

孔内モードの周波数特性に基づく透水性き裂の計測

Measurement of a permeable fracture based on frequency response of borehole mode

○ 齊藤玄敏

Hiroyuki SAITO

弘前大学理工学部

Faculty of Science and Technology, Hirosaki University

キーワード: 周波数領域音波検層 (FDAL), フルウェーブ音波検層 (FWAL), 孔内ストーンリー波 (borehole Stoneley wave), 不連続面 (discontinuity), 透水性き裂 (permeable fracture)

連絡先: 〒036-8561 弘前市文京町 3 番地 弘前大学理工学部 知能機械工学科 齊藤玄敏

Tel:0172-39-3694, E-mail:saitoh@cc.hirosaki-u.ac.jp

1. はじめに

日本国内においては、石油代替エネルギー資源の開発、自然エネルギー資源の利用が推し進められつつあるが、遅々として進まない状況にあるよってよい。これには原油価格がこれまで比較的安価に推移していたことや、地球温暖化を深刻な問題として実感できなかったことが大きく影響している。しかし、近年、経済活動を急速に伸ばしている国々による石油需要の急激な増大は、化石資源である石油の枯渇に対する懸念を現実のものとしたばかりか、その消費活動にともなう温室効果ガスの排出増加は現在進行中の地球温暖化にさらなる拍車を掛けるものと懸念され、状況は一変している。まさに、石油代替エネルギー資源、自然エネルギー資源の開発・利用は急務となっている。

数ある代替エネルギーの中で、一応利用技術が確立されている地熱エネルギー資源は、エネ

ルギー賦存量、温室効果ガスの排出量の少なさ、純国産などの観点から、そのさらなる開発が要望されている¹⁾。特に、天然の条件に依存することなく能動的に地熱エネルギーの抽出を可能にする次世代型地熱開発は、高温乾燥岩体 (HDR) や高温湿潤岩体 (HWR) を利用するため適用地域が飛躍的に拡大するとともに抽出可能なエネルギー量が大幅に増大し、また、従来型地熱開発に比べ環境負荷が小さくなるので期待は大きい²⁾。

次世代型地熱抽出システムを実現するための重要なステップの一つに固体力学的設計がある。ここでは地下構造と地下き裂が第一支配因子となるが、地下構造が複雑な地熱地帯においても、これらを正確に計測・評価する技術を開発することが重要な課題である。また、システム造成後においても、地熱貯留層の正確な分布やその内部の微細な構造の把握、地熱貯留層

を構成する地下き裂の動的挙動の解明を行うために不可欠な技術となることは言うまでもない。

本研究は、従来の音波検層法では測定が難しい複雑な地下構造下においても、地層境界面や透水性地下き裂の検出を実現する周波数領域音波検層法について報告する。

2. フィールド実験とデータの特徴

音波検層法は、トランスミッタ（音波発信器）とレシーバ（音波受信器）を内装した検層ツールを地中に掘削された孔井内に入れ、それを移動させながら岩体を透過する弾性波を連続的に測定する方法である³⁾。従来は、測定データの記録はアーミングパルス部からP波やS波の到来部に限定されていたが、記録容量の大型化や検層器自体の発展によって、現在では波形全体を記録するフルウェーブ音波検層（FWAL）が主流となっている⁴⁾。また、これによって、新たに疑似レーリーモード、孔内ストーンリーモードが解析の対象として加わり、これらの波の伝搬特性を利用した地下き裂システムの微細構造や動的挙動の評価が試みられるようになっている⁵⁻⁷⁾。

Fig.1 にフルウェーブ音波検層を実施した東八幡平フィールドの概略図を示す。本フィールドは HDR 地熱抽出システムを模擬した実験フィールドで、岩手県松尾村赤川山国有林に位置する。また、本フィールドの熱交換システムは、深度 280-380m の存在する石英安山岩質熔結凝灰岩（小和瀬川熔結凝灰岩）中に、(1)F-1 井掘削、(2)水圧破砕法による人工き裂の作成、(3)EE-4 井掘削の順に作成された。人工き裂は F-1 井と深度 369m(測深), EE-4 井と深度 358.2m(測深) で交差していることが確認されており、EE-4 井の掘削時に採取された定方位コア、及び掘削後に行われたインプレッションパッカーによる方位測定から、人工き裂の走行と傾斜は

