

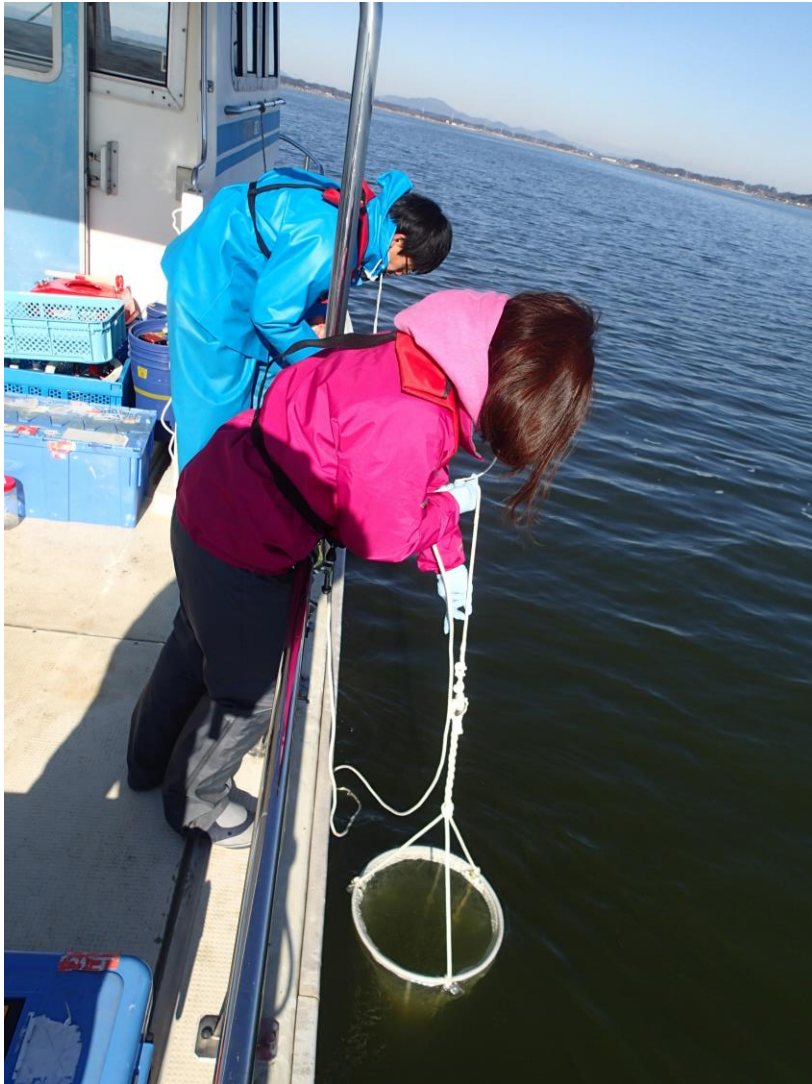
湖沼環境はどうして変わる？

～40年間の長期観測と10分ごとの高頻度観測からわかること～

高津 文人（地域環境保全領域）



湖沼の観測って、どんな気持ちで、何を見てるの？



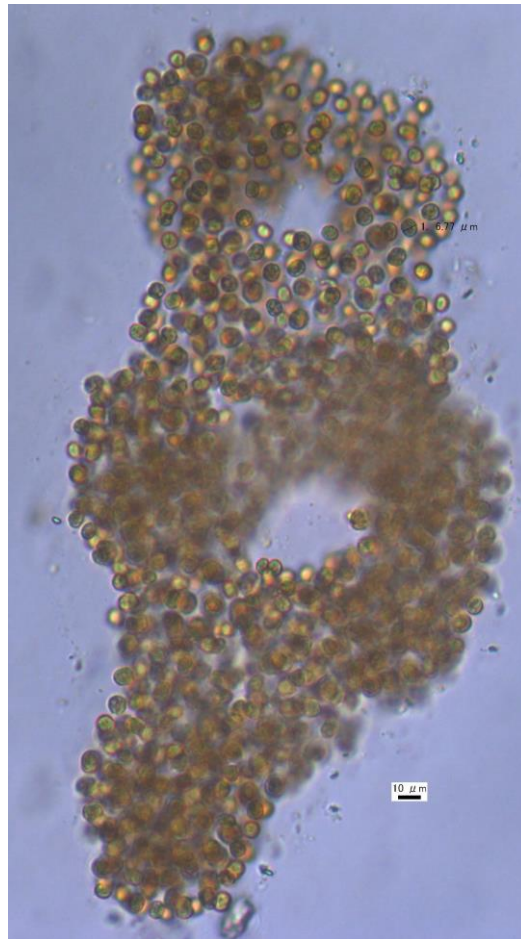
観測対象：生き物や水を濁らせる物質、臭いやガス←飲み水としての重要性

何が楽しい？：開放的な景色、毎月違う現場水質、昨年との違い

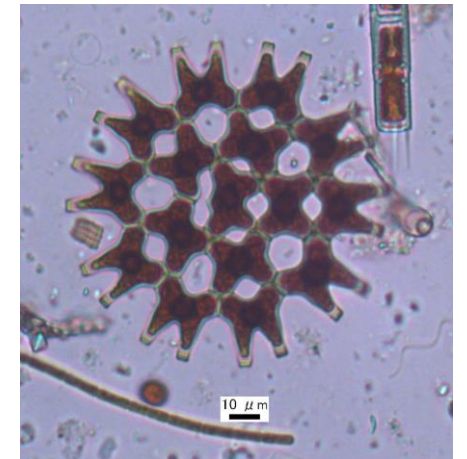
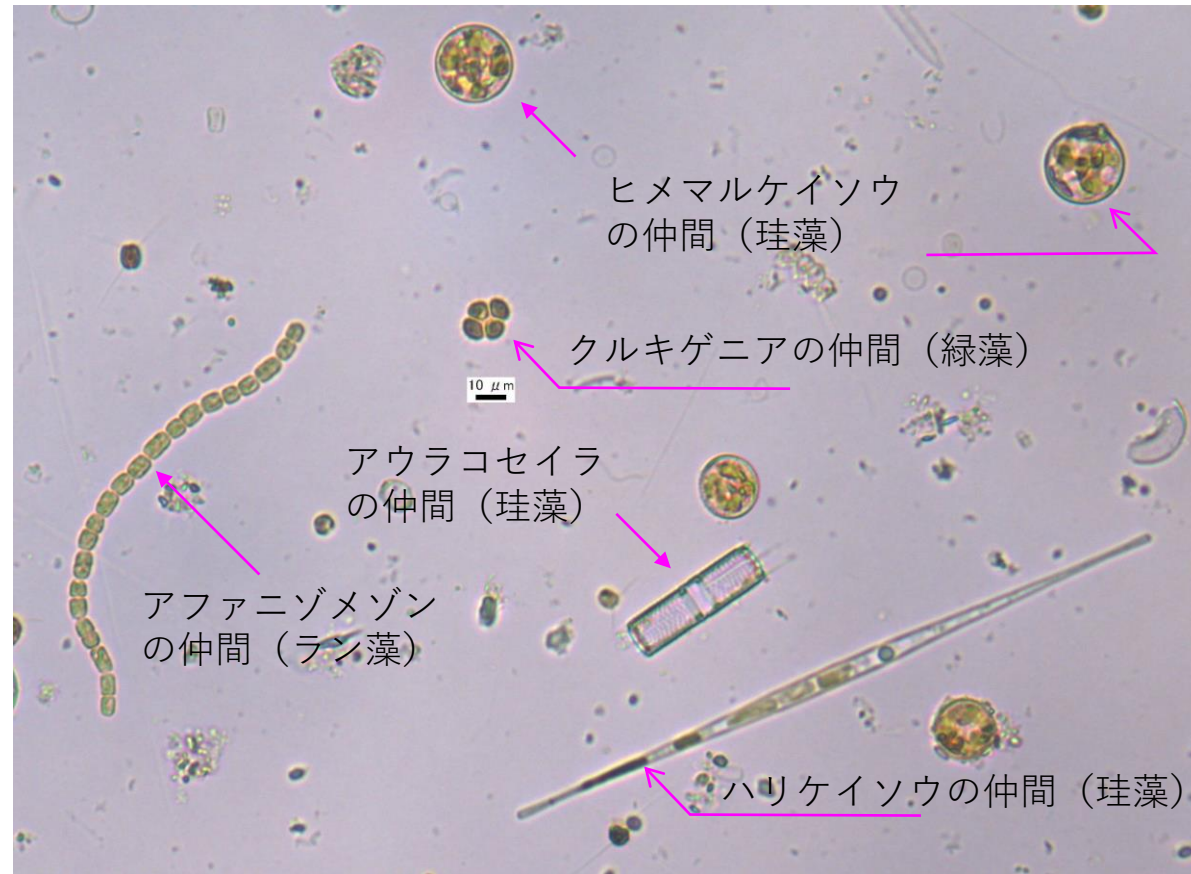
つらいことは：毎月1回でもずっと続けることの大変さ（日程調整、荒天や船の故障）、戻ってからの目・肩・腰の痛み

