

令和6年度 第1回 F-REI産学官ネットワーク・セミナー

水中ロボット技術の 社会実装に向けた取り組み

九州工業大学
大学院生命体工学研究科
石井和男



1996年 東京大学大学院工学系研究科
船舶海洋工学専攻修了, 博士(工学)
同年, 九州工業大学
フィールドロボットに関する研究に従事.

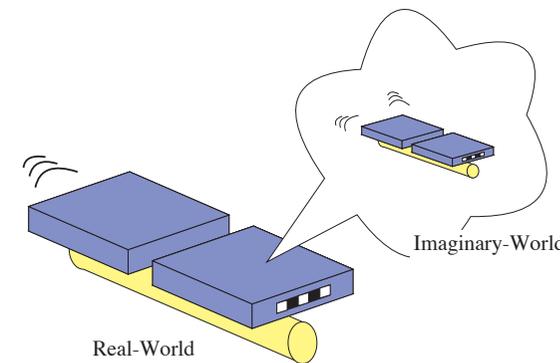
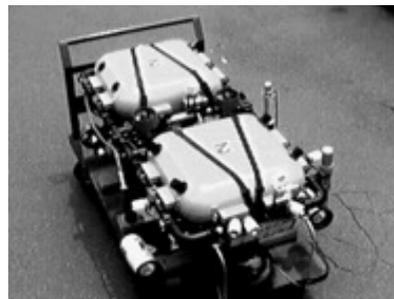
大学院受験の小論文
「海洋環境保全, 水中ロボットの開発に
ついて, その必要性を記述」
(小論文について質問されるとは知らず)
面接時に教授Mより
「海の中をロボットで掃除と言っている
のは君か? 君に何ができるんだ?」
私 「大企業の社長でもない」と・・・」
(上手く返答できず)

将来は 水中ロボットで海を掃除しよう!

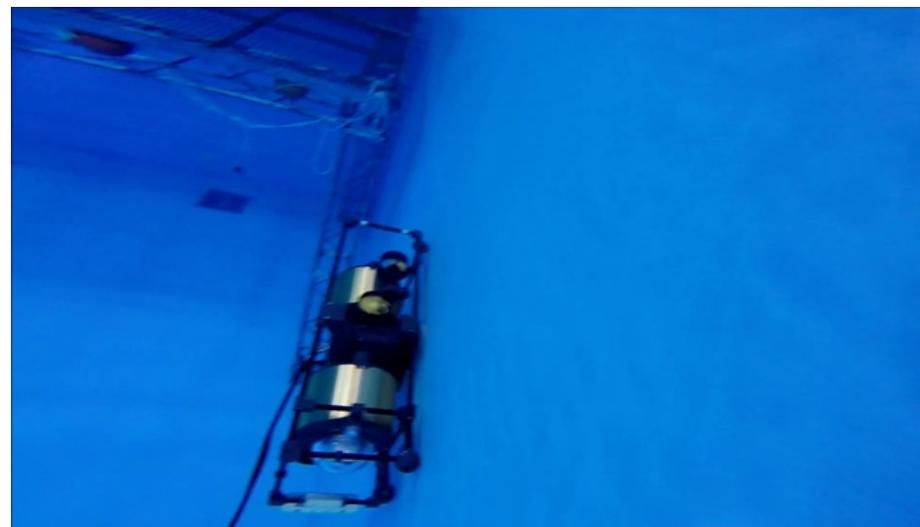
約30年間, 水中ロボット関連の研究に従事

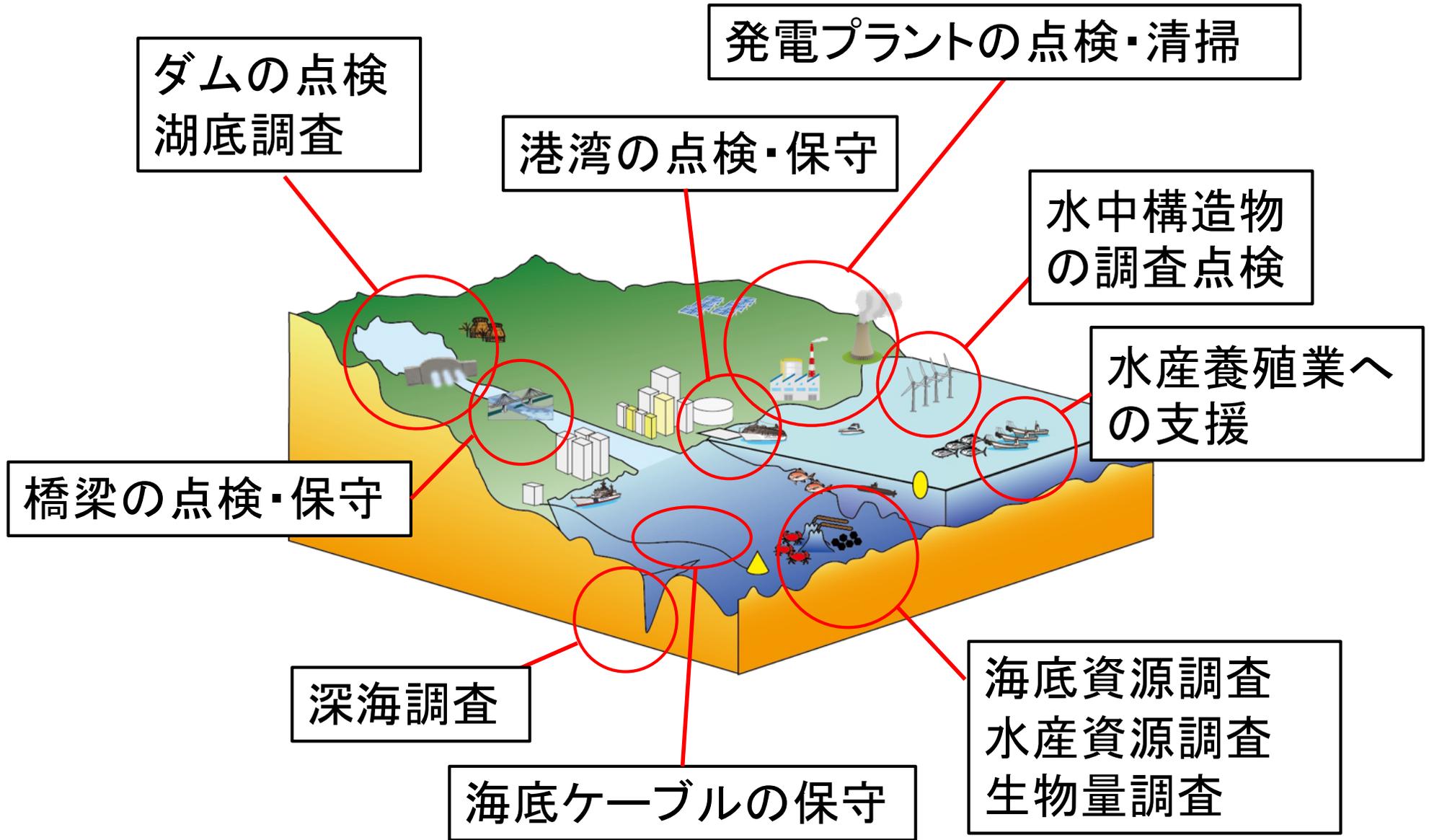
自律型水中ロボット
"Twin-Burger"
14個のTransputerを搭載

ロボット版イメージトレーニング



海底生物サンプリング, 船底清掃, 水産養殖





水中環境の難しさ

- 高い水圧 → 10m潜る毎に1気圧(1m²あたり10トンの圧力)
- 光、電波の減衰が大きい → 電波通信が難しい、GNSS(GPS、みちびき等)が利用できない、通信方法に限られる(通信密度が低く、SN比が悪い)
- 撮影画像は青みがかり不鮮明、光の散乱
- 深海底は暗黒、マリンスノーが降り注ぐ
- 未知の環境、詳細な地図がない
- 人が直接作業するには厳しい環境

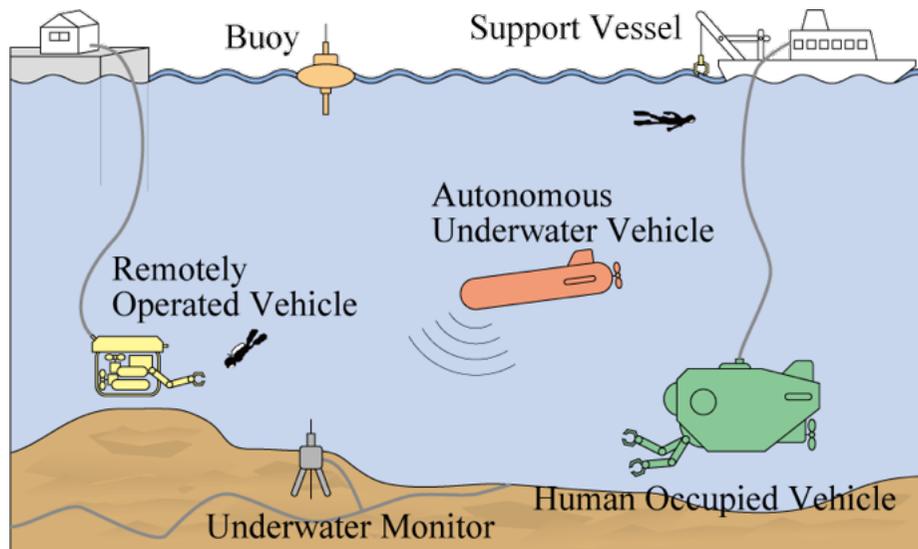
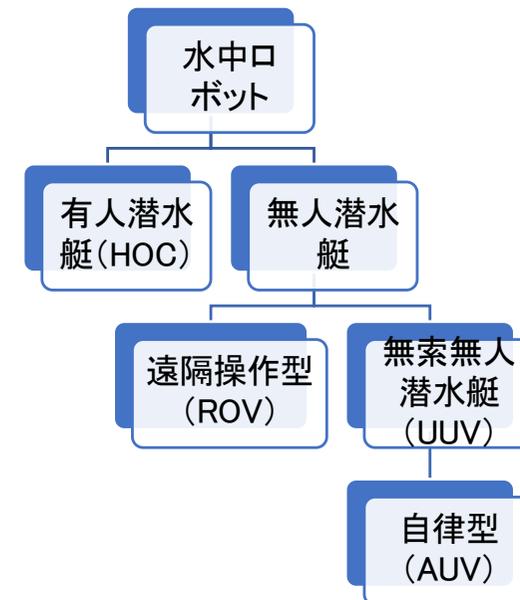