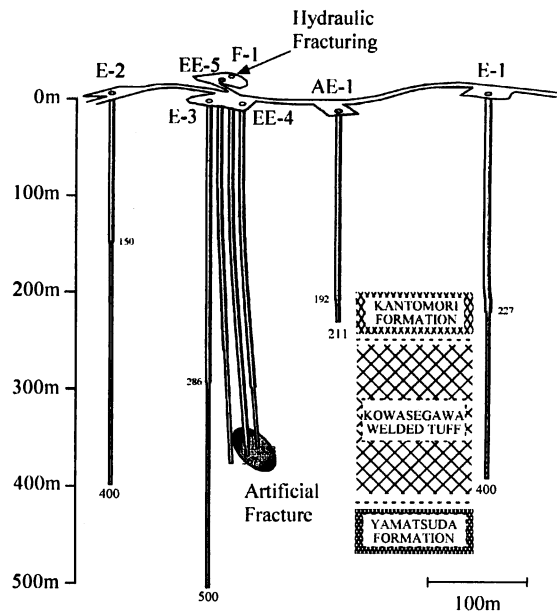


Fig.1 Schematic view of the Higashi-Hachimantai geothermal field

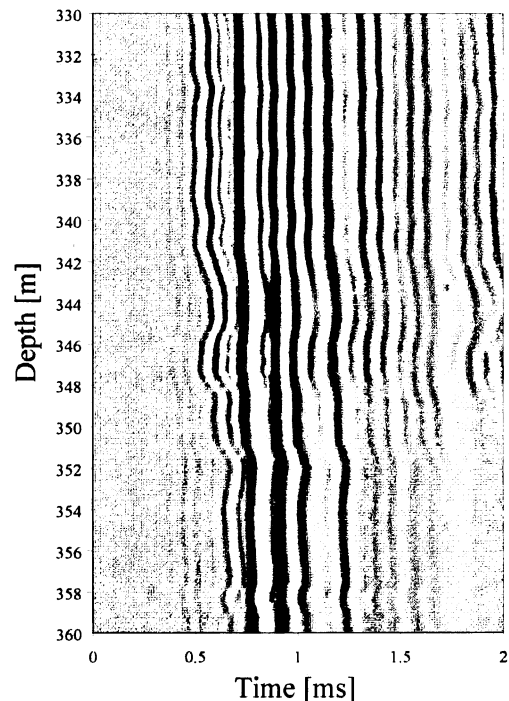


Fig.2 Variable density acoustic log in well EE-4 at the Higashi-Hachimantai field. The P-wave transit times are between 0.25-0.35 ms on the plot. The arrivals with large amplitude between 0.7-1.3 ms are borehole Stoneley waves.

各々 $N61^{\circ}E$, $NW46^{\circ}$ であることが確認されている^{8,9)}。

フルウェーブ音波検層は EE-4 井の深度

330-360m で行われ、0.1m ごとにデータを取得した¹⁰⁾。用いた検層器はで送信機の中心周波数が 15kHz、送-受信器間の距離が 3ft のシングルレシーバタイプである。受信信号はサンプリング周波数 500 kHz で、極性符合付 11bit のデジタル信号に変換し、データ長 1k ワードで記録した。

Fig.2 に測定データを示す。図は振幅の大きさを濃淡表示したもので、約 0.25-0.35ms に P 波の到来、約 0.7-1.3ms に孔内ストーンリー波の到来が見られる。

Fig.3 は各波形から P 波の到来時刻を読み取り、P 波速度を求めた結果である。図は岩盤の熔結度と岩相を併せて示している。検層区間の岩相はデサイト質熔結凝灰岩とデサイト質礫質凝灰岩から構成されており、深度 351m に岩相が変化する境界が存在する。また、熔結度は、強熔結、中熔結、弱熔結の 3 段階で表される岩盤堅さの指標であり、検層区間には深度 343m、346.5m、347.5m に境界がある。図より、P 波速度の変化は岩相と熔結度の変化に良く対応していることはわかるが、P 波速度のみから境界や透水性き裂の位置を特定することは難しい。

3. 周波数領域音波検層法

孔内ストーンリー波は固-液境界である孔壁近傍を伝搬する表面波で、振幅が大きいため識別が容易である。また、透水性き裂が存在する位置で大きく減衰するため、透水性き裂の検出に効果を発揮している孔内モードである¹¹⁻¹³⁾。

