

称号及び氏名 博士（工学） 田村 大樹

学位授与の日付 2024年3月31日

論文名 「牡蠣養殖場を対象とした弾性体と剛体の  
連成解析技術に関する研究」

論文審査委員 主査 片山 徹  
副査 中谷 直樹  
副査 橋本 博公  
副査 二瓶 泰範  
副査 飯島 一博（大阪大学大学院工学研究科）

## 論文要旨

人口増加により世界中が食料危機に直面している。この問題意識を全世界で共有して解決に向かうために、SDGs（持続可能な開発目標）の目標2に「飢餓をゼロに」が掲げられた。これにより食料生産方法の高度化の重要性がより一層高まっている。食料のうち世界中で人気が高いものの1つが魚介類である。持続可能な漁業生産の観点から養殖業の需要が高まっており、世界中で大幅に増加している。そこで、養殖技術の高度化の一助となる研究に取り組んだ。

魚介類の中で、牡蠣は養殖生産量の割合が非常に高い。牡蠣の採苗から収穫までに要する期間は1~3年程度であり、養殖期間が長いほど災害のリスクが高い。例えば、養殖期間中に大型の台風が襲来すると、垂下連の動揺量が大きくなり、複数の垂下連が絡まることがある。その事例として、2018年に襲来した大型の台風21号により、日本の牡蠣養殖施設は甚大な被害を受けた。一方で、牡蠣に関する研究事例は牡蠣殻のリサイクルや牡蠣の成育に関するものが多く、牡蠣の運動や台風対策方法に着目された研究事例は少ない。よって、今後大型の台風が襲来した場合にはこれまでと同様の被害が再発すると危惧される。したがって本研究では牡蠣養殖に着目し、数値解析による養殖技術の高度化を目的とした。

牡蠣の養殖方法は多岐に渡るが、垂下式養殖が主流である。垂下式養殖とは、ロープに等間隔に配置されたホタテ貝に牡蠣を付着させて成育する方法である。ここで、ホタテ貝と牡蠣の集合体はグロ、グロが複数付着したロープは垂下連と呼ばれる。垂下式養殖の中で、日本でよく行われている延縄式養殖と筏式養殖を研究対象とした。延縄式養殖では、垂下連を浮かべるための浮力体としてブイが用いられる。ブイの両端にロープが接続され、2本のロープから複数の垂下連が吊るされる。また筏式養殖では、垂下連を浮かべるために筏が用いられる。筏は主に竹と発泡スチロールにより構成されるが、大型の台風に対する脆弱性が問題視され、ポリエチレン製の筏

(以下、PE 筏) が新たに開発されている。PE 筏はまだ開発途上であり、高波浪に対する耐久性や適切な構成方法が明確化されていないため、数値解析などを用いた性能評価が求められている。

以上の社会的背景を踏まえ、課題を解決すべく研究に取り組んだ。本論文は第 1 章から第 6 章までで構成される。各章の概要を以下で説明する。

第 1 章では、研究に取り組む意義を説明するために、研究背景、研究目的および牡蠣の養殖方法などについて述べる。それらの概要は上記のとおりである。

第 2 章では、本論文で扱う物理現象に関連する理論式について述べる。時刻歴応答解析において、延縄式養殖施設を構成するグロとブイは剛体、各種ロープは線状体としてモデル化した。また、筏式養殖施設の筏は弾性体、トレーは剛体としてモデル化した。なお、弾性体と線状体には同じ理論式を適用した。第 5 章において弾性体の曲げ挙動に着目するため、モデル化の方法、曲げの計算手順および曲げひずみの計算方法をまとめた。また、剛体は 6 自由度運動するものとし、運動方程式を用いて運動応答を計算した。剛体に作用する波浪荷重の計算にはモリソン式を用いた。

第 3 章では、延縄式養殖施設を対象とした時刻歴応答解析技術の構築について述べる。剛体と線状体の連成解析の妥当性を検証するために、比較対象となる模型実験を実施した。供試模型におけるグロ模型は数値解析での再現を容易にするために球体とした。規則波のみおよび規則波と一様流の共存場の 2 ケースを対象に、模型実験と数値解析でグロ模型の変位量を計測した。その結果、いずれのケースでも水平変位量と鉛直変位量が概ね一致する結果が得られた。したがって、規則波および流れに対して一定の解析精度があることが確認された。

