

機関番号：10103

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2008～2010

課題番号：20560753

研究課題名(和文)

近接型AEダブルット解析による地下き裂システムの連係進展過程評価法の開発

研究課題名(英文) Estimation of dynamics in a subsurface fracture reservoir by means of proximity microseismic doublets analysis

研究代表者

永野 宏治 (NAGANO KOJI)

室蘭工業大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号：90212109

研究成果の概要(和文)：

近接型AEダブルットは、波形相似なAE信号(Acoustic Emission)が1s程度の短い時間差で入力する現象である。近接型AEダブルットの進展ベクトルの標定は、伝播媒質に変化がないため正確である。近接型AEダブルットの進展ベクトルを使って地熱貯留層の動きを推定するために、本研究では、新たには時間-ケフレンシ解析および時間-ケフレンシ解析へのMUSIC法の応用等の信号処理法を考案し、それを使って実データを解析、さらに、表示システムの開発を行った。

研究成果の概要(英文)：

Proximity microseismic doublets are similar microseismic events that occur with overlapping waveforms. Analysis of such similar, overlapping microseismic events can provide precise relative source locations of those events because their relative location is not affected by change of velocity structure. I developed time-quefreny analysis that can detect precise interval between P-waves. MUSIC analysis is applied to detect their interval. MUSIC analysis provides interval between proximity similar events in high resolution.

I analyzed proximity microseismic doublets that were measured during a hydraulic fracturing at the Soultz hot dry rock field. I located nine proximity microseismic doublets. I determined relative location between their sources of the proximity microseismic doublets.

A multiple interface visualization system for hypocenters and relative locations of AE sources are developed. The visualization system shows simultaneously the whole image of the reservoir and fine structures between AE sources so that we can analyze characteristic properties of the geothermal reservoir.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	900,000	270,000	1,170,000
2009年度	900,000	270,000	1,170,000
2010年度	900,000	270,000	1,170,000
年度			
年度			
総計	2,700,000	810,000	3,510,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：総合工学・地球・資源システム工学

キーワード：再生可能資源，エネルギー，地熱エネルギー，地下計測

## 1. 研究開始当初の背景

地下き裂進展時に発生する波形のよく似た AE(微小地震)は AE ダブルレット/マルチプレットと呼ばれている。AE ダブルレット/マルチプレット解析は、数 km 離れた震源の相対的な位置関係を数 m の精度で推定できる。

しかし、AE ダブルレット/マルチプレット解析は伝播媒質の変化と震源座標の変化を合わせて解析するため、相対震源座標の正確さに限界があった。本研究は、この AE ダブルレット/マルチプレット解析を改良した近接型 AE ダブルレット解析を主な解析手段にする。

近接型 AE ダブルレットは、発生時間間隔が 1 秒以内の AE ダブルレットである。近接型 AE ダブルレットでは伝播媒質の変化がないため、相対震源座標つまり進展ベクトルを正確に標定できる。しかも、近接型 AE ダブルレットの震源は、時間・空間・進展メカニズムの 3 点で極めて相互関係が強い。近接型 AE ダブルレットの進展ベクトルを解析すると、連係して動く地下き裂の特徴を明らかにできると考えられた。

地球環境の保全とエネルギー安全保障から、石油への依存度の抑制と再生可能エネルギーの利用拡大は緊急かつ切実な課題である。地熱エネルギーは他の再生可能エネルギーに比べて、安定した高い出力が優れた特徴である。したがって、地熱エネルギーは今後地域の需要に適應した分散型エネルギーシステムの重要な要素になる。その時、経済性を確保するには、地熱貯留層の開発・維持技術の高度化による開発リスクの低減が必要である。近接型 AE ダブルレット解析は、地熱貯留層の理解と利用に不可欠だが、今までなしえなかった地下き裂システムの連係性を明らかにし、卓越して水が通る地下き裂の評価に新たな道を拓く可能性があった。

近接型 AE ダブルレット解析に着目した研究は、本研究の申請者により国内外で現在唯一行われているだけであった。自然地震の分野でも相似地震解析として AE ダブルレット/マルチプレット解析と同様な研究が行われている。しかし、本研究で取り上げた波形が重畳した波形相似な自然地震の解析は行われていなかった。

