (9)$$

とおく。マスタ震源の座標 $x_m = (x_m, y_m, z_m)$ は既知とする。スレーブ震源の座標 $x = (x, y, z)$ は、マスタ震源 $x_m = (x_m, y_m, z_m)$ からの相対値 $(\Delta x, \Delta y, \Delta z)$ で表されるため、式(9)は $\Delta x, \Delta y, \Delta z$ と発生時間差 τ_{ms} を未知変数として、

$$f_i(x, y, z, \tau_{ms}) = f_i(\Delta x, \Delta y, \Delta z, \tau_{ms}) \quad (10)$$

になる。

$\Delta x, \Delta y, \Delta z$ と τ_{ms} が十分に小さい時、 $x = x_m, \tau_{ms} = 0$ において、 $f_i(\Delta x, \Delta y, \Delta z, \tau_{ms})$ は、

$$f_i = f_i|_0 + \left. \frac{\partial f_i}{\partial \Delta x} \right|_0 \Delta x + \left. \frac{\partial f_i}{\partial \Delta y} \right|_0 \Delta y + \left. \frac{\partial f_i}{\partial \Delta z} \right|_0 \Delta z + \left. \frac{\partial f_i}{\partial \tau_{ms}} \right|_0 \tau_{ms} + \dots \quad (11)$$

に近似できる。なお、 $|_0$ は $x = x_m, \tau_{ms} = 0$ の場合を表し、 $f_i = f_i(\Delta x, \Delta y, \Delta z, \tau_{ms})$ と簡略に表示している。式(6)より、 $f_i|_0 = 0$ である。また、式(11)において2次以上の高次項を無視すると

$$f_i = \left. \frac{\partial f_i}{\partial \Delta x} \right|_0 \Delta x + \left. \frac{\partial f_i}{\partial \Delta y} \right|_0 \Delta y + \left. \frac{\partial f_i}{\partial \Delta z} \right|_0 \Delta z + \left. \frac{\partial f_i}{\partial \tau_{ms}} \right|_0 \tau_{ms} \quad (12)$$

になる。

観測点*i*における式(6)の左辺が表す観測したP波の入力時間差 ΔT_i と、同式の右辺が表す未知変数 $\Delta x, \Delta y, \Delta z, \tau_{ms}$ における理論的な入力時間差の差 ε_i を、

$$\varepsilon_i = \Delta T_i - \left(\left. \frac{\partial f_i}{\partial \Delta x} \right|_0 \Delta x + \left. \frac{\partial f_i}{\partial \Delta y} \right|_0 \Delta y + \left. \frac{\partial f_i}{\partial \Delta z} \right|_0 \Delta z + \left. \frac{\partial f_i}{\partial \tau_{ms}} \right|_0 \tau_{ms} \right) \quad (13)$$

と表す。偏分量 $\left. \frac{\partial f_i}{\partial \Delta x} \right|_0, \left. \frac{\partial f_i}{\partial \Delta y} \right|_0, \left. \frac{\partial f_i}{\partial \Delta z} \right|_0$ はマスター震源・観測点の位置関係とP波速度により数値計算して求められる。4点以上の観測点でそれぞれ式(13)を計算し、最小二乗法にしたがって $\sum \varepsilon_i^2$ を最小にするように、未知変数 $\Delta x, \Delta y, \Delta z, \tau_{ms}$ を推定する。

第3節で述べた時間-ケフレンシ解析で検出できる量は、式(6)の左辺が表す観測したP波の入力時間差 ΔT_i ではなく、その絶対値 $|\Delta T_i|$ である。図4で示したように震源と観測点の位置関係および震

