

浅い湖沼：霞ヶ浦の水質特性

福島武彦（茨城県霞ヶ浦環境科学センター）

fukushima.takehik.fu@u.tsukuba.ac.jp

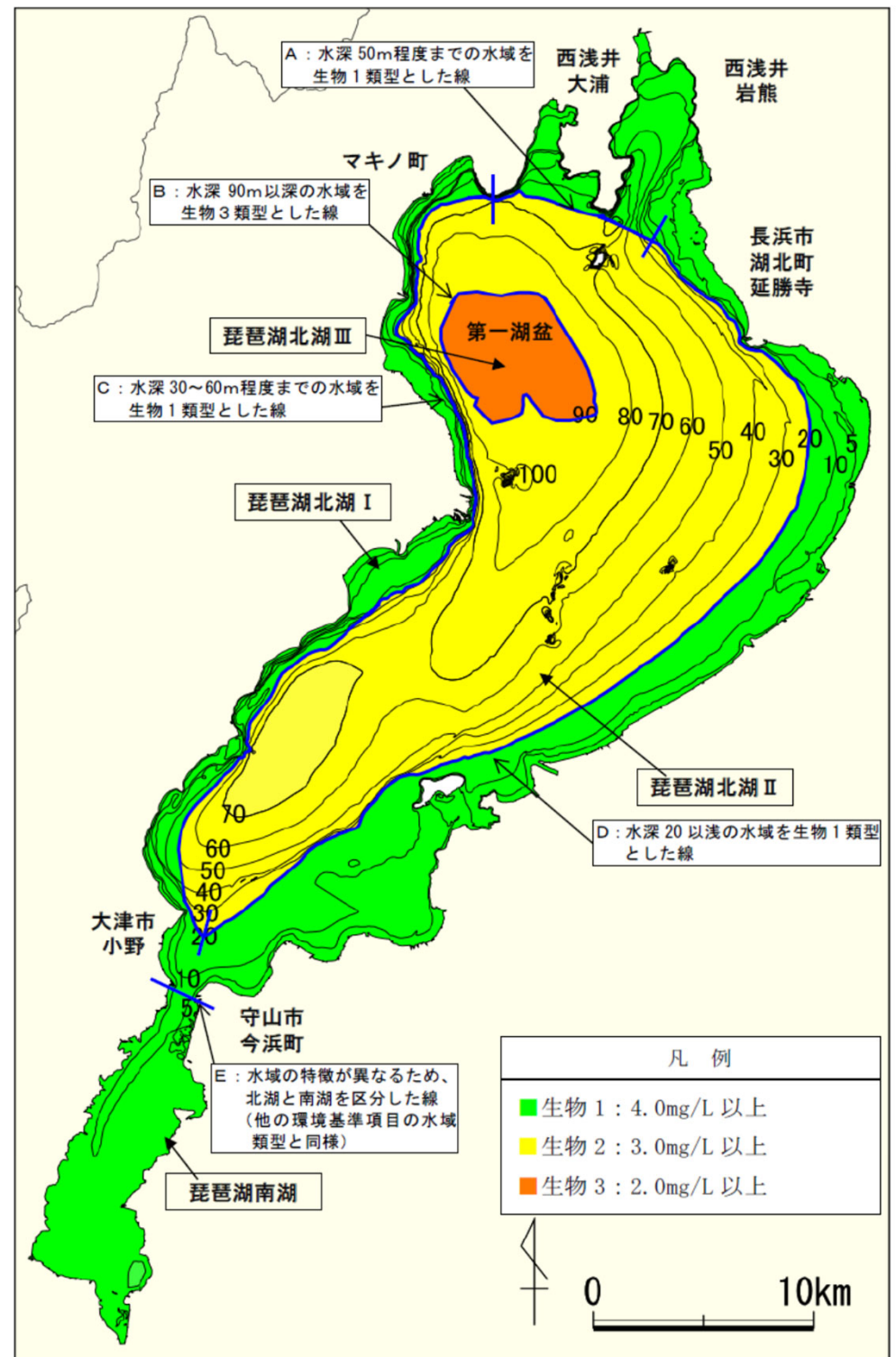
2017年以降の自著論文と本日の研究紹介(赤字)

