

近年の温暖化が 琵琶湖北湖の溶存メタン動態 に与える影響の解明研究

京大大学生態学研究センター

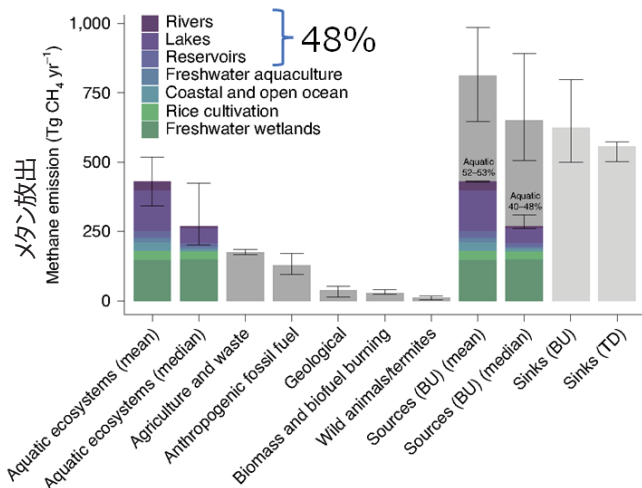
池谷 透（立命館大学理工学部）

0 本年度の成果報告

- 底層の溶存メタンの国内湖沼間比較
（琵琶湖のメタン動態の特徴）
- 深層溶存メタン動態の変動要因の検討
（深層における変動の内部要因・外部要因）
- 琵琶湖のメタン動態形成要因に関する課題

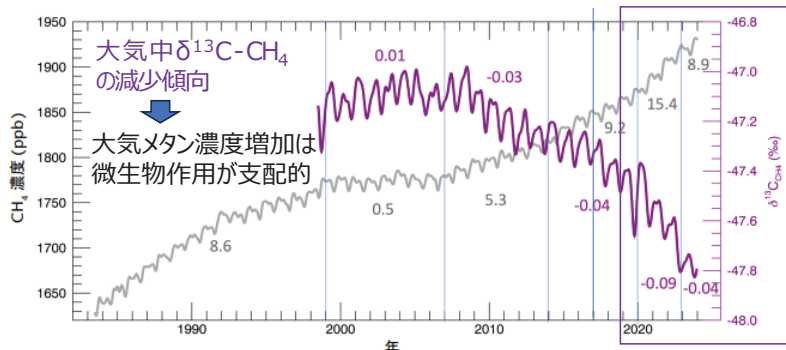
1 水域の温暖化と貧酸素化; 溶存メタン動態への影響

水域からのメタン放出の全球見積り



Rosentreter et al. (2021)

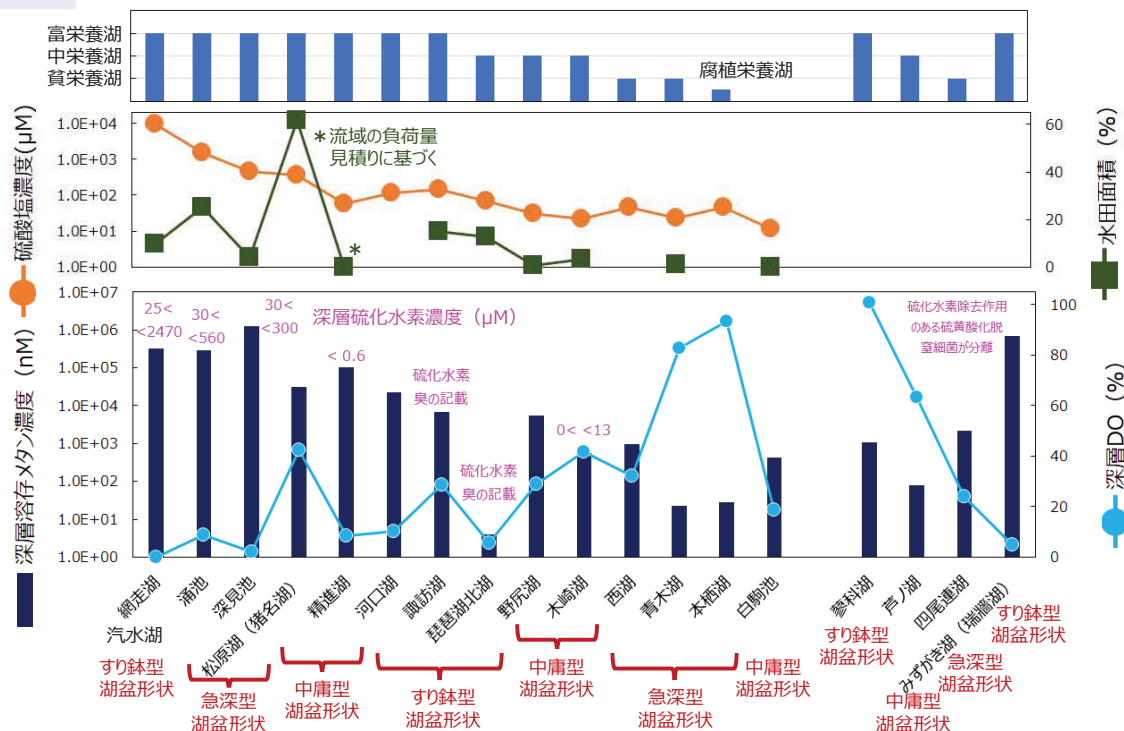
全球平均メタン濃度とメタン炭素同位体比 ($\delta^{13}\text{C}-\text{CH}_4$)