Fig. Underwater Observation



JAMSTEC「しんかい 6500」 <https://www.jamstec.go.jp/j/about/equipment/ships/shinkai6500.html>



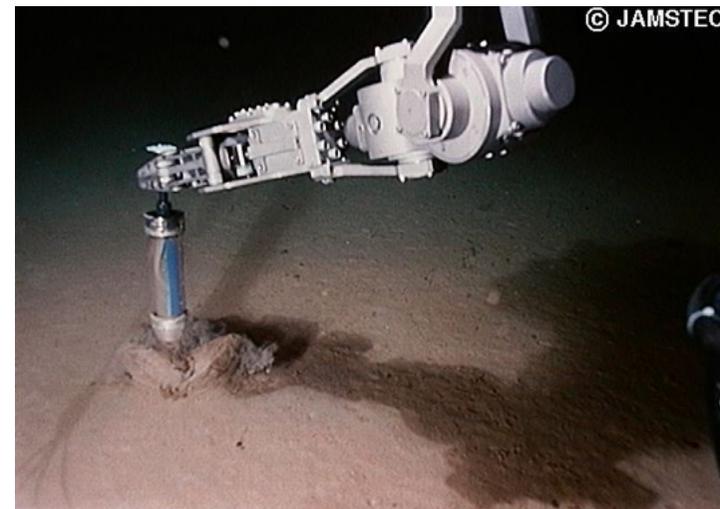
- ・Length : 9.5m
- ・Width : 2.7m
- ・Height : 3.2m
- ・Mass : 25.8ton
- ・Complement : 3
- ・Normal Dive Duration : 9hours
- ・First Dive : 1989



JAMSTEC 「かいこう」

<https://www.jamstec.go.jp/j/about/equipment/ships/kaiko.html>

初代である「かいこう」は、マリアナ海溝水深10,911mで底生生物の「カイコウオオソコエビ」の採取や、インド洋で熱水活動と熱水噴出孔生物群の発見

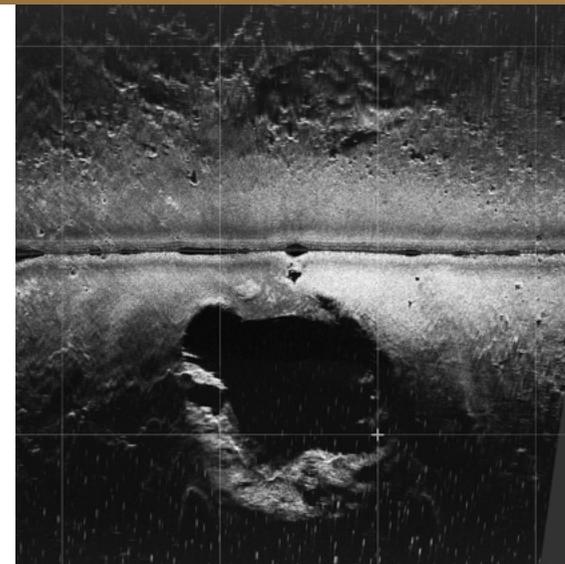
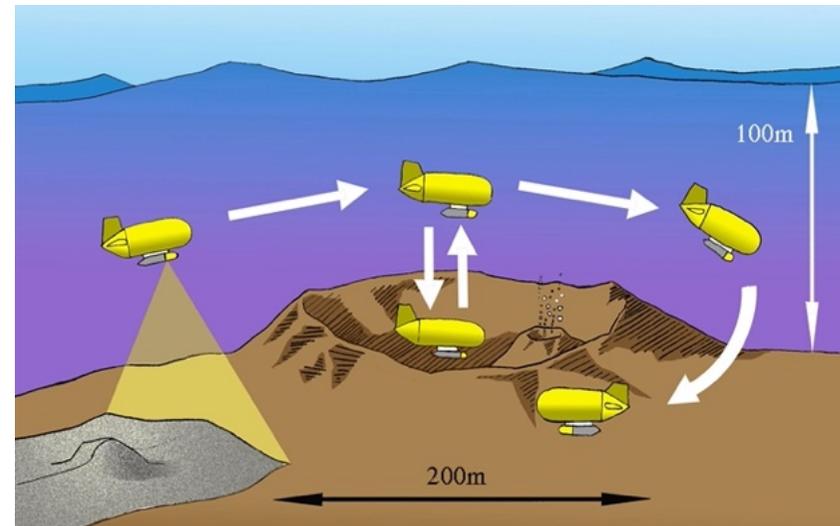


東大生研「r2D4」(アールツーディーフォ)

R-oneロボットの後継期、熱水域の観測、海底遺失物の調査、海底火山の調査

佐渡島(2003)や黒島海丘(2003)、海底火山の北西口タ(2004)、海底クレータである明神礁(2005)などで運用

浦環氏 提供

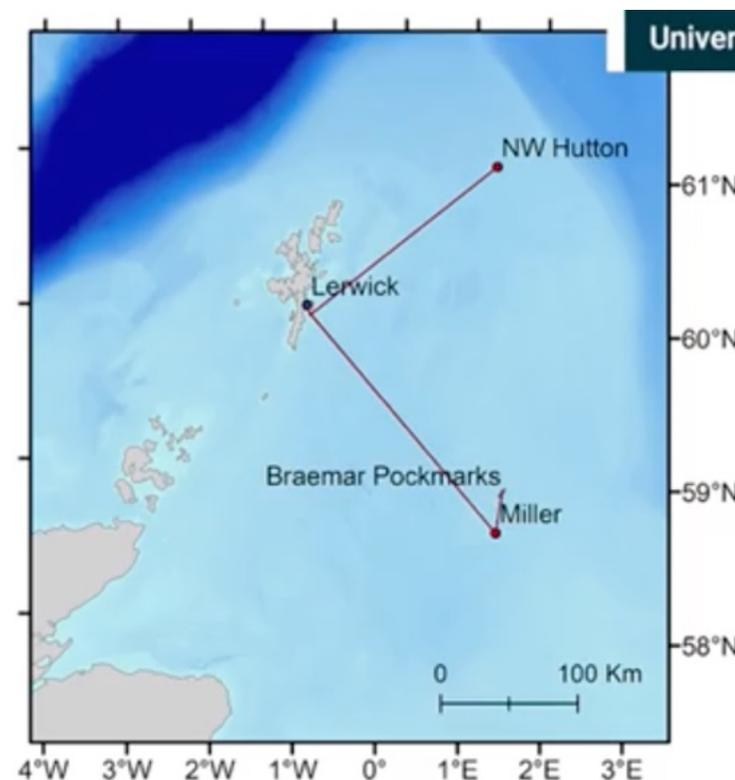


Long Range AUV "BoatyMcBoatFace"

2022年9月 22日間19時間に渡り1,013kmを航行、複数廃止石油サイトを含む3つのサイトの海底画像マッピングを実施。

AUVは1日1回衛星通信を通して、1,000km以上離れたオフィスに成果を報告。

報告された内容を元に、オペレータ会議(毎日朝10時から1時間)で決められたその日の命令を受け、任務を継続。



<https://noc.ac.uk/science/projects/autonomous-techniques-infrastructure-ecological-assessment-sea-project>