## 2. 研究の目的

本研究の目的は、近接型 AE ダブルレット解析を独自の解析手段として、地下き裂システムの連係した動きを評価する手法を開発することである。近接型 AE ダブルレット解析の特長は次の 3 点である。①時間・空間・進展メカニズムにおいて相互作用が強い AE 源を解析する。②AE 源の進展ベクトルを高い精度で推定できる。③発生時間間隔を正確に推

定できる。本研究の具体的な目的は、(1) 連係震源の進展ベクトルの推定法の開発。(2) フランス Soultz 地熱フィールド、北海道勇払石油ガス田を題材にした進展ベクトルの特徴解明。(3) OpenGL を使った近接型 AE ダブルレットの進展ベクトルと AE 源分布全体像の同時表示システムの開発。である。

## 3. 研究の方法

本研究は、フランス Soultz 地熱フィールド(1993 年、1995-96 年、2000 年)、オーストラリア Cooper Basin HDR 実験フィールド(2003 年)、北海道勇払石油ガス田(2005 年)で観測した近接型 AE ダブルレットと AE 信号を題材に研究を進める。これらの水圧破碎実験は、様々な手法により地下き裂の特性が検討されているため、本課題の検証に適している。複数の地下き裂貯留層に本評価法を適用できるため、評価法の問題点を明らかにし改善できる。

(1) 連係した AE 源の進展ベクトル推定法の開発。

3 成分ケプストラム解析を時間-ケフレンシ解析に発展させる。そして、高い精度で検出した P 波の入力時間差から、AE 源の進展ベクトルを推定する計算プログラムを改良する。さらに、MUSIC 法を時間-ケフレンシ解析に導入し、ケプストラムの推定分解能を向上させる。マスターイベント法と順解析の探索法を組み合わせ近接型 AE ダブルレットの進展ベクトルを推定する計算法を開発する。

(2) 複数の水圧破碎実験における近接型 AE ダブルレット解析。

狭帯域の近接型 AE ダブルレット信号に対しても、高い時間分解能で P 波の入力時間差を検出できるように、3 成分ケプストラム解析を改良する。

複数の水圧破碎実験で観測した近接型 AE ダブルレットの AE 源の進展ベクトルを推定する。

近接型 AE ダブルレットの AE 源の進展ベクトルの特徴(向き、長さ、速度)、進展ベクトル群の特徴(位置、形、向き)を地下き裂貯留層全体の特徴(地殻応力、既存地下き裂、注水点等、AE 源分布の全体像)と関連づけて、進展ベクトルと水を卓越して通す地下き裂の構造の関係を検討する。

(3) OpenGL を使った近接型 AE ダブルレットの進展ベクトルと AE 源分布全体像の同時表示システムの開発。

地下き裂貯留層全体の AE 源分布と近接型

AE ダブルレットを発生した AE 源の進展ベクトルを合わせて解析する時、AE 源分布の全体像と進展ベクトルのスケールが 100 倍程度違うため、図のようにその特徴を視覚的に把握しにくい問題があった。本研究では、Open GL を使い AE 源の全体の分布と近接型 AE ダブルレットの進展ベクトルを同時に 3 次元表示するソフトウェアを開発する。

#### 4. 研究成果

(1) 時間-ケフレンシ解析とその解析ソフトウェアの開発。

近接型 AE ダブルレットは図 1 のように極めて時間間隔で 2 つの AE 信号が連続して入力する現象である。この P 波の入力時間差を検出することにより、2 つの AE 源間の進展ベクトルを推定できる。

近接型 AE ダブルレットの P 波入力時間差は、図 2 のようにケプストラム解析で検出できる。しかし、ケプストラム解析では、P 波の入力時間差と S 波の入力時間差を区別できなかった。本研究で開発した時間-ケフレンシ解析では、第 2S 波の入力時刻より前を時間窓を使って取り出すとともに、その時間窓長を変化させてケプストラムの変化を比較して、近接型 AE ダブルレットの P 波の入力時間差を検出する。さらに、図 3 のように時間-ケフレンシ解析の結果の誤認識を避けるために時間-ケフレンシ解析の結果を等高線表示するプログラムを開発した。この等高線表示により、時間-ケフレンシ解析における P 波の入力時間差の誤検出を減らせるようになった。

