

# 環境調和型再生可能エネルギー「地熱」利用のための AE・微小地震を用いた 地下情報計測に関する研究

森谷 祐一

東北大学大学院環境科学研究科

Tel: 795-7996, e-mail: hirokazu@ni2.kankyo.tohoku.ac.jp

## 1. はじめに

環境調和型再生可能エネルギー利用に関する研究，技術開発は，日毎にその重要性が増している．再生可能エネルギーの一つである地熱エネルギーを利用するためには，熱水蒸気の流路となる地下き裂の位置やき裂中の流体流動方向を把握することが不可欠であり，そのための計測技術は極めて重要である．地下の流体流路を計測する方法に，流路内流体圧力の変化により地下き裂や断層がせん断すべりを起こす際に誘発される弾性波（AE・微小地震）を利用した方法がある．AE・微小地震波は，地表や坑井内（センサ設置用の井戸）に展開した高感度地震計のネットワーク（多点・多成分[水平2成分，垂直1成分]計測の地震計により構成される）により計測され，そこではネットワーク間での情報処理，ならびに多成分信号の処理技術が必要となる．地熱利用において極めて重要なことは，熱水流体の存在する地下き裂や断層の位置を把握することであり，これらの位置は，AE・微小地震の震源位置を決定することにより推定可能である．しかしながら，従来の AE・微小地震計測では，地形の制約から観測ネットワークを十分に展開できないことや，観測される信号の非定常性が強い等の理由により，震源位置を高精度に決定できないことが多かった．地熱の利用を普及させるためには，重要な要素技術の一つとなっている熱水流体の存在位置計測法を確立することが不可欠である．

筆者らは，情報通信分野で用いられている概念や手法と，地下情報計測の分野で用いられている技術とを相互に融合し，新原理にもとづく解析法の開発を進めてきた．本研究は，AE・微小地震震源の高精度標定法の開発を目的として行われたもので，ここでは，地震計ネットワークの3成分弾性波検出器により計測された AE・微小地震信号を用いた震源位置高精度標定のための一連の多成分信号処理法が開発を行ってきた．

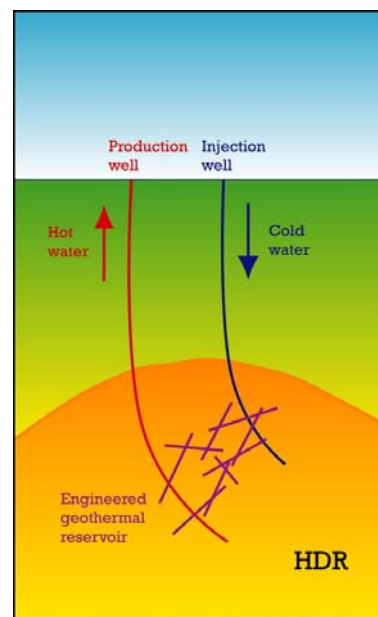


図 1: 深部地熱エネルギー抽出の概念.

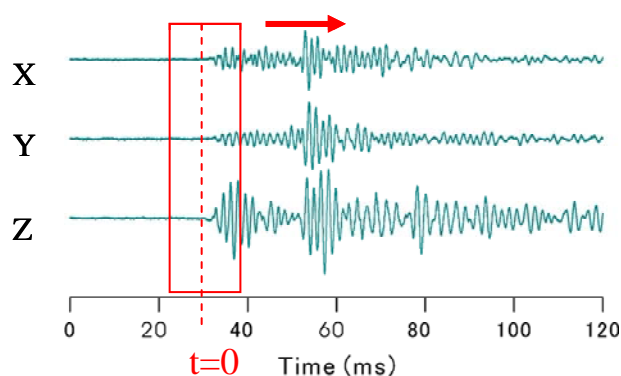


図 2: 微小地震の3成分波形例とスペクトル行列解析時間窓.

