

機関番号：11301

研究種目：基盤研究（B）

研究期間：2008～2010

課題番号：20360403

研究課題名（和文）先進的地熱抽出のための貯留層き裂の3次元同定法の構築

研究課題名（英文）Characterization of Subsurface 3-D Cracks for Advanced Geothermal Heat Extraction

研究代表者

林 一夫 (HAYASHI KAZUO)

東北大学・流体科学研究所・教授

研究者番号：30111256

研究成果の概要（和文）：現代地熱抽出では人工き裂を貯留層の核のひとつとして導入するのが一般である。これは、より効率的かつ大規模な熱抽出を可能とするためである。この人工き裂は堆積岩のなかでは1個の卓越したき裂として形成されることが多い。本研究は、この人工き裂を、内部を流体に満たされた3次元き裂としてモデル化し、き裂の広がり、位置、流体通路としての特性、例えば局所的流動抵抗などのき裂情報を、弾性波を照射したときの、き裂の応答から、推定するための方法を提示し、さらに、フィールドデータへの適用性を明らかにした。

研究成果の概要（英文）：In modern geothermal heat extraction, artificial fractures are usually introduced in order to produce geothermal heat more efficiently and more massively. The artificial cracks are predominantly large in sedimentary rocks. In the present report, we model the artificial crack as a 3-D crack filled with fluid. Then we studied the dynamic responses of the 3-D fluid filled cracks, such as size, location and conductivity. A new method is proposed to estimate the factors listed above. The applicability to field data was checked.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	4,900,000	1,470,000	6,370,000
2009年度	2,300,000	690,000	2,990,000
2010年度	2,100,000	630,000	2,730,000
総計	9,300,000	2,790,000	12,090,000

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：自然エネルギー・再生可能エネルギー・地熱エネルギー・弾性波・

き裂同定法

## 1. 研究開始当初の背景

(1) 地震波による震源同定は、地下せん断き裂（あるいは分断されたアスペリティ）が放射する弾性波を用いる点では、工学的地下利用における受動的 AE/MS (Acoustic Emission/Micro Seismicity) 法と類似してい

るが、後者は対象とするスケールがはるかに小さく、レイパスの影響の少ない極めて多数のイベントを得ることができる。近年の信号処理技術の格段に進歩と、新しいアルゴリズム（例えばマルチプレット解析、コラプシング法など）の導入により、AE/MS から震源付

近の構造まで推察できるという高度なレベルに達するに至っている。1999年以降、米国地熱協会定例講演会で特別のセッションが組まれている。本研究代表者も例年参加している。AE/MSによるき裂評価の研究は、日本では東北大学と電力中央研究所が拠点となっており、また、世界的には、米、仏、スイス、独、およびオーストラリアで熱心に行われている。

(2) 上記のAE/MS法は、水圧刺激等による誘発滑り（せん断型き裂変形）によって生じる場合を対象としている。本研究が対象としているものは、き裂内の流体圧の伝播にともなうもので、本質的に開口型のき裂変形モードである。これと類似なものとして、火山性微動がある。開口型のき裂振動による弾性波を多く含んでいる。この種の問題に先鞭を付けたものとしてはMIT大学の一連の研究がある。これらは、き裂内の流体として熔融マグマを想定して、き裂開口幅を非常に大きく（5m程度）設定している。このことは、地熱抽出ではあり得ない設定であり、その方法及び知見とも援用できない。

## 2. 研究の目的

(1) 卓越したき裂について、き裂自身の空間的広がり、通水性能、き裂面開口幅、き裂面接触剛性等を同定する手法を構築する。

(2) 室内模擬実験を実施し、流体と弾性体の連成振動によりき裂に生じる定在波（き裂波）の存在を明らかにする。

(3) 3次元き裂同定法をフィールドデータに適用し、適用性の高さを示す。

## 3. 研究の方法

(1) 楕円板状3次元き裂を含む弾性体（岩体）の動的応答特性が、ここで求めようとしているき裂の動特性である。解法としては、本研究代表者が開発した方法を使う。これは、Laplace像空間でBetti-Rayleighの相反定理を誘導される境界積分方程式を使う方法である。き裂同定は逆解析プロセスである。この逆解析にはLovenburg/Marquart法を用いた。き裂内の流動はNavier-Stokesの方程式

に従うものとした。

(2) アルミ材で試験片を作成し、所要の点で指示を支持して、インパルハンマにより加振した。試験片の概要を図1に示す。また、観測データの1例を図2に示す。

(3) 東北大学東八幡平実験フィールドで取得されたデータならびにオーストラリアのHDRプロジェクト(Cooper Basin)に上述の逆解析法を適用し、き裂規模等を推定した。東八幡平フィールドの地下構造条件の概略を示した(図3)。

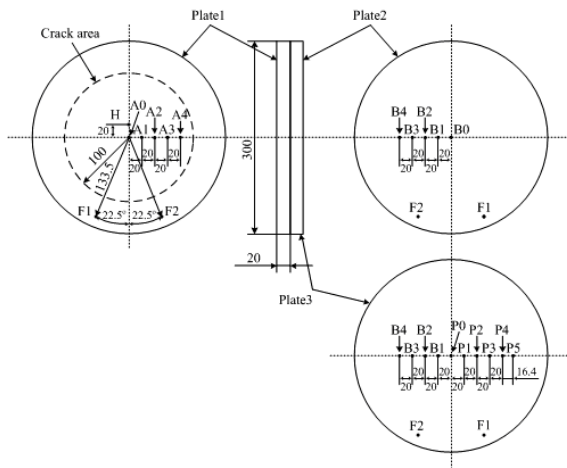
## 4. 研究成果

(1) 固有角振動数を決定する問題を固有値問題に帰着させるという新しい方法を考案して、固有角振動数を求め、全ての固有角振動数それぞれについて固有振動モードを得た。

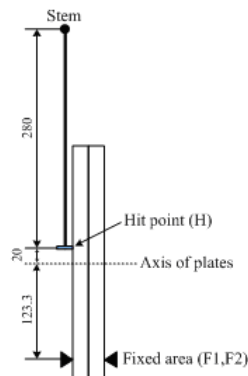
(2) 円板状き裂の場合、非軸対称振動モードは起こりにくいことが分かった。第5次までの低次の固有モードは全て軸対称モードである。また、液体が入っている場合について近似計算を行って集中インパルス集中荷重に対する応答を調べた結果も軸対称に極めて近い振動パターンであることが分かった。

(3) 二次元き裂で想定されるような振動モード（すなわち、き裂の幅方向ではなく、き裂の奥行き方向を振動の節とするような振動モード）は、アスペクト比が0.5程度のだ円板状き裂では発生しない。

(4) 本同定法を二つのHDRテストサイトに適用したところ、合理的な解を得ることが出来た。しかし、き裂モデルの違いにより、き裂内流体に明瞭な定在波が存在する場合と存在しない場合があることがわかった。よって現実の地下き裂の評価に関しては、ピーク周波数が得られない場合に対しても対応可能なき裂の評価法の構築が必要であることが示唆される。また、明瞭なピーク周波数が得られた場合においても、振動モードの解釈が非常に難しいものとなることが示唆される。



(a) アルミ円板試験片



(b) 打撃の様式図

図1：試験片概要と打撃の様子(単位 mm, 点 A0~A4 並びに B0~B4 には加速度センサ, P0~P5 には圧力センサを設置し, 点 F1 と F2 で固定し点 H を打撃).

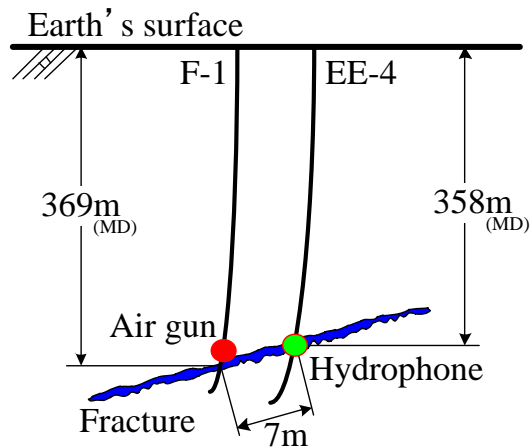


図2：東八幡平フィールド地下システム概要. 坑井 F-1, EE-4 が人工き裂につながっている. エアガンを坑井 F-1 と人工き裂の交点に, またハイドロフォンを EE-4 と人工き裂の交点にセットする.

