

令和元年6月5日現在

機関番号：12608

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K18137

研究課題名（和文）メタンハイドレートを含む海底地層に対する波動解析手法の開発とその応用

研究課題名（英文）Development of numerical techniques for wave propagation and scattering in seabed layer including methane-hydrate bearing sediment and its application to geophysical exploration

研究代表者

古川 陽 (Furukawa, Akira)

東京工業大学・環境・社会理工学院・助教

研究者番号：60724614

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,700,000円

研究成果の概要（和文）：本研究は、メタンハイドレートを含む海底地層の波動解析手法の開発とメタンハイドレート濃縮帯の形状推定のための逆解析手法の開発を行なった。本研究では、メタンハイドレートを含む海底地層のモデル化には凍結した多孔質体（frozen porous media）を用い、海底地層に含まれるハイドレートの体積割合を明確に表現した上で解析を行った。波動解析手法には境界要素法を採用し、周波数領域と時間領域の境界要素法を開発を行なった。また、メタンハイドレート濃縮帯の形状推定においては、アンセンテッドカルマンフィルタを用いた推定手法の開発を行なった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では、凍結した多孔質体の波動問題に対する順解析手法および逆解析手法の開発を行なっているが、この力学モデルに対する波動解析の研究例は世界的にも珍しく、学術的意義を有していると考えられる。さらに、凍結した多孔質体を用いることによりハイドレート堆積物の体積割合を明確に表現した上で解析を実現することができる点も、今後の探査技術の発展に貢献できる可能性を有している。

研究成果の概要（英文）：This research studies wave analysis of seabed layer including methane-hydrate bearing sediment. We use frozen porous media for modeling the dynamic behavior of the seabed layer. Using the frozen porous media, we can explicitly express the volume ratio of the hydrate sediment. We develop frequency-domain and time-domain boundary element methods (BEMs) for wave scattering in frozen porous media. In time-domain analysis, convolution quadrature method is used for temporal discretization. Some numerical results present the validity of our proposed BEMs. We also develop an estimation method for the shape of methane-hydrate bearing sediment in seabed layer. In this approach, we try to estimate some parameters of the shape of the sediment using the properties of the scattering waves. We show the validity of our estimation method by solving some typical problems.

研究分野：工学

キーワード：メタンハイドレート 凍結した多孔質体 波動解析 境界要素法 アンセンテッドカルマンフィルタ
形状推定

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

メタンハイドレートはガスハイドレートの種類であり、石油や天然ガスに代わる新たなエネルギー資源として注目を集めている。日本周辺では、太平洋側には深層型(あるいは砂層型とも呼ばれる)、日本海側には表層型のメタンハイドレート層の存在が確認されている。メタンハイドレートに関連する研究や技術開発においては、近年、回収率の高い生産方法の開発や環境影響評価に強い関心が寄せられているが、メタンハイドレート層の探査の効率化や賦存状況の把握は、依然として重要な達成目標に挙げられる。

海底地層に含まれるメタンハイドレート層の探査には、多くの場合、地震探査と掘削によるコアサンプリングが用いられる。探査においては、品位の高い(すなわち、海底地層の間隙にメタンハイドレートが密に存在する状態)のメタンハイドレート層を見つけ出し、そこに存在するメタンハイドレートの総量を適切に把握することが要求される。既往の研究によって、メタンハイドレートはBSR(Bottom Simulating Reflector; 海底擬似反射面)よりも上の地層に存在することが裏付けられており、日本周辺におけるBSRの分布図も既に作成されている。一方、BSRによってメタンハイドレートの存在が裏付けられている場所において、その場所に存在するメタンハイドレート層の大きさや品位を評価するためには、掘削によるコアサンプリングが実施される。コアサンプリングの結果は、探査結果の検証において重要な役割を果たすが、日本周辺には現時点でBSRの存在が確認されていないながら、十分な検証が行われていない領域が広く存在する。このような観点から、メタンハイドレートを含む海底地層に対する探査の効率化は、必要不可欠であると考えられる。特に、地震探査のみでメタンハイドレート層の品位や形状を推定できれば、探査の効率を大幅に向上させることが期待できる。

2. 研究の目的

上述の研究背景を踏まえ、本研究では、地震探査のみで海底地層内のメタンハイドレートの探査を実現する推定手法の開発を行う。この目的を達成するため、海底地層に含まれるメタンハイドレートを明確に表現できる力学モデルに対する波動解析手法を開発し、それをを用いた推定手法の開発を行う。具体的には、以下に示す達成目標を設定する。

(目標1) 凍結した多孔質体に対する波動解析手法の開発

(目標2)(目標1)で開発した解析手法の基づくハイドレート濃縮帯の形状推定手法の開発

3. 研究の方法

以下では、前節に示した達成目標ごとに、研究の方法を整理する。

(1) 凍結した多孔質体に対する波動解析手法の開発

本研究では、海底地層に含まれるメタンハイドレートの体積割合を明確に記述することが可能な力学モデルとして、凍結した多孔質体(frozen porous media)に対する波動解析手法の開発を行なう。凍結した多孔質体はBiotによる飽和多孔質弾性体(固体骨格部と間隙流体によって構成される二相体の力学モデル)の拡張モデルとして知られている。凍結した多孔質体は三相体の力学モデルであり、各相は固体骨格部、間隙流体、そして氷骨格部と呼ばれる。この力学モデルでは、各相の連成効果を表現することが可能であり、また、各相の体積割合を明確に表現することが可能である。ただし、これに伴い場の変数が増加するため、数値シミュレーションにおいては注意が必要となる。

具体的な研究の方法として、はじめに、凍結した多孔質体中を伝播する波動の性質を整理する。ここでは、平面波を仮定した1次元的な波動解析から、波動の伝播モード(P波やS波など)の確認や、各伝播モードの有する分散性(周波数に依存して位相速度が変化する性質)や散逸性(波動伝播に伴ってエネルギーが減少する性質)について考察を行なう。また、メタンハイドレート層に対応する氷骨格部の体積割合(本研究では、氷飽和度 I' と呼ぶ)の変化に伴う波動の性質の変化についても考察を行なう。次に、凍結した多孔質体の2次元波動問題に対する数値シミュレーション手法の開発を行なう。本研究では、境界要素法を用いた解析手法の開発を行なう。境界要素法は、解析領域の境界のみの離散化で近似解を求めることができるため、波動解析において有効な解析手法であることが知られている。

(2) ハイドレート濃縮帯の形状推定手法の開発

海底地層内部に存在するハイドレート濃縮帯(ハイドレートを多く含む領域)の形状推定問題を設定し、それに対する逆解析手法の開発を行なう。ハイドレート層とその周辺領域を凍結した多孔質体によってモデル化し、それらの領域は、氷飽和度の値で区別する。推定アルゴリズムには、アンセンテッドカルマンフィルタを用いる。アンセンテッドカルマンフィルタは、非線形の状態空間表現に適用可能なカルマンフィルタの一種である。本研究では、ハイドレート層の形状を表現するためのパラメータを状態推定量とし、ハイドレート層の周辺で観測される散乱波の特性を観測量とする。このとき、境界要素法による数値シミュレーションは、状態推定量と観測量を関連付ける非線形変換の計算に用いられる。

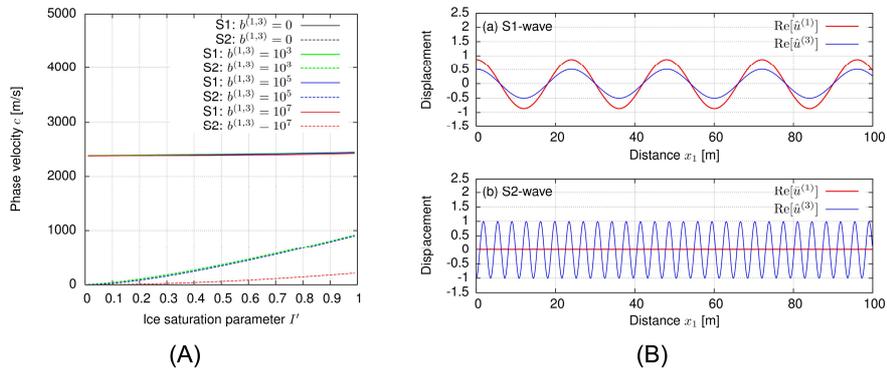


図 1：凍結した多孔質体中の面外波動の性質 (A)位相速度と氷飽和度の関係，(B)波動の各伝播モードにおける変位分布，雑誌論文 より)

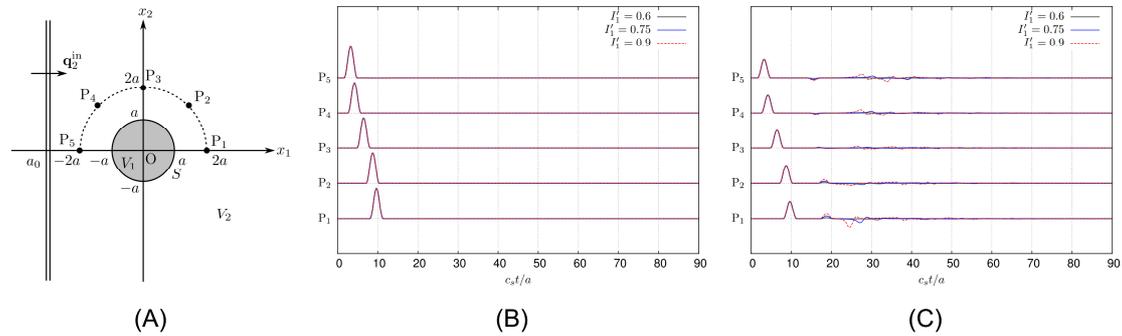


図 2：演算子積分時間領域境界要素法による波動散乱解析の結果 (A)解析モデル，(B)固体骨格部の変位の時刻歴波形，(C)氷骨格部の変位の時刻歴波形，雑誌論文 より)

4. 研究成果

本節では，上述の研究の方法によって得られた研究成果について説明する．

(1) 凍結した多孔質体に対する波動解析手法の開発

はじめに，凍結した多孔質体を伝播する波動の性質についての解析結果を示す．ここでは後述する境界要素解析で対象とする面外波動の性質について説明する．凍結した多孔質体の面外波動問題では，伝播モードとして2種類のS波（S1波およびS2波と呼ぶ）が存在する．図1に解析結果を示す．同図(A)には，位相速度と氷飽和度の関係を示す．この結果から，氷飽和度 I' の変化に伴い，S2波の位相速度が大きく変化することが確認できる．また，同図(B)には，S1波およびS2波の伝播に伴う変位の空間分布を示す．この図において，赤線は固体骨格部の変位を示しており，青線は氷骨格部の変位を示してあり，S1波はこれらの変位が同程度の値となること，S2波は氷骨格部の変位の値が大きくなることを確認できる．

次に，境界要素法を用いた数値シミュレーション手法の開発に関する研究成果について説明する．本研究では，凍結した多孔質体の波動散乱問題に対して，時間領域および周波数領域の境界要素法の開発を行なった．そのうち，演算子積分時間領域境界要素法による解析結果を図2に示す．同図(A)は解析モデルを示しており，領域 V_1 はハイドレート濃縮帯，領域 V_2 はその周辺の海底地層を表している．また，同図(B)および(C)は，観測点 P_i ($i = 1, 2, \dots, 5$)における固体骨格部および氷骨格部の変位を表している．これらの結果から，ハイドレート濃縮帯によって発生する散乱波は，氷骨格部の変位を用いて観測が可能であることが確認できる．

(2) ハイドレート濃縮帯の形状推定手法の開発

3節に示した研究の方法に基づき，ハイドレート濃縮帯の形状推定問題に対する逆解析手法の開発を行なった．図3に提案手法を用いた推定結果を示す．同図(A)は解析モデルを表し，領域 V_1 は凍結した多孔質体でモデル化されたハイドレート濃縮帯，領域 V_2 は飽和多孔質弾性体でモデル化された海底地層に対応している．また，同図(B)および(C)には，介在物であるハイドレート濃縮帯の形状が異なる場合の推定結果を示す．これらの結果から，散乱波に含まれる情報を用いてハイドレート濃縮帯の形状を推定することが可能であることが確認された．

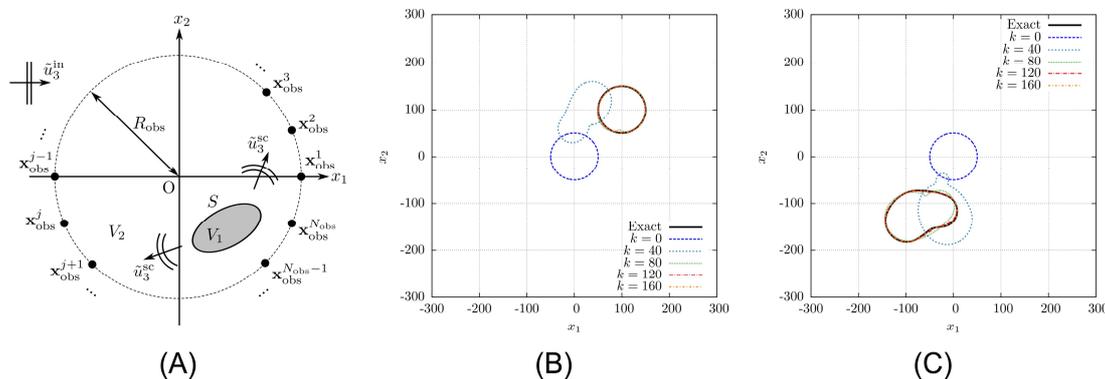


図3: アンセンテッドカルマンフィルタを用いたハイドレート濃縮帯の形状推定問題の解析結果 ((A)解析モデル, (B)円状境界を有する介在物に対する推定結果, (C)非円状境界を有する介在物に対する推定結果, 雑誌論文 より)

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 3 件)

古川陽, 斎藤隆泰, 廣瀬壮一: 周波数領域境界要素法とACAによる凍結した多孔質体内部の介在物による波動散乱解析, 計算数理工学論文集, Vol.17, pp.83-88, 論文 No.17-171215, 2017. (査読有)

古川陽, 斎藤隆泰, 廣瀬壮一: 凍結した多孔質体の面外波動解析のための演算子積分時間領域境界要素法, 土木学会論文集 A2(応用力学), Vol.73, No.2 (応用力学論文集 Vol.20), pp.1_343-1_354, 2017. (査読有)

古川陽, 斎藤隆泰, 廣瀬壮一: アンセンテッドカルマンフィルタを用いた海底地層内部のハイドレート濃縮帯の形状推定, 計算数理工学論文集, Vol.18, pp.63-68, 論文 No.14-181201, 2018. (査読有)

〔学会発表〕(計 8 件)

Furukawa, A., Saitoh, T., Hirose, S.: A boundary element method for antiplane wave analysis of frozen porous media, IABEM2018, Book of abstracts, p.46, 2018. (presented on June 28th, 2018, at Universite Pierre-et-Marie Curie, Paris, France)

Furukawa, A., Saitoh, T., Hirose, S.: Numerical simulation of antiplane wave scattering by a hydrate inclusion using a BEM, WCCM2018, 2018. (presented on July 23rd, 2018, at Marriott Marquis, New York, USA)

Furukawa, A., Iba, R., Saitoh, T., Hirose, S.: A frequency-domain boundary element method using Sinc approximation for SH wave scattering, ICCM2018, ID: 3347, 2018. (presented on August 7th, 2018, at Auditorium Antonianum, Roma, Italy)

古川陽, 斎藤隆泰, 廣瀬壮一: 凍結した多孔質体の面外波動解析のための演算子積分時間領域境界要素法, 第20回応用力学シンポジウム講演概要集, USBメモリ収録(原稿番号: 100129), 2017. (2017年5月20日発表, 京都大学吉田キャンパス)

古川陽, 斎藤隆泰, 廣瀬壮一: ハイドレート堆積物の探査に向けた面外波動の伝播・散乱特性の評価, 第21回応用力学シンポジウム概要集, USBメモリ収録(原稿番号: C000114), 2018. (2018年5月20日発表, 名城大学天白キャンパス)

射場峻輔, 古川陽, 斎藤隆泰, 廣瀬壮一: DE-Sinc境界要素法の2次元面外波動問題への適用, 第21回応用力学シンポジウム概要集, USBメモリ収録(原稿番号: C000067), 2018.

古川陽, 斎藤隆泰, 廣瀬壮一: 凍結した多孔質体と飽和多孔質弾性体の連成解析のための境界要素法の開発と面外波動問題への適用, 土木学会平成30年度全国大会第73回年次学術講演会講演概要集, DVD-ROM収録(原稿番号: CS5-023), 2018. (2018年8月29日発表, 北海道大学札幌キャンパス)

射場峻輔, 古川陽, 斎藤隆泰, 廣瀬壮一: DE-Sinc数値計算法を用いた境界要素法の2次元 Helmholtz 方程式への適用, 土木学会平成30年度全国大会第73回年次学術講演会講演概要集, DVD-ROM収録(原稿番号: CS5-024), 2018.

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況(計 0 件)

取得状況（計 0 件）

〔その他〕
特になし

6. 研究組織

(1)研究分担者
該当なし

(2)研究協力者
研究協力者氏名：廣瀬壮一
ローマ字氏名：Sohichi Hirose

研究協力者氏名：斎藤隆泰
ローマ字氏名：Takahiro Saitoh

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。