

[課題番号]2-2007

# 海洋酸性化と貧酸素化の複合影響の総合評価

[体系的番号] JPMEERF20202007

[重点課題] 主: ⑧気候変動への適応に関わる研究・技術開発  
副: ⑯大気・水・土壌等の環境管理・改善のための対策技術の高度化及び  
評価・解明に関する研究

[行政ニーズ] (5-2)底層溶存酸素量が生物種の個体群の維持に与える影響と  
その評価手法の開発

[研究代表機関] (国研)水産研究・教育機構

[研究代表者名] 小埜恒夫

[研究分担機関] (国研)産業総合技術研究所  
(公財)海洋生物環境研究所  
北海道大学

[研究期間] 令和2年度～令和4年度

- ・全球的に海洋の酸性化・貧酸素化が進行中。

#酸性化については気候変動の影響への適応計画において、沿岸域におけるpHの日周変動の把握と生物への酸性化影響機構の解明を進め、将来における影響予測とそれに基づいた対策技術の開発を行うことが明記。

#貧酸素化についてはH28年より水質汚濁に係る生活環境の保全に関する環境基準に、底層溶存酸素濃度が追加される。

- ・沿岸域では温暖化を要因とする酸性化・貧酸素化に加え、陸域栄養塩負荷や陸水負荷による酸性化・貧酸素化が発生しており、後者はローカルレベルでコントロール可能。
- ・酸性化・貧酸素化それぞれが海洋生物に与える影響についての知見は蓄積されつつあるが、両者の複合影響に関する知見は世界的に見ても極めて乏しい。

## 研究開発目的

- ・海水のpHと溶存酸素濃度を同時に制御可能な飼育装置を用いて、日本沿岸に生息する複数の海洋生物に対する酸性化と貧酸素化の複合影響の評価試験を実施し、複合影響を考慮したpHおよび溶存酸素濃度の影響発現閾値を算定する。
- ・高解像度生態系モデルを用いて沿岸域海洋環境の将来予測を実施し、国内沿岸域において酸性化と貧酸素化の複合影響が発現する時期の予測を行う。
- ・数値モデル上で陸域からの栄養塩負荷量や淡水供給量を変化させることにより、酸性化・貧酸素化複合影響発現時期をどの程度遅延させることができるかを評価する。

## 全体目標:

日本沿岸域における酸性化と貧酸素化の複合影響に関する総合的な評価を実施し、沿岸各自治体が適応策を検討するための基本情報として公開する。

## 下位目標(各サブテーマ目標):

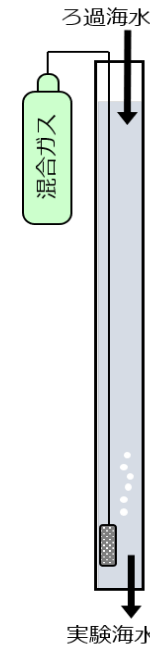
- ①6種の沿岸生物に対する酸性化・貧酸素複合影響評価実験を実施し、それぞれの生物について酸性化・貧酸素複合影響の発現閾値を特定する。
- ②飼育実験後の個体の遺伝子発現解析および骨格観察・元素分析を実施し、その結果から各生物の酸性化・貧酸素複合影響発現機序の推定を実施する。
- ③宮古、柏崎、東京湾におけるpHと溶存酸素濃度の周年モニタリングを実施し、現在の沿岸域におけるpHと溶存酸素濃度が、得られた閾値に対してどの程度離れた、または近い状況にあるかの評価を実施する。
- ④宮古、柏崎、東京湾のpH・溶存酸素変動を再現可能な高解像度沿岸生態系モデルを開発し、将来の日本沿岸域におけるpHと溶存酸素濃度が、何年程度後に得られた閾値に到達するかの予測を実施したうえで、陸域栄養塩負荷量を管理することでこの影響発現閾値到達時期を何年程度遅延させられるかの予測を行い、沿岸各自治体が適応策を検討するための基本情報として公開する。

サブテーマ1 海洋生物への酸性化と貧酸素化の複合影響評価実験 [海洋生物環境研究所]