また、実際のグロは球体ではなく複雑な形状を有している。そこで、グロの付加質量係数、減衰係数および抗力係数を把握するために、強制動揺試験および抵抗試験を実施した。実海域で養殖に用いられたホタテ貝と収穫された牡蠣殻を用いてグロ模型を作製し、両試験に用いた。水平方向の強制動揺試験を行った結果、周期 2~10 s の範囲において、付加質量係数は 1.11~1.41、減衰係数は 0.96~1.40 であった。断面が正方形の四角柱の付加質量係数 1.19 と同程度であることが分かった。また、グロの抗力係数を把握することを目的とした抵抗試験では、水中に固定したグロ模型に対して一様流を作用させた。グロ模型の抗力係数は牡蠣殻の配置や 1 つ 1 つの牡蠣殻の形状により異なるが、本試験で用いたグロ模型では 0.60~0.75 であった。

第 4 章では、構築した数値解析モデルを用いて延縄式養殖施設の台風対策方法を研究した結果について述べる。台風被害として、垂下連が絡まることが問題の 1 つとされている。そこで、垂下連が絡まりやすくなる現象に対して仮説を立て、それらを数値解析で検証した。その結果、以下の知見が得られた。

- 波周期が短いほど隣り合う垂下連が絡まりやすい。これは、隣の垂下連との運動の位相差が大きくなるためである。
- 不規則波・非定常風・一様流を全て同一方向から作用させた場合、非定常風と一様流が垂下連の絡まりやすさに及ぼす影響は小さい。また、不規則波の平均波周期が短いほど垂下連が絡まりやすい。
- 不規則波と非定常風が作用する条件下では、垂下連が整列される方向に波が入射する場合に最も絡まりやすい。

また、上記の結果を踏まえて延縄式養殖施設の改良案を複数提案し、それらの効果を数値解析で立証した。その結果、以下の知見が得られた。

- 垂下連の下端は自由端であるため、特に波周期が短い場合には下端の変位量が大きくなり、

垂下連が絡まりやすくなる。そこで、垂下連の下端にグロよりも質量の大きい物体を設置することで、変位量を抑えられると推測される。数値解析によりその効果を検証し、垂下連が絡まりにくくなることが確認された。

- 隣り合う2本の垂下連の下端を棒状体で接続することで、常に一定の間隔が保たれる。これにより垂下連の絡まりが抑制されることが数値解析により確認された。

第5章では、剛体、弾性体および線状体の連成解析モデルの構築に向けた取り組みについて述べる。第3章および第4章では延縄式養殖を対象としたが、本章では筏式養殖を対象とした。また筏の種類はPE筏とし、垂下連ではなく養殖トレーを対象とした。

数値解析の妥当性検証を目的とし、模型実験を実施した。PE筏には4つのユニットがあり、それらが2本のパイプ（以下、Pipe C）で連結される構造である。そのため、波浪中においてPipe Cの曲げ応力が大きくなりやすい。よって、PE筏の設計時においてPipe Cの耐久性が最重要課題であると考え、供試模型のPipe Cの曲げ剛性が実機に対する相似則を概ね満足するように設計した。なお、縮尺比は1/6.75とした。本実験の目的から逸脱せず、かつ比較的容易に供試模型を製作可能とするため、以下の工夫を施した。

- 実機の構造とは異なるが、Pipe Cを模型の最上部に配置した。これは、Pipe Cに設置するひずみゲージの防水のためである。またこれによりPipe Cは流体に干渉しないため、外形を実機に合わせる必要が無い。そこで、ひずみゲージを設置しやすくするために円筒ではなく平板（以下、Plate C）とした。
- 養殖トレーは網目構造であるが、模型実験では円柱とした。これは、数値解析での再現を容易にするためである。

供試模型を線形ばねで緩係留し、水槽内に設置した。計測項目は波高・波周期、Plate Cの曲げひずみ、各ユニットの変位量および係留力とし、規則波中の応答特性を評価した。波条件は波形勾配を0.02で一定とし、実機スケールで波高を0.07~0.74 m、波周期を1.51~5.0 sとした。また筏模型から吊り下げるトレー模型の個数を0, 8, 16個の3パターンとした。また、実験と同条件の数値解析モデルを作成し、時刻歴応答解析および固有値解析を実施した。模型実験と数値解析から得られた知見を以下に示す。