- T. Fukushima, et al.: Will hypolimnetic waters become anoxic in all deep tropical lakes? Scientific Reports 7:45320, 2017. doi.org/10.1038/srep45320
- T. Fukushima, et al.: Semi-analytical prediction of Secchi depth transparency in Lake Kasumigaura using MERIS data. Limnology, 19, 89-100, 2018. doi.org/10.1007/s10201-017-0521-3
- T. Fukushima et al.: Shifts of radiocesium vertical profiles in sediments and their modelling in Japanese lakes. Science of the Total Environment, 615, 741- 750, 2018. doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.09.286
- T. Fukushima , et al.: Nakamoto: Suppression of nutrient release from freshwater lake sediments using granulated coal ash. Water Science and Technology: Water Supply, 18-5, 1810-1824, 2018. doi.org/10.2166/ws.2018.005
- T. Fukushima, et al.: Factors explaining the yearly changes in minimum bottom dissolved oxygen concentrations in Lake Biwa, a warm monomictic lake. Scientific Reports, 9:298, 2019. doi.org/10.1038/s41598-018-36533-7
- T. Fukushima, et al.: Decadal change in tripton concentration in a shallow lake. SN Applied Sciences. 1:1637, 2019. doi.org/10.1007/s42452-019-1668-9
- T. Fukushima, et al.: Characteristics of DO decline in Lakes Kasumigaura and Kitaura, shallow polymictic eutrophic lakes in Japan. Lakes & Reservoirs: Science, Policy and Management for Sustainable Use. 24, 314-323, 2019. doi.org/10.1111/lre.12294
- T. Fukushima, et al.: Long-term changes in water mineral concentrations and their influence on sediment water content in a shallow lake. SN Applied Sciences, 2: 1319, 2020. doi.org/10.1007/s42452-020-3119-z
- T. Fukushima, B. Matsushita: Limiting nutrient and its use efficiency of phytoplankton in a shallow eutrophic lake, Lake Kasumigaura. Hydrobiologia, 848, 3469-3487, 2021. doi.org/10.1007/s10750-021-04593-y
- T. Fukushima, et al.: Lake water quality observed after extreme rainfall events: Implications for water quality affected by stormy runoff. SN Applied Sciences 3: 841, 2021. doi.org/10.1007/s42452-021-04823-x
- T. Fukushima, et al.: Convection of waters in Lakes Maninjau and Singkarak, tropical oligomictic lakes. Limnology. (in press) doi.org/10.1007/s10201-021-00686-8