源における発生時間差によって ΔT_i には正の場合と負の場合があるため、波形だけから ΔT_i の正負を決められない。そのため、時間-ケフレンシ解析で得た P 波の入力時間差の絶対値 $|\Delta T_i|$ を各観測点で正の場合と負の場合について、それぞれ式(13)を計算し、 $\Delta x, \Delta y, \Delta z, \tau_{ms}$ を求める。例えば、図 6 のように 4 つの観測点がある場合 16 通りについて、それぞれの観測点における P 波の入力時間差の絶対値 $|\Delta T_i|$ を正の場合と負の場合を検討する。そして、式(13)の $\sum \varepsilon_i^2$ を最小にする $\Delta x, \Delta y, \Delta z, \tau_{ms}$ を求める。定義によれば、発生点における第 1 イベントと第 2 イベントの発生時間差 τ_{ms} は負にならない。したがって、式(13)の計算により $\tau_{ms} < 0$ になる場合、その解を除外する。そして、最も τ_{ms} が短い場合を、本論文では、最適な解にする。

5 結論

本論文では、近接型相似微小地震対の相対震源座標の推定方法について述べた。本論文では、近接型相似微小地震対は 2 つの相似な微小地震が 1s 以下の極めて短い間隔で入力するため、観測点の入力順と震源の発生順が一致しない場合があることを新しく指摘した。そして、観測点の入力順と震源の発生順が一致しない場合をも含めた近接型相似微小地震対の相対震源座標の推定方法を述べた。

今後は、この解析方法を実際の地熱フィールドで観測した近接型相似微小地震対に適用し、その相対震源座標を標定する。そして、標定した相対震源座標の妥当性を、他の微小地震の震源の標定結果や地殻応力に基づいて検証する。

謝辞

産業技術総合研究所の横田俊之博士には、近接型相似微小地震対の相対震源座標推定法について、貴重な助言をいただきました。

文献

- (1) 永野宏治, 江原大輔, ケプストラム解析による近接型 AE ダブレットの入力時間差推定法, 日本地熱学会誌, vol. 30, no. 1, 2008, p. 37-47.
- (2) K. Nagano, Time-quefreny Analysis of Overlapping Similar Microseismic Events, Exploration Geophysics, vol. 47, no. 2, 2016, p. 133-144.
- (3) D.P. Skinner, D.G. Childers, and R.C. Kemerait, The Ceptrum: A Guide to Processing, Proceedings of IEEE, vol. 65, 1977, p. 1428-1443.
- (4) 城戸健一, デジタル信号処理入門, 丸善, 1985.
- (5) 赤尾嘉彦, 渡部丹, 1986 年パームスプリングス地震の強震記録を用いた多重震源位置のインバージョン解析, 地震, vol. 41, no. 2, 1988, p. 247-257.