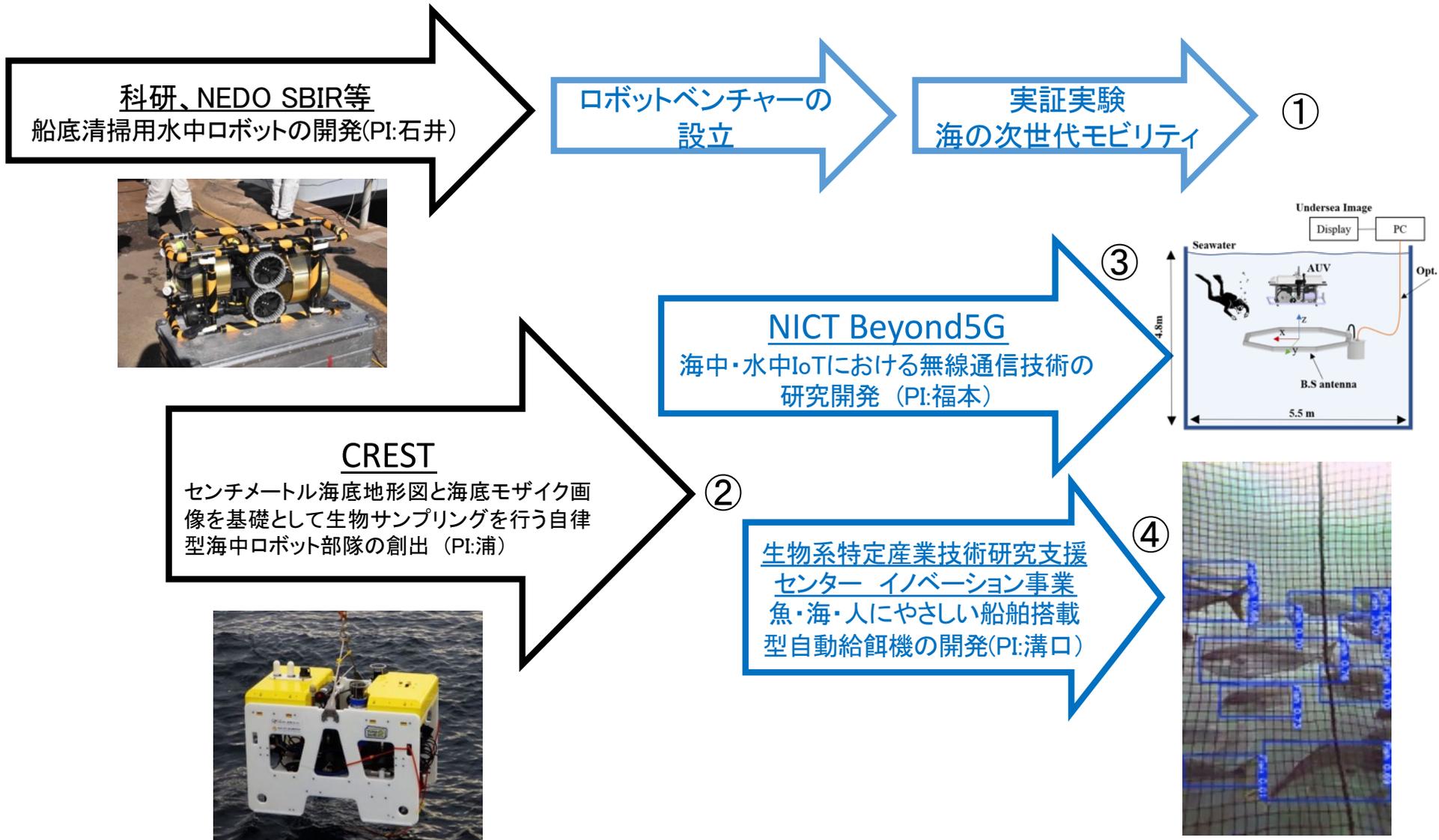
https://www.youtube.com/watch?v=_bl7Q7q2xtg&embeds_euri=https%3A%2F%2Fwww.google.com%2F&feature=emb_logo



2011

2021

2025





- 燃費低下
 - 燃料費高騰 ⇒ 経済性
 - IMO ⇒ 国際海運のCO2削減規制
- 海洋汚染
 - IMO 海洋汚染防止条約(MARPOL条約)
 - 付着防止塗料による環境ホルモンの問題
 - 移入生物による生態系破壊の問題

⇒水中清掃の積極的な導入が重要 (海洋政策研究財団 2011年報告書)
- 船底の清掃
 - 主にダイバーによる水中作業, 或は, ドッグ時に陸上にて清掃
 - ダイバーによる清掃は, 危険を伴う作業であり, 高コスト
 - 船舶の定期検査, 中間検査は1年毎に実施

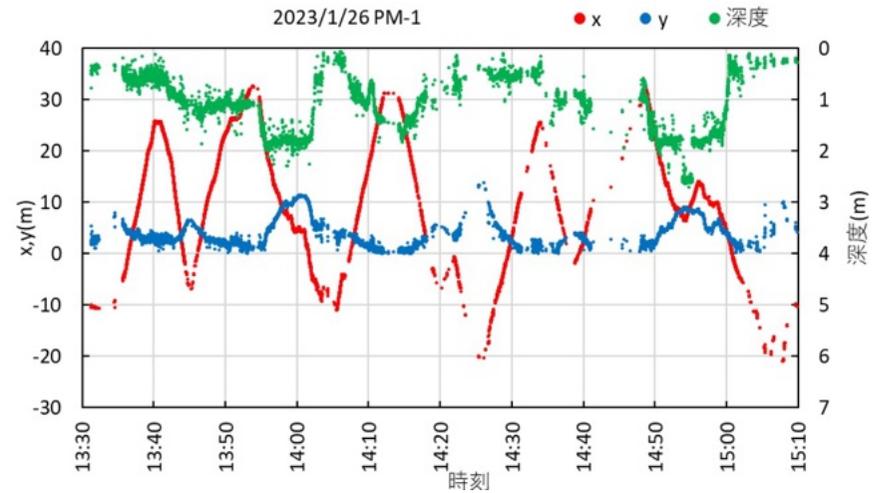
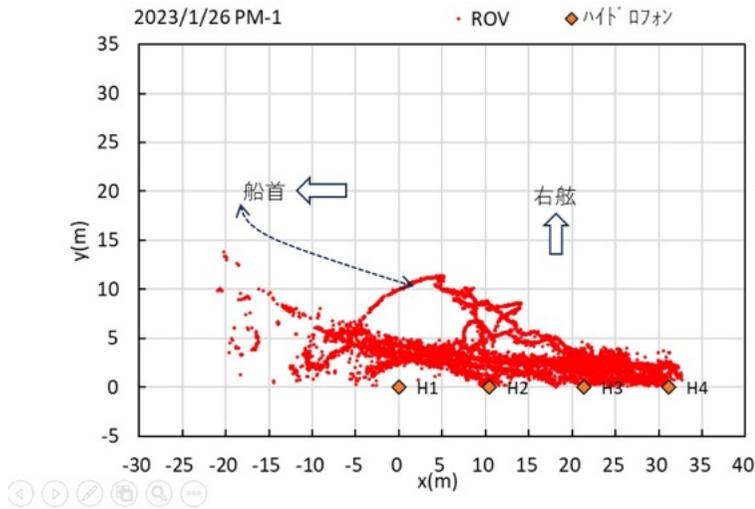
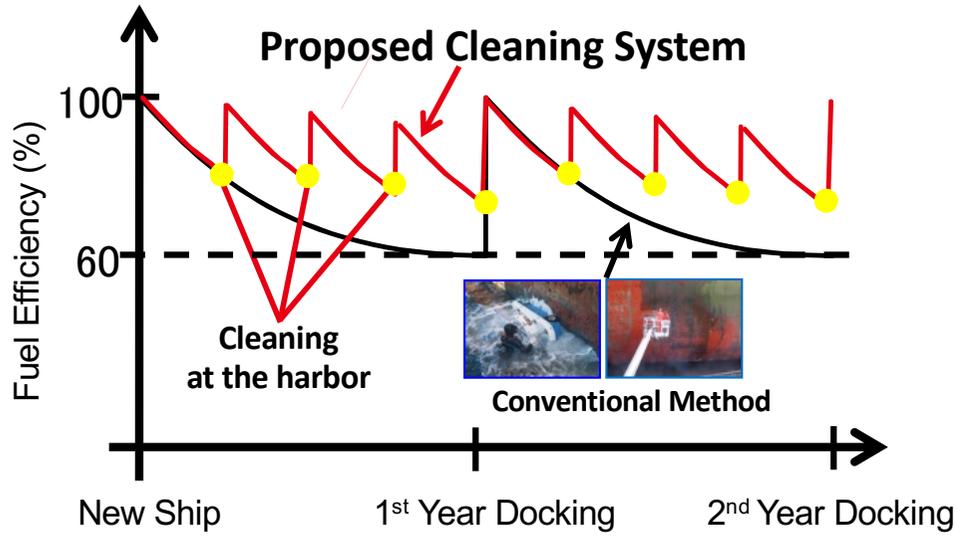


