

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成25年 4月 1日現在

機関番号：11301

研究種目：基盤研究（B）

研究期間：2009～2012

課題番号：21360443

研究課題名（和文）AEマルチプレットを用いた貯留層リアルタイムモニタリングシステムの開発

研究課題名（英文）Development of realtime reservoir monitoring system using microseismic multiplets

研究代表者

浅沼 宏 (ASANUMA HIROSHI)

東北大学・大学院環境科学研究科・准教授

研究者番号：50250717

研究成果の概要（和文）：本研究ではリアルタイム貯留層モニタリング／イメージングシステムについて以下のような成果を得た。

- (a) 周波数領域でのマルチプレット逐次クラスタリング法を開発した
- (b) AEマルチプレット源の時空間解析による水圧刺激プロセス評価法を開発した
- (c) AEマルチプレットと大マグニチュードAEとの関連性を検討した
- (d) AEマルチプレットを音源とする水圧刺激領域内部の反射イメージング/トモグラフィ法を開発した
- (e) リアルタイム貯留層モニタリング／イメージングシステムを開発した

研究成果の概要（英文）：

The followings have been established through this research project.

- (a) Realtime clustering method of AE multiplets have been developed.
- (b) Monitoring method of hydraulic stimulation by spatio-temporal analysis of AE multiplets.
- (c) Relation of magnitude to the AE multiplets have been investigated.
- (d) Passive tomographic/reflection methods have been developed.
- (e) Realtime reservoir monitoring system has been developed.

交付決定額

（金額単位：円）

| | 直接経費 | 間接経費 | 合計 |
|--------|------------|-----------|------------|
| 2009年度 | 3,200,000 | 960,000 | 4,160,000 |
| 2010年度 | 2,300,000 | 690,000 | 2,990,000 |
| 2011年度 | 4,500,000 | 1,350,000 | 5,850,000 |
| 2012年度 | 1,500,000 | 450,000 | 1,950,000 |
| 年度 | | | |
| 総計 | 11,500,000 | 3,450,000 | 14,950,000 |

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：誘発有感地震，マルチプレット，地熱貯留層，水圧刺激，AE

1. 研究開始当初の背景

水圧刺激は、地熱や石油・天然ガス貯留層の開発・生産量増大のために不可欠な技術のひとつとして使用されている。水圧刺激時には既存き裂のせん断すべりが生じ、それにとも

ないAEが観測されることが一般的である。また、通常の生産時にもAEが観測される事例は多い。AEの震源マッピング、震源メカニズム解析等により、貯留層内の情報を広範囲に実用的な精度で取得可能であるため、A

E法は水圧刺激の標準的モニタリング法として実用化されている。特に近年、欧米の石油業界では、EORに対する需要の高まりに応じてAEモニタリング技術のビジネス化が急速に進んでいる。

本研究の代表者らは、1980年代からAE計測システム、AE解析手法等、本分野における多岐にわたる研究を実施するとともに、内外のプロジェクトからの受託を受けフィールドモニタリングを行う等の実績を有している。

これまでの代表者の研究により、AE信号には互いに波形が類似した“AEマルチプレット”が多数含まれており、それらの高精度マッピングにより、貯留層内の微細構造を推定できることが明らかになった。しかし、AEマルチプレットを発生させる物理現象が十分に解明されていないこと、AEマルチプレットと震源パラメータの関係が考慮されていないこと、AEマルチプレット解析が即時性を有していないこと等が実用上の大きな問題とされてきた。一方、申請者はAEマルチプレットの特性(高い波形類似性、高精度に決定された震源位置等)と、申請者らが研究・開発してきた多成分弾性波信号処理技術を組み合わせ、AEマルチプレットを弾性波源として利用する新たな反射法、トモグラフィ法の開発が行えると判断した。

2. 研究の目的

本研究はAEマルチプレットの特徴を利用した一連の解析技術をリアルタイムモニタリング技術として実用化するための手法、およびシステムの開発を目的として実施することとした。

本研究では、最終的に高速AD変換装置と必要なソフトウェアを組み込んだ計算機からなる「リアルタイム貯留層モニタリング/イメージングシステム」を開発、実用化することを目指した。本研究の前半では、AEマルチプレット解析における実用上の問題点を解決する目的で、以下の点を達成することとした。(1)周波数領域でのマルチプレット逐次クラスタリング法の開発：AEイベントの検出と同時に既取得のイベントとのコヒーレンスを周波数領域で評価し、クラスタリングを実現する。(2)AEマルチプレット源の時空間解析による水圧刺激プロセス評価法の開発：AEマルチプレットの空間的コヒーレンス分布、震源半径、マグニチュード等を視覚化し、貯留層形成プロセスの解釈に使用可能なツールを開発する。(3)AEマルチプレットと大マグニチュードAEとの関連性の解明：既取得の実データについて大マグニチュードAE発生前後でのAEマルチプレットの発生挙動(空白域、前震、余震等)を解析し、大マグニチュード発生リスクの評価を実