・pH5段階 (8.0, 7.8, 7.7, 7.6, 7.5) X 溶存酸素濃度 (DO) 5段階 (230, 185, 140, 95, 50  $\mu\text{mol/kg}$ ) の25区画を同時運用可能な酸性化・貧酸素複合ばく露水槽を開発

=>シオダマリミジンコ、キタクシノハクモヒトデ、ウバガイ、バイ、シロギス、アマノガワテンジクダイの6種の生物の酸性化・貧酸素化複合影響飼育試験を、それぞれ複数の生活史段階について実施

=>複合影響が発現する閾値となるDO値をpH条件ごとに算定

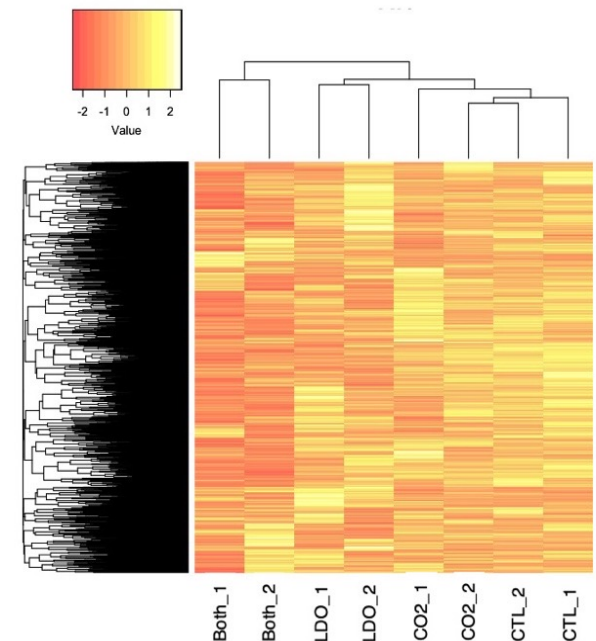


サブテーマ2 生理学的・形態学的計測に基づく酸性化・貧酸素化複合影響の発現機序解明 [産業技術総合研究所]

・サブテーマ1の飼育個体の網羅的遺伝子発現解析を実施  
キタクシノハクモヒトデ、ウバガイ、バイについては、炭酸カルシウム殻の形態観察と元素分析も実施

=>複合影響が発現した個体の遺伝子発現パターンの変化・殻の形態・元素組成の変化から、各生物の複合影響発現機序を推定

=>貧酸素影響下で各生物種に共通に現れるストレス遺伝子を「貧酸素ストレスマーカー」として抽出



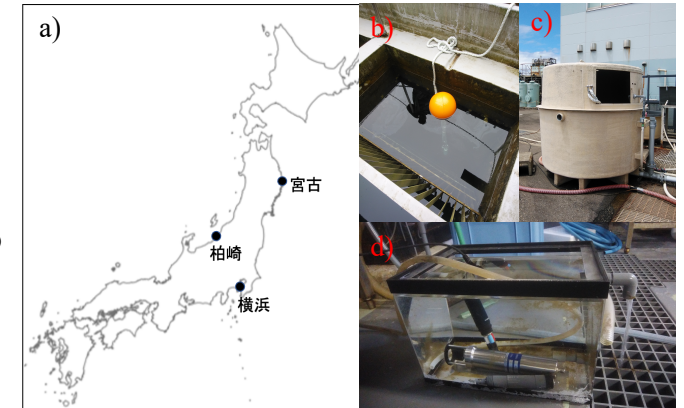


サブテーマ3 沿岸域における酸性化・貧酸素化の現状把握  
[水産研究・教育機構]

・宮古地先/沖合、柏崎地先/沖合、東京湾における水温・塩分・DO・pHの連続周年観測を実施。(測定精度: pH $\pm$ 0.02、DO $\pm$ 5 $\mu$ mol/kg)

=>各海域におけるDO、pH、アラゴナイト飽和度( $\Omega_{ara}$ )の年最低値とサブテーマ1で求められた複合影響発現閾値(24-h LD<sub>5</sub>)との比較から**複合影響発現猶予値**、または**閾値超過日数**を算出。

=>各海域における**DO、pH、 $\Omega_{ara}$ の変動要因を推定**

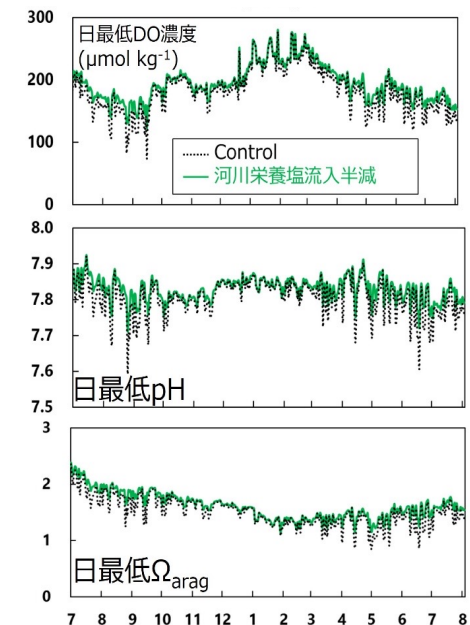


サブテーマ4 沿岸域における酸性化・貧酸素複合影響の将来予測  
[北海道大学]

・宮古、柏崎、東京湾のDO、pH、 $\Omega_{ara}$ の変動を再現可能な高解像度沿岸生態系モデルを開発。  
二つのCO<sub>2</sub>排出シナリオ(RCP8.5, RCP2.6)と3つの栄養塩シナリオ(将来の海域への栄養塩負荷量を現在と同じと仮定、現在から半減、現在から倍増)のもとで、各沿岸域のDO、pH、 $\Omega_{ara}$ の将来予測を実施

=>柏崎・宮古では、**DO、pH、 $\Omega_{ara}$ が複合影響発現閾値に到達する年がシナリオによりどう変化するか**を解析

=>現時点でDO、 $\Omega_{ara}$ の年最低値が複合影響発現閾値下回る東京湾では、**閾値超過日数がシナリオによりどう変化するか**を解析

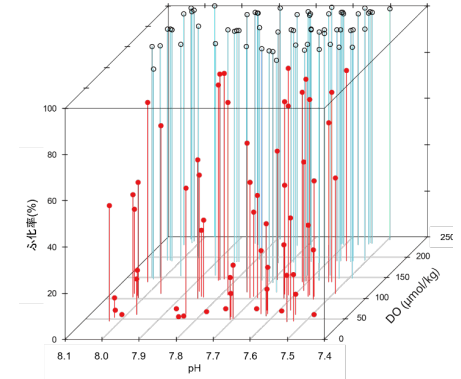


1] 沿岸生物の酸性化・貧酸素化複合影響発現閾値の算定

・飼育実験の結果、6種の生物のうちウバガイ・バイ(卵・幼生)、キタクシノハクモヒトデ・シオダマリミジンコ(成体)は、実験範囲内で致死的な複合影響は生じないことが確認できた。

・シロギス卵・幼生、シオダマリミジンコ幼生では、pH条件により異なる閾値で貧酸素影響が発現する**複合影響**を確認

異なるDO・pH条件に対するシロギス卵の孵化率の変化



=>24時間の暴露時間における5%致死濃度として**酸性化・貧酸素化複合影響発現閾値**を算定。

各pH条件下の24時間の暴露時間における5%致死DO濃度(24-h LC<sub>5</sub>; 単位はμmol/kg)

生物種	生活史段階	pH				
		8.0	7.8	7.7	7.6	7.5
シロギス	卵	128	132	121	117	137
	仔魚	125	111	119	120	131
シオダマリ	幼生	68	76	60	77	78
ミジンコ						

# 現在の東京湾のpH条件 (pH=7.8)におけるシロギス卵の24-h LC<sub>5</sub> (132 μmol/kg = 4.2mg/L) は、

**東京湾の底層溶存酸素濃度基準(生物1基準値; 4.0 mg/L)よりも高い**

=>東京湾では**底層溶存酸素濃度基準値を満たしている海域でも、シロギスに影響が出る可能性**

# 将来の東京湾のpH条件 (pH=7.5)における24-h LC<sub>5</sub> は、各生物ともに**現在より上昇する。**

=> **将来の酸性化が進んだ環境下では、より厳しい底層溶存酸素濃度基準値を設定する必要を示唆**

・その他、非致死的な複合影響も多数発見。(複合影響下でのバイ成体の成長速度の低下、ウバガイ成体の成長速度の増加、キタクシノハクモヒトデの行動活性低下....等)