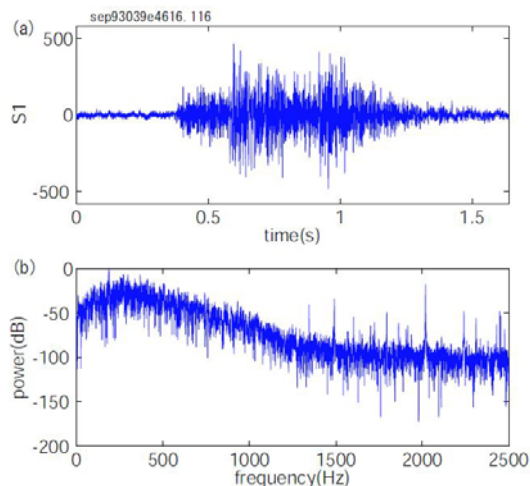


図 1 近接型 AE ダブルレットの波形とパワースペクトル

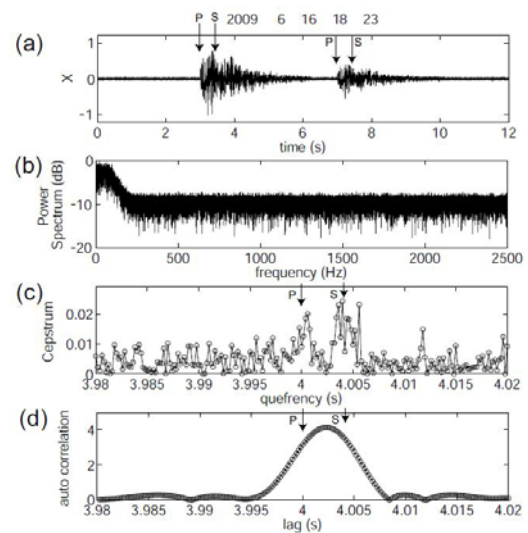


図 2 近接型 AE ダブルレットの P 波の入力時間差の検出

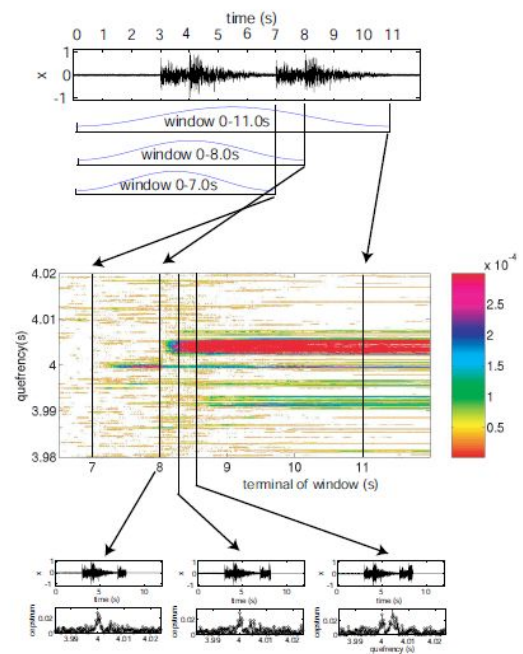


図 3 時間-ケフレンシ解析の概念図

(2) MUSIC 法による時間-ケフレンシ解析の高分解能化。

近接型 AE ダブルレットの入力時間差を高分解能で検出するために、図 4 に示すように、FFT により求めた対数パワースペクトルに MUSIC 法を使って、ケプストラムを求める手法を考案した。そして、図 5 に示すように MUSIC 法で解析する相互相関行列の次元と P 波入力時間差の誤差の関係を検討した。