## 2. 研究の意義と研究内容

本研究は，音源位置の高精度同定や非定常スペクトルを用いた偏波解析など，ネットワーク間の情報処理や波動の信号処理に関連するものであり，その基礎概念と手法は波動を用いた様々な物理量計測に

適用可能であると考えられる。一方、地震予知や災害予防のために地震計ネットワークの整備が近年進んでいるが、そこでは、複数の観測点で計測された信号を用いて震源位置決定や規模の推定等がリアルタイムで行われており、ネットワーク間の情報伝達や波形信号処理など、情報通信技術や信号処理技術が重要な役割を担っている。

AE・微小地震震源の絶対位置や相対的位置関係を決定するためには、P波（縦波）到来方向の検出、P波到来時刻の検出、波形間のP波到来時刻差等の検出が必要である。これに関連して、筆者らは、AE・微小地震震源の高精度標定のため、以下の技術を開発している。

- (1) AE・微小地震波のスペクトル行列解析による震源方位の高精度推定法
- (2) 非定常スペクトル推定法を用いたスペクトル行列解析法によるP波到来時刻の高精度検出法
- (3) マルチプレット・クラスタリング解析による音源相対位置の高精度標定法

## 2-1 AE・微小地震波のスペクトル行列解析による震源方位の高精度推定法

筆者らは、まず多成分弾性波信号による波源方位推定法として、スペクトル行列解析法を開発した[1]。スペクトル行列は、多成分信号のパワースペクトルとクロススペクトルにより定義される行列である。従来、弾性波信号を用いた偏波解析は時間領域で行われていたが、筆者らは、AE・微小地震の3成分信号（水平方向2成分、垂直方向1成分）を用いてスペクトル行列を定義し、弾性波の3次元粒子運動を周波数領域で解析することを提案した。また、スペクトル行列の固有値を用いた評価関数を定義し、P波到来方向を高精度に検出するアルゴリズムを構築した。

スペクトル行列は次式で定義される。

$$S_P(t_j, f_k) = \begin{pmatrix} S_{xx}(t_j, f_k) & S_{xy}(t_j, f_k) & S_{xz}(t_j, f_k) \\ S_{yx}(t_j, f_k) & S_{yy}(t_j, f_k) & S_{yz}(t_j, f_k) \\ S_{zx}(t_j, f_k) & S_{zy}(t_j, f_k) & S_{zz}(t_j, f_k) \end{pmatrix} \quad (1)$$

ここに、 $t_j, f_k$  は、それぞれ時間と周波数、 $S_{ii}(t_j, f_k)$  はパワースペクトル、 $S_{ij}(t_j, f_k)$  はクロススペクトルである。本行列は、波動の3次元偏波情報（P波の場合は振動）を有しており、本行列の固有ベクトルならびに固有値( $\lambda_i$  ( $i=1,2,3$ ))を用いたパラメータ（(2)式）により、偏波主軸方向と偏波の度合い（例：直線偏波、または、楕円偏波）を定量評価することが出来る[2]。

$$C_R(t_j, f_k) = \frac{(\lambda_1 - \lambda_2)^2 + (\lambda_1 - \lambda_3)^2 + (\lambda_2 - \lambda_3)^2}{2(\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3)^2} \quad (2)$$

図3は、図2の波形に関してスペクトル行列解析により検出された弾性波P波（縦波）部分の偏波（振動）を示している。本例では、15ms以前の200Hz以下の部分において、振動方向が安定しておりP波振動方向が検出できている。それ以外の、時間、周波数では、地震計の共振成分やノイズのため、振動方向が安定していないことが分かる。筆者らは、本行列をもとに弾性波到来方向高精度検出のためのパラメータを定義し、弾性波到来方向の高精度検出法を開発した。従来、微小地震波の到来方向検出は、地震計と周囲の岩盤とのカップリングの状態に起因する周波数特性の変化により、数度から数十度の検出誤差を生じることがあった。しかし、スペクトル行列を用いた周波数領域を主とした解析により、その検出精度は、 $3^\circ$  から  $1^\circ$  まで向上することが出来た。