2]中程度の酸性化条件における「緩和的な複合影響」の出現

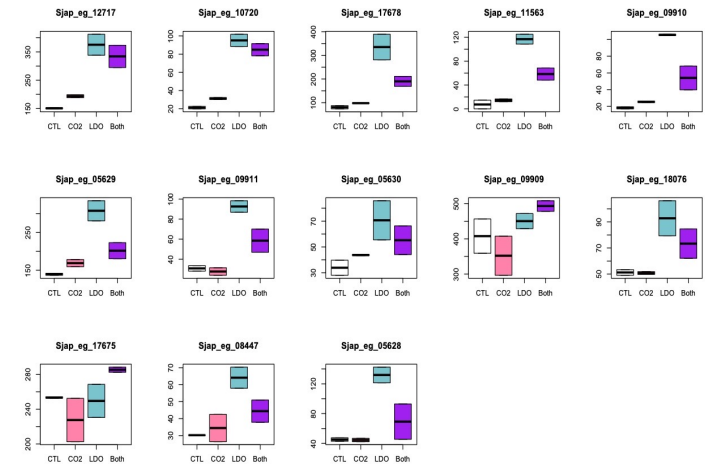
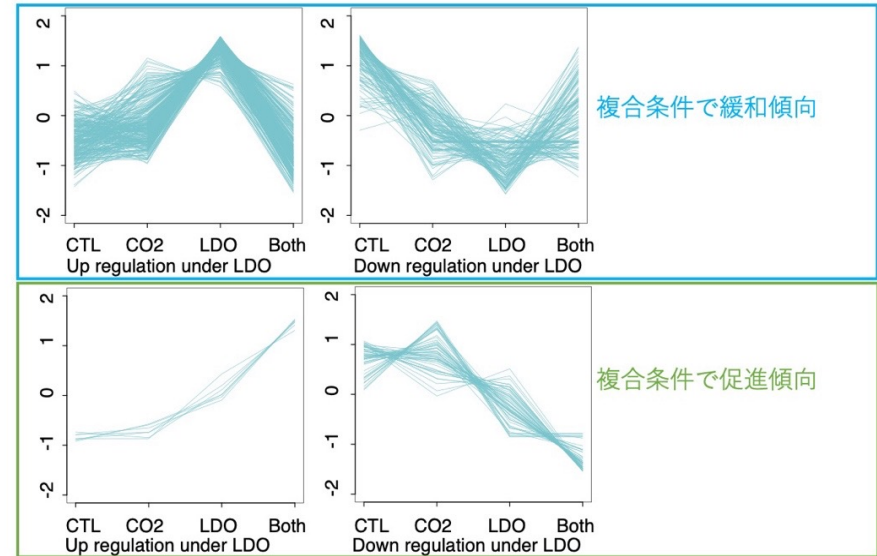
- シロギス卵・幼生、シオダマリミジンコ幼生の24-h LD<sub>50</sub>は、十分低いpH条件では現在より上昇するが、中程度のpH条件下 (pH=7.7~7.6) ではむしろ現在よりも低下することが確認された(緩和的な複合影響)。  
=>既往知見ではほとんど見られない事例。  
飼育条件の高精度管理が功を奏した？

- サブテーマ2による網羅的遺伝子発現解析の結果からも、酸性化単体、貧酸素化単体で発現が増加する遺伝子の多くが複合影響下では発現量が緩和されることを確認。

- 特に、解糖系に関わる遺伝子群の発現量増加を多数検出

=>貧酸素により電子伝達系の活動が阻害された結果、効率の悪い解糖系によるATP合成を行わざるを得なくなっている？  
=>中程度の酸性環境下で解糖系の発現が緩和されるのは、ボーア効果(酸性環境ではヘモグロビンが酸素を解離しやすくなり、結果体の末端における酸素欠乏が解消される)が働いているため？