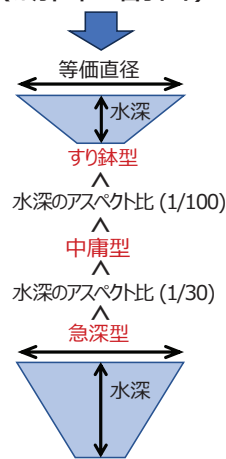
水域の温暖化と貧酸素化の影響 (気象庁2024)
富栄養化による水域の有機物蓄積

➡ メタン動態の理解が重要
(有機物の最終分解産物)

2 国内湖沼の溶存メタンに関する報告 (本研究を含む)

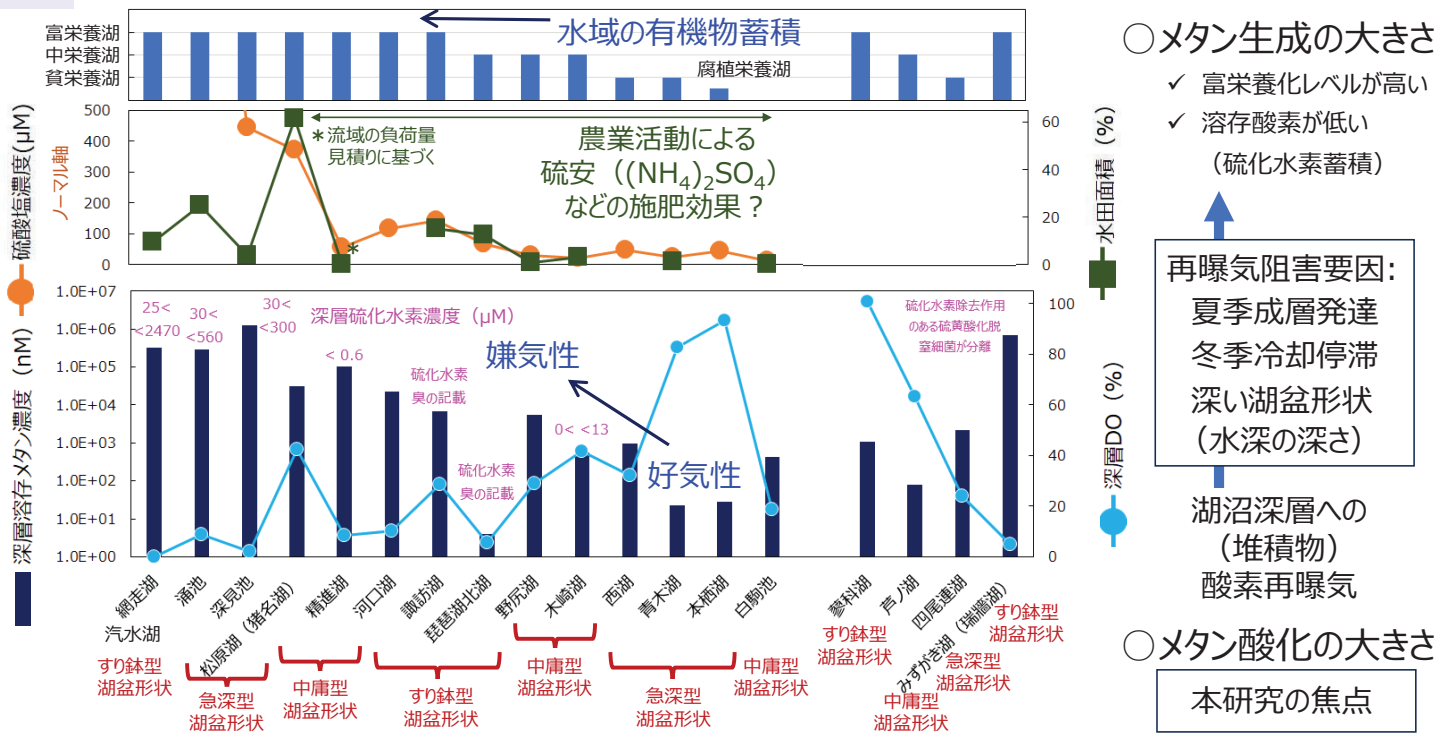


大気の影響
(湖面の割合)

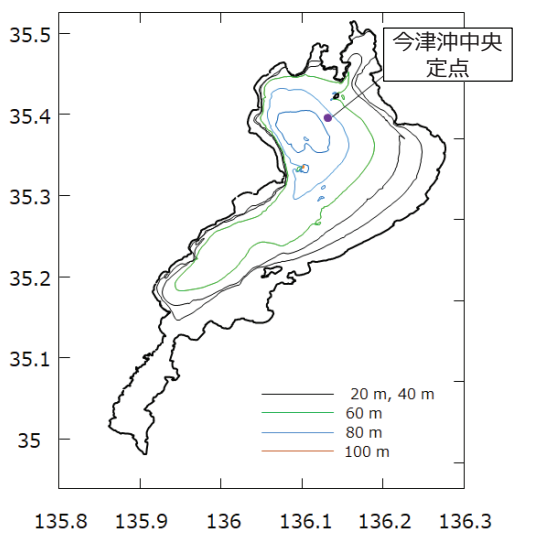


堆積物の影響
(斜面の割合)

