

S波コーダ波の時間-周波数領域における3次元ホドグラム解析による深部地熱貯留層構造の推定

相馬 宣和 産業技術総合研究所 深部地質環境研究センター
新妻 弘明 東北大学大学院 工学研究科
ロイ・バリア GEIE - Exploitation Minière de la Chaleur (仏)

1. はじめに

地熱エネルギーの開発では、貯留層分布や性状の評価のために AE(ここでは微小地震とほぼ同義)の観測が行われる。近年では、より詳細かつ総合的な地熱システムの評価が求められるようになり、貯留層(すなわち震源域)だけでなくその周辺構造の把握までが重要となっている。また放射性廃棄物地層処分や CO₂ 地中貯留の開発などにおいても、開発域周辺の把握は重要である。しかしながら従来の方法では、媒質や温度・圧力などの問題により、このような領域の計測が困難なことがしばしばあった。

以上のようなことをふまえ、筆者らはこれまで AE を音源とする反射法計測技術の開発を行ってきた。本報告では、時間-周波数領域における3次元ホドグラム解析による AE を用いた反射法の概要と、ソルツ高温岩体テストサイト(仏)で観測された AE 波形に本手法を適用して得られた深部地熱貯留層構造の推定結果を述べる。

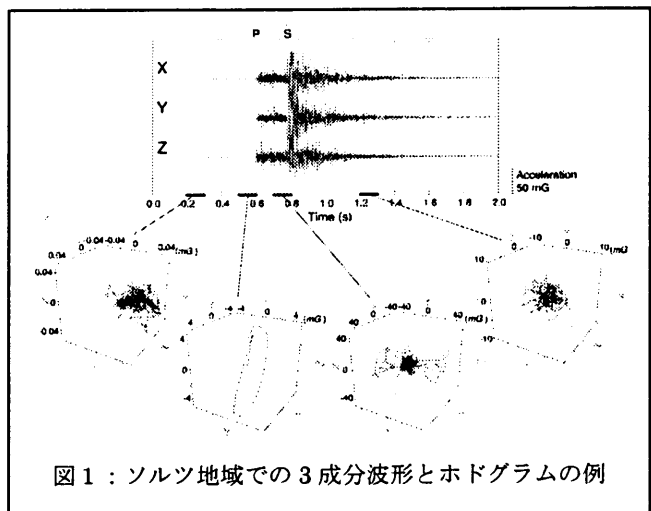
2. 時間-周波数領域における AE を音源とする反射法

2-1. 3次元ホドグラムの形状評価によるコーダ波中からの反射波の検出

図1上部はソルツ地域での観測波形例である。一般に、観測波形の S 波コーダ部分には明確なエネルギーの変化は見られない。すなわち、波形のエネルギー変化だけに基づく従来の手法では、反射波の抽出は困難である。

高精度な多成分弾性波検出器を用いた場合3次元粒子運動軌跡の検出が可能であり、3次元ホドグラムを描いた場合その形状が波の状態に対応することが知られている(Nagano et al., 1986)。

図1下部に3次元ホドグラムの例を示す。ホドグラムは P、S 波の到来時などには一時的に直線的に変化するのに対し、ノイズ部分やコーダ波では球状になっている。ここで、対象とする反射波は直達波と同様にコヒーレントな平面波とみなせると仮定すると、コーダ波受信中の3次元ホドグラムの直線性の評価により反射波の抽出が可能になると考えられる。なお、エネルギーや反射 P が直達 S と干渉する問題から、本研究では S 波の反射のみに着目している。