複合影響区で遺伝子発現が緩和・促進された遺伝子群の発現パターン(シロギス卵)



対照区(CTL)、酸性化区(CO<sub>2</sub>)、貧酸素区(LDO)、複合影響区(Both)における、シロギス卵の解糖系関連遺伝子の発現パターン。

## 3]貧酸素ストレス指標遺伝子群の特定

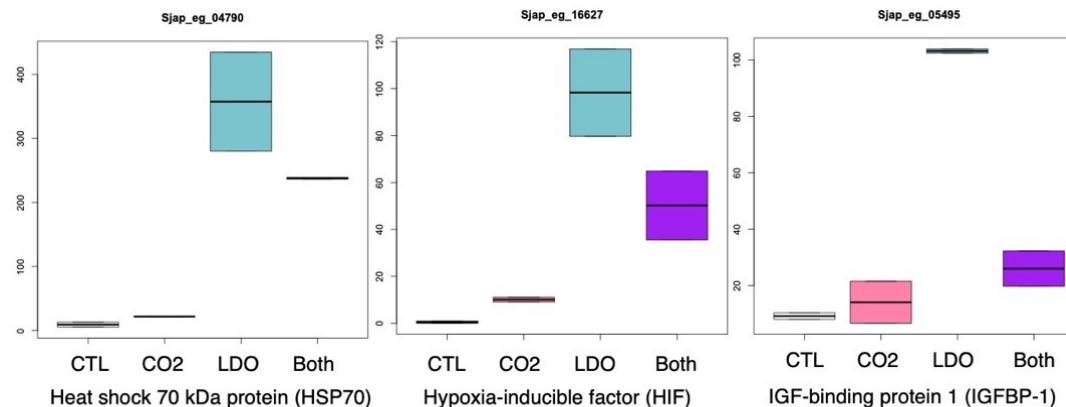
・シロギスの網羅的遺伝子解析の結果、貧酸素条件下において特異的に発現量が増加する3種の遺伝子を特定

#ヒートショックプロテイン

#低酸素誘導因子

#インスリン様成長因子結合タンパク質1

=>野外生物におけるこれらの遺伝子群の発現量を、生態系が受けている貧酸素ストレスの指標として使用できる可能性を示唆。



シロギス卵における Heat shock 70 kDa protein、Hypoxia-inducible factor、Insulin-like growth factor-binding protein 1の発現パターン。

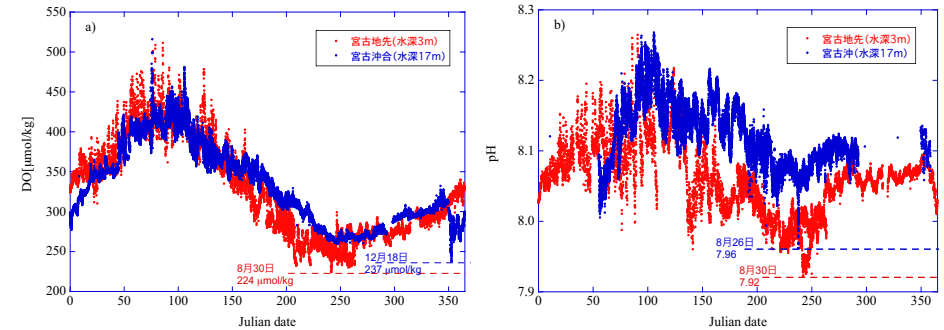
4]現在の沿岸域における酸性化・貧酸素化進行状況の定量評価

・宮古地先/沖合、柏崎地/沖合、東京湾における DO, pH,  $\Omega_{ara}$  の年間最低値と、飼育実験で得られた複合影響発現閾値とを比較

\*年最低値 > 閾値の場合 =>最低値と閾値の差を算出(影響発現猶予値)

\*年最低値 < 閾値の場合 =>観測値が閾値以下になる積算日数を算出(閾値超過日数)