スペクトル行列解析法の開発により，弾性波信号の周波数領域での偏波解析が可能となり，その結果として低 S/N 信号，かつ 1 つの観測点からでも波源方位を高精度に検出することが可能となった．また本研究に関連して，多成分地震計の現位置での周波数特性評価法を開発した．

## 2-2 非定常スペクトル推定法を用いたスペクトル行列解析法による P 波到来時刻の高精度検出法

筆者らは，非定常スペクトル推定法を用いた時間一周波数領域での AE・微小地震の偏波解析法を開発した[2]．AE・微小地震信号は強い非定常性を有する信号であり，従来のスペクトル推定法では，高い時間分解能での解析は困難であった．そこで，本研究では，Choi-Williams 分布（式(3)）を用いてスペクトル行列を定義することにより偏波解析を行うことを検討した．

$$P(t, \omega) = \frac{1}{2\pi} \iiint_{-\infty}^{\infty} \exp[-j(\xi t + \tau\omega - \xi\mu)] \phi(\xi, \tau) f\left(\mu + \frac{\tau}{2}\right) f^*\left(\mu - \frac{\tau}{2}\right) d\mu d\tau d\xi \quad (3)$$

ここでは，スペクトル行列の固有値を用いた関数を定義することにより，高い時間分解能で，かつ，時間一周波数の両領域での偏波解析を可能にした．また，仮説検定法を導入することで時々刻々と変化する偏波状態を定量的に評価することを考案し，それをもとに P 波到来時刻を高精度に検出するアルゴリズムを開発した．本解析法の概要を以下に述べる．

次式により，弾性波の 3 成分波形の時間一周波数表現を推定する．

$$S_{\ell m}(t, f) = 2 \sum_{\tau=-\infty}^{\infty} W_N(\tau) e^{-2j\pi\tau/N} \times \left[ \sum_{\mu=-\infty}^{\infty} W_N(\mu) \frac{1}{\sqrt{4\pi\tau^2/\sigma}} \times \exp\left(-\frac{\mu^2}{4\tau^2/\sigma}\right) \right] \quad (4)$$

$$\left[ f^{\ell}(t + \mu + \tau) \times f^{m*}(t + \mu - \tau) \right] \quad \ell, m = 1, 2, 3$$

得られた時間一周波数表現により，(1) 式のスペクトル行列，ならびに(2)式を定義する．

3 成分弾性波信号のペクトルにより空間に描かれる軌跡は，雑音部では球状となるが，P 波成分が到来するとその形状は直線となる．したがって，P 波成分の到来時刻は，軌跡が球状から直線状に変化する時刻を検出すればよいことになる．この考えにもとづき，式(4)を利用して時間，周波数領域上で P 波の周波数成分を推定すると同時に，その到来時刻を検出する解析法を開発した．

時間一周波数領域上の時間  $t_q$ ，周波数  $f_r$  を中心とした 2 つの領域（図 4）で計算されたパラメータを次式のように定義する．

$$\overline{C_{R0}(t_q, f_r)} = \frac{1}{(2m+1)n} \sum_{j=q-1}^{q+n} \sum_{k=r-m}^{r+m} C_R(t_q, f_r) \quad (5)$$

$$\overline{C_{R1}(t_q, f_r)} = \frac{1}{(2m+1)n} \sum_{j=q}^{q+(n-1)} \sum_{k=r-m}^{r+m} C_R(t_q, f_r)$$

ここで、次の2つの仮説を立て、検定によりP波到来時刻とその周波数を検出することを考える。

帰無仮説  $H_0: \overline{C_{R0}(t_q, f_r)} = \overline{C_{R1}(t_q, f_r)}$  :

時間  $t_q$  の周波数  $f_r$  においてP波成分が到来していない (時間  $t_q$  前後で偏波直線性に变化無し)

対立仮説  $H_1: \overline{C_{R0}(t_q, f_r)} \neq \overline{C_{R1}(t_q, f_r)}$  :

時間  $t_q$  の周波数  $f_r$  においてP波成分が到来した (時間  $t_q$  前後で偏波直線性に变化有り)

