

琵琶湖深湖底の貧酸素化における 底生生物と環境要因の関係解明



滋賀県琵琶湖環境科学研究センター
石川可奈子
(代理発表: 専門研究員 井上栄壮)

本日の発表内容

1. 研究の背景
2. 観測の方法
3. 解析方法の検討 (生データの特性を見る)
4. 長期的な群集構造の変化と環境要因の関係
5. 変動に影響を及ぼす要因との関係
6. まとめ
7. 今後の展望
8. 謝辞

研究の背景

温暖化で琵琶湖の表層水温も約 30 年間のモニタリングで約 1°C の上昇

全層循環のメカニズム

出典：琵琶湖をとりまく現状と課題

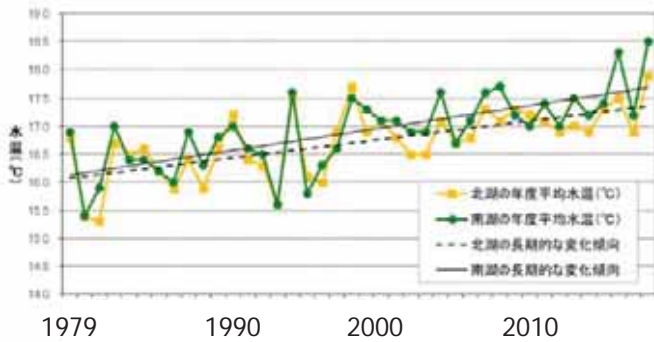
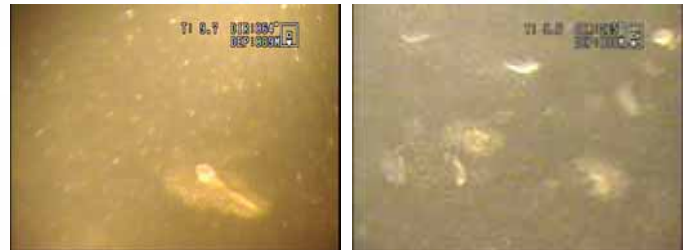
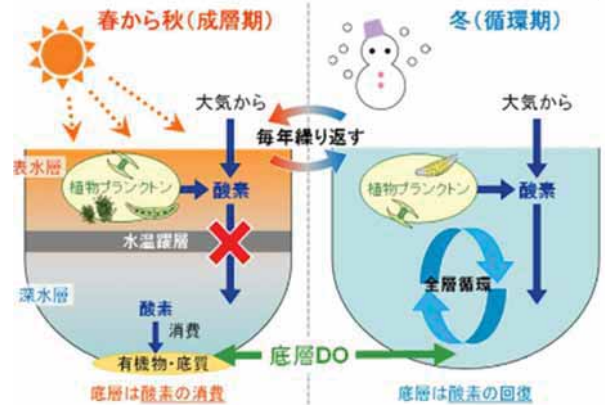
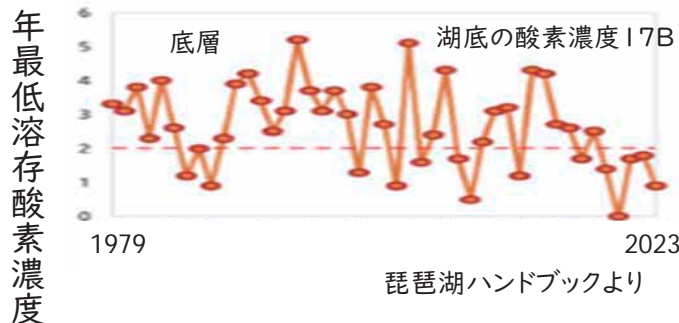


図 B7 琵琶湖の水温の経年変化（表層平均）

<https://www.pref.shiga.lg.jp/file/attachment/5242577.pdf>



2007年ごろから深湖底で酸素欠乏による生物の死亡個体が多く見られるようになった。



琵琶湖ハンドブックより

研究の背景

中央環境審議会 水環境・土壌農薬部会 生活環境の保全に関する水環境基準小委員会 第1回資料2(令和6年3月11日)より引用

底層溶存酸素量 平成28年3月に環境基準として設定

底層溶存酸素量は、底層を利用する生物の生息・再生産にとって特に重要な要素の一つ。

- 底層溶存酸素量の確保により、
 - ・魚介類等が生息・再生産できる溶存酸素を確保できる。
 - ・底層溶存酸素量の低下防止により青潮・赤潮などの発生リスクを低減できる。
- 魚介類等の水生生物保全の観点から底層溶存酸素量の指標が有効。

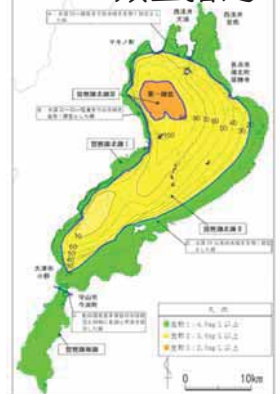


青潮

【指定湖沼】琵琶湖、霞ヶ浦
 【指定海域】東京湾、伊勢湾(狭義)、瀬戸内海(大阪湾、播磨灘北西部、備讃瀬戸、燧灘東部、燧灘北西部、広島湾西部、響灘・周防灘)、有明海

【琵琶湖の保全対象種】コイ(在来型)、ニゴロブナ、ホンモロコ、イサザ、イワトコナマス、ビワマス、スジエビ、セタシジミ 計8種

R3~類型指定



科学的データが十分ないため、保全対象種の選定は ①計画等 ②貧酸素影響の受けやすさ ③水産・文化的利用 ④地域関係者からの意見 によって選定

研究の目的

本研究は、琵琶湖深湖底における貧酸素化の進行と底生生物の生息状況との関係を、長期観測データに基づいて定量的に解析し、底生生物と環境要因（水温、底層溶存酸素量（DO）、栄養塩、泥質など）との関係性を明らかにすることを目的とする。