現する。(4)AEマルチプレットを音源とする水圧刺激領域内部の反射イメージング/トモグラフィ法の開発：AEマルチプレットの波形類似性、高精度に決定された震源間相対位置等、AEマルチプレットが有する特徴と、多成分弾性波信号処理を組み合わせ、AE源近傍の反射体や速度不連続面をイメージング可能な手法を導出する。本研究では、最終的にこれらの手法をシステムへ組み込み、実用可能にすることとした。

3. 研究の方法

本研究では以下のように研究計画を立案し、実行した。

【平成21年度】

(1)周波数領域でのマルチプレット逐次クラスタリング法の開発

① バーゼルおよびソルツ地熱フィールドで既取得のAEについて、コヒーレンスを評価する周波数帯域・時間窓長・閾値を変化させ、クラスタリングを行う。DD法により高分解能相対位置マッピングを行い、これらのパラメータとAE源時空間分布の関連性を検討する。

② AE波形から震源モーメントの情報を抽出可能か判別するアルゴリズムを検討する。

③ 上記の結果から、マルチプレットの最適なクラスタリング法について検討する。また、これを逐次実現するためのアルゴリズムを検討する。

(2)AEマルチプレット源の時空間解析による水圧刺激プロセス評価法の開発

① バーゼルおよびソルツ地熱フィールドで記録したAEについて、水圧刺激時の送水記録とAEマルチプレット源位置の時空間分布、震源半径、コーナー周波数、震源メカニズム解等を比較・検討し、本フィールドでの貯留層形成プロセスを推定する。貯留層形成プロセスのリアルタイムモニタリングのために必要な情報の抽出法を検討する。

(3)AEマルチプレットと大マグニチュードAEとの関連性の解明

① バーゼルおよびクーパー盆地地熱フィールドで記録したAEについて、大マグニチュードAE源付近でのAEマルチプレットの発生時系列、マルチプレットが作る構造、震源半径等を解析する。これにより空白域、前震、余震に対応するAEマルチプレットの有無を検討する。

(4)AEマルチプレットを音源とする水圧刺激領域内部の反射イメージング/トモグラフィ法の開発

① ソルツ地熱フィールドで記録したAEについて、類似性が高いマルチプレットを検出し、それらの差分波形を観察するこ

とにより、反射体、散乱体に関する情報を抽出可能か検討する。

- ② 実データおよび合成波形を対象として、ウェーブレットスペクトル行列解析、3次元時間一周波数コヒーレンス解析法、3成分ディコンボリューション法等の多成分弾性波信号処理法を適用することにより反射波を検出可能か検討する。
- ③ 高精度に相対震源位置が決定されたマルチプレットをソースアレイとみなして解析を行う手法を検討する。

【平成22年度～24年度】

- (1) 周波数領域でのマルチプレット逐次クラスタリング法の開発
 - ① マルチプレットに分類されないイベントの物理的意味について検討する。
 - ② マルチプレットの逐次クラスタリングアルゴリズムを検討する。
- (2) A Eマルチプレット源の時空間解析による水圧刺激プロセス評価法の開発
 - ① 貯留層形成プロセスのリアルタイムモニタリングのために必要な情報の視覚化手法について検討する。
- (3) A Eマルチプレットと大マグニチュードA Eとの関連性の解明
 - ① A Eマルチプレットを用いた大マグニチュードA E発生リスクの評価法を検討するとともに、コード化のための具体的アルゴリズムを検討する。
- (4) A Eマルチプレットを音源とする水圧刺激領域内部および近傍の反射イメージング/トモグラフィ法の開発
 - ① 開発した反射法、振幅トモグラフィ法の性能をシミュレーションにより評価する。本手法をソルツおよびバーゼル地熱フィールドで記録したデータへ適用し、反射イメージングを行う。得られた反射イメージと坑井データ、検層データ、地質データ等を比較し、本手法の有効性について検討する。
- (5) リアルタイム貯留層モニタリング/イメージングシステムの開発
 - ① 本システムが有する機能、G U I等について概念設計を行う。同時高速A D変換装置の仕様を調査し、これをもとに、データ転送部、バッファメモリ、主メモリ、C P U等ホストコンピュータの使用を決定し、導入する。
 - ② データフォーマット、ユーザ定義関数等、システムで共通に使用する部分の仕様を策定する。メインメニュー、A D変換制御・データ転送部分、A E/ノイズ判別部分等の主要な機能をコード化する。(a)-(d)で開発した解析手法をコード化し、メインプログラムとリンクさせる。
- ③ ソルツおよびクーパー盆地地熱フィールドで連続記録されたデータを用いて、本

