

令和 2 年 7 月 1 日現在

機関番号：23401

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2016～2019

課題番号：16K14975

研究課題名(和文)物質循環促進型垂下養殖施設の自律運用管理を通じた環境再生型漁業の創成

研究課題名(英文) Enhancement of material cycle improvement by taper cultivation hanging facilities

研究代表者

瀬戸 雅文 (seto, masabumi)

福井県立大学・海洋生物資源学部・教授

研究者番号：60360020

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,900,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、二枚貝垂下養殖施設の外形をテーパ化することにより、施設の後流域に発生する上下混合流が水質環境の改善に寄与することを明らかにした。定常流場ではカルマン渦の発生周期が、振動流場においては付着後流の容積が長手方向に変化することに起因して上下混合流が形成された。ホタテガイ稚貝の貧酸素耐性をストレス度で評価し、養殖海域における貧酸素水塊の動態を感度解析することにより、青潮警戒レベルや近未来の動向を可視化表示可能なアプリを開発した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究は、垂下養殖施設の外形をテーパ化することで、施設自体に上下混合促進効果が発現し、動力装置や土木工事を伴わずに流れが緩やかな閉鎖性養殖海域の水質改善に寄与できる可能性が示唆された。垂下養殖施設を構成する網カゴは、養殖業者が使い慣れた漁具のため、維持管理に新たな技術や知識を必要とせず、貧酸素水塊挙動診断アプリを活用した養殖活動を通して、環境再生と持続的な安定生産を融合した環境再生型漁業の実現に貢献することが期待できる。

研究成果の概要(英文)：Water near sea bottom around the aquaculture grounds into which a lot of nutrients flow becomes deficient in oxygen during summer stratification. We described relationship between vertical mixing rate and taper ratio around taper cultivation hanging facilities. Vertical mixing of the facilities could be explained by the vertical variation of the vortex shedding frequency and wake volume of Karman vortex streets generated on the hanging direction of the facilities. Hypoxia water behavior of stratification stage and convection stage around the aquaculture site were investigated through the numerical simulation and observed analyzing data in Lake Noto. Based on tolerance of scallop to low concentrations of dissolved oxygen and taper cultivation hanging facilities, we developed a method for adaptive management in aquaculture grounds for Japanese scallop *Patinopecten yessoensis*.

研究分野：水産土木学

キーワード：養殖施設

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

ホタテガイ、カキ、真珠など二枚貝の養殖が実施される閉鎖性水域では、海水の上下混合が停滞する成層期の底層より貧酸素水塊が発達し、養殖貝の斃死が報告されている。貝類養殖は、陸上から負荷された栄養塩類を、植物プランクトンを介して摂取し、水産物あるいは放流用種苗として系外へ移送して物質循環の促進に寄与する反面、養殖施設の周辺に堆積した排泄物や養殖施設から脱落した有機付着物により底質の有機物含有量が増加し、DO の減少のみならず富栄養化や青潮の発生を引き起こす。環境問題を抱える養殖場では、貧酸素水塊対策として、養殖許容量規制などの漁場管理対策に加えて、有機汚泥への覆砂・浚渫や水流・曝気による水質浄化装置の有効性が検討されているが、多大な初期投資・維持管理費や水質監視体制、流水制御技術など困難な問題が山積している。養殖海域周辺における貧酸素水塊の逐次観測と貧酸素水塊の挙動シミュレーションをハイブリッド解析することにより、貧酸素水塊の発達状況や近未来の動向を診断し順応的に管理する取り組みも実施されているが、地球温暖化の進行とともに貧酸素水塊の形成深度が浅所化し、その動向を予測出来ても発達を抑制できない順応的管理の限界性が懸念されている。申請者は、直径が軸方向に減少するテーパ構造物に対して、軸と垂直方向より定常流を作用させると、後流域に上下混合流が発生することを見出した。この流れは、夏季成層期の密度躍層を破壊する強さをもち、人工湧昇流発生構造物などへ応用が期待される。さらに上下混合流は亜臨界レイノルズ数領域に対しても発生することが確認され、垂下養殖施設の外形をテーパ状に形成することにより、我が国で垂下養殖が営まれる流れが緩やかな閉鎖性海域における貧酸素水塊の発達抑制への活用が期待できる。垂下養殖施設を構成する網カゴは、養殖業者が使い慣れた漁具のため、維持管理に新たな技術や知識を要しない。さらに、養殖施設自体に上下混合促進効果を付与することにより、動力装置や土木工事を一切伴わず、養殖区画や生産規模、運用経費を大きく変えることなく、網カゴの交換時期に合わせて導入が容易である。