本研究では、検層波形中で観測された孔内ストーンリー波の周波数領域における特性を使って、境界面と透水性き裂の位置を求める方法を以下で検討する。

3.1 境界面の検出

孔内ストーンリー波の周波数領域検層図は、時系列の検層波形の二乗振幅から孔内ストーン

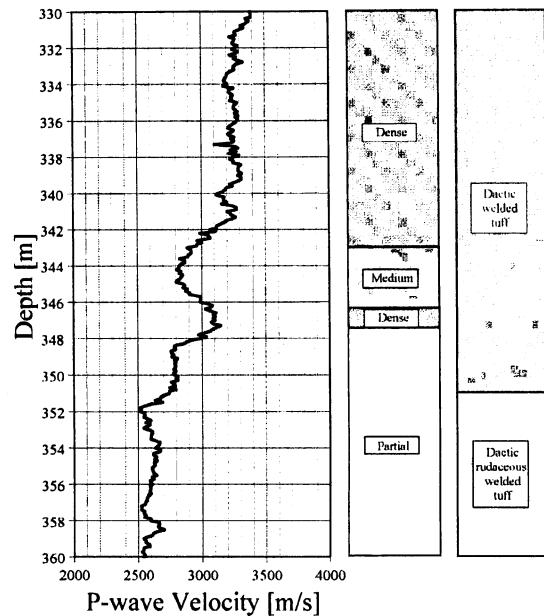


Fig.3 P-wave velocity log corresponding to the variable density log in Figure 2, and logs of degree of welding and lithology, in well EE-4 at the Higashi-Hachimantai field.

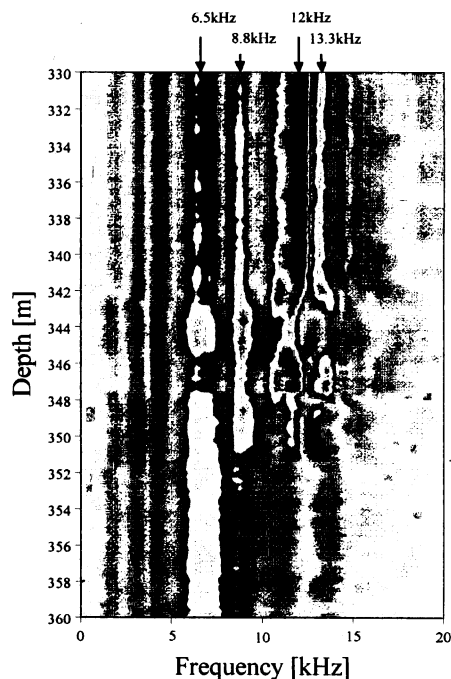


Fig.4 Frequency-domain Stoneley wave log in well EE-4 at the Higashi-Hachimantai field. The depth range is 330-360 m. Notable peaks are recognized at the frequencies of 6.5, 8.8, 12, and 13.3 kHz.

リー波の波束の範囲を求め、次にその範囲を窓関数で切り出しフーリエ変換する。最後に得られた振幅スペクトルを深度順に並べることで作

成した。

Fig.4 に検層区間の周波数領域検層図を示す。図より、この検層区間の孔内ストーンリー波は主に4つの周波数成分(6.5, 8.8, 12, 13.3kHz)で構成されていることがわかる。また、孔内ストーンリー波の振幅を観察すると、柔らかい岩盤では低周波が卓越し、堅い岩盤では高周波が卓越する傾向が見られ、岩盤の性質(岩種、熔結度、P波速度)の深度分布と非常に相関が高いことがわかる。このことから、孔内ストーンリー波の周波数検層図は境界面の検出に有効であることがわかる。

3.2 透水性き裂の検出

Fig.5 に4つの周波数成分各々の孔内ストーンリー波振幅の深度分布を示す。岩盤の構造が複雑なため、振幅が深度に対して大きく変化している。そのため、いずれの図からもき裂の位置を特定することはできないが、低周波数の振幅(図(a)と(b))は固い岩盤で小さく、柔らかい岩盤では大きくなる。それに対して、高周波の振幅(図(c)と(d))は逆の関係になることわかる。この性質から、4つの振幅の深度分布を荷重平均すると振幅分布は一定になり、透水性き裂の位置は下に凸になると予想される。

