



室蘭工業大学

学術資源アーカイブ

Muroran Institute of Technology Academic Resources Archive



ケプストラム解析による近接型AEダブルレットの入力 時間差推定法

メタデータ	言語: jpn 出版者: 日本地熱学会 公開日: 2008-07-29 キーワード (Ja): キーワード (En): doublets/multiplets, similar earthquakes, proximity AE doublets, cepstrum, fracture 作成者: 永野, 宏治, 江原, 大輔 メールアドレス: 所属:
URL	http://hdl.handle.net/10258/413

ケプストラム解析による近接型AEダブルレットの入力 時間差推定法

その他（別言語等） のタイトル	Detection of Arrivaltime Interval in Proximity AE Doublets using Cepstrum Analysis
著者	永野 宏治, 江原 大輔
雑誌名	日本地熱学会誌
巻	30
号	1
ページ	37-47
発行年	2008
URL	http://hdl.handle.net/10258/413

doi: info:doi/10.11367/grsj1979.30.37

ケプストラム解析による近接型 AE ダブルレットの入力時間差推定法

永野宏治*・江原大輔*

(平成17年11月18日一部発表, 平成19年5月23日受付, 平成19年10月6日受理)

Detection of Arrivaltime Interval in Proximity AE Doublets using Cepstrum Analysis

Koji NAGANO* and Daisuke EHARA*

Abstract

Proximity AE doublets are introduced as a new category of AE doublets in this paper. Proximity AE doublets have a similar waveform, and they occur in a succession with a short interval. Proximity AE doublets have the second event that arrives before attenuation of the first event. Their interval is shorter than 1 s. On the other hand, interval between events of the conventional AE doublets/multiplets ranges from some seconds to some days. Because of this short interval of the proximity AE doublets, relative location between AE sources can be estimated more accurately in the proximity AE doublets analysis than in the conventional AE doublets/multiplets analysis.

This paper also describes a signal processing technique to determine intervals of P-wave and S-wave between two events of proximity AE doublets. It is difficult to estimate similarity between the two waveforms and their interval because the two events overlap each other. Cepstrum analysis is applied to estimate both the interval and the similarity. Proximity AE doublets have one or two peaks in their cepstrum, and quefrequencies of the peaks are intervals of P-wave and S-wave between the two events. Three-component AE signal is rotated in the directions of P-wave and S-wave, and data before the first S-wave arrival is replaced with zeros so that the intervals can be determined from the peaks in the cepstrum analysis. Cepstrums of these processed three-component AE signal can show intervals of P-wave and S-wave between the two events of proximity AE doublets.

Keywords: doublets/multiplets, similar earthquakes, proximity AE doublets, cepstrum, fracture.

1. はじめに

地熱貯留層を把握する計測法として、微小地震/AE (Acoustic Emission)を計測する AE 法が広く行われている。

AE 法は、遠隔計測できるため深い地熱貯留層を計測するのに有利であり、即時性にも優れている。AE 法では、AE の活性度、AE 源の分布、AE 信号の波形などの解析

* 室蘭工業大学 情報工学科 〒050-8585 北海道室蘭市水元町27-1
Department of Computer Science and Systems Engineering, Muroran Institute of Technology,
Mizumoto 27-1, Muroran, Hokkaido, 050-8585, Japan
© The Geothermal Research Society of Japan, 2008

から、地下き裂の活性度、地下き裂の位置・形、破壊モード等が推定されている。特に、AE 源の標定とその分布形状の解析は、地熱貯留層を評価するうえで基本的かつ重要な解析方法である(新妻, 1997)。

AE 源の標定方法は、大きく2つに分けられる。ひとつは、個々の AE 信号を独立に解析し、複数の観測点で検出した AE 信号の P 波到達時間差あるいは S 波到達時間差から、AE 源の絶対座標を標定する手法である。もうひとつは、波形相似な AE 信号の対やグループに着目し、その AE 源間の相対座標を推定する AE ダブルレット/マルチプレット解析である(例えば、Poupinet et al., 1984; Rubin et al., 1999; Moriya et al., 2002; Moriya et al., 2003)。この手法は地震学においては相似地震解析として使われている(宇津, 2001, p. 160)。

微小地震/AE と地震は地下の岩盤の破壊や動きに由来する点で、同じ現象である。対象とする岩盤のスケールの大小によって、微小地震/AE と地震が便宜的に使い分けられている。本論文でも、これにならない AE ダブルレット/マルチプレット解析と相似地震解析を対象に応じて表現を使い分けて述べる。

AE ダブルレットは、波形相似な AE 信号の対であり、AE マルチプレットは波形相似な AE 信号のグループである(Poupinet et al., 1996; Moriya et al., 2002)。AE ダブルレット/マルチプレットは波形が相似なため、これらの AE は極めて近い地下き裂が同じようにせん断滑りする時に発生すると考えられている。AE ダブルレット/マルチプレット解析では、クロススペクトル解析等を使い、波形間の P 波および S 波の入力時間差の微小な違いを検出して、AE 源の相対震源座標を高精度で推定する(Ito, 1985, 1990)。AE ダブルレット/マルチプレット解析で実現できる AE 源の相対座標の精度は、AE ダブルレット/マルチプレットの AE 源の絶対座標を個々に標定し、その絶対座標の差から求めた AE 源の相対座標の精度より向上する。したがって、AE 源の絶対座標の標定では分からない地下き裂の微細な構造が、AE ダブルレット/マルチプレット解析により判明している(Moriya et al., 2002; Rutledge et al., 2004)。

相似地震の波形相似性を使って、地震波の伝播経路の変化を推定する手法もある。Yamawaki et al. (2004)は、太平洋で発生した相似地震を岩手山の周辺で観測し、比較した。この解析では、相似地震がほぼ同じ震源からほぼ同じ波形で伝播する点を利用し、相似地震間の S 波の相関係数を観測点間で比較した。その結果、岩手山の斜面で観測した相似地震は S 波の相関が低く、岩手山から離れた観測点で観測した相似地震は S 波の相関が高い観測現象を示した。そして、岩手山の斜面で観測した場合において、相似地震の間で、S 波の相関が低い現象を、

岩手山の火山活動による地下の伝播媒質の変化と関係づけた。

このように、AE ダブルレット/マルチプレット解析及び相似地震解析では、波形の相似性を利用して波の微小な相違を抽出し、その相違の原因として AE 源の座標や伝播媒質の変化を推定している。しかし、AE 源の座標の相違と伝播媒質の変化は、ともに AE 信号の微小な相違の原因になる。これまでの AE ダブルレット/マルチプレット解析及び相似地震解析では、AE 源の座標と伝播媒質の変化について、一方が不変であるとした仮定のもと、他方を推定している。

これまで解析されてきた AE ダブルレット/マルチプレット及び相似地震では、その発生時間間隔は数秒から数日離れている。これらのイベントは、時間的に離れているため、別のイベントとして記録されている。そして、解析では、波形観察によって波形の相似性を確認し、P 波および S 波の到達時間差を検出して相対震源座標を標定している。

