

シンポジウム「持続可能な次世代養殖システムの開発：サバ養殖の新たな展開に向けて」

海面半閉鎖循環式養殖システムの 実現可能性の検討

令和5年12月12日 @イオンコンパス東京八重洲会議室 (RoomB+C)

東京大学生産技術研究所 北澤 大輔

水産研究・教育機構

水産技術研究所 井上 誠章、三好 潤

- 新たな養殖の場：陸上・閉鎖的な沿岸域・沖合域
- 海面半閉鎖循環式養殖システムの実現可能性の検討
- まとめ

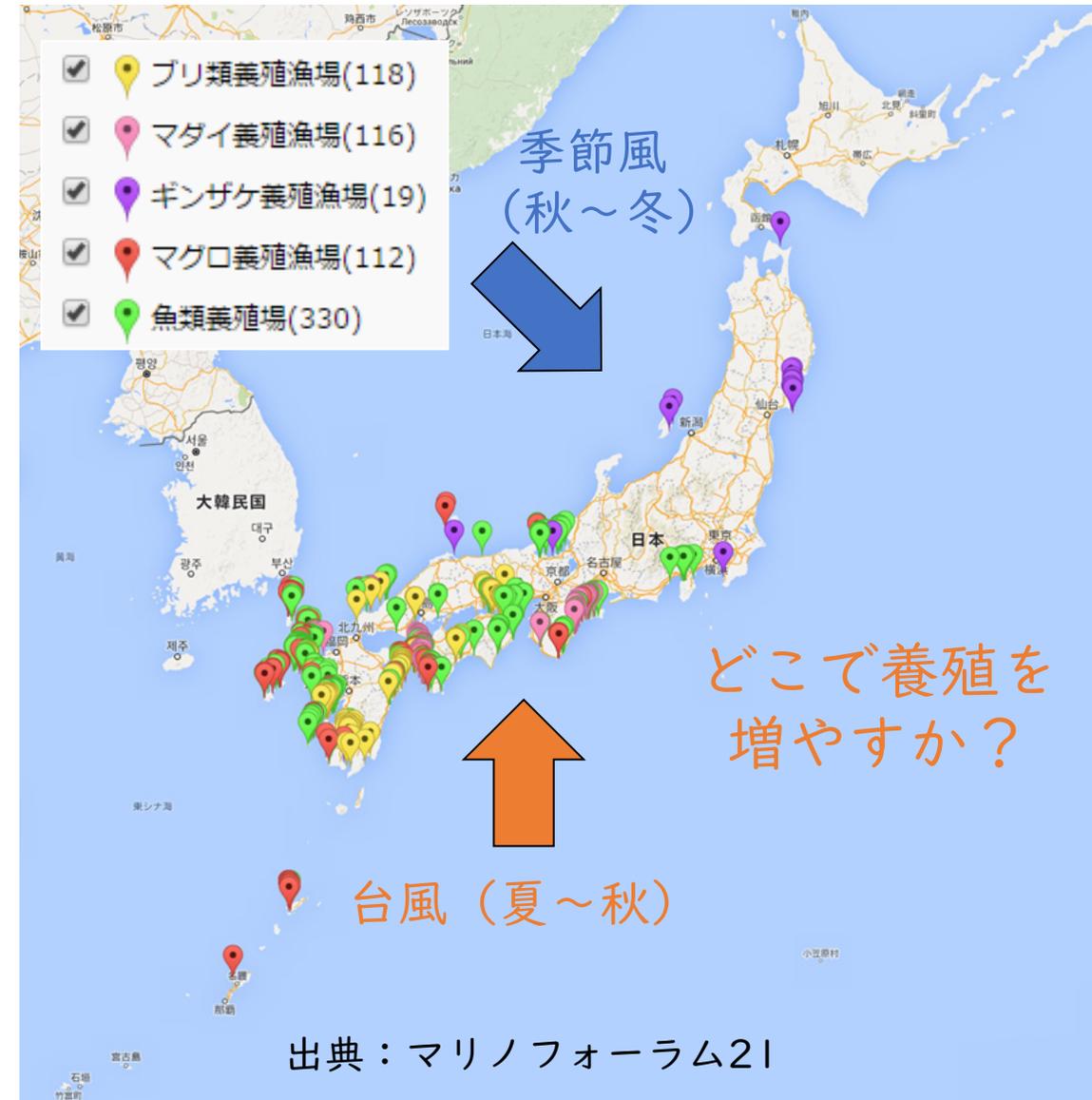
養殖生産量の目標（水産庁：魚類）

魚種	2018年	2030年（目標）
ブリ類	13.8万トン	24万トン
マダイ	6.1万トン	11万トン
クロマグロ	1.8万トン	2万トン
サケ・マス類	1.8万トン	3-4万トン
新魚種		1-2万トン

※現状で、ノルウェーでは150~160万トン、チリでは70~80万トンのサーモンを養殖している。

※みどりの食料システム戦略では、2030年までに漁獲量を444万トンまで回復することを目標としている。

養殖漁場マップ



養殖の場をどこで増やすか？

- 波浪の影響が少なく、潮通しが良い沿岸海域で養殖を行っている。
- 海水交換が悪い海域や波浪が高い海域では養殖があまり行われていない。

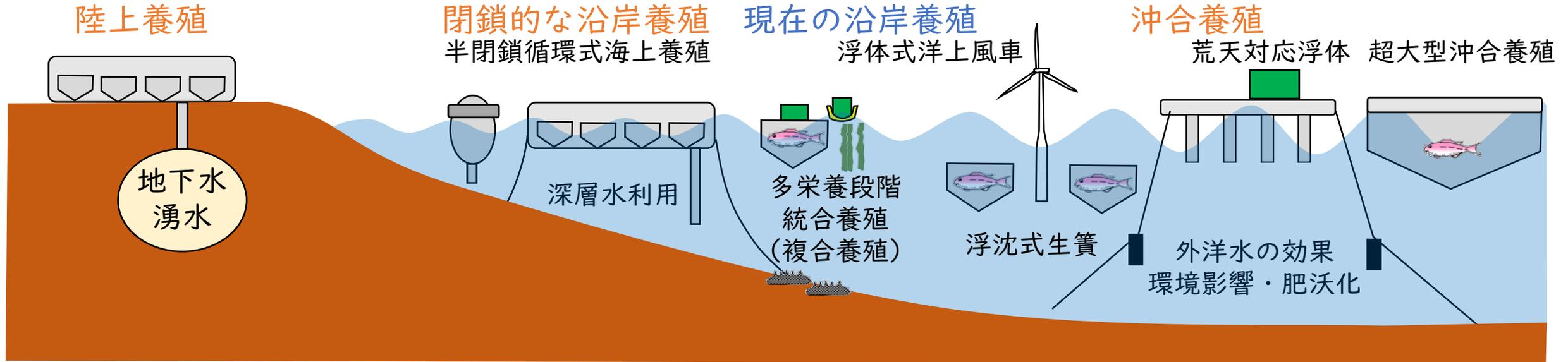
三重県五ヶ所湾



高知県柏島



既存の養殖の場である沿岸と新たな養殖の場である陸上と沖合



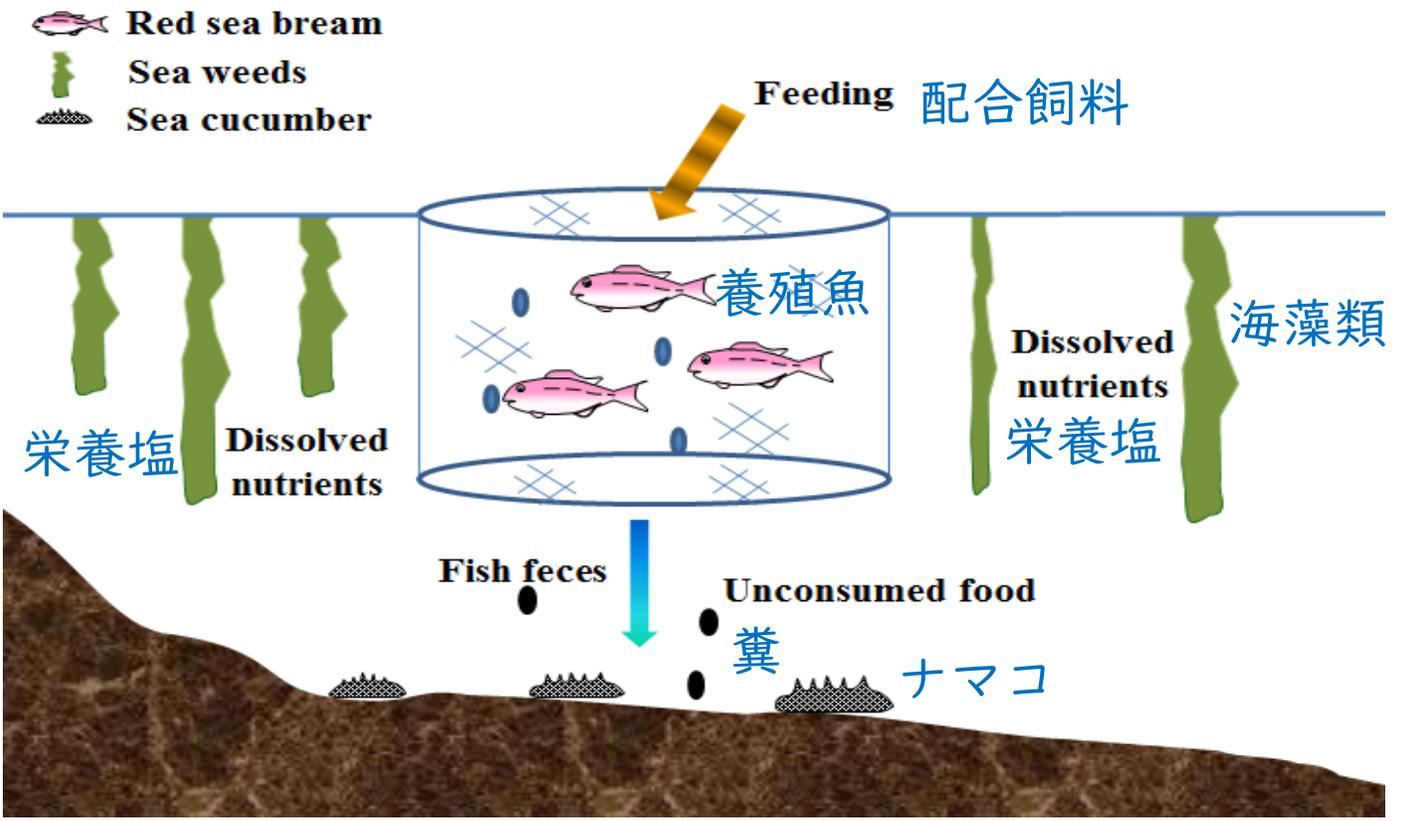
新たな養殖の場

沿岸: 赤潮等が発生する海域や漁港などの未利用海域の利用を目的とする。①排泄物を利用して他の生物を飼育する**多栄養段階統合養殖 (複合養殖)**を実用化する。②波浪の影響が少なく、潮通しもあまり良くない海域 (閉鎖的な沿岸海域) で、従来の網ではなく、海水をあまり通さない材料を用いた生簀による**半閉鎖循環式養殖システム**を利用する。内部水と汚染された外部水 (赤潮、貧酸素水塊、ウイルス、寄生虫等を含む) を隔離し、内部水を管理しながら飼育する。