2-2. ウェーブレット変換を用いた時間-周波数領域における共分散行列解析

3次元ホドグラムは3次元粒子運動の軌跡であり、 $s(t) = [s_x(t), s_y(t), s_z(t)]^T$ と表される。ここで、 $t = n\tau$ ($n=0, 1, 2, \dots, N-1$) であり、 τ はサンプリング間隔、 $N\tau$ はデータ長、“ T ”は転置を表す。一般に、3成分波形のパワースペクトルおよびクロススペクトルを用いることにより、周波数領域での共分散行列すなわちスペクトル行列を定義できる(Samson, 1977)。この際に信号の時間-周波数表現を用いて、時変スペクトルを本行列の定義に用

いることにより、時々刻々と変化するスペクトル行列を得ることができる。本研究では、平滑化された時間-周波数分布とみなすことができるウェーブレット変換を用いて、時間-周波数領域でスペクトル行列を定義する。

$$\mathbf{SpWT}(b, a) = \begin{pmatrix} WT_{xx}(b, a) & WT_{xy}(b, a) & WT_{xz}(b, a) \\ WT_{yx}(b, a) & WT_{yy}(b, a) & WT_{yz}(b, a) \\ WT_{zx}(b, a) & WT_{zy}(b, a) & WT_{zz}(b, a) \end{pmatrix} \quad (1)$$

ここで $WT_{ii}(b, a) = W_i(b, a)W_i(b, a)^* (i=x, y, z)$, $WT_{ij}(b, a) = W_i(b, a)W_j(b, a)^* (i=x, y, x, i \neq j)$,

$$W_i(b, a) = \int s_i(t) \frac{1}{\sqrt{a}} h^* \left(\frac{t-b}{a} \right) dt \quad (i=x, y, z)$$

*: complex conjugate, $h(t)$: integral kernel known as the analyzing wavelet, a : scale, b : shift.

本研究ではアナライジングウェーブレットとして、Mayerの正規直交ウェーブレットを用いている。本行列では、解析する周波数によって時間分解能が変化するというウェーブレット変換の特徴が反映されており、異なる周波数成分間でほぼ平等な条件でホドグラムを扱えることになり、時間-周波数領域での3次元ホドグラムの評価に適している。また、時間分解能は使用する最大周波数成分が支配するため、これまでに比べてより高い分解能と推定精度を有すると考えられる。

3次元ホドグラムの形状の定量評価は、Samson (1977)を基にした時間-周波数領域での次式を用いている。

$$C_p(b, a) = \frac{(\lambda_1 - \lambda_2)^2 + (\lambda_2 - \lambda_3)^2 + (\lambda_3 - \lambda_1)^2}{2(\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3)^2} \quad (2)$$

ここで、 $\lambda_i = \lambda_i(b, a) (i = 1, 2, 3, \lambda_1 > \lambda_2 > \lambda_3)$ は行列(1)の固有値であり、 a : scale, b : shift がそれぞれ時間と周波数に対応することから時間-周波数領域での定義と見なす。 $C_p(b, a)$ はホドグラムの形状に対応し、ホドグラムが完全に直線の時に $C_p = 1.0$ 、球状の時に $C_p = 0.0$ となる。本研究では、この C_p を3次元ホドグラムの直線性評価に用いる。本手法のシミュレーションの例を図2示す。ランダムノイズ中の微弱な正弦波成分が検出できている。