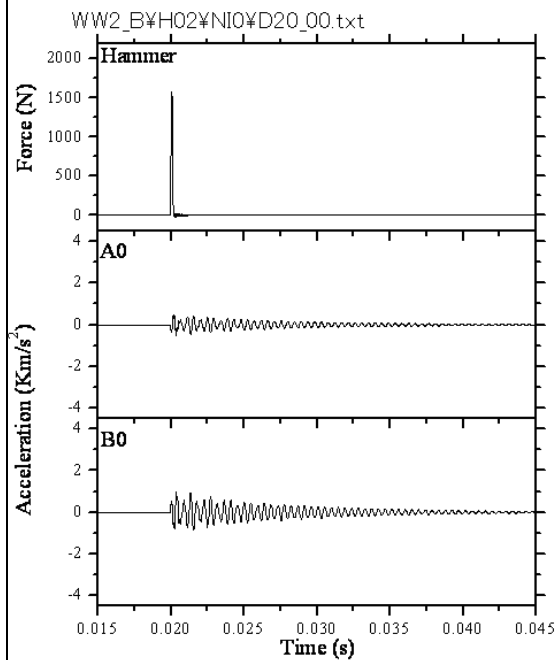


図3：き裂内が水で満たされた, 試験片 Plate1 と試験片 Plate2 の組み合わせの場合における波形の例 (上のグラフより, インパルスハンマの応答, 円板中央の測定点 A0 と B0 での加速度).

(5) 複数の井戸を考慮したき裂モデルを用いて, 岩手県東八幡平に存在する地下き裂の透水性等の評価を行った. この評価法の構築にあたっては, ピーク周波数を利用しない方法とした. その結果, 透水性に関しては他の評価結果と整合性がある結果が得られた. よって, 実フィールドでの本評価法の有効性が示された.

(6) 室内実験において, 試験片内部に存在するき裂内の流体に生じる定在波が, 試験片表面においても測定可能であることを明らかにした. き裂モデルより推定される. 周波数とは異なるものの, 流体圧の分布についてはある程度整合性の有る結果となった.

## 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3件)

- ① Shin ITO, Kazuo HAYASHI and Koji NAGANO, Characterization of a hydraulic fracture in the Higashi-Hachimantai geothermal model field, Japan, based on fluid

dynamics, Transactions of Geothermal Resources Council, Vol.35, (2011) to appear. 査読有

- ② Kazuo HAYASHI, Active Acoustic Characterization of Geothermal Reservoir Crack with Application to Field Data, The Reports of the Institute of Fluid Science Tohoku University, Sendai, Japan, Vol. 22, 2010, pp.1-28. 査読無
- ③ 伊藤 伸, 関根 孝太郎, 森谷 祐一, 林 一夫, 有限弾性体中の流体で満たされたき裂に生じる振動特性の検討(き裂に生じる定常波を測定するための最適な条件の検討) 日本機械学会論文集 A 編, 第 76 巻, 第 762 号, (2010), pp.158-163. 査読有

[学会発表] (計 6 件)

- ① 伊藤 伸, 林 一夫, き裂内流体の動特性を用いたき裂の透水性評価の基礎的検討, 日本地熱学会平成 22 年度学術講演会, 2010.11.26, B28, つくば市.
- ② 伊藤 伸, 林 一夫, 地熱抽出に用いられる坑井に関する二次元軸対称モデルの応力解析, 日本地熱学会平成 22 年学術講演会, 2010.11.25, P18, つくば市.
- ③ Shin ITO, Kazuo HAYASHI and Koji NAGANO, Estimation of Permeability of the Artificial Subsurface Fracture in Higashi-Hachmantai, Iwate, JAPAN, by the Dynamics of fluid in a Fracture, The Geoscience Society of New Zealand Conference and the New Zealand Geothermal Workshop, Nov. 22, 2010, p.170, Auckland, New Zealand.
- ④ 伊藤 伸, 林 一夫, 井戸を考慮した長方形形状地下き裂モデルの動的応答解析(岩体との連成振動を考慮しない場合), 日本地熱学会平成 21 年学術講演会, 2009.12.1, A21, 京都市.
- ⑤ 伊藤 伸, 林 一夫, 井戸を考慮した二次元の地下き裂モデルの動的応答解析, 日本地熱学会平成 20 年学術講演会, 2008.10.30, P06, 金沢市.
- ⑥ 高山 雅樹, 伊藤 伸, 林 一夫, 有限な弾性体中に存在する二次元き裂に生じる振動の数値解析, 日本機械学会M&M2008 材料力学カンファレンス, 2008.9.18, GS0909, 滋賀県草津市.

[その他]

ホームページ等

<http://geo1.ifs.tohoku.ac.jp/index-j.html>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

林 一夫 (HAYASHI KAZUO)  
東北大学・流体科学研究所・教授  
研究者番号：30111256

### (2) 研究分担者

伊藤 伸 (ITO SHIN)  
秋田県立大学・システム科学技術学部・准教授  
研究者番号：10315640

関根 孝太郎 (SEKINE KOTARO)  
東北大学・流体科学研究所・助教  
研究者番号：70361194

森谷 祐一 (MORIYA HIROKAZU)  
東北大学・大学院工学研究科・講師  
研究者番号：60261591