本論文では、新しい AE ダブルレットの形態である「近接型 AE ダブルレット」を提案し、その解析方法について述べる。近接型 AE ダブルレットは、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い場合の AE ダブルレットである。本論文で解析したフランス・ソルツ HDR 実験フィールドの地熱貯留層で発生した AE 信号 1 イベントの継続時間は、おおむね 0.7s であった。したがって、本論文で取り上げる近接型 AE ダブルレットを構成する AE 信号の到達時間差は、1s より短い。

近接型 AE ダブルレットの発生時間間隔は 1s 以内のため、その発生時間内に伝播経路上の媒質の変化がないと言える。したがって、近接型 AE ダブルレットの波形の変化は AE 源の座標の変化のみに由来すると考えてよい。一方、従来の AE ダブルレット/マルチプレット解析では、その発生時間間隔が数秒から数日だった。発生時間間隔が長いと、その間に伝播媒質が変化する可能性がある。AE ダブルレット/マルチプレットの AE 源の相対座標は、AE ダブルレット間の到達時間差の観測点間の相違から推定する。AE 信号の到達時間差は、弾性波の伝播速度と AE 源までの距離つまり AE 源の座標から決まるため、伝播媒質の変化は AE 源の座標の推定に影響する。近接型 AE ダブルレットの相対座標を推定する時、このような伝播媒質の変化を考える必要がない。

これまでの AE ダブルレット/マルチプレット解析では、極めて近い地下き裂が動いて、AE ダブルレット/マルチプレットが発生したと考えている。そして、AE ダブルレット/マルチプレットの相対震源座標の関係から、地下き裂のネットワーク構造や動く地下き裂を決める地殻応力が推定されている(Moriya et al., 2002; Rutledge et al., 2004)。

近接型 AE ダブルットの AE 源も従来の AE ダブルットと同じように地下き裂のネットワーク構造や地殻応力の影響を受けていると考えられる。しかも、近接型 AE ダブルットの発生時間間隔は極めて短いため、近接型 AE ダブルットの2つの AE イベントは、従来の AE ダブルットより、時間において連係の度合いが強い関係にあると考えられる。従来の AE ダブルット/マルチプレット解析は空間と震源メカニズムの2つの観点における近い関係に着目していたが、近接型 AE ダブルット解析では、空間と震源メカニズムに加え、さらに、時間の3つの観点における近い関係に着目している。

本論文では、フランス・ソルツ HDR 実験フィールドで1993年に行われた水圧破碎実験で観測した AE 波形を用いる(Jupe et al., 1994)。この水圧破碎実験では、15090個の AE イベントが位置標定された。この計測では、4つの観測点で AE を観測した。3つの観測点には3成分弾性波検出器、残りの1つの観測点にはハイドロフォンを設置した。地熱貯留層の AE 計測では、AE 信号からより多くの情報を正確に得るために AE 信号の粒子運動を計測できる3成分 AE 計測が広く行われている。観測した信号は、サンプリング周波数 5000 Hz、データ長 8192 点で離散化した。したがって、記録した1つのファイルには 1.638 s の長さで波形が記録されている。本論文では、3成分弾性波検出器で計測した3成分の AE 信号を解析の対象にする。

2. 近接型 AE ダブルット

近接型 AE ダブルットの典型的な波形を Fig. 1 に示す。同図には2つの AE 信号がある。同図では、第1の AE 信号の S 波が減衰すると、すぐに第2の AE 信号が入力している。さらに、第1の AE 信号と第2の AE 信号の波形は似ている。本論文では、入力時間差が AE 信号1イベントの継続時間程度あるいは継続時間より短い場合、

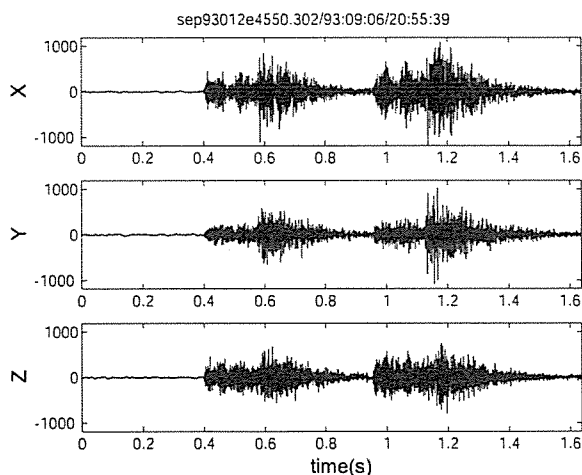


Fig. 1 Typical waveform of proximity AE doublets.

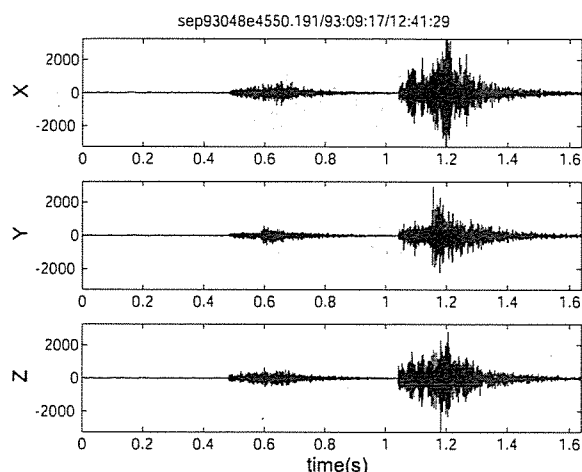


Fig. 2 AE events are observed almost simultaneously but their waveforms are not similar to each other. These AE events are not proximity AE doublets.

その AE ダブルットを近接型 AE ダブルットとする。ソルツ HDR 実験フィールドで観測した AE 信号の継続時間は約 0.7 s であった。

AE ダブルットの AE 源の相対座標は、AE ダブルットの2つの AE 信号の P 波の到達時間差あるいは S 波の到達時間差、もしくは、P 波到達時間差および S 波到達時間差の双方を観測点間で比較して推定する。これらの時間差は、AE 源座標に直接関係する伝播距離と AE の伝播速度の関数である。Fig. 1 の近接型 AE ダブルットの到達時間差は、約 0.5 s である。到達時間差が数秒から数日であった従来の AE ダブルット/マルチプレットに比べ、近接型 AE ダブルットの到達時間差が極めて短い。このように 1s 以下の短い間隔で入力する近接型 AE ダブルットでは、その2つの AE 信号が伝播してきた伝播媒質に変化がないと考えられる。したがって、AE 信号の波形の微小な相違は AE 源の座標の違いであるため、近接型 AE ダブルットでは AE 源の相対座標をより正確に推定できる。また、近い地下き裂がほぼ同時に動いて近接型 AE ダブルットが発生しているため、地下き裂の動きについての情報を近接型 AE ダブルットを解析すると得られる可能性がある。