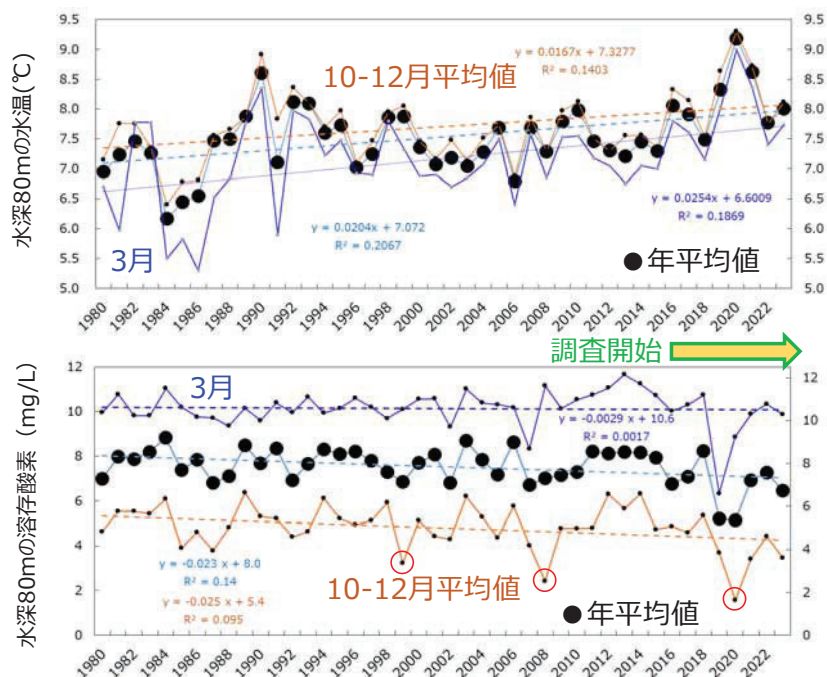
3 国内湖沼の溶存メタンに関する報告（本研究を含む）



4 琵琶湖北湖（今津沖中央水深80m）の長期観測データ

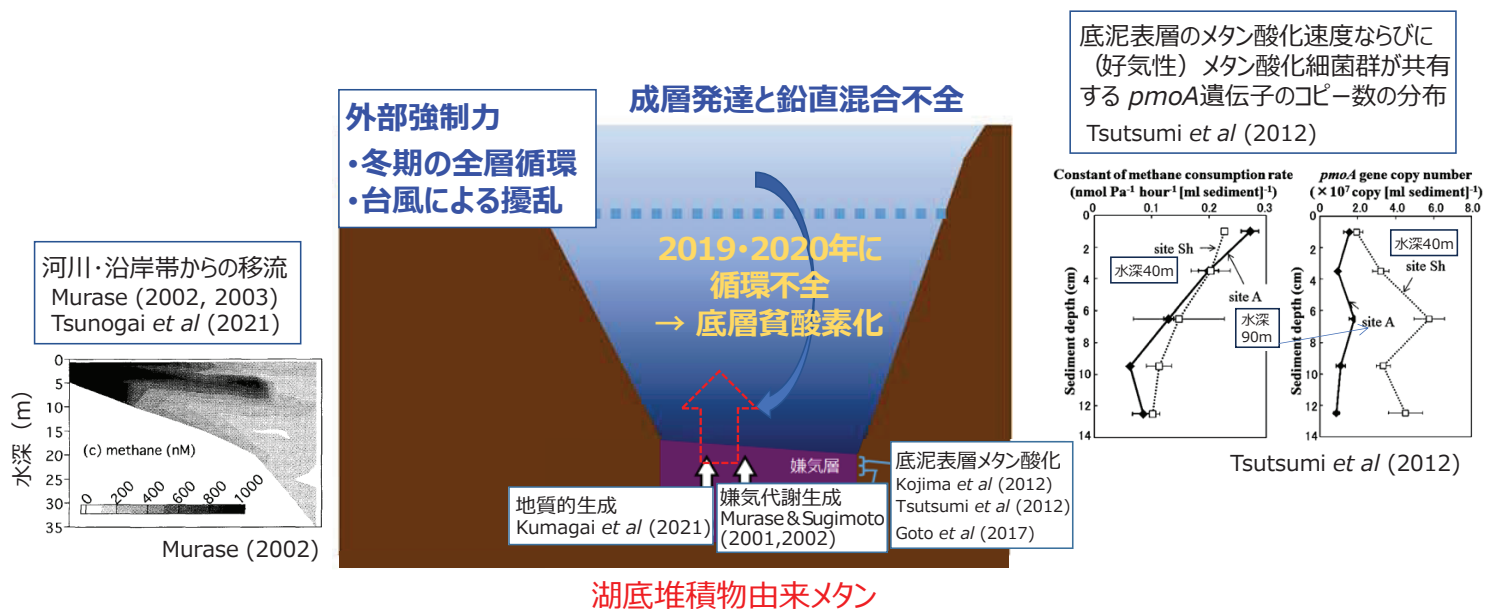


『滋賀県琵琶湖環境科学研究所』データから作成



5 琵琶湖のメタン鉛直分布と経年変動

琵琶湖のメタン代謝に関わる先行知見と温暖化による冬季冷却弱化の影響



6 調査地点 (2016~2024年)



北湖

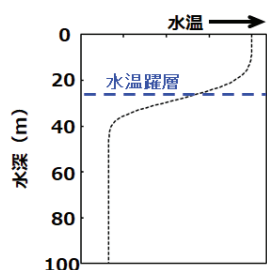
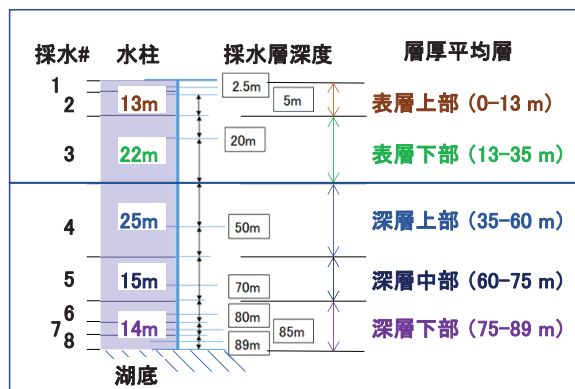
2016年: 北湖第一湖盆最深点 (水深約104 m) 12月
2017~2024年: 今津沖中央 (水深約89 m) 10~12月
2023~2024年: T1 (水深約90 m) 通年季節調査
2024年: 日野川沖 (水深約30 m) 12月
2024年: 愛知川沖 (水深約30 m) 12月
2024年: 天野川沖 (水深約29 m) 12月
2024年: 姉川沖 (水深約30 m) 12月
2024年: 安曇川沖 (水深約26 m) 12月
2024年: 野洲川沖 (水深約36 m) 12月

流入河川

2023年: 日野川沖河口 12月
2023年: 長命寺川河口 12月
2023年: 愛知川河口 12月
2023年: 姉川河口 12月
2023年: 安曇川河口 12月
2023年: 野洲川河口 12月

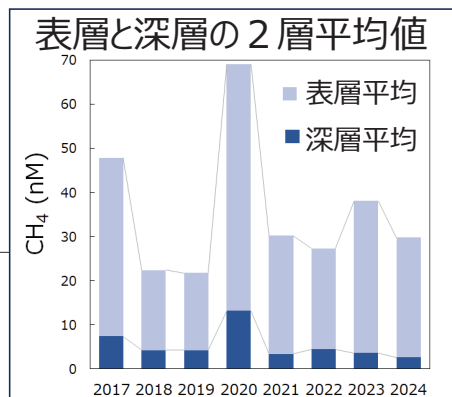
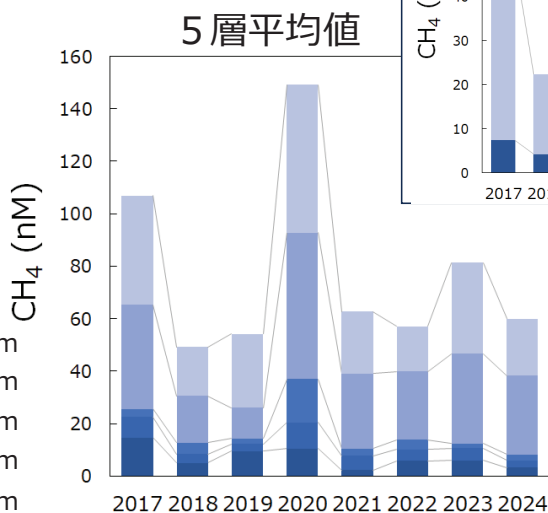
7 琵琶湖の溶存メタン濃度分布（京大生存圏研 伊藤雅之博士）

層厚平均メタン濃度の経年変動（今津沖中央）

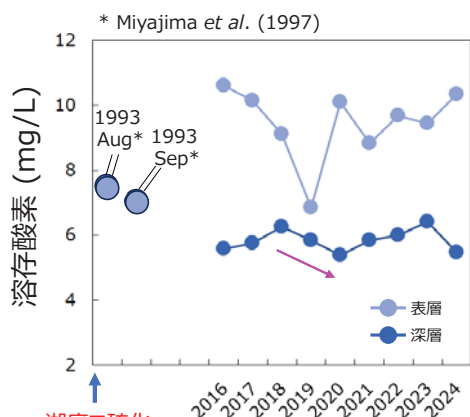


CH₄ (nM)

0 - 13 m
13 - 35 m
35 - 60 m
60 - 75 m
75 - 89 m

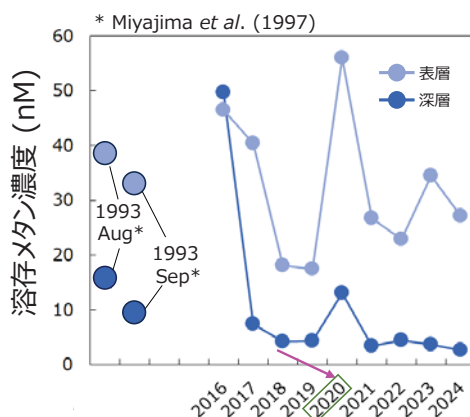


8 晩秋期の表層と深層における年々変動（2016-2024年）

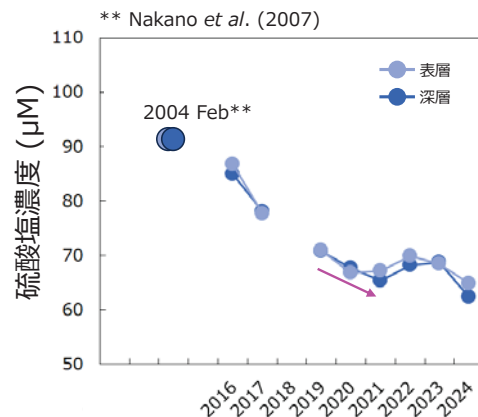


湖底で硫化水素臭が指摘

琵琶湖北湖湖底でイオウ酸化細菌 (*Thioploca* spp.) 発見 (Nishino et al., 1998)



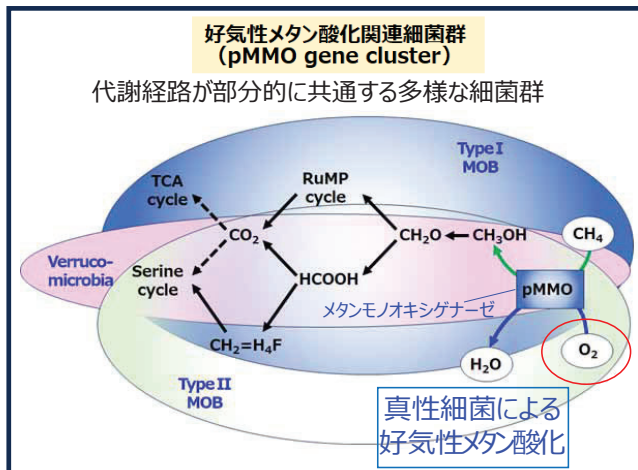
☆ 溶存メタン濃度は表層と深層で同期して変動？



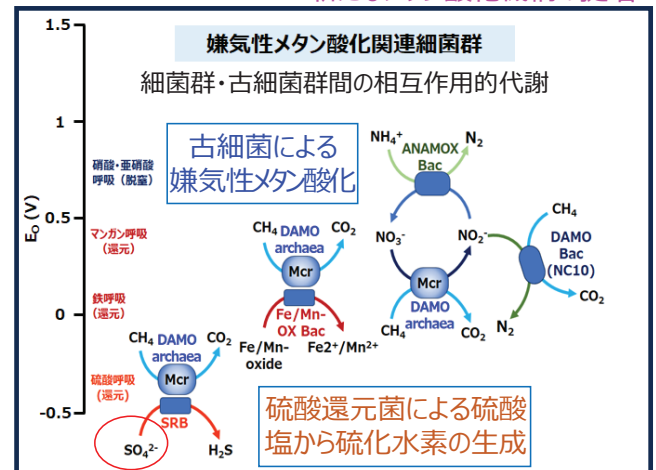
9 メタン生成と酸化に関わる細菌群の作用 (深層溶存メタンの内部変動要因)

好氣的（微好氣的）条件		貧酸素化
メタン生成	阻害	促進
メタン酸化	好気性酸化	嫌気性酸化

Tavormina et al. (2011); Chistoserdova (2011)

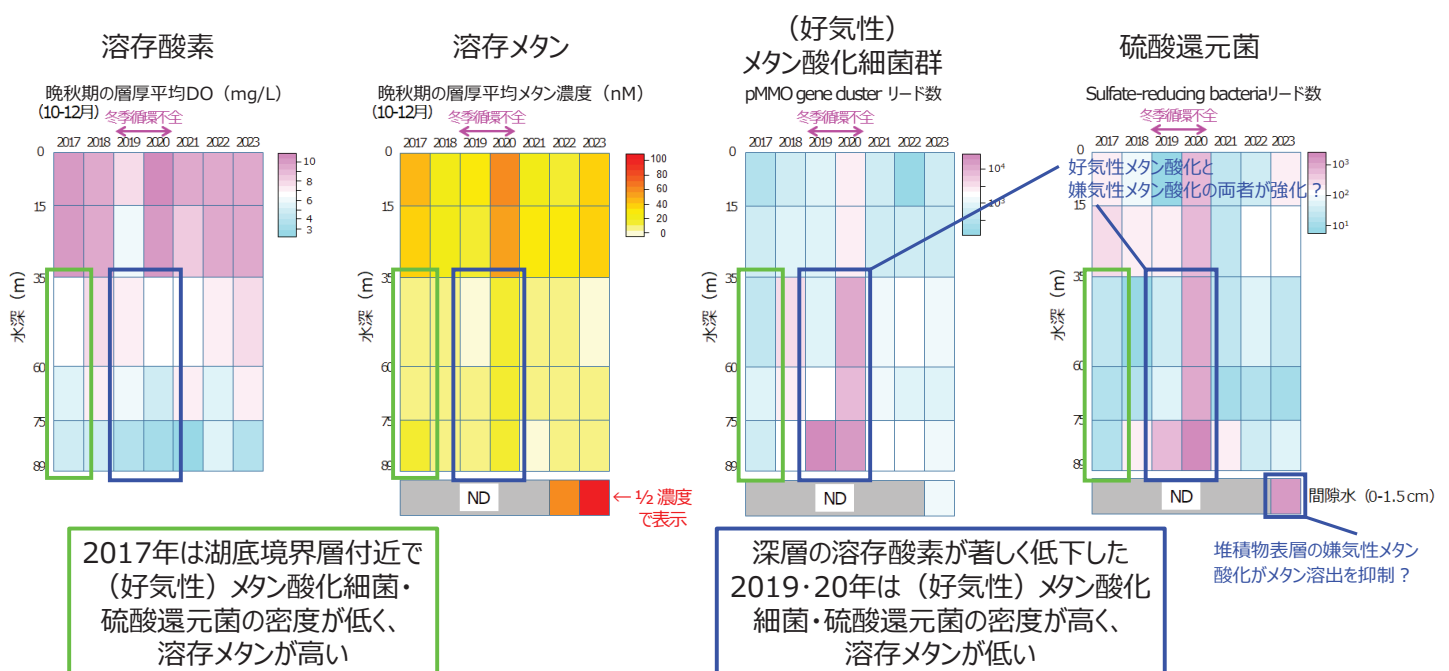


硫酸塩・硝酸塩を電子受容体としてメタンを酸化
(Cui et al. 2015) **新たなメタン酸化機構の提唱**



10 溶存酸素・溶存メタン・細菌群の年々変動 (北湖：今津沖中央)

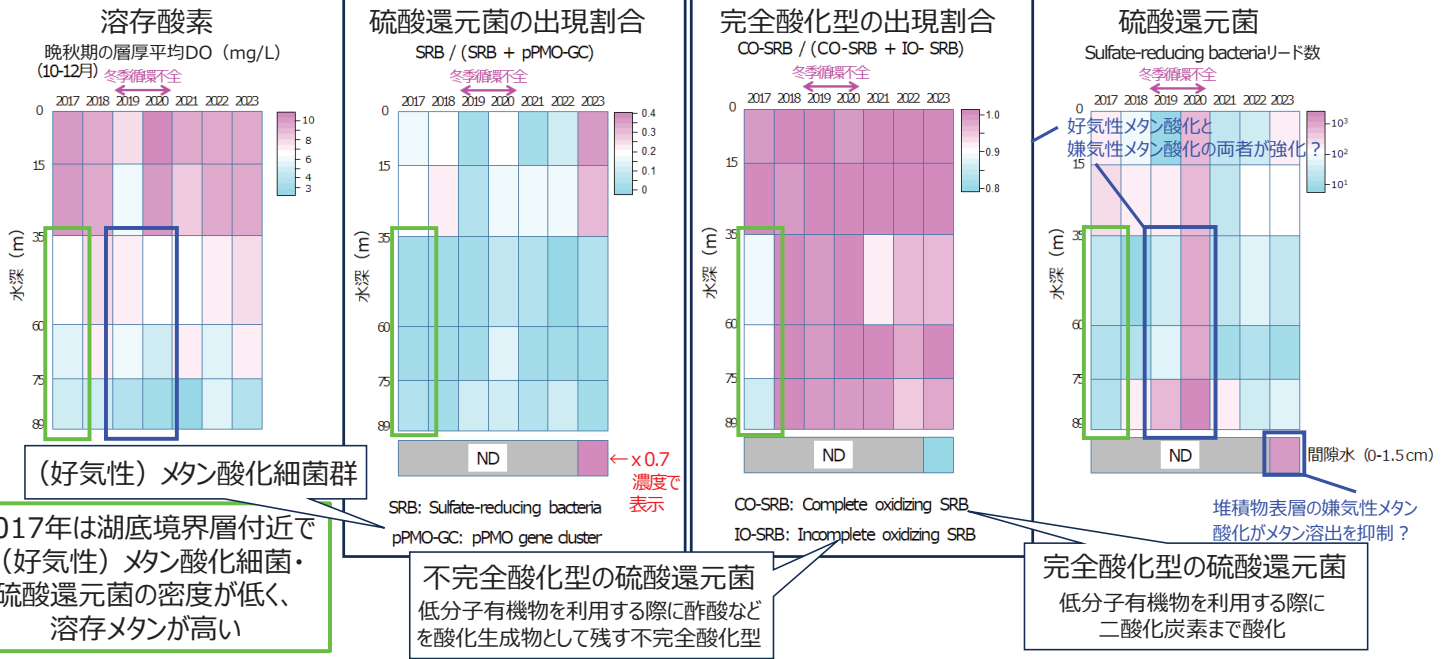
深層溶存メタンの内部変動要因



11 メタン酸化細菌群の検出状況

深層溶存メタンの外部変動要因

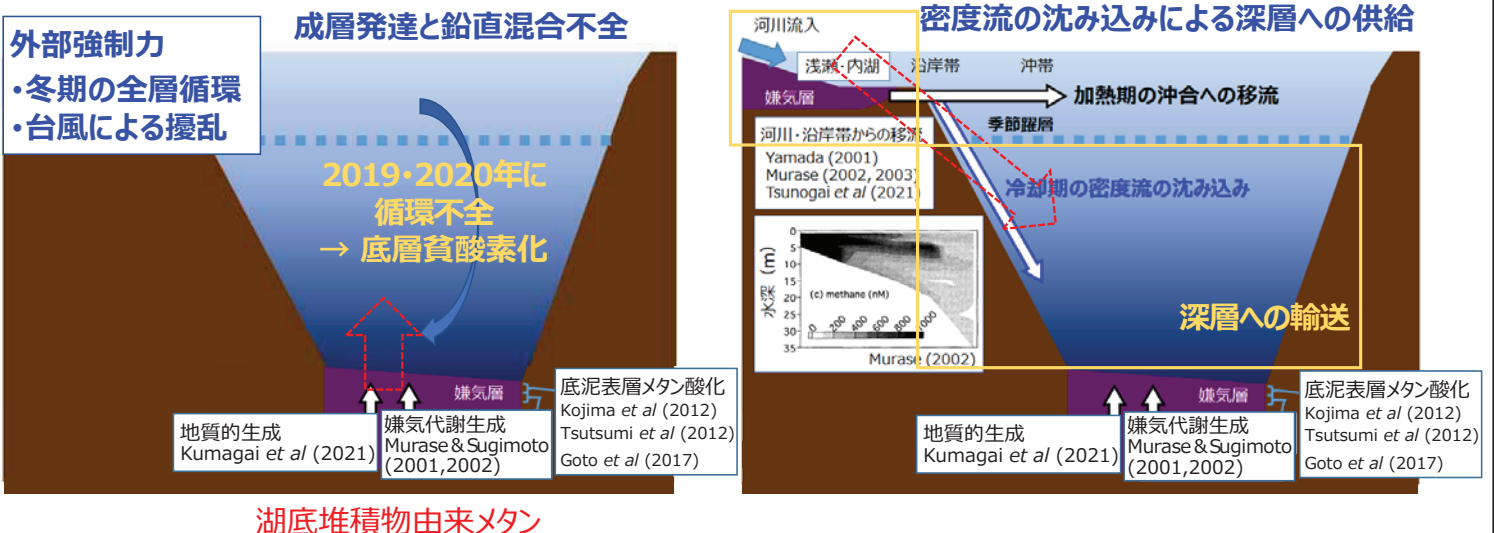
2017年は深層の硫酸還元菌密度が低下し、完全酸化型より不完全酸化型が多い（堆積物間隙水に類似）



12 メタン鉛直分布と経年変動と温暖化影響

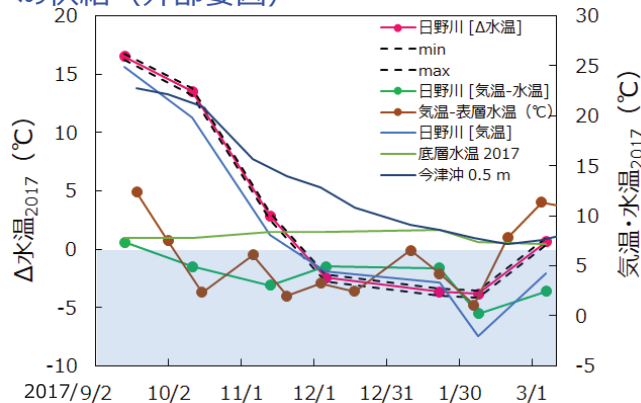
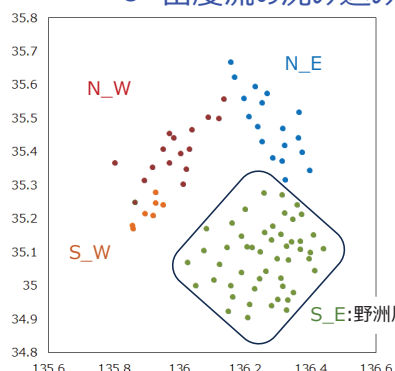
- 貧酸素化と有機物分解 & 細菌捕食・食物網への転流（内部要因）
- 密度流の沈み込みによる表層から深層への供給（外部要因）

外部強制力
・気温・河川水温
・降水量



13 2017年の降水量と季節躍層以深への沈降の検証

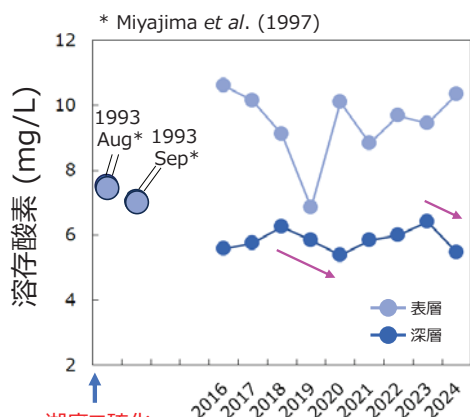
● 密度流の沈み込みによる表層から深層への供給（外部要因）



10-12月積算降水量(mm)	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023
S_W	2874	2961	3555	4464	1786	3144	2264	1668	1932	2160
S_E	20214	14534	14329	31463	9595	21969	17683	12944	11282	11595
N_W	8554	6444	6783	11677	5363	7313	8042	5018	5162	8252
N_E	9808	6874	7759	13874	6434	7636	9664	4892	6257	11949

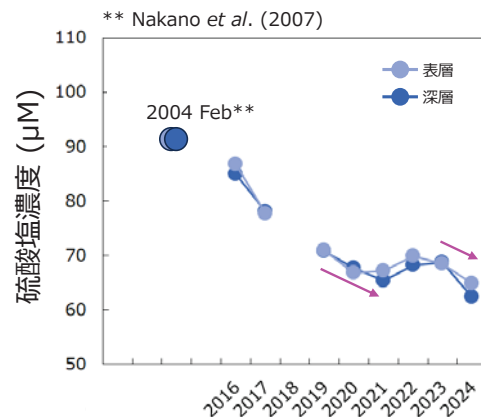
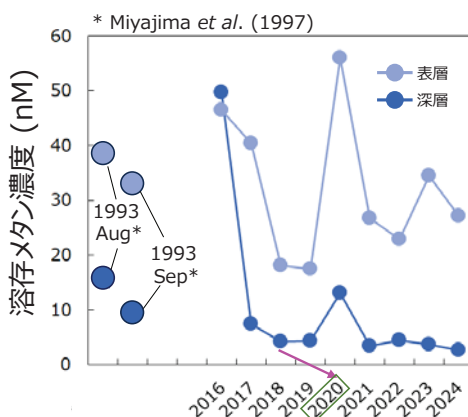
北湖+南湖 (%総降水量)	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023
10月積算降水量(mm)	5	1.1	3	13	2	8	6	1.4	2	5
11月積算降水量(mm)	2	4	2	2	1.4	1.1	2	3	2	3
12月積算降水量(mm)	4	4	4	3	4	2	3	3	3	2

14 晩秋期の表層と深層における年々変動（2016-2024年）



湖底で硫化水素臭が指摘

琵琶湖北湖湖底でイオウ酸化細菌（*Thioploca* spp.）発見（Nishino et al., 1998）

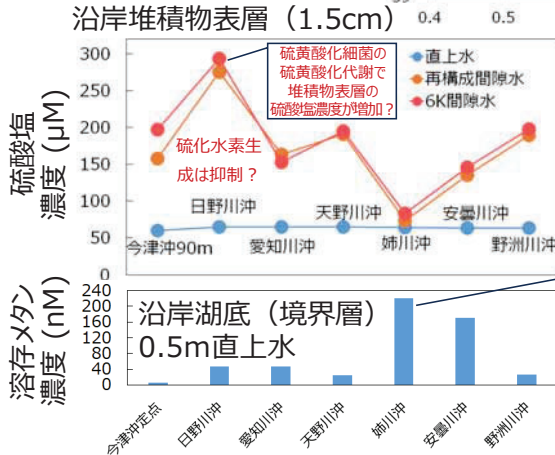
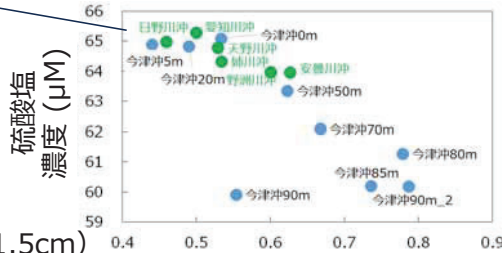