続けることの重要性が分かってるから乗り越えられる

霞ヶ浦の湖水を一滴として顕微鏡でのぞくと・・・



ミクロキスティスの仲間（ラン藻）

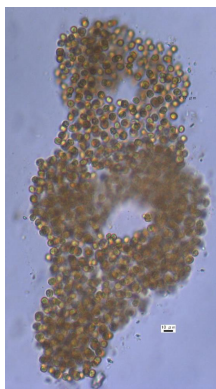


クンショウモの仲間（緑藻）

ラン藻・珪藻・緑藻の混在した世界

霞ヶ浦の汚れたイメージは植物プランクトンの特にラン藻が引き起こす様々な現象と関連している

【アオコ現象】



ミクロキスティスの仲間（ラン藻）
が引き起こすことが多い

【水カビ臭】

ジェオスミン

2-MIB

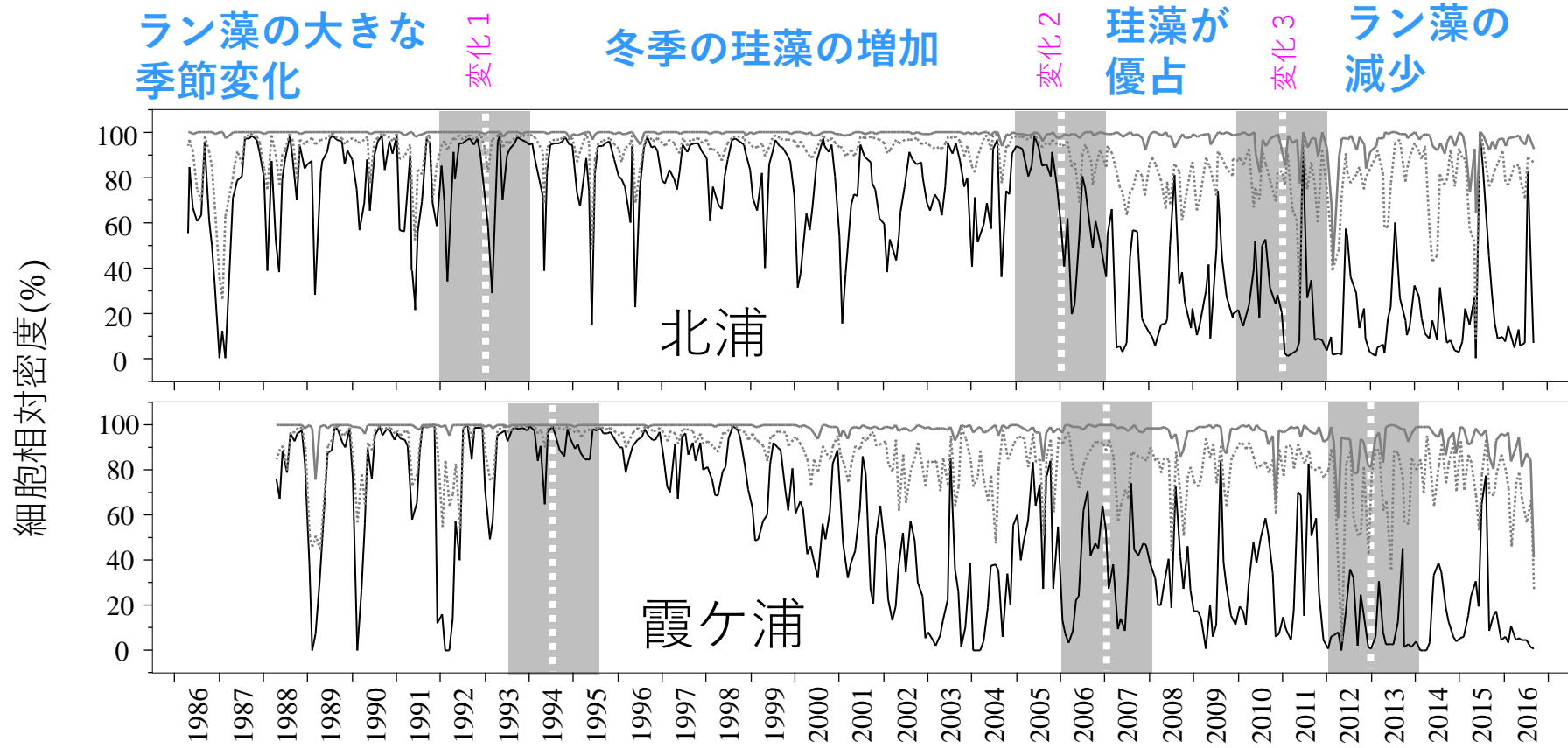


アフアニゾメゾンの仲間（ラン藻）



シュードアナベナの仲間（ラン藻）

長期観測の結果、霞ヶ浦や北浦では植物プランクトンの組成が3回大きく変化している



ラン藻の大きな
季節変化

変化1

冬季の珪藻の増加

変化2

珪藻が
優占

変化3

ラン藻の
減少

Regime shift detection
Chronological clustering analysis
の二つの手法により検出

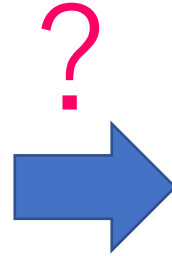
- ラン藻類の割合
- ラン藻類+珪藻類の割合
- ラン藻類+珪藻類+緑藻類の割合

出典元
「Kohzu et al.
(2023) Science of