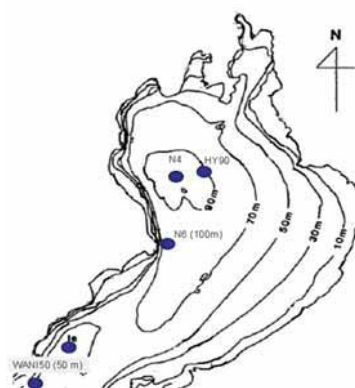
【本研究の将来期待される効果】

- ◆ 深湖底における貧酸素化の生態系への影響を科学的根拠に基づいて評価する。
- ◆ 環境基準として設定された底層DOの目標値の妥当性を、生物学・生態学的視点から検討する。
- ◆ 生物生産性の向上と栄養塩負荷削減とのトレードオフを踏まえ、持続可能な水質・水産資源管理の在り方検討に役立てる。
- ◆ 湖沼・沿岸域における貧酸素化対策および水環境管理の高度化に資する科学的基盤の構築を目指す。

水中ロボット(ROV)を用いた深湖底の底生動物調査



Remotely Operated Vehicle (ROV)



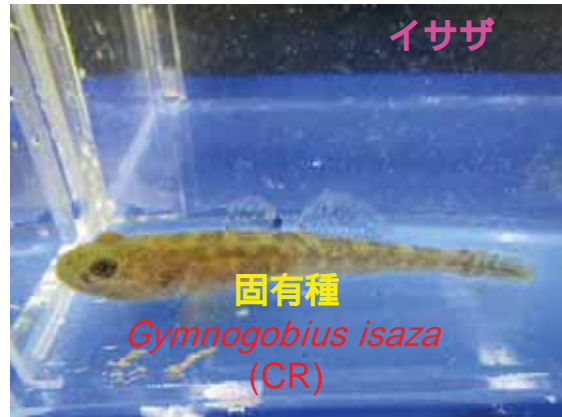
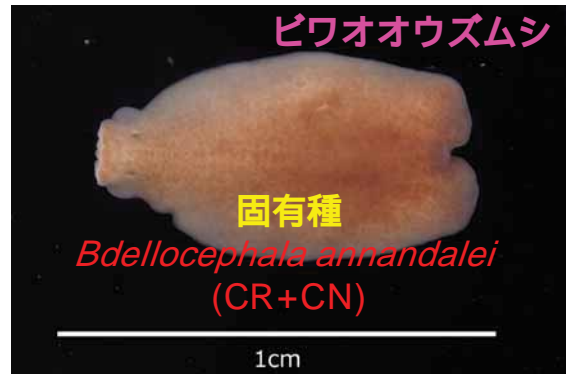
調査地点



底生生物の計数のために撮影された動画画像

モニタリング期間：2012年4月～現在
調査地点数：3～5地点
調査頻度：1～2か月ごと
DO（溶存酸素）、水温、クロロフィルの測定：
JFEアドバンテック社製 AAQ
多項目水質プロファイラーを使用
貧酸素の評価：
滋賀県協同観測データに基づく

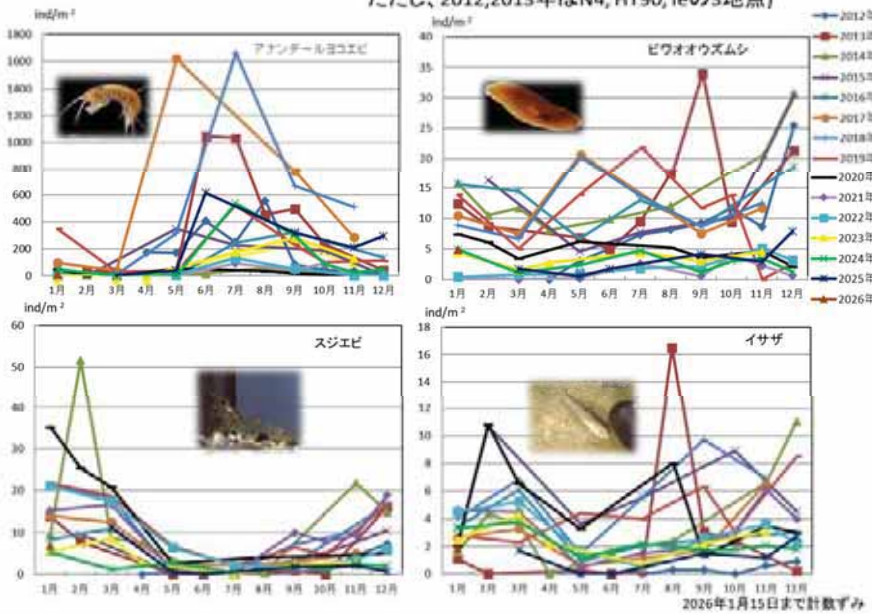
ROV を用いて計数した深湖底の生物



環境省レッドリスト種

底生生物の生活史における深湖底を生息場とする時期

ROVによる底生生物定期モニタリング (N4, HY90, N6, 1e, Wani50の5地点平均値
ただし、2012, 2013年はN4, HY90, 1eの3地点)



