

# 結晶質岩コアを用いた漏洩表面波の計測

岡山大学 正会員 ○ 木本 和志  
岡山大学 非会員 チェ ソンバク  
岡山大学 学生会員 岩崎 佳介

## 1. はじめに

結晶質岩試料の損傷度評価を行うためには、粒界や粒内で発生、進展するマイクロクラックの大きさや密度、方向性について知る必要がある。微小亀裂の情報は、岩石試料から薄片を作成し、偏光顕微鏡で観察する等の方法によって得ることができるが、試料内部の状況やコア全体での亀裂分布状態を直接観察することは多大な労力を要し現実的でない。一方、X線CTによる三次元イメージングによる方法は、近年解像度の向上が著しいものの、亀裂のようにボリュームを持たない対象はX線吸収量に顕著な変化が期待できず、その可視化には困難が伴うと予想される。

これに対し、弾性波を用いた非破壊検査は、き裂サイズに見合った周波数を選べば、き裂と波動場の相互作用により強い散乱波が発生することから、試料内部の亀裂群に関する情報を試料表面での観測結果から得ることができる可能性がある。ただし、試料内の弾性波の散乱源は、亀裂以外にも存在し、たとえば粗大な結晶粒を有する結晶質岩では、結晶粒界での散乱も無視できない可能性がある。特に、造岩鉱物に音響的性質が著しくことなるものが含まれる場合には、粒界散乱が支配的となり、クラックによる散乱波成分を観測データから抽出することが難しくなると予想される。また、き裂散乱波の影響が支配的である場合にも、散乱場が大きさも形も異なるき裂群による複雑な多重散乱の結果として形成されるため、散乱に起因する減衰や分散性を精度よく計測し、モデル化やシミュレーションを行うことは未だ簡単でない。

本研究は、岩石試料における散乱減衰を正確に計測するための高密度超音波計測システムの開発を目的として行ったものである。具体的には、水浸法による超音波計測を、精密ステージとニードルハイドロフォンを用いて行うことで、試料表面の状態に左右されず、安定した超音波エコーを高い空間解像度で計測する。また、開発したシステムによる超音波計測を模擬した数値シミュレーションを行い、漏洩表面波によって水中に放射されるヘッドウェーブが存在すること、実験的にもそれが観測でき、岩石試料における超音波の分散や減衰評価に有効であることを示す。以下では、超音波計測実験の概要を述べ、次に、どのようなモードの超音波が発生するかを予め調べるために行った数値シミュレ

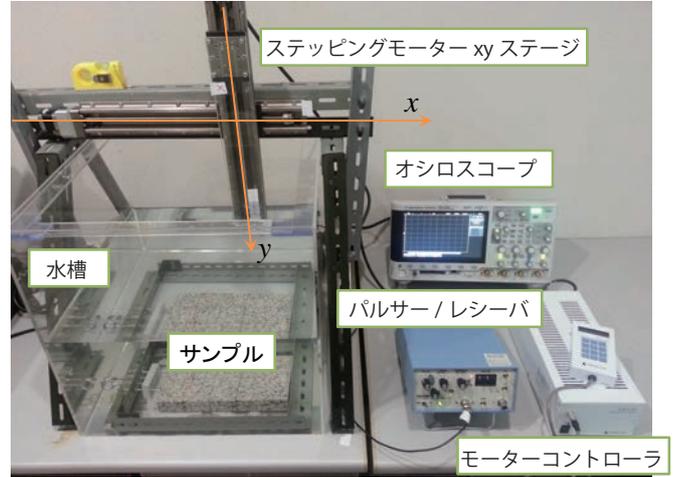


図1 超音波計測装置の構成。

シミュレーションの概要と結果を示す。次に、花崗岩試料を用いて行った計測の結果を、均質なアルミニウム試料による計測結果と比較しながら考察とともに示し、最後に本研究のまとめと今後の課題について述べる。

## 2. 実験概要

図1に、水浸法による超音波計測装置の構成を示す。水浸法では、試験体とセンサーを水中に沈めて計測を行うため、この図に示すようにサンプルおよびセンサーは水槽に入れている。また、受信位置位置を正確に制御するため、レーザーとして用いるニードルハイドロフォンは、ステッピングモーターで駆動される精密xyステージに取り付けてある。送信センサーの駆動にはパルサー/レーザー(Olympus 5077PR)によって発生させた400Vの矩形電圧パルスを用い、ハイドロフォンで受信したシグナルは付属プリアンプで増幅した後、デジタルオシロスコープに送られ、512から1024回程度の平均化を行った上、デジタル波形データとして保存する。図2に、送受信センサーの配置と観測点位置を示す。送信には接触型垂直入射の横波探触子を、受信用ハイドロフォンは素子径が0.5mmのニードルハイドロフォン(東レエンジニアリングHY05N)を用い、試料から3mm離れた位置を0.5mm間隔で移動しながら合計256点で計測を行う。これらのセンサーの外観は図3に示す通りである。なお、通常の水浸法では、送受信ともセンサーを試験体に接触させない状態で検査を行うことが普通

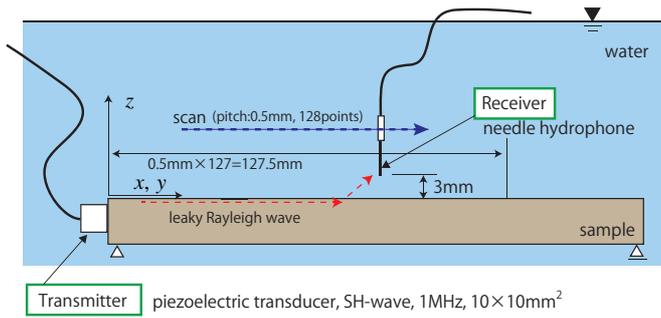


図2 送受信センサーおよび観測点の配置.

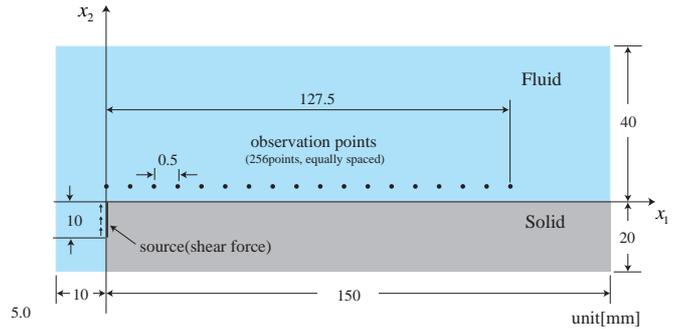
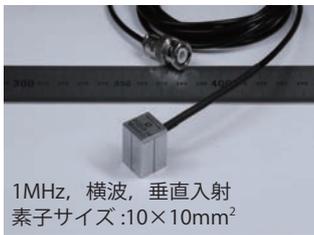


図5 2次元数値解析モデル.

(a) 送信センサー



(b) 受信センサー

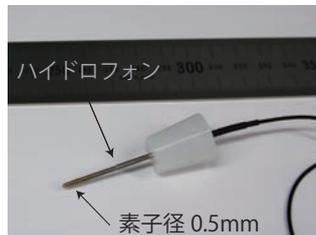
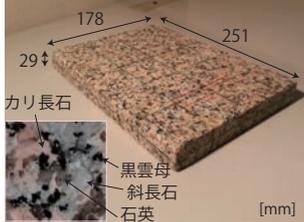


図3 送受信センサー.(a) 接触型横波探触子, (b) ニードルハイドロフォン.

(a) 花崗岩試料



(b) アルミニウム試料 (基準試料)

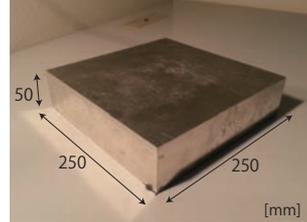


図4 (a) 花崗岩試料とその主要造岩鉱物, (b) 基準試料として用いるアルミニウムブロック.

だが,ここではできるだけ強いレーリー波を試料表面に励起できるように,防水加工された接触型の横波探触子を,試料端部にとりつけて超音波の送信を行っている. 実験供試体には,代表的な結晶質岩である花崗岩を板状に成形したものをを用い,比較のための均質な基準試料としてアルミニウムブロックを使った計測も同様にして行う. これらの試験体の形状と寸法を図4のようである. なお,図4-(a)には,試料表面の写真を拡大し,主要造岩鉱物の名称とともに左下に示してある.

### 3. 数値シミュレーション

実験に先立ち,図2のような条件で送受信を行った際に発生する超音波を線形弾性波動の数値シミュレーションによって調べる. 数値シミュレーションは図5に示したモデルを用いて行う. このモデルは,  $x_1 > 0$  かつ  $x_2 < 0$ , すなわち第4象限を固体が,それ以外の領域を水としたものであり,いずれの領域も密度と弾性係数が一定の二つの均質媒体から成る. なお,固体中の縦波および横波の位相速度はそれぞれ  $c_L = 6.0$ ,  $c_T = 3.0$  [km/sec], 水中の音波の音速は  $c_p = 1.5$  [km/sec] としている. 超音波の励起は,固体領域表面 ( $x_1 = 0$ ) の10mmの範囲 ( $-10 < x_2 < 0$ ) に鉛直方向の時間的に変化するせん断力を加えることによって行う. なお,数値解析にはFDTD法を用い,無限領域を模擬するために,計算領域外周部にPML領域を配している.

数値シミュレーションの結果を,速度場のスナップショットとして図6に示す. この図は,上から経過時間の順に速度場の進展の様子を示したものであり図には主要な波動のモードを示してある. ただし,同図(b),(c)においては,各モードを頭文字のみで表しており,例えば,RはRayleigh波を,Hはヘッドウェーブを意味する. 図6-(a)を見ると,固体中には縦波(L波),横波(SV波)および表面波(R波)が励起されているが,SV波とR波は近接して現れており両者をこの結果から明確に区別することは難しい. 一方,水中には固体領域の角部から発生する円筒状の波面をもつ回折波と,回折波の波面に接し,SV波あるいはR波に接続される直線状の波面成すヘッドウェーブが見られる. なお,実際には,固体中のL波に励起されたヘッドウェーブも水中に放射されているが,その振幅は非常に小さく図6にはほとんど現れていない. これらの波面は,時間の経過についで幾何学的に概ね相似な形を保ったまま進展するが,SV波とR波は速度差のために次第に分離していく. また,図6-(c)によれば,大きな振幅を持つヘッドウェーブの波面は,

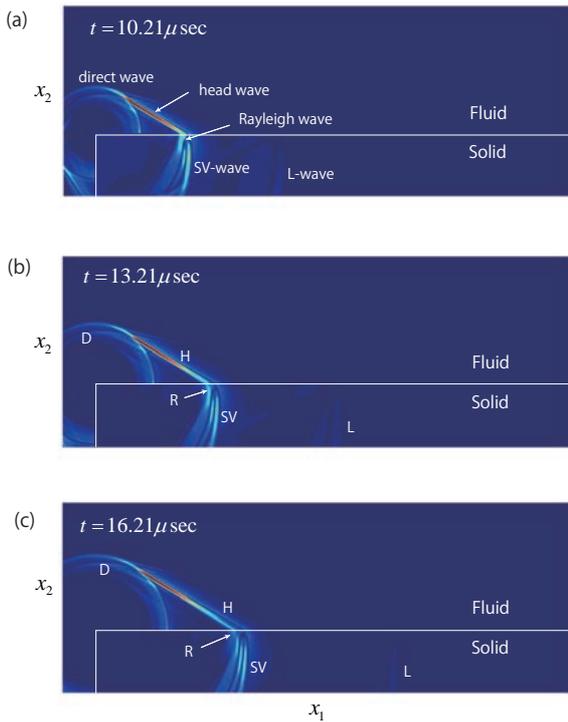


図6 数値シミュレーション結果 (速度場のスナップショット).

固液界面で R 波に接続されており、このことから水中で観測される最も強いヘッドウェーブは R 波に起因するものになると判断される。

次に、図 5 のように水中に配置した観測点における圧力の時間変化を図 7 に示す。この図は、横軸に時間を縦軸に距離 ( $x_1$  座標) をとったもので、各モードの波の到達時間と振幅の大小を読み取ることができる。到達時間を結んだ線は概ね直線となり、その傾きは伝播速度を表す。従って、傾きの大きな順に L 波および R 波に起因するヘッドウェーブの到達を示しており、水中を伝わり直接観測点に至る直達波は、最も傾きが小さく最後に到達することが分かる。

#### 4. 実験結果

アルミおよび花崗岩供試体を用いて計測を行った結果を図 8 と 9 に示す。これらは、図 7 同様、横軸に時間、縦軸に距離をとって観測波形を示した走時プロットである。いずれの場合も、L 波起因のヘッドウェーブが最初に現れるが、その振幅は非常に小さく、観測点距離が遠くなるにつれ、ほとんど見えなくなる。一方、R 波に励起されるヘッドウェーブは、振幅も大きく広い範囲で観測される。特に、アルミ供試体の場合、距離による減衰が小さく観測を行った全ての範囲で R 波起因のヘッドウェーブが観測されている。これに対して花崗岩供試体の場合、20mm 程度の距離から著

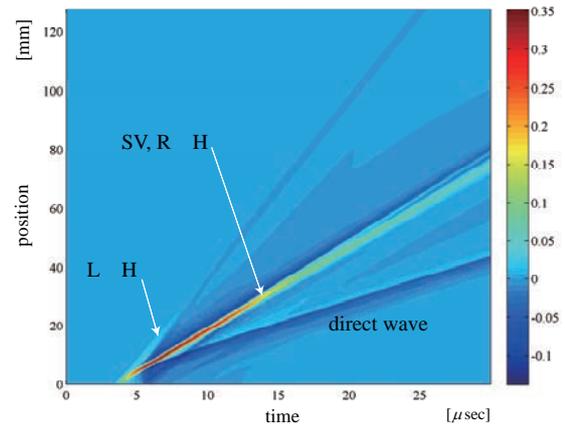


図7 数値シミュレーション結果 (圧力波形の走時プロット).

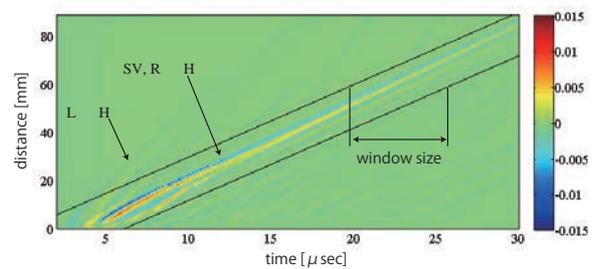


図8 アルミ供試体による計測結果.

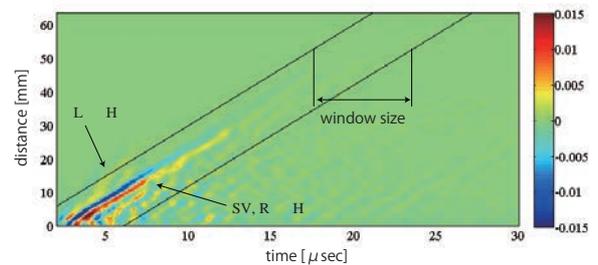


図9 花崗岩供試体による計測結果.

しい減衰を示し、30mm 以上ではこのプロット上でほとんど見えなくなる。また、距離 20mm 程度までの範囲では、ヘッドウェーブの通過後も振動が続いており、供試体内の多重散乱による影響が現れている。なお、いずれの供試体の場合も、今回の実験では直達波はほとんど観測することが出来なかった。これは、試験体角部で発生する回折波強度が予想よりも小さいことを意味し、その原因は、探触子設置位置や向きのずれ、押し付け圧が十分でないこと等が考えられる。

最後に、R 波起因のヘッドウェーブについて、距離による減衰と卓越周波数の変化を調べるために、最大フーリエ振幅とそれを与える周波数を、距離に対してプロットした結果

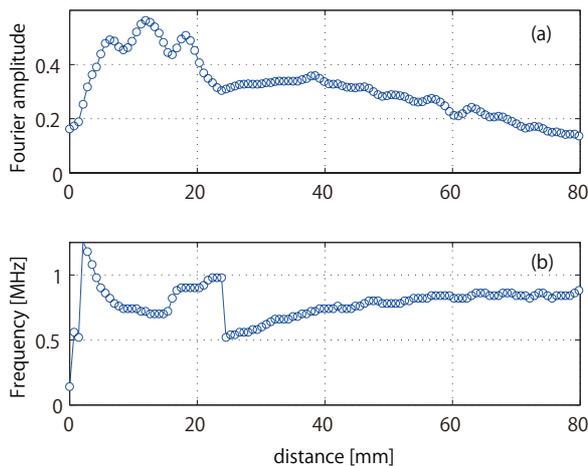


図 10 最大振幅と周波数の距離による変化 (アルミニウム供試体).

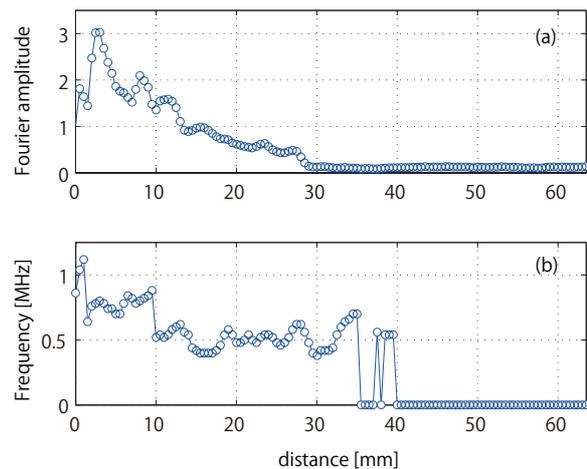


図 11 最大振幅と周波数の距離による変化 (花崗岩供試体).

を, 図 10 および 11 に示す. それぞれの図において, (a) は最大フーリエ振幅を, (b) はそのときの周波数を示している. なお, ここでは R 波起因のヘッドウェーブについて, 振幅および周波数の変化を調べることを目的としているため, フーリエ変換を行うにあたり, ガウス関数を窓関数として用いている. 適用したガウス窓関数の幅を  $6\sigma$  (標準偏差の 6 倍) として表示すると, 図 8 および 9 に, 実線で示したようになる. アルミニウム供試体では距離 40mm 程度から単調に振幅が減少し始めるが, その勾配は緩やかで, 距離 80mm で振幅はピーク値の 3 分の 1 程度にとどまっている. また, ピーク周波数も距離 40mm 以遠では 0.8~0.9MHz と, 送信センサーの周波数に近い値でほぼ一定値になっている. 一方, 花崗岩試料を用いた計測の結果では, 10mm 程度の観測点位置から急速に振幅が低下し, 30mm からは非常に小さな値を示している. ピーク周波数に関しても, 10mm から 30mm の範囲ではおよそ 0.5MHz で一定しているが, 35mm 付近を境にゼロとなる距離が現れ, このことは, ヘッドウェーブによる振幅が有意な S/N 比を示すのは, およそ 35mm 程度までであることを意味する.

## 5. まとめ

本研究では, 結晶質岩試料における超音波の減衰を計測することを目的として, 漏洩表面波に励起されるヘッドウェーブを計測するためのシステムを開発し, アルミニウムおよび花崗岩試料を用いて実際に計測を行った. その結果得られた知見をまとめると以下のようである.

- 数値シミュレーションおよび計測の結果, 試験片表面近傍では, 表面波に起因するヘッドウェーブの振

幅が最も大きく, 観測が容易である.

- 均質なアルミニウム試験片に対する計測結果では, ヘッドウェーブの減衰は緩やかであり, 観測波形のピーク周波数は 0.8 から 0.9MHz と, 送信圧電トランスデューサの公称周波数 1MHz に近い値となる.
- 花崗岩試料を用いた場合, ヘッドウェーブは観測されるものの, 減衰が大きく, 透過距離は 30 から 35mm 程度であった. また, ピーク周波数も 0.5MHz と送信周波数よりも低周波側にシフトする.
- 花崗岩試料に対する計測結果では, ヘッドウェーブの到達後も, 音圧変動が継続し, これは, 供試体内部で起きる多重散乱によるものと考えられる.

以上を踏まえ, 今後は次のような課題に取り組むことを検討している.

- 送信センサーの取り付け方法を改良し, 同様な実験を繰り返すことで, 結果の信頼性, ばらつきを評価すること.
- 材料の非均質性に起因する減衰とそれ以外の要因による減衰の切り分けを行う方法を考案すること. また, そのための 3 次元数値シミュレーションを行うこと.
- 結晶質岩の非均質性を考慮した数値シミュレーション技術を開発すること.

以上の課題をクリアすることにより, き裂による散乱減衰量の評価が可能になると考えられ, 結晶質岩の損傷度評価法の開発につなげることが期待される.