水圧破碎実験で地下き裂を刺激する時、複数の地下き裂が注水の影響を受けるため、独立した複数の地下き裂がほぼ同時に動く場合がある。Fig. 2 に、波形は異なるが、ほぼ同時に観測された2つの AE 信号の例を示す。このように連続しているが波形が異なる AE 信号は、Fig. 1 に示した近接型 AE ダブルットとは異なるとする。したがって、Fig. 2 のように連続して入力しているが波形が異なる AE 信号を、近接型 AE ダブルットとは分ける必要がある。

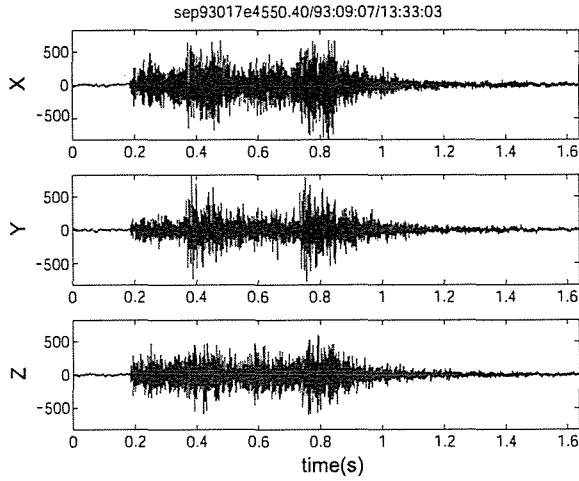


Fig. 3 Two AE events are observed. The second event arrives before attenuation of the first event. It is difficult to estimate similarity of the waveforms and to detect the arrivaltime of the second event.

Fig. 3 に示す AE 信号は、第 1 の AE 信号の S 波が単調に減衰しないで、第 1 の S 波の後再び信号が大きくなっている。これは第 1 の AE 信号が十分に減衰する前に第 2 の AE 信号が入力している場合と考えられる。このような連続信号の場合、Fig. 1 と Fig. 2 のように波形を観察・比較して、波形の相似性の有無を決めにくい。近接型 AE ダブルレットを検出するためには、Fig. 3 のような AE 信号においても、波形の相似性を評価し入力時間差を検出できることが必要である。

3. 近接型 AE ダブルレットと AE 源の相対座標

近接型 AE ダブルレットの第 1AE の AE 源を原点にし、第 1AE の AE 源からみた第 2AE の AE 源の相対座標を推定する。Fig. 4 に 2 つの AE 源とセンサの位置関係の模式図を示す。近接型 AE ダブルレットの AE 源間の相対座標

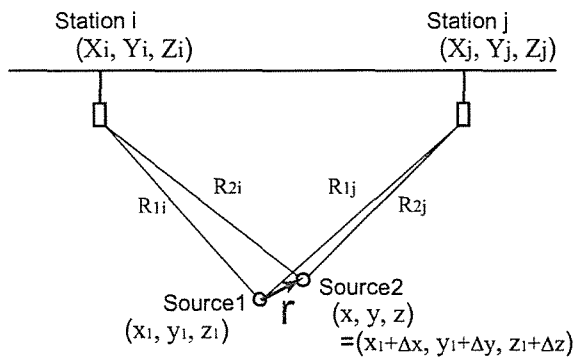


Fig. 4 Relative location r between sources of the proximity AE doublets is determined when intervals of P-wave and S-wave between the events are compared among stations.

を推定する時、地下の伝播媒質を等方均質と仮定する。第 1 の AE 源の座標を (x_1, y_1, z_1) 、観測点 i の座標を (X_i, Y_i, Z_i) とする。これらの座標は既知とする。第 1 の AE 源から観測点 i までの伝播距離 R_{1i} は、

$$R_{1i} = \sqrt{(x_1 - X_i)^2 + (y_1 - Y_i)^2 + (z_1 - Z_i)^2} \quad (1)$$

である。第 2 の AE 源の座標を (x, y, z) とする。第 2 の AE 源の座標を第 1 の AE 源からの相対座標 $(\Delta x, \Delta y, \Delta z)$ で表す。つまり、 $(x, y, z) = (x_1 + \Delta x, y_1 + \Delta y, z_1 + \Delta z)$ である。AE タブレット解析では、この相対座標 $(\Delta x, \Delta y, \Delta z)$ を推定する。第 2 の AE 源から観測点 i までの伝播距離 R_{2i} は、

$$\begin{aligned} R_{2i} &= \sqrt{(x - X_i)^2 + (y - Y_i)^2 + (z - Z_i)^2} \\ &= \sqrt{(x_1 + \Delta x - X_i)^2 + (y_1 + \Delta y - Y_i)^2 + (z_1 + \Delta z - Z_i)^2} \end{aligned} \quad (2)$$

である。

第 1AE の発生時刻を T_{01} 、第 2AE の発生時刻を T_{02} とすると、観測点 i における第 1P 波、第 2P 波、第 1S 波、第 2S 波の入力時刻 T_{P1i} 、 T_{P2i} 、 T_{S1i} 、 T_{S2i} はそれぞれ

$$T_{P1i} = \frac{R_{1i}}{V_p} + T_{01}, \quad T_{P2i} = \frac{R_{2i}}{V_p} + T_{02} \quad (3)$$

$$T_{S1i} = \frac{R_{1i}}{V_s} + T_{01}, \quad T_{S2i} = \frac{R_{2i}}{V_s} + T_{02} \quad (4)$$

である。なお、P 波伝播速度を V_p 、S 波伝播速度を V_s とする。第 1P 波と第 2P 波の到達時間差 ΔT_{Pi} と第 1S 波と第 2S 波の到達時間差 ΔT_{Si} はそれぞれ

$$\begin{aligned} \Delta T_{Pi} &= T_{P2i} - T_{P1i} \\ &= \frac{R_{2i} - R_{1i}}{V_p} + T_{02} - T_{01}, \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \Delta T_{Si} &= T_{S2i} - T_{S1i} \\ &= \frac{R_{2i} - R_{1i}}{V_s} + T_{02} - T_{01} \end{aligned} \quad (6)$$

である。

近接型 AE ダブルレット解析では、第 1P 波と第 2P 波の到達時間差 ΔT_{Pi} と第 1S 波と第 2S 波の到達時間差 ΔT_{Si} を複数の観測点で検出できると、式(5)および式(6)を 4 つ以上連立させて、第 2 の AE 源の相対座標 $(\Delta x, \Delta y, \Delta z)$ と発生時間差 $T_{02} - T_{01}$ を推定できる。

従来の AE ダブルレット/マルチプレット解析では、AE 信号が複数のデータファイルに分かれて記録されている。

そこで、従来の AE ダブルレット/マルチプレット解析では、観測点 i と観測点 j の間で、第 1P 波と第 2P 波の到達時間差を比較した $\Delta\tau_{ij} = \Delta T_{P_i} - \Delta T_{P_j}$ から、AE 源の相対座標を推定している(Ito, 1985)。なお、この場合、AE の発生時間差 $T_{02} - T_{01}$ は推定できない。