水中ロボットによる自動船底清掃が実現できると

- 船舶をドッグ入りさせることなく, 港湾における係留中頻繁に船底を清掃可能
- 燃費の維持が可能
- ダイバーの仕事の効率化



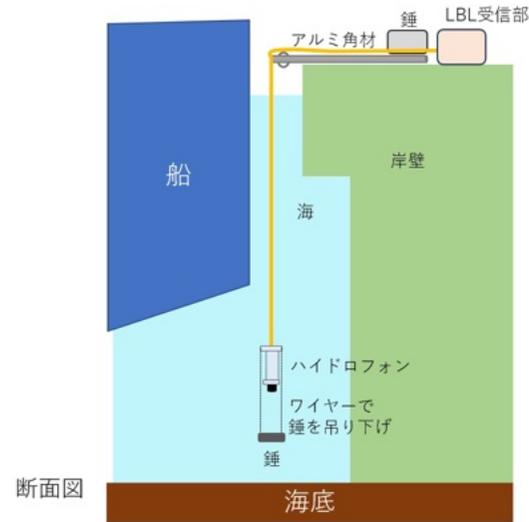
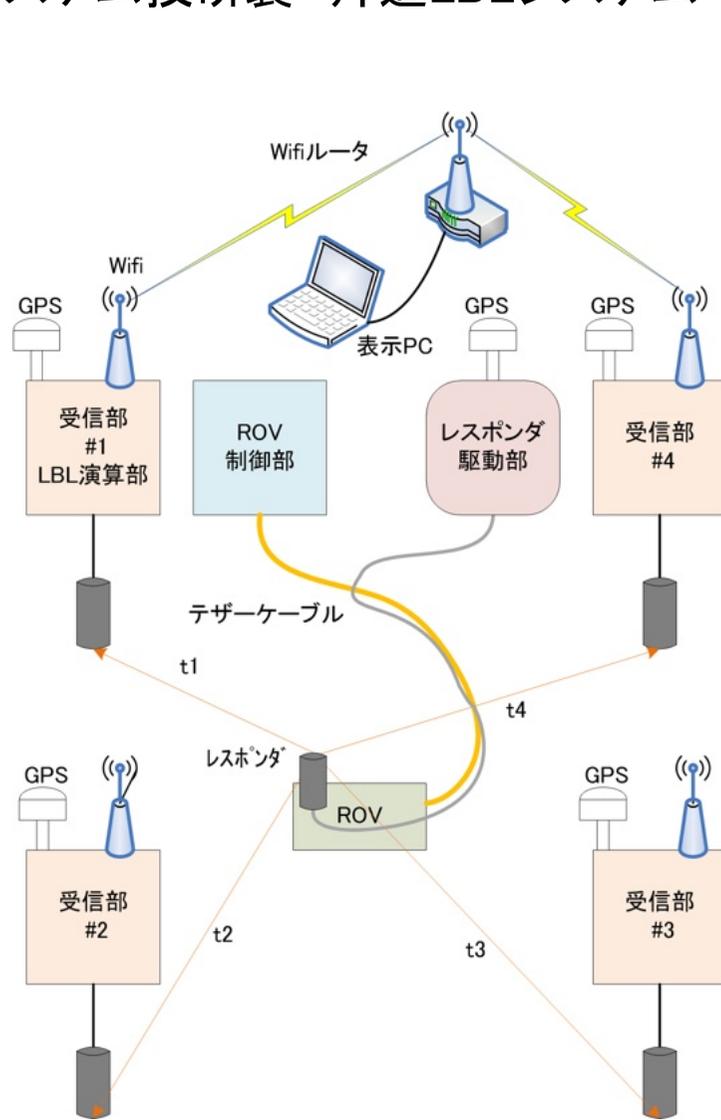
運行費用の削減
CO2発生量の削減



① 課題: 船体付着生物



水中ロボットにおける課題: 水中における自己位置推定システム技研製 片道LBLシステム



水中ロボットにおける課題：

超音波通信(コマンド送受信、画像伝送、水中自己位置)

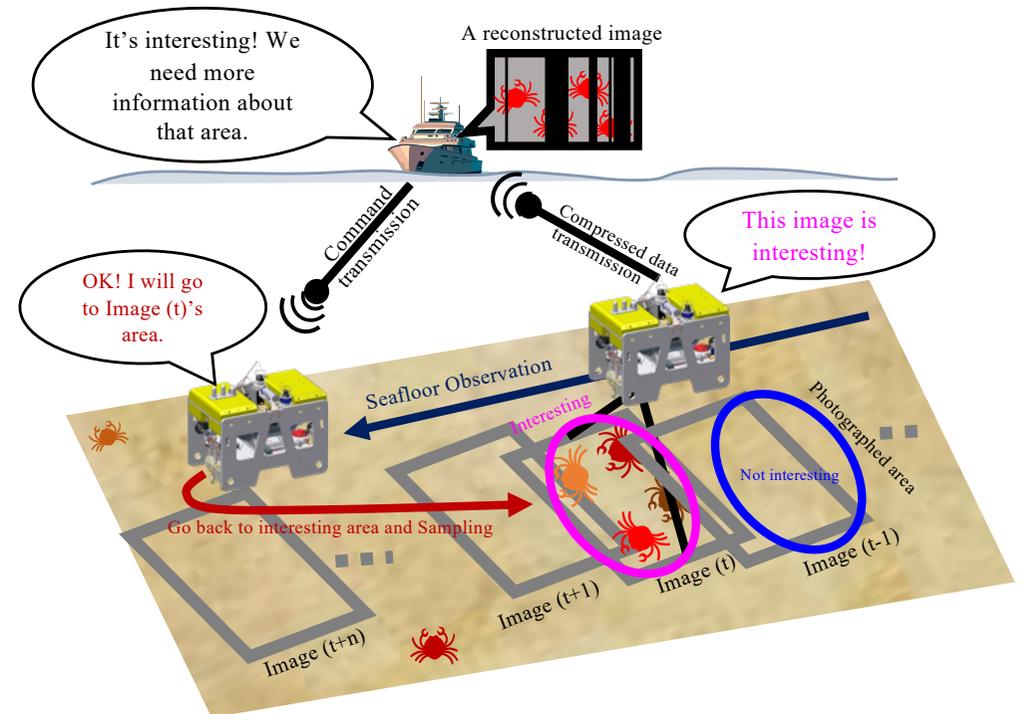
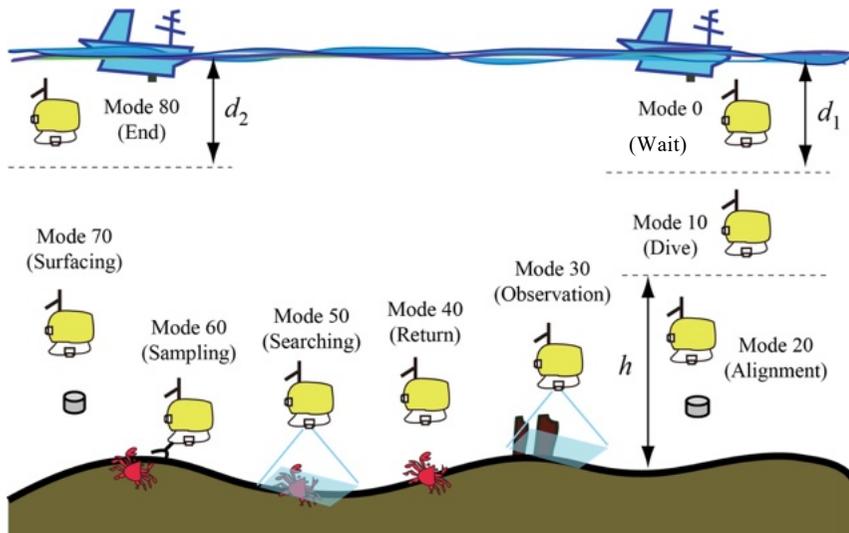
画像劣化、画像圧縮

目標物の追従(ビジュアルサーボ、リアルタイムでの目標物画像の更新)

大深度での高度制御+深度制御

人の意思決定が存在

- ・人が見やすい画像
- ・人が興味をもつ画像



画像補正：Retinex理論

□ The Retinex theory estimates illumination by **Gaussian**

$$R(x, y) = I(x, y) / L(x, y)$$

$$L = F(\sigma) * I \quad F(\sigma) = K \exp(-(x^2 + y^2) / \sigma^2)$$

$$R_{Out} = \log I - \log L$$

$$R_{Out} = \log R + \cancel{\log L} - \log F(\sigma) * R - \log \cancel{F(\sigma)} * L$$

$$R_{img} = \alpha \cdot R_{Out} + \beta \quad L \approx F(\sigma) * L$$

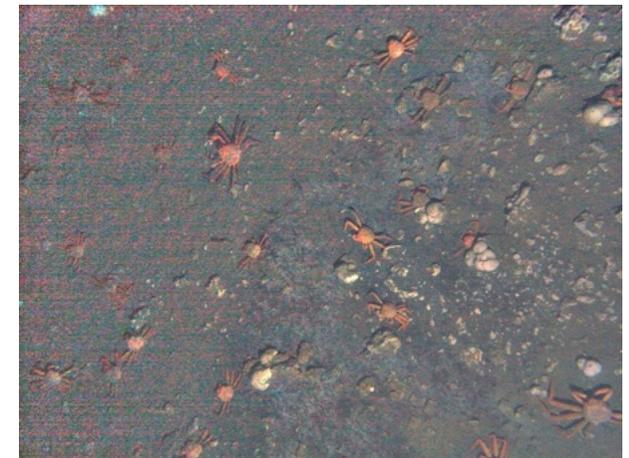
I: Input image, R: Reflectance,
x,y: pixel's coordinate
L: Illumination, F(σ): Gaussian
filter, K: Normalization factor,
R_{out}: Retinex output,
α: gain parameter,
β: offset parameter,
R_{img}: Out put image