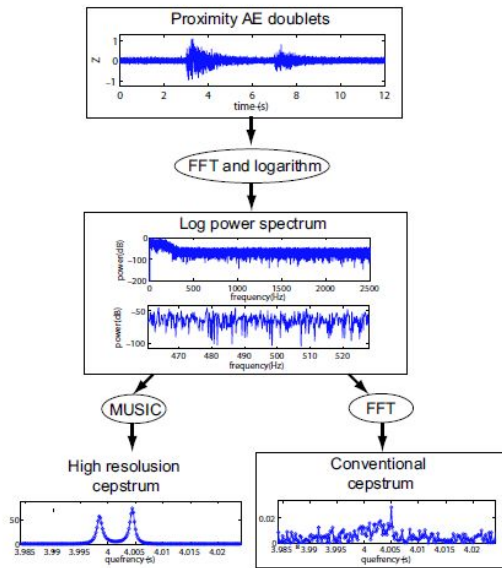


図4 時間-ケフレンシ解析へのMUSIC法の導入

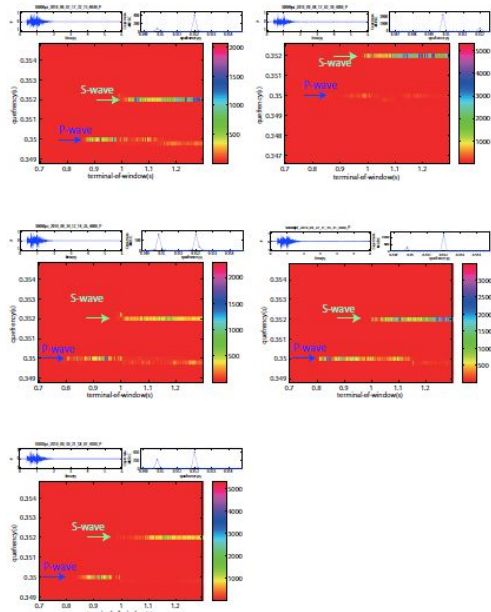


図5 MUSIC法における相関行列の最大ラグの検討

(3) Soultz 地熱フィールドと勇払油ガス田における近接型 AE ダブルットの進展ベクトルの標定。

1993 年 Soultz 地熱フィールドで観測した 15089 個の AE を図 6 のように解析して、230 個の近接型 AE ダブルットを検出した。それらを時間-ケフレンシ解析して、図 7 のように 4 観測点で P 波の入力時間差を検出できた 9 個の進展ベクトル源を標定した。また、2005 年に苫小牧勇払油ガス田で観測した 3708 個

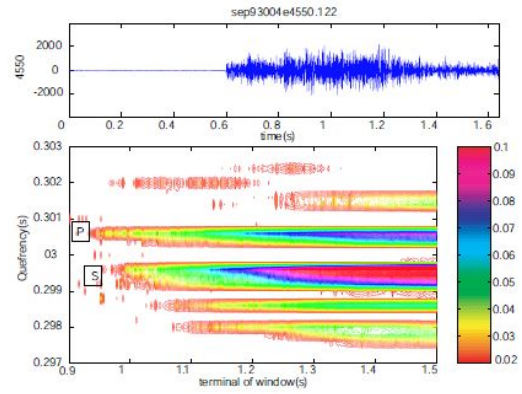


図6 時間-ケフレンシ解析の等高線表示

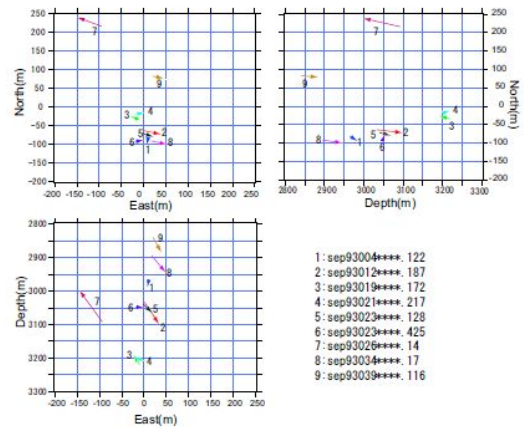


図7 Soultz 地熱フィールドで観測した近接型 AE ダブルットの進展ベクトル

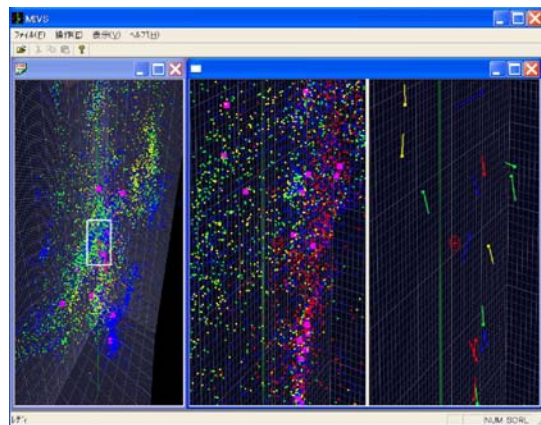


図8 近接型 AE ダブルットの進展ベクトルと AE 源分布全体像の同時表示システム

の AE を解析して 234 個の近接型 AE ダブルットを見つけたが、4 点の観測点で P 波入力時間差を検出できたイベントはなかったため、相対震源標定には至らなかった。

