

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 25 年 6 月 9 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究（B）

研究期間：2009 ～ 2011

課題番号：21360445

研究課題名（和文） 弾性波減衰特性を考慮したメタンハイドレート濃集帯評価法の構築と濃集機構の解明

研究課題名（英文） Establishment of the method for estimating highly concentrated methane hydrate using seismic attenuation and elucidation of accumulation mechanism of

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（和文）：

本研究は、弾性波減衰特性に着目したメタンハイドレート（以下 MH）層評価法に関するこれまでの研究成果（若手研究(A)：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）を踏まえ、さらに研究を進展させることにより、当該手法の背景となる減衰現象の広範囲周波数領域での解析・把握と、それに基づく包括的な理論・モデルについて検討した。なお、MH 集積メカニズム等の地質モデルを加味することによる MH 層に関する統合的な評価法を提示することも目指していたが、連携研究者の逝去により達成されなかった。

研究成果の概要（英文）：

In order to reduce uncertainties in characterizing methane hydrate bearing sediments, the combined use of other physical parameters can be helpful for reliable quantification of hydrate system. Measurement of seismic attenuation from laboratory and field data, as well as theoretical work, indicate a link between attenuation, the presence of fracture and fluid saturation. Derivation of frequency dependency of total attenuation has a potential to provide insight into the characteristics of hydrate system. We developed advanced seismic attenuation estimation methods and apply them for various seismic methods including ultrasonic laboratory measurement, sonic logging, VSP, and surface seismic.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009 年度	4,300,000	1,290,000	5,590,000
2010 年度	6,600,000	1,980,000	8,580,000
2011 年度	3,400,000	1,020,000	4,420,000
総計	14,300,000	4,290,000	18,590,000

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、地震波減衰、岩石物理学、集積メカニズム、音波検層、反射法地震探査、VSP 地震探査、減衰メカニズム

1. 研究開始当初の背景

日本におけるメタンハイドレート研究開発事業は、諸外国に比べて進んでおり、所有する物理探査データの質・量ともに優れているため、これらデータを積極的に活用しメタンハイドレート層濃集帯を検知する手法

を確立することは国際的意義が大きい。

現在、物理探査データから求められる特性としては、弾性波速度情報が主流であるが、メタンハイドレート賦存形態の多様性への依存性や地下の不均質性による擾乱を受けるため、その他の物性情報を統合することに

より不確実性を減らすことが求められている。地震波減衰特性については数十年以上に渡り研究が行われてきているが、減衰解析手法が確立していないこと、減衰メカニズムの理解が十分でないこと等により、実用化のレベルに至っていない。メタンハイドレート賦存層の減衰特性は特徴的な現象を呈しており（高速度かつ高減衰）、この現象のメカニズムを解明し、併せて体系的な減衰解析手法を構築することは、地震探査分野において重要な意味を持つ。

2. 研究の目的

メタンハイドレート賦存層（MH層）の弾性波減衰特性に着目することにより、濃集帯探査に資する情報を推定する方法論を実データ解析・室内実験・理論的検討により包括的に確立することが最終目標である。

MH層での地震波減衰現象は、波長スケールにより現象が異なる。すなわち、ミクロスケール（室内実験）では固液共存系での減衰メカニズムが働き、メソスケール（音波検層）ではミクロスケールでの現象に加えて、MH層と非MH層との互層における層間でのメソスケールでの流体流れのメカニズムが働き、マクロスケール（VSP、反射法地震探査）では、MH層が波長に比べて薄いことにより減衰が有意に生じない。従ってMH層における地震波減衰現象の周波数依存性を解明することは、MH層のキャラクタリゼーションに有効となり得る。以上はP波の場合であるがS波についても同様の傾向になるかの検討が必要である（ガスの影響を受けないS波の方がMH層の減衰解析には適しているのではないかと推察される）。

また、減衰解析手法は通常の石油・天然ガスを対象とした探査データ処理においても、ルーチン的な処理に組み込まれていない。これは、地震波速度以上に地震波減衰は様々な要因の影響を受けてしまうからであるため、地下の不均質性に係る影響を評価すること、さらには不確実性を定量化し安定的な減衰解析手法を構築することも目指す。

以上より、本研究の目的を3項目に整理すると以下のようになる。

- (1) 減衰特性が未解明な周波数領域・波動モードでの減衰解析を実施し、減衰現象の周波数特性・波動モードの差異を解明する。
- (2) 周波数依存性、波動モードによる差異を説明するためのマルチスケール岩石物理学モデルを構築する
- (3) 地震波減衰解析結果に不確実性を及ぼす要因の整理、不確実性の定量化、安定的な減衰解析手法を構築する。

