

平成 22 年 6 月 17 日現在

研究種目：若手研究 (A)  
 研究期間：2006 ～ 2008  
 課題番号：18686073  
 研究課題名 (和文) メタンハイドレート賦存層の弾性波減衰特性に関する室内実験・岩石物理学的研究  
 研究課題名 (英文) Experimental and theoretical study on seismic attenuation in methane hydrate-bearing sediments  
 研究代表者  
 松島 潤 (MATSUSHIMA JUN)  
 東京大学・大学院工学系研究科・准教授  
 研究者番号：70282499

## 研究成果の概要：

本研究は、未来型エネルギーであるメタンハイドレート（以下 MH）が賦存する地層の弾性波減衰特性に着目することにより、MH 賦存層の資源量評価に資する情報（MH 飽和率など）を推定する方法論の理論的背景を明確にすることを目的とする。塩水を凍結させる過程で得られる固液共存系を模擬 MH 試料として、超音波伝播実験を実施し高速度・高減衰現象を確認するとともに、核磁気共鳴実験により測定試料の物性情報を取得し減衰との関連を調査した。さらに、これらの情報を元に、岩石物理学を用いた理論的検討により、MH 賦存層の弾性波減衰メカニズムの一端を明らかにした。

## 交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2006 年度	8,900,000	2,670,000	11,570,000
2007 年度	4,200,000	1,260,000	5,460,000
2009 年度	2,000,000	600,000	2,600,000
年度			
年度			
総計	15,100,000	4,530,000	19,630,000

研究分野：物理探査学

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：メタンハイドレート、超音波伝播、地震波減衰、岩石物理学、固液共存系、核磁気共鳴

## 1. 研究開始当初の背景

メタンハイドレート賦存層 (MH 層) は、弾性波動伝播の観点では高速度帯として特徴付けられるため、MH 飽和率と弾性波速度 (主に P 波速度) との定量的関係を推定することが資源量評価の点で重要となっている。しかし、MH 飽和率と P 波速度との関連性については、P 波速度が MH 自体でなく、MH・グレイン粒子・孔隙内流体からなる混合系の

弾性パラメータを反映するため、単純に関係付けられない。このような場合、S 波速度を併用して MH 飽和率を推定することも一方法であるが、S 波速度情報を得ることは容易でない。

物理的な直感によれば、弾性波速度が大きな物質の弾性波減衰は小さいと考えられるが、このような直感に反して、MH 層における高減衰現象が音波検層記録あるいは坑井

間地震探査記録等により観測されている。このような減衰現象を引き起こす減衰メカニズムについては、孔隙スケールでの粒子と孔隙中に存在する流体との相互作用であることが指摘されているものの、その詳細については現状未解明である。減衰情報の視点で MH 飽和率を推定する手法を確立すれば、速度情報による推定手法を補完することができる。弾性波伝播に伴う減衰メカニズムの要因は様々であるが、孔隙内流体による影響に注目する研究が多くなされてきた。その中でも、塩水凍結過程で生ずる固液共存系における超音波伝播特性を測定する手法は、温度制御により固体と液体との存在比を変化させる点で独特であり、本研究でもこの手法に着目する。

## 2. 研究の目的

高空間分解能かつ高精度な超音波波動伝播測定装置を用いた精緻な室内実験を実施することにより、減衰メカニズムを説明するミクロスケールでの岩石物理学モデルを構築し、多孔質弾性論（ミクロスケールでの流体流動と弾性変形の連成理論）の観点から MH 賦存層における減衰現象を包括的に理解し、弾性波減衰特性を利用した MH 飽和率推定法の理論的背景を明確にすることが本研究の目的であり、具体的には以下になる。

(1) 模擬 MH 賦存層試料における精緻な弾性波動伝播記録を観測するとともに、試料のミクロスケールでの物理的構成・状態（流体と固体との共存様式、透水性など）と波動減衰特性との関連性を定量的に把握すること