当初は貧酸素で死亡しなければ影響ないと考えていた。

水深90mにおける底層DO

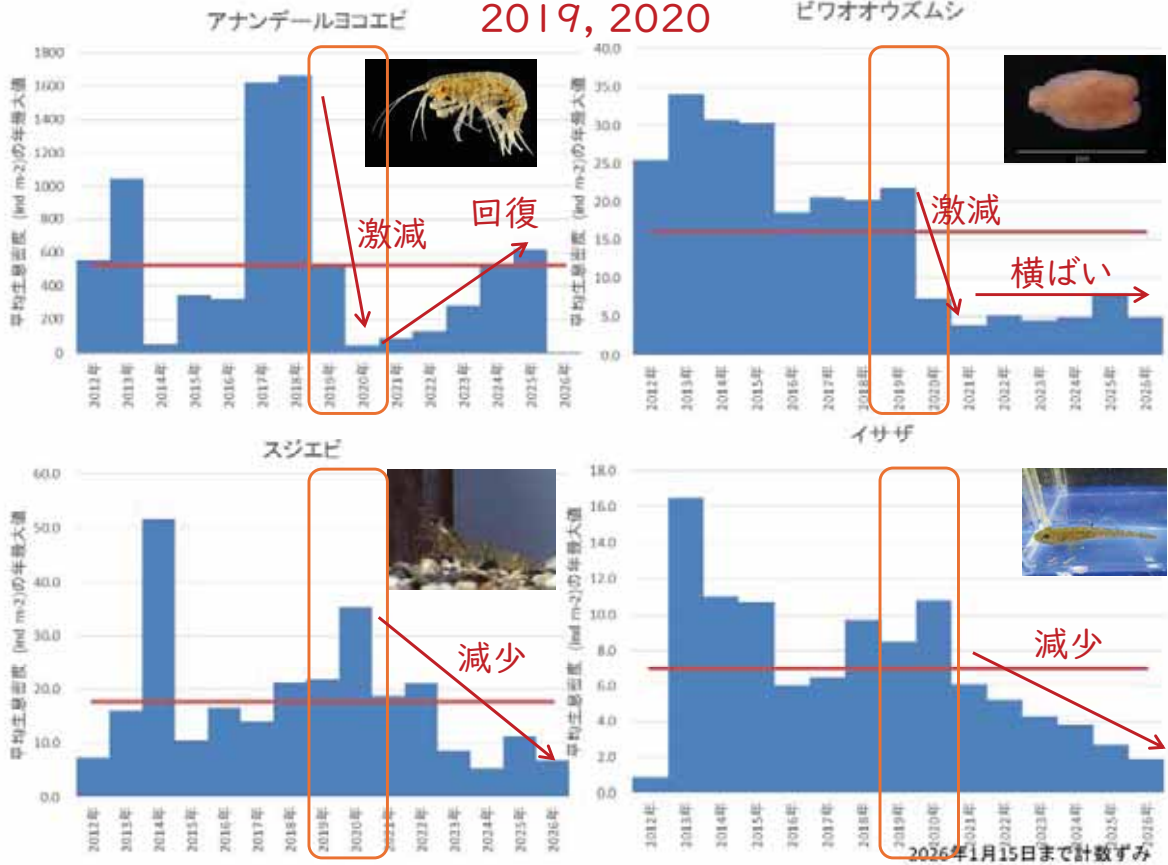


環境監視部門
貧酸素になりやすい時期

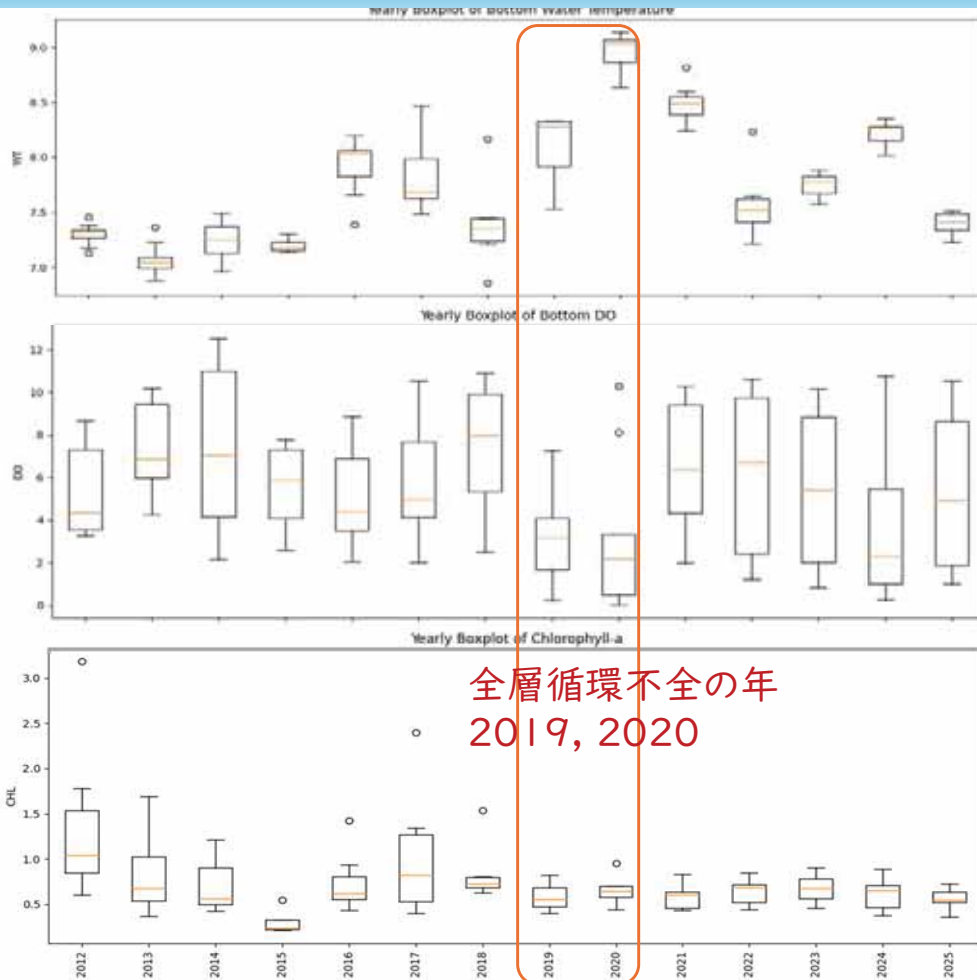
	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月
ヨコエビ	プランクトン			← プランクトン →								
ウズムシ	← →											
スジエビ	← →			沿岸で産卵			ゆっくりと沖へ			← →		
イサザ	← →											
							沿岸で産卵					

底生生物の定期観測（平均生息密度の年最大値）

全層循環不全の年
2019, 2020



Boxplot で見る底層水温・底層DO・鉛直平均CHL-a



全層循環不全の年
2019, 2020

底層水温
水深90m
N4

底層DO
水深90m
N4

鉛直平均
CHL-a
水深90m
N4

長期的な群集構造の変化と環境要因の関係

季節変動を除去した「長期環境変動 × 群集構造変化」の定量評価

本研究の底生生物・環境データの特徴

- ・長期温暖化トレンドの進行
- ・底層DOの非線形低下と閾値挙動
- ・生物群集の時間遅れ応答・段階的变化
- ・強い自己相関を持つ連続時系列データ

解析手順

前処理

データの欠損値を線形補間し、月ごとの時系列連続データにする。

季節性の除去と長期成分抽出

PythonによるSTL(Seasonal and Trend decomposition using Loess)分解で、季節成分+残差を除去し、長期成分(トレンド)のみを抽出する。

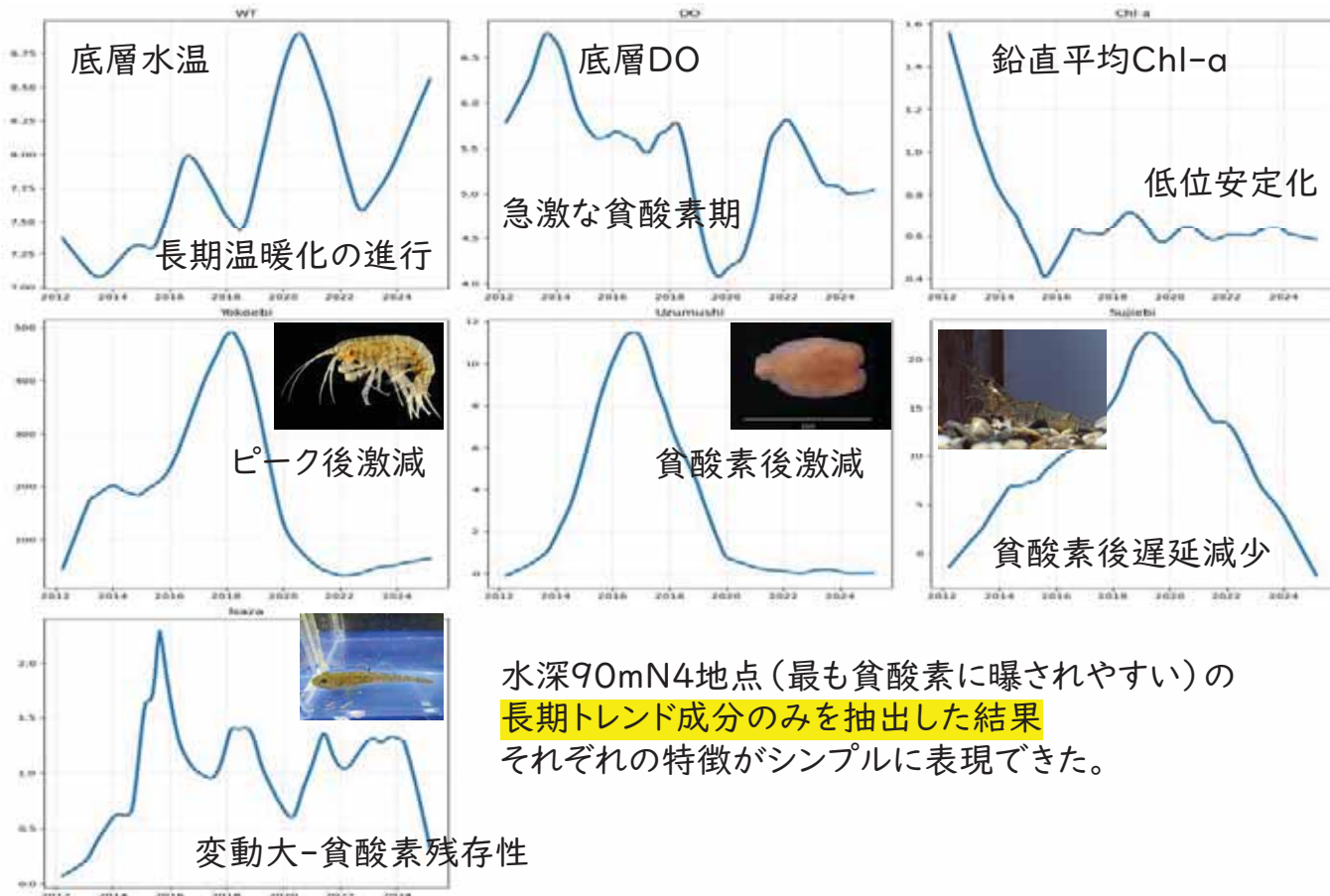
多変量解析

トレンド成分を標準化後、動的主成分分析(D-PCA)、群集構造の一元化。

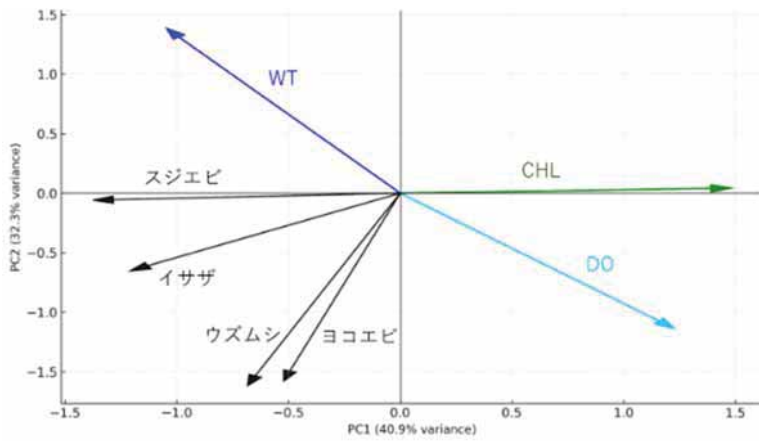
変化点の検出

PCI に対する piecewise linear regression による変化点検出

長期的な群集構造の変化と環境要因の関係

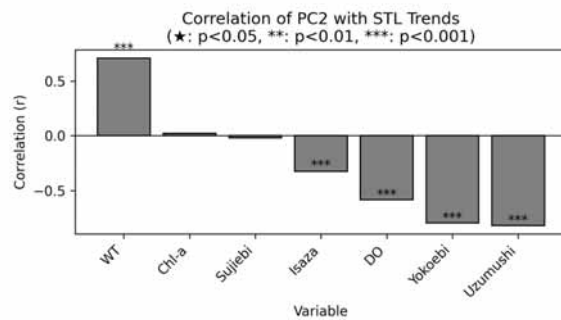
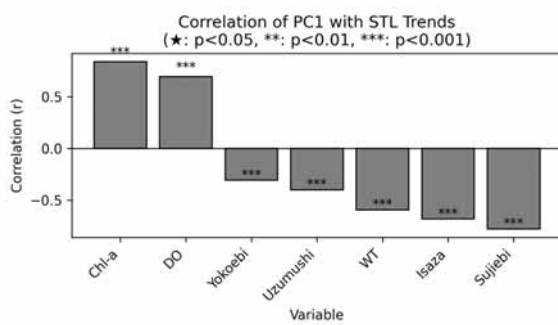


長期的な群集構造の変化と環境要因の関係

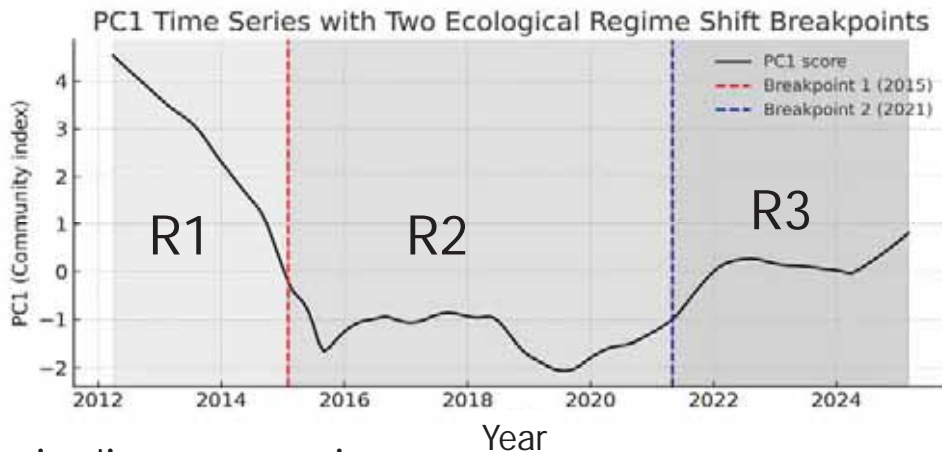


- ◆ PC1: 長期的な共通変動を示す軸 温暖化・貧酸素化による群集全体減少
- ◆ PC2: 冷水性種の温度感受性と耐性種との応答タイミング差が表現された。
- ◆ 累積寄与率: 73%

環境要因と底生生物トレンドの Dynamic PCAバイプロット



長期的な群集構造の変化と環境要因の関係

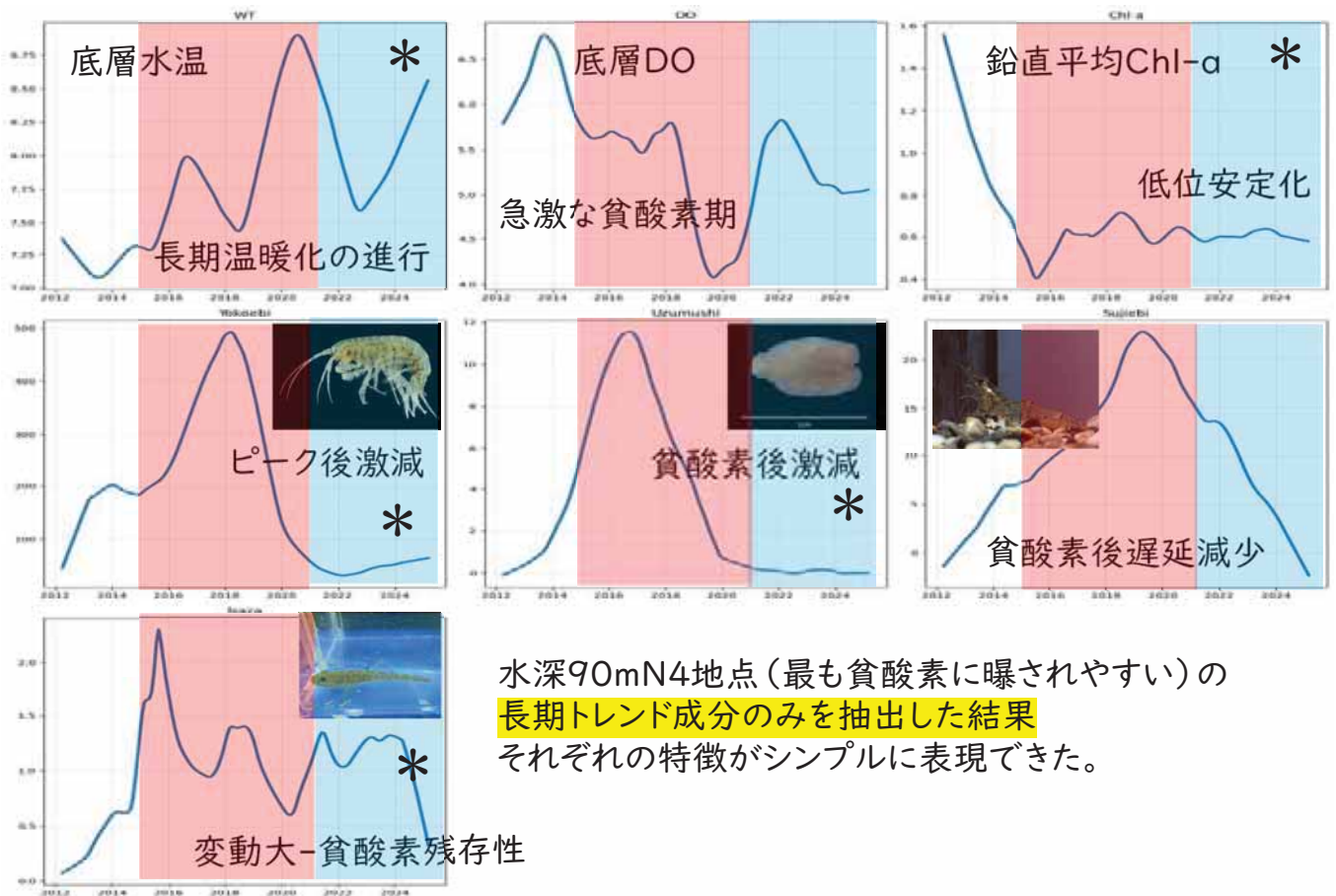


Python: piecewise linear regression
 (区分線形回帰により変化点を見つけて、3つのレジームに区分)

各レジームの平均値とANOVA (3レジーム比較) での有意性(p値<0.05)*

変数	p値	R1	R2	R3	
PC1 *	3.8×10^{-62}	2.73	-1.28	0.07	群集構造が3レジームで異なる。
WT () *	4.7×10^{-12}	7.20	7.95	7.93	水温が段階的に上昇
DO (mg/L)	0.207	6.56	5.44	5.64	レジーム間での差は小さい(年変動大)
ヨコエビ*	0.0018	232.8	341.3	80.2	R3で激減
ウズムシ*	3.8×10^{-14}	1.71	7.16	0.085	R2が最大、R3で激減
スジエビ	0.066	14.1	16.1	7.61	増減あるが有意でない
イサザ*	0.016	0.95	2.23	1.37	R2で増加傾向

長期的な群集構造の変化と環境要因の関係



長期的な群集構造の変化と環境要因の関係

長期群集構造変化のまとめ

- 深湖底では **急速な温暖化**(+1.1 /13年) が進行
- 群集構造は **2015年・2021年の2段階でレジーム転換**
- 冷水・好酸素性の代表種(ヨコエビ, ウズムシ)が顕著に減少
- 温暖耐性種(スジエビ, イサザ)は R2 (2015-2021) で一時的増加
- 温暖化と DO 低下は深湖底生態系の構造を大きく変化させる

環境要因によって駆動される底生生物との関係解析

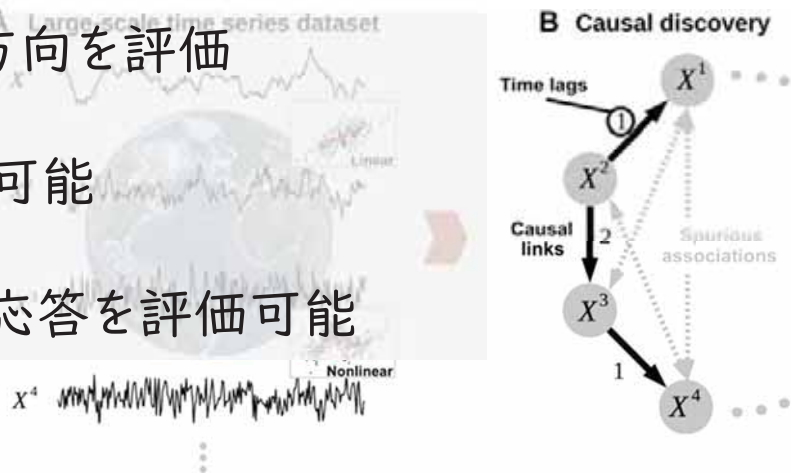
湖沼環境では、水温上昇、底層DO低下、生物群集の減少が同時に進行する。しかし、「本当に環境変化が生物を減少させているのか？」といった因果関係を確認するには、**単なる相関分析では不十分である。**

時系列データセットの因果推論 <https://py-palette.jp/tigra-inst/> 因果探索

✓ 相関ではなく因果方向を評価

✓ 非線形応答を検出可能

✓ 遅れを含む生態系応答を評価可能



■ CCM (Convergent Cross Mapping) は、非線形生態系において「環境が生物を駆動しているか」を長期時系列から直接検証できる因果解析手法である。

Sugihara et al. 2012

Sugihara G, May R, Ye H, Hsieh CH, Deyle E, Fogarty M, Munch S (2012) Detecting causality in complex ecosystems. Science, 338: 496-500. [https://doi.org/10.1016/s1474-6670\(17\)65050-x](https://doi.org/10.1016/s1474-6670(17)65050-x)

環境要因によって駆動される底生生物との関係解析

解析手順

前処理

データの欠損値を線形補間し、月ごとの時系列連続データにする。

季節性の除去

PythonによるSTL(Seasonal and Trend decomposition using Loess)分解で、季節成分のみを除去し、トレンド+残差を抽出する。

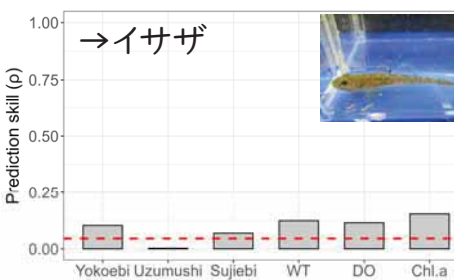
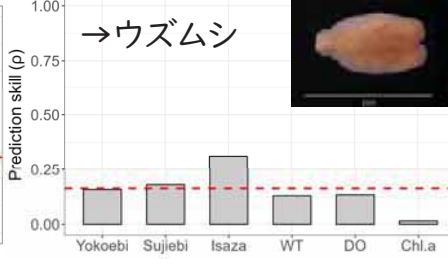
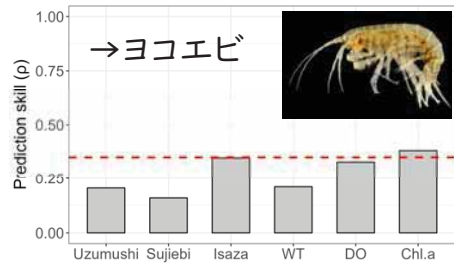
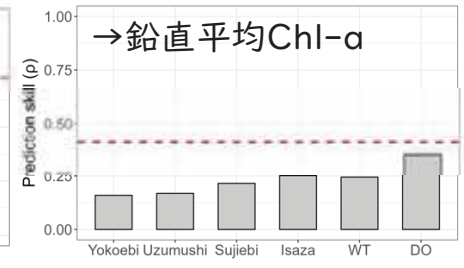
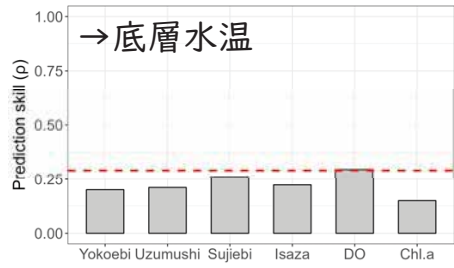
CCM

RのパッケージtEDM (Temporal Empirical Dynamic Modeling) におけるConvergent Cross Mapping (CCM)による解析

非線形力学系における因果関係の同定 (変数間の因果方向とその強さの推定)

Prediction skill (ρ) ロー: どちらが原因か、時間差 (Lag) をつけて確認することで、因果の方向性を確実にする。データ数を増やしたときに、prediction skill (ρ) が上昇し、一定の値に収束する場合、真の因果関係である可能性が高い。

CCMのPrediction skill で推察する因果関係



イサザ ウズムシ

ρ がSurrogate (Sinカーブ)を大きく上回る
強い一方向性【因果の非対称性が明瞭】

Chl-a ヨコエビに有意

一次生産変動 → 餌資源・酸素環境を介した間接効果

CCMのPrediction skill で推察する因果関係

長期的因果関係解析の結果 まとめ

A. 生物間相互作用:イサザ→ウズムシ
理由は?

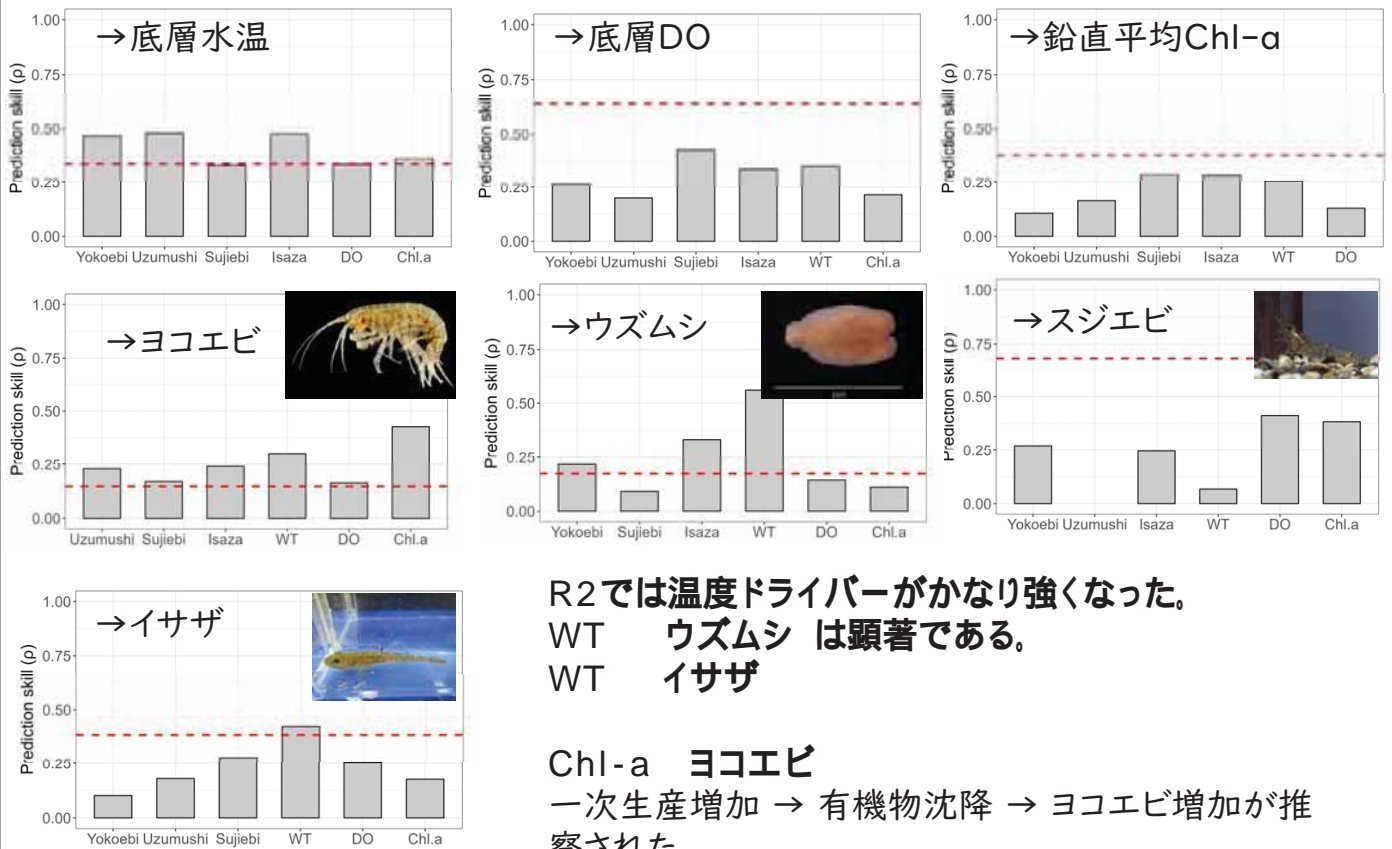
A. 生産系:Chl-a→ヨコエビ

ヨコエビは「一次生産(有機物供給)側の変動」に反応している
可能性が推察

C.WT・DOとの因果関係は明瞭でない

→短期イベントによる影響 期間を区切った解析等が相応しい?

期間R2のCCMのPrediction skill で推察する因果関係



R2では温度ドライバーがかなり強くなった。
 WT ウズムシ は顕著である。
 WT イサザ

Chl-a ヨコエビ
 一次生産増加 → 有機物沈降 → ヨコエビ増加が推察された。

CCMのPrediction skill で推察する因果関係

因果関係解析の結果 まとめ

A. 生物間相互作用: イサザ → ウズムシ

B. 生産系: Chl-a → ヨコエビ

ヨコエビは「一次生産(有機物供給)側の変動」に反応している可能性が推察

C. WT・DOとの因果関係は限定的

→ 短期イベントによる影響 期間を区切った解析など

D. 期間をR2のみに区切って解析すると、温度ドライバーが効いていることが明瞭となった。

今年度のまとめと次年度の計画

今年度のまとめ(長期変化と因果解析)

本研究では、モデル解析により生データでは見えない関係性を解明しようと試みた。

琵琶湖深湖底では急速な温暖化(+1.1°C/13年)に伴い、2015年と2021年の2段階で底生生物群集のレジーム転換が生じた。

CCM解析では イサザ→ウズムシ、Chl-a→ヨコエビ の関係が検出され、R2期間(2015-2021)の解析では水温が主要ドライバーとして群集変化を促したことが示された。

2年目の展望

(1) 長期データの高度解析

当センター蓄積データ 底生生物、水温(WT)、DOクロロフィルa、栄養塩、底質→因果構造・応答閾値の抽出(CCM・時系列解析・閾値解析等)

VARモデル・インパルス応答等

(2) 外部データとの統合検証(2年目)

- 琵琶湖河川事務所の長期底生生物データを統合
- 解釈の再現性・整合性の検証

学会発表・資料提供・招待講演等

- 石川可奈子・井上栄壮・焦春萌 琵琶湖深湖底の温暖化・貧酸素化が底生生物群集に及ぼす長期影響の解析 日本水環境学会 2026年3月 中央大学
- 石川可奈子・井上栄壮・蔡吉・焦春萌 CCMを用いた琵琶湖深湖底の底生動物動態と環境変動の因果解析 日本水産学会春季大会 2026年3月 東京海洋大学
- 県政資料提供 2025年9月13日 琵琶湖北湖第一湖盆(水深約90m)において
- 貧酸素状態が確認されました 琵琶湖保全再生課 寺内、赤崎 琵琶湖環境科学研究センター 海東、小笠原、石川
- 県政資料提供 2026年2月13日 琵琶湖北湖において全層循環の完了を確認 琵琶湖保全再生課 寺内、赤崎 琵琶湖環境科学研究センター 海東、石川
- 石川可奈子, 井上栄壮, 蔡吉, 芳賀裕樹. (2025). 琵琶湖沿岸の自然再生・修復と生態系の現状評価. 用水と廃水, 67(10), 722-729
- 大塚泰介・根来 健・瀬 諭・石川可奈子・辻 彰洋 (2025) 琵琶湖のプランクトンの長期変動—なぜ富栄養化が止まっても有害藻類ブルームが発生し続けるのか? 特集—琵琶湖における環境変動と漁業生産の変化:瀬戸内海と比較して考える— 月刊海洋 2025年6月号 57号
- Yan, N, T. Mukai, K. Sawada, K. Hashimoto, K. Ishikawa (2025) Acoustic characteristics of *Jesogammarus annandalei* in Lake Biwa Journal of Sea Research <https://doi.org/10.1016/j.seares.2025.102566>

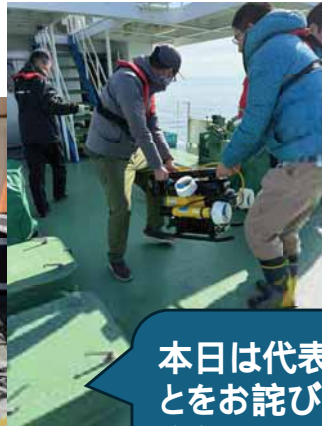
招待講演

- Monitoring Ecosystem Change to Build Sustainable Lakescapes—Case Studies from Lake Biwa, Japan and Lake Tana, Ethiopia— 国際湖沼環境委員会(ILEC)ウェビナー 2025年6月23日 オンライン
- 琵琶湖における水の管理、水質改善と生態系の変化 2025年8月13日 中国浙江省淡水水産研究所
- 石川可奈子 『琵琶湖の生態系はどう変わったか - 企業と地域が支える生態系の未来 -』 滋賀グリーン活動ネットワーク CSR研究会 2026年2月10日 大津 コラボしが

ご清聴ありがとうございました。

研究メンバー

石川可奈子・井上栄壮・蔡吉・焦春萌・市木博哉・岡本高弘・小笠原翔



本日は代表者が出席できず、代理での発表となりましたこと
をお詫び申し上げます。
今後もメンバー一同、研究の推進に努めてまいりますので、
引き続きご指導・ご支援のほどよろしくお願い申し上げます。