上記の2つの仮説の検定するために、次式を定義する。

$$Z(t_q, f_r) = \sqrt{(2m+1)n-3} \left( Z_T(\overline{C_{R0}(t_q, f_r)}) - Z_T(\overline{C_{R1}(t_q, f_r)}) \right) \quad (6)$$

ここで、

$$Z_T(\overline{C_{R0}(t_q, f_r)}) = \frac{1}{2} \log \left( \frac{1 + \overline{C_{R0}(t_q, f_r)}}{1 - \overline{C_{R0}(t_q, f_r)}} \right) \quad (7)$$

$$Z_T(\overline{C_{R1}(t_q, f_r)}) = \frac{1}{2} \log \left( \frac{1 + \overline{C_{R1}(t_q, f_r)}}{1 - \overline{C_{R1}(t_q, f_r)}} \right)$$

である。

P波到来の有無は、 $Z(t_p, f_p)$  を次式で定義し、 $P(z)$  を分散が1の正規分布として信頼区間  $\alpha$  を予め与えておき、時間  $t_q$ 、周波数  $f_r$  を変化させる。

$$Z(t_p, f_p) = \max[Z(t_q, f_r)] \quad (8)$$

$$\alpha = \int_{Z(\alpha)}^{+\infty} P(z) dz \quad (9)$$

もし、次式が満たされるとき、仮説  $H_0$  は棄却、され、一方の仮説  $H_1$  が採択されることになり、その際の  $t_p, f_p$  において、P波が到来したと判定することが出来る。

$$\max[Z(t_p, f_p)] > z(\alpha) \quad (10)$$

図5は、実際に計測された微小地震の  $Z(t_q, f_r)$  を求めた例である。本結果では、低周波雑音が重畳しているにも関わらず、27.2msにおいて約100Hzの成分を有するP波の到来時刻が検出されている。

Choi-Williams分布を用いたスペクトル行列解析法の開発では、高い時間分解能で偏波解析を時間一周波数の両領域で同時に行うことが可能となり、異なるモード波の同定、波動の速度分散検出、P波到来時刻の高精度検出が可能となった。また、これらの解析法を基礎に、ウェーブレット変換を用いた偏波解析法が開発された。

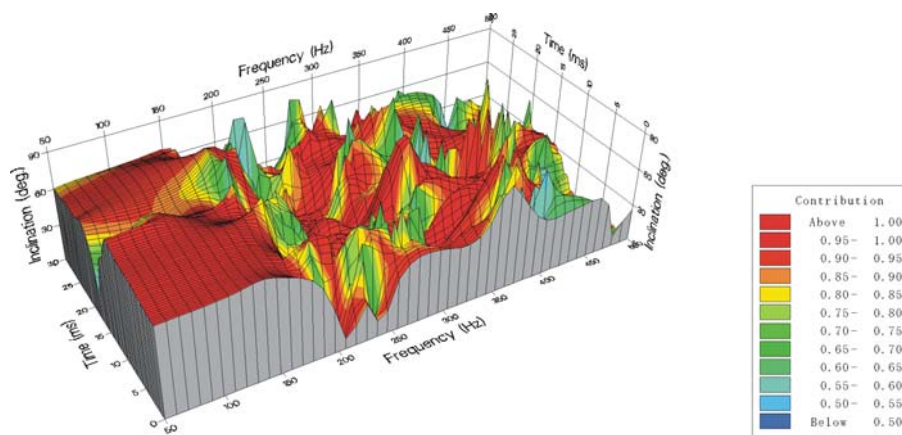


図 3：図 2 の波形について求められたスペクトル行列解析による P 波振動方向の時間、周波数分布（3 成分弾性波波形を解析することにより時間一周波数領域での偏波解析が可能）。