荷重平均は次式で表される。

$$EFFD(d) = \frac{1}{W} \sum_{i=1}^N w_i S_i, \quad (i = 1, 2, \dots, N) \quad (1)$$

$$W = \sum_{i=1}^N w_i, \quad (i = 1, 2, \dots, N) \quad (2)$$

ここに、 w_i は重み、 S_i は孔内ストーンリー波の振幅分布、 i は振幅分布数である。重みの決定には遺伝的アルゴリズムを用いた。評価関数は式(1)の分散を用い、透水性き裂が存在しない330-350mの区間の分散が最小になるときの重みを最適値とした。

Fig.6 と Fig.7 に透水性き裂の位置検出を試みた結果を示す。Fig.6 は重みが等しい場合で、個々の境界面の影響が強く、透水性き裂を識別

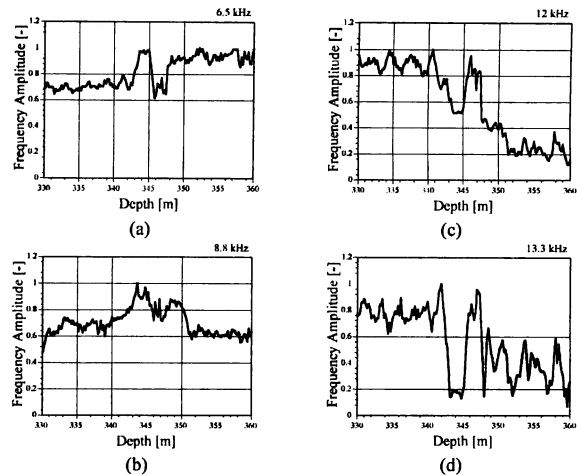


Fig.5 Stoneley wave amplitude logs at four frequencies: (a) 6.5 kHz, (b) 8.8 kHz, (c) 12 kHz, and (d) 13.3 kHz.

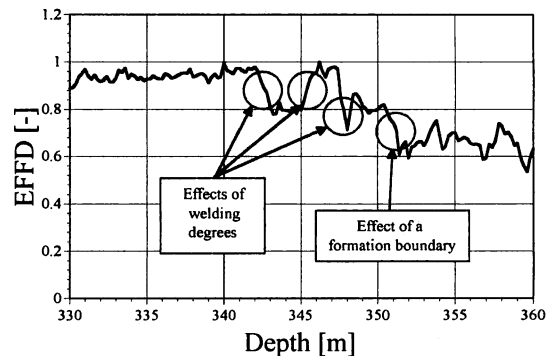


Fig.6 EFFD with equal weights for all w_i in Equation (1).

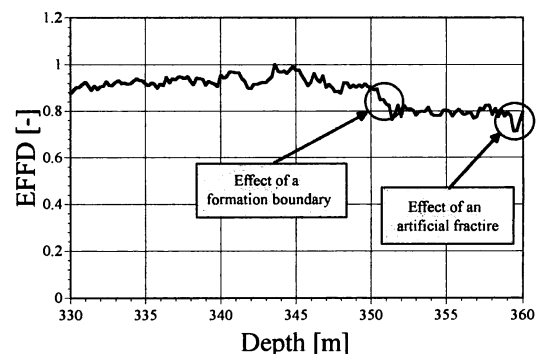


Fig.7 EFFD with the optimum weights w_i as determined by a genetic algorithm.

することは難しい。Fig.7 は重みを 1 : 0.6 : 0.5 : 0.1 とした場合で、359m 付近における振幅分布が下に凸となっており、透水性き裂の位置が容易に識別できる。

4. 検討

Fig.4 と Fig.7 の周波数領域検層により境界面と透水性き裂の位置は, Fig.3 の岩相と熔結度の分布と 1m 程度ずれている. これは検層器の送一受信器間距離 (3ft) に起因している. 送一受信器間距離が大きい検層器を使用すると境界面と透水性き裂の検出能の低下を招くが, デコンポリューション処理などを行うことで, この問題はある程度回避できる.

東八幡平フィールドの人工き裂の透水率は 0.05cm/s と評価されている¹⁵⁾. き裂面を滑らかな平行平板と仮定して 3 乗則を用いると, き裂の開口幅は約 0.1mm になる. したがって, 提示した方法は現段階で開口幅 0.1mm 以上の透水性き裂の検出に対して有効であるといえる.

透水性き裂の検出では, 周波数振幅の深度分布を荷重平均すると一定値になることと, 孔内ストーンリー波は透水性き裂によって全周波数帯域で減衰することの 2 つを仮定している. 前者はエネルギー保存から成立しそうであるが詳細な検討が必要である. 後者はビオ・ローゼンバームの簡略化モデルで確認されているので問題にならない.

5. まとめ

本研究では, フルウェーブ音波検層データを時間領域から周波数領域に変換することで得られる周波数領域音波検層図に現れる特徴を利用して, 境界面と透水性き裂の位置を求める新しい手法を示した. 今後は, 他のフィールドにおける解析例を増やし, 本手法を確かなものにしていくとともに, 透水性き裂の開口変位を求める方法の開発に取り組む予定である.

謝辞: 本研究を行うに当たり, 貴重なデータを提供して頂いた, 東北大学工学部の地熱開発工学研究グループ (GEEE) の皆様に深く感謝いたします. また, 本研究は文部科学省科学研究

費補助金事業の助成 (基盤研究 (C), No. 18560778) を受けて実施したことを付記するとともに, 関係者各位に感謝の意を表します.

参考文献

- 1) 日本地熱調査会: Geothermal Power in Japan (2001).
- 2) NEDO: 地熱エネルギーの技術開発を担う(2002).
- 3) 物理探査学会: 物理探査ハンドブック (1998).
- 4) Paillet, F. L., and Cheng, C. H., 1991, Acoustic waves in boreholes, *CRC Press*.
- 5) Cheng, C. H. and Toksöz, M. N., 1983, Determination of shear wave velocities in "slow" formation: *Trans. SPWLA 24th Ann. Logging Symp.*, Calgary, Canada, Paper V.
- 6) Stevens, J., and Day, S. M., 1986, Shear velocity logging in slow formations using the Stoneley wave: *Geophysics*, **51**, 137-147.
- 7) Johnson, D. L., Koplik, J., and Dashen, R., 1987, Theory of dynamic permeability and tortuosity in fluid-saturated porous media: *J. Fluid Mech*, **176**, 379-400.
- 8) Hayashi, K., Ito, T., and Abé, H., 1987, A new method for the determination of in situ hydraulic properties by pressure pulse tests and application to the Higashi Hachimantai geothermal field: *J. Geophys. Res.*, **92**, 9168-9174. Stevens, J., and Day, S. M., 1986, Shear velocity logging in slow formations using the Stoneley wave: *Geophysics*, **51**, 137-147.
- 9) Niitsuma, H., and Saito, H., 1991, Evaluation of the three-dimensional configuration of a subsurface artificial fracture by the triaxial shear shadow method: *Geophysics*, **56**, 2118-2128.
- 10) Saito, H., and Hayashi, K., 2000, Sonic log in a fluid-filled borehole with a fracture resulting from hydraulic fracturing: *Proc. of the World Geother. Cong. 2000*, 2833-2838
- 11) Endo, T., Tezuka, K., Fukushima, T., Brie, A., Mikada, H., and Miyairi, M., 1998, Fracture evaluation from inversion of Stoneley transmission and reflections: *Proc. Fourth SEGJ Internat. Symp. - Fracture Imaging -*, Soc. Explor. Geophys. Japan, 389-394.
- 12) Hornby, E. D., Johnson, D. L., Winkler, K. W., and Plumb, R. A., 1989, Fracture evaluation using reflected Stoneley-wave arrivals: *Geophysics*, **54**, 1274-1288.
- 13) Tang, X.M., and Cheng, C. H., 1989, A dynamic model for fluid flow in open borehole fractures: *J. Geophys. Res.*, **94**, 7567-7576.
- 14) Goldberg, D. E., 1989, *Genetic algorithms in search optimization and machine learning*: Addison Wesley.
- 15) Hayashi, K., and Abé, H., 1989, Evaluation of hydraulic properties of the artificial subsurface system in Higashihachimantai geothermal model field: *J. Geothermal Research Society of Japan*, **11**, 203-215.
- 16) Tang, X.M., and Cheng, C. H., and Toksöz, M. N., 1991, Dynamic permeability and borehole Stoneley waves: A simplified Biot-Rosenbaum model: *J. Acoust. Soc. Am.*, **90**, 1632-1646.