the Total
Environment, 881,
163097, Elsevier」

観測を続けるとわかることは？



「湖沼環境はどう
変わったか？」



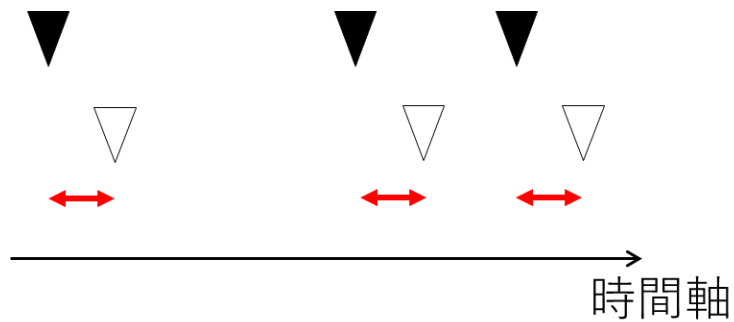
「湖沼環境はどう
して変わったか？」

前半は、「どう変わったか」から「どうして変
わったか」を知るための方法を霞ヶ浦の40年間の
長期観測データから作ったお話

「原因A⇒現象B」を示す方法

実験等で現象Bが起きる場合と起きない場合を比較することは難しいので、湖沼では長期間の観測データから、原因Aが生じてからしばらく経つと**いつも**現象Bが起きることを示せばよい

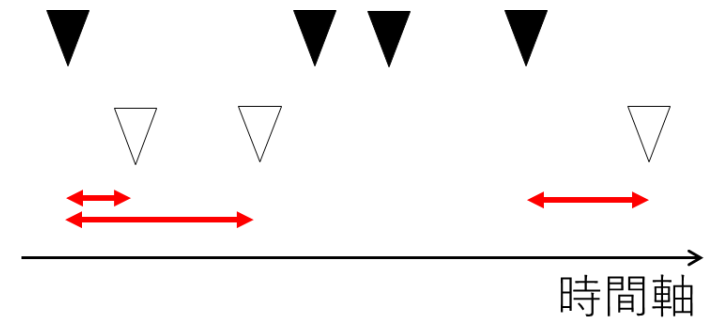
原因候補Aが**真の原因**
である可能性が高い



両者の時間差が一定

原因Aの発生時期
現象Bの発生時期
両者の時間差

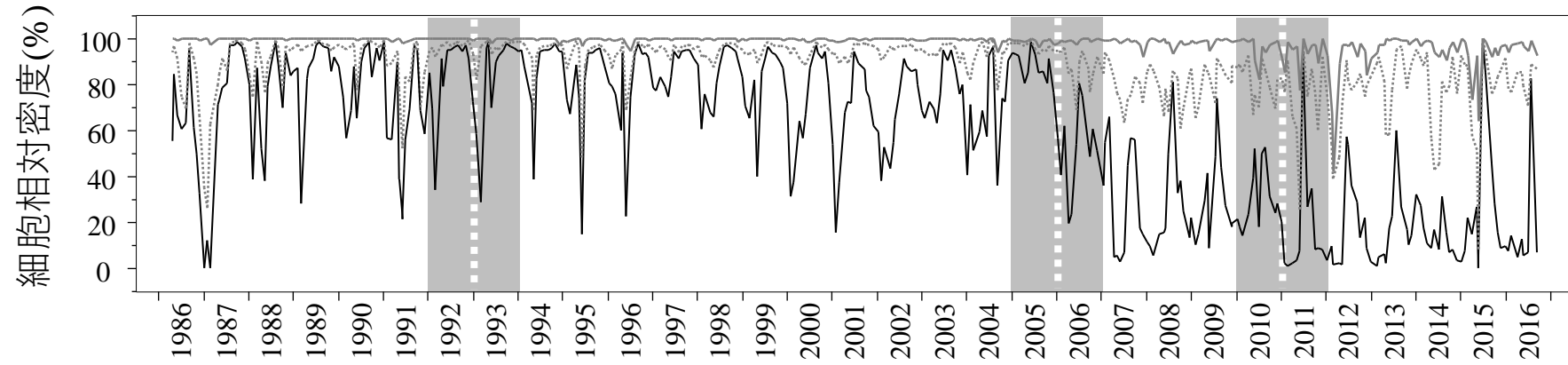
原因候補Aが**真の原因**
ではない



両者の時間差がばらつく

時間差の安定性を
統計的に評価！

現象B：ラン藻・珪藻の優占度と季節変化パターンの大きな変化



出典元
「Kohzu et al.
(2023) Science of
the Total
Environment, 881,
163097, Elsevier」