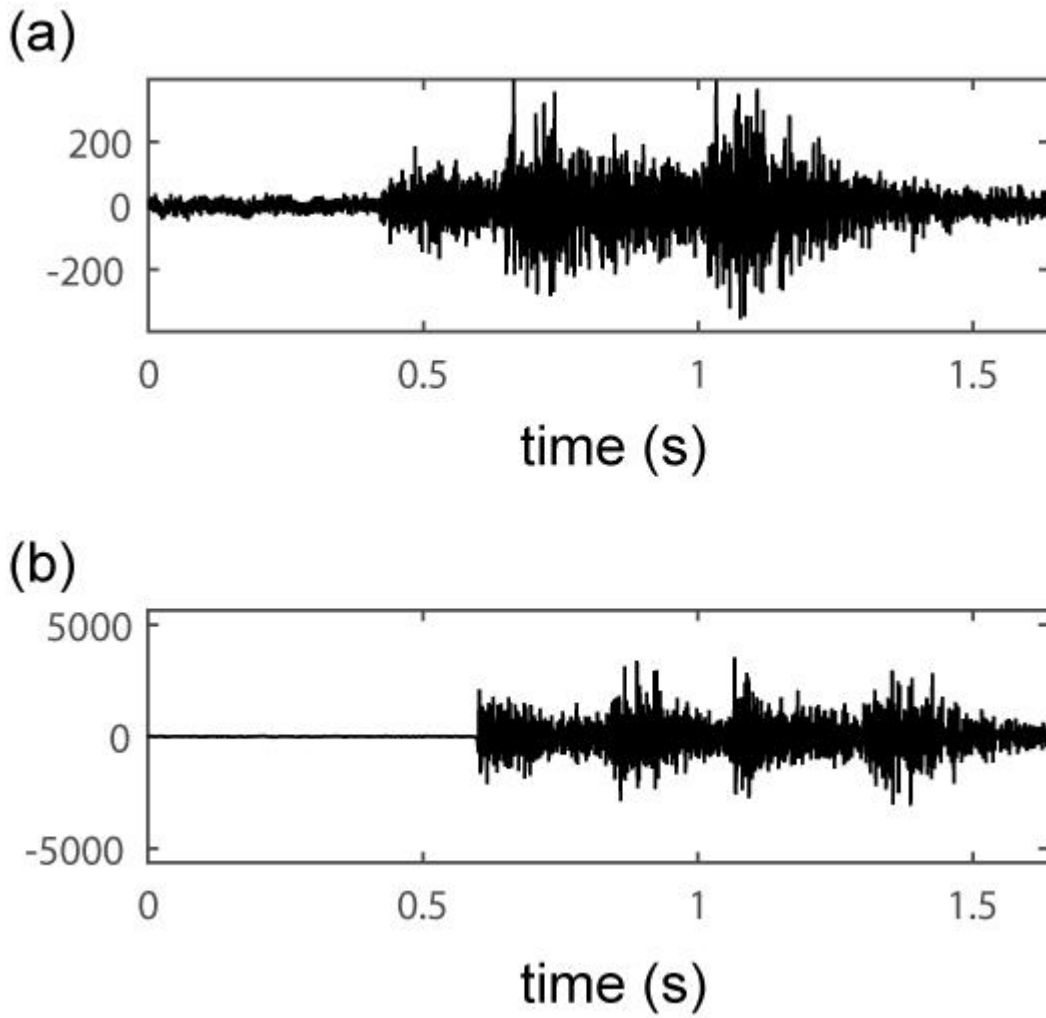


図1 近接型相似微小地震対の波形

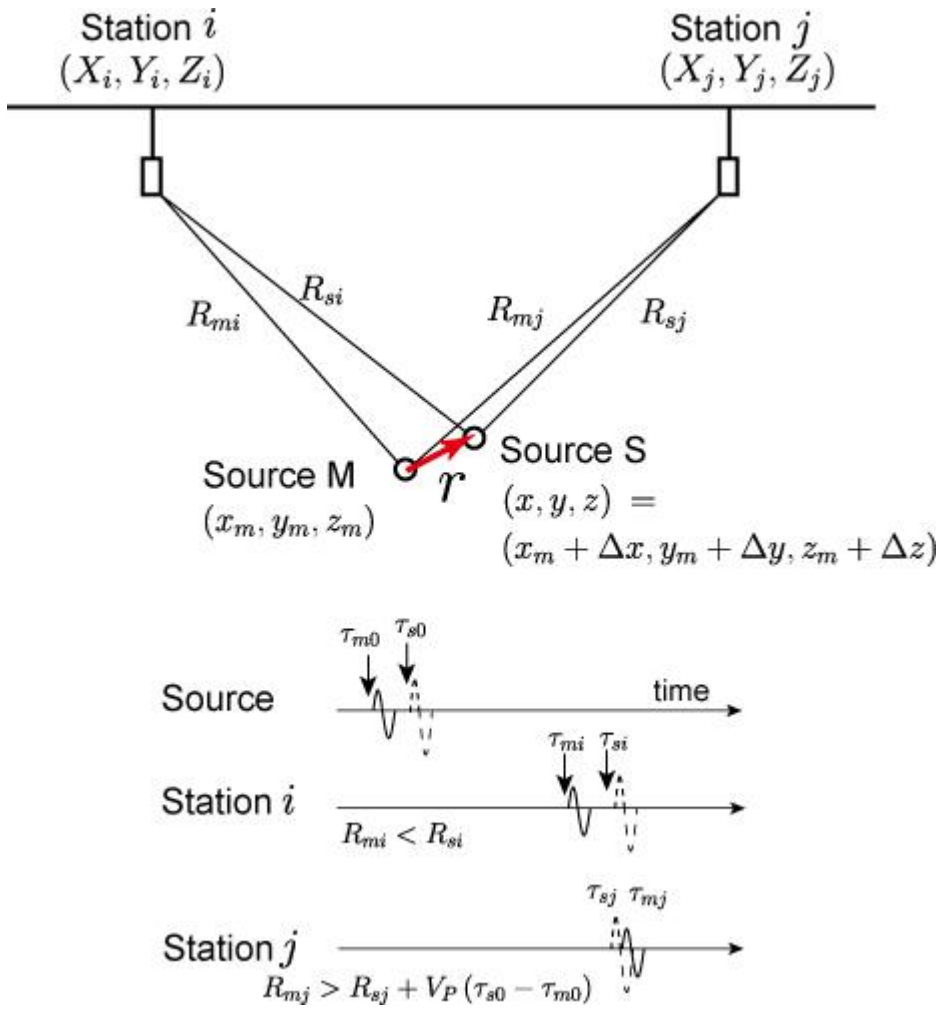