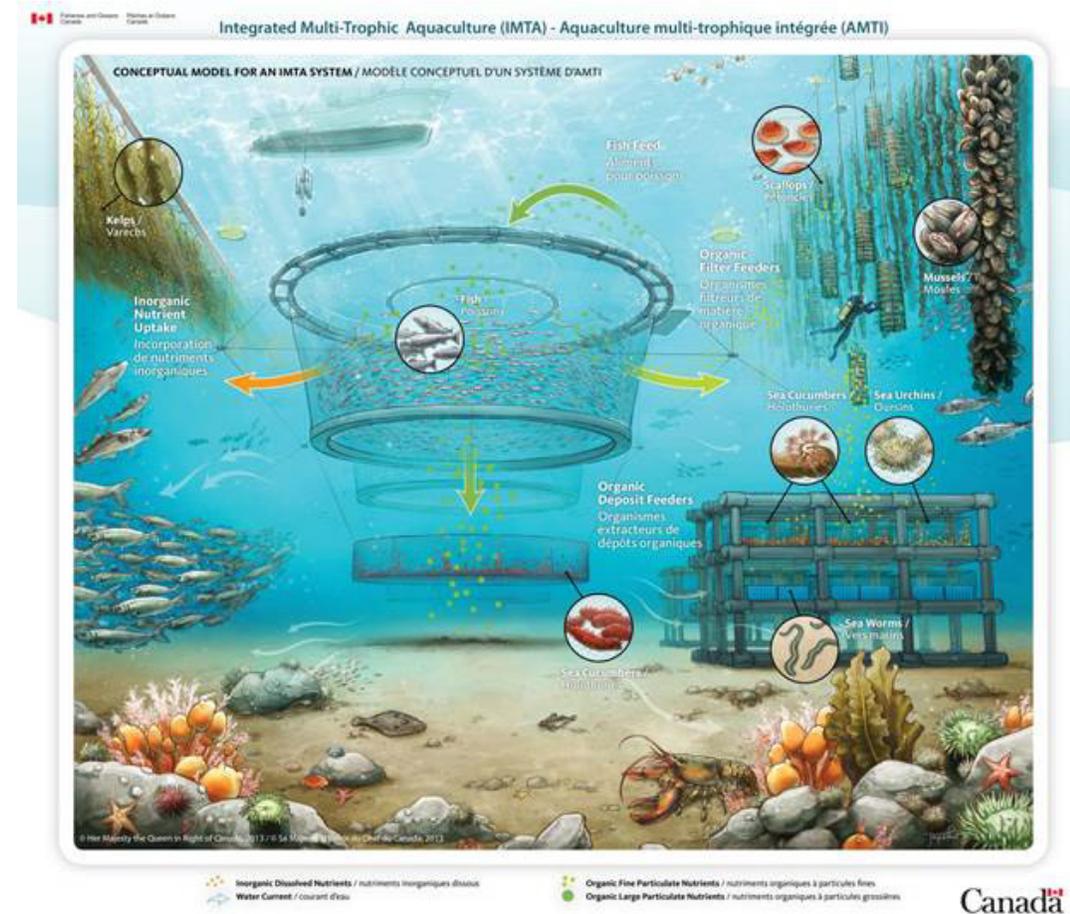
沖合: 波浪の影響が大きく、潮通しも良い海域で養殖を行う。浮沈式生簀は開発されてきたが、給餌のためのプラットフォームは開発課題であり、通常の給餌船方式、陸上からの長距離搬送方式、自律運航給餌船等が検討されている。プラットフォームとして**洋上風車**の利用も考えられる。

多栄養段階統合養殖等による環境負荷低減

養殖魚の排泄物を他の生物に摂取させ、環境への負荷を減らし、生産性を向上させる。
ただし、付加的な作業が増加と経済性、局所的な流速減少などの欠点もある。システム化を行ってビジネスモデルを構築できるかが鍵。



出典：Zhang et al. (2016)



出典：Fisheries and Oceans Canada



従来の生簀形状

出典：Fishfarmingexpert



従来と異なる生簀形状

出典：Hauge Aqua AS



バージ船

出典：<http://www.ace-sg.com/>



大型船舶

出典：ASC HP

- 従来の生簀に近い形状から、バージ船、大型船、新たな形状まで、様々な形状が提案されている。
- 作業員の環境安全、**寄生虫の少ない深層水**の利用、生簀内部の流れと環境の制御、高精度な給餌と残餌、糞の再利用、**逃亡防止**、捕食防止などが利点として挙げられている。溶存態の排泄物は海水中の排出される。
- 既存生簀の代替として用いられ、電源や配合飼料はバージ船などから供給される。
- 従来の生簀に近い形状には、**剛体**と**柔軟体**のものがある。



波浪中での**スロッシング**の発生やそれによる生簀への荷重が懸念されている

世界の沖合養殖への取り組み

1980

1990

2000

2010

2020

日本



スウェーデン



ロシア

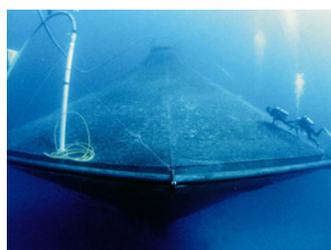
米国

パナマ

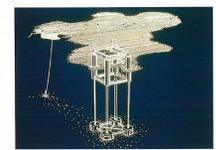
韓国

ノルウェー

中国



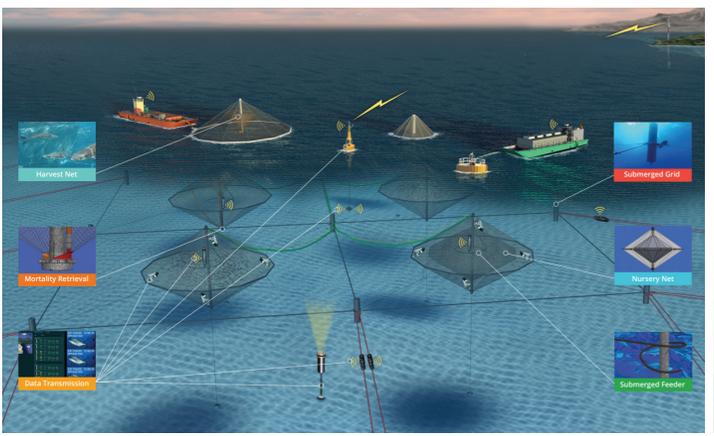
- 沖合養殖



- 大型生簀

- 大型浮沈式生簀

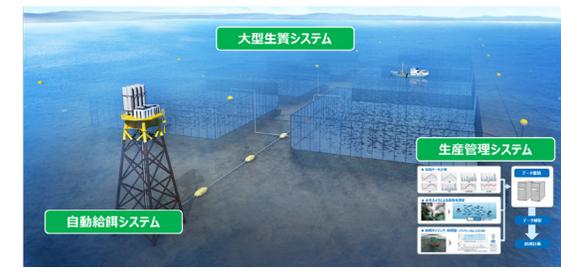
- 沖合養殖プロジェクト



- 沖合沈下式養殖

- マグロ養殖効率化

- 大規模養殖システム



- 沖合Cobia養殖

- 沖合養殖プロジェクト



- EXPOSED

- ○○一号



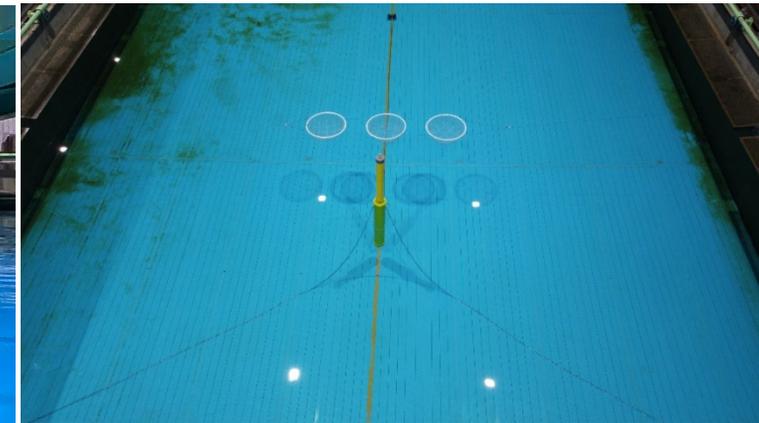
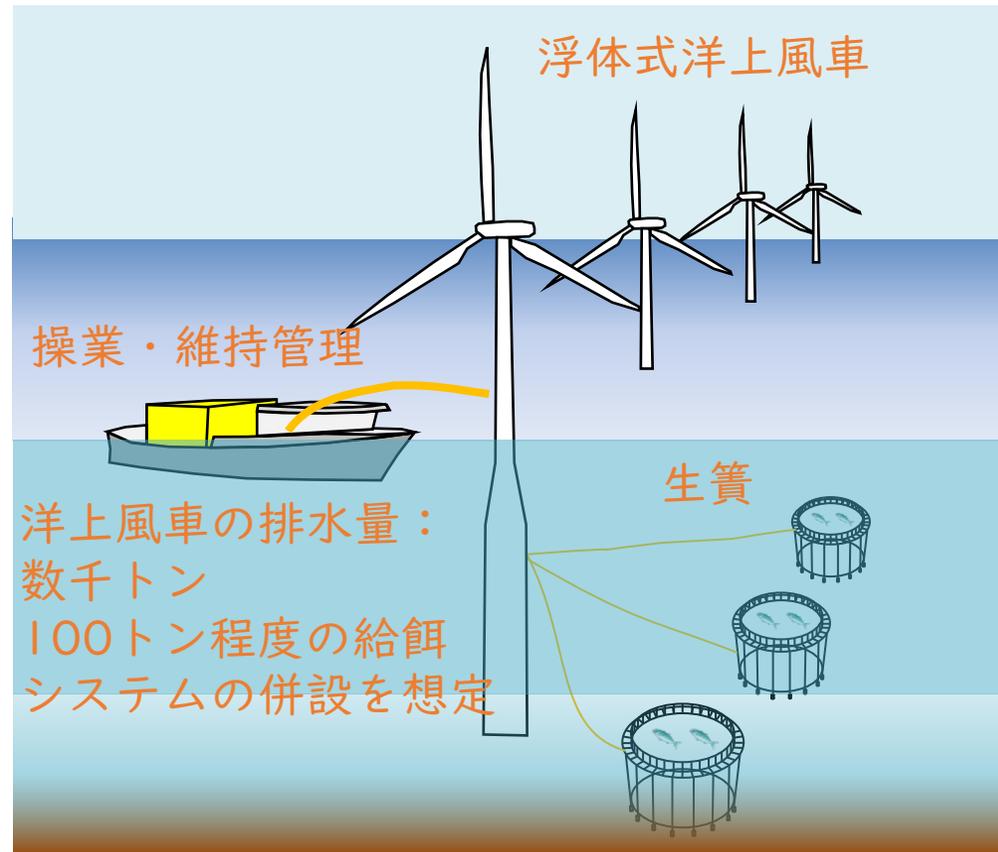
出典：Svealv (1988), SADC HP, Vielma and Kankainen (2013), InnovaSea HP, マリノフォーラム21, 株式会社ニッスイ, 日東製網株式会社, 日鉄エンジニアリング株式会社, Kim et al. (2014), Salmar HP, 人民網日本語版