☆湖盆全体がほぼ一方向的減少傾向

15 琵琶湖への硫酸塩流入と硫酸還元（2024年12月）

同位体比を伴った濃度減少と貧酸素化影響・琵琶湖のメタン代謝の特徴との関係（？）

沿岸湖底境界層・沖合表層から沖合深層までの値が、硫黄同位体比の増加を伴った硫酸塩濃度減少傾向を示した

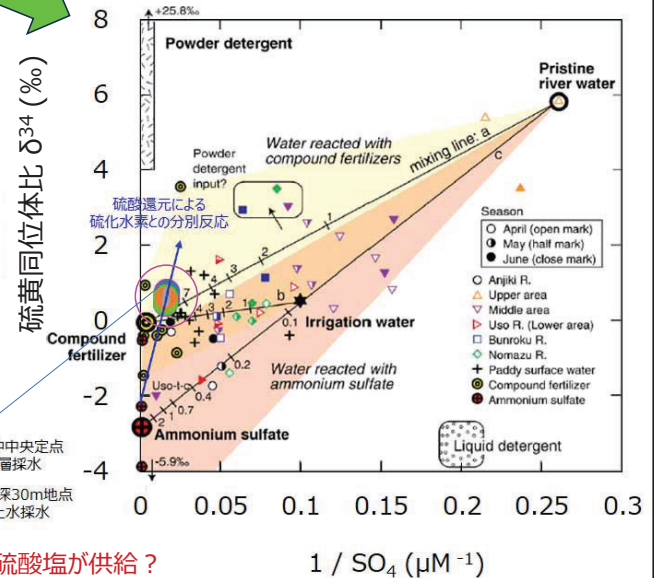


姉川沖では直上水の溶存メタン濃度が最も高く、直上水と間隙水の硫酸塩濃度差が最も小さい；波動や水温変化による擾乱で間隙水成分の浮上・拡散が促進？

沿岸境界層での混合作用 + 密度流

→ 深層に溶存メタン・硫酸塩が供給？

試料分析値群は琵琶湖集水域の肥料と灌漑水由来の混合成分の近くに分布
Hosono et al. (2007)のKeelingプロット



16 まとめと課題

✓ 国内湖沼間比較 –（特に底層）溶存メタン濃度の低さが琵琶湖の特徴

- 富栄養化レベル（溶存有物濃度）が低いことが溶存メタン濃度の一義的要因と考えられる
- 国内最大水深ながら湖盆形状は大気や沿岸堆積物の影響を受けやすいすり鉢状

2000年以降、水温上昇・貧酸素化の影響は強くなっているが、溶存メタン濃度は低い状態が持続 … 大きな謎
集水域の農業活動（硫安などの施肥）から琵琶湖に供給される硫黄・窒素が（嫌気性）メタン酸化容量を上げている？
水温上昇によって沿岸堆積物でも嫌気度が高まり、硫酸還元の影響で湖盆全体の硫酸塩濃度は低下傾向
姉川沖などでは波動や水温変化による擾乱によって堆積物（間隙水成分）の浮上・拡散が促進されている？

✓ 琵琶湖の深層メタン動態の内部変動要因と外部変動要因について

– 2023年までの細菌組成の詳細解析を実施 –

- メタン代謝活性が低い訳ではなく、深層の溶存酸素低下時に（好気性）メタン酸化細菌群と（嫌気性）メタン酸化に関連する硫酸還元菌の増加を確認（2019・2020年）
2000年以降、水温上昇・貧酸素化の影響は強くなっている（内部変動要因-1）
- メタン濃度の年々変動が季節躍層を隔てた表層と深層で同期（2017-2024年）
晩秋期に水温低下によって密度流が沈降？（2017年）（外部変動要因-1）
細菌捕食者によってメタン酸化細菌密度が制御（内部変動要因-2）

17 まとめと課題 – 2

✓ 2019-2020年に沖合湖底境界層でメタン酸化が促進

- メタン生成抑制なのか、（嫌気性）メタン酸化促進なのか？（内部要因形成）
メタン酸化細菌によって硫化水素が蓄積せずに硫酸還元菌が硫酸還元反応でメタン酸化の電子受容体供給持続していることが重要？
- 沿岸堆積物の嫌気状態がメタン動態と水質形成にどのように影響しているか？（外部要因形成）
2023年の沖合表層で硫酸還元菌が増加傾向を示したこととの関係（水温上昇の影響？）
「河川水」・「沿岸堆積物境界層」・「沖合表層」・「沖合深層」までをつなぐ細菌群・硫黄同位体比・溶存メタン共存因子（アルミニウム・キレート複合体？）の分析・検討が必要

✓ 琵琶湖のメタン動態の形成要因に関する課題

- 姉川沖で確認された沿岸堆積物からの拡散促進のメカニズム（湖盆形状/水温擾乱）？
- 琵琶湖水温上昇の将来予測と晩秋期の密度流形成量の関係についての検討
- メタン酸化細菌の捕食によって高次栄養段階に炭素がどの程度転送されている？
（バルク炭素同位体比による栄養段階解析を予定）
- 沖合底層からの拡散と密度流沈降によって沿岸底層から深層に流入する溶存メタンの行方の検討