(4) 近接型 AE ダブルットの進展ベクトルと AE 源分布全体像の同時表示システムの開発。

AE 源分布の全体像と AE 源間の相対座標を同時に表示するシステムを図 8 のように開発した。この表示システムでは、2 つのウィンドウを使い、両者の回転・平行移動・スケールリングを同期させて、AE 源分布の全体像と相対震源座標の関係を分かりやすく操作できるようにした。

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 5 件)

① S. Ito, K. Hayashi, and K. Nagano, Estimation of Permeability of the Artificial Subsurface Fracture in Higashi-Hachimantai, Iwate, Japan, by the Dynamics of Fluid in a Fracture, GeoNZ 2010, (2010), p. 139, Auckland, October 2010. (査読有)

② K. Nagano and D. Konishi, Multiple interface visualization system for a geothermal reservoir, Joint Seminar on Environmental Science and Disaster Mitigation 2010, Muroran, (2010), pp. 64-65, March 10.

③ K. Nagano and K. Tomohiro, An application of the multiple signal classification method for detection of intervals between proximity acoustic emission doublets, The 9th Society of Exploration Geophysicists of Japan International Symposium, Sapporo, (2009), p. 64, October 12-14. (査読有)

④ K. Nagano and K. Itakura, Time-frequency analysis for detection of intervals between proximity similar events, The 2009 IEEE International Geoscience & Remote Sensing Symposium, Cape town, (2009), p. 28, July 12-17. (査読有)

⑤ K. Nagano and K. Tomohiro, Computer simulation of the multiple signal classification (MUSIC) method for

proximity AE doublets, Joint Seminar on Environmental Science and Disaster Mitigation 2009, Muroran, (2009), pp. 79-80, March, 10.

[学会発表] (計 8 件)

① 山田 勇人, 永野 宏治, 近接型相似微小地震対の入力時間差検出における AR スペクトル推定法の検討, 日本地熱学会 平成 22 年 学術講演会講演論文集, p. P02, (2010 年 11 月 24 日-11 月 26 日, つくば)

② 朝魯 蒙, 山田 勇人, 友廣 寿理, Roy Baria, 永野 宏治, 1993 年 Soultz 地熱フィールドで観測した近接型相似微小地震対の相対震源標定, 日本地熱学会 平成 22 年 学術講演会講演論文集, p. B26, (2010 年 11 月 24 日-11 月 26 日, つくば)

③ 朝魯 蒙, 山田 勇人, 友廣 寿理, Roy Baria, 永野 宏治, 1993 年 Soultz 地熱フィールドで観測した近接型相似微小地震対の解析, 平成 22 年度物理探査学会秋季学術講演会講演論文集, pp. 50-53, (2010 年 9 月 29 日-10 月 1 日, 仙台)

④ 永野 宏治, 小西 大輔, 地下き裂の AE 源の分布・相対座標同時表示システム, 第 42 回計測自動制御学会北海道支部学術講演会論文集, pp. 7-8, (2010 年 2 月 22 日, 札幌)

⑤ 友廣 寿理, 永野 宏治, 近接型 AE ダブルットの MUSIC 解析における相関行列の統一的解釈, 資源・素材 2009 企画発表・一般発表 (A) (S) 講演資料, pp. 229-230, (2009 年 9 月 8-10 日, 札幌)

⑥ 永野 宏治, 山口 徹, 時間窓を使ったケプストラム解析による近接型 AE ダブルットの P 波の入力時間差の推定, 平成 21 年度物理探査学会春季学術講演会講演論文集, pp. 117-120, (2009 年 5 月 25-27 日, 東京)

⑦ 永野 宏治, 山口 徹, 近接型 AE ダブルットの P 波と S 波を分離するケプストラム解析, 第 41 回計測自動制御学会北海道支部学術講演会論文集, pp. 91-92, (2009 年 2 月 26 日, 札幌)

⑧ 友廣 寿理, 永野 宏治, 近接型 AE ダブルットの入力時間差を検出する MUSIC 法の相関行列の検討, 第 41 回計測自動制御学会北海道支部学術講演会論文集, pp. 93-94, (2009 年 2 月 26 日, 札幌)

〔その他〕

ホームページ等

<http://wsp.csse.muroran-it.ac.jp/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

永野 宏治 (NAGANO KOJI)

室蘭工業大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号：90212109

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし