

平成 30 年 4 月 22 日現在

機関番号：14401

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2016～2017

課題番号：16K14511

研究課題名(和文) 浮体のクローキングを実現するための海洋波メタマテリアルの開発と設計

研究課題名(英文) Development and design of marine metamaterials for realizing cloaking of a floating body

研究代表者

柏木 正 (KASHIWAGI, MASASHI)

大阪大学・工学研究科・教授

研究者番号：00161026

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,800,000円

研究成果の概要(和文)：水波中での浮体のクローキングを実現する方法として、まず浮体周りに複数の小円柱や弾性膜を同心円状に置き、波の多重反射によって散乱波を小円柱群あるいは弾性膜の内側に閉じ込める方法について各種の研究結果を得た。次に、浅水波近似の下で、空間形状の変形を与える座標変換を使うと、支配方程式や境界条件が元の式と同じになる水深テンソルを求めることができ、それを実現するための均質化法を使って数値計算上クローキングの達成が可能であることを確かめた。さらに、波長より小さい角柱群から構成される特殊な十字水路網を用いると、波が通常とは逆方向に屈折する負の屈折率が実現できることやバックワード波が発生することも確認した。

研究成果の概要(英文)：As a method to realize the cloaking of a floating body in water waves, first, by using a number of smaller circular cylinders and elastic membrane placed around the floating body, various research results were obtained for realizing confinement of scattered waves and hence cloaking, wave-energy absorption, and practically zero wave drift force. Then, under the shallow-wave approximation, we could find the water-depth tensor by using a coordinate transformation that gives deformation of the spatial shape but the same governing equation and boundary conditions. Numerical computation confirmed that the water-depth tensor can be achieved using the homogenization method which can realize the cloaking. In addition, a special cross-channel network composed of a group of small rectangular bodies can realize the negative refraction index implying that the incident wave is bent into an opposite direction and also the backward propagating wave.

研究分野：海洋流体工学

キーワード：クローキング 波浪制御 メタマテリアル 波浪エネルギー 波漂流力 弾性膜 水深テンソル 負の屈折率

1. 研究開始当初の背景

サイエンス誌に掲載された Pendry らによる電磁波でのクローキング現象の論文をきっかけに、音響波や地震波の分野でもクローキングの研究が盛んになりつつある。海洋工学分野における水波と浮体の相互作用の研究では、浮体による散乱波が遠方まで伝播しない状態、あたかも浮体が存在しないかのように入射波が乱されずに伝播する状態になっていることをクローキングと呼び、これまでに Diffraction 問題に対して幾つかの研究が行われているが、浮体が動揺している場合やそれらの工学的応用に関する研究はこれから脚光を浴びるだろうと予測される。研究代表者も数値計算や水槽実験を行い、浮体の周りを幾つかの小円柱で取り囲めば、ある特定の周波数では小円柱群の外側へ散乱波が伝播しないクローキング現象が実現できること、その時には波漂流力もほぼゼロになることを確認した。

しかし特定の周波数でのみ実現されるクローキングでは海洋工学的応用は限られる。もし浮体を迂回するように水波の伝播方向を曲げることができれば、浮体による波の散乱が無くなり、浮体のクローキングが実現される。それは有り得ないように思うかもしれないが、流体の密度や局所的な水深を変化させれば分散関係によって水波の伝播方向を変えることができる。このような「海洋波メタマテリアル」を用いたクローキングの実現は海洋工学的な応用が大きく広がるだろうと考え、本研究の着想に至った。

クローキングに関する研究は電磁波分野、音響波分野で先行しているが、水波では重力の影響による分散性のために研究が難しい。特に海洋波メタマテリアルの観点での研究によって浮体のクローキングを達成させようとする点に本研究の特色がある。海洋工学の分野では、これまで浮体に対する波力の影響は大前提として設計が行われているが、クローキングが実現できると、波力ならびに浮体の動揺をゼロとすることができることになり、設計思想も変わるだろう。またこの技術は、波エネルギーの集積や吸収効率の向上の研究にも応用可能であり、海洋工学の研究分野へ多くの研究テーマを提供することになる。

2. 研究の目的

水波の伝播方向を変えることができる「海洋波メタマテリアル」や「クローキングレンズ」を開発・設計し、それを用いて波浪中の浮体周りに静穏域を創ること、すなわち浮体が波の影響を受けないクローキングという現象が実現できることを数値計算、水槽実験によって実証すること、更にそれを発展させることにより、波浪中での浮体の安全という工学的応用に貢献することが目的である。それを達成するためにこれまでの研究実績を

土台とし、(1) 密度の異なる流体領域、剛性の変化する弾性膜(海洋波メタマテリアル)上での水波の伝播特性を把握するとともに、(2) 水波の伝播角を変化させる没水体クローキングレンズを最適設計する。そしてそれらの成果を踏まえて(3) 波浪中での浮体のクローキングを水槽実験で実証すること、が本研究で行おうとしている主な内容である。

3. 研究の方法

(1) 水波の伝播方向を変えることができる「海洋波メタマテリアル」に関する研究
クロークすべき浮体の周りに弾性膜を水面に置き、それらの分布・剛性・形状を最適化すると水波の伝播方向を変化させることができるはずである。また、局所的に水深を変える没水体(これをクローキングレンズと呼ぶことにする)を浮体周りに配置し、その形状を工夫することでも水波の伝播角は変化する。そのような海洋メタマテリアルを用いたクローキングの実現可能性を実証する。

(2) 海洋波メタマテリアルを用いた浮体のクローキングに関する実証実験

数値計算で浮体のクローキングが実現できたとしても、それが実際に可能かどうかについては、やはり水槽実験で確認する必要がある。密度の異なる流体を使うことは水槽実験では難しいので、水面に浮かぶ弾性膜や没水のクローキングレンズを中心に考え、浮体のクローキングを実験で実証する。

本研究では平成 28 年度に「海洋波メタマテリアル」と「クローキングレンズ」に関する数理解析・数値計算による研究を行い、その結果を踏まえ、平成 29 年度には浮体のクローキングに関する実証実験を行う。密度が変化する流体領域や剛性が変化する弾性膜上を水波がどのように伝播するのか、また局所的な水深を変化させる没水体クローキングレンズ上で水波がどのように屈折するのかに関する研究には、CFD ソフトウェアや独自開発の高次境界要素法を使う。

4. 研究成果

(1) これまである浮体の周りに小円柱群を置き、波の多重反射により散乱波を小円柱群の内側に閉じ込めてクローキングを達成するという研究が行われてきたが、浮体の運動はすべて固定されている diffraction 問題についてのみであった。中央のクロークすべき浮体が波浪によって自由動揺している場合でも、小円柱群の上下運動を外力学系で制御することにより、ある特定の周波数でクローキング現象を達成することが可能であることを示した。また、グリーンの公式に基づくエネルギー保存則を適用して、クローキングと波エネルギーの吸収幅(吸収効率)の関係を理論的に導き、その関係式が数値的に満足されていることを示した。

(2) 浅水波近似の下で、電気回路と流体運動の相関関係を使ってクローキングの実現可能性について理論的に研究し、流体に異方性ならびに不均一な流体密度や水深を仮定することにより、水波が伝播しない領域を創ることができることを示した。また、有限要素法に基づく市販ソフト COMSOL を使って数値計算を行い、理論通りの結果となっていることを確かめた。さらに、流体の異方性を実現させるためのメタマテリアルとして微小幅の水路網を設計し、波動の性質を制御できることを理論ならびに COMSOL による数値実験によって立証した。

(3) 浅水波近似の下で、空間形状の変形を与えるある座標変換を使って、支配方程式や境界条件が元の式のままだなる水深テンソルや重力加速度の条件を求め、それによって波をある特定の場所に集中させる「集波」が可能であることを数値計算によって実証した。

(4) クローキングさせる浮体周りの水面に弾性膜を浮かべ、その形状や剛性を最適化することで水波の伝播方向を変え、浮体のクローキングを達成させる手法について検討したが、浮体の周りを進行波が迂回するように進行方向を変化させることは難しいことが解った。そこで弾性膜の形状は円環(ドーナツ)状とし、剛性や弾性膜の内径・外径を調整することで外方へ伝播する散乱波を極力少なくし、結果的に浮体に働く波漂流力を小さくすることを考えた。数値計算は独自開発の高次境界要素法とモード関数展開法を用い、浮体のみに働く波漂流力は直接圧力積分法を用いた。波漂流力を完全にゼロとするまでには至らなかったが、各モード関数の寄与を詳しく調べ、円環形状弾性膜の内側に散乱波を閉じ込めるメカニズムについて流体力学的な考察を行い、国際会議論文を執筆した。

(5) 浅水波近似の下では、空間形状の変形を与える座標変換を使うと、支配方程式や境界条件が元の式のままだなる水深テンソルを求めることができる。そのような水深を実現するために均質化法を用いて特殊な「メタマテリアル」を作ってクローキングを達成させることができるが、その手法は円柱だけでなく、断面が四角形状の柱状体に対しても有効であることを有限要素法に基づく市販ソフト COMSOL を使った数値計算によって確かめた。

(6) 流体が微小空間において異方的な性質を持ち且つ空間的に不均一に広がっていることを実現させるために、波の長さより小さい十字水路を用いることを提案し、それを用いると波が通常とは逆方向に屈折する「負の屈折率」を実現できることを見出した。COMSOL による数値計算によって、小さな角柱

群の領域が負の屈折率を持つ波動場となり、入射する波は通常とは逆方向の角度をもって屈折することが確認できた。さらにこの媒質中ではエネルギー(群速度)の進む方向に対して、位相速度が逆向きとなる「バックワード波」が生じることも確認した。

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 10件)

- 1) Takahito Iida and Masashi Kashiwagi: Shallow Water Cloaking with Anisotropic Fluid, Proc. of 31st International Workshop on Water Waves and Floating Bodies (Michigan, USA), 査読有, (2016), pp.65 ~ 68
- 2) Mariko Miki, Takahito Iida, Masashi Kashiwagi and Taiga Asaumi: Optimization of Motions of Surrounding Multiple Cylinders to Cloak a Central Body Oscillating in Regular Waves, Proc. of 26th International Offshore and Polar Engineering Conference (Rhodes, Greece), (2016), Vol.3, pp.62 ~ 67
- 3) Takahito Iida and Masashi Kashiwagi: Design of Small Water Channel Network for Shallow Water Cloaking, Proc. of 32nd International Workshop on Water Waves and Floating Bodies (Dalian, China), (2017), pp.89 ~ 92
- 4) Masashi Kashiwagi: Hydrodynamic Interactions of Multiple Bodies with Water Waves, International Journal of Offshore and Polar Engineering, (2017), Vol.27, No.2, pp.113 ~ 122
- 5) Takahito Iida and Masashi Kashiwagi: Water Wave Focusing Using Coordinate Transformation, Journal of Energy and Power Engineering, (2017), Vol.11, No.10, pp.631-636
- 6) Zhigang Zhang, Guanghua He, Masashi Kashiwagi and Zhengke Wang: A quasi-cloaking phenomenon to reduce the wave drift force on an array of adjacent floating bodies, Applied Ocean Research, (2018), Vol.71, pp.1 ~ 10
- 7) Takahito Iida and Masashi Kashiwagi: Backward Waves through Array of Rectangular Columns, Proc. of 33rd International Workshop on Water Waves and Floating Bodies (Guidel-Plages, France), (2018), pp.81 ~ 84
- 8) Takahito Iida and Masashi Kashiwagi: Small Water Channel Network for Designing Wave Fields in Shallow Water, Journal of Fluid Mechanics, (2018), Accepted for publication
- 9) Eva Loukogeorgaki and Masashi Kashiwagi: Hydroelastic Analysis of an Annular Flexible Floating Plate, Proc. of 28th International Ocean and Polar Engineering Conference (Sapporo, Japan), (2018), accepted for presentation

- 10) Takahito Iida and Masashi Kashiwagi: Negative Refraction of Deep Water Waves through Water Channel Network, Journal of Hydrodynamics, (2018), to appear

〔学会発表〕(計 11 件)

- 1) Takahito Iida and Masashi Kashiwagi: Shallow Water Cloaking with Anisotropic Fluid, The 31st International Workshop on Water Waves and Floating Bodies (Michigan, USA), 2016 年 4 月
- 2) Mariko Miki, Takahito Iida, Masashi Kashiwagi and Taiga Asaumi: Optimization of Motions of Surrounding Multiple Cylinders to Cloak a Central Body Oscillating in Regular Waves, The 26th International Offshore and Polar Engineering Conference (Rhodes, Greece), 2016 年 6 月
- 3) 飯田隆人, 柏木 正: 座標変換に基づく波伝播の制御方法に関する研究, 日本船舶海洋工学会春季講演会, 2016 年 5 月 (福岡)
- 4) Takahito Iida and Masashi Kashiwagi: Design of Small Water Channel Network for Shallow Water Cloaking, The 32nd International Workshop on Water Waves and Floating Bodies (Dalian, China), 2017 年 4 月
- 5) 飯田隆人, 柏木 正: 座標変換に基づく集波に関する研究, 日本船舶海洋工学会春季講演会, 2017 年 5 月 (東京)
- 6) 三木真理子, 柏木 正, 飯田隆人, 浅海太雅: 波浪中で自由動揺する円柱のクローキングと波エネルギーの吸収について, 日本船舶海洋工学会春季講演会, 2017 年 5 月 (東京)
- 7) Takahito Iida and Masashi Kashiwagi: Backward Waves through Array of Rectangular Columns, The 33rd International Workshop on Water Waves and Floating Bodies (Guidel-Plages, France), 2018 年 4 月
- 8) Takahito Iida: Controlling Wave Rays with Zero Energy Scattering, 3rd Program of International Platform on Ocean Energy for Young Researcher 2017, Saga, Japan, 2017 March
- 9) Takahito Iida and Masashi Kashiwagi: Cancellation of Scattering Waves by Multilayered Elastic Plate”, International Academic Research Exchange Workshop on Ship and Ocean Engineering, Osaka, Japan, 2018 January
- 10) 飯田 隆人, 柏木 正: 浅水波における負の屈折率を実現する水路網に関する研究, 日本機械学会 2017 年度年次大会, 埼玉, 2017 年 9 月
- 11) 飯田 隆人, Ahmad ZAREEI, Mohammad-Reza ALAM: 薄膜による波漂流力の低減に関する研究, 日本船舶海洋工学会平成 30 年春季講演会, 大阪, 2018 年 5 月

〔図書〕(計 件)

〔産業財産権〕

出願状況 (計 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 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://www.naoe.eng.osaka-u.ac.jp/kashi/kashi.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

柏木 正 (KASHIWAGI MASASHI)
大阪大学・大学院工学研究科・教授
研究者番号: 00161026

(2) 連携研究者

箕浦宗彦 (MINOURA MUNEHIKO)
大阪大学・大学院工学研究科・准教授
研究者番号: 30294044

(3) 研究協力者

飯田 隆人 (IIDA TAKAHITO)
大阪大学・大学院工学研究科・大学院学生
日本学術振興会特別研究員 (DC1)
2016 年度 ~ 2017 年度まで

三木真理子 (MIKI MARIKO)
大阪大学・大学院工学研究科・大学院学生
2016 年度

浅海 太雅 (ASAUMI TAIGA)
大阪大学・大学院工学研究科・大学院学生
2016 年度 ~ 2017 年度まで