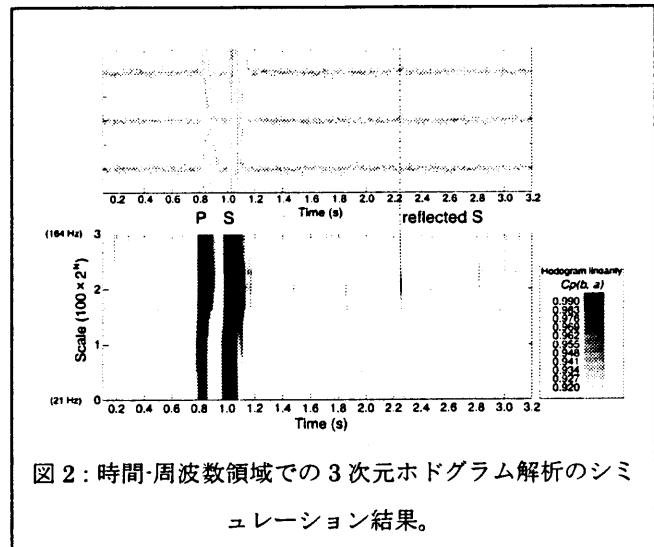


図2：時間-周波数領域での3次元ホドグラム解析のシミュレーション結果。

2-3. S波偏波情報を用いたディフラクションスタック法

前節で定義した $C_p(b, a)$ を、解析に使用する全ての波形について計算し、それを用いた3次元的な逆解析により地下のイメージングを行う。ここでは、ディフラクションスタック法を基にS波偏波方向を用いた制限と、不均一な震源分布の影響の補正を加えている。

最も基本的なディフラクションスタック法では、処理の過程で、反射波のディレイと観測点・震源位置から定まる反射楕円体上の全てに波形エネルギーを分布させる。一方本研究では、高精度に波の振動方向を検出できるという利点を生かし、S波の振動方向が到来方向に直交するという条件により波形エネルギーを分布させる領域を制限し、反射体の検出精度を向上させている。また不均一な震源分布の影響の補正として、個々の震源の周りの他の震源の個数を算出しスタッキングの際に正規化を行っている。

3. ソルツ高温岩体テストサイトへの適用結果

3-1. ソルツ高温岩体テストサイトの概要

ソルツ高温岩体テストサイトは、フランスの北東部アルザス地方に位置し、1987年から仏・独・ECにより開発が行われている。図3にソルツ地域の概要を示す。本地域の地質は、深度1.5km付近以深はほぼ均質な花崗岩である。本地域では1997年に深度3.5km付近の人工貯留層での長期循環試験に成功し、それをふまえて現在では深度5km付近を対象に実用化(発電利用)を念頭にした開発に移行している。

AEの観測は開発初期から行われており、例えば1993年に深度3.5km付近での水圧破碎実験

で約2万イベント、2000年の深度5km付近での実験で約4万イベント近くが記録されている。AEの利用は人工貯留層の分布の把握だけでなく、近年では岩石力学や水圧破碎、地化学、地質などの関係者らとともに、人工貯留層の生成過程の理解や抽熱システムの把握のためにより深く用いられるようになってきている。

3-2. ソルツ地域で検出された反射面と人工貯留層分布

反射面の検出には、1993年に観測点4550で受信されたうちの101イベントと、2000年に観測点4601とOPS4で受信された257イベントを用いている。2000年には国際共同研究MURPHYプロジェクト(代表: Hugh Murphy、日本側代表: 浅沼宏)によるAE観測も実施され、本研究にも適した長いデータ長での記録が行われ、より広範囲を対象とした解析が可能になった(Asanuma et al., 2001)。

図4は、1993年の観測点4550、2000年の4601およびOPS4の、3観測点での反射体検出結果を統合し過去の震源分布と比較したものである。図中の低傾斜の反射体は主に1993年4550での解析結果に由来している。また、高傾斜の反射体については、異なる観測点間で解析結果が類似していた。このことは、対象とした深