### 2. 研究の目的

本研究は、垂下養殖施設を構成する網カゴの代表径を垂下方向に変化させることにより、施設外形をテーパ化した上で配置した場合の、上下混合促進効果を解析し、環境再生と安定生産を両立可能な新たな垂下養殖施設を開発する。ホタテガイの種苗生産拠点である能取湖をモデルケースとして、成層構造と貧酸素水塊の挙動をフル 3 次元流動解析モデルで再現し、水槽実験を実施して貧酸素条件下における稚貝の斃死リスクや摂餌率の変化も加味しながら、貧酸素水塊の動きを予測し、先手を打って対処するための貧酸素水塊挙動診断アプリを開発し、適用性を検証する。養殖活動を通して環境再生と安定生産が持続可能となる自律サイクルを誘起することにより、水産業と環境再生を融合した環境再生型漁業の実現に向けた要素技術を開発する。

### 3. 研究の方法

#### (1) 物質循環促進型垂下養殖施設の開発

丸カゴの代表径を連続的に変化させながら垂下方向に連結することによりテーパ型の外形を有する施設模型を形成した。トレーサ粒子を拡散させた水槽の観測部に下方が凸になるように施設模型を垂下し、主流流速を段階的に変化させながら、低密度 PIV 法を用いて施設模型周辺の流れ場を可視化計測し、上下混合促進効果を最大化するための施設条件を解明した。続いて、水槽観測部に二層流を形成後、顕著な上下混合流が認められたテーパ型施設模型を水温躍層を貫いて設置し、下層をメチレンブルーで着色後、主流流速、密度勾配、施設の躍層貫入深度を段階的に変化させながら施設の成層強度低減効果の発現条件を明らかにした。さらに、実海域で作用する波浪や潮流に伴う振動流場に適用範囲を拡張し、水理模型実験を実施して上下混合流の形成機構を解明した。

#### (2) 上下混合動態予測モデルの構築

能取湖をモデルケースとして、2011~2017 年における湖内水質調査データを水塊分析し、湖内に水温躍層が発達し外海水が湖内中層に進入する 7 月上旬~9 月上旬と、底層進入に切り替わり青潮を誘発する 9 月中旬~10 月上旬に大別した上で、水温、塩分、DO の鉛直分布を初期条件、外海潮位データおよびアメダスより得られる風データを境界条件としてフル 3 次元流動場解析モデルと生態系モデルを用いて、貧酸素水塊の挙動に伴う湖内の環境変化を数値解析した。計算では、能取湖およびオホーツク海周辺海域を水平格子間隔 100m x 100m、水深方向には 1m 間隔で最大 27 層に分割した。予備的な数値シミュレーションを実施して、貧酸素水塊の顕著な上昇が認められた南風を選定し、夏季成層期は 3.5m/s ~ 5.5m/s の範囲内で、青潮警戒期は 3.5m/s ~ 5.0m/s の範囲内で段階的に風速条件を変化させた。

#### (3) 貧酸素水塊挙動診断アプリの適用性解析

ホタテガイ稚貝を対象に貧酸素耐性実験を実施した。飼育水槽内に  $N_2O_2$  混合ガスを曝露し混合ガスポンベ法を用いて DO が 0.1 mg/L ~ 4.0mg/L および飽和、飼育水温を 16 ~ 24 まで段階的に可変しながら、致死時間を濾水率と共に求めた。さらに、ホタテガイ稚貝の貧酸素耐性について、水質条件の非正常性も反映可能なストレス度による評価手法を考案し、上下混合動態予測モデルとハイブリッド解析することにより、当該域でモニタリングされた水質観測データを入力すると、貧酸素水塊の挙動やホタテガイの斃死リスク(警戒レベル)をタブレット端末上で可