- 給餌プラットフォームと複数の生簀を組み合わせたシステムと超大型養殖システムに分けられる。
- 浮沈式生簀は開発されてきたが、給餌システムの開発は十分でない。

- 生簀としては浮沈式生簀を用いて、給餌用プラットフォーム、操業・維持管理システムは洋上風力発電と共有化できるが、給餌用プラットフォーム、操業・維持管理システムについては課題がある。
1. 洋上風力の事業者は、認証の観点から、付帯設備を増やしたくないこと、操業に伴う事故のリスクを減らしたいとの意見がある。
 2. 養殖業者からは、風が強く、波浪が高い海域で養殖を営むことは困難であるとの意見がある。

洋上風力発電と養殖の連携のイメージ

水槽模型実験の例



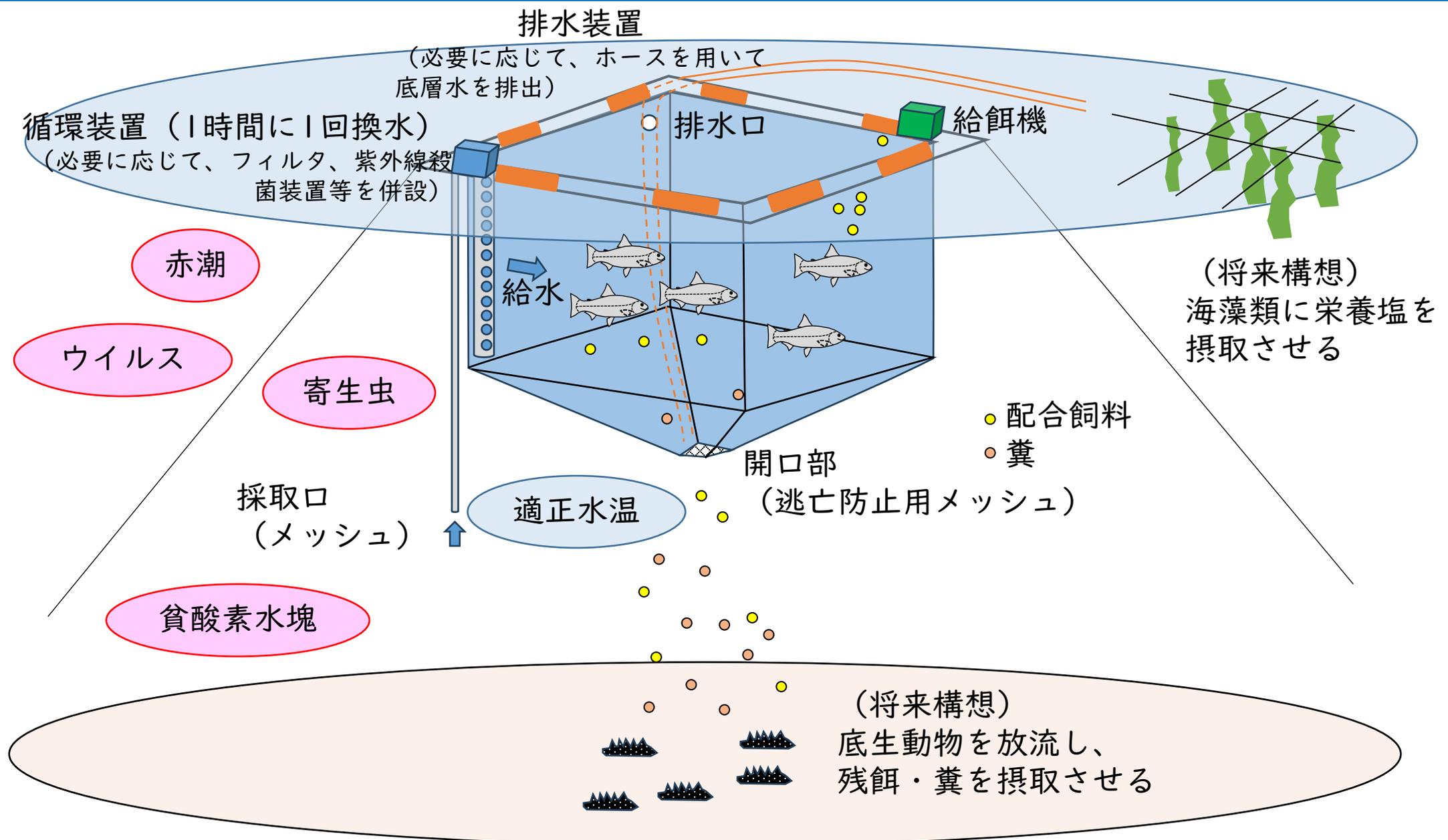
浮体運動の観点から、排水量が3500トンのスパー型浮体式風車に100トンの給餌システムを設置する場合、加速度、運動変位が顕著な増加はないため、併設利用が可能と言える。

生簀の存在により、短周期の波浪中では洋上風車の運動が抑制され、長周期の波浪中では運動がやや大きくなる様子も見られたが、ほとんど変化がなかった。

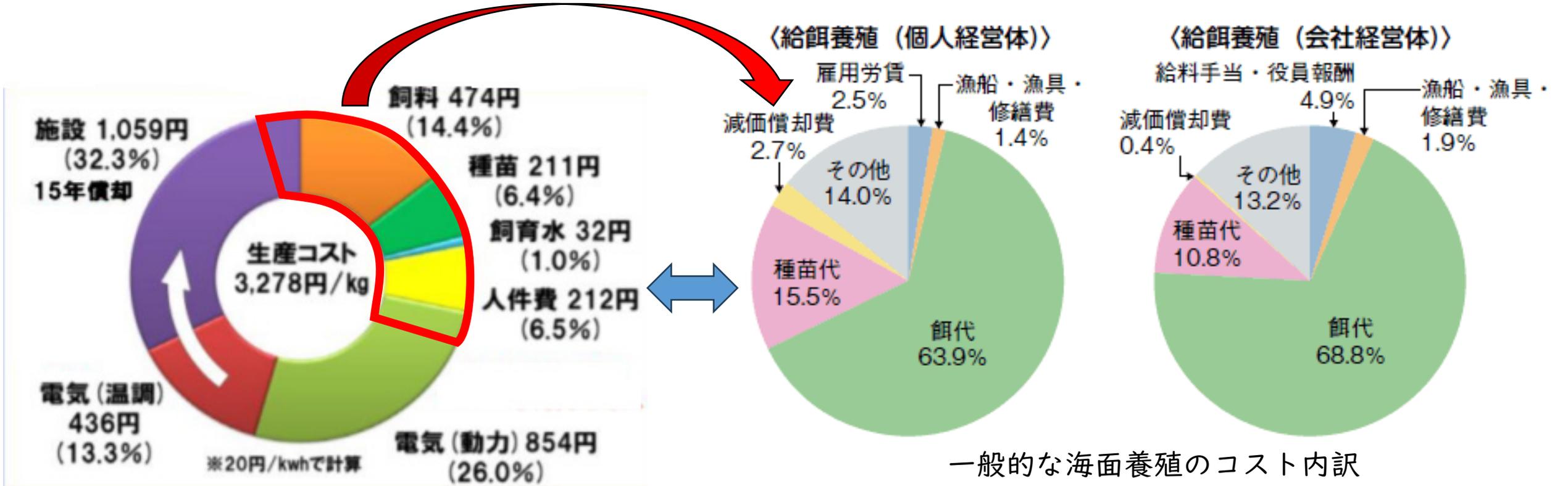
ただし、洋上風力との連携は安全性認証、海域利用許可等が複雑化し、適地も合致していない

- 新たな養殖の場：陸上・閉鎖的な沿岸域・沖合域
- 海面半閉鎖循環式養殖システムの実現可能性の検討
- まとめ

海面半閉鎖循環式養殖のイメージ



水質や底質が比較的悪化した海域でも養殖を行うことで、漁場を拡大する

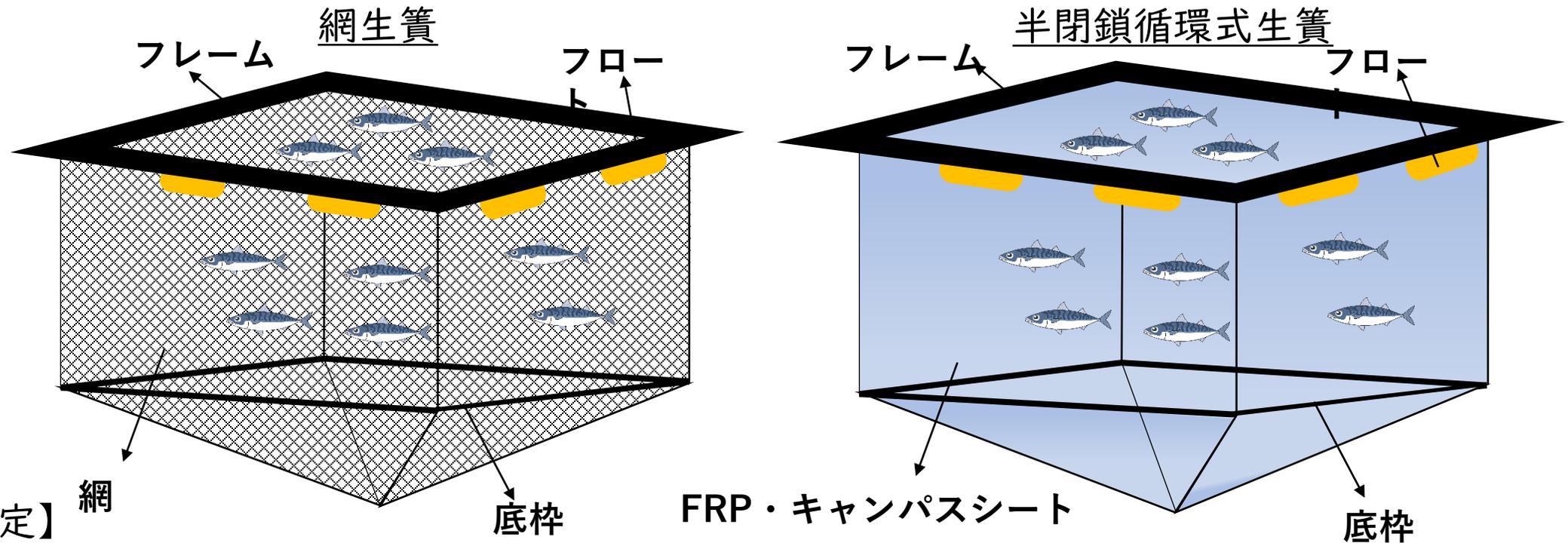


一般的な海面養殖のコスト内訳

出典：水産白書 (2017)

トラフグの陸上養殖コスト 出典：水産庁 (2013)

- 電気は海水の循環、曝気、給餌などに関わる最小限の設備に用い、可能な限り自然エネルギーを利用する。
- 溶存酸素濃度を制御することで、生産効率を上げる (現在の海面養殖：最大で30kg/m³程度、陸上養殖：50~70kg/m³程度)。
- 排泄物を管理して、多栄養段階統合養殖に活用する。