図2 近接型相似微小地震対の発生順と入力順が逆転する概念

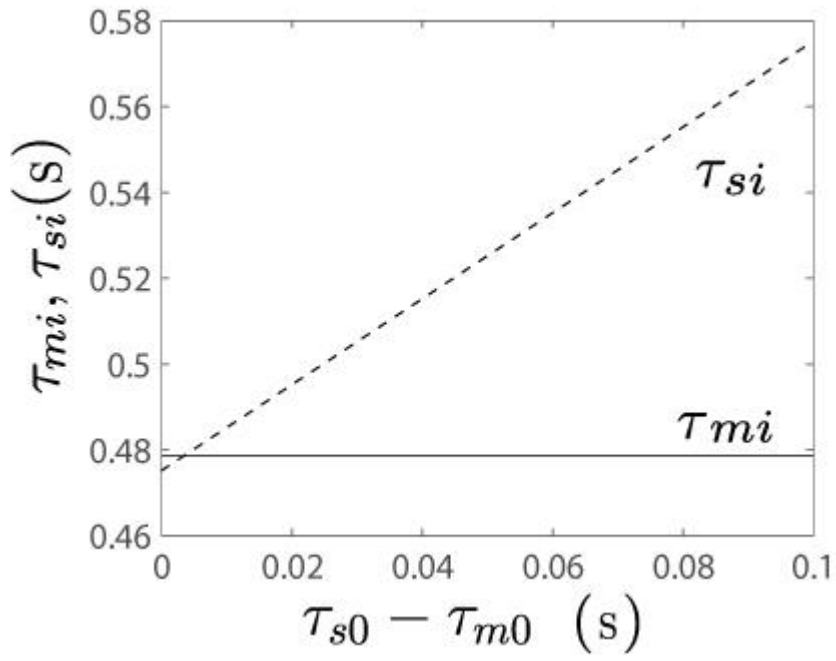


図3 近接型相似微小地震対において、発生順と入力順が逆転する場合の計算例