3. 研究の方法

- (1) 減衰特性が未解明な周波数領域・波動モ

ードでの減衰解析の実施

- ① ウォークアウェイ VSP データ（オフセット VSP データも含む）の S 波減衰解析

国内基礎試錐調査において取得されたウォークアウェイ VSP 記録（基礎試錐「南海トラフ」、基礎試錐「東海沖-熊野灘」）を入手し、S波抽出作業を実施し、2種類（Spectral Ratio 法、Centroid Frequency 法）の減衰解析手法により予備的に減衰解析を実施した。ウォークアウェイ VSP データを利用して S 波減衰特性を明らかにしたのは世界でも極めて例は少ない。

- ② BARS 検層データの P 波・S 波減衰解析

国内基礎試錐調査において取得された BARS 検層データ（基礎試錐「東海沖-熊野灘」）を入手し、P 波と S 波（正確には変換 S 波）の初動波形を抽出し、Spectral Ratio 法、Centroid Frequency 法、mean-median shift 法による減衰解析を予備的に行った。また、音波検層データの問題として、震源と地層とのカップリングの効果ならびに散乱現象の効果の評価した。BARS 検層データを利用して減衰特性を明らかにしたのは世界でも極めて例は少ない。

- ③ 海上地震探査データの P 波減衰解析

減衰解析プログラムの整備・構築として QVO 法（Dasgupta and Clark, 1998）のプログラム化を実施し、国内基礎物理探査において取得された海上地震探査データ（2次元基礎物理探査「東海沖～熊野灘」）に予備的に適用し、既存の音波検層ならびに VSP 記録により得られた減衰結果あるいは MH 飽和率との関係を調査した。また、地層の互層に伴うチューニング効果について数値実験データにより評価した。さらに、反射法地震探査における散乱現象の影響についても評価した。

- (2) 周波数依存性、波動モードによる差異を説明するためのマルチスケール岩石物理学モデルの構築

地震波減衰の岩石物理モデルとして最も有名な Biot 理論を拡張した物理モデルを第一ステップとして室内実験減衰解析データに適用した。また、超音波帯域測定におけるサンプルに対して MRI（核磁気共鳴）測定により得られた 3 次元的なミクロスケール内部構造を用いて岩石物理学モデルを構築する。

- (3) 地震波減衰解析結果に不確実性を及ぼす要因の整理、不確実性の定量化、安定的な減衰解析手法の構築

地下の不均質性が反射法地震探査データに及ぼす影響について数値モデルにより検討した。音波検層データを用いた減衰解析については、Source-formation カップリング効果という坑井環境における特殊な効果につ

いても、その影響を評価した。また、音波検層データを用いた減衰解析における不確実性の定量化と安定的な減衰解析手法を構築し、実データ「基礎試錐・南海トラフ」に適用した。

超音波帯域測定におけるサンプルに対して MRI (核磁気共鳴) 測定を行い、3 次元的なマイクロスケール内部構造を得ることにより、不均質性に関する 3 次元情報を抽出し、波動伝播シミュレーションを実施することにより、超音波減衰測定に与える影響 (散乱減衰効果) を評価する。

4. 研究成果

(1) 減衰特性が未解明な周波数領域・波動モードでの減衰解析の実施

ウォークアウェイ VSP データ (オフセット VSP データも含む) の S 波減衰解析については、S 波抽出作業の減衰解析結果に影響することを見出し、今後より高精度な抽出方法を検討する必要がある。海上地震探査データの P 波減衰解析については、地層の互層に伴うチューニング効果が減衰解析結果に及ぼす影響を評価し、確率論的なアプローチを用いた統計的減衰解析手法を構築した。海上地震探査データの P 波減衰解析により予備的な減衰結果を得たところ、MH 層では減衰値が大きくなっていることが判明したが、これは過去の VSP データを用いた減衰結果と調和的ではない点もあり、上述のチューニング効果の影響が考えられる。

(2) 周波数依存性、波動モードによる差異を説明するためのマルチスケール岩石物理学モデルの構築

今回は多孔質弾性論として有名な Biot モデルに基づいて観測された減衰現象を説明することを試みたが、このモデルのみでは十分に現象が説明できず、Squirt flow 効果や滑り摩擦効果などの複合的な効果を検討する必要性を明らかにした。また、物理モデルのみの検討では不十分であることもわかった (決定すべきパラメータ数が多く、その仮定の影響も無視できない)。今後はマルチスケール室内実験を実施していくことが必要で、とりわけ低周波数帯域での室内実験手法の現況の整理と測定原理に係る予備的検討も行ったところ、その適用性が見出された。