宮古地先・宮古沖合における DOとpHの年間最低値



宮古、柏崎、東京湾におけるDO、pH、 $\Omega_{ara}$ の年間最低値と、そこから計算された複合影響発現猶予値もしくは閾値超過日数

	宮古地先	宮古沖	柏崎地先	柏崎沖	東京湾 <sup>#</sup>
DO					
年間最低値(μmol/kg)	224	237	216	204	88
影響発現猶予値(μmol/kg)	92	105	95	72	----
閾値超過日数(日)					1
pH					
年間最低値	7.92	7.96	7.81	7.94	7.60
影響発現猶予値	0.32	0.36	0.21	0.34	0.00
$\Omega_{ara}$					
年間最低値	1.59	1.31	1.67	2.19	0.87
影響発現猶予値	----	----	0.07	0.69	----
閾値超過日数(日)	0.25	10			87

・東京湾では $\Omega_{ara}$ が影響発現閾値を下回る日数が87日間、DOが影響発現閾値を下回る日が1日存在していた事を確認

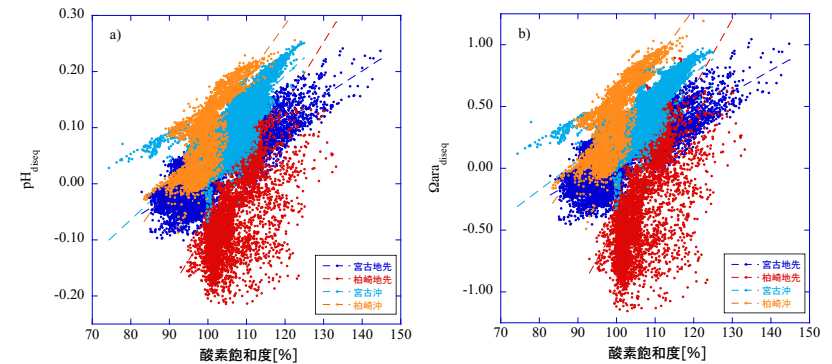
=>現在の東京湾でも貧酸素化・酸性化複合影響が生じ得ることを示唆。



5] 栄養塩負荷量の削減が沿岸域の貧酸素化・酸性化を抑制する効果の定量的評価

- ① 沿岸モニタリングの結果から、沿岸ではDO・pH・ $\Omega_{ara}$ がすべて連動して増減する傾向にある事を確認。  
 => DOとpH、DOと $\Omega_{ara}$ の相関の傾きから、栄養塩削減施策により沿岸の酸素飽和度が10%改善した場合に、連動して発生することが期待されるpHと $\Omega_{ara}$ の増加量を海域ごとに試算。  
 => **貧酸素対策が、酸性化対策としてもどの程度の効果があるかを自治体が試算する際の参考値として有用。**

各海域におけるDOとpH, DOと $\Omega_{ara}$ の相関プロット



各海域の酸素飽和度を10%改善させることで期待されるpHと $\Omega_{ara}$ の上昇量

	宮古地先	宮古沖	柏崎地先	柏崎沖	東京湾
pH	0.04	0.06	0.11	0.10	0.05
$\Omega_{ara}$	0.18	0.24	0.55	0.43	0.24