(2) 室内実験で観測された減衰現象を説明するためのミクロスケールでの岩石物理学的モデルを構築し、減衰メカニズムの理論的背景を明確にすること

## 3. 研究の方法

(1) 測定試料については、MH が未固結の砂粒子間隙を埋める孔隙充填型の MH 試料を作成すべきであるが、塩水を凍結させる過程で得られる固体-液体共存系からなる擬似 MH 試料を用いることとする。一般に、純水を凍らせると液体から固体に一気に相変化を起こすが、塩水を低温環境におくと、まず真水部分が凍結し、その過程で塩分を排出するため、不凍水の塩分濃度は上昇する。その結果、純水により生成された固体部分と高塩分濃度水からなる不凍水との共存状態が生ずる（これを固液共存系と呼ぶ）。なお、我々は塩分濃度 2 %（実験開始時）を用いて測定する。このとき、固液共存系における固体部分と液体部分の存在比は、温度設定により制御することができる。

各温度で生成される固液共存系において超音波波動伝播室内実験を実施し、波形を取

得し速度情報ならびに減衰情報を解析する。なお、この際、低温域で生成される固液共存系における波動伝播現象を計測する室内実験例は少なく、再現性のある高信頼性のデータを取得するための実験システムを構築する。具体的には、(1)冷却装置の違いによる固液共存系の生成過程の比較評価、(2)圧電素子の低温下及び氷生成に伴う封圧下での性能評価、(3)観測波形が定常状態に達するまでの安定性評価、を行う。

固液共存系のミクロスケールでの物理的構成・状態を調べるために、NMR 測定により各温度の固液共存系における不凍水分量を測定し、減衰値との相関を調べる。さらに、MRI 測定を用いて、固液体共存系における三次元イメージング (TI 強調画像) の取得とバルク拡散係数 (ADC: Apparent Diffusion Coefficient) の導出を行う。弾性波減衰は、内部減衰と散乱減衰に便宜上区別されるが、実際の減衰測定において両者の総和を測定していることになる。そこで MRI 画像を用いて、試料内部の固液共存の幾何学的分布を求め、超音波伝播の散乱減衰値を推定する。

さらに、減衰値を高精度に導出する手法としてスイープ波形を用いる方法を提案する。インパルス波形に対して減衰解析を適用する場合は、波形の一部を切り出したものに対してフーリエ変換を適用することが一般的である。しかしながら、この場合、spectral leakage 現象により、適切な減衰解析を実施することができない。そこで、スイープ型波形とウェーブレット変換を組み合わせた新手法を検討する。

(2) 塩水を凍結させる過程で得られる固体-液体共存系からなる擬似 MH 試料に対して得られた減衰結果と、多孔質媒質理論である Biot 理論による理論減衰値とを比較し、減衰メカニズムに関する考察を行う。

## 4. 研究成果

MH 賦存層で観測される弾性波高速度・高減衰現象を、塩水凍結により生成される固液共存系における超音波室内実験で再現することができた。超音波伝播記録から減衰値を算出するアルゴリズムについては、複数検討した。インパルス型波形を用いる場合には、spectral leakage の影響により、減衰値が過小評価されることを指摘し、スイープ波形を用いた減衰値推定法の高精度化を実現した。なお、低温環境での超音波室内実験例は事例が少ないが、本研究を通して品質の確保された超音波伝播記録を取得する知見・方法論を深めることができた。さらに、核磁気共鳴実験のうちの NMR 測定により、不凍水分量の測定を取得して、弾性波減衰と不凍水分量とが密接な関係にあることを見出した (図

1)。

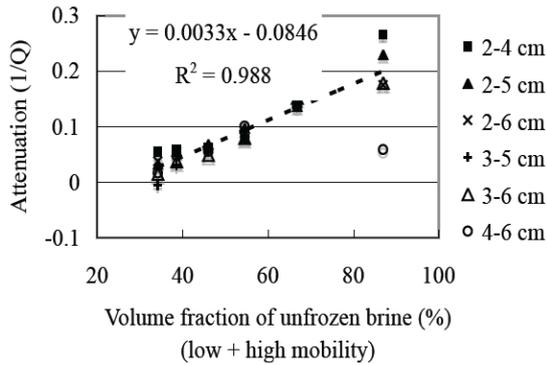


図1 減衰と不凍水分量の関係 (Matsushima et al., 2008)