超音波帯域測定におけるサンプルに対して MRI (核磁気共鳴) 測定により得られた 3 次元的なマイクロスケール内部構造を用いて孔隙率を推定する手法を構築した。

(3) 地震波減衰解析結果に不確実性を及ぼす要因の整理、不確実性の定量化、安定的な減衰解析手法の構築

音波検層データを用いた減衰解析につい

ては、Source-formation カップリング効果という坑井環境における特殊な効果についても、その影響を評価し減衰結果に有意に影響を及ぼすことを示した。また、音波検層データを用いた減衰解析における不確実性の定量化と安定的な減衰解析手法を構築することに成功した。また、散乱減衰効果については MRI (核磁気共鳴) 測定により得られた 3 次元的なマイクロスケール内部構造に対して波動シミュレーションを実施し、散乱効果分を見積もり、散乱減衰分が 3 割程度含まれていることを明らかにした。

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 7 件)

- (1) Suzuki, H. and Matsushima, J., in press, Quantifying uncertainties in attenuation estimation at methane-hydrate-bearing zones using sonic waveform logs, *Geophysics*, 査読有り.
- (2) Matsushima, J., 2012, Effects of random heterogeneity on seismic reflection images, In: Kanao, M. (ed.) *Seismic Waves, Research and Analysis*, InTech, 174-194, 査読有り.
- (3) 松島 潤, 2012, 減衰特性解明の超音波室内実験における散乱現象の影響について, *物理探査*, vol.65, pp. 27-36, 査読有り.
- (4) 鈴木博之, 松島 潤, 2012, 音波検層波形記録を用いた地震波減衰解析, *石油技術協会誌*, Vol. 77, 21-27, 査読有り.
- (5) Matsushima, J., Nibe, T., Suzuki, M., Kato, Y., and Rokugawa, S., 2011, A poroelastic model for ultrasonic wave attenuation in partially frozen brines, *Exploration Geophysics*, Vol. 42, 105-115, 査読有り.
- (6) Matsushima, J., Suzuki, M., Kato, Y., and Rokugawa, S., 2011, Estimation of ultrasonic scattering attenuation in partially frozen brines using magnetic resonance images, *Geophysics*, Vol. 76, pp. T13-T25, 査読有り.
- (7) Matsushima, J. and Nishizawa, O., 2010, Difference image of seismic reflection sections with highly dense spatial sampling in random heterogeneous media, *Journal of Seismic Exploration*, Vol. 19, pp. 279-301, 査読有り.

[学会発表] (計 42 件)

- (1) Lee, K. and Matsushima, J. 2012, Thin-Layering Effect On Estimating Seismic