システムの動作を確認する。

- ④ 研究協力者を通じて各国のフィールドでの水圧刺激に関する情報を収集し、本システムを使用可能な事例があれば、現地で本システムを運用し、有効性の実証、性能評価を行う。

4. 研究成果

本研究に関連する主な研究成果は以下の通り。

- (1) コヒーレンス解析法の原理に基づき、周波数領域でのマルチプレット逐次自動クラスタリングアルゴリズムを導出し、コード化した。これによりA E発生後1秒以内でイベントのクラスタリングを行うことが可能になった。
- (2) マルチプレット震源のDouble Difference法による高精度震源位置再決定、マルチプレット震源構造面、各イベントの断層面解、震源半径を組み合わせて水圧刺激領域の進展をモニタリング可能にした。
- (3) A Eマルチプレットとマグニチュードの関連性について検討した。その結果、マグニチュードと波形類似性の間に直接的な相関関係は見られないことを明らかにした。
- (4) A Eマルチプレットを音源とする受動的反射イメージング法の原理を考案した。本手法は弾性波の3次元粒子運動軌跡の時空間コヒーレンス解析に基づくものであり、従来法に比して高解像度・高信頼性の反射イメージを取得できることを明らかにした。
- (5) 本研究の成果をまとめ、A Eマルチプレットを使用したリアルタイム貯留層モニタリング/イメージングシステムの開発を行った。ここではハードおよびソフトの開発によりシステムを実現した。インドネシア、Kamojang 地熱フィールドに本システムを設置し、本システムの基本機能には問題がないことを実証した。

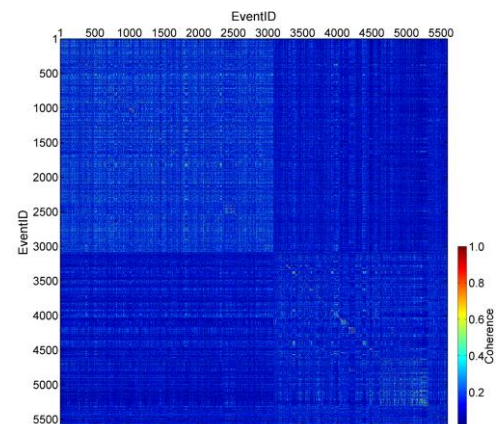


図1：本システムにより作成されたクロスコヒーレンステーブルの例

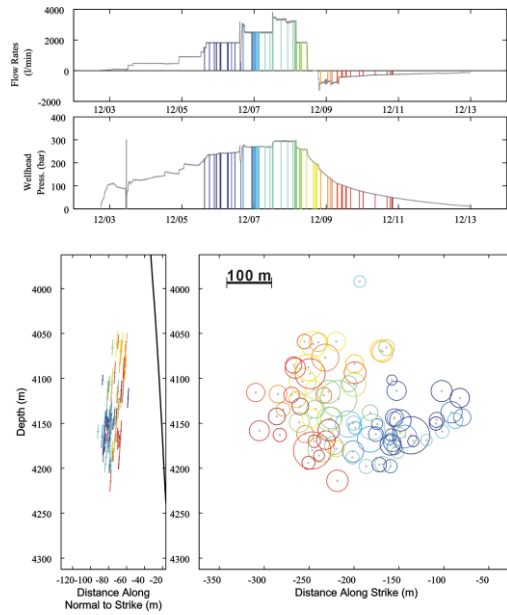


図2：A/Eマルチプレット震源の時空間分布。丸の大きさは震源半径を表す。

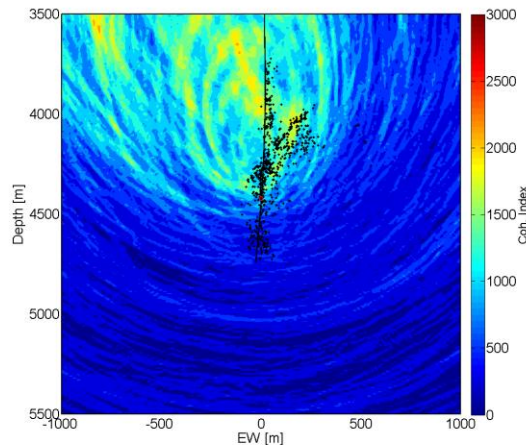


図3：A/E反射法によるソルツ地熱フィールドの反射イメージ

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)