4. 到着時間差の検出

4-1) ケプストラムの特徴

近接型 AE ダブルレットの P 波到達時間差と S 波到達時間差を推定するために、ケプストラム解析を使う。ケプストラムは、信号の対数パワースペクトルのフーリエ逆変換である(城戸, 1985, pp.152-156)。そして、ケプストラムは時間の次元をもつケフレンシの関数である。信号 $x(t)$ に波形相似でかつ時間差 T 遅れて入力した信号を $rx(t-T)$ とする。 r は信号の大きさの違いを表す。信号 $x(t)$ と遅れて入力した信号 $rx(t-T)$ が混ざった信号 $z(t) = x(t) + rx(t-T)$ のケプストラムは、ケフレンシ T に鋭いピークをもつ。

近接型 AE ダブルレットの第 1P 波を $x_p(t)$ 、第 1S 波を $x_s(t)$ 、第 2P 波を $rx_p(t - \Delta T_p)$ 、第 2S 波を $rx_s(t - \Delta T_s)$ とする。 ΔT_p は第 1AE と第 2AE の発生時間差と伝播時間に起因する P 波の到達時間差、 ΔT_s は第 1AE と第 2AE の発生時間差と伝播時間に起因する S 波の到達時間差である。観測信号 $y(t)$ は

$$y(t) = x_p(t) + x_s(t) + rx_p(t - \Delta T_p) + rx_s(t - \Delta T_s) \quad (7)$$

になる。 $y(t)$ の対数パワースペクトルは

$$\begin{aligned} \log|Y(f)|^2 = & \log \left[|X_p(f)|^2 \{1 + r^2 + 2r \cos(2\pi f \Delta T_p)\} \right. \\ & + |X_s(f)|^2 \{1 + r^2 + 2r \cos(2\pi f \Delta T_s)\} \\ & + 2|X_p(f)||X_s(f)|r \cos(\theta_p - \theta_s - 2\pi f \Delta T_p) \\ & + 2|X_p(f)||X_s(f)|r \cos(\theta_p - \theta_s - 2\pi f \Delta T_s) \\ & + 2|X_p(f)||X_s(f)|r^2 \cos\{\theta_p - \theta_s - 2\pi f(\Delta T_p - \Delta T_s)\} \\ & \left. + 2|X_p(f)||X_s(f)|\cos(\theta_p - \theta_s) \right] \quad (8) \end{aligned}$$

である。なお、 $X_p(f) = |X_p(f)| \exp(j\theta_p)$ 、 $X_s(f) = |X_s(f)| \exp(j\theta_s)$ とする。 $y(t)$ のケプストラムは、式(8)のフーリエ逆変換である。式(8)には、周波数 f 対して ΔT_p と ΔT_s の周期性を表す項があるため、 $y(t)$ のケプストラムはケフレンシ ΔT_p 、 ΔT_s にピークをもつと考えられる。しかし、式(8)には、右辺第 1 項、第 2 項にある P 波の ΔT_p と $|X_p(f)|$ のみ、S 波の ΔT_s と $|X_s(f)|$ のみ

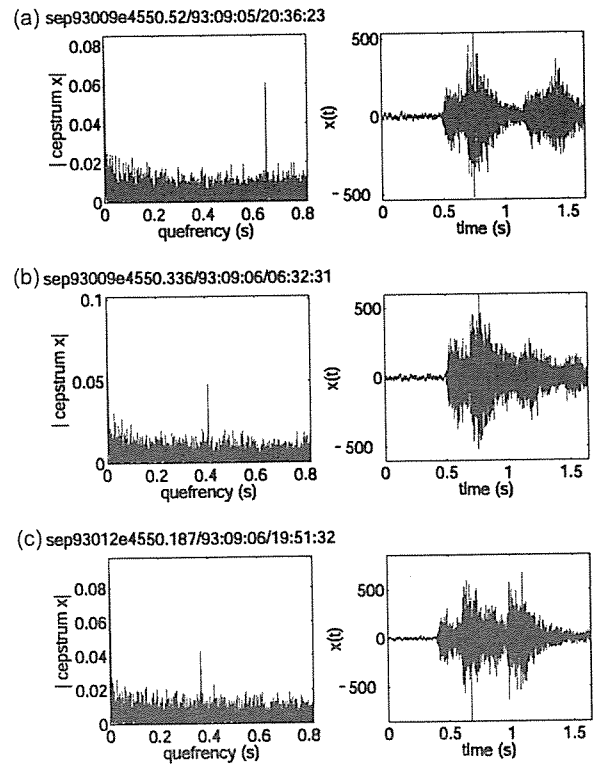


Fig. 5 There is a line in cepstrum of proximity AE doublets. Quefrequency of the line in the cepstrum indicates interval between events.

で決まるオート項の他に、右辺第 3 項、第 4 項のように P 波の $|X_p(f)|$ と S 波の $|X_s(f)|$ が交差するクロス項がある。しかもそれらの和を非線形に対数変換するため、 $y(t)$ のケプストラムは ΔT_p と ΔT_s の成分が複雑に関係する。つまり、 $|X_p(f)|$ がケフレンシ ΔT_p のピークの高さだけでなく、ケフレンシ ΔT_s のピークの高さにも影響する。しかも、その影響の大きさが対数関係である。

Fig. 5 に明確な線ケプストラムがある AE 信号を示す。同図(a)の 2 つの AE 信号の波形には相似性が認められる。そして、同図(a)では、線ケプストラムがあるケフレンシは、波形で読み取れる 2 つの AE 信号の到達時間差に対応している。図(a)の 2 つの AE 信号は近接型 AE ダブルレットである。同図(b)(c)の波形では 2 つの AE 信号の重なりが大きいため、波形の相似性は波形の一部のみで判断せざるをえない。同図(b)(c)の波形の一部を観察すると、連続して入力した AE 信号の波形に相似性が認められる。さらに、同図(b)(c)で明確な線ケプストラムがみられ、そのケフレンシが波形から推定する到達時間差にほぼ等しい。したがって、同図(b)(c)の連続して入力した AE 信号も近接型 AE ダブルレットであると推定できる。

Fig. 5 とは別の連続して入力した 2 つの AE 信号とそのケプストラムの例を Fig. 6 に示す。同図では連続して入

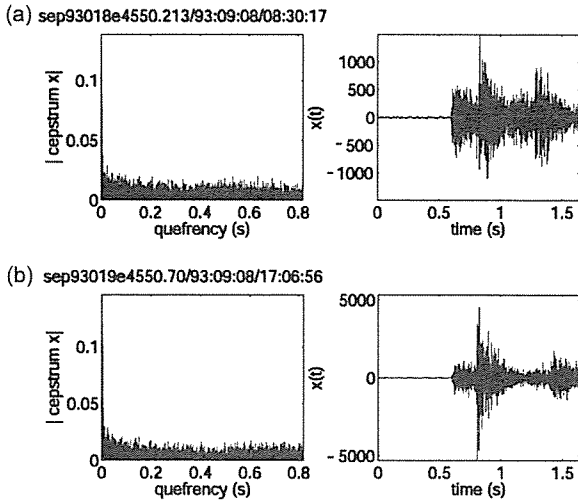


Fig. 6 When two AE events that are independent to each other are observed, there is no line in the cepstrum. Therefore, we can discriminate the proximity AE doublets from such independent events.