5] 栄養塩負荷量の削減が沿岸域の貧酸素化・酸性化を抑制する効果の定量的評価

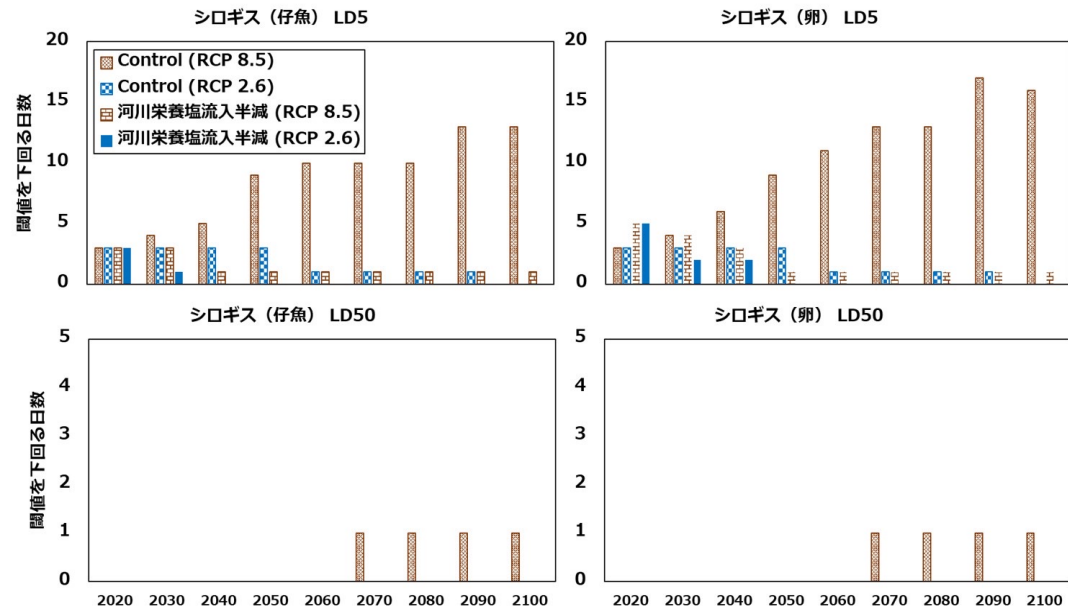
② 沿岸への栄養塩負荷量に応答してDO・pH・ $\Omega_{ara}$ の変動が変化する過程を組み込んだ高解像度沿岸生態系モデルを用いて、東京湾における将来のDOの閾値超過日数が栄養塩シナリオによってどのように変動するかを予測した。

結果

- # RCP8.5シナリオで、栄養塩負荷量の削減なし => 2100年までにDOの閾値超過日数が大幅増加。
- # RCP8.5シナリオで、栄養塩負荷量を現在から半減 => 2100年までにDOの閾値超過日数が大幅低下
- # RCP2.6シナリオで、栄養塩負荷量を現在から半減 => **2050年までに、DOの閾値超過日数がゼロに**

=> 「**将来の酸性化対策としての栄養塩負荷量抑制政策**」の有効性を示す結果に。

複数のCO<sub>2</sub>排出シナリオ及び栄養塩負荷量シナリオ別に算出された、将来の東京湾底層におけるDOがシロギスの仔魚(左)及び卵(右)の24-h LC<sub>5</sub>(上)及び24-h LC<sub>50</sub>(下)を下回る日数の将来予測結果



## 6]栄養塩負荷量の削減が沿岸域の貧酸素化・酸性化を抑制する効果に関する国民との対話

- ・3年間で12件の「国民との対話」を実施し、特に「**栄養塩負荷量の削減が沿岸域の貧酸素化・酸性化を抑制する**」という研究成果とその社会実装方法について、参加者との協議を重ねた。

## 結果

- # 国民の多くが酸性化の解決には世界的なCO<sub>2</sub>削減のみが有効で、**地域でできる対策はない**と認識していた。 <= 本研究にはその意識を変える効果がある。
- # 漁業者からは、単純な栄養塩削減には否定的な意見(貝類漁業者を除く)  
=>海の生産力と貧酸素化・酸性化回避のバランスをとる現実的な手法についての議論を各所で実施。  
現場から出た有望な案として、
  - ・能動的栄養塩放出量管理
  - ・海底耕運による再生栄養塩負荷量の削減
  - ・藻場による河口域での栄養塩吸収処理などがあげられた。
- # 今後も対話を重ね、漁業関係者も沿岸住民も受け入れやすい栄養塩管理手法を海域ごとに検討していく。

瀬戸内海環境保全協会公開講座における  
沿岸自治体職員・漁業関係者との対話の様子  
[瀬戸内海環境保全協会HPより]



- ① シロギス卵・仔魚の貧酸素影響発現閾値が、底層溶存酸素濃度基準値(生物1)よりも高い。
- ② 酸性化が進行すると、貧酸素影響発現閾値は現在よりもさらに高くなる  
=>将来底層溶存酸素濃度基準値を改訂する際の重要な参考情報
- ③ 貧酸素条件下において特異的に発現量が増加する3種の遺伝子の特定に成功  
=>海洋生物の貧酸素ストレスを評価するモニタリング指標の候補に
- ④ 東京湾では現在でも既に、アラゴナイト飽和度が酸性化影響発現閾値を87日間下回っている。  
また貧酸素影響発現閾値も1日だけ下回った。  
=>東京湾で酸性化・貧酸素化複合影響が発現するおそれがあり、モニタリングの強化が必要
- ⑤ 貧酸素対策により沿岸域の酸素飽和度を10%上昇させることに成功した場合、同時に期待されるpHとアラゴナイト飽和度の上昇量を海域ごとに定量化。  
=>既存の貧酸素対策が持つ酸性化抑制作用としての効果を自治体が試算する際の参考値に
- ⑥ 将来の東京湾における底層溶存酸素濃度の閾値超過日数は、栄養塩負荷量を現在から半減させることによって大幅に低下させることが可能。  
CO<sub>2</sub>排出量削減(RCP2.6)と栄養塩負荷量半減の双方を実施した場合、2050年までに底層溶存酸素の閾値超過日数をゼロにすることも可能。  
=>「**将来の酸性化対策としての栄養塩負荷量抑制政策**」の有効性を示す科学的論拠に

## 目標どおりの成果をあげた

- ・6種の生物の複合影響飼育試験を実施し、溶存酸素濃度の貧酸素影響発現閾値がpH条件毎に異なる「複合影響」の発生を確認した。  
21世紀末に予想されるpH条件下ではDOの貧酸素影響発現閾値が現在よりも上昇し、酸性化によって生物が貧酸素に対して更に脆弱になる可能性が示された。
- ・6種の生物の遺伝子発現解析、3種の生物の殻の形態観察と元素分析を実施し、複合影響の発現機序を推定した。貧酸素影響の発現機序として電子伝達系の機能低下、複合影響の発現機序としてボーア効果が推定された。また、貧酸素条件下において特異的に発現量が増加する3種の遺伝子の特定に成功した。
- ・宮古、柏崎、東京湾のモニタリングを実施し、pHの変動を±0.02以下の精度、DOの変動を±5μmol/kgの精度で把握した。この結果を元に現在の各海域の酸性化・貧酸素化の進行状況を定量的に評価した。  
この結果、東京湾では既に酸性化・貧酸素化複合影響が生じている可能性を明らかにした。
- ・本課題の最終目標である、栄養塩負荷量管理による貧酸素化・酸性化の進行抑制効果の定量化のために、
  - ①貧酸素対策により沿岸の酸素飽和度を10%上昇させた場合に期待されるpHとアラゴナイト飽和度の上昇量の定量的な推定
  - ②将来の各海域における酸性化・貧酸素化の栄養塩シナリオ別進行予測を実施した。  
特に高栄養塩負荷海域である東京湾では、栄養塩負荷量を現在から半減させることで、将来のCO<sub>2</sub>排出量をRCP8.5からRCP2.6に引き下げたのとほぼ同程度の酸性化・貧酸素化複合影響発現リスク抑制効果を期待できることを定量的に示した。

これらの知見を統合して、沿岸自治体からの影響塩負荷量を削減する施策が将来の酸性化・貧酸素複合影響を低減する適応策として有効であることを示す一連の理論的根拠を構築し、各沿岸の自治体関係者や漁業関係者に対して情報発信を行うとともに、漁業関係者も沿岸住民も受け入れやすい具体的な社会実装方法についての検討を進めた。



- ・論文(査読有) 7件
- ・その他誌上発表 7件
- ・口頭発表 30件
- ・国民との対話 12件
- ・プレスリリース 3件

NHK サイエンスZERO「生き物のからだ溶ける？"海洋酸性化"の脅威」  
(2022年8月14日放映)



## ・本研究費の研究成果による受賞 2件

- ①本研究を含む研究により、サブテーマ4リーダーの藤井賢彦が日本海洋学会2022年度環境科学賞「地球温暖化と海洋酸性化の複合影響の評価・予測・対策に関する統合的研究の推進および関係する教育啓発・社会活動」を受賞
- ②本研究費を用いた研究論文が日本海洋学会2023年度日高論文賞を受賞  
(T. Ono: Journal of Oceanography, 77, 659-684 (2021)  
Long-term trends of oxygen concentration in the waters in bank and shelves of the Southern Japan Sea)