[雑誌論文] (計9件)

- (1) H. Asanuma, Y. Mukuhira, H. Niitsuma, M. Haring, Fundamental features of large magnitude microseismic events observed at Basel, Switzerland, *Mathematical Geosciences*, (2013) (in-press) 査読有
- (2) Y. Mukuhira, H. Asanuma, H. Niitsuma, M. Haring, Characteristics of large-magnitude microseismic events recorded during and after stimulation of a geothermal reservoir at Basel,

Switzerland, *Geothermics*, 45, 1-17 (2013) 査読有

- (3) H. Asanuma, S. Mitsumori, M. Adachi, M. Saeki, K. Aoyama, H. Ozeki, Estimation of stress state at Yanaizu-Nishiyama geothermal field using microseismic multiplets, *Trans. GRC*, 36, 989-994 (2012.10) 査読有
- (4) H. Asanuma, K. Tamakawa, H. Niitsuma, N. Soma, J. Rutledge, C. Rowe, Reflection imaging of the Aneth CCS reservoir using microseismic multiplets as a source, *SEG Expanded Abstracts* (2011.10) 査読有
- (5) H. Asanuma, K. Tamakawa, H. Niitsuma, R. Baria, M. Haring, Reflection imaging of EGS reservoirs at Soultz and Basel using microseismic multiplets as a source, *Trans. GRC*, 35, (2011.10) 査読有
- (6) H. Asanuma, S. Mitsumori, M. Adachi, K. Saeki, K. Aoyama, H. Ozeki, Y. Mukuhira, H. Niitsuma, Characteristics of microearthquakes at Yanaizu-Nishiyama geothermal field, *Trans. GRC*, 35, (2011.10) 査読有
- (7) Y. Mukuhira, H. Asanuma, H. Niitsuma, M. Haring, Identification of fracture orientation for the large magnitude microseismic events recorded at Basel, Switzerland in 2006, *Trans. GRC*, 35, (2011.10) 査読有
- (8) H. Asanuma, Y. Kawamura, H. Niitsuma, D. Wyborn, Integrating microseismic multiplet and source parameter analyses to define EGS reservoir structure: Cooper Basin, Australia, *Trans. GRC*, 34, 841-846, (2010.10) 査読有
- (9) Y. Mukuhira, H. Asanuma, H. Niitsuma, M. Haring, N. Deichmann, Estimation of source parameter of microseismic events with large magnitude collected at Basel, Switzerland in 2006, *Trans. GRC*, 34, 407-412, (2010.10) 査読有

[学会発表] (計16件)

- (1) T. Eto, H. Asanuma, M. Adachi, K. Saeki, K. Aoyama, H. Ozeki, M. Haring, Seismostatistical characterization

of microseismicity observed at geothermal fields, AGU 2012 Fall Meeting Abstract presented at 2012 Fall Meeting, AGU, San Francisco, Calif., 5-9 Dec., H12F-01 (アメリカ, サンフランシスコ, 2012. 12. 7)