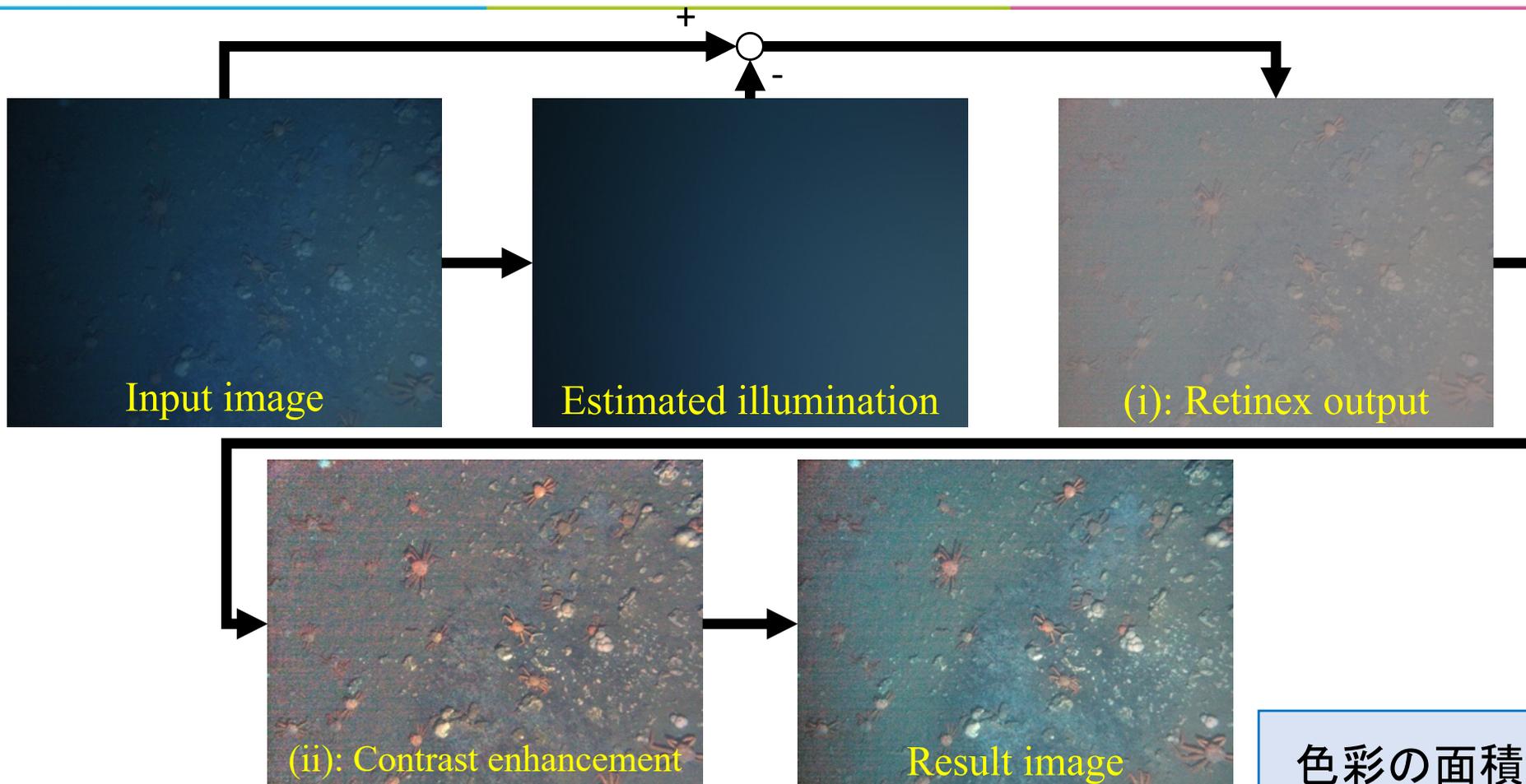
Raw image (I)



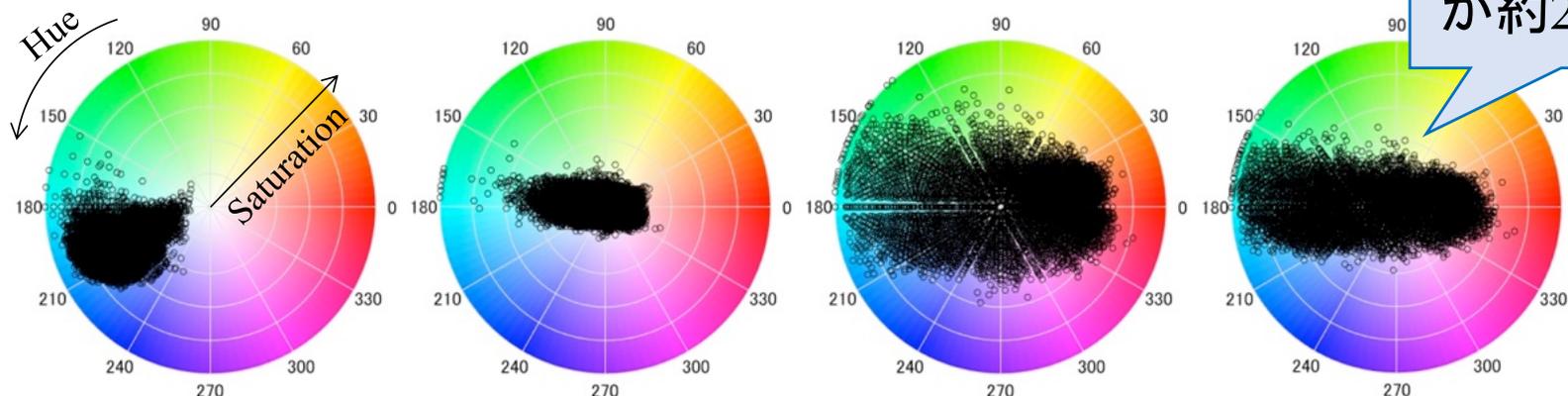
Illumination (L) = ($I * F$)



Output image (R_{img})



色彩の面積
が約2倍増加



実環境での送信実験－北海道オホーツク海実験結果

Raw image



Enhanced image



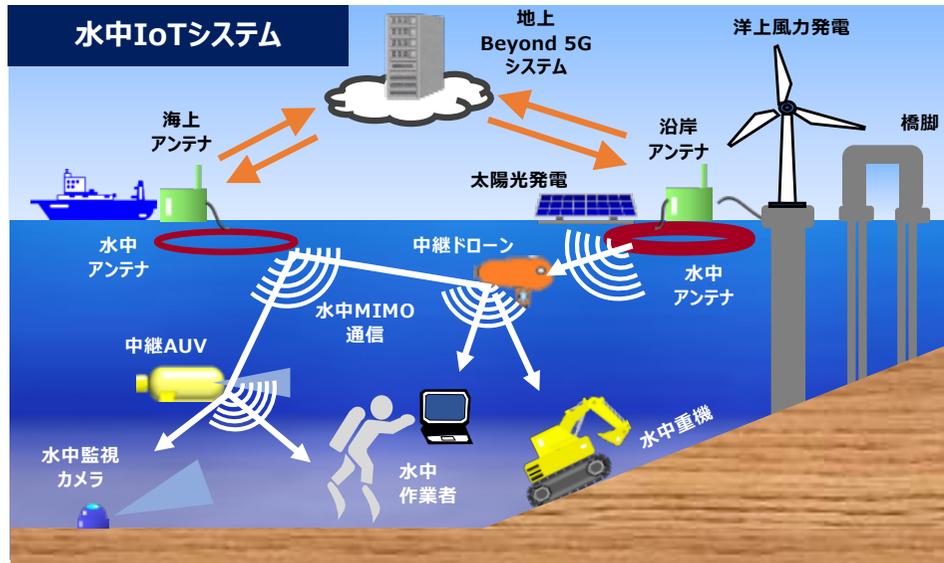
Reconstructed image



- 3回の潜航中1回のみ観測成功
⇒カラーパレットの更新が不可

- データ欠損：
船の仕様上、音響モデムの固定が不可
振動により、モデムのroll, pitch発生
⇒データ欠損が多く発生

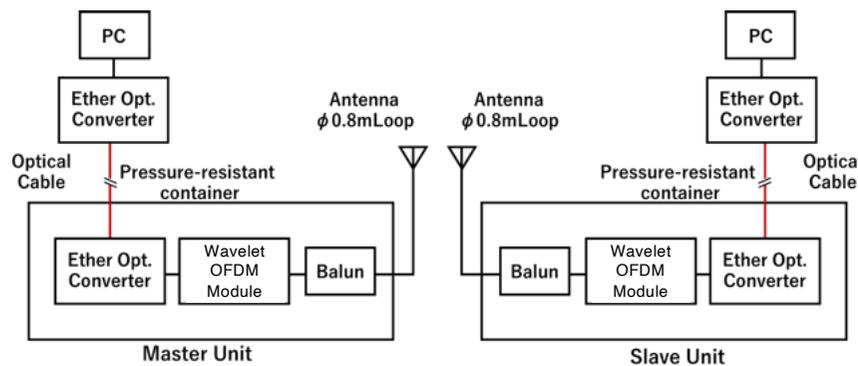




競うのではなく補完 (用途が異なる)

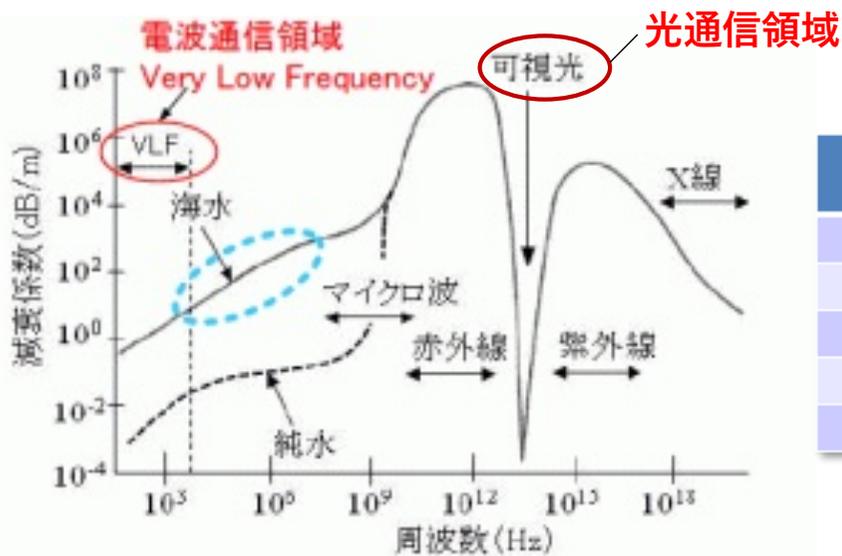
	音響	光	電波
実用化	○	△ 研究	△ 研究
通信距離	○ 数km~	△ 数十m	△ 数m
伝送容量	△	◎	○
コスト	○	△	◎
課題	反射、セキュリティ	濁り、光軸合わせ	距離
代表的利用シーン	潜水艇との通信	(AUVデータ・ハーベスト)	水中IoTセンシング