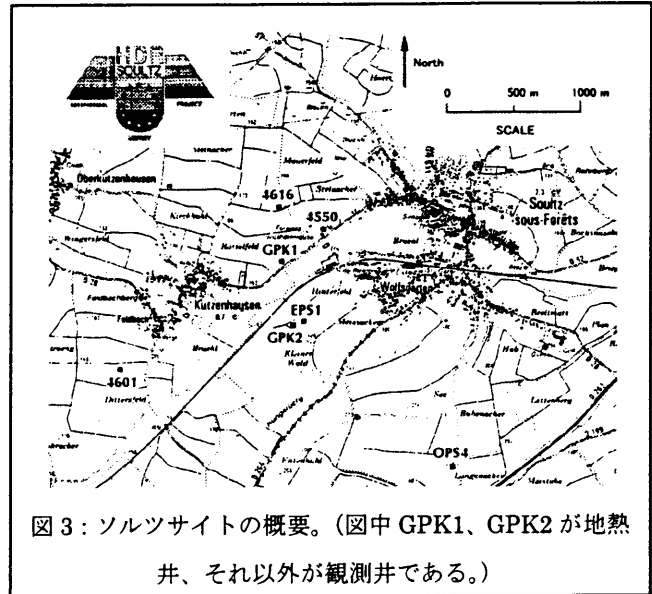


図3: ソルツサイトの概要。(図中GPK1、GPK2が地熱井、それ以外が観測井である。)

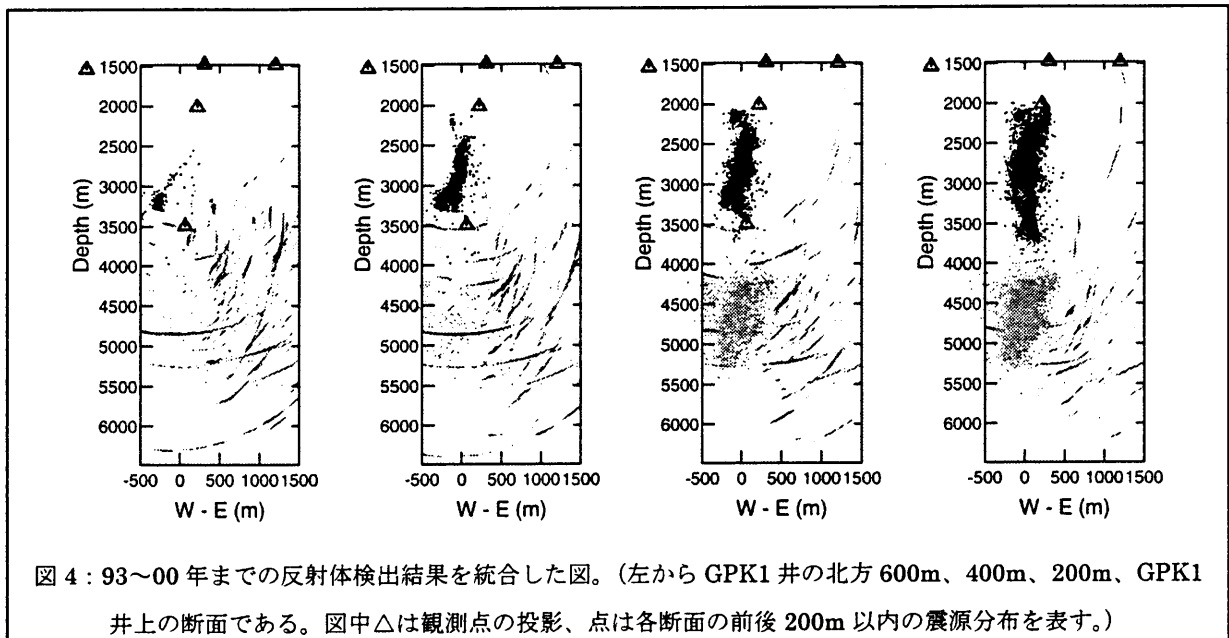


図4: 93~00年までの反射体検出結果を統合した図。(左からGPK1井の北方600m、400m、200m、GPK1井上の断面である。図中△は観測点の投影、点は各断面の前後200m以内の震源分布を表す。)

度付近において、断層等の高傾斜構造の存在を示唆していると考えられる。反射体の位置は、人工貯留層を形成する範囲である震源分布の上下の境界付近および側面に位置している。水圧破碎が行われた年や位置から考えて、検出された反射面は開発と無関係な既存構造を表していると考えられ、既存地下構造が人工貯留層の進展を支配していることを示していると予想される。