力した2つのAE信号の波形は相似していない。したがって、そのケプストラムにも特徴的な線ケプストラムはみられない。

Fig. 5とFig. 6ではケフレンシ0s~10msでケプストラムが大きな値になっている。この0ケフレンシ付近の特徴はAE信号に共通してみられる。AE信号自体がもつケプストラムのピークと近接型AEダブルットの到達時間差によるケプストラムのピークを区別する必要がある。したがって、近接型AEダブルットの到達時間差を検出できる最小値は10ms以上と考えられる。

このように、ケプストラム解析は、Fig. 5のような近接型AEダブルットと、Fig. 6のように偶然に連続して入力した独立な2つのAE信号を区別するのに有効であ

る。さらに、特徴的な線ケプストラムのケフレンシにより、近接型AEダブルットの到達時間差を検出できる。

Fig. 7に近接型AEダブルットとそのケプストラムを示す。同図は3成分AE計測で計測した3成分のAE信号である。同図のケプストラムは、Fig. 5に示したケプストラムよりケフレンシを拡大して表示している。同図(a)のAE信号は、第1のS波が減衰している時に第2のAE信号が入力している。第1のAEのS波と第2のAEのP波が重なっているため、同図(a)のP波の到達時間差を決めにくい。同図(a)の信号が特徴的に大きくなるS波の部分を観察すると、2つの信号の到達時間差が約0.3sと推定できる。一方、同図(b)のケプストラムには0.3s付近に、2つの明確なピークがある。この2つのピークは、式(8)に示したP波の到達時間差 ΔT_{Pi} とS波の到達時間差 ΔT_{Si} に対応している。しかし、同図(b)のケプストラムだけでは、2つのピークがP波とS波のどちらの到達時間差に対応しているかは判断しにくい。

Fig. 8に幅の広い線状ケプストラムの例を示す。式(5)と式(6)によれば、第1AEの伝播距離 R_{1i} と第2AEの伝播距離 R_{2i} の違いが小さい場合、P波の到達時間差 ΔT_{Pi} とS波の到達時間差 ΔT_{Si} の違いが小さくなる。そのように ΔT_{Pi} と ΔT_{Si} が近い場合、2本の線ケプストラムが十分に分離しないため、幅の広い線状ケプストラムになる。

Fig. 8のように、P波の到達時間差とS波の到達時間差を表している幅の広い1本の線状ケプストラムがある場合、その線状ケプストラムの幅から、近接型AEダブルットのAE源の相対座標を推定できる。観測点*i*におけるP波の到達時間差 ΔT_{Pi} とS波の到達時間差 ΔT_{Si} の差と、AEの伝播距離 R_{2i} は、式(5)と式(6)より

$$\Delta T_{Pi} - \Delta T_{Si} = \frac{R_{2i} - R_{1i}}{V_P} - \frac{R_{2i} - R_{1i}}{V_S}$$

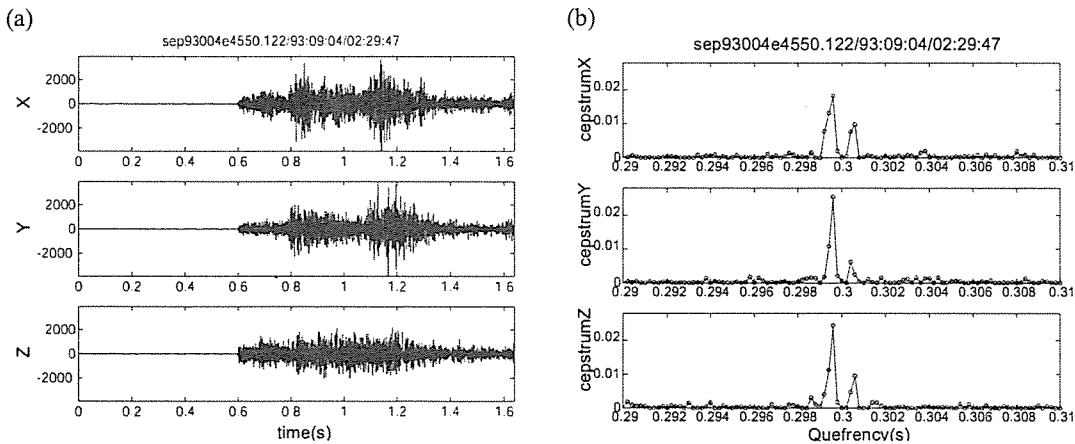


Fig. 7 There are two peaks in the cepstrum of proximity AE doublets when AE sources are separated to each other. These peaks show the intervals of P-wave and S-wave between two events. Resolution of quefrequency in this figure is more fine than that in Fig. 5.

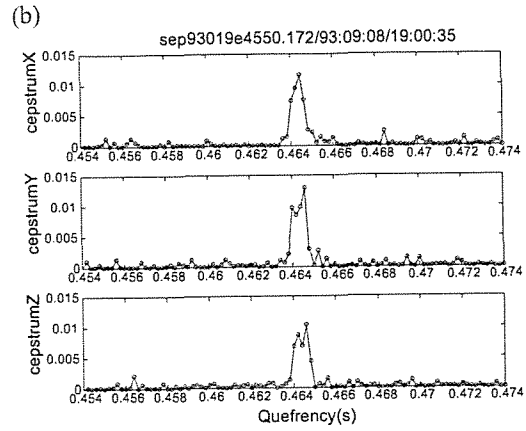
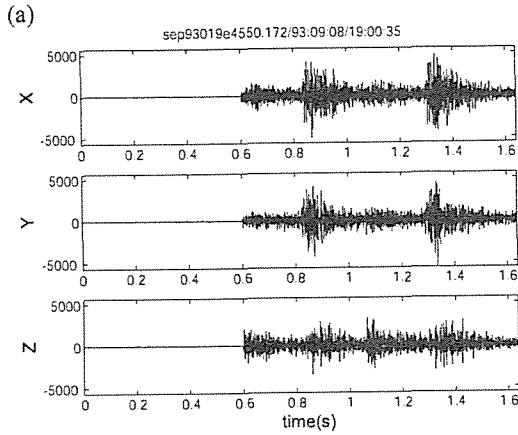


Fig. 8 When interval of P-wave is close to that of S-wave in the proximity AE doublets, the cepstrum shows a broad peak.