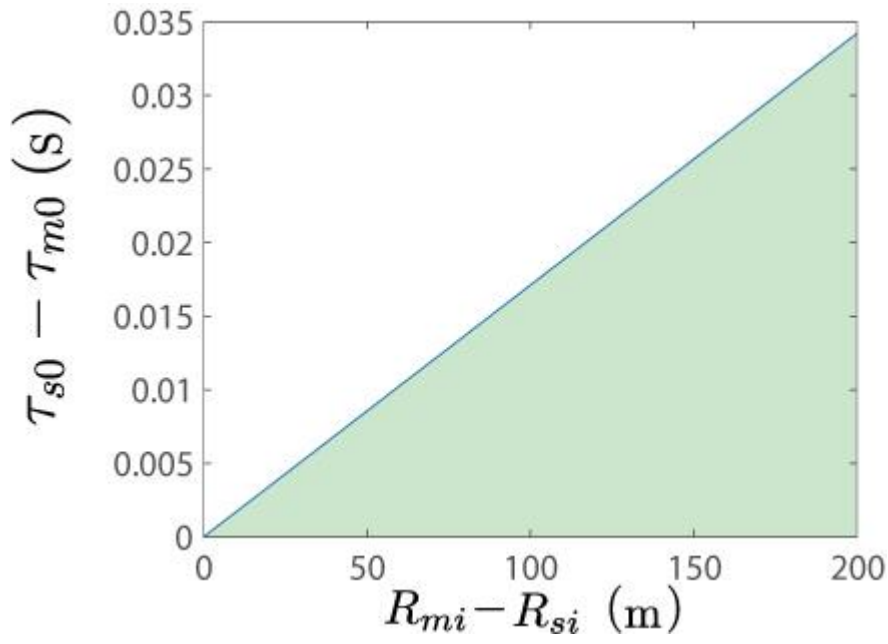


図4 近接型相似微小地震対において、発生順と入力順の関係

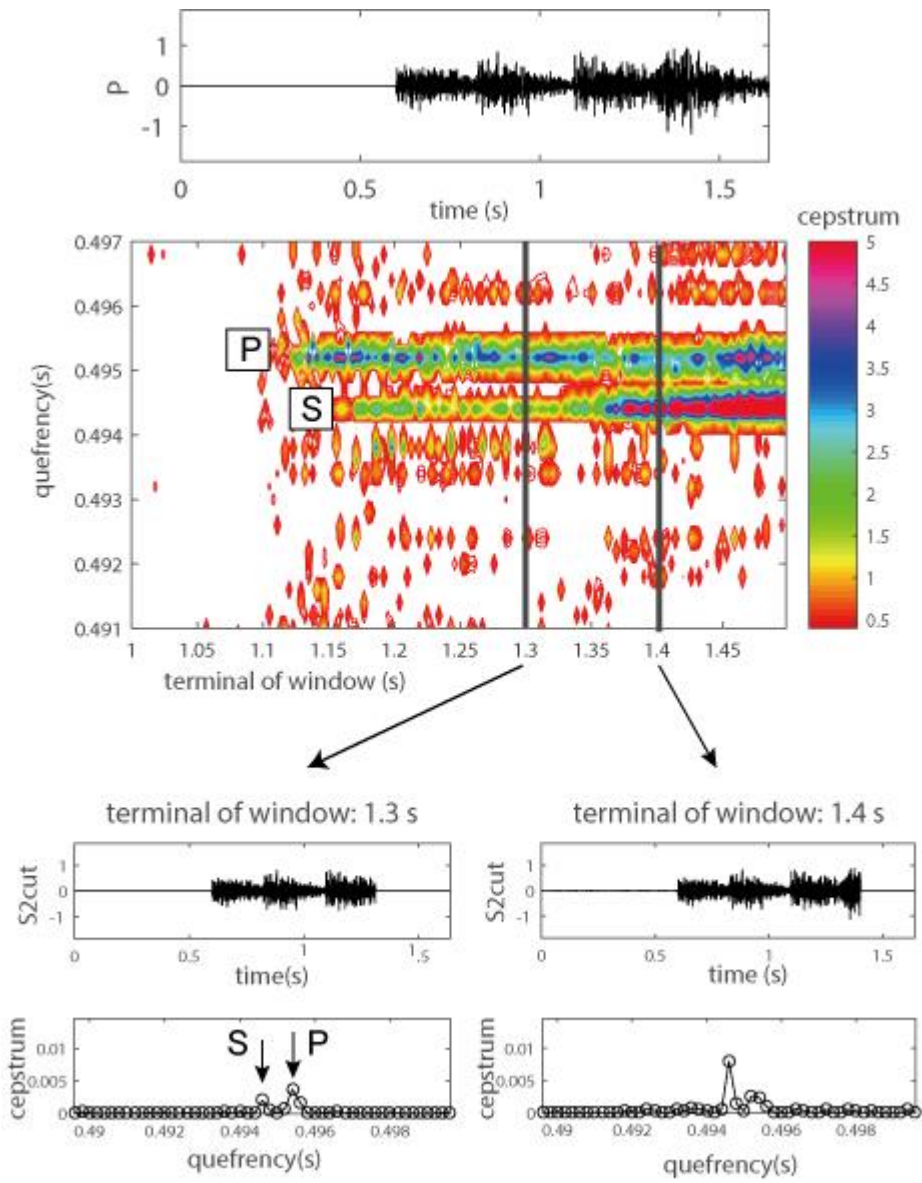