- 模型実験と数値解析の結果を比較し、運動および曲げひずみの波周期に対する傾向が全ケースで良く一致した。よって、構築した数値解析モデルは定性評価に十分使用可能である。また、Sway変位量、Heave変位量およびトレー模型有りの場合の曲げひずみは全ケースで概ね一致した。したがって、これらの項目の定量評価は十分可能である。
- Heave変位量のRAOは、外側のユニットの方が大きい結果であった。メガフロートなどの弾性浮体では端部の鉛直変位が大きくなることが知られており、それと同じ傾向を示した。
- 入射波の2次成分の周期とPlate Cの1次振動モードの固有周期が概ね合致するケースにおいて、同調現象が確認された。したがって、PE筏の開発・設計段階には曲げの固有振動モードおよび固有周期を把握し、波周期との同調を避けるなどの対策が求められる。
- Plate Cの曲げひずみが最大となるのは波長と模型幅が同程度のケースであった。これは、波長と模型全幅のマッチングが生じたためと考えられる。したがって、実機のPE筏においても波長と筏の全幅が同程度の場合にマッチングが生じ、曲げ破壊の可能性が増大する。

第6章では、本研究で得られた成果を総括して述べる。

以上、本研究では、牡蠣養殖施設を対象として弾性体、剛体および線状体の連成解析技術の構築を目指した。延縄式養殖施設と筏式養殖施設を対象に模型実験との比較検証を行い、いずれも良好な一致を示した。よって、これらの牡蠣養殖施設を対象とした連成解析技術が構築できたと

言える。また、台風対策方法を提案し、構築した数値解析モデルにより検証した結果、十分な効果が示された。

## 審査結果の要旨

本論文は、多岐に渡る牡蠣養殖方法の中でも日本で主として行われている延縄式養殖と筏式養殖を研究対象としたものである。牡蠣の採苗から収穫までに要する期間は1~3年程度であり、養殖期間が長いほど災害のリスクが高まる。このような観点から波や流れや風の外力下における延縄式養殖施設の垂下連や、筏式養殖の浮体部や牡蠣養殖トレー等の挙動を明らかにすることが重要であり、以下の成果を得ている。

- (1) 延縄式養殖施設を対象とした時刻歴応答解析技術の構築を行った。延縄式養殖施設を構成するグロとブイは剛体、各種ロープは線状体としてモデル化した。剛体と線状体の連成運動の妥当性検証のために、模型実験を実施した。検証では規則波のみ及び規則波と一様流の共存場を対象に、模型実験と数値解析でグロ模型の変位量を計測した。グロ模型は簡単のために球体とした。いずれのケースでもグロ模型の水平変位量と鉛直変位量が概ね一致する結果が確認された。グロはホタテ貝と牡蠣殻の集合体であるため、球体ではなく複雑な形状を有している。そこで、グロの付加質量係数、減衰係数および抗力係数を把握した。その結果、付加質量係数は1.11~1.41、減衰係数は0.96~1.40、抗力係数は0.60~0.75ということが明らかになった。
- (2) 延縄式養殖施設において台風時に垂下連が絡まる被害が報告されており、養殖施設の改良案を複数提案し、それらの効果を数値解析で立証した。自由端となる垂下連の下端にグロよりも質量の大きい物体を設置することで垂下連が絡まりにくくなることが確認された。
- (3) 筏式養殖を対象とした時刻歴応答解析技術の構築を行った。主な解析対象の筏の種類は新たに開発されているPE筏とし、牡蠣の養殖方法はトレー養殖とした。PE部を弾性体、トレーは剛体としてモデル化した。数値解析の妥当性検証を目的とし、波浪中における模型実験を実施した。運動および曲げひずみの比較検証の結果、計測した全ケースで傾向は良く一致した。また、PE部の曲げひずみが最大となるのは波長と浮体の幅が同程度のケースであることが明らかにされた。

以上の諸成果は、我が国の主たる牡蠣養殖方法である延縄式や筏式といった養殖施設の挙動を明らかにすることに大きな貢献を果たしたと言え、また他の大規模養殖施設への応用にも展開することができ、海洋システム工学分野の学術的・産業的な発展に貢献するところ大である。また、申請者が自立して研究活動を行うのに必要な能力と学識を有することを証したものである。学位論文審査委員会は、本論文の審査および最終試験の結果から、博士（工学）の学位を授与することを適当と認める。