溶存酸素量 (DO)は湖沼鉛直循環 特性に支配されている？

浅い湖沼：夏季における低風速の継続特性
深い湖沼：気温の年較差

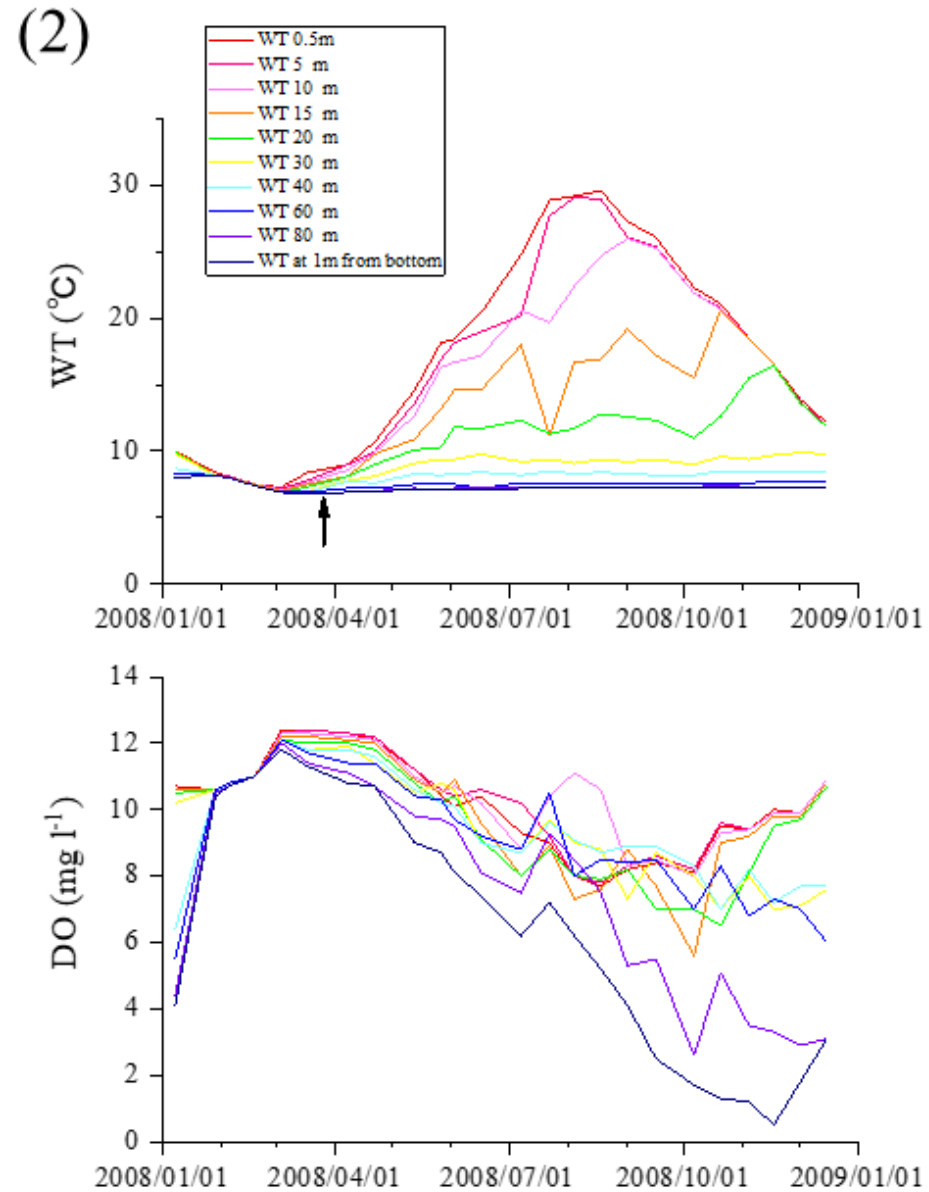
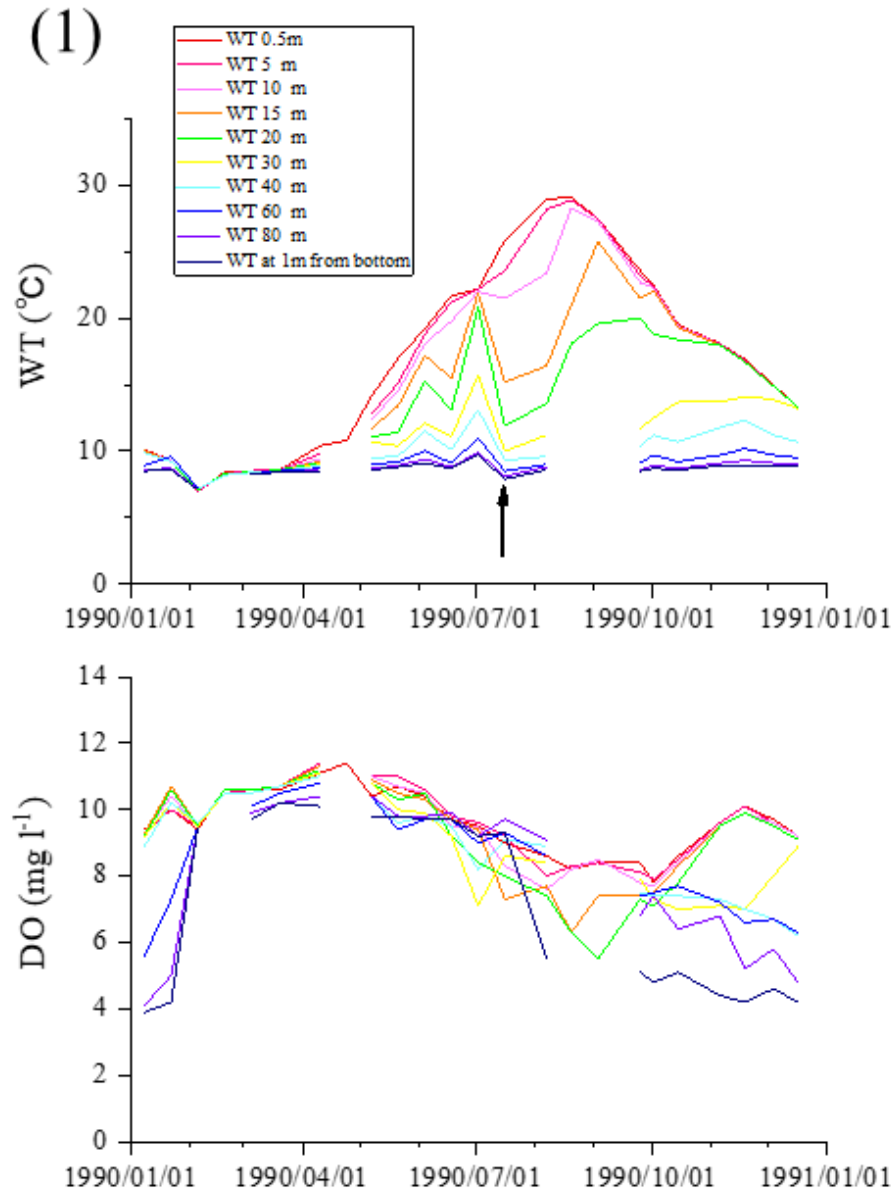
琵琶湖の底層 溶存酸素量の 類型指定 2021