- (2) S. Mitsumori, H. Asanuma, M. Adachi, M. Saeki, K. Aoyama, H. Ozeki, Long term microseismic monitoring at Yanaizu-Nishiyama geothermal field, Japan, Proc. 18th Formation Evaluation Symposium of Japan, E (千葉, 2012. 8. 30)
- (3) T. Eto, H. Asanuma, M. Adachi, M. Saeki, K. Aoyama, H. Ozeki, M. Haring, A seismostatistical approach for microseismic monitoring of geothermal reservoirs, Proc. 18th Formation Evaluation Symposium of Japan, D, (千葉, 2012. 8. 30)
- (4) H. Asanuma, Y. Mukuhira, S. Mitsumori, M. Haring, D. Wyborn, and M. Adachi, Fault plane solutions of earthquakes from deep geothermal reservoirs, Proc. EGU2012 Annual Mtg. (ウィーン, オーストリア, 2012. 4. 24)
- (5) H. Asanuma, S. Mitsumori, M. Adachi, M. Saeki, K. Aoyama, H. Ozeki, Y. Mukuhira, Long term seismic monitoring and reservoir characterization at Yanaizu-Nishiyama geothermal field, Proc. KACST-JCCP 1st Joint International WS for the Earth's Surface and Subsurface 4D monitoring in 2012 (リヤド, サウジアラビア, 2012. 1. 6)
- (6) Y. Mukuhira, H. Asanuma, H Niitsuma, M, Haring, Investigation on the characteristics of seismic events observed during stimulation of geothermal reservoirs at Basel, Switzerland, AGU 2011 Fall Meeting Abstract S41C-2119 presented at 2011 Fall Meeting, AGU, San Francisco, Calif., 5-9 Dec. (サンフランシスコ, アメリカ 2011. 12. 8)
- (7) H. Asanuma, S. Mitsumori, M. Adachi, M. Saeki, K. Aoyama, H. Ozeki, Y. Mukuhira, H. Niitsuma,

Characteristics of earthquakes observed at Yanaizu-Nishiyama geothermal field, Japan, AGU 2011 Fall Meeting Abstract S44B-08 presented at 2011 Fall Meeting, AGU, San Francisco, Calif., 5-9 Dec. (サンフランシスコ, アメリカ, 2011. 12. 6)

- (8) H. Asanuma, K. Tamakawa, N. Soma, H. Niitsuma, Principles of coherence reflection method and its applicability to seismic reflection survey, Proc. SEGJ Symposium, 55-58 (京都, 2011. 11. 20)
- (9) Y. Mukuhira, H. Asanuma, H. Niitsuma, and M. Haring, Characteristics of the large events from the seismically activated fractures at Basel geothermal reservoir, Proc. SEGJ Symposium, 116-119 (京都, 2011. 11. 20)
- (10) H. Asanuma, K. Tamakawa, N. Soma H. Niitsuma, R. Baria, M. Haring, Reflection imaging of EGS reservoirs using microseismicity as a source, Proc. Stanford Geothermal Workshop, 909-913 (スタンフォード, アメリカ, 2011. 1. 30)
- (11) H. Asanuma, Y. Kawamura, H. Niitsuma, D. Wyborn, Estimation of structure of geothermal reservoir at Cooper Basin, Australia, by integrated analysis of microseismic multiplet and source parameter, Proc. SEGJ Symposium, 120-124 (京都, 2011. 1. 20)
- (12) H. Asanuma, Y. Kawamura, H. Niitsuma, D. Wyborn, Estimation of EGS reservoir structure at Cooper Basin, Australia by integrated analysis of microseismic multiplet and source parameter, Abstract H33D-1160 presented at 2010 Fall Meeting, AGU, San Francisco, Calif., 13-17 Dec. (サンフランシスコ, アメリカ, 2010. 12. 16)
- (13) K. Tamakawa, H. Asanuma, H. Niitsuma, N. Soma, Identification of reflected phase by coherence analysis of 3D hodogram and application to reflection imaging, Proc. 16th Formation Evaluation Symposium of Japan, Q, (千葉, 2010. 9. 30)

- (14) H. Asanuma, Y. Kumano, Y. Kenmoku, Y. Kawamura, Y. Mukuhira, H. Niitsuma, D. Wyborn, M. Haring, Estimation of stimulation process of HDR/EGS reservoirs by analysis of microseismic multiplets, Proc. RE2010 (千葉, 2010. 8. 10)
- (15) H. Asanuma, Y. Kumano, H. Moriya, H. Niitsuma, M. Haring, Interpretation of reservoir creation process by super-resolution mapping of microseismic multiplets collected at Basel, Switzerland, Proc. WGC2010 (CDROM) (バリ, インドネシア, 2010. 4. 30)
- (16) Y. Mukuhira, H. Nozaki, H. Asanuma, H. Niitsuma, D. Wyborn, M. Haring, Analysis of microseismic events with larger magnitude collected at Cooper Basin, Australia and Basel, Switzerland, Proc. WGC2010 (CDROM) (バリ, インドネシア, 2010. 4. 30)

[図書] (計0件)

[産業財産権]

○出願状況 (計0件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
出願年月日：
国内外の別：

○取得状況 (計0件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
取得年月日：
国内外の別：

[その他]

ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

浅沼 宏 (Hiroshi ASANUMA)

東北大学・大学院環境科学研究科・准教授

研究者番号：50250717

(2) 研究分担者：無

(3) 連携研究者：無