$$= (R_{1i} - R_{2i}) \left(\frac{V_p - V_s}{V_p V_s} \right) \quad (9)$$

で関係づけられる。式(9)によれば、P波とS波の伝播速度 V_p, V_s は定数だから、 R_{1i} と R_{2i} の長さの違いによって ΔT_{Pi} と ΔT_{Si} の大小関係が決まる。しかし、 R_{2i} は未知のため、 ΔT_{Pi} と ΔT_{Si} の大小関係は決められず、その差の絶対値 $|\Delta T_{Pi} - \Delta T_{Si}|$ だけがケプストラムのピークの幅から検出できる。この場合、式(9)は、

$$|\Delta T_{Pi} - \Delta T_{Si}| = |R_{1i} - R_{2i}| \left(\frac{V_p - V_s}{V_p V_s} \right) \quad (10)$$

になる。この式(10)と式(5)、式(6)を複数の観測点で連立

して、近接型 AE ダブルットの AE 源の相対座標を推定できる。ただし、式(10)を使う場合、推定できる相対座標の解には、第1の AE 源を中心にして互いに逆方向を向いた2つがある。

Fig. 9 に鋭い1本の線ケプストラムの例を示す。離散化した AE 信号をケプストラム解析する場合、ケフレンシの分解能は AE 信号を離散化する時のサンプリング周期である。 ΔT_{Pi} と ΔT_{Si} の差がサンプリング周期より短い時、 ΔT_{Pi} の線ケプストラムと ΔT_{Si} の線ケプストラムが一致して鋭い一本の線ケプストラムになると考えられる。この場合、相対震源標定の計算では、第1AEのAE源までの距離 R_{1i} と第2AEのAE源までの距離 R_{2i} が等しくなるため、AE ダブルットの相対震源座標は推定できない。

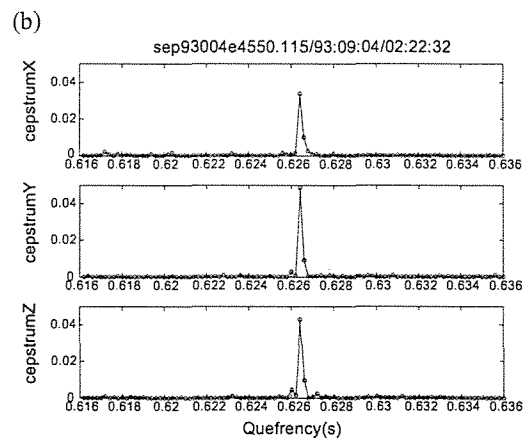
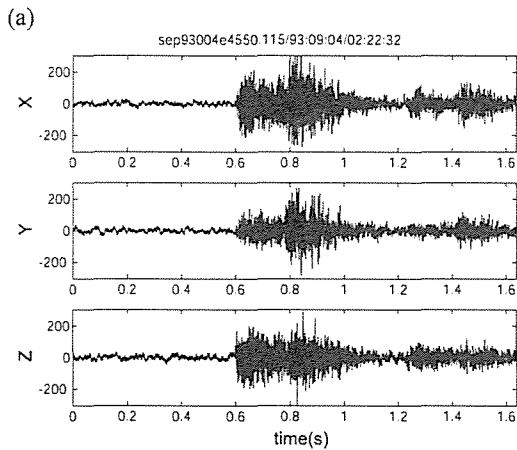


Fig. 9 The cepstrum shows a sharp peak. When difference between P-wave interval and S-wave interval is smaller than a sampling period, there is a sharp peak in the cepstrum of the proximity AE doublets. We cannot estimate relative location from such single peak in the cepstrum.

4-2) シミュレーション

Fig. 7に示した近接型 AE ダブルレットでは、2本の線ケプストラムとP波の到達時間差およびS波の到達時間差の対応が決められないため、AE源の相対座標を推定できない。式(8)のように近接型 AE ダブルレットのケプストラムは、P波とS波のスペクトルのクロス項が複数混在するとともに、パワースペクトルを非線形に対数変換するため、P波の到達時間差およびS波の入力時間差を式(8)から直接推定しにくい。そこで、近接型 AE ダブルレットのケプストラム解析についてシミュレーション実験を行い、近接型 AE ダブルレットのケプストラムの特徴を検討する。

Fig. 10にシミュレーション実験に使った模擬信号を示す。このシミュレーション実験では、正規乱数に減衰する指数関数をかけた信号によりAE信号のP波とS波を模擬している。この模擬信号はサンプリング周波数5000 Hzで離散化した信号とする。同図(a)では、第1のP波が入力した後、0.4000 s後に第1のP波と波形相似な第2のP波が入力している。同図(b)は、同様に第1のS波とそれに波形相似な第2のS波である。第1のS波と第2のS波の到達時間差は0.4004 sとしている。この入力時間差の差はサンプリング周波数を5000 Hzとしたデジタル信号において2点の違いに相当する。実際に観測されるAE信号では、一般にP波はS波より小さいため、シミュレーション実験でも、同図(b)のS波の瞬時値の標準偏差は同図(a)のP波の瞬時値の標準偏差の1.5倍に設定している。また、第2のAE信号の瞬時値の標準偏差は第1のAE信号の瞬時値の標準偏差の1.2倍に設定している。信号の全区間には、同図(c)のように正規乱数を雑音として加えている。このシミュレーション実験で

は、同図(d)のように、第1のS波が入力した時刻より前の信号の大きさを0にした信号も準備する。これは、P波に対応する線ケプストラムを決められるようにするためである。

Fig. 10(e)は同図(c)のケプストラムである。同図(e)のケプストラムでは、0.4000 sと0.4004 sのケプレシに鋭い明確なピークがある。これらは、それぞれ設定したP波の到達時間差とS波の到達時間差に対応している。また、同図(c)では、P波はS波より小さい。この信号の大きさの大小関係が同図(e)のケプストラムのピークの高さにも成立している。しかし、ケプストラムのピークの高さと信号の大きさを定量的に関係づけることは困難である。

Fig. 10(d)に示した第1のS波の前を0にした信号のケプストラムは同図(f)である。設定したP波の到達時間差とS波の到達時間差のケプレシに鋭いピークがある。ただし、第1S波の前にあるP波の一部分を0に置き換えているため、P波の到達時間差に対応するケプストラムのピークが同図(e)に比べて小さくなっている。

近接型 AE ダブルレットのケプストラムにおいて、P波とS波の到達時間差に対応する2つのピークがある場合、このシミュレーション実験の結果に見られるように、ケプストラムのピークの高さと信号の大きさの関係に着目すると、そのケプストラムのピークが対応する波を特定できる。さらに、第1のS波が入力する前にあるP波を0に置き換えた信号のケプストラムは、0に置き換える前に比べて、P波に対応するケプストラムのピークの高さが小さくなる。この性質も、ケプストラムのピークに対応する波を特定する観点になる。