環境省

図 8 琵琶湖の類型指定

低酸素イベント monomictic lake 琵琶湖 oligomicticに？



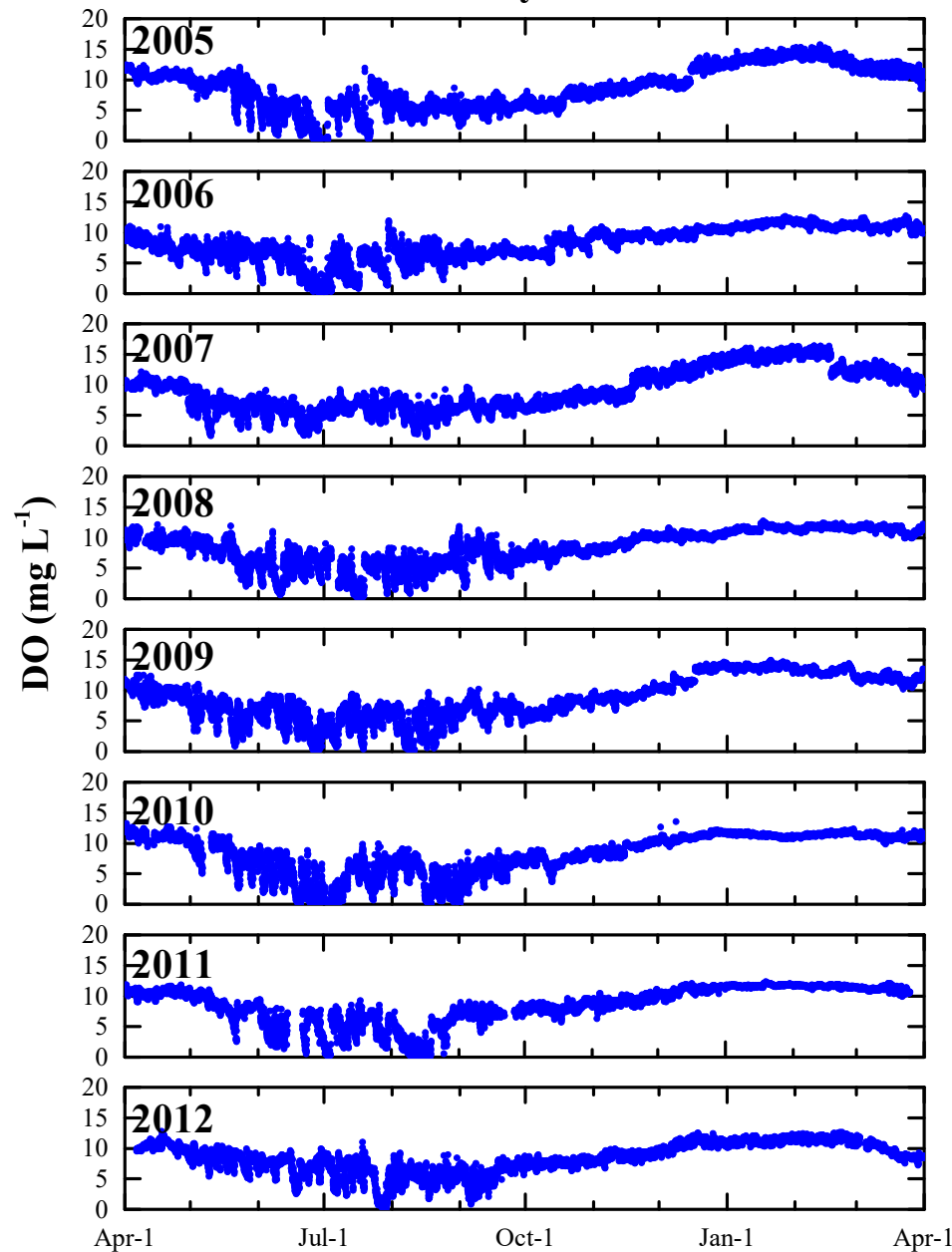
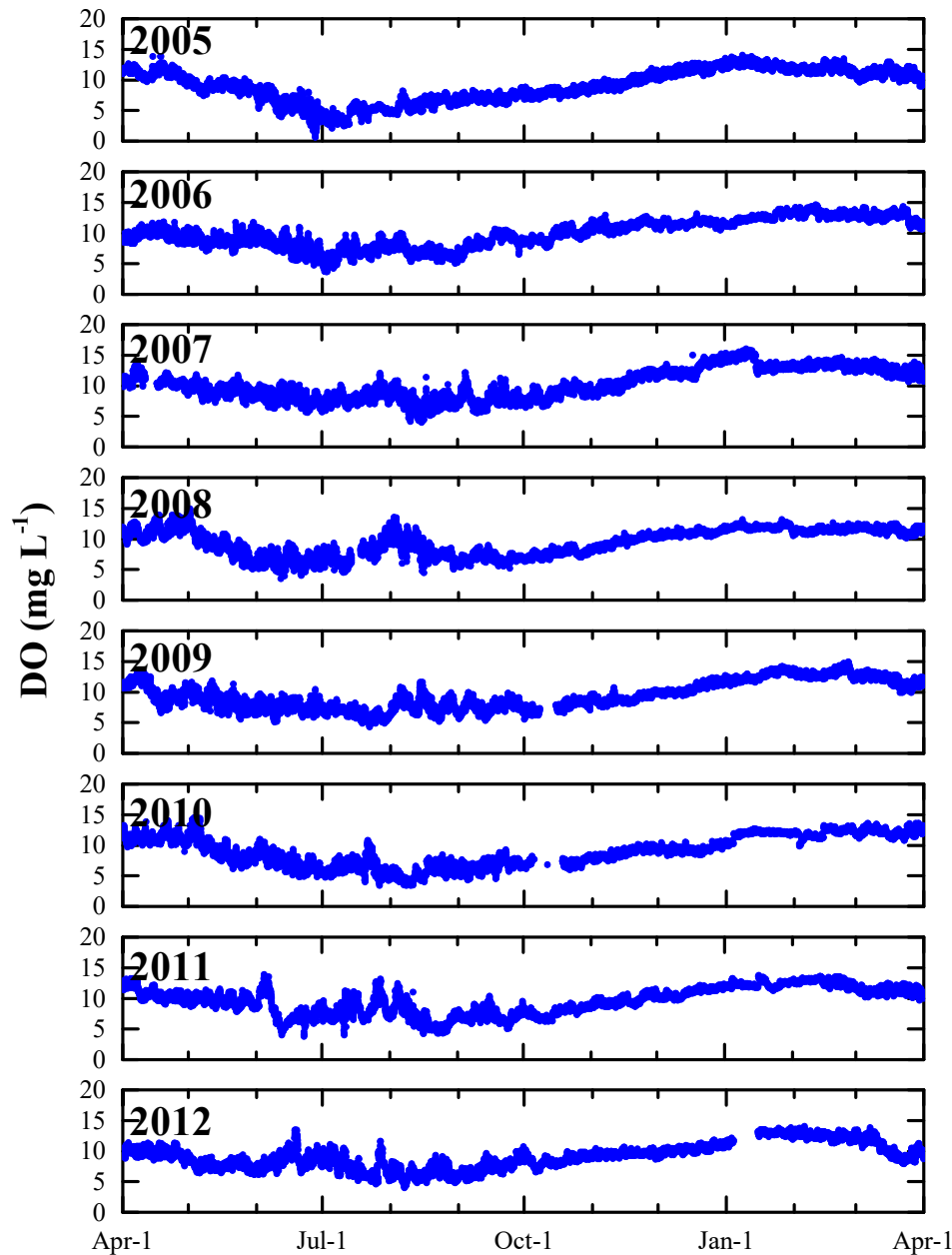
霞ヶ浦での底層DO(例)