- Attenuation In Methane Hydrate-Bearing Sediments, American Geophysical Union Fall Meeting (2012.12.6, 米国サンフランシスコ)
- (2) Pradhan, O. and Matsushima, J., Suzuki, M., 2012, MR imaging of heterogeneity in partially frozen brine and their effect on ultrasonic wave propagation, American Geophysical Union Fall Meeting (2012.12.6, 米国サンフランシスコ)
 - (3) Matsushima, J., Suzuki, M., Kato, Y., and Rokugawa, S., Kato, A., 2012, Attenuation measurements of ultrasonic P-wave and S-wave in partially frozen unconsolidated sands, American Geophysical Union Fall Meeting (2012.12.6, 米国サンフランシスコ)
 - (4) 李光鎬・松島 潤, 2012, Tuning Effect がメタンハイドレート貯存層での地震波減衰値算出に与える影響 (その2) - 確率統計的な評価, 物理探査学会第127回学術講演会論文集, 223-225 (2012.11.30, 鳥取)
 - (5) 松島 潤・鈴木 博之, 2012, 地震探査データ解析における不確実性の定量的評価 — 音波検層波形記録を用いた減衰解析の例, 物理探査学会第127回学術講演会論文集, 219-222 (2012.11.30, 鳥取)
 - (6) プラダン オム・松島 潤・鈴木 誠, 2012, Effect of partially frozen brine present in porous sand on Seismic wave propagation, 物理探査学会第127回学術講演会論文集, 203-206 (2012.11.29, 鳥取)
 - (7) 松島 潤, 2012, 部分凍結した未固結砂における超音波減衰測定, 日本地球惑星科学連合同大会2012. (2012.5.21, 千葉・幕張)
 - (8) 松島 潤・鈴木 誠・加藤 俣史・六川 修一, 2012, 塩水飽和された未固結媒体の凍結過程におけるS波伝播実験と減衰解析, 物理探査学会第126回学術講演会論文集, 102-105. (2012.5.31, 東京・早稲田大学)
 - (9) プラダン オム・松島 潤・鈴木 誠, 2012, Effect of inhomogeneity on ultrasonic wave propagation in partially frozen brine, 物理探査学会第126回学術講演会論文集, 98-101. (2012.5.31, 東京・早稲田大学)
 - (10) Matsushima, J., Suzuki, M., Kato, Y., and Rokugawa, S., 2011, Characterization of ultrasonic scattering effect due to micro-scale heterogeneity in partially frozen brines using magnetic resonance images, Proceedings of the 10th SEGJ International Symposium, pp.475-478. (2011年11月20日, 京都)
 - (11) Lee, K. and Matsushima, J., Suzuki, M., 2011, Influence of tuning effect on seismic attenuation estimation, Proceedings of the 10th SEGJ International Symposium, pp.163-166. (2011年11月20日, 京都)
 - (12) Pradhan, O. and Matsushima, J., Suzuki, M., 2011, Micro-structural characterization of partially frozen brine using MRI, Proceedings of the 10th SEGJ International Symposium, pp.129-132. (2011年11月20日, 京都)
 - (13) Suzuki, H. and Matsushima, J., 2011, Estimation of seismic wave attenuation at the Nankai Trough area using sonic waveform data, Proceedings of the 10th SEGJ International Symposium, pp.112-115. (2011年11月20日, 京都)
 - (14) Matsushima, J., Suzuki, M., Kato, Y., and Rokugawa, S., 2011, Laboratory measurements of ultrasonic P-wave and S-wave attenuation in partially frozen unconsolidated sediments saturated with brine, Expanded abstracts of 81th Ann. Internat. Mtg.: Soc. of Expl. Geophys. Vol.30 pp. 2130-2134. (米国・サンアントニオ, 2011.9.18)
 - (15) 松島 潤・鈴木 誠・加藤 俣史・六川 修一, 2011, 塩水飽和された未固結媒体の凍結過程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125回学術講演会論文集, 209-212. (2011.9.13, 秋田)
 - (16) 鈴木 誠・松島 潤・加藤 俣史・六川 修一, 2011, 塩水飽和された未固結媒体の凍結過程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125回学術講演会論文集, 205-208. (2011.9.13, 秋田)
 - (17) 李光鎬・松島 潤, 2011, Tuning Effect がメタンハイドレート貯存層での地震波減衰値算出に与える影響, 物理探査学会第125回学術講演会論文集, 201-204. (2011.9.13, 秋田)
 - (18) プラダン オム・松島 潤・鈴木 誠, 2011, Use of MRI to study micro-structures in partially frozen brine, 物理探査学会第125回学術講演会論文集, 197-200. (2011.9.13, 秋田)
 - (19) 鈴木 博之・松島 潤, 2011, 音波検層波形記録を用いた地震波減衰解析, 平成23年度石油技術協会春季講演会 (2011.6.8, 東京)
 - (20) 鈴木 博之・松島 潤, 2011, 音波検層の合成波形記録作成による震源カップリング効果と散乱減衰の評価, 物理探査学会第124回学術講演会論文集, 135-138. (2011.5.12, 東京・早稲田大学)
 - (21) プラダン オム・松島 潤・鈴木 誠, 2011, NMR properties of partially frozen brine