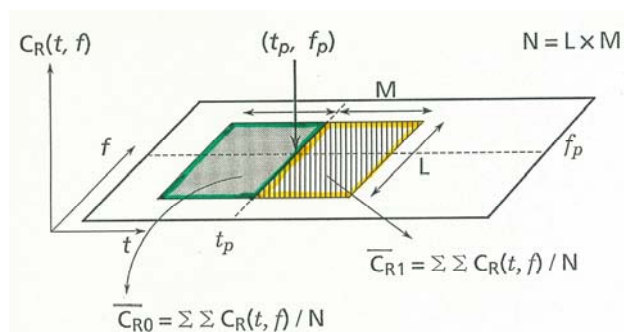


図 4：時間一周波数領域上での偏波変化検出のための評価パラメータの定義。

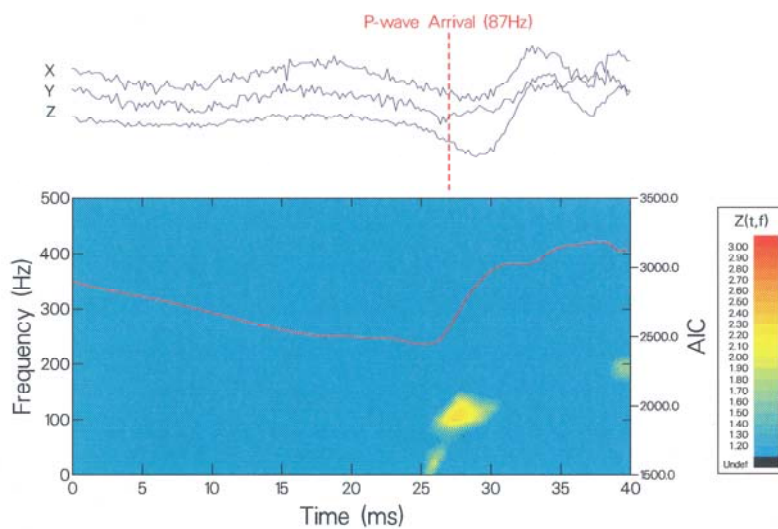


図 5：微小地震の  $Z(t_q, f_r)$  の計算例。本結果では、低周波雑音が重畳しているにも関わらず、27.2ms において約 100Hz の成分を有する P 波の到来時刻が検出されている。

### 2-3 マルチプレット・クラスタリング解析による音源相対位置の高精度標定法[3]

筆者らは、類似波形を有する AE・微小地震群（相互に近接する震源から波形が相互に類似した AE・微小地震が放射されることがあり、それらの震源分布から活断層面等の走向傾斜が推定できる）の波形群に着目し、震源の相対位置を高精度に標定する解析法（マルチプレット・クラスタリング解析）を開発した。本解析法は、波形の類似性を利用して、クロススペクトル解析により波の到来時刻差を検出し、検出したディレイを最適化することにより震源間の相対的位置関係を高精度に標定するものである。

マルチプレット・クラスタリング解析では、地震計ネットワークで取得された信号間の解析を行うことにより、深度数 km に存在する AE・微小地震震源の相対位置関係を、数 m の精度で決定することが可能となり、波源決定精度は従来法の約 10 倍向上した。