【実機の想定】

網

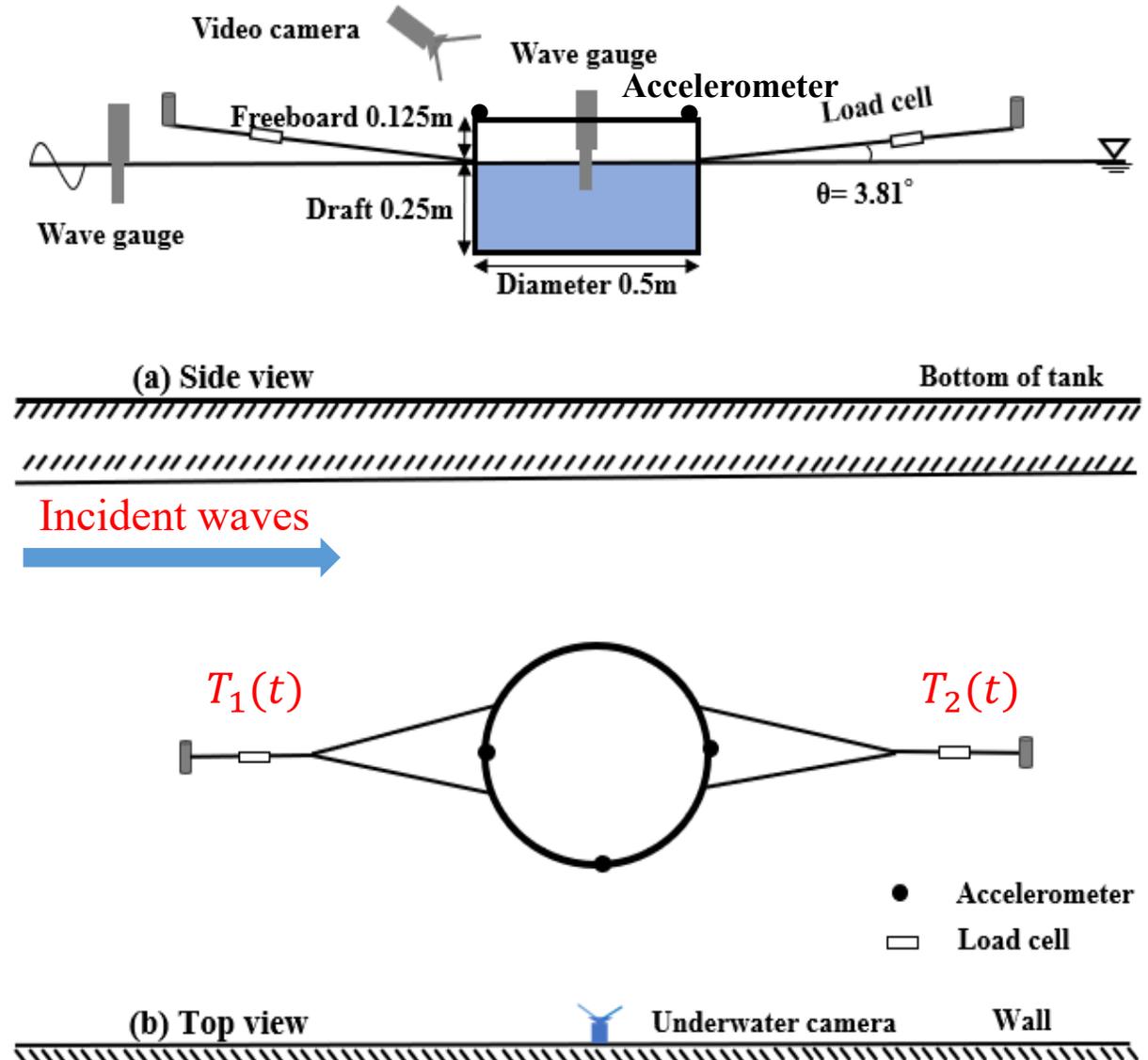
底枠

FRP・キャンパスシート

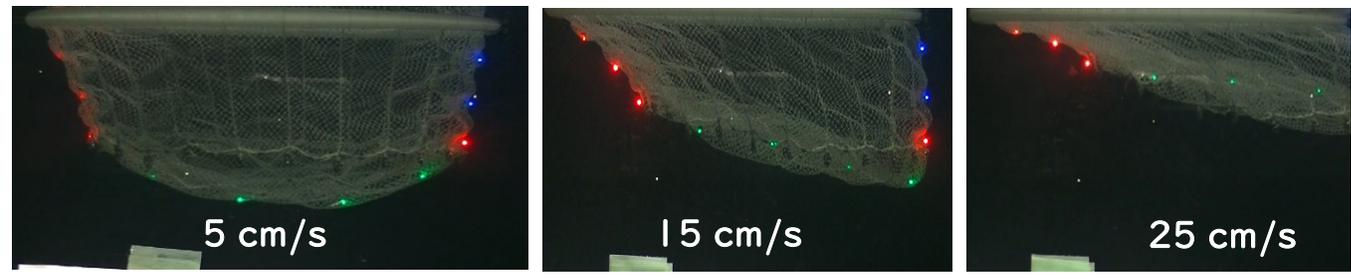
底枠

- 網生簀へのスカート設置等のニーズも踏まえ、従来の生簀形状で網地の代わりに海水をあまり透過しない材料を用いることを想定する。
- 剛体生簀：材料として、サンドイッチ複合材等が用いられている。スロッシングが大きいいため、開放部が少ない構造となっている。FRP漁船を製作している日本の中小型造船所の強みを活かして、FRPで製作することを想定する。
- 柔軟体生簀：陸上の膜（ポリエステル繊維などの合成繊維に塩化ビニル樹脂をコーティングした膜）等を調査した結果、漁業で馴致用等に用いられているキャンバスシート（ナイロン製）で製作することを想定する。漁網会社が製作可能である。

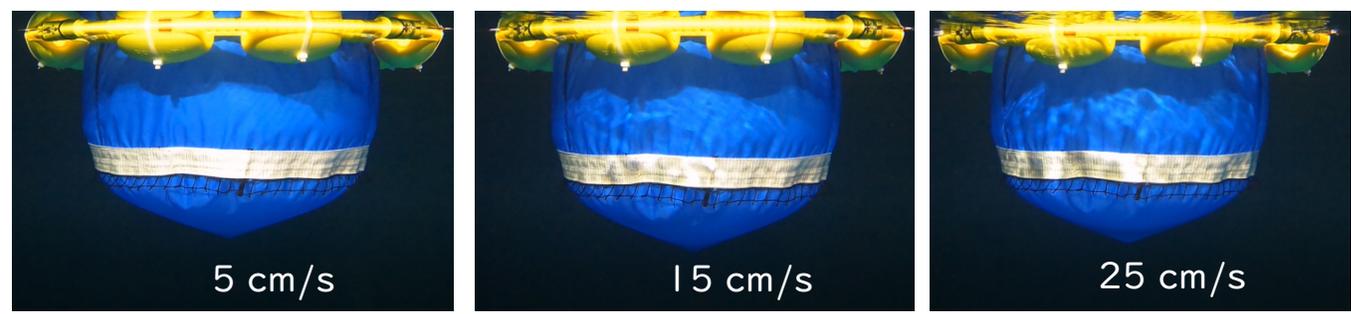
- 実機を直径25mの円型生簀と想定して、縮尺比1/50の剛体生簀、柔軟体生簀模型を製作
- 慣性力と重力が卓越する現象のため、フルードの相似則を適用
- 生簀を曳航して抵抗を計測し、網生簀の抵抗と比較。
- 規則波中で、生簀枠に加速度センサーを取り付けて運動を計測。係留索にロードセルを取り付けて、係留力を計測。ビデオカメラを用いて内部水のスロッシングを観察



網生簀 (縮尺比 1/50) の変形 (知の集積事業)



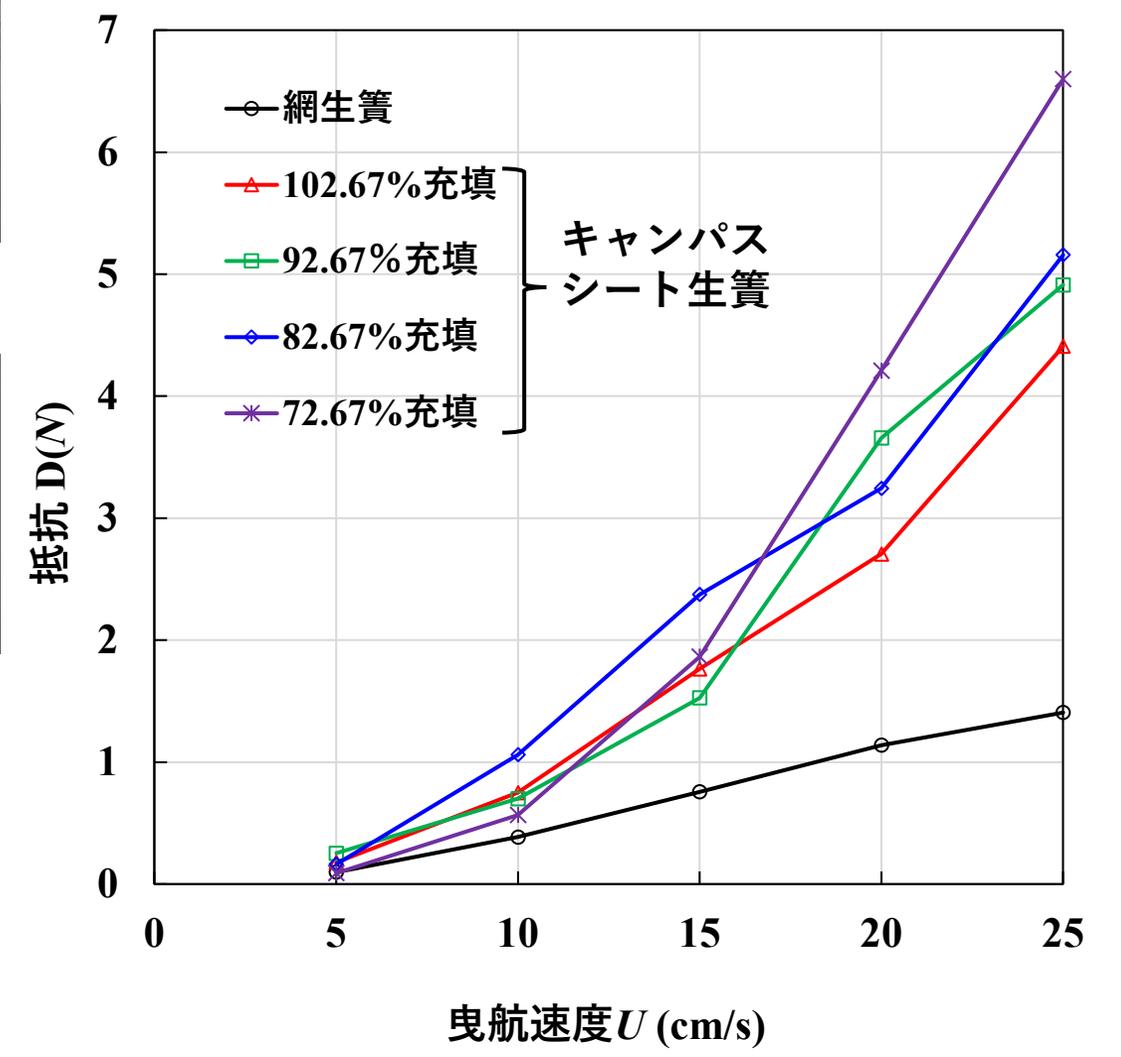
キャンパスシート生簀の変形



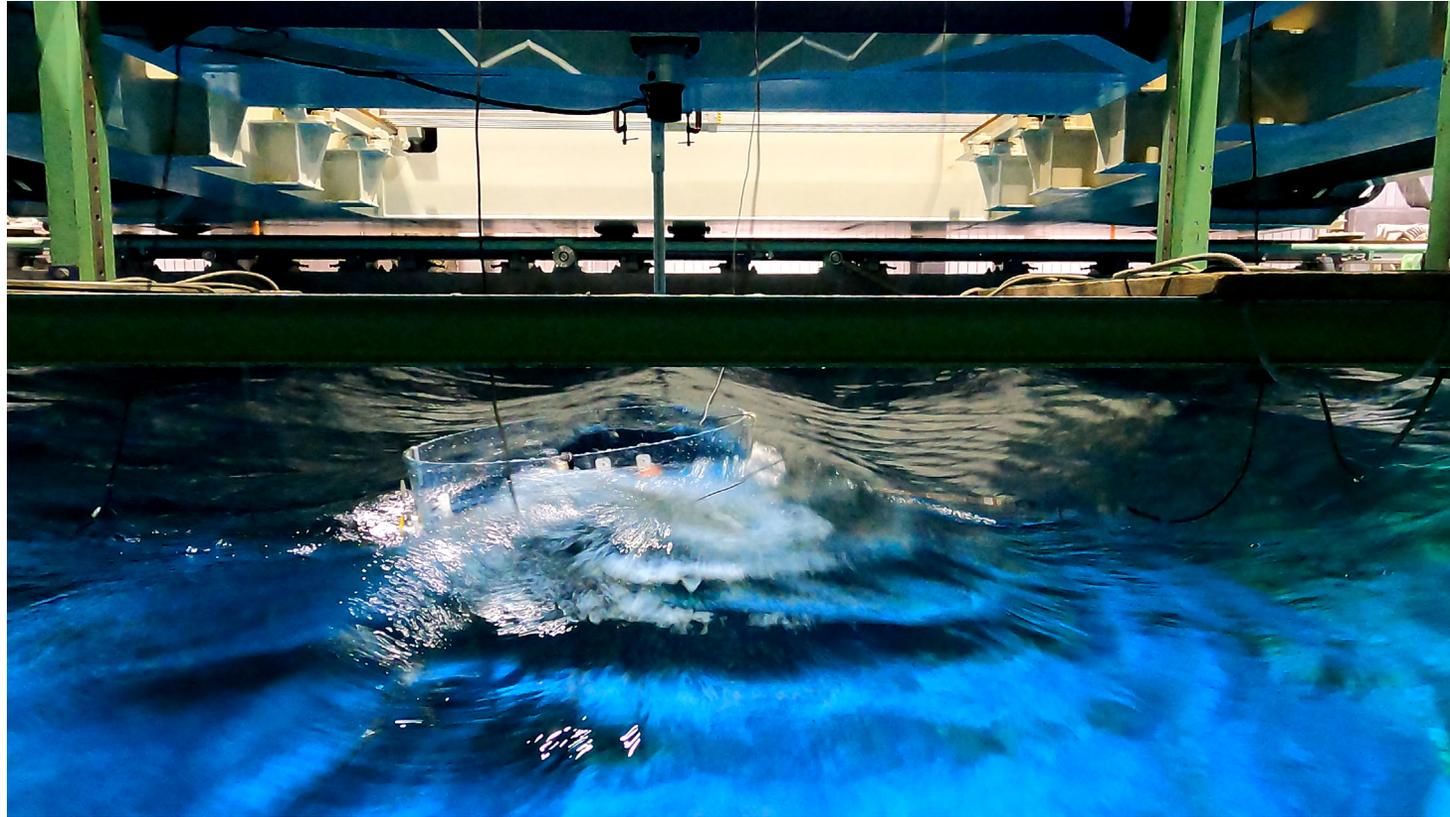
※田内の相似則に基づく、25 cm/sは53 cm/sに該当する。
(フルードの相似則では、176.8 cm/sに該当)

- キャンパスシート生簀は、網生簀のような大きな変形が発生しにくく、内部の飼育空間を維持できるという利点がある。
- 最大曳航速度が25cm/sの条件下で、キャンパスシート生簀は網生簀に比べて抵抗が3.1倍から4.7倍大きくなった。

生簀の抵抗

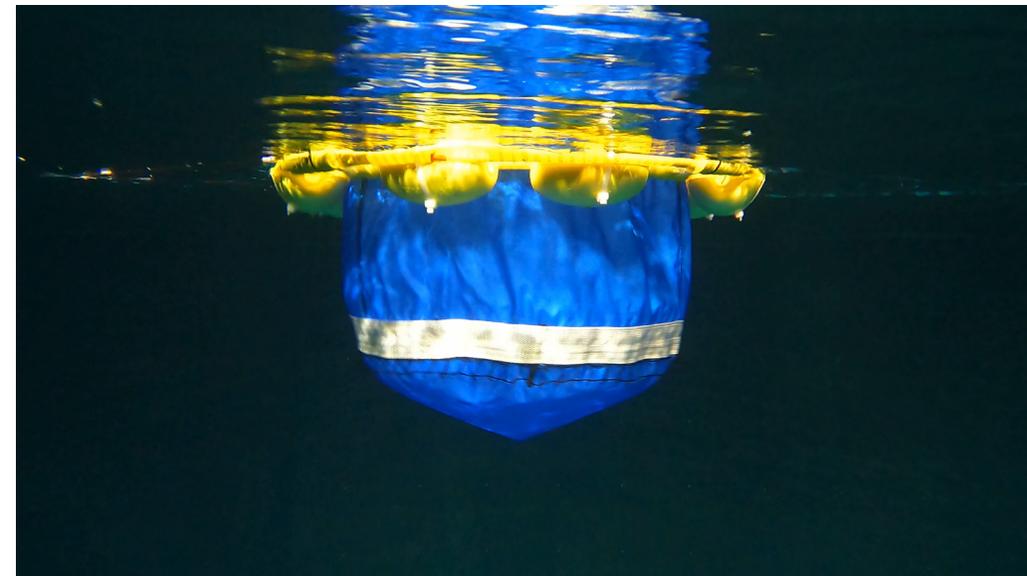
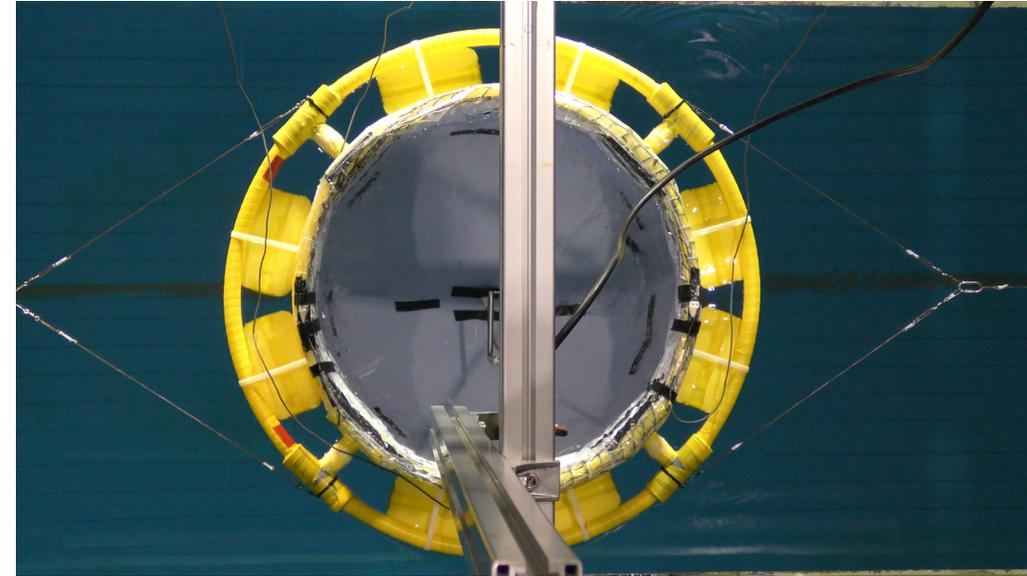


剛体生簀の運動の様子



剛体生簀の場合は、実海域換算で波周期7.8秒以上、波高3.1m以上で、飼育水が溢れたが、柔軟生簀の場合は飼育水の溢れがほとんど見られなかった。→内部水のスロッシングをキャンバスシートが緩和

柔軟体生簀の運動の様子



前後揺れ

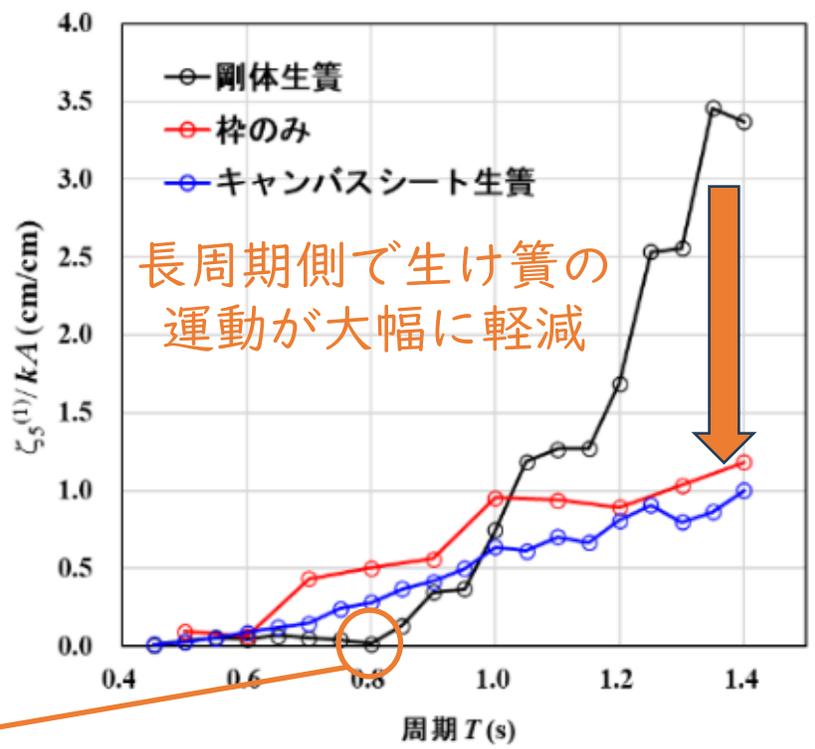
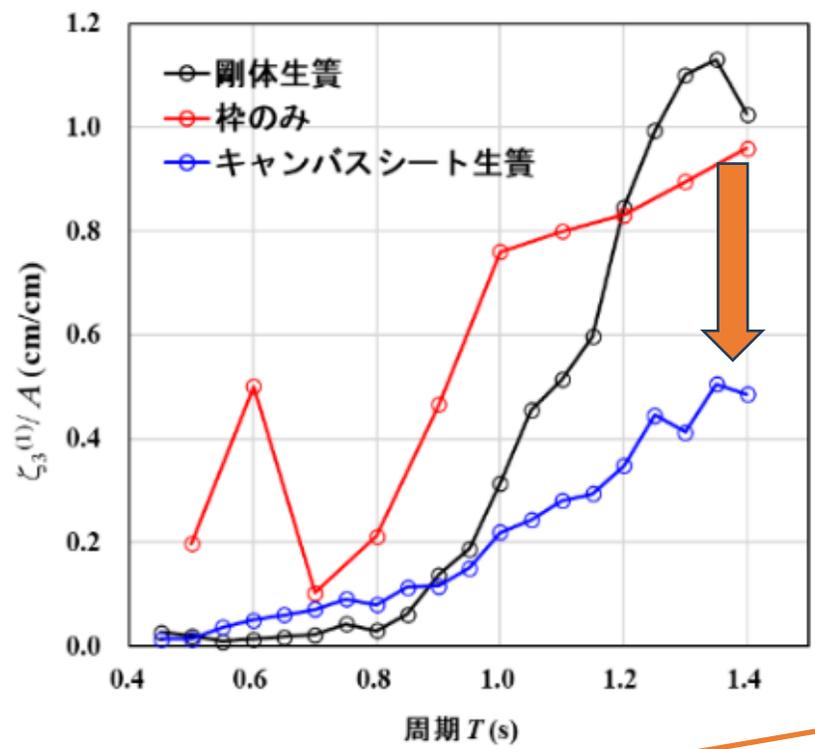
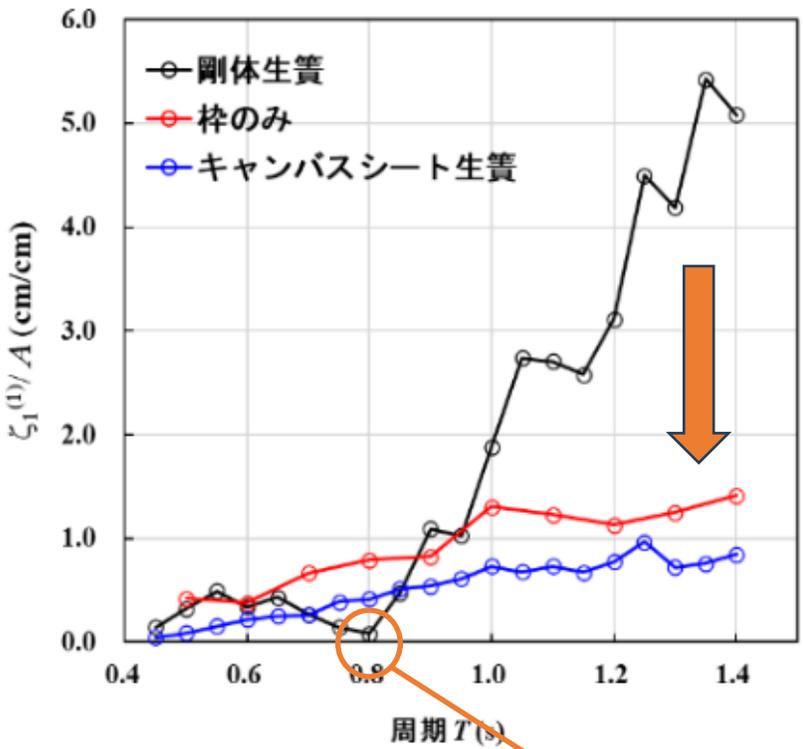
上下揺れ

縦揺れ

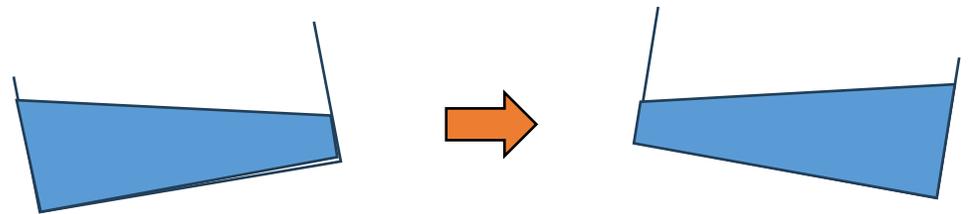
サージ

ヒーブ

ピッチ



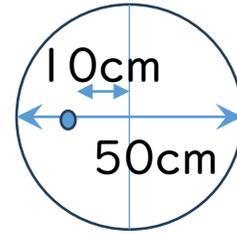
生簀の運動と内部水の運動が逆位相となり、運動が抑制される



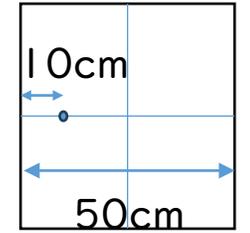
枠のみの運動と比べてもキャンバスシート生簀の運動が小さいことから、キャンバスシートは動揺低減の効果を有している

生簀内部の流速（加振実験）

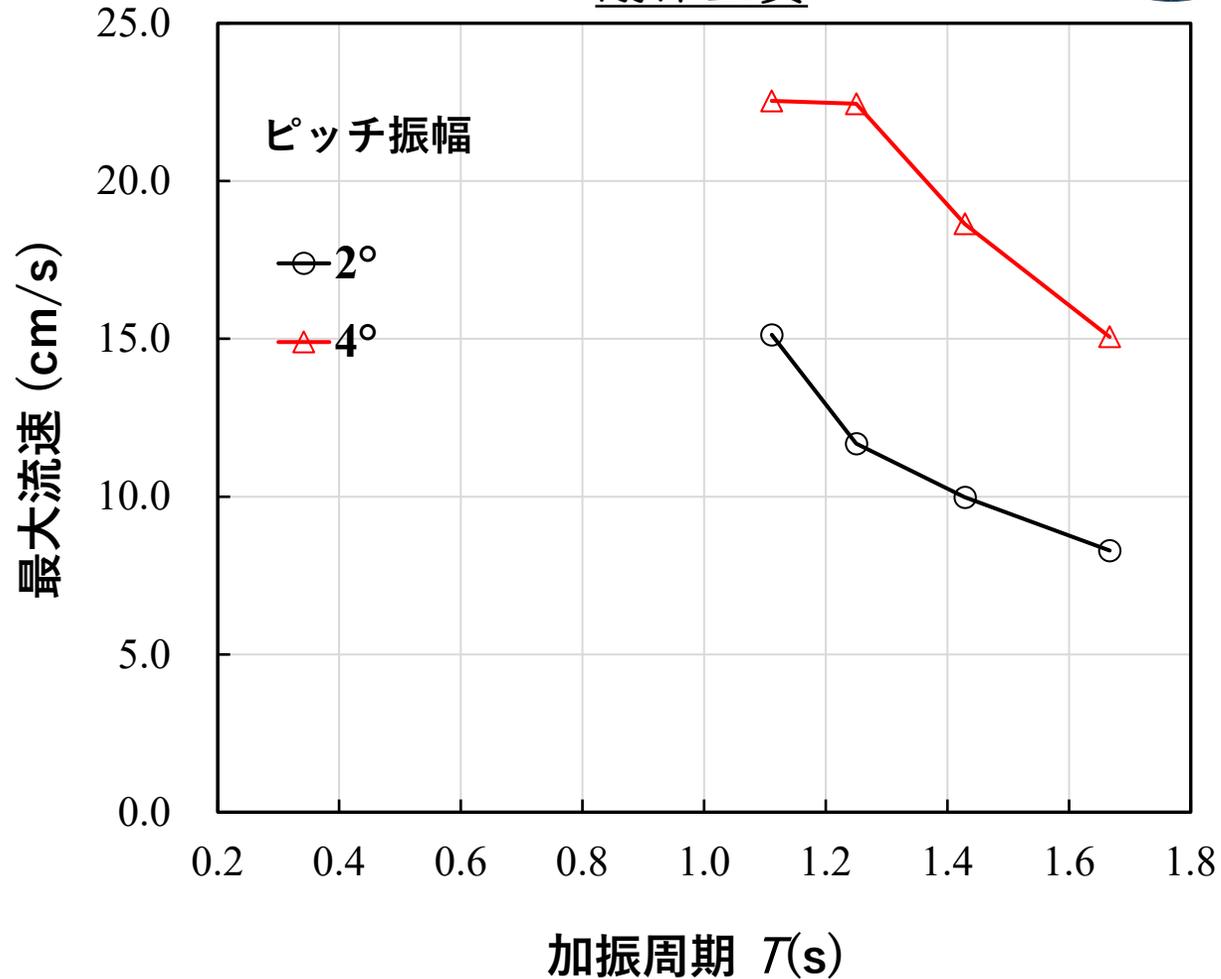
水産教育・研究機構水産技術研究所水産工学部の
動揺シミュレーション装置で実施



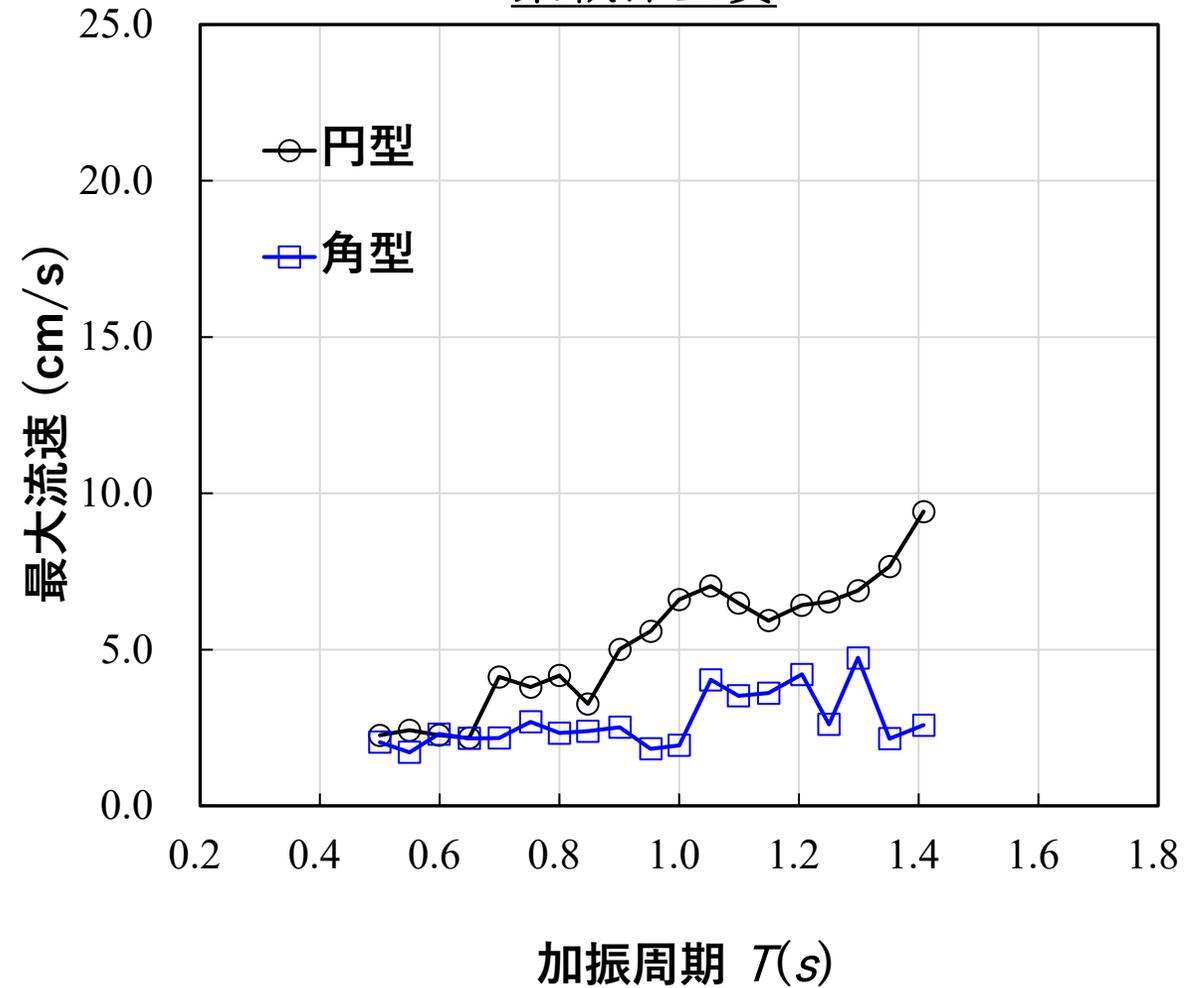
測定位置：深度12cm



剛体生簀

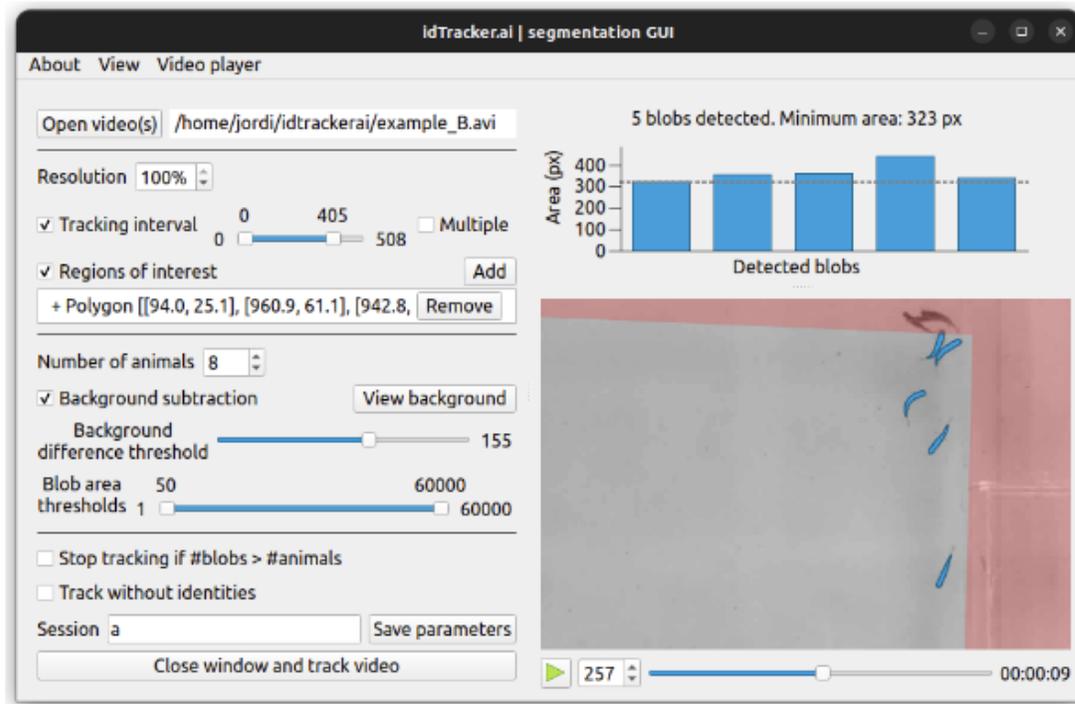


柔軟体生簀



解析方法

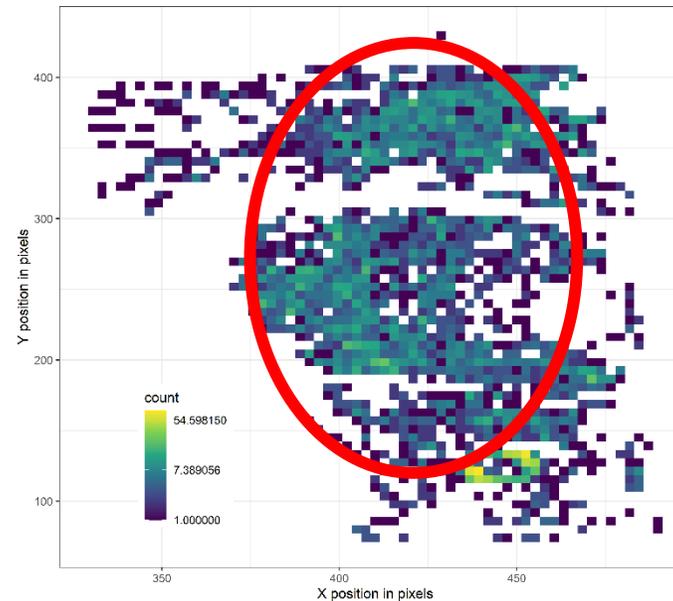
- idtracker.aiツールを使用
- 解析パラメーター設定
- 出力設定：idtrackerai_video
- 結果可視化：Python/R



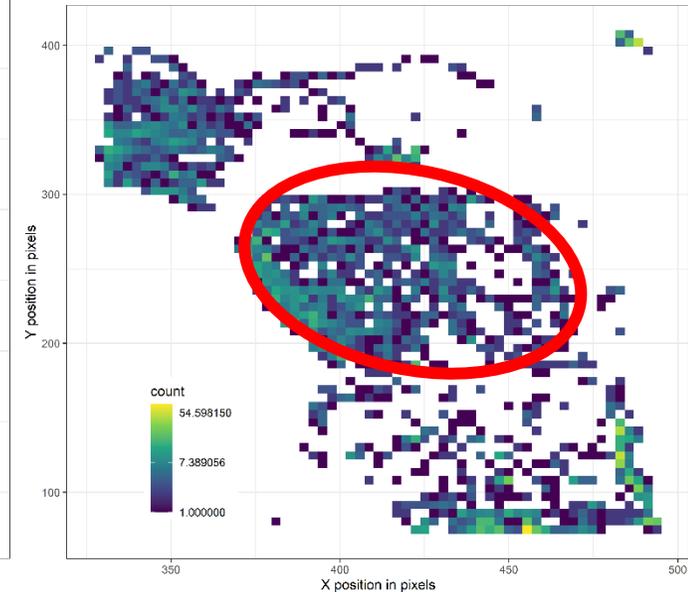
idtracker.ai's segmentation application (in light mode) #

解析結果

静止



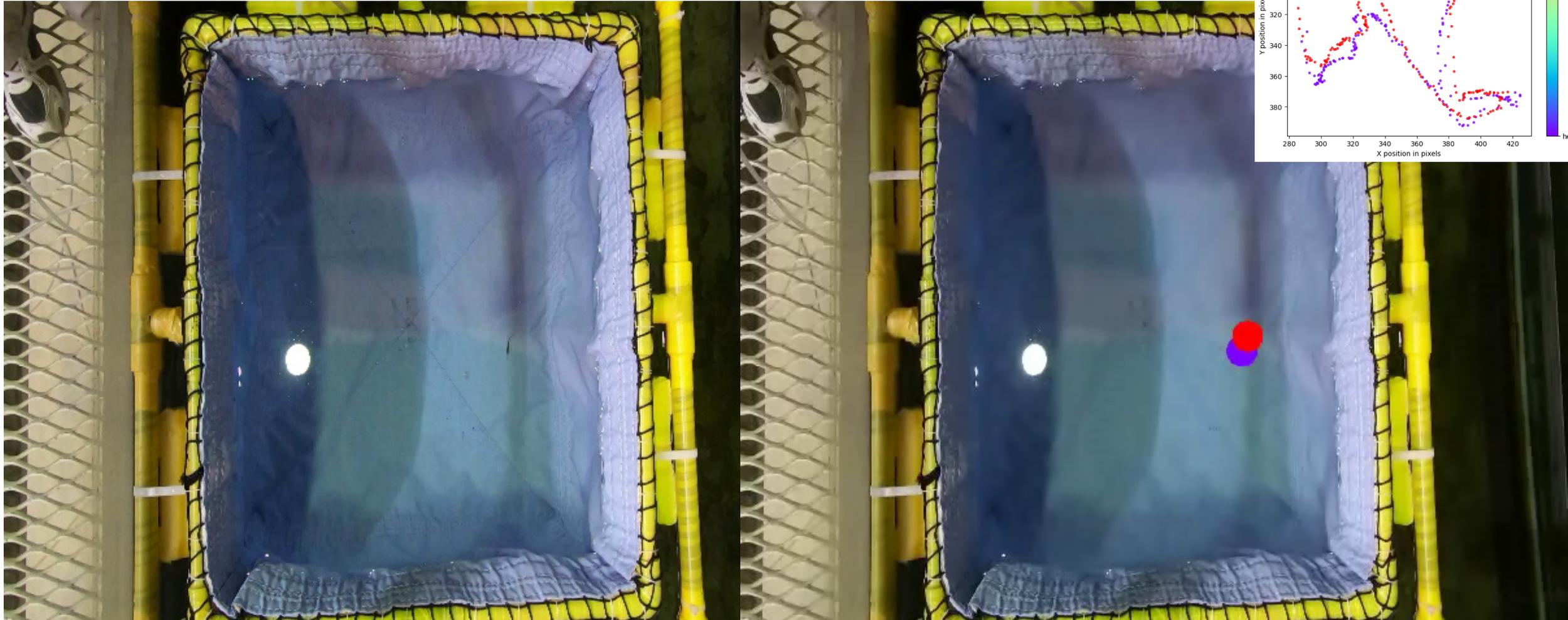
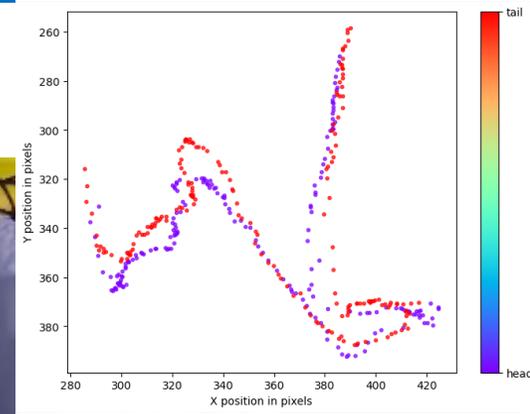
縦揺れ0.7°



- 静止状態では、魚群が解析範囲内の広い領域にわたって分布している様子が見られた。
- 縦揺れの状態では、静止状態と比べて、魚群が生簀中央部に集まる傾向があった。

