

2023年度 修士研究最終発表

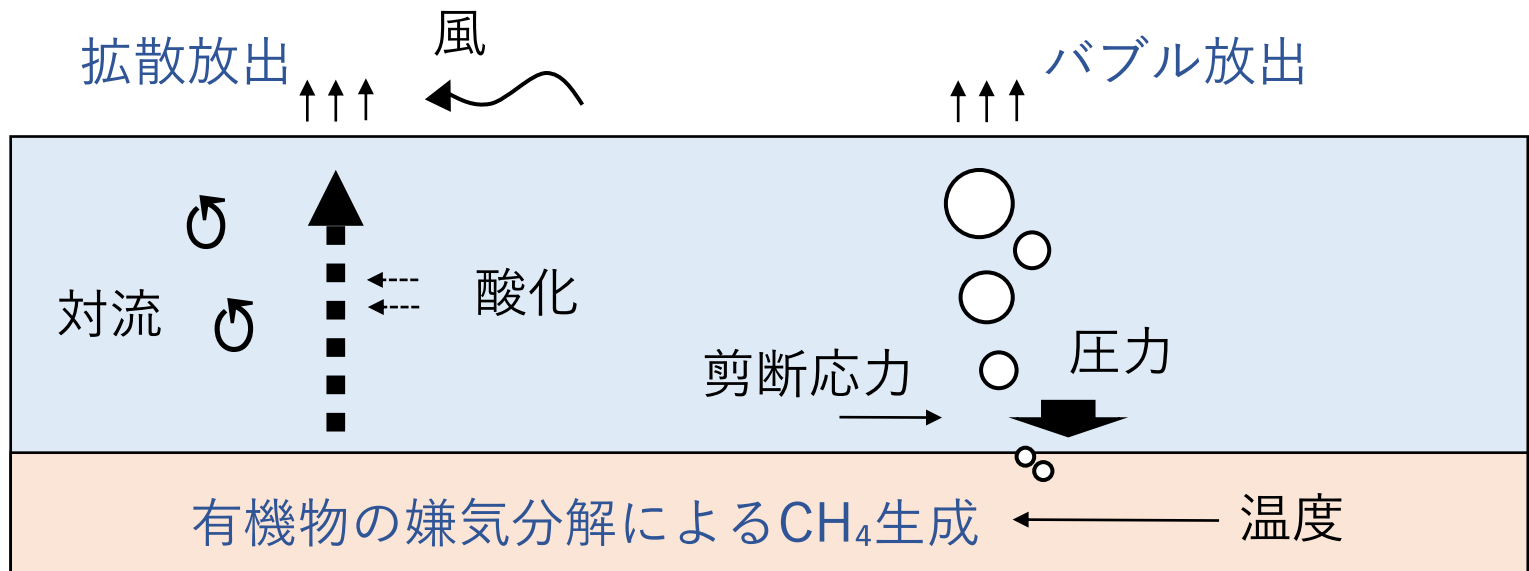
浅い富栄養湖からのメタン放出の長期変動： 温度と有機物供給の影響

22SS612F 山田基



はじめに

- 湖は重要な温室効果ガスであるメタン（ CH_4 ）の主要な放出源
(Bastviken et al., 2011; IPCC, 2013)
- 湖からの CH_4 放出の変動とその制御要因の解明は、気候変動を予測する上で重要
- 時間～季節スケールでの放出の制御要因
(Duc et al., 2010; Taoka et al., 2020; Wik et al., 2013)



はじめに

■ 長期スケールでの放出の制御要因

実験室実験・水槽実験（条件をコントロール・操作）や
短期間の観測，空間的変動の違いを基に指摘

- ・ 温暖化：CH₄生成速度の増加 → 放出の増加 (Duc et al., 2010)
- ・ 湖の富栄養化：有機物の供給増加 → 放出の増加 (Megonigal et al., 2004)
- ・ 水生植物の大量繁茂：枯れ葉や根からの有機物供給の増加 → 放出の増加
酸素放出によるCH₄酸化 → 放出の低下
(Zhang et al., 2019; Kosten et al., 2016)

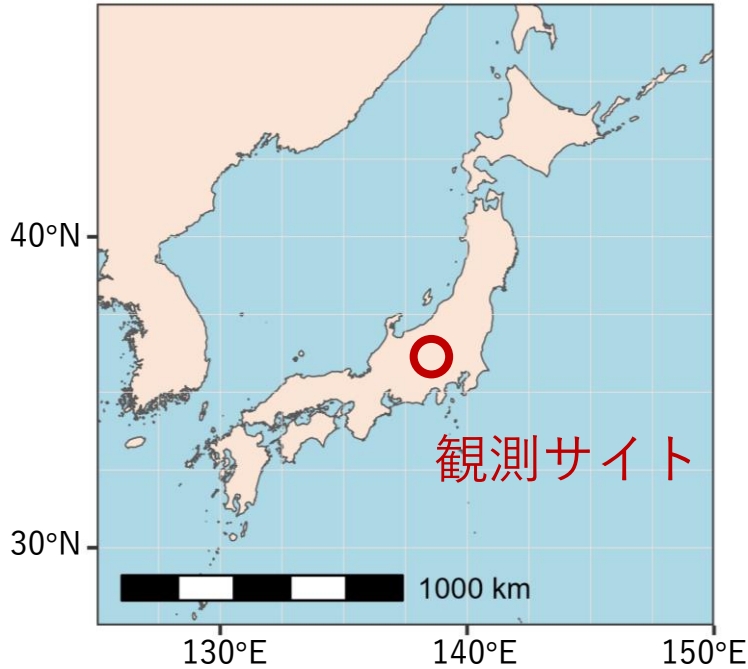


実際の湖（様々な要因が作用し合う環境）での長期変動は？

本研究の目的

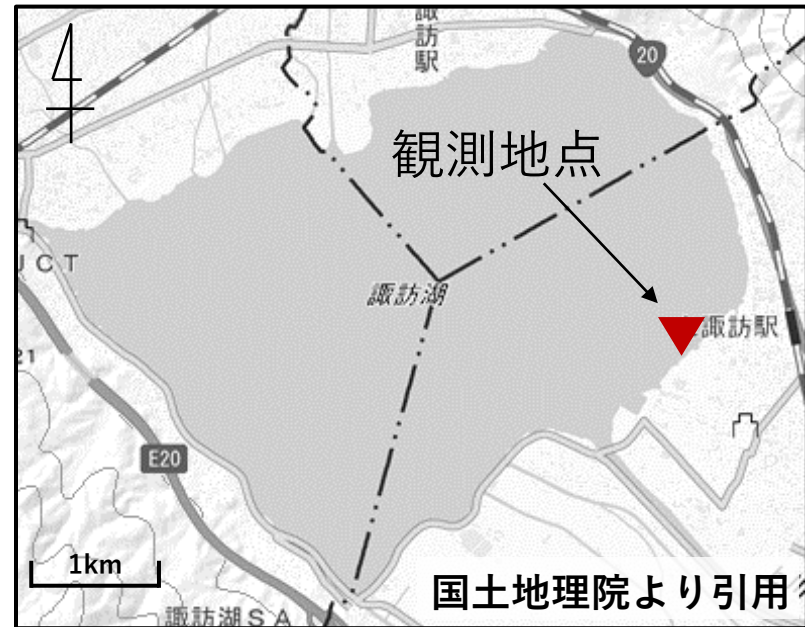
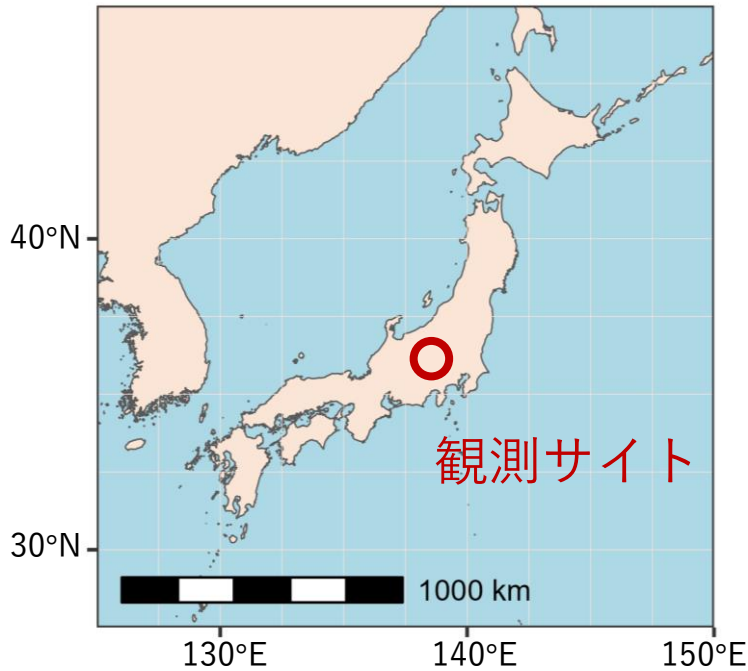
約7年間の観測データを用いて，諏訪湖からのCH₄放出の経年変動，
およびその制御要因を明らかにする

研究対象：諏訪湖（長野県）



- 標高：759 m
- 面積：13.3 km²
- 水深：4.3 m（平均），6.4 m（最大），約2 m（観測地点）
- 富栄養湖（TN：0.62 mg L⁻¹，TP：0.041 mg L⁻¹）
- 夏に藍藻類，冬から春に珪藻類の植物プランクトンが発生
- 夏に沿岸部にヒシ（浮葉植物）とクロモ（沈水植物）が繁茂

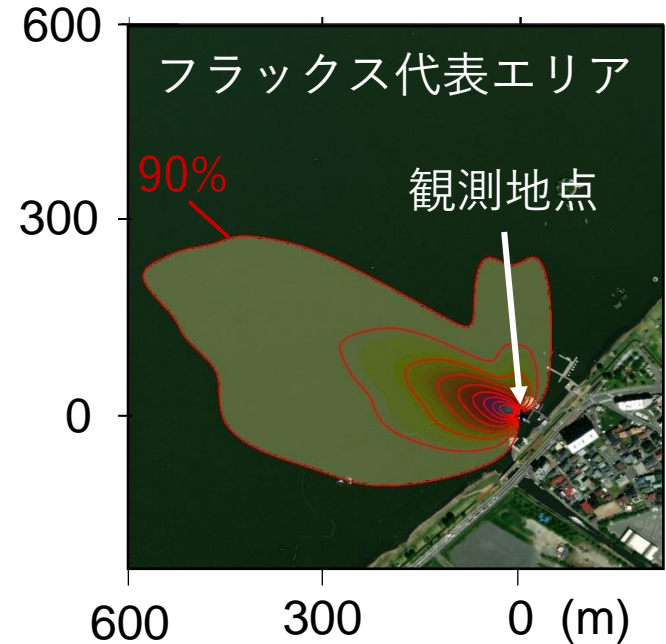
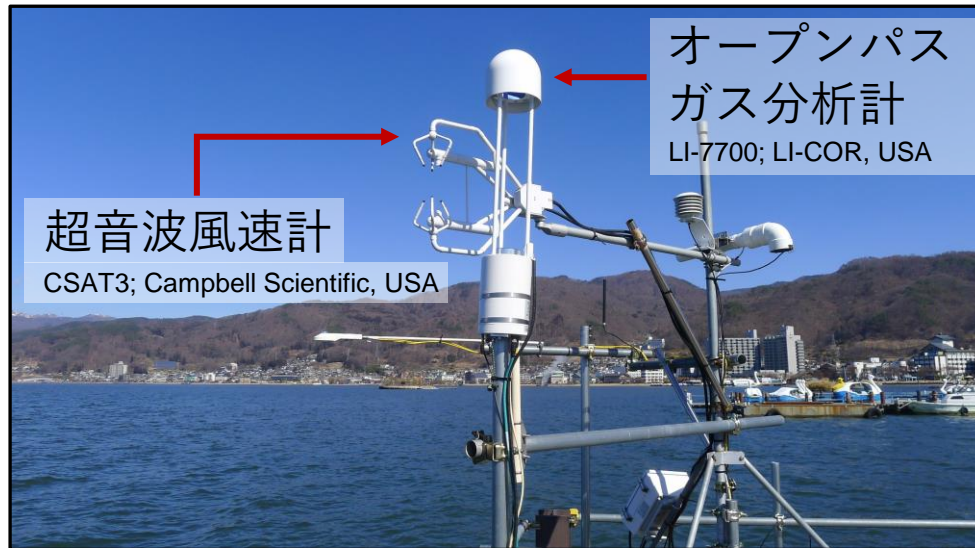
研究対象：諏訪湖（長野県）



- 標高：759 m
- 面積：13.3 km²
- 水深：4.3 m（平均），6.4 m（最大），約2 m（観測地点）
- 富栄養湖（TN：0.62 mg L⁻¹，TP：0.041 mg L⁻¹）
- 夏に藍藻類，冬から春に珪藻類の植物プランクトンが発生
- 夏に沿岸部にヒシ（浮葉植物）とクロモ（沈水植物）が繁茂

CH₄フラックスデータ

■ 渦相関法を用いてCH₄フラックスを観測



- ・ 拡散・バブルを含めた正味のフラックスを算出
 - 分離手法 (Iwata et al., 2018) を適用し、**拡散・バブルフラックスを算出**
↳ チャンバー観測により検証
 - ・ ランダムフォレスト回帰を適用し、**データの欠測を補間**
- 対象期間：約7年間（2016年6月～2023年9月）

気象・湖環境データ

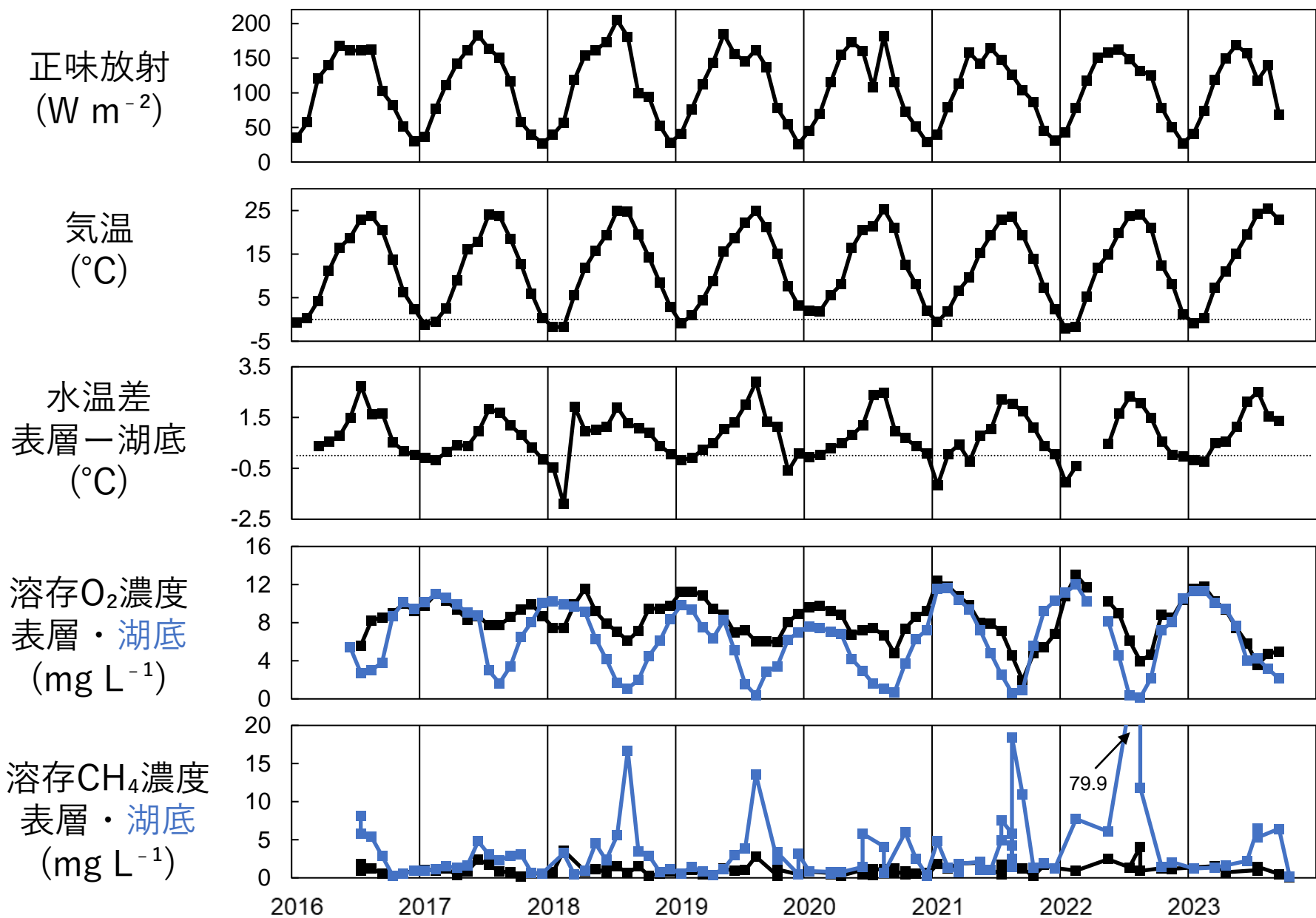
■ 観測

- ・ 気温，風速，放射，全静圧，
水温（0.25 m，bottom-0.2m），
溶存O₂濃度（0.25 m，bottom-0.2m），
溶存CH₄濃度（0.25 m，bottom-0.2m）
連続・定期観測を実施
- ・ **クロロフィル濃度**（湖心，全層水）
約2週間ごとに測定（データ提供：宮原裕一，信州大学）

■ 植生被覆

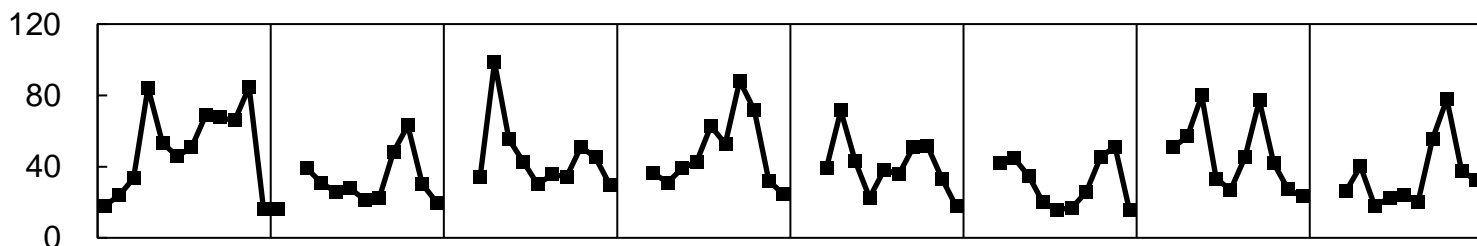
- ・ **正規化植生指数：NDVI**（代表エリア内）
光合成特有の反射特性を利用し，衛星画像（Sentinel-2）から算出

気象・湖環境の時間変化

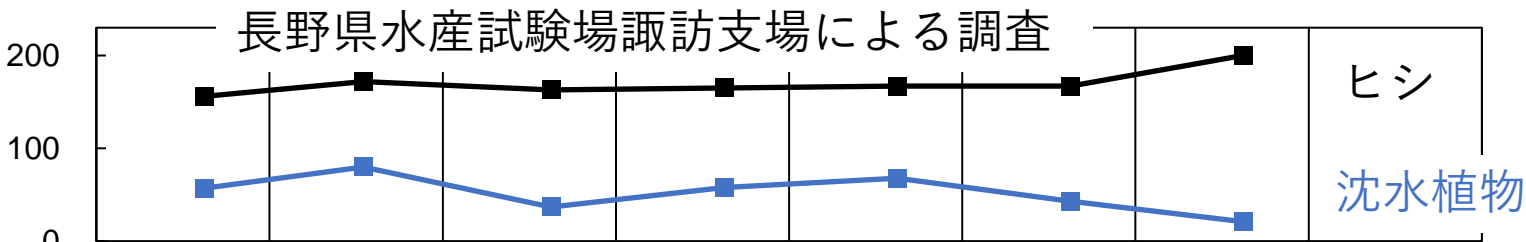


湖環境・CH₄フラックスの時間変化

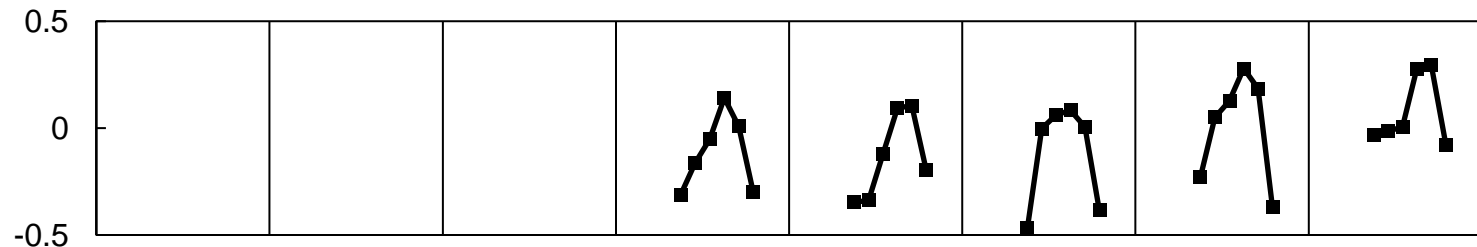
クロロフィル
濃度
($\mu\text{g L}^{-1}$)



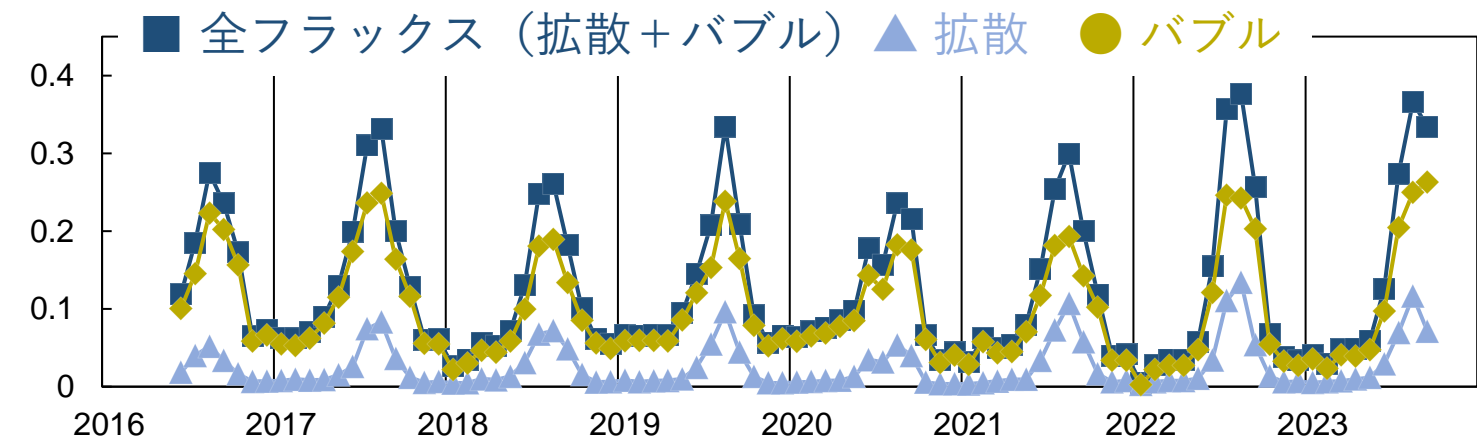
湖全域の水生
植物繁茂面積
(ha)



NDVI



CH₄フラックス
($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)



CH₄フラックスの季節変化と気象湖環境の関係

全CH₄フラックス（月平均値）

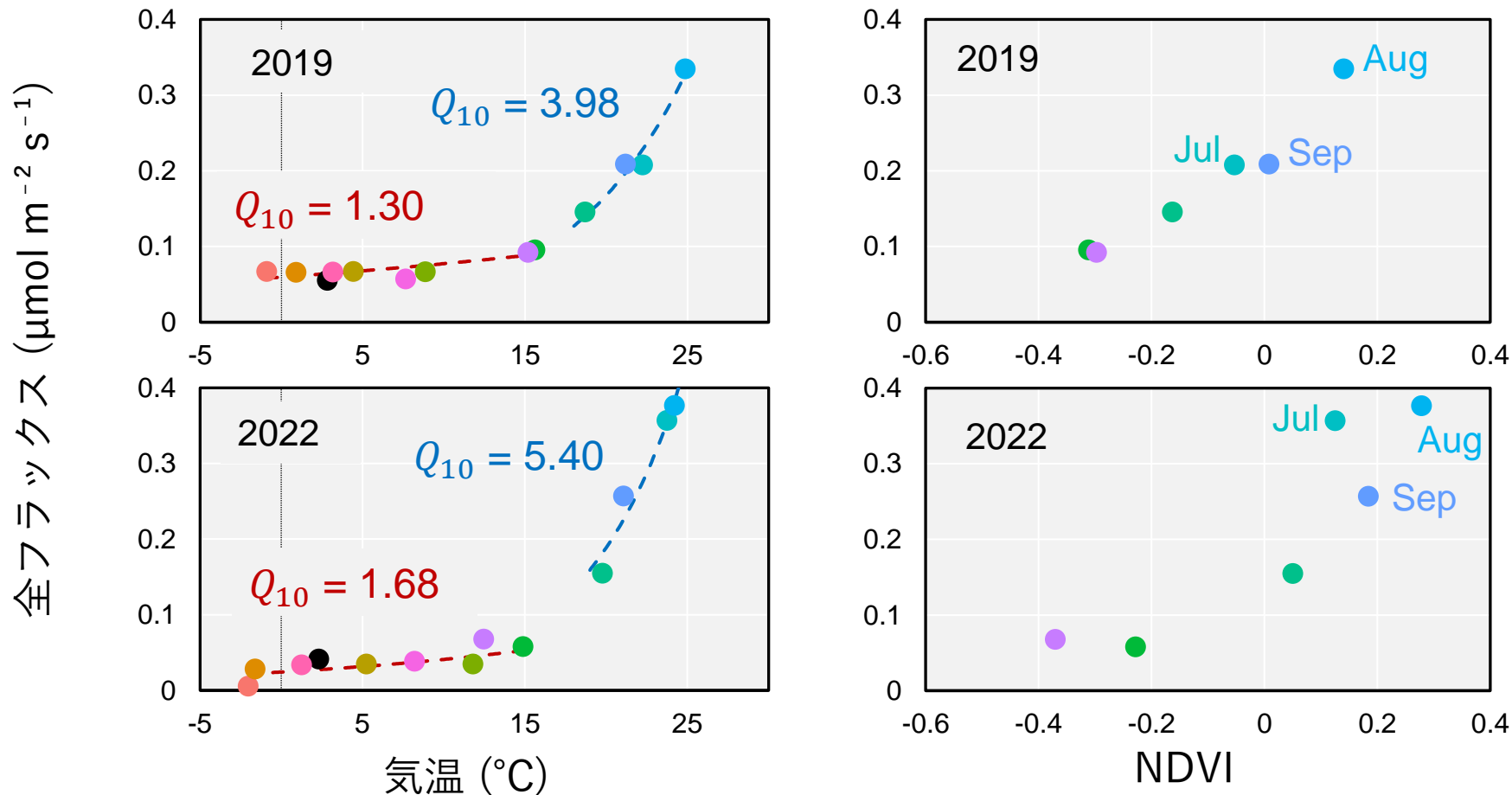
相関係数 * : P<0.05, ** : p<0.01	制御変数					
	単相関	気温	表層 水温	湖底 水温	湖底 O ₂ 濃度	NDVI
風速	-0.54 **	-0.12	-0.12	-0.14	0.04	-0.05
正味放射	0.43 **	-0.38 **	-0.38 **	-0.32 *	0.12	0.06
気温	0.84 **	/	0.04	0.22	0.39 **	0.34 *
表層水温	0.84 **	0.04	/	0.23	0.39 **	0.34 *
湖底水温	0.84 **	-0.09	-0.13	/	0.37 **	0.33 *
表層O ₂ 濃度	-0.73 **	-0.17	-0.17	-0.18	-0.12	-0.31 *
湖底O ₂ 濃度	-0.84 **	-0.38 **	-0.38 **	-0.41 **	/	-0.45 **
全静圧	-0.71 **	-0.41 **	-0.40 **	-0.40 **	-0.37 **	-0.32 *
降水量	0.52 **	-0.08	-0.05	0.00	-0.09	0.15
CO ₂ フラックス	-0.53 **	-0.50 **	-0.50 **	-0.50 **	-0.42 **	-0.36 **
NDVI	0.91 **	0.70 **	0.70 **	0.70 **	0.73 **	/
クロロフィル濃度	0.01	-0.16	-0.16	-0.14	-0.12	-0.06
表層CH ₄ 濃度	0.25	0.16	0.16	0.17	0.45 **	0.07
湖底CH ₄ 濃度	0.69 **	0.61 **	0.61 **	0.61 **	0.58 **	0.40 *

CH₄生成の
温度依存性

光合成
植生繁茂

月平均CH₄フラックスと温度，NDVIの関係

● 前年12月 ● 1月 ● 2月 ● 3月 ● 4月 ● 5月 ● 6月 ● 7月 ● 8月 ● 9月 ● 10月 ● 11月 ● 12月



植生の影響が一ヶ月未満で反映されている可能性がある

植生繁茂の影響

■ 落ち葉やその死骸を有機物として湖底に供給

ヒシ：

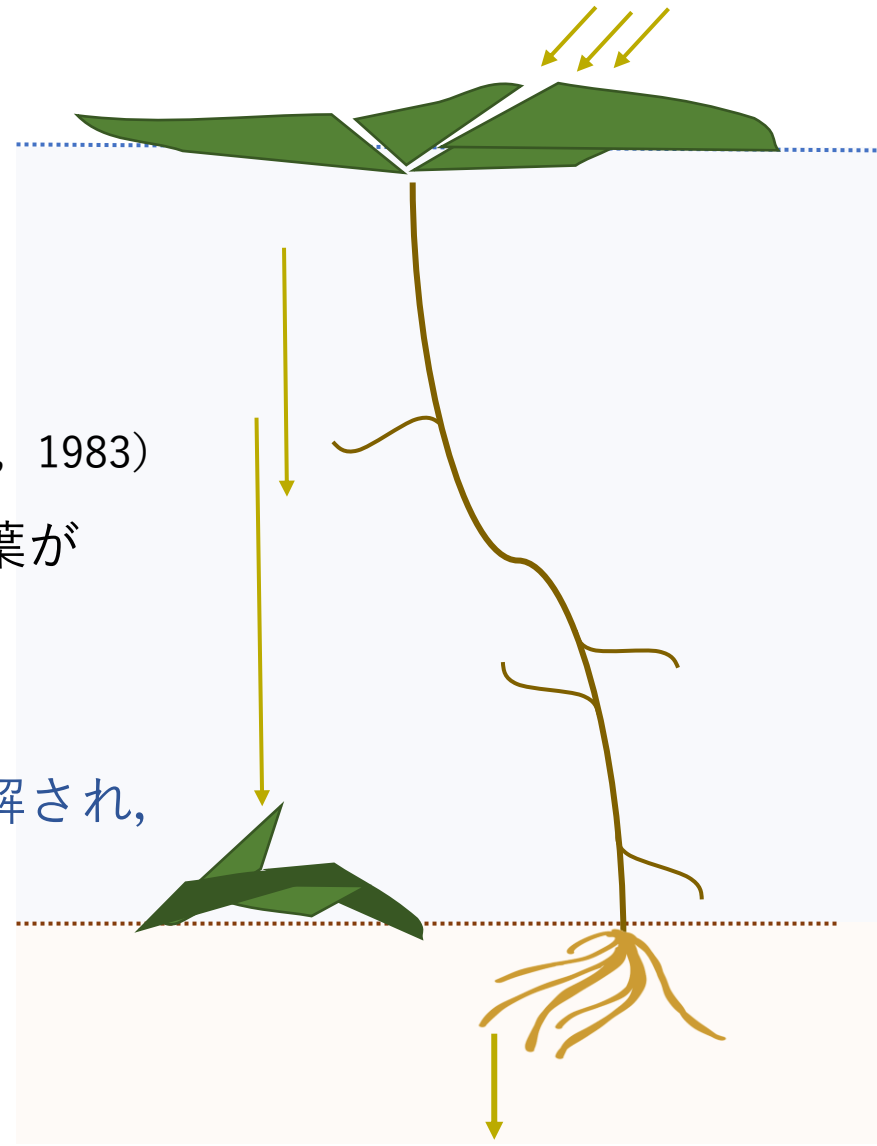
- ・ 葉の寿命は約20日程度と短かく、1日に約1枚の割合で葉が展開（土谷, 1983）
- ・ リターバックに入れて湖底に沈めた葉が3週間で約90%消失（土谷, 1983）

→ 絶え間なく湖底に落ち葉を供給

→ 落ち葉の多くが比較的速い速度で分解され、 CH_4 が生成されている

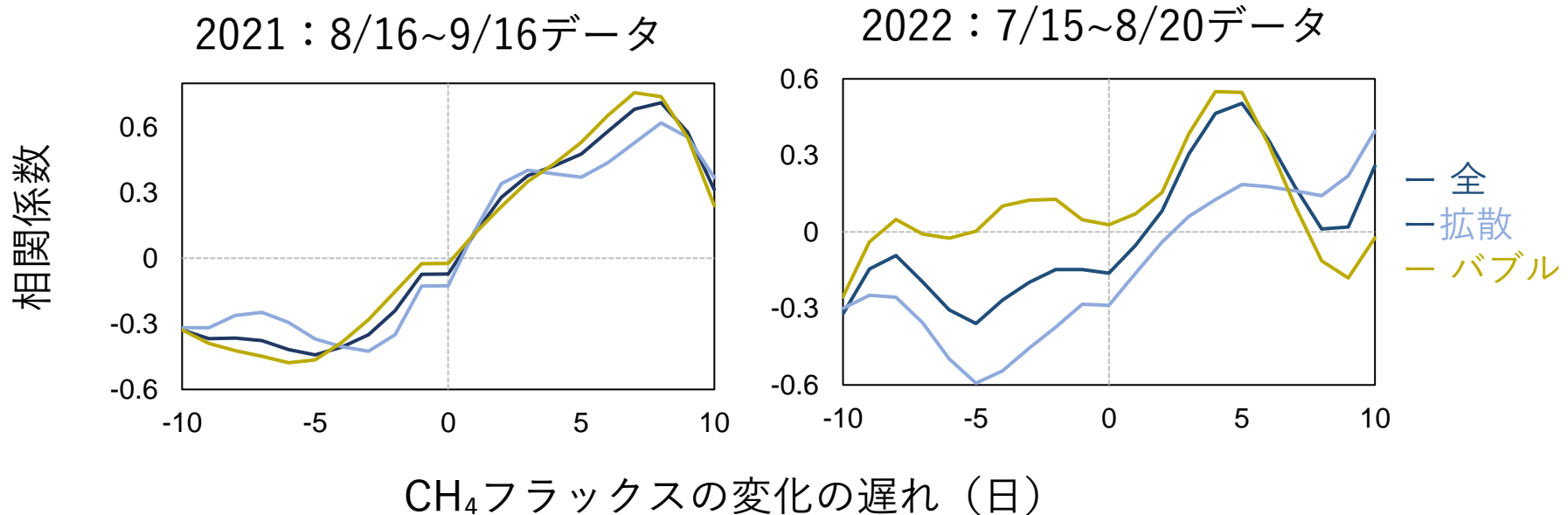
■ 光合成産物の有機物を根から供給

光合成により固定された炭素が数日で CH_4 に変換，放出（Waldo et al., 2019）



日平均CH₄フラックスと日射の関係

日射の時間変化に対するCH₄フラックスの時間変化の遅れの相関を算出



日射の増加後、数日遅れでCH₄フラックスが増加

→ 光合成産物の根からの供給の影響も重要な可能性がある

夏（6~9月）の経年変動と気象湖環境の関係

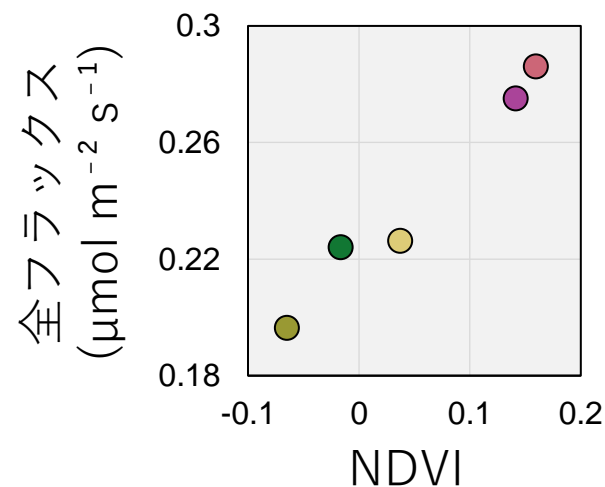
相関係数

フラックス

* : P<0.1, ** : p<0.05

	全	拡散	バブル
風速	0.36	0.09	0.47
正味放射	-0.44	-0.40	-0.38
気温	0.29	0.36	0.19
表層水温	0.41	0.18	0.49
湖底水温	0.32	0.10	0.41
表層O ₂ 濃度	-0.34	-0.63 *	-0.08
湖底O ₂ 濃度	0.22	-0.22	0.47
全静圧	-0.32	0.10	-0.54
CO ₂ フラックス	-0.62 *	-0.79 **	-0.39
水生植物繁茂面積合計	0.36	-0.12	0.63
ヒシの繁茂面積	0.87 **	0.83 **	0.69 *
沈水植物の繁茂面積	-0.30	-0.69 *	0.05
NDVI	0.98 **	0.94 **	0.92 **
クロロフィル濃度	-0.21	-0.34	-0.08
表層CH ₄ 濃度	0.55	0.57	0.43
湖底CH ₄ 濃度	0.56	0.66 *	0.38

- 2016
- 2017
- 2018
- 2019
- 2020
- 2021
- 2022
- 2023



経年変動においても
植生の繁茂の重要性が示された

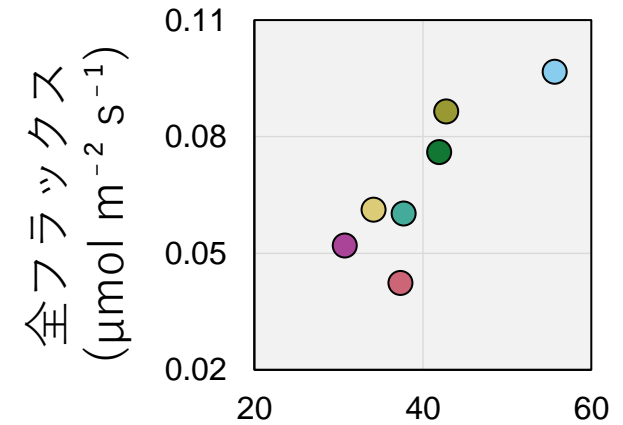
春（3~5月）の経年変動と気象湖環境の関係

相関係数

* : $P < 0.1$, ** : $p < 0.05$

フラックス

	全	拡散	バブル
風速	0.00	-0.09	0.01
正味放射	-0.01	-0.04	-0.01
気温	-0.85 **	-0.03	-0.86 **
表層水温	-0.71 *	0.16	-0.73 *
湖底水温	0.01	0.30	-0.01
表層O ₂ 濃度	-0.62	-0.22	-0.62
湖底O ₂ 濃度	-0.30	0.17	-0.32
全静圧	-0.79 **	-0.03	-0.80 **
CO ₂ フラックス	0.05	0.32	0.03
春のクロロフィル濃度	-0.38	0.03	-0.38
前年秋のクロロフィル濃度	0.76 **	0.48	0.75 *
前年10~12月のクロロフィル濃度	0.84 **	0.45	0.84 **



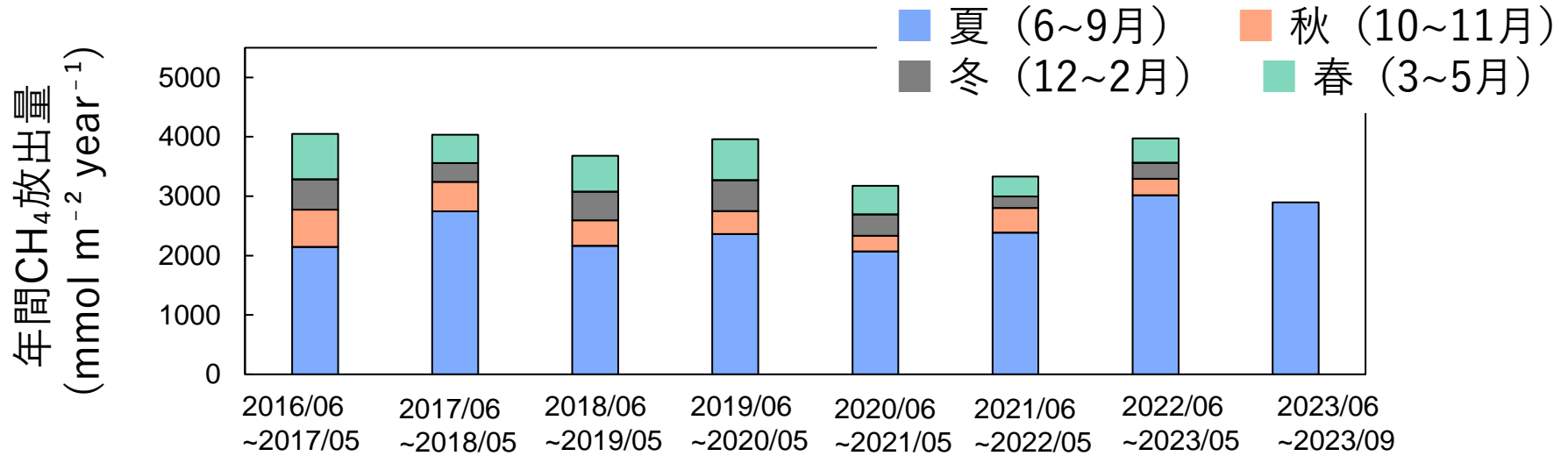
10~12月のクロロフィル濃度 ($\mu\text{g L}^{-1}$)

珪藻：

冬の温度条件では非常に分解が遅い (Yang, 2023)

→ 秋から初冬にかけて蓄積した珪藻が低温において分解が進みきらず、春になり温度が上昇することでCH₄生成に影響している可能性あり

CH₄フラックスの経年変動

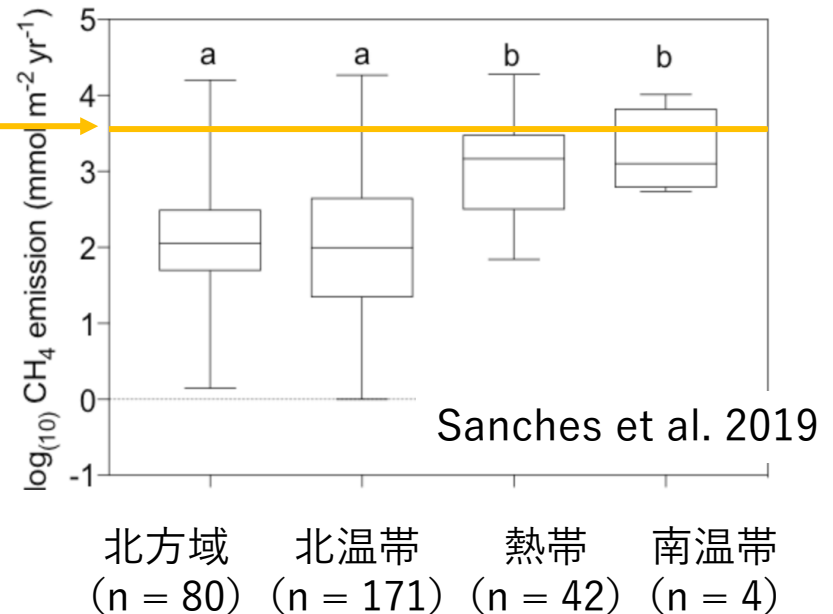


諏訪湖からの年間CH₄放出量：
平均 $3.74 \times 10^3 \text{ mmol m}^{-2} \text{ year}^{-1}$

高い放出量

- ・ 富栄養状態や水生植物の繁茂による有機物の供給の活発な環境
- ・ 高いバブル放出の割合 (約79%)

緯度・気候帯による年間CH₄放出量



まとめ

- 本研究は、実際の湖からの CH_4 放出の経年変動の受ける影響を長期データから明らかにした

植生の繁茂は CH_4 放出の季節変動および夏季の経年変動と強く関連
→落ち葉や根からの有機物供給の影響

秋から初冬に発生する植物プランクトンは翌年春の CH_4 放出と関連
→植物プランクトンによる有機物の供給，分解の時間的遅れの影響

富栄養および浅い自然湖沼において CH_4 フラックスの長期変動を評価する際、温度だけでなく、水生植物や植物プランクトンによる有機物供給の量とその供給，分解の季節性を考慮することの重要性を示した