- and their comparison with ultrasonic attenuation results, 物理探査学会第124回学術講演会論文集, 131-134. (2011.5.12,東京・早稲田大学)
- (22) 松島 潤・鈴木 誠・加藤 俣史・六川 修一, 2011, 塩水凍結過程において生成される固液共存系におけるS波データの減衰解析, 物理探査学会第124回学術講演会論文集, 123-126. (2011.5.12,東京・早稲田大学)
- (23) 鈴木 誠・松島 潤・加藤 俣史・六川 修一, 2011, 塩水凍結過程で生成される固液共存系におけるS波データ取得, 物理探査学会第124回学術講演会論文集, 119-122. (2011.5.12,東京・早稲田大学)
- (24) 松島 潤, 2011, 固液共存系のMRI測定に基づく波動伝播シミュレーション(その2), 日本地球惑星科学連合同大会2011. (2011.5.21, 千葉・幕張)
- (25) Suzuki, H., Matsushima, J., 2010, Estimation of seismic wave attenuation using sonic logging data – comparison of estimating methods -, American Geophysical Union Fall Meeting (2010.12.15, 米国サンフランシスコ)
- (26) Matsushima, J., Suzuki, M., Kato, Y., and Rokugawa, S., 2010, Ultrasonic P-wave and S-wave attenuation in partially frozen porous material saturated with brine, American Geophysical Union Fall Meeting (2010.12.15, 米国サンフランシスコ)
- (27) Lee, K., Matsushima, J., 2010, Estimating seismic attenuation in methane hydrate bearing sediments in the Nankai Trough, Japan, American Geophysical Union Fall Meeting (2010.12.15, 米国サンフランシスコ)
- (28) 松島 潤, 鈴木 誠, 加藤 俣史, 六川 修一, 2010, メタンハイドレート層における地震波減衰に関する室内実験研究, 第2回メタンハイドレート総合シンポジウム (2010.12.2, 東京・お台場)
- (29) 鈴木 博之, 松島 潤, 2010, 音波検層波形データを用いたメタンハイドレート層の地震波減衰解析, 第2回メタンハイドレート総合シンポジウム (2010.12.2, 東京・お台場)
- (30) 李 光鎬, 松島 潤, 2010, QVO法によるメタンハイドレート賦存層の地震波減衰値の算出, 第2回メタンハイドレート総合シンポジウム (2010.12.2, 東京・お台場)
- (31) Lee, K., Matsushima, J., 2010, Estimating attenuation in methane hydrate bearing sediments using Q-versus offset method, International Symposium on Methane Hydrate Resources:From Mallik to the Nankai Trough (2010.11.15, 東京代々木)
- (32) Matsushima, J., Suzuki, M., Kato, Y., and Rokugawa, S., 2010, Spatial investigation by magnetic resonance imaging and estimation of scattering attenuation in partially frozen brines, Expanded abstracts of 80th Ann. Internat. Mtg.: Soc. of Expl. Geophys. Vol.29 pp. 2681-2685. (米国・デンバー, 2010.10.22)
- (33) 鈴木 博之, 松島 潤, 2010, 音波検層波形データを用いた地震波減衰解析 -減衰解析手法の比較-, 物理探査学会第123回学術講演会論文集, 118-121. (2010.9.30, 仙台・東北大学)
- (34) 李 光鎬, 松島 潤, 2010, QVO法によるメタンハイドレート賦存層の地震波減衰値の算出(その3) -区間減衰と区間速度の比較-, 物理探査学会第123回学術講演会論文集, 114-117. (2010.9.30, 仙台・東北大学)
- (35) 松島 潤, 鈴木 誠, 加藤 俣史, 六川 修一, 2010, 塩水凍結過程で生成される固液共存系におけるS波データ取得と減衰解析, 物理探査学会第123回学術講演会論文集, 111-113. (2010.9.30, 仙台・東北大学)
- (36) 鈴木 博之, 松島 潤, 2010, F-K領域における音波検層波形データの合成, 物理探査学会第122回学術講演会論文集, 221-224. (2010.6.2, 東京・早稲田大学)
- (37) 李 光鎬, 松島 潤, 2010, QVO法によるメタンハイドレート賦存層の減衰値の算出(その2) -数値実験による検討-, 物理探査学会第122回学術講演会論文集, 71-74. (2010.6.2, 東京・早稲田大学)
- (38) 松島 潤, 鈴木 誠, 加藤 俣史, 六川 修一, 2010, 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8) - スウィープ波形を用いた減衰解析の高度化, 物理探査学会第122回学術講演会論文集, 67-70. (2010.6.2, 東京・早稲田大学)
- (39) 松島 潤, 2010, 固液共存系のMRI測定に基づく波動伝播シミュレーション, 日本地球惑星科学連合同大会2010. (2010.5.28, 千葉・幕張)
- (40) 鈴木 博之, 松島 潤, 2010, 南海トラフ音波検層波形データにおける散乱減衰の評価, 日本地球惑星科学連合同大会2010. (2010.5.28, 千葉・幕張)
- (41) Matsushima, J., Suzuki, M., Kato, Y., and Rokugawa, S., 2010, Experimental approach to characterize seismic attenuation in methane hydrate-bearing sediments, 7th International Workshop on Methane Hydrate Research & Development (2010.5.12, ニュージーラ

ンド・ウェリントン)

- (42) Suzuki, H. and Matsushima, J., 2009, Attenuation estimation at methane hydrate-bearing zones by using sonic waveform logs, Proceedings of the 9th SEGJ International Symposium, PaperID 86. (札幌、2009.10.12)

[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

玉木 賢策 (TAMAKI KENSAKU)

東京大学・大学院工学系研究科・教授

研究者番号：50188421

※2011年4月5日逝去