ラン藻の大きな
季節変化
変化1

冬季の珪藻の増加

珪藻が
優占
変化2

ラン藻の減少
変化3

原因候補A

気象統合
パラメー
タの変化

流入河川
水質の変
化

湖の水位
や水温の
変化

湖の水質
の変化

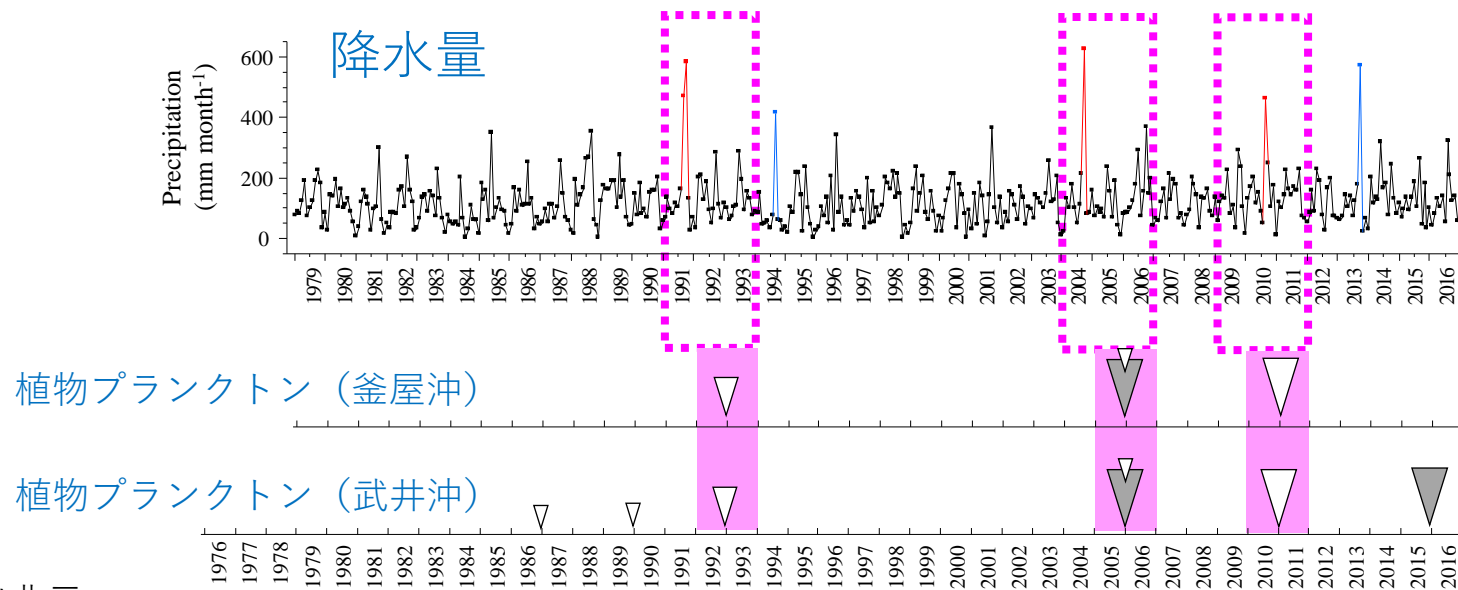
大雨

大風

渇水

原因候補Aの発生タイミングのうち、藻類変化のタイ
ミングと一番符合するのはどの候補？

「月400mmを超える大雨が降るとラン藻が発生しにくくなる」



出典元

「Kohzu et al.
(2023) Science of
the Total
Environment, 881,
163097, Elsevier」

気候変動下で大雨が増えるとますます
ラン藻は発生しにくくなるが、大雨が
降るといつもラン藻が減るとは限らな
い（例：青い降水イベント）

大雨が降ってからラン藻割合が減るのに北浦で0.9年、霞ヶ浦で2.7年かかっていた。より**大きな湖では大雨が降ってから5～10年経って**植物プランクトンが変化することもありえる！

植物プランクトン組成が変化した3回とも大雨が1～3年前に発生

Science of the Total Environment 881 (2023) 163097



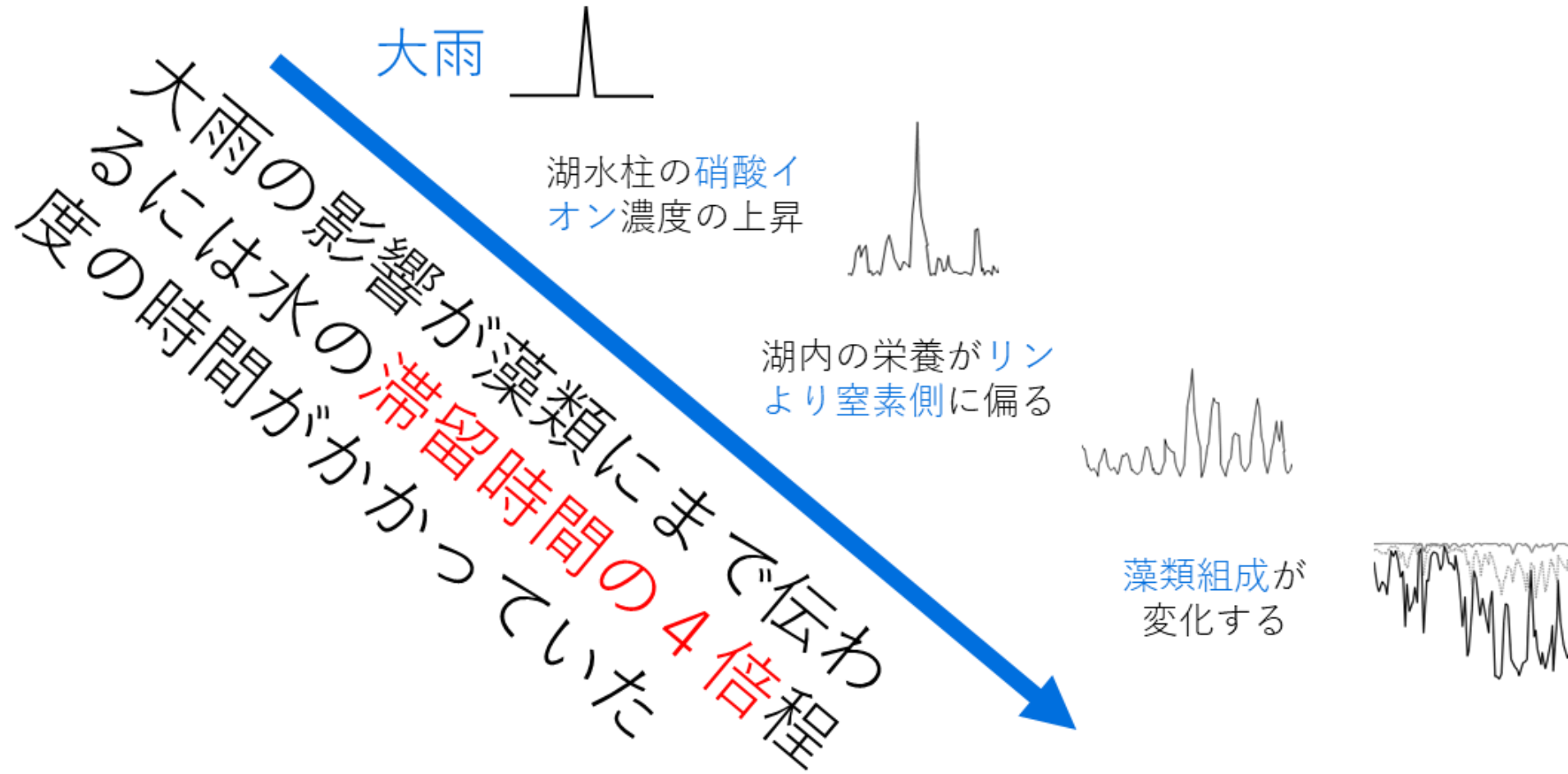
Identifi-
cation tir-
shalle

Ayato I
Megun

^a Regional E
^b Biodiversit

^c Ibaraki Kasumigaura Environmental Science Center, 1853 Okijyuku, Tsuchiura, Ibaraki 300-0023, Japan

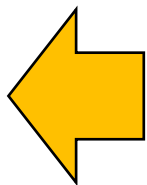
^d Department of Engineering, Shinshu University, 4-17-1 Wakasato, Nagano 380-0928, Japan



「環境悪化の監視目的の長期湖沼観測データを活用し、**気候変動**
や社会変化による影響を明らかにする研究や適応策に役立てる」

時系列変動解析で湖沼の栄養状態やプランクトンの変化が何によって起きたか明らかに

**解析に
活かす**



国・自治体や環境研究所による幅広い常時監視をしている2湖沼、**霞ヶ浦（浅く広い富栄養湖）**と琵琶湖（深く大きい貧～中栄養湖）の観測データ群



**原因特定
し対策へ**

気候変動が原因なのか
流域や湖岸の改変が
原因なのかを見分ける

**流域管理や気候
変動適応策に役
立てる**

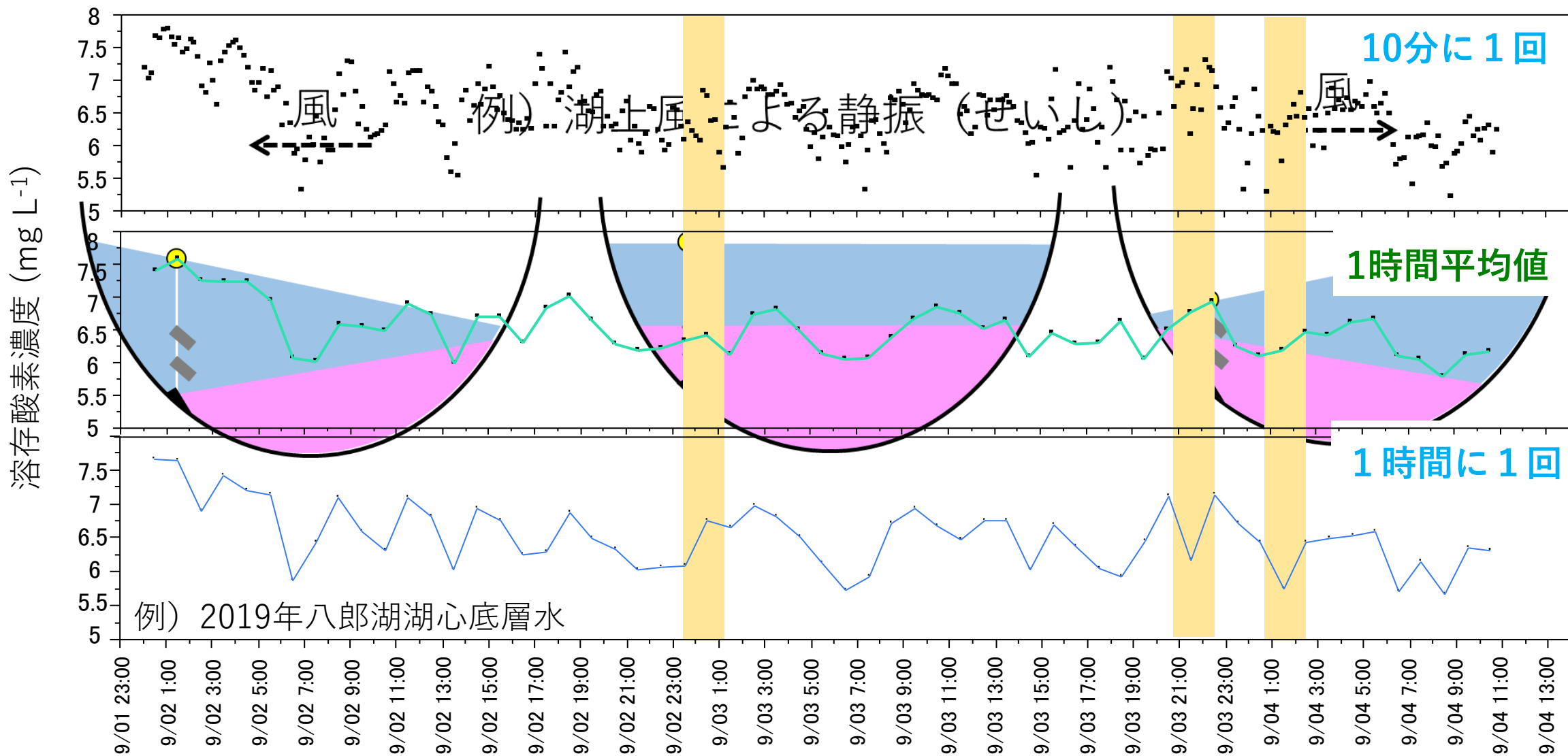
「湖沼環境はどうして変わる？」に高価で紛失の危険もある機器を設置しての高頻度観測が必要な理由

現在高頻度観測が可能な水質リスト

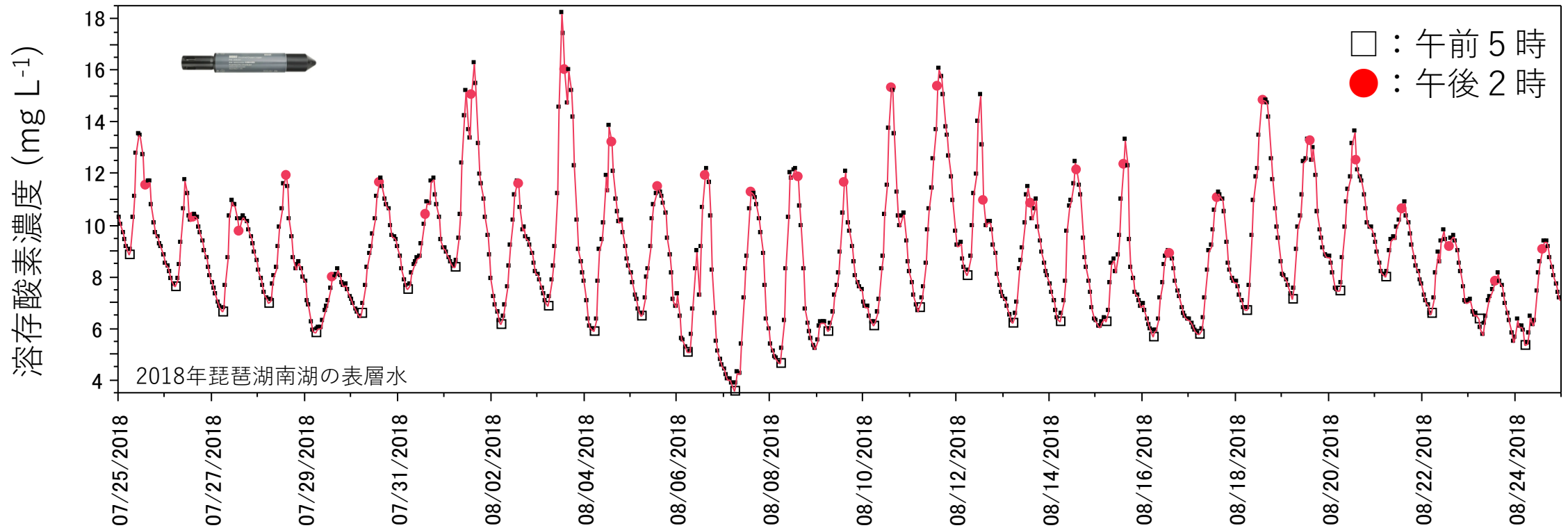
水温、pH、電気伝導度、濁度、クロロフィル濃度、溶存酸素濃度、亜硝酸イオン濃度

1. 大風や熱波や集中豪雨といった、短時間で大きな影響を及ぼす気象要因の解析が進む（現在進行中）
2. 普段調査してる時間は1日もしくは1ヶ月の水質をどこまで代表しているか分かる（一部をご紹介）
3. 1日周期の湖の中の変化をより正確に、多くのデータを使って検証できる（一部をご紹介）

高頻度観測データを時間平均したデータを解析に用いることが重要：1時間に1回と1時間の平均値は異なる！

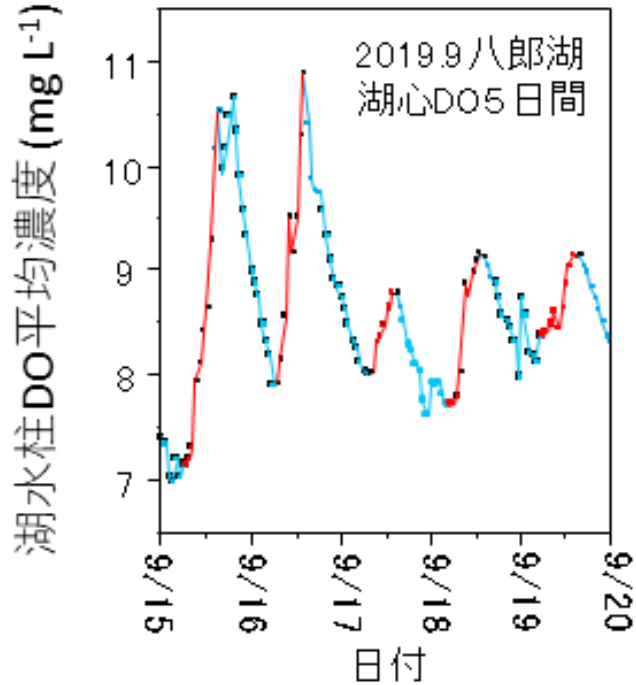


高頻度観測のデータからその日の表層の溶存酸素濃度の
平均値に近いのは午前8時～9時、午後5時から7時の
測定だと分かるがいずれも通常の勤務時間外



高頻度観測のデータを元に算出した湖水柱の 1日の酸素の生産と消費の速度の関係

時間平均溶存酸素濃度



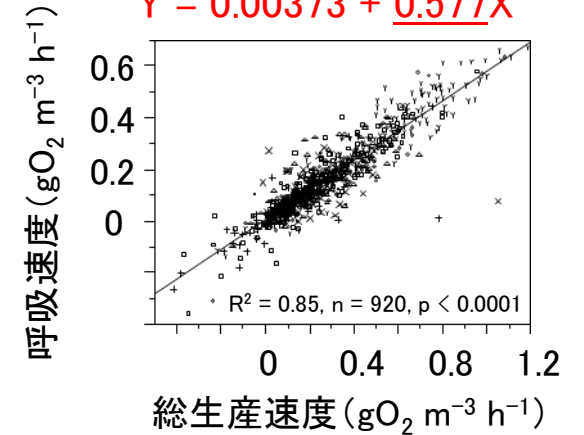
時間平均濃度の変化速度から酸素代謝を算出

Table 2. Equations used to calculate lake metabolism.