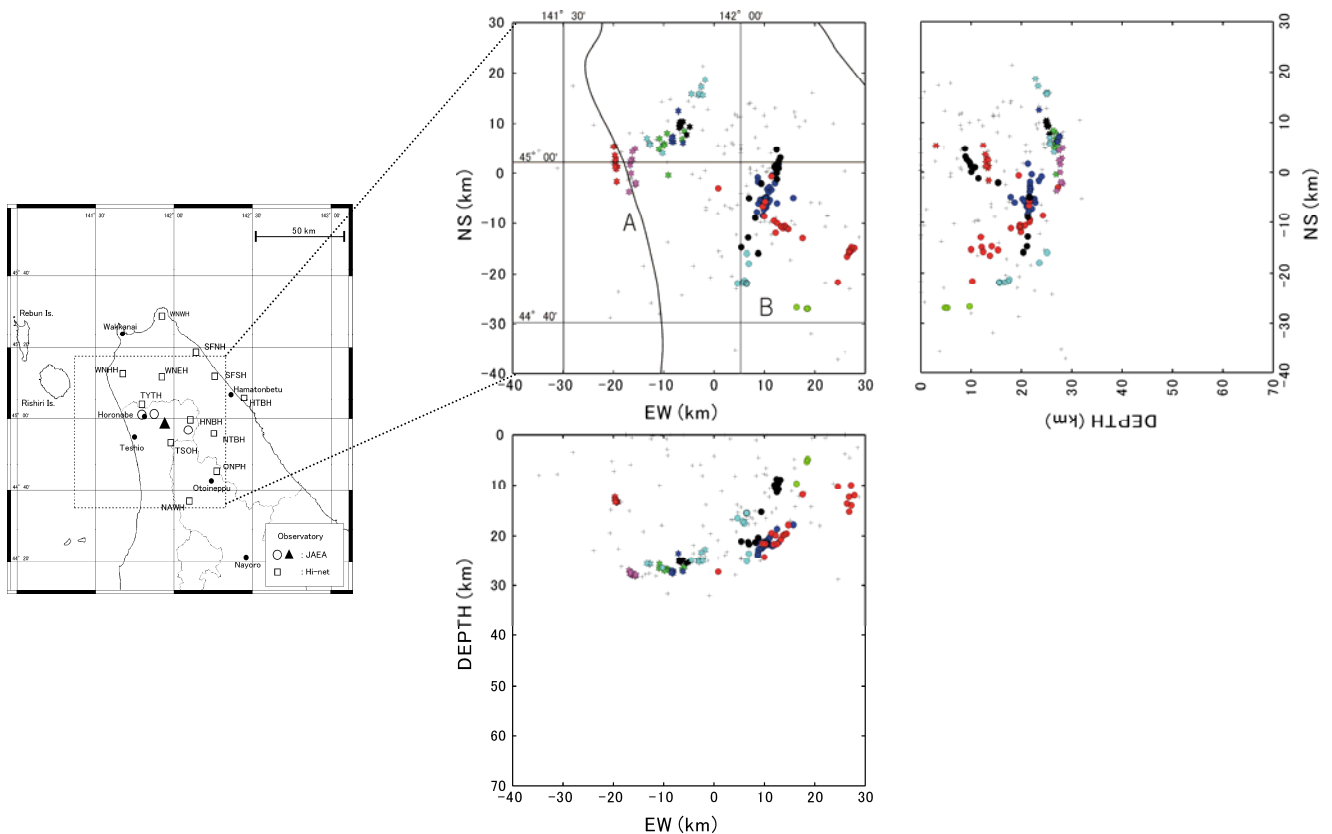


図 6：北海道北部微小地震への震源高精度法を適用した例。記号+は従来法，記号○，●は本研究の成果を適用した場合の震源分布。南北に走向を有する構造が抽出されている。

### 3. 研究成果における実用化への貢献内容

スペクトル行列を用いた P 波到来方向検出法は、NEDO（新エネルギー・産業技術総合開発機構）が進めてきた地熱開発プロジェクトにおいて、リアルタイムで AE・微小地震源を自動決定するシステム内に組み込まれ、実用された実績を有している。マルチプレット・クラスタリング解析法は、フランスをはじめとする内外の地熱開発プロジェクトにおいて、AE・微小地震解析法として利用され、地熱貯留層内の流体流動方向の計測等で重要な役割を果たしている。また、マルチプレット・クラスタリング解析は、近年整備された北海道北部の地震観測ネットで観測された内陸型地震群に適用され、地下数 km から 25 km 程度の深度に存在すると考えられている地震活断層の抽出が試みられている（図 6，7）。