図5 時間-ケフレンシ解析の例

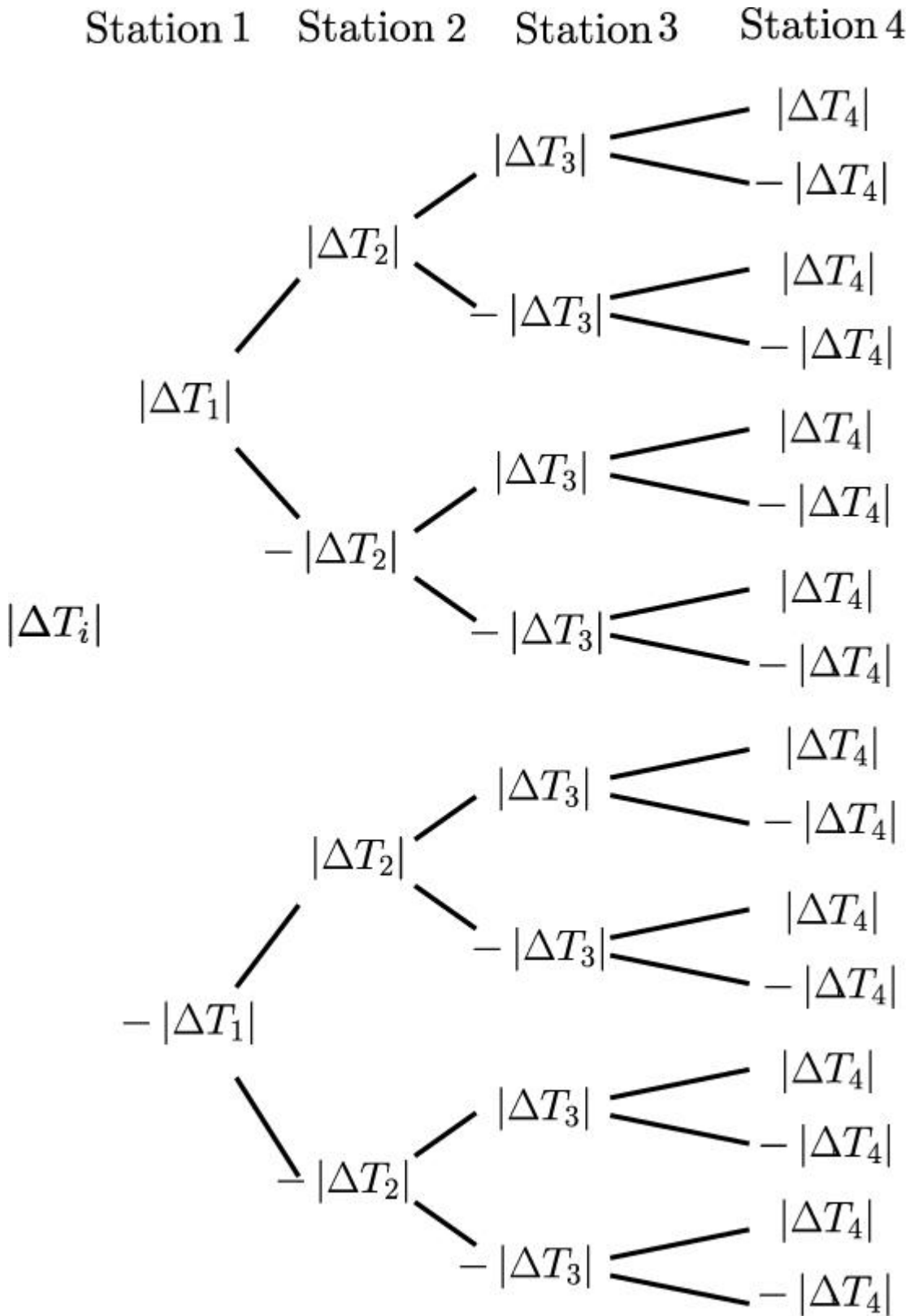


図 6 近接型相似微小地震対の相対震源座標を推定する時の場合分けの例