視化表示可能な貧酸素水塊挙動診断アプリを開発した。最後に、ホタテガイ稚貝を対象に実験水槽内の水温を一定の上昇率(0.05 /min~0.28 /min)で12~22まで昇温させた場合、およびD0を一定の減少率(-0.032 mg/L/min~-0.19mg/L/min)で7.5mg/L~0.2mg/Lまで低下させた場合の水質急変実験を実施して、ストレス度を指標とする貧酸素水塊挙動診断アプリの適用性を検証した。

#### 4. 研究成果

##### (1) 物質循環促進型垂下養殖施設の開発

二枚貝の垂下養殖が営まれる内湾の閉鎖性海域における主流速を想定し、亜臨界レイノルズ数領域に垂下した養殖施設の実用上の適応範囲を考慮して、テーパ比を0.05~0.2、施設長手方向と鉛直方向のなす傾斜角を0~0.35radまで変化させたところ、テーパ比が0.15付近で上下混合流の流速振幅はピークをとり、最大で主流流速の0.6倍程度まで発達した。さらに、流速振幅は傾斜角0.1rad付近で最小値をとり上下混合も停滞した。テーパ施設模型の後流域における渦の吐出に伴う変動流速は、単一周波数をピークとしたワイドバンドなスペクトル分布をとり、テーパ径によらず長手方向にストローハル数で0.19程度を維持した。すなわち、テーパ施設の後流域ではテーパ径に応じてカルマン渦の発生周期がスパン方向に変化し、これに応じて主流と直交する流速の水平成分もスパン方向にシア一流を形成して、シア一流に駆動された非対称型の一対の渦列が施設背後にスパン方向に発生した。施設背後の左側の渦列は反時計回り、右側の渦列は時計回りに回転し、これら鉛直渦に駆動される形で、渦列を縫うようにスネーク状の上昇流が発生し、渦列の左右外縁には下降流が形成された。左右の渦列の配置間隔は、後流逆流域の後端でゼロに漸近し上下混合流も減衰することから、渦列の形成特性をもとにテーパ施設の上下混合促進機能を定量化できた。続いて、鉛直循環型二層流振動流水槽を用いて密度差0.23 kg/m<sup>3</sup>~1.17kg/m<sup>3</sup>の範囲内で定常二層流を形成後、密度躍層を貫いてテーパ施設を配置し、上下混合流の形成状況を注入トレーサ法より解析したところ、密度勾配に応じた最適テーパ比が増加することが確認された。テーパ型の施設模型に周期6sec~12secの振動流を作用し、流速振幅を0.03 cm/s~16.7cm/sまで段階的に変化させながら物体周辺の流れ場を可視化解析した結果、流速振幅の増加に伴い後流域の流れパターンは、双子渦の発生、伸長、カルマン渦へと変化し、物体背後の付着後流の容積増加率の長手方向の変化を補うように、主流の流速振幅と同じオーダの上下混合流が転流の度に間欠的に発生し、これらの流れパターンは主流速度/(主流加速度×円柱径)<sup>1/2</sup>で統一的に評価された。アスペクト比0.2程度の連段丸籠の代表径を、長手方向に2~10段階変化させた水理模型実験より、代表径が5段階以上、施設外形のテーパ比が0.15の条件で上下混合が促進された。