また核磁気共鳴実験のうちのMRI測定により、不凍水分量の空間的分布を取得し、これに基づいた波動シミュレーションを実施することにより、散乱減衰分を補正することができた。また、減衰メカニズムを明らかにするために、多孔質弾性論 (Biot の理論) を用いた岩石物理学的検討を行った。超音波伝播記録において推定された減衰値に対して、完全にそのメカニズムを明らかにしたわけではないが、散乱減衰分と多孔質弾性論 (Biot の理論) による減衰分とで大まかに説明することができた。なお、実際の MH 賦存層を模擬するためには、未固結砂粒、氷、不凍水の3相を考える必要があったが、減衰が大きいため品質が確保された超音波伝播記録を取得することができなかった。そこで、アルミナセラミックスからなる多孔質媒体を塩水で飽和させた試料を凍結させることにより生成される3相において超音波伝播記録を取得し、塩水凍結同様の現象 (高速度・高減衰) を確認することができた。

固液共存系を用いた超音波伝播実験のなかで、技術的知見として得られた以下の3点について述べる。

- ・冷却装置の違いによる固液共存系の生成過程の比較評価については、温度の時空間的变化を調べ固液共存系の成長を確認した。その結果、冷却装置の違いにより、容器内での固液共存系の時空間的な生成過程が異なることを示した。
- ・圧電素子の低温下及び氷生成に伴う封圧下での性能評価については、それぞれの状況下における波形情報の変化を定量的に評価した。その結果、圧電素子の低温・圧力特性として、振幅情報は大きく影響を受けるものの、速度と周波数については影響が軽微であることを確認した。
- ・観測波形が定常状態に達するまでの安定性評価については、各温度における観測波形が定常状態に達するまでの冷却時間の妥当性を検証した。その結果、Matsushima et al.

(2008) の実験で採用した冷却時間が妥当であることを示すと同時に、冷却装置の違いによる波形の安定性を比較した。

## 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2件)

- (1) 鈴木 誠, 松島 潤, 加藤 倅史, 六川 修, 低温域における固液共存系の生成と超音波伝播波形データの評価, 物理探査, 印刷中, 査読有り
- (2) Matsushima, J., Suzuki, M., Kato, Y., Nibe, T., and Rokugawa, S., 2008, Laboratory experiments on compressional ultrasonic wave attenuation in partially frozen brines, *Geophysics*, 73, pp.N9-N18. (doi:10.1190/1.2827214), 査読有り.

[学会発表] (計17件)

- (1) Matsushima, J., Suzuki, M., Kato, Y., Nibe, T., and Rokugawa, S., 2007, Laboratory experiments on ultrasonic wave attenuation in partially frozen brines, Expanded abstracts of 77th Ann. Internat. Mtg.: Soc. of Expl. Geophys., pp. 1604-1608.
- (2) Matsushima, J., Suzuki, M., Kato, Y., and Rokugawa, S., 2009, Laboratory measurements of ultrasonic P-wave attenuation in partially frozen brines by using sweep signals, Expanded abstracts of 79th Ann. Internat. Mtg.: Soc. of Expl. Geophys. pp. 2144-2148 (doi:10.1190/1.3255281).
- (3) Matsushima, J., Suzuki, M., Kato, Y., and Rokugawa, S., 2009, Laboratory measurements of ultrasonic P-wave and S-wave attenuation during the freezing of salty water in porous material, Proceedings of the 9th SEGJ International Symposium, PaperID 88.
- (4) 松島 潤, 2006, 弾性波減衰情報に着目したメタンハイドレート賦存層評価手法の確立に向けて -現象理解・実験的検証・理論構築-, 日本地球惑星科学連合同大会 (物理探査のフロンティア) 2006.
- (5) 松島 潤, 鈴木 誠, 加藤倅史, 六川修一, 2006, 模擬メタンハイドレート試料を用いた弾性波減衰に関する室内実験, 物理探査学会第114回学術講演会論文集, 1-3.
- (6) 鈴木 誠, 松島 潤, 加藤倅史, 六川修一, 2006, 模擬メタンハイドレート試料を