魚の遊泳行動（加振実験）

DeepLabCutによる画像解析結果





スロッシングのストレスが魚類に与える影響について、ほとんど知見がない。



ストレス応答について多数の研究がなされているモデル生物であるゼブラフィッシュを対象とした。

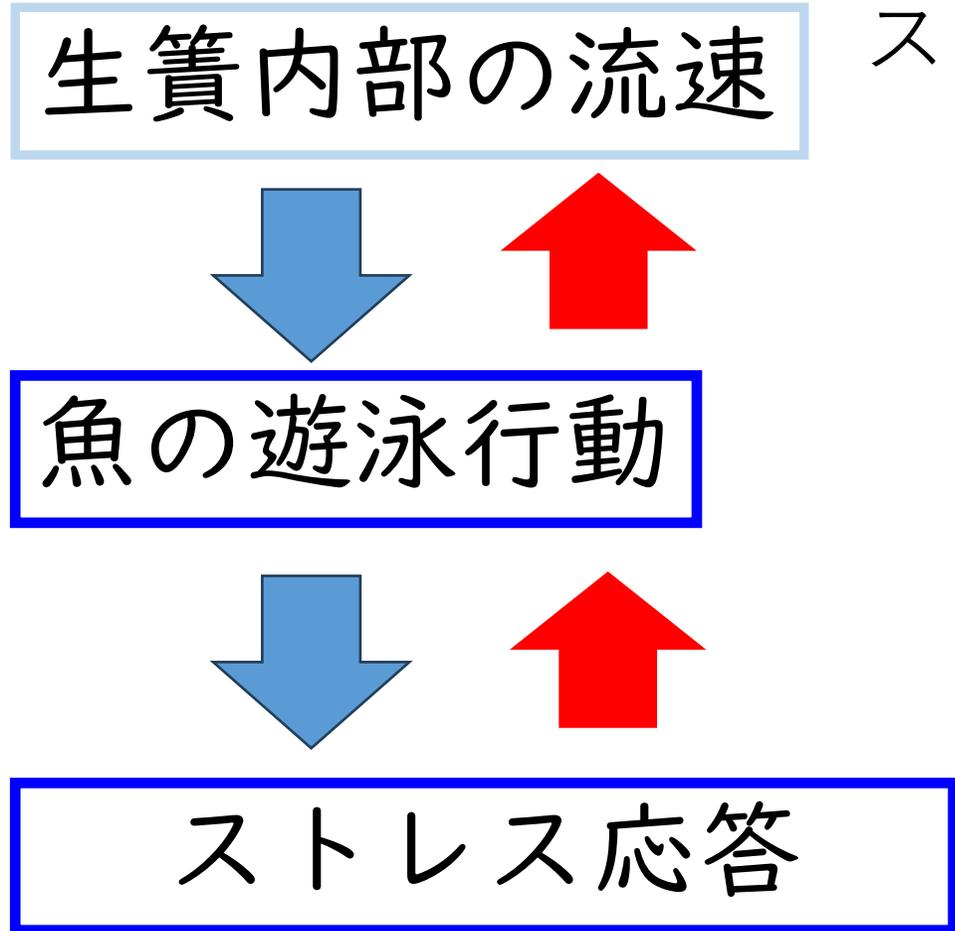
試験項目

- ・ 生簀内部の流速
- ・ 魚の遊泳行動

・ ストレス応答

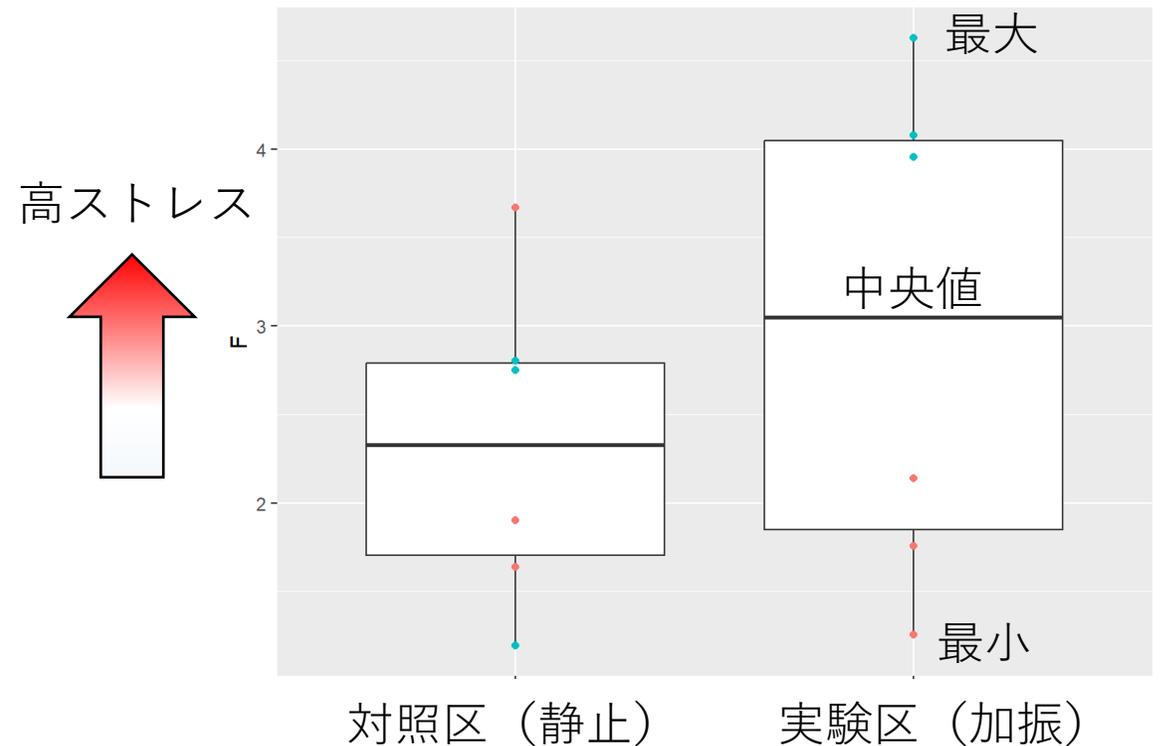
コルチゾール濃度測定

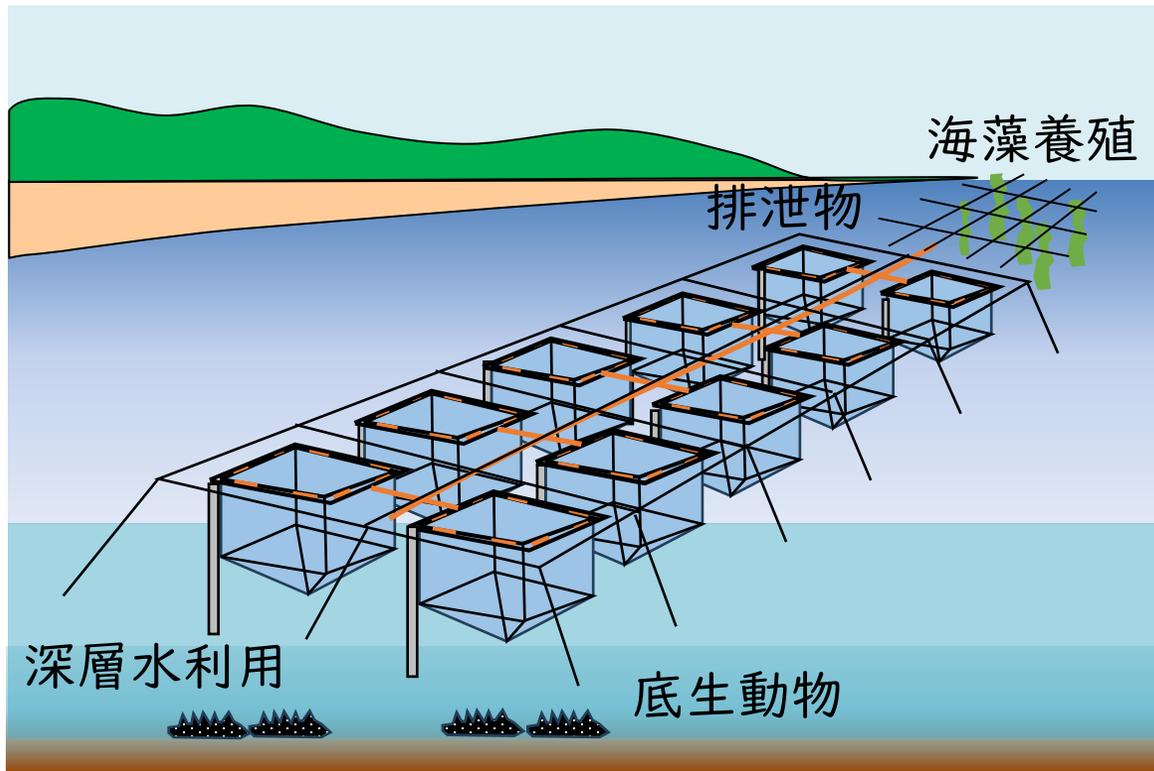
次世代シーケンサーを用いたRNA-seq
→ 遺伝子発現の網羅的解析



生簀の性能評価に、遊泳行動、
ストレス応答が使える可能性がある！

コルチゾール濃度
(予備試験)





10 m x 10 m x 8 mの生簀10基 (8,000 m³)
生産密度：30 kg m⁻³
飼育尾数：480,000尾
年間生産量：240トン

主要な設備

- 生簀 (従来は網、本事業ではキャンバスシート)
- 側張り
- 給餌船または給餌機 + 補給船
- 作業船
- 網洗いロボット (キャンバスシート用は存在しない、オプション)
- 水中ドローン (検査用、オプション)
- 内部水循環システム

海面半閉鎖循環式養殖の特徴

- 閉鎖性海域 (湾奥、漁港など) の有効活用
- 生簀内部の水質管理
- 深層水の利用による水温調整
- 生簀間距離の短縮
- 排泄物利用の効率化



詳細設計による耐久性・ロバスト性の検討
コスト計算により費用対効果を算出

養殖の場を広げる試みとして、現在の養殖の場よりも閉鎖的で、水質が相対的に悪化している海域での半閉鎖循環式養殖システムと、外海側で洋上風力発電と連携した養殖システムの検討を行った。

- 半閉鎖循環式養殖システムについては、FRP等を用いた剛体生簀とキャンバスシート等を用いた柔軟体生簀を検討し、水槽模型実験によって生簀内部のスロッシングの発生やその生簀運動への影響を調査した。剛体生簀の場合はスロッシングが大きいため、スロッシングを抑制する機構の開発が必要である。柔軟体生簀の場合は、剛性の相似を考慮しなかったが、スロッシングは抑制された。
- スロッシングによる流れが魚に及ぼす影響に関する研究を開始した。

【今後の課題】

- 半閉鎖循環式養殖システムについては、剛性の相似を考慮した模型を製作し、キャンバスシートの変形や耐久性に関する実験を行うとともに、循環システム等の付帯設備のロバスト性を考慮して詳細設計を行う。
- 洋上風力発電と連携した養殖システムについては、安全性認証、海域利用許可等が複雑化し、適地も合致していないことから、新たなプラットフォームを検討する。
- スロッシングによる流れが魚に及ぼす影響を引き続き調査する。