水中電波通信: 海中通信に適する2MHz以下に対応したWaveletOFDM通信装置の開発
九州工業大学とパナソニックの共同研究



海中電波通信の難しさ

- 電波は30kHz以下のVLFが利用されているが、速度が1kbps以下で低速が課題
- 電波で高速通信を行うにはMHz帯が必要であるが、**10mで390dB/1MHz**と厳しい環境
- 音響は長距離だが低速、光は高速だが濁りや光軸合わせの課題があり一長一短



水中での電磁波の吸収減衰

音波、電波の海中損失

周波数	音波損失 (dB/m)	電波損失 (dB/m)
1kHz	7.0×10^{-5}	1.2
10kHz	1.1×10^{-3}	3.9
100kHz	2.8×10^{-2}	12.2
1MHz	0.44	38.6
10MHz	30.1	122

光の海中損失

色	波長 (nm)	光損失 (dB/m)
紫	430	1.2
青	480	0.7
緑	530	0.64
黄色	580	0.56
オレンジ	605	0.76

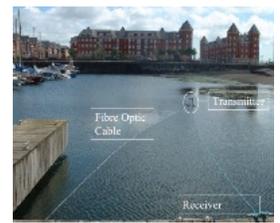
海中電波通信の実海域での研究例

■ 海中ロボットを運用できる海中での広域・高速電波通信の研究はない

	(a)リバプール ジョンムーア大学	(b)NICT	(c)当研究グループ
利用目標	海中ロボット	チャンネルサウンダ*2	水中IoT
通信速度	500kbps(理論値)	1.5Mbps(2x2MIMO)	1Mbps以上 (動画伝送)
通信距離/範囲	5m/-100dBm*1	1.5m(平行)	4m (平行)
周波数	5MHz	1MHz	0.0625-3.5MHz*
変調方式	なし	Single carrier QAM	Wavelet OFDM
送信電力	5W	30W	1W
アンテナ	ループアンテナ	ダイポールアンテナ	ループアンテナ



実験装置

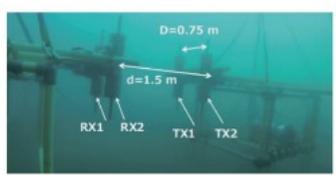


実験環境

(a) リバプール・ジョン・ムーア大学

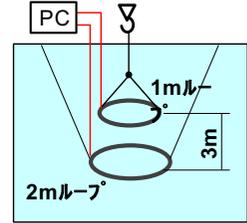


実験アンテナ

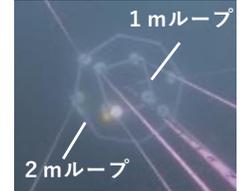


実験状況

(b) NICT



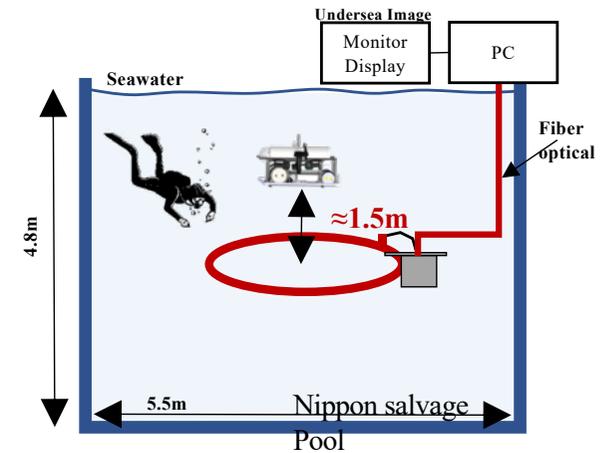
実験システム



実験状況

(c) 当研究グループ

*1 再現実験論文や当研究グループの実験では、再現データを取ることが出来ていない。 *2 チャンネルサウンダ：電波の伝搬損失、遅延等の電波環境を測定する通信実験装置
 その他： CSignum (<https://www.csignum.com/>) では電磁波で200~400bps (超低速) 伝送を行っている