4-3) 3成分 AE 信号のケプストラム解析

前節で述べた近接型 AE ダブルレットのケプストラム解

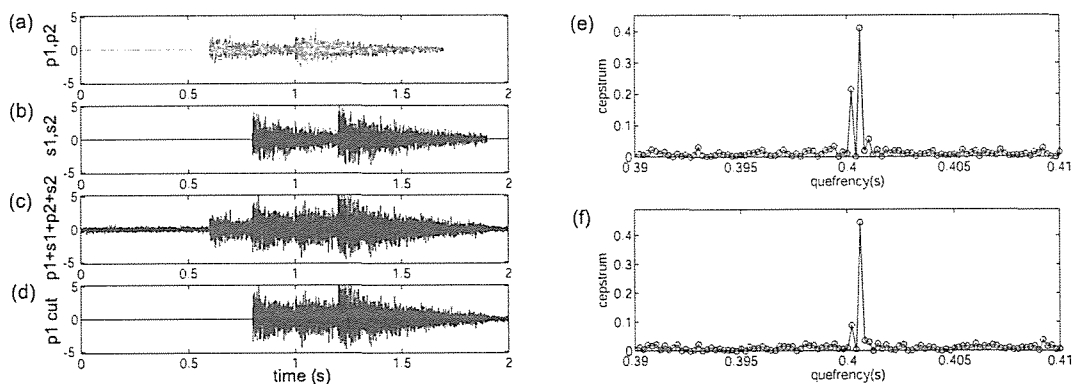


Fig. 10 Computer simulation of cepstrum analysis for proximity AE doublets. Synthesized signal is used to examine properties of cepstrum. The synthesized signal is made from Gaussian random variables and its envelope is an exponential decay function. Because P-wave shown in (a) is smaller than S-wave shown in (b), a peak of P-wave at the quefrequency of 0.4000 s is lower than that of S-wave at the quefrequency of 0.4004 s in (e). Data before arrival of the first S-wave is replaced with zeros in (d). A cepstrum of the zero-replaced data shown in (d) is represented in (f). The peak that indicates the interval of P-wave in (f) is lower than that in (e).

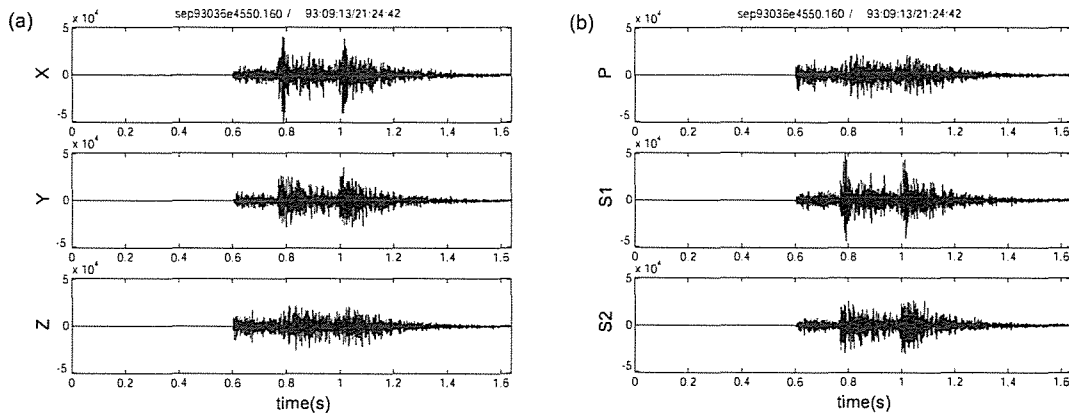


Fig. 11 Three-component AE signal is rotated to directions of P- and S-waves. *P* is the signal in the direction of P-wave oscillation. The rotated signal that has the maximum variance on a S-wave plane is *S1*.

析のシミュレーションによれば、P波とS波の大きさの違いが、ケプストラムのピークの高さの違いと整合していた。そこで、P波とS波の大きさの違いをより明確にするため、直交する3軸方向で計測した3成分のAE信号を、P波の振動方向とそれに垂直なS波の振動方向に座標回転する。P波の振動方向を本論文では*P*軸とする。*P*軸の方向は第1のS波が入力する前において第1のP波の信号の分散が最大になる方向にとる (Montalbetti and Kanasewich, 1970)。ケプストラム解析するS波の振動方向は、P波の振動方向に垂直な面内で、第2のP波が入力する前に第1のS波が入力している時間帯の信号の分散が最大になる方向とする。このS波の振動方向を本論文では*S1*軸とし、*S1*軸と*P*軸に垂直な方向を*S2*軸とする。第1のS波と第2のP波が重なっている場合、第1のS波が最大になる時刻と第2のS波が最大になる時刻の間隔に基づいて、第1のP波の入力時刻から第2のP波の入力時刻を推定し、*S1*軸を導出する。

Fig. 11に観測した3成分信号と座標回転で得た*P1*–*S1*–*S2*軸の信号の典型的な例を示す。*P*軸の信号では、第1のP波の大きさが他の方向の信号に比べて大きくなっている。*S1*軸の信号は、第1のP波が小さくなり、第1のS波が大きくなって、P波とS波の大きさのコントラストが明確になっている。このような*S1*軸と*P*軸の信号のケプストラムからP波とS波の到達時間差に対応するケプストラムのピークを特定する。

Fig. 12(a)(c)に*P*軸と*S1*軸と近接型AEダブルットの信号とそのケプストラムを示す。この近接型AEダブルットのケプストラムは、2つのピークが現われている。また、同図(b)(d)は、*P*軸と*S1*軸の信号において、第1のS波が入力する前の信号を0にした場合の波形とそのケプストラムである。同図(c)に示した*S1*軸の信号では、P波の大きさがS波の大きさより小さい。したがって、その

ケプストラムの2つのピークのうち、短いケフレンシにある高さが低いピークがP波に対応していると考えられる。この信号の大きさとケプストラムのピークの高さの関係は同図(a)の*P*軸の信号にも成立している。さらに、同図(d)に示した第1のS波が入力する前を0に置き換えた信号のケプストラムでは、同図(c)でP波に対応としたピークが小さくなっている。同図(b)のケプストラムのピークにおいても、第1のS波が入力する前を0に置き換えた効果が、確認できる。以上の近接型AEダブルットの波形の特徴とケプストラムの特徴の解析により、P波の到達時間差とS波の到達時間差に対応する線ケプストラムのケフレンシが決定できる。Fig. 12のように、

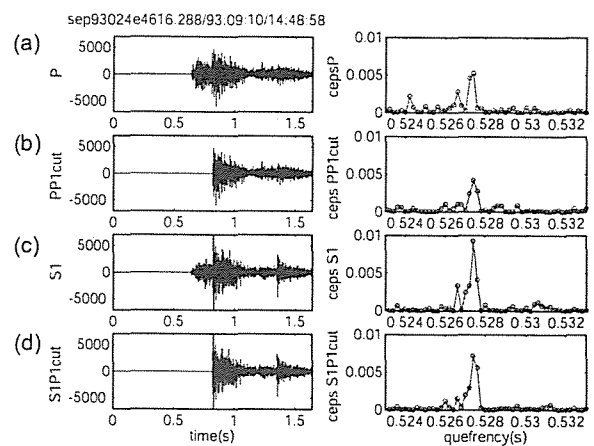


Fig. 12 The signals rotated in *P* and *S1* directions, which are shown in (a) and (c), are analyzed in their cepstrums so that the intervals in the proximity AE doublets can be detected. The signals that have replaced with zeros before the first S-wave arrival are also analyzed in (b) and (d).