- 用いた弾性波減衰に関する室内実験 - 測定システムの構築, 物理探査学会第 114 回学術講演会論文集, 4-7.
- (7) 松島 潤, 鈴木誠, 加藤 俣史, 六川修, 2006, 模擬メタンハイドレート試料を用いた弾性波減衰に関する室内実験(その 2), 物理探査学会第 115 回学術講演会論文集, 107-109.
- (8) 鈴木 誠, 松島 潤, 加藤 俣史, 六川修一, 2006, 低温域における弾性波動伝播測定システム, 物理探査学会第 115 回学術講演会論文集, 103-106.
- (9) 鈴木 誠, 松島 潤, 加藤 俣史, 六川修, 2007, 低温域における弾性波動伝播測定システム(その 2), 物理探査学会第 117 回学術講演会論文集, 329-332.
- (10) 新部 貴夫, 松島 潤, 鈴木 誠, 加藤 俣史, 2007, 模擬メタンハイドレート試料を用いた弾性波減衰に関する室内実験(3) -spectral leakage に関する検討, 物理探査学会第 117 回学術講演会論文集, 107-109.
- (11) 松島 潤, 鈴木 誠, 加藤 俣史, 大橋 邦光, 六川 修一, 2008, 模擬メタンハイドレート試料を用いた弾性波減衰に関する室内実験(その 4) - 散乱減衰の評価, 物理探査学会第 118 回学術講演会論文集, 20-22.
- (12) 新部 貴夫, 松島 潤, 鈴木 誠, 加藤 俣史, 2008, 模擬メタンハイドレート試料を用いた弾性波減衰に関する室内実験(その 5)-spectral leakage による影響の補正-, 物理探査学会第 119 回学術講演会論文集, 81-84.
- (13) 松島 潤, 鈴木 誠, 加藤 俣史, 六川修一, 2008, 模擬メタンハイドレート試料を用いた弾性波減衰に関する室内実験(その 6) - スウィープ波形を用いた速度分散ならびに減衰解析, 物理探査学会第 119 回学術講演会論文集, 85-88.
- (14) 松島 潤, 新部 貴夫, 鈴木 誠, 加藤 俣史, 六川 修一, 2009, 模擬メタンハイドレート試料を用いた弾性波減衰に関する室内実験(その 7) - 岩石物理学的検討, 物理探査学会第 120 回学術講演会論文集, 55-58.
- (15) 松島 潤, 2009, 塩水凍結過程において生成される固液共存系の不均質性評価と波動伝播, 日本地球惑星科学連合同大会 2009.
- (16) 松島 潤, 鈴木 誠, 加藤 俣史, 六川修一, 2009, 多孔質媒体内で生成される固液共存系における超音波波動伝播実験 -データ解析-, 物理探査学会第 121 回学術講演会論文集, 128-131.
- (17) 鈴木 誠, 松島 潤, 加藤 俣史, 六川

修一, 2009, 多孔質媒体内で生成される固液共存系における超音波波動伝播実験 -データ取得-, 物理探査学会第 121 回学術講演会論文集, 132-135.

〔図書〕(計 0 件)  
〔産業財産権〕  
○出願状況 (計 0 件)

名称 :  
発明者 :  
権利者 :  
種類 :  
番号 :  
出願年月日 :  
国内外の別 :

○取得状況 (計 0 件)

名称 :  
発明者 :  
権利者 :  
種類 :  
番号 :  
取得年月日 :  
国内外の別 :

〔その他〕  
ホームページ等  
<http://usegate.t.u-tokyo.ac.jp/frcer/member/matsushima.html>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

**松島 潤 (MATSUSHIMA JUN)**  
東京大学・大学院工学系研究科・准教授  
研究者番号 : 70282499

### (2) 研究分担者 ( )

研究者番号 :

### (3) 連携研究者 ( )

研究者番号 :