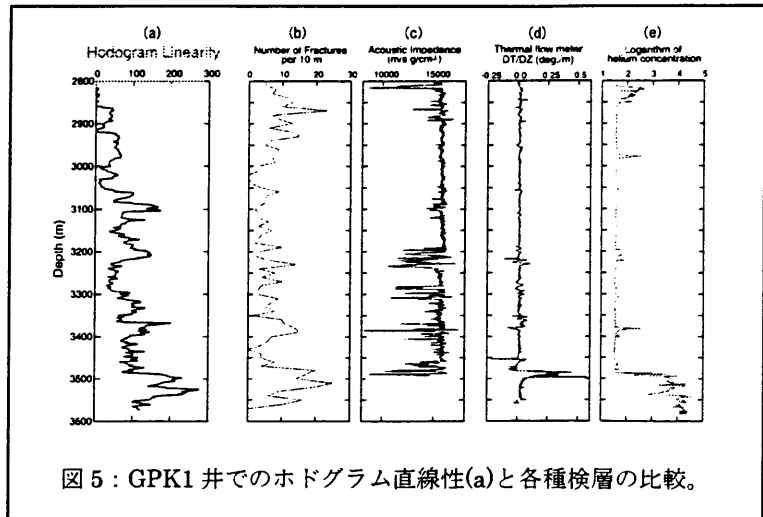


図5：GPK1井でのホドグラム直線性(a)と各種検層の比較。

また、浅部について反射体深度と各種ボアホールデータとの比較を行ったところ、反射体はき裂の分布によく対応しており、特に人工貯留層内部で比較的明瞭に検出された反射面(深度 3.5km 付近)は、大規模な透水性を有するき裂帯深度に一致していた。このことから本手法で得られる反射面は確認されており、何らかの貯留層内構造に対応していると考えられる。

4. まとめ

これまで、地熱地域での AE(微小地震)波形を対象に、S波コーダ波の時間-周波数領域での3次元ホドグラム解析法を開発し、反射波の抽出から地下深部構造を推定する手法(AE 反射法)を検討してきた。本報告では、本方法の概要を述べ、ソルツ高温岩体テストサイト(仏)で得られた波形に適用した結果を報告した。

本方法では、エネルギー変化の解析では困難な微弱な反射波成分の抽出が可能で、実際にソルツ地域で有意と考えられる反射面が検出された。深部貯留層周辺の反射面の分布から、人工貯留層造成の際の既存構造の影響も示唆された。本研究でのアプローチは、ここで示した地熱開発についてだけでなく、一般的な地下計測の場面でも利用可能であり、厳しい条件下での深部計測法として有用であると考えられる。

(謝辞)本研究は国際共同研究 MURPHY プロジェクト(代表: Hugh Murphy, NEDO 国際共同研究助成)の一環として行われた。また本研究の一部については、平成 12 年度産業技術研究助成事業により実施したものであり、関係各位に謝意を表する。AE 観測については GEIE をはじめとする欧州地熱開発プロジェクト関係機関の協力によるものであり関係各位に感謝する。

(参考文献)

- Asanuma, H., Mochizuki, S., Nakazato, K., Soma, N., Niitsuma, H. and Baria, R. (2001), Data acquisition and analysis of microseismicity from stimulation of deep reservoir at Soultz by the MTC/MURPHY international collaborative project, GRC Transactions, 161-166.
- Nagano, K., Niitsuma, H. and Chubachi, N., 1986, A new automatic AE source location algorithm for downhole triaxial AE measurement, *in* Yamaguchi, K., et al., Eds., Progress in Acoustic Emission III: The Japanese Soc. for NDI, 396-406.
- Samson, J. C., 1977, Matrix and Stokes velocity representations of detectors for polarized waveforms: theory, with some applications to teleseismic waves: Geophys. J. Roy. Astr. Soc., 51, 583-603.