2つの線ケプストラムが現われる場合、近接型 AE ダブルレットの到達時間差の検出精度は、5000 Hz でサンプリングした信号の3点に相当し、0.6 ms であった。

このように3成分信号で、近接型 AE ダブルレットのケプストラムを解析すると、近接型 AE ダブルレットのP波の到達時間差とS波の到達時間差を検出できる。この入力時間差を使って、式(5)および式(6)を連立して解くと近接型 AE ダブルレットのAE源の相対座標を推定できる。

近接型 AE ダブルレットのケプストラムは、式(8)に示したように、P波とS波のスペクトルが複雑に関係している。式(8)の右辺にある対数演算内の第3項のようにS波の振幅スペクトル $|X_s(f)|$ はP波の到達時間差 ΔT_p の周期項にも関係している。また、P波の振幅スペクトル $|X_p(f)|$ は、同じ第4項においてS波の到達時間差 ΔT_s の周期項に関係している。近接型 AE ダブルレットのケプストラムには、このようなクロス項がある。Fig. 12(a)と(b)、(c)と(d)を比較すると、このようなクロス項の効果によると考えられるケプストラムの変化を確認できる。たとえば、同図(b)と(d)のケプストラムにおいて、第1のS波の前を0に置き換えた場合、P波に対応するピークの高さが低下するだけでなく、S波に対応するピークの高さも変化している点が、クロス項の影響と考えられる。

5. 結論

本論文では、新しいAEダブルレットの形態である近接型AEダブルレットを提案した。そして、近接型AEダブルレットにある2つのAE信号間のP波の到達時間差とS波の入力時間差を推定する信号処理法を述べた。この到達時間差を検出することにより、近接型AEダブルレットの2つのAE源間の相対座標を決定できる。近接型AEダブルレットのAE源の標定では伝播媒質に変化がないため、従来のAEダブルレット/マルチプレット解析より、近接型AEダブルレット解析はAE源の相対座標を正確に決定できる。

近接型AEダブルレットの到達時間差の決定するには、ケプストラム解析が有効である。しかし、近接型AEダブルレットのケプストラムには、P波の到達時間差とS波の到達時間差に対応する2つの線ケプストラムが現われる課題があった。

本論文で述べた近接型AEダブルレットの到達時間差を検出する信号処理法は、AEの3次元粒子運動を表す3成分信号を解析対象にしている。3成分信号を座標回転し、P波が振動するP軸方向とS波の分散が大きいS1軸方向の信号をケプストラム解析する。さらに、第1のS波の前の信号を0に置き換えた信号を作成し、そのケプストラムも解析する。これらの波形の大きさとそれ

ぞれのケプストラムにみられるピークの高さを比較すると、P波とS波に対応するピークを特定でき、そのケプレンシから到達時間差を決定できる。このケプストラム解析による近接型AEダブルレットの到達時間差の検出精度は、サンプリング周波数5000 HzのAE信号において0.6 msであった。

本論文では、ソルツHDR実験フィールドで1993年に行われた水圧破碎実験で観測したAE波形について、近接型AEダブルレットを調べた。そして、実際の近接型AEダブルレットの解析を行い、ケプストラムを用いた到達時間差の検出能力について検討した。今後、本論文で述べた手法により、近接型AEダブルレットのAE源の相対座標を標定する予定である。そして、同フィールドで観測した従来のAEダブルレット/マルチプレットのAE源の相対座標の分布と近接型AEダブルレットのそれを比較・解析する。この解析により、地下き裂の微細な構造および動的な挙動の特徴を検討する予定である。

謝辞

本研究は、NEDO国際共同研究MTC/MURPHYプロジェクトおよび文部科学省科学研究費補助金「近接型AEダブルレット解析による地下き裂の動きの推定法(課題番号17560719)」により実施された。関係各位に感謝する。また、2名の匿名の査読者には本論文について有意義な助言をいただきました。ここに記して感謝の意を表します。

引用文献

- Ito, A. (1985) High resolution relative hypocenters of similar earthquakes by cross-spectral analysis method, *J. Phys. Earth*, **33**, 279-294.
- Ito, A. (1990) Earthquake swarm activity revealed from high-resolution relative hypocenters - clustering of microearthquakes, *Tectonophysics*, **175**, 47-66.
- Jupe, A., Jones, R. H., Willis-Richards, J., Dyer B., Nicholls, J., and Jacques, P. (1994) Report on HDR Phase 4 - Soultz Experimental Programme 1993/1994, CSM Associates Ltd., IR02-12.
- 城戸健一 (1985) デジタル信号処理入門, 丸善, 223p.
- Montalbetti, J.F. and Kanasevich, E.R. (1970) Enhancement of teleseismic body phases with a polarization filter, *Geophys. J. R. astr. Soc.*, **21**, 119-129.
- Moriya, H., Nakazato, K., Niitsuma, H., and Baria, R. (2002) Detailed fracture system of the Soultz-sous-Forêts HDR field evaluated using microseismic multiplet analysis, *Pure Appl. Geophys.*, **159**, 517-541. è
- Moriya, H., Niitsuma, H., and Baria, R. (2003) Multiplet-clustering

- analysis for estimation of fine detail structures in seismic cloud, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **93**, 1606-1620.
- 新妻弘明 (1997) A E・微小地震解析による地熱貯留層キャラクターゼーション, *資源と素材*, **113**, 301-307.
- Poupinet, G., Ellsworth, W. L., and Frechet, J. (1984) Monitoring velocity variations in the crust using earthquake doublets: An application to the Calaveras Fault, California, *J. Geophys. Res.* **89**, 5719-5731.
- Poupinet, G., Ratdomopurbo, A., and Coutant, O. (1996) On the use of earthquake multiplets to study fractures and the temporal evolution of an active volcano, *Ann. Geofis.*, **39**, 253-264.
- Rubin, A. M., Gillard, D., and J. Got (1999) Streaks of microearthquakes along creeping faults, *Nature*, **400**, 635-641.
- Rutledge, J. T., Phillips, W. S., and Mayerhofer, M. J. (2004) Faulting induced by forced fluid injection and fluid flow forced by faulting: An interpretation of hydraulic-fracture microseismicity, Carthage Cotton Valley gas field, Texas, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **94**, 1817-1830.
- 宇津徳治(2001)地震学 第3版, 共立出版, 376p.
- Yamawaki, T., Nishimura, T., and Hamaguchi, H. (2004) Temporal change of seismic structure around Iwate volcano inferred from waveform correlation analysis of similar earthquakes, *Geophys. Res. Lett.*, **31**, L24616, doi:10.1029/2004GL021103.