Optical communication

View Frame rate: 24.677



Wireless communication

View Frame rate: 19.354

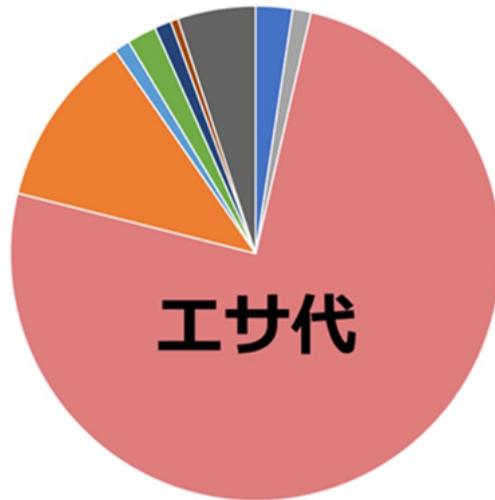




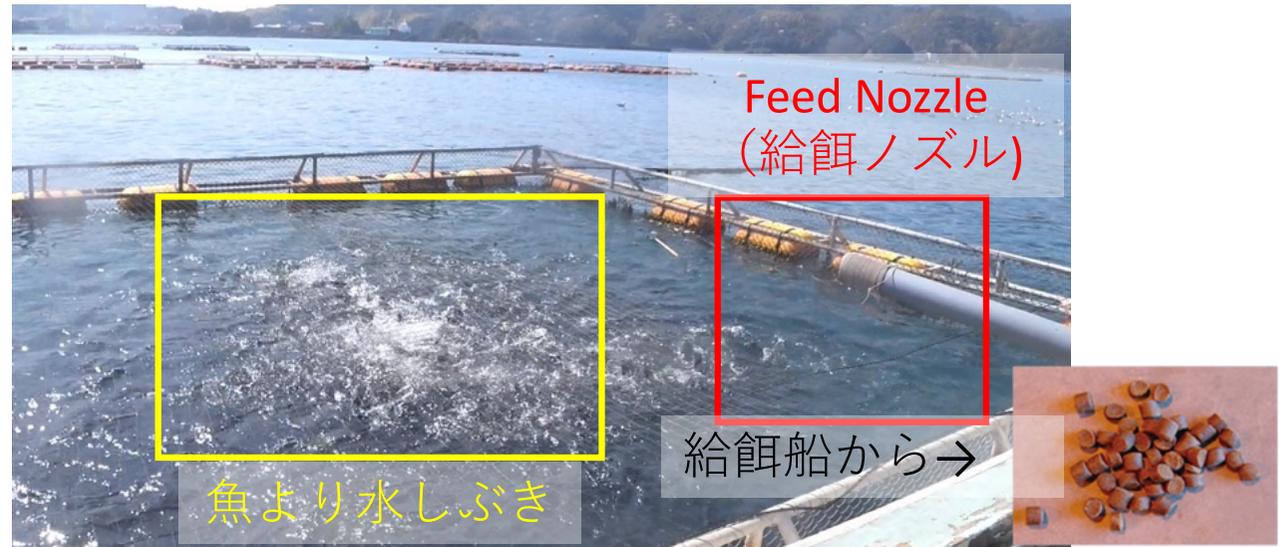
養殖業が抱える問題

- 経費に占めるエサ代の割合が大きい。
- 「匠の技術」で成長度合いが異なる。
- 新米だと残エサが発生し海が汚れる

漁労収入に対する経費の割合
ブリ類養殖業



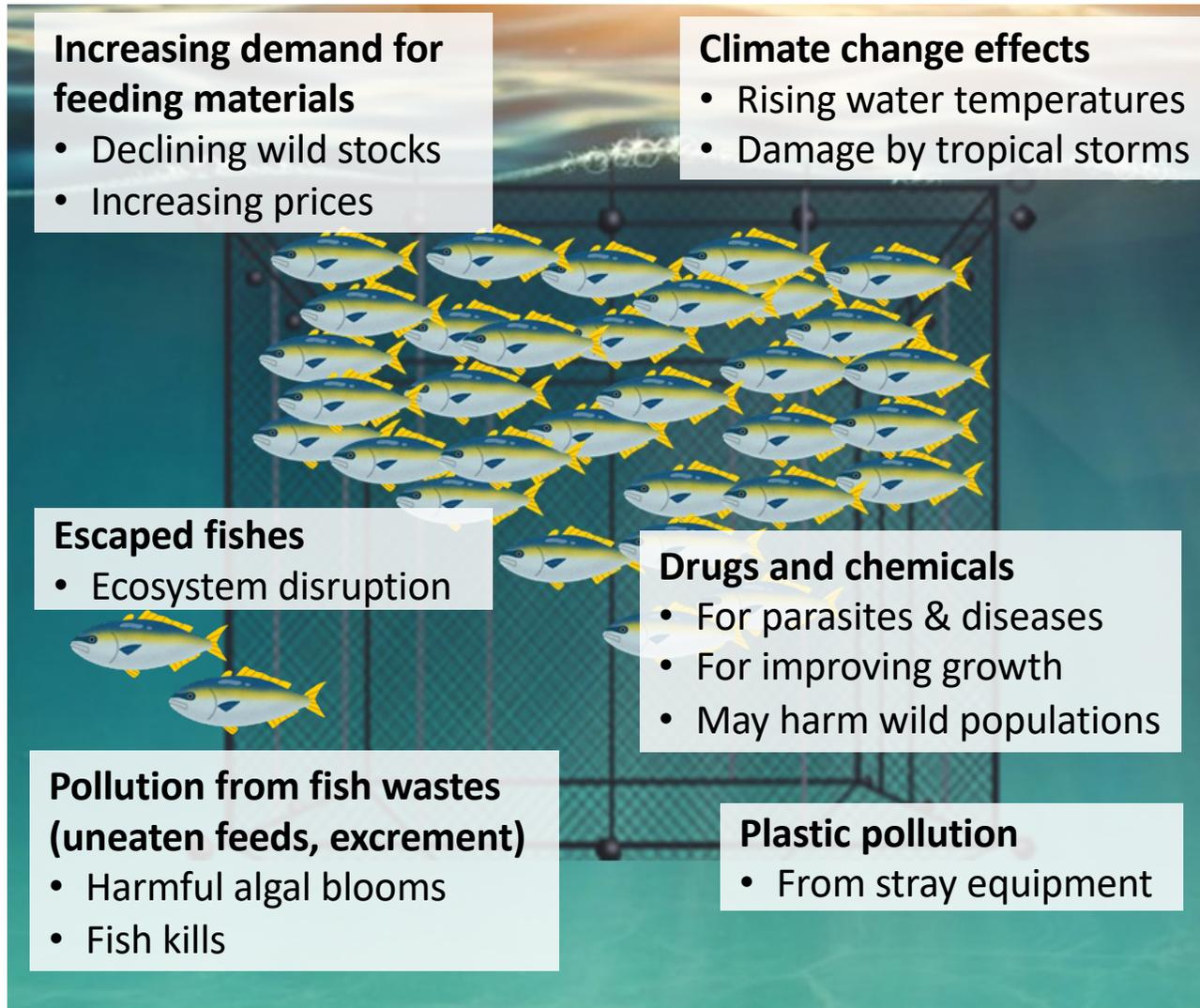
出典：令和2年度水産白書



水産技術研究所、(株)ベルテクネ、九州工業大学の共同研究
魚の「エサ食い」状況等を判別し、給餌量を全自動で調整でき、小型
作業船に搭載できるコンパクトな自動給餌機の開発。



Problems in aquaculture threaten its sustainability [2],[3]

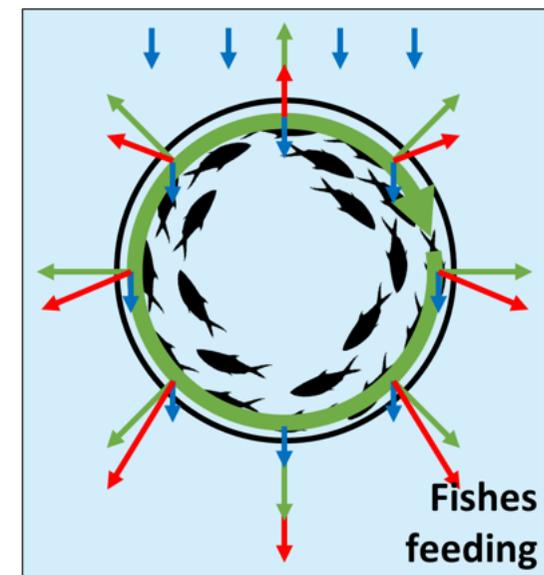
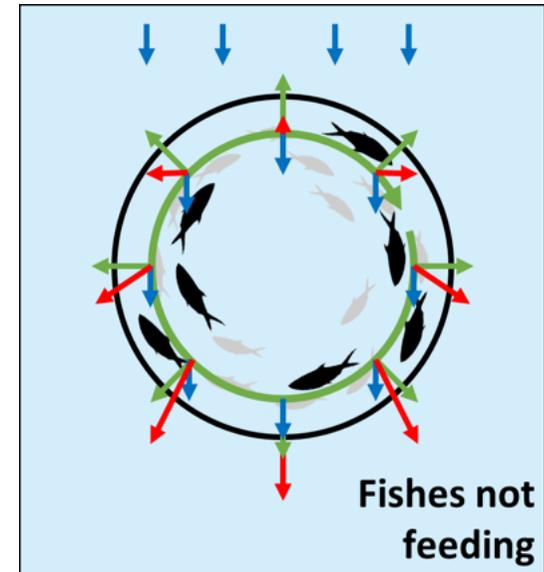
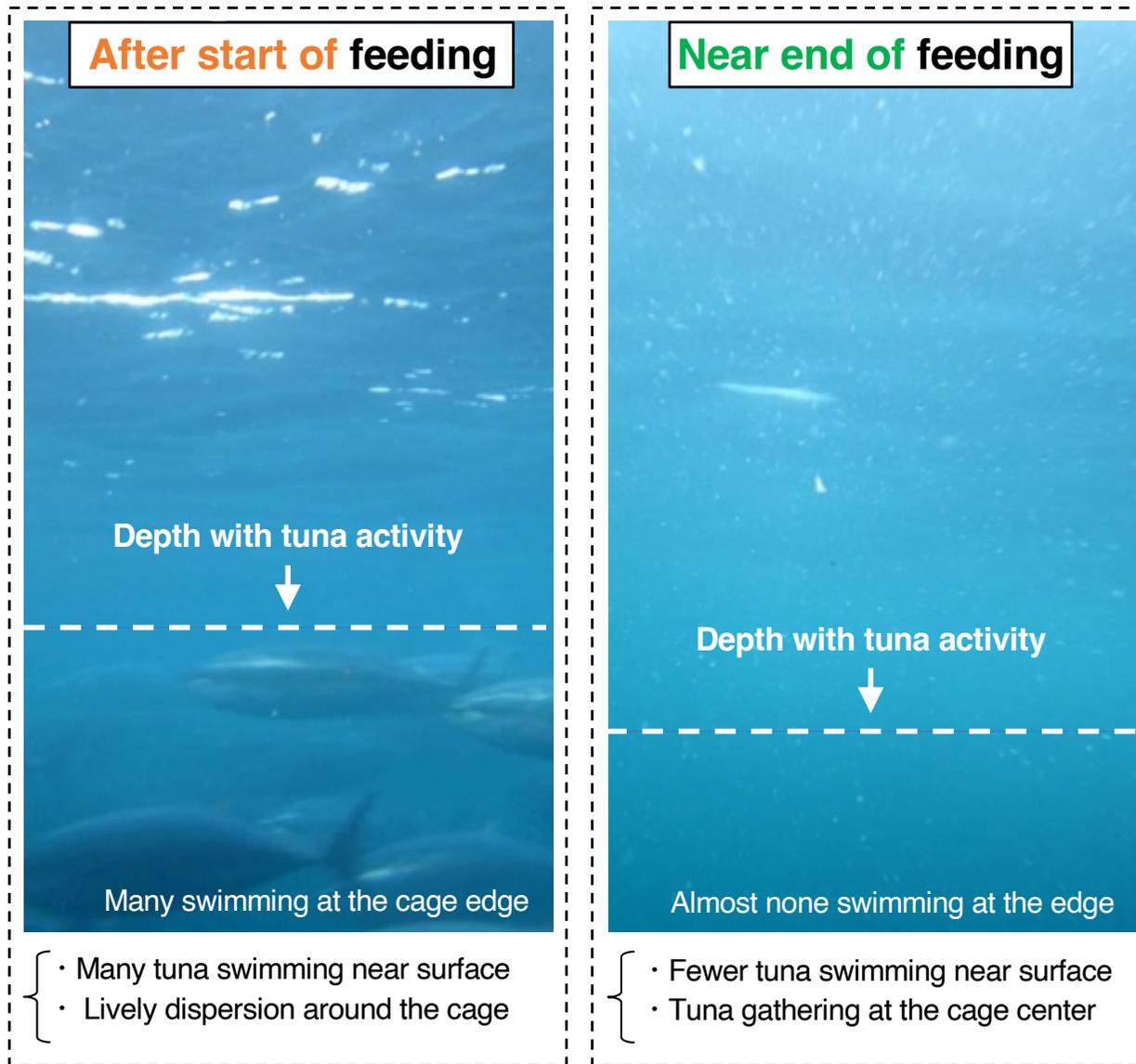


Research Topics

- Fish growth performance
- Reproduction and breeding
- Disease resistance and control
- Water environment regulation
- Fish cage engineering
- **Intelligent monitoring & control systems**
- Many others

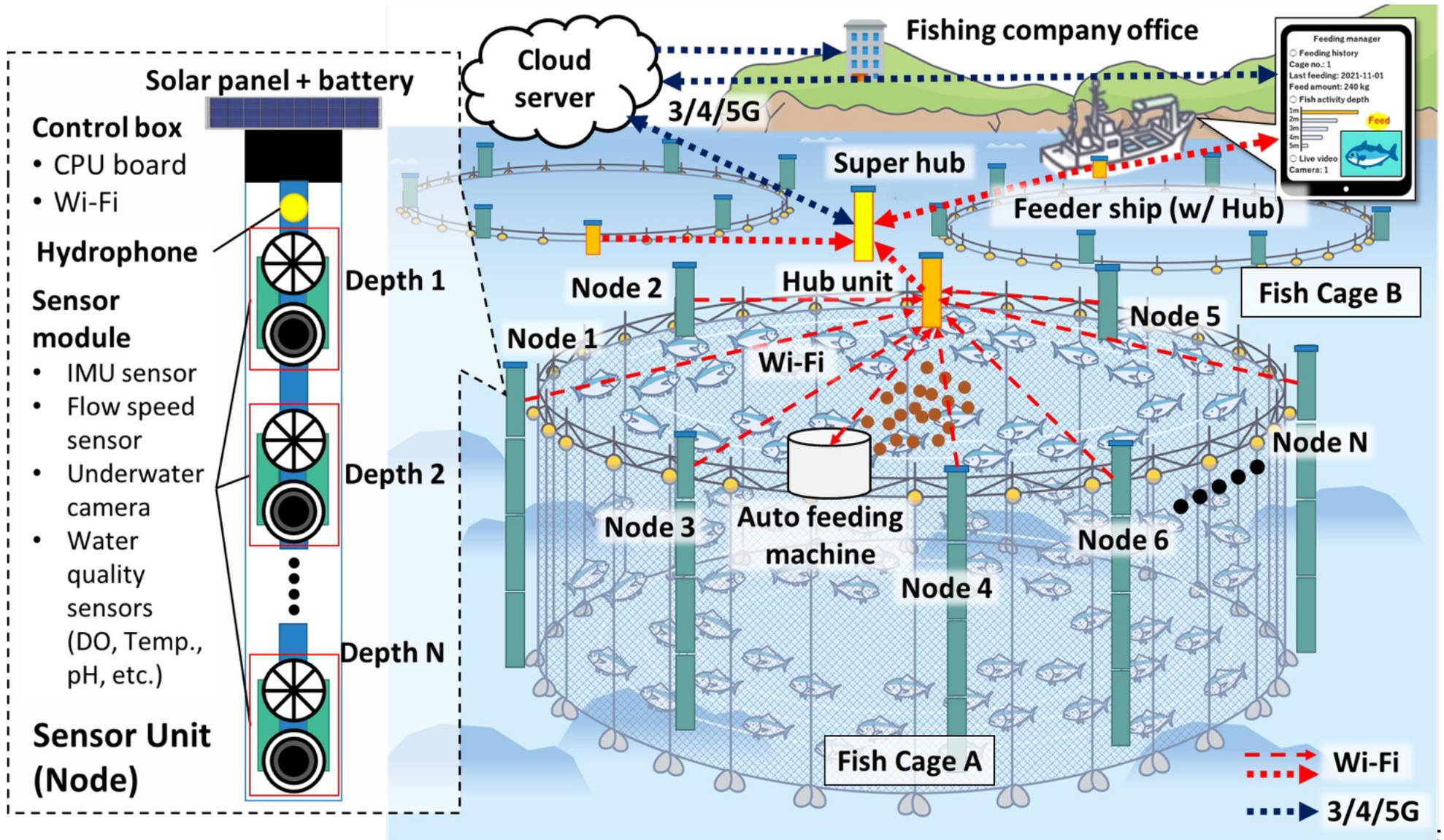
[2] M. Martinez-Porchas and L. R. Martinez-Cordova, "World Aquaculture: Environmental Impacts and Troubleshooting Alternatives," 2012.

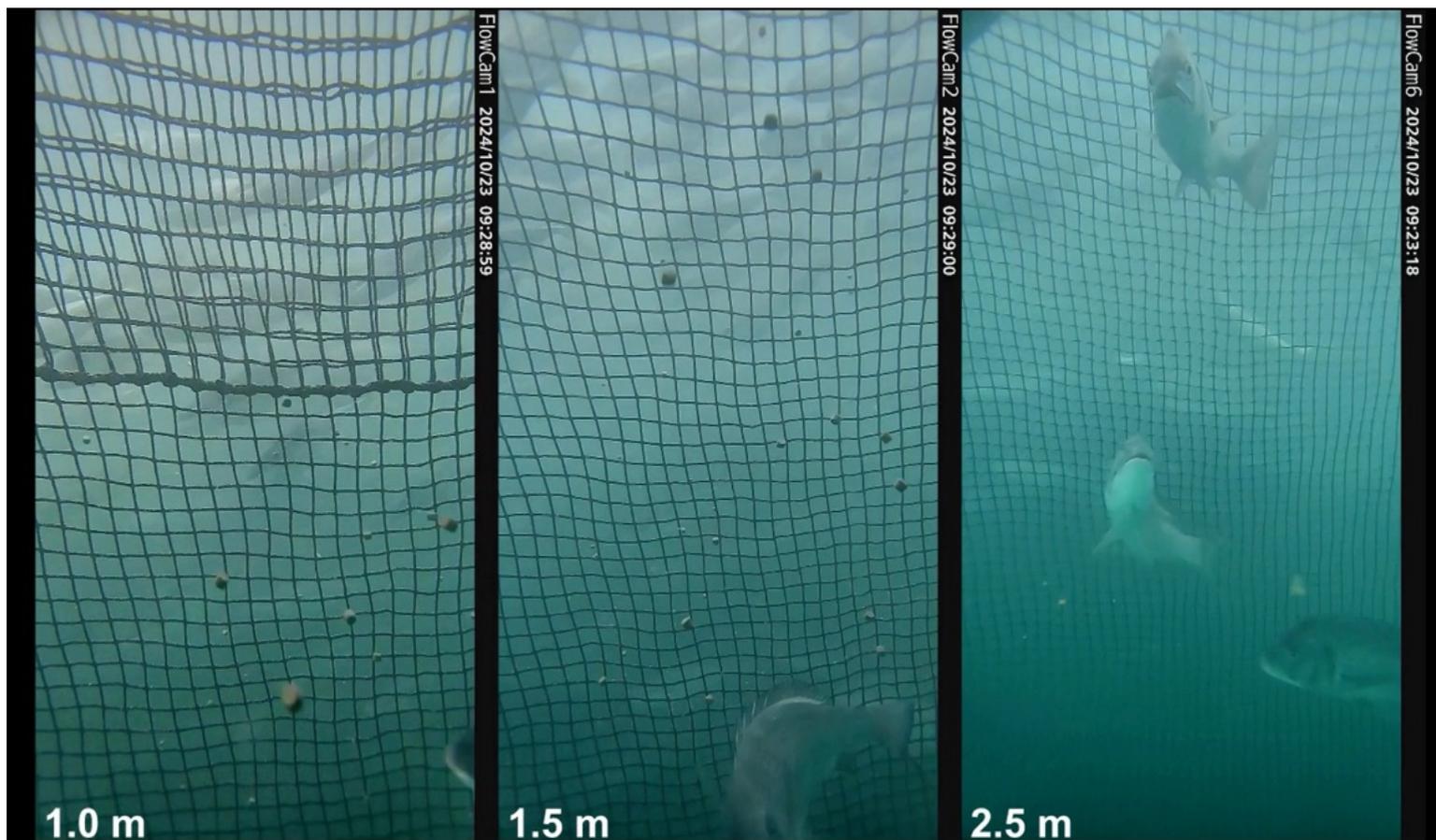
[3] A. Amad et al., "Aquaculture industry: Supply and demand, best practices, effluent and its current issues and treatment technology," J. Environ. Manage., 2021.



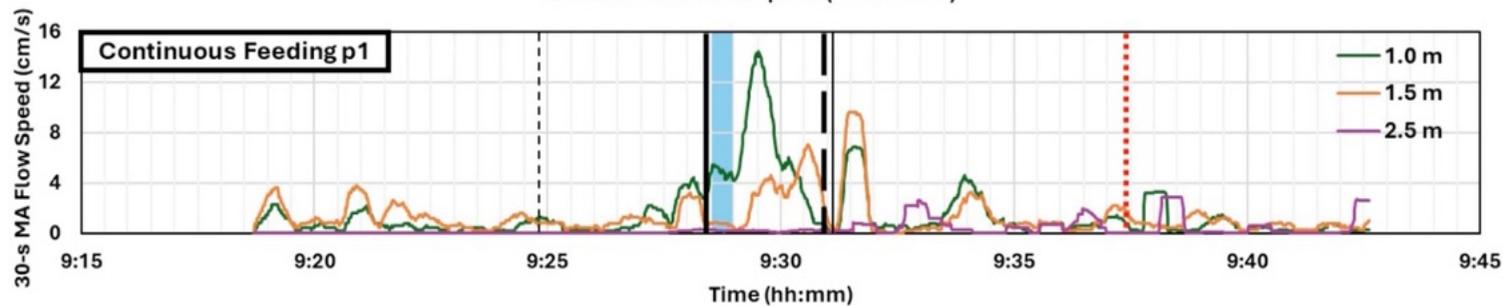


水産養殖のモニタリングシステム





Yellowtail MA Flow Speed (2024-10-23)



- 2024/10/26 @ファームチョイス(株)
- YOLOv8を用いて養殖魚を認識

給餌初期
9:19 ~9:21

給餌中
9:23 ~9:25