掛馬沖(水深約4m)

Kakeuma-oki

釜谷沖(水深約6m)

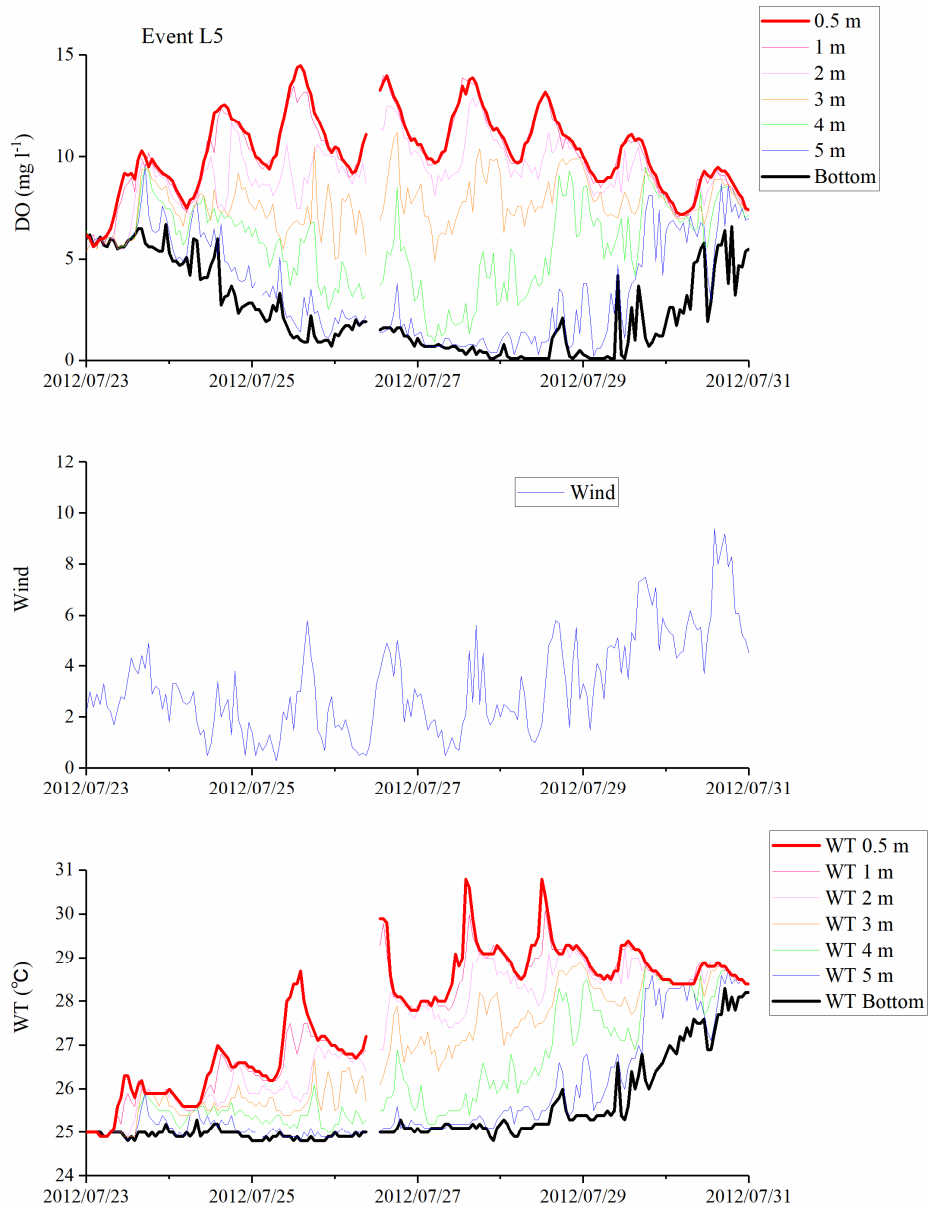
Kamaya-oki



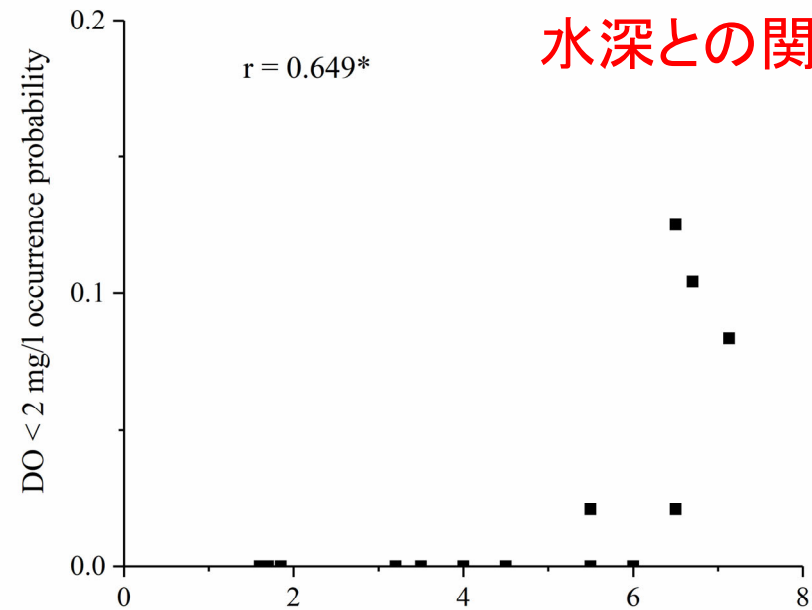
低酸素イベント in a polymictic lake

西浦、北浦、外浪逆浦