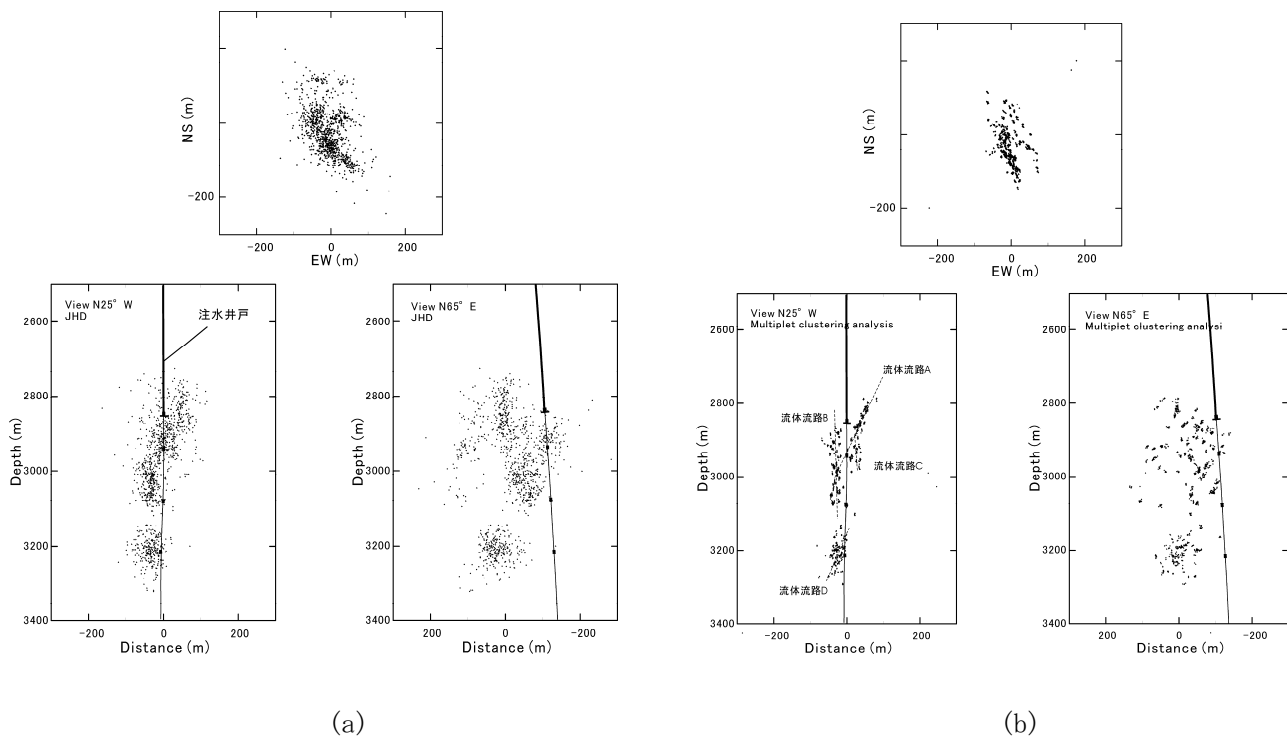


図 7：誘発微小地震をもちいた人工地熱貯留層構造評価結果（ソルツ高温岩体地熱フィールド（フランス））. (a)従来法, (b)本研究成果による方法. (b)では、震源決定精度向上により流体流路と考えられる構造（透水き裂ゾーン）が明確になっている.

#### 4. まとめ

一連の研究の結果、地震計ネットワークで計測された AE・微小地震の信号を用いて、地震計の周波数特性評価、震源絶対位置ならびに相対的位置関係の高精度標定が可能となり、それらをもとに、地下での流体移動に伴う震源位置の移動の様子や、地下での熱水流路形成メカニズムを推定することが可能となった。地下深度数 km に存在する地下き裂の構造計測は、AE・微小地震による方法が唯一とってよいいため、本研究の成果は深部地下計測に広く波及し、環境科学分野だけでなく地震学の分野でも用いられるようになった。

#### 参考文献

1. Moriya, H., K. Nagano and H. Niitsuma, Precise source location of AE doublets by spectral matrix analysis of triaxial hodogram, *Geophysics*, **59**, 36–45, 1994.
2. Moriya, H. and H. Niitsuma, Precise detection of a P-wave in low S/N signal by using time-frequency representations of a triaxial hodogram, *Geophysics*, **61**, 1453–1466, 1996.
3. Moriya, H., H. Niitsuma and R. Baria, Multiplet-clustering analysis reveals structural details within the seismic cloud at the Soultz geothermal field, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, **93**, 1606–1620, 2003.