Parameter	Equation	Reference
The governing equation	$\Delta O_2/\Delta t = GPP - R - F - A$	Odum 1956
Oxygen saturation as a function of temperature (T, kelvin) and salinity (S, ppt)	$O_{2sat} \text{ (mg L}^{-1}\text{)} = (e^S) \times 1.423 \text{ mg O}_2 \text{ mL}^{-1}$	Weiss 1970
	$C \text{ (ml O}_2 \text{ L}^{-1}\text{)} = (-173.4292 + 249.6339 \times (100 / T) + 143.3483 \times \ln(T / 100) - 21.8492 \times (T / 100) + S \times [-0.033096 + 0.014259 \times (T / 100) - 0.0017000 \times (T / 100)^2])$	
Correction of O_{2sat} for barometric pressure (BP, millibars) for altitude (m)	$O_{2sat} \text{ (mg L}^{-1}\text{)} \text{ corrected for pressure} = O_{2sat} \text{ (mg L}^{-1}\text{)} \times \text{correction factor}$	USGS memo #81.11 1981
	correction factor = $(BP > 0.0987 - 0.0112)/100$	USGS memo #81.15 1981
	Correction factor = $(0.0000005 \times \text{altitude}^2 - 0.0118 \times \text{altitude} + 99.979)/100$	
Conversion of % O_2 to O_2 concentration	$O_{2conc} \text{ (mg L}^{-1}\text{)} = (\%DO / 100) \times O_{2sat} \text{ (mg L}^{-1}\text{)}$	
Schmidt coefficient, from water temperature (T, Celsius)	$Sc = 0.0476 T^3 + 3.7818 T^2 - 120.1 T + 1800.6$	Wanninkhof 1992
Wind speed, at 10 m height (U_{10}) from wind speed at height z (U_z , m/s)	$U_{10} \text{ (m s}^{-1}\text{)} = U_z \times \alpha$	Smith 1985
	$\alpha = 1.4125 z^{-0.15}$	
Piston velocity	$k_{100} \text{ (m h}^{-1}\text{)} = (2.07 + 0.215 U_{10}^{1.7})/100$	Cole and Caraco 1998
	$k \text{ (m h}^{-1}\text{)} = k_{100}(\text{m h}^{-1}) \times ([Sc/600]^{-0.5})$	Jähne et al. 1987
Physical gas flux	$F \text{ (g O}_2 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}\text{)} = k (O_{2atm} - O_{2sat})$	
$NEP_{daytime}$	$NEP_{daytime} \text{ (g O}_2 \text{ m}^{-3} \text{ hr}^{-1}\text{)} = \Delta O_2 \text{ (g m}^{-3} \text{ hr}^{-1}\text{)} - fFZ_{net}$ $NEP_{daytime} \text{ (g O}_2 \text{ m}^{-3} \text{ daylight period}^{-1}\text{)} = \text{mean } NEP_{daytime} \text{ during daylight} \times \text{dayfraction} \times 24$	Cole et al. 2000
R	$R_{day} \text{ (g O}_2 \text{ m}^{-3} \text{ h}^{-1}\text{)} = \text{mean } NEP_{day} \text{ during darkness}$ $R_{daytime} \text{ (g O}_2 \text{ m}^{-3} \text{ daylight period}^{-1}\text{)} = R_{day} \times 24 \text{ h} \times \text{dayfraction}$ $R_{day} \text{ (g O}_2 \text{ m}^{-3} \text{ d}^{-1}\text{)} = R_{day} \times 24 \text{ h}$	
GPP	$GPP \text{ (g O}_2 \text{ m}^{-3} \text{ d}^{-1}\text{)} = NEP_{daytime} + R_{daytime}$	
NEP	$NEP \text{ (g O}_2 \text{ m}^{-3} \text{ d}^{-1}\text{)} = GPP - R_{day}$	

4 湖沼の酸素代謝

$$Y = 0.00373 + 0.577X$$

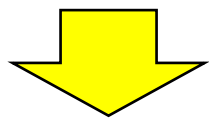


昼間光合成で生産された酸素の58%程度はその日のうちに消費される

溶存酸素濃度の時間平均値の夜間の値から生態系呼吸速度 (R)を、日中の値から純生産速度(NEP)を算出し、両者を足し合わせたものを総生産速度(GPP)として温度依存性を評価する

残りの42%はどうなるの？

- 1) 分解しCO₂になって海や大気へ ⇒カーボンニュートラル
- 2) 一旦湖底に堆積した後、メタンガスになって大気へ ⇒地球温暖化
- 3) 難分解化して湖底の泥に堆積 ⇒ブルーカーボン