##### (2) 上下混合動態予測モデルの構築

成層海域における密度躍層の安定指標であるリチャードソン数を構成する、密度差、上層厚 $h$ 、海上の風速、および貧酸素水塊の形成深度 $d$ をパラメータとし、夏期成層期と青潮警戒期のそれぞれについて感度解析を実施したところ、夏期成層期においては、水温躍層が未発達の状態では貧酸素化が進行した場合にD02.0mg/L未満の貧酸素水塊が湖奥方向に上昇し垂下養殖深度に達することがわかった。青潮警戒期においては、外海水の密度が湖内底層水の密度よりも小さい場合には、貧酸素水塊は吹送流に起因した鉛直補償流により湖奥方向に広く拡散し、外海水の密度が湖内底層水の密度よりも大きい場合には、湖内底層に潜り込んだ外海水が貧酸素水塊を湖奥の表層へと移送し、 $0.4 < d < 17\text{m}$ 、風速4.0 m/s~4.5m/sで表層のD0低下が顕在化し、風速3.5m/sの南風が連吹する条件下で垂下養殖施設への被害が拡大する可能性が示唆された。開発された上下混合動態予測モデルは、当該域で発生した青潮に伴う貧酸素水塊の湖奥部への遡上や移流消滅過程を概ね再現できた。

今回構築した上下混合動態予測モデルをもとに、ホタテガイ種苗の管理を担う漁業関係者が、湖心における表層と底層の水温・塩分、上層厚 $h$ 、D02.0mg/Lの形成深度 $d$ 、湖口における水温・塩分の断面平均値を入力すると、感度解析結果をもとに、今後、発生が予測される様々な風条件の中で、養殖貝に最も被害を及ぼす最悪のシナリオを湖内の養殖区画ごとに抽出し、水深別のD0と警戒レベルを可視化表示可能な貧酸素水塊挙動診断アプリを開発した。具体的には、湖心および湖口における $h$ 、 $d$ の値と、各養殖区における $h$ 、 $d$ の対応関係を明らかにした上で、養殖区画ごとに、 $h$ 、 $d$ と貧酸素水塊の上昇深度の関係を等値曲面で近似した。また、当該入力データと前回に観測された既往データを比較し、その変化率に基づいた今後の貧酸素水塊の動向が日別に推定(可視化表示)できる。さらに、本アプリによるD0の予測値と観測データを定期的に比較・校正することにより、アプリの精度向上や、気候変動など中長期的な環境変動に適応できる可能性が示唆された。

##### (3) 貧酸素水塊挙動診断アプリの適用性解析

稚貝の貧酸素耐性をKaplan-Meier法より推定したところ、D0が0.5mg/L、1.4mg/Lの全ての実験区およびD0が2.2mg/Lで高水温の実験区では連続暴露144時間でほぼ全滅し、その他の実験区においては10%致死まで至らなかった。定水温、D0環境下における貧酸素耐性をストレス度により評価し、貧酸素水塊挙動診断アプリの警戒レベルに反映した。ストレス度は、貧酸素水塊に暴露した生物の定水温下のD0に対する暴露時間と死亡率の関係をもとに、暴露時間で基準

化された1時間当たりの斃死率を時間積算した値として定義した。ストレス度を用いれば、水温とD0が連続的に変化する実海域において、貧酸素水塊のD0、暴露時間と斃死率の関係を推定できる。定水温、D0実験より推定されるストレス度の非定常環境下における適用性を、本種の浮遊珪藻 (*Chaetoceros gracilis*) に対する摂餌速度をもとに検証した。具体的には、水温およびD0濃度を連続的に変化させた後、一定時間維持した非定常環境下における摂餌量を、水温、D0を段階的に変化させた定常過程より推定された摂餌速度曲線もとに算定される摂餌量と比較したところ、水温上昇率0.19 /min以上、溶存酸素濃度低下率-0.12mg/min以下の急変現象に対しては再現性の低下が懸念された。今後、青潮の挙動など水質環境の非定常的な急変現象に対する生物応答に関する知見の集積により診断アプリの精度の向上が期待できる。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計3件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 瀬戸 雅文
2. 発表標題 二枚貝中間育成における自律運用管理プロセスの確立
3. 学会等名 日本水産学会中部支部大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 瀬戸 雅文
2. 発表標題 非定常流場におけるテーパ円柱の上下混合促進機構
3. 学会等名 日本水産工学会学術講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 瀬戸 雅文
2. 発表標題 テーパ付き円柱構造物の上下混合促進機構
3. 学会等名 日本水産工学会
4. 発表年 2016年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----