時間-周波数表現による地下き裂面を伝搬する境界波の速度推定[†]

永 野 宏 治*・新 妻 弘 明**

Estimation of Guided Wave Velocity in Subsurface Fracture Using a Time-Frequency Representation Technique

Koji NAGANO* and Hiroaki NIITSUMA*

Velocity of guided waves which propagate along a subsurface fracture is estimated by means of a wave detection technique based on time-frequency representations. Propagation characteristics of the guided waves depend on not only geometric features of the interface but also mechanical properties on it. These interface conditions sensitively affect the propagation characteristics because their energy concentrates on the interface and they propagate along the interface. Measurement of the guided waves, therefore, has an advantage to characterize the interface condition. This energy distribution, however, makes it difficult to use an array sensor in velocity measurement. Number of sensors which can be arranged near the interface is limited, in particular, in a field measurement.

We examine a wave detection technique based on the time-frequency representations. The time-frequency representations combine time-domain and frequency-domain analyses to distinguish the guided waves from other waves and detect an arrival of each frequency component. This technique is applied to the estimation of the guided waves trapped in an artificial subsurface fracture. Specific patterns of both a wave source and detected guided waves are analyzed in the time-frequency representations. A result by the time-frequency representation analysis shows a typical dispersion pattern of the fundamental symmetric mode of the guided waves.

Key Words: guided waves, time-frequency representations, pseudo-Wigner distribution, characterization of interface

1. ま え が き

岩盤の内部に生成あるいは作成したき裂の形状とき裂面の接触状態の計測が問題になっている¹⁾。地下き裂はトンネルやダム等においては岩盤の強度や安全性を大きく支配する。また、地下き裂を熱交換面として利用する地熱エネルギー開発では、熱採取効率や寿命等の性能評価に地下き裂の評価が不可欠である²⁾。しかし、地下き裂の計測では十分な精度で満足のいく情報が得られていないのが現状である¹⁾。岩盤内に広がる地下き裂を人間は直接見たり触れたりできず、また、電磁波の伝搬能力も

低いいため、地下き裂の計測では弾性波を使った遠隔計測が主に用いられている。しかし、地下き裂における低コントラストな音響インピーダンスや媒質の不均質性等の地下固有の問題が地下き裂計測を困難にしている。また、センサを設置する坑井の掘削が高価なため使える坑井は少なくセンサの数は限られる。しかも坑井は狭い空間のため計測装置の形状と性能が制限されることも計測を難しくしている。したがって、地下き裂計測では地下き裂の特徴をうまく評価できる測定原理に基づく新たな計測方法の開発が重要な課題である。そして、制限が多い地下き裂の計測では、限られた情報を有効に活用できる信号処理技術の開発がとりわけ重要である。

本論文でとりあげる境界波とは、弾性的な性質が異なる媒質の境界面にエネルギーが集中して伝搬する弾性波である³⁾。境界波は自由表面を伝搬するレーリー波等の表面波とは一般に区別され、固体/固体、固体/液体あるいは3層以上の層構造の境界面を伝搬する弾性波をい

[†] 第34回計測自動制御学会学術講演会で発表(1995・7)

* 室蘭工業大学 室蘭市水元町27-1

** 東北大学工学部 仙台市青葉区荒巻字青葉

* Muroran Institute of Technology, Muroran

** Faculty of Engineering, Tohoku University, Sendai
(Received March 31, 1995)

(Revised December 25, 1995)

う。境界波を境界面の弾性的・幾何学的性質の評価に用いる理由として次の2点があげられる。

- ①境界波の伝搬特性は媒質の弾性的性質以外に境界面の幾何学的性質つまり接触状態や境界面の大きさに強く影響される。
- ②境界波はそのエネルギーが境界面付近に集中ししかも境界面に沿って伝搬するため、境界面の透過波や反射波に比べ、境界面の性質に敏感である。

境界波を使った地下き裂面の計測法は地下き裂面の接触状態を直接評価できる点が他の計測法にはない特徴である。2つの固体が接触した地下き裂面では一般に音響インピーダンスのコントラストが小さいため、弾性波トモグラフィーのような縦波や横波の透過・反射特性に着目した計測法⁴⁾では、その接触状態を評価するには限界がある。それに比べ、境界波は地下き裂面に沿って伝搬するため、地下き裂面の接触状態の違いに強く反応する伝搬特性の変化が境界波には期待できる。

一般に波の伝搬特性を評価するには伝搬パスに沿って配置したアレイセンサを用いる計測方法が有効である⁴⁾。アレイセンサにより波数に関する情報を得ることが可能になり、しかも信号源の初期位相の影響を受けない測定ができる。一方、境界波はエネルギーが境界面近傍に集中しているため、境界波を測定するにはセンサをその境界面近傍あるいは境界面内に設置する必要がある。しかしながら、実フィールドでは地下き裂面の近くにセンサを多数配置することが困難な場合が多いため、実フィールドの境界波計測では測定できるセンサの数に限界がある。したがって、実フィールドの地下き裂面を対象にした境界波計測では、限られた数の測定点で境界波の伝搬特性を推定する手法の開発が重要になる。

境界面の接触特性は境界波の分散性に強く影響を与える^{5),6)}。したがって、境界波の分散性を評価することにより境界面の接触特性を推定できる可能性がある。しかし、実フィールドの境界波計測では、その分散性の評価が幾つかの原因により困難であった。例えば、実フィールドで現在利用可能な音源は少なからず非定常な振動を発生する特性をもつと考えられる。また、境界波の速度は岩石の縦波や横波に比べ遅いため、境界波はそれらに重畳して計測される。さらに、測定対象以外の境界での反射波や変換波が混入する可能性がある。これらの境界波以外の波や音源の非定常性が境界波の速度評価を困難にしている。

時々刻々と性質が変化する不規則な現象のパワースペクトルを評価するために、時間-周波数表現が使われている^{7)~10)}。時間-周波数表現の1つ Wigner-Ville 分布は、短時間 Fourier 変換にみられる時間と周波数の不確定性

の制限を受けないため、高い時間分解能と周波数分解能で現象を評価できる。境界波計測のように次々と新しく入力する複数の波の特定とその周波数特性の評価に時間-周波数表現は有効と考えられる。

本論文では、地下き裂面を伝搬する境界波の速度を数が限られた測定点で時間-周波数表現を用いて推定する解析方法を検討し、推定した速度から評価した地下き裂面の接触状態の特徴を述べる。まず、人工地下き裂を伝搬する境界波を計測する実験の概要を述べる。そして、時間-周波数表現を使って境界波の特徴と境界波の速度の推定方法を検討し、速度の解析結果から推定できるき裂面の接触状態の特徴を述べる。なお、本論文で検討する計測法は、一般の材料や構造物中のき裂評価にも適用可能であり、特に大型の構造物中のき裂評価に有効である。

2. 人工地下き裂を使った境界波計測実験

境界波の計測は岩手県東八幡平にある東北大学東八幡平実験フィールドの人工地下き裂を用いて行った。Fig. 1に本実験フィールドの坑井の配置と地下き裂の推定形状を示す。地下き裂は、既存き裂が少ない小和瀬川凝灰岩層内に掘削したF-1井の測深369.0mに水圧破碎により作成した¹¹⁾。EE-4井は地下き裂作成後に掘削し、測深358.2mでこの地下き裂に交わっている。この2つの坑井と地下き裂の交点の直線距離は6.7mである。作成

Fig. 1 Illustration of the Higashi-Hachimantai field

した地下き裂が円板状と仮定すると、破碎流体の圧入総量から地下き裂の半径は約 60 m と推定されている¹¹⁾。水圧破碎では地下き裂内にき裂支持剤(40 メッシュサンド)を圧入したため、地下き裂面はそのき裂支持剤を介して部分的に接触した状態になっている¹²⁾。

境界波の計測実験では、地下き裂に交わる一方の坑井 F-1 井のき裂交点直上測深 367.0 m に音源としてエアガン、他方の坑井 EE-4 井のき裂交点の測深 358.2 m にハイドロフォンを設置した^{13),14)}。坑井内は水で満たされている。Fig. 2 に境界波計測の概念図を示す。2 つの坑口は、油圧により坑口を閉じるリュウブリケートを使って閉止し、地上より地下き裂を加圧しながら境界波を計測した。Fig. 3 に地下き裂を加圧した時の坑口圧の変化を示す。エアガンの周波数帯域は 5 Hz~300 Hz であり、エアガンにはガス発射時刻を測定するためにジオフォンが内蔵されている。ハイドロフォンは 60 Hz~30 kHz の帯域で平坦な感度を持ち、60 Hz 以下では感度はなだらかに低下している。ハイドロフォンで測定した信号は地上で遮断周波数 300 Hz のベッセル特性の低域通過型フィルタを通した後、サンプリング周波数 10 kHz でデジタル信号に変換し記録した。

地下き裂に沿って伝搬する境界波はそのエネルギーが液体層に集中している⁵⁾。したがって、坑井と地下き裂の交点において境界波はチューブウェーブに変換し坑井内を伝搬する。EE-4 井の 6 つの深度に設置したハイドロフォンによりチューブウェーブを測定し、き裂交点で発生したチューブウェーブを検出することにより、地下き

Fig. 2 Concept of guided waves measurement for subsurface fracture characterization

裂に沿って伝搬する境界波を決定した¹³⁾。また、坑壁に固定した三軸弾性波検出器により境界波が入力した時の岩石層の運動を測定した結果、伸縮型の振動が地下き裂を伝搬する境界波では卓越していた¹³⁾。

地下き裂を加圧した時にハイドロフォンで計測した波形を Fig. 4 に示す。同図の波形の初動及び三軸弾性波検出器で測定した 3 次元粒子運動を解析した結果、岩石を

Fig. 3 Wellhead pressure during the guided waves measurement

Fig. 4 Waves detected with a hydrophone during the guided waves measurement. An arrow in the figure indicates an arrival of the guided waves

伝搬する縦波の速度 α と横波の速度 β はそれぞれ $\alpha = 3000$ m/s, $\beta = 1750$ m/s であった。縦波、横波の検出誤差と伝搬距離の測定誤差による、速度の推定誤差は約 10% である。チューブウェーブの解析¹³⁾によれば、同図に矢印で示した時刻に入力した波が地下き裂に沿って伝搬する境界波である。同図では地下き裂の加圧に伴い境界波の同位相の波が遅れる現象が観測された。

3. 擬似 Wigner 分布による境界波の解析

3.1 境界波の速度推定の原理

境界波のエネルギーは地下き裂近傍に集中しているため、その境界波の速度を計測するにはアレイセンサを地下き裂近傍に配置する手法が有効であろう。しかし、多数の坑井の掘削は経済的に制限されるため、地下き裂近傍に配置できるセンサの数は極端に限られる。本論文の東八幡平実験フィールドでは、地下き裂に交差している坑井は 2 本であり、音源と 1 つのセンサを配置できるだけである。したがって、本論文で解析する境界波のデータにはアレイセンサ計測で使われるクロススペクトル解析を適用できない。

また、音源の非定常性と伝搬媒質の不均質性が境界波の速度推定を困難にしている。音源であるエアガンは坑井内に圧縮ガスを発射し境界波を励振する。エアガンは大振幅のパルス状の波を励振するのではなく、圧縮ガス発射に続く気泡振動によって複雑に変化する波を励振する¹⁵⁾。また、岩石の縦波と横波の他に坑底をはじめとする様々な境界面での反射波と変換波が境界波に重畳して入力することが考えられる。したがって、定常性にもとづく波形解析には限界がある。

本論文では、非定常に変化するパワースペクトルの推定に有効な時間-周波数表現を境界波の速度推定に適用する。この解析では、音源の振動とセンサの測定波形について時間と周波数の両領域におけるエネルギー分布を解析することにより、境界波や他の波を特定し周波数成分毎に伝搬時間を推定する。そして、別の測定によって求めた境界波の伝搬距離を使って、各周波数成分について速度を決定する。境界波の分散性は境界面の接触特性と密接な関係があるため、各周波数成分について速度を評価することは接触特性を評価するうえで不可欠である^{5), 6)}。また、次々に遅れて入力する波の特定に時間-周波数表現は有効と考える。

3.2 擬似 Wigner 分布

擬似 Wigner 分布は非定常な信号のパワースペクトルを表す時間-周波数表現の一つであり、時間軸上を移動する窓関数によって切り出された信号に対する Wigner-Ville 分布である¹⁶⁾。信号 $x(t)$ に対する Wigner-Ville 分

布は

$$W_x(t, f) = \int_{-\infty}^{\infty} z\left(t + \frac{\tau}{2}\right) z^*\left(t - \frac{\tau}{2}\right) e^{-j2\pi f\tau} d\tau \quad (1)$$

である⁹⁾。ただし、 $z(t)$ は $x(t)$ の解析信号、添字は対応する信号名を表し、 j は虚数単位、 $*$ は複素共役を表すこととする。信号 $x(t)$ の擬似 Wigner 分布を $\tilde{W}_x(t, f)$ とすると、擬似 Wigner 分布は Wigner-Ville 分布と

$$\tilde{W}_x(t, f) = \int_{-\infty}^{\infty} W_x(t, f') W_h(0, f - f') df' \quad (2)$$

の関係がある⁹⁾。ただし、 $W_h(t, f)$ は窓関数 $h(t)$ の Wigner-Ville 分布である。つまり、擬似 Wigner 分布は Wigner-Ville 分布を周波数軸上で平滑化した時間-周波数表現である。擬似 Wigner 分布の時間分解能は Wigner-Ville 分布と同じであるが、周波数分解能は Wigner-Ville 分布には劣る。しかし、擬似 Wigner 分布では、Wigner-Ville 分布に見られる負のエネルギーが少なくなるとともに偽像が抑圧され瞬時周波数近辺にエネルギーが集中した時間-周波数表現を得ることができ¹⁶⁾。

本論文では境界波の分散を推定するために擬似 Wigner 分布を用いて解析を行った。擬似 Wigner 分布を用いた理由は次の 3 点である。

- ①時間と周波数間の不確定性関係の制限を受ける短時間 Fourier 変換より時間分解能と周波数分解能が高い。
- ②エアガンは坑井内に圧縮ガスを放出するため気泡振動による非定常かつ複雑な振動を発生する。エアガンが発生する複雑な信号を時間-周波数表現推定時に現れる偽像と混乱しないため、偽像は極力少ないことが必要である。
- ③境界波の各周波数成分の入力時刻を決定するには、時間分解能が高い方がよい。

本論文の解析では、擬似 Wigner 分布を計算する時の窓関数 $h(t)$ には、

$$h(t) = e^{-at^2} \quad (3)$$

を用いた。(3)式で a は平滑の度合いを決めるパラメータである。 a は解析対象の信号に依存するため、 a を決める一般的な手法はない¹⁶⁾。そこで、計算では幾つかの a の値から解析対象の信号の周波数特性に近い周波数特性を有する a を用いた。

4. 境界波の速度推定

4.1 音源の特性

Fig. 5(a), Fig. 6(a)に坑口圧が 0.24 MPa, 2.95 MPa の時にエアガン内蔵のジョウフォンで測定した信号(ショットマーク信号)を示す。ショットマーク信号には、

Fig. 5 Shot mark signal of an air gun and its pseudo-Wigner distribution at the wellhead pressure of 0.24 MPa. (a) Shot mark signal. The arrow indicates discharge of the air gun. (b) 0 dB is a maximum energy level in both a time-domain and a frequency-domain. (c) The maximum energy level is determined in each frequency component and its energy level in defined as 0 dB.

エアガン内で圧縮ガスを蓄えるチャンバーの電磁弁を開くために流れた電流に誘導したパルス状の信号(25 ms から 30 ms 付近)が入力し、それに続いてガス発射に伴う複雑な波形(47 ms 付近以降)の振動が入力している。

Fig. 5(b)(c), Fig. 6(b)(c)に解析区間長 409.6 ms で計算した擬似 Wigner 分布を示す。同図の擬似 Wigner 分布では、信号の特徴を強調するために 2 つの表示方法を用いている。つまり、同図(b)は時間と周波数の両領域でのエネルギーの最大値を 0 dB として表示した。同図(b)によって、信号がもつエネルギーの分布の全体傾向は評価できる。しかし、エネルギーの大きな周波数成分が強調されるため、エネルギーが比較的小さい周波数成分の分布を評価しにくい欠点がある。これはショットマーク信号は 50 Hz 以下の周波数成分のエネルギーがそれより高い周波数成分比べて大きいためである。一方、同図(c)では、各周波数成分毎に、エネルギーが最大になる時刻を検出し、その時刻のエネルギーを 0 dB として表示した。この図では、比較的小さい高周波数成分の入力時刻も明確に推定できる。しかし、同図(b)においてほとんどエネルギーがない 100 Hz 以上の高周波数成分も、同図(c)では強調されている。そこで、解析ではまず同図(b)で信号の全体のエネルギー分布を評価し、そして同図(c)により有効な大きさのエネルギーをもつ周波数成分の時間軸上の分布を解析することにより、信号の時間-周波数表現を検討した。な

Fig. 6 Shot mark signal and its pseudo-Wigner distribution at the wellhead pressure of 2.95 MPa. (b) (c) Energy distributions are represented in the same way in Fig. 5

お、これらの擬似 Wigner 分布の計算では(3)式の窓関数のパラメータ a は、 $a=0.0001$ とした。

擬似 Wigner 分布は信号の瞬間のパワースペクトルを表している。例えば、Fig. 5 では、ガス発射直後に 0 Hz から 200 Hz の広い周波数帯域にわたって継続時間が約 2 ms のエネルギー分布があり、そして続いて約 80 Hz から 200 Hz と、約 100 Hz 以下に 2 つのエネルギー分布がある。その後、63 ms 付近から約 80 Hz 以下にエネルギーの主な分布がある。同図(a)の波形の瞬時振幅が小さい時、瞬間のパワースペクトルは全周波数帯域で小さくなるため、時間-周波数表現におけるエネルギーの分布は区切られている。しかし、時間-周波数表現の意味を考慮すると、これらは連続したエネルギーの分布と考えられる。

一方、擬似 Wigner 分布も偽像を発生し、解析に困難をもたらすことが知られている¹⁶⁾。例えば、Fig. 5(a)の 60 ms 以降には、100 Hz 以上の高い周波数成分のエネルギーが認められないため、同図(b)の 60 ms 以降の高周波数帯域に繰り返して現れるエネルギーは偽像と考えられる。

実験ではエアガンを吊り下げた坑井を地さき裂と一緒に加圧するため、約 3.0 MPa の静水圧の差がある環境下でエアガンを動作させた。エアガンのガス放出特性は原理的に静水圧の影響を受けるため、Fig. 5(a)と Fig. 6(a)のショットマーク信号には静水圧の影響と考えられる変化が測定された。例えば、坑口圧 0.24 MPa の時観測したガス発射直後の高周波の振動が坑口圧が上昇するに伴い減衰していった現象が静水圧の変化の影響であ

る。しかしながら、Fig. 5 と Fig. 6 に示した 200 Hz 以下の周波数帯域において擬似 Wigner 分布で表す時間-周波数表現はエネルギーの大きさに変化はあるが、その分布の形はほぼ同じであった。したがって、200 Hz 以下の周波数帯域を解析するならば、本実験のエアガンの発射特性に対して坑井内の静水圧の変化の影響は少ないと考える。

ショットマーク信号が境界波を励振する振動を必ずしも表しているわけではない。しかし、エアガンを地下き裂直上 2 m に設置しているため、岩盤中を伝搬する弾性波によりエアガンのガス発射直後 1 ms 以内に境界波が励振されていると考えられる。しかも、ショットマーク信号の時間-周波数表現が坑口圧の変化に関わらずほぼ同じであった。そこで、境界波を励振した時刻の近似的指標としてショットマーク信号を用いることとする。また、Fig. 5(c) と Fig. 6(c) によればショットマーク信号の 200 Hz 以下の周波数帯域では 3 ms のばらつきで同時に振動が始まっている。そこで、200 Hz 以下の周波数成分については、Fig. 5(a) に矢印で示す時刻を F-1 井の地下き裂交点における境界波の発生時刻とした。

4.2 境界波の時間-周波数表現

境界波には伸縮型と屈曲型があり、それぞれが無数の分枝をもつ。そのなかで、エネルギーが大きいため測定できる可能性が最も高いモードは伸縮型の基本モードである¹⁷⁾。境界波の伸縮型基本モードは、他の全てのモードと異なり低い周波数成分の速度が遅い異常分散性を示す⁵⁾ことが特徴である。

Fig. 7 Detected guided wave and its pseudo-Wigner distribution at the wellhead pressure of 0.24 MPa. (a) The arrow indicates arrival of the guided waves. (b)(c) Energy distributions are represented in the same way in Fig. 5

Fig. 7~Fig. 9 に坑口圧が 0.24, 2.04, 2.95 MPa の時に測定した境界波の擬似 Wigner 分布を示す。Fig. 7 (a) に矢印で示した時刻に入力している波が、チューブウェーブの波形解析¹³⁾により判明している境界波の初動である。この波はそれに続く境界波の中で最初に入力しているため、き裂端等で反射していない直達の境界波である。前節のショットマーク信号の擬似 Wigner 分布について Fig. 5 と Fig. 6 に示した 2 種類の表示法を Fig. 7~Fig. 9 でも用いている。なお、境界波の擬似

Fig. 8 Detected guided wave and its pseudo-Wigner distribution at the wellhead pressure of 2.04 MPa. (b)(c) Energy distributions are represented in the same way in Fig. 5

Fig. 9 Detected guided wave and its pseudo-Wigner distribution at the wellhead pressure of 2.95 MPa. (b)(c) Energy distributions are represented in the same way in Fig. 5

Wigner 分布の計算では、(3)式の窓関数のパラメータ a は $a=0.0001$ とした。また、時刻 $t=0$ はショットマーク信号のガス発射時刻にし、解析区間の長さを 409.6 ms とした。

Fig. 7 では 55 ms 以降の 70 Hz 以下の周波数帯域に主なエネルギーの分布があり、坑口圧を上昇した Fig. 8 と Fig. 9 では 50 ms 付近までエネルギーの入力時刻が早くなっている。擬似 Wigner 分布は瞬間のパワースペクトルを表すので、波形の瞬時振幅が小さくなる時刻で擬似 Wigner 分布のエネルギー分布は区切られる。これを考慮すると、Fig. 8 と Fig. 9 において 50 ms 以降、100 Hz 以下の領域で 2 つに区切られたエネルギー分布は、連続したエネルギーを表していると考えられる。

Fig. 7～Fig. 9 に示した境界波の時間-周波数表現には、約 80 Hz 以下の周波数成分に低い周波数成分が遅れて入力する現象がみられた。これは、境界波の伸縮型基本モードの異常分散性に対応すると考えられる。そして、この現象は地下き裂を伝搬する境界波の 3 次元粒子運動は伸縮型が卓越していた¹³⁾ ことと整合する。

4.3 境界波の速度推定

境界波の速度は 3.1 節に述べた実フィールドにおける境界波計測に関する考察、4.1 節と 4.2 節で述べた音源と測定した境界波の時間-周波数表現に関する考察に基づき、次の手順で推定した。

- ① ショットマーク信号に記録されたガス発射時刻を各周波数成分の境界波励振時刻 t_0 とする。境界波の励振時刻は各周波数成分について設定することも可能である。しかし、4.1 節のショットマーク信号に関する時間-周波数表現の解析によれば、200 Hz 以下の周波数成分はほとんど同時に発生していたため、各周波数成分が同じ時刻に発生したこととする。
- ② 境界波の時間-周波数表現を解析し、各周波数成分について入力時刻 $t(f)$ を決定する。解析では各周波数成分のエネルギーがその最大値の -60 dB になった時刻を入力時刻とした。-60 dB は本実験において境界波の異常分散性が識別できる最低のエネルギーレベルである。
- ③ 伝搬距離 l は坑跡から求めた 2 つの坑井と地下き裂の交点間の直線距離 6.7 m とする。本実験フィールドの地下き裂面は平面でないため、この距離は正確には境界波の伝搬距離ではない。しかし、地殻応力計測により予測される地下き裂の方向とき裂交点間を結ぶ方向はほぼ一致する¹⁸⁾ ため、本論文ではエアガンとセンサ間の直線距離を境界波の伝搬距離とした。
- ④ 各周波数成分について境界波の速度 $v(f)$ を(4)

Fig. 10 Dispersion of detected guided waves when the fracture was pressurized

式のように決定する。

$$v(f) = \frac{l}{t(f) - t_0} \quad (4)$$

Fig. 10 に坑口圧を変えた時の境界波の速度を示す。同図では境界波の異常分散が確認できる。また、30 Hz 以上の周波数帯域では、坑口圧が 0.46 MPa 以下の時分散性が緩やかであり、坑口圧が 0.67 MPa 以上に上昇すると、速度が速くなるとともに分散性が強くなっていた。

Fig. 10 では坑口圧が上昇した時速度の増加が認められたが、0.67 MPa 以上では速度がほとんど変化しなかった。境界波の速度は、中間の流体層の厚さと境界面の接触面積比に影響される。つまり、接触面積比が低下するとき裂面接触剛性が低下するため速度は遅くなり、流体層の厚さが増大するとストリー波の速度に漸近し速度は速くなる。実際の地下き裂面は高さが分布した凹凸面が接触した状態になっているため、地下き裂を加圧した時接触面積の低下と流体層の拡大が進むと考えられる。Fig. 10 にみられた速度の変化は、これら 2 つの要因が複雑に関係してことを示していると考えられる。

Hayashi and Sato の計算によれば、地下き裂面の接触が少なくなりき裂面接触剛性が低下すると、境界波の分散性が強くなる⁹⁾。Fig. 10 にみられる坑口圧の上昇に伴う分散の変化はこの計算結果と整合する。

本節で述べた時間-周波数表現を使った境界波の入力時刻の決定方法では、瞬時振幅が小さい時エネルギーの分布が区切られるため、評価できる入力時刻が不連続になる問題点がある。例えば、Fig. 7 の坑口圧が 0.24 MPa の時の 55 ms 付近が入力時刻を評価できない時間帯であり、30 Hz 以上の周波数帯域において坑口圧が 0.46

MPa から 0.67 MPa に上昇した時の速度の不連続はこの問題の影響が大きい。これは閾値を越えた時刻を波の入力時刻にする手法には原理的に付随する問題といえるが、時間-周波数表現に適用する場合その誤差が大きくなる場合がある。しかし、Fig. 10 において境界波の速度の分散性を定性的に評価するには、この要因による誤差の影響は少なかった。

形状が正確に判明していない地下き裂を計測対象とする場合、境界波の伝搬距離を正確に決めることは困難である。これは境界波の速度推定の根本的な課題である。これに対しては、測定対象に関する他の様々な情報を総合的に解析し、その情報の不足を補うしかない。例えば、本論文で取り上げた地下き裂については地殻応力計測の結果を利用して信頼性を検討した。つまり、境界波の伝搬距離として本節で用いた 2 つの坑井と地下き裂の交点間の直線距離は真の伝搬距離より短いと考えられる。坑壁で観測される地下き裂の方向と地下き裂の 2 つの交点を結ぶ方向が正確に一致しない¹¹⁾ ため地下き裂は平面ではなく、境界波の真の伝搬距離は本節で用いた値より長いはずである。しかしながら、地殻応力測定から予想した地下き裂進展方向と地下き裂の 2 つの交点を結ぶ方向がほぼ一致している¹⁸⁾ ので、境界波の伝搬距離として本節で用いた値に大きな誤差はないと考える。

5. む す び

本論文では、時間-周波数表現を使って境界波の速度を推定する手法を検討した。そして、実フィールドの地下き裂を伝搬する境界波の速度の推定結果を述べた。まず、実フィールドにおける境界波計測実験の概要をまとめた。そして、時間-周波数表現の 1 つ擬似 Wigner 分布による境界波の速度推定法について考察し、音源と測定した境界波の時間-周波数表現の特徴を検討した。実フィールドの境界波計測ではセンサの数に極端に制限があるため、アレイセンサを使った速度推定に用いられるクロススペクトル解析が適用できないため、時間-周波数表現を用いた速度推定法を検討した。さらに、推定した境界波の分散性の特徴を述べた。それによれば、境界波の速度は地下き裂を加圧した時速くなっていた。また、境界波は異常分散性を示し、坑口圧の上昇に伴いその分散性は強くなっていた。本論文で示した境界波の分散性に関する解析結果は、境界波の伝搬特性の理論的な解析と定性的にはよく整合する。しかし、定量的な検討を行うには本推定法には推定精度にまだ解決すべき問題があった。

地下き裂面の特性評価には、利用可能な計測方法、計測システムの構成、測定対象に関する既知の情報等に大きな制限がある。このため、実際の計測では限られた計

測方法と情報を有効に活用しなければならない。境界波計測は地下き裂面の接触特性や形状を評価可能な数少ない計測方法の 1 つであり、本論文で述べた時間-周波数表現等の信号処理法を適切に活用することにより限られた情報から有効な評価が可能になると考える。

謝 辞

本研究の一部は、文部省科学研究費(05232103, 06750957)の補助によるものである。

参 考 文 献

- 1) 例えば、玉井、小杉：地下空間の保全技術—3 次元岩盤変位計測—、計測と制御、**33**-12, 1020/1023 (1994)
- 2) 阿部博之：地下深部抽熱工学の現状と将来、日本機械学会誌、**89**-807, 159/164 (1986)
- 3) 佐藤泰夫：弾性波動論、92/97, 109/112, 岩波書店 (1978)
- 4) L. R. Lines ed.: The Special Issue on "Seismic Inversion", Proc. IEEE, **74**-3, 389/508 (1986)
- 5) V. Ferrazzini and K. Aki: Slow Waves Trapped in a Fluid-Filled Infinite Crack: Implication for Volcanic Tremor, J. Geophys. Res., **92**-B 9, 9215/9223 (1987)
- 6) K. Hayashi and K. Sato: A Theoretical Study of AE Traveling through a Fluid-Filled Crack with Application to Characterization of a Geothermal Reservoir Crack, Progress in Acoustic Emission VI, 423/430, The Japanese Society for Non-Destructive Inspection (1992)
- 7) L. Cohen: Time-Frequency Distributions—A Review, Proc. IEEE, **77**-7, 941/981 (1989)
- 8) W. Martin and P. Flandrin: Wigner-Ville Spectral Analysis of Nonstationary Processes, IEEE Trans. Acoust. Speech, Sig. Proc., **ASSP**-33-6, 1461/1470 (1985)
- 9) 吉川 昭：Wigner-Ville 分布：理論と応用、電子情報通信学会誌、**73**-6, 601/608 (1990)
- 10) F. Hlawatsch and G. F. Boudreaux-Bartels: Linear and Quadratic Time-Frequency Signal Representations, IEEE Sig. Proc. Mag., **9**-2, 21/67 (1992)
- 11) H. Niitsuma: Fracture Mechanics Design and Development of HDR Reservoirs—Concept and Results of the F-Project, Tohoku University, Japan, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., **26**-3/4, 169/175 (1989)
- 12) 林、阿部：東北大学東八幡フィールドの水循環地下システムの通水性能の評価、日本地熱学会誌、**11**-3, 203/215 (1989)
- 13) K. Nagano, H. Saito, and H. Niitsuma: Guided Waves Trapped in an Artificial Subsurface Fracture, Geothermal Science and Technology, **5**-1/2, 63/70 (1995)
- 14) K. Nagano and H. Niitsuma: Guided Waves Propagation along a Fracture with Contact, Proc. 1st North American Rock Mechanics Symposium 157/163 (1994)
- 15) 佐々、芦田、菅野：建設・防災技術者のための物理探査、68/69, 森北出版 (1993)
- 16) T. A. C. M. Claassen and W. F. G. Mecklenbräuker: The Wigner Distribution—A Tool for Time-Frequency Analysis, Philips J. Res., **35**-3, 217/250 (1980)
- 17) 佐藤和浩：東北大学修士学位論文 (1992)

- 18) H. Niitsuma and H. Saito: Evaluation of the Three-Dimensional Configuration of a Subsurface Artificial Fracture by the Triaxial Shear Shadow Method, *Geophysics*, 56-12, 2118/2128 (1991)

~~~~~

[著者紹介]

永野宏治 (正会員)

1983年東北大学工学部卒業, 89年東北大学大学院博士課程修了。工学博士。同年日本学術振興会特別研究員, 91年東北大学工学部助手, 92年室蘭工業大学助手。弾性波の計測とそのデジタル信号処理の研究に従事。日本音響学会, 電子情報通信学会, 電気学会, 計測自動制御学会, 物理探査学会, IEEE, SEG, AGUの各会員。

新妻弘明 (正会員)

1970年東北大学工学部通信工学科卒業。75年東北大学大学院工学研究科博士課程電気及び通信工学専攻修了。工学博士。同年日本学術振興会特別奨励研究員, 76年東北大学助手, 82年同助教授, 88年同教授。地下計測, 地下情報処理に関する研究に従事。日本音響学会, 電子情報通信学会, 電気学会, 物理探査学会(評議委員), 日本地熱学会(評議委員), 計測自動制御学会, 資源・素材学会(評議委員, 地下計測部門委員会 幹事), エネルギー・資源学会, 日本非破壊検査協会(AE委員会 幹事), 日本雪工学会(編集委員会 委員), IEEE, SEG, SPWLA各会員。

~~~~~