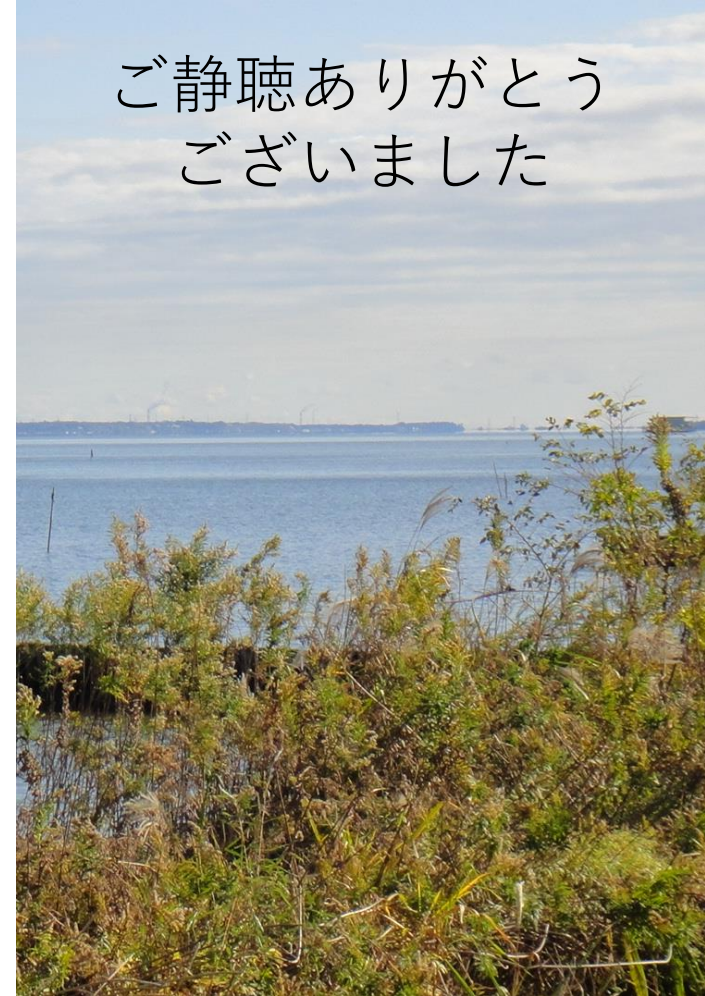


溶存酸素濃度だけでなくメタンガスの高頻度観測も実施できれば、
上の3つのプロセスの重要性が明らかに。

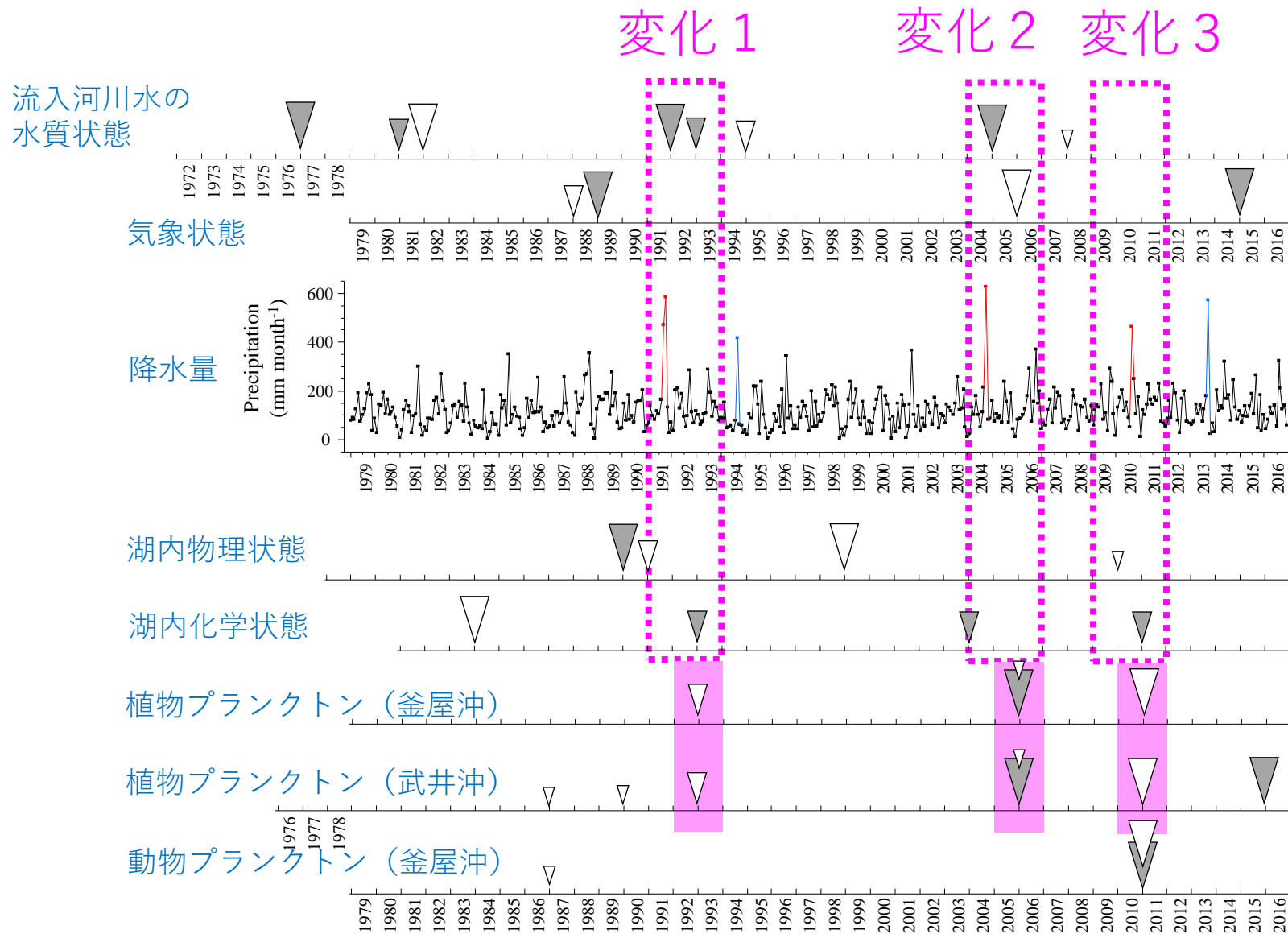
まとめ

1. 長期モニタリングのデータからは、湖沼環境が何が原因でどう変わったかに迫ることができる。
2. 高頻度モニタリングのデータからは、湖が毎日生産している酸素と呼吸して消費している酸素のバランスが分かり、湖のカーボンバランスの研究に活かせる
3. 長期的にも短期的にも気象が湖沼環境に大きな影響を与えており、今後多様な湖沼に展開することで、気候変動に頑強な湖沼生態系についての議論が可能となる。

ご静聴ありがとうございました



参考資料（北浦の長期変動解析の例）



月合計降水量が
400 mmを超える
イベントだけがいつ
も決まった期間
だけ先行して生じ
ていた

出典元
「Kohzu et al.
(2023) Science of
the Total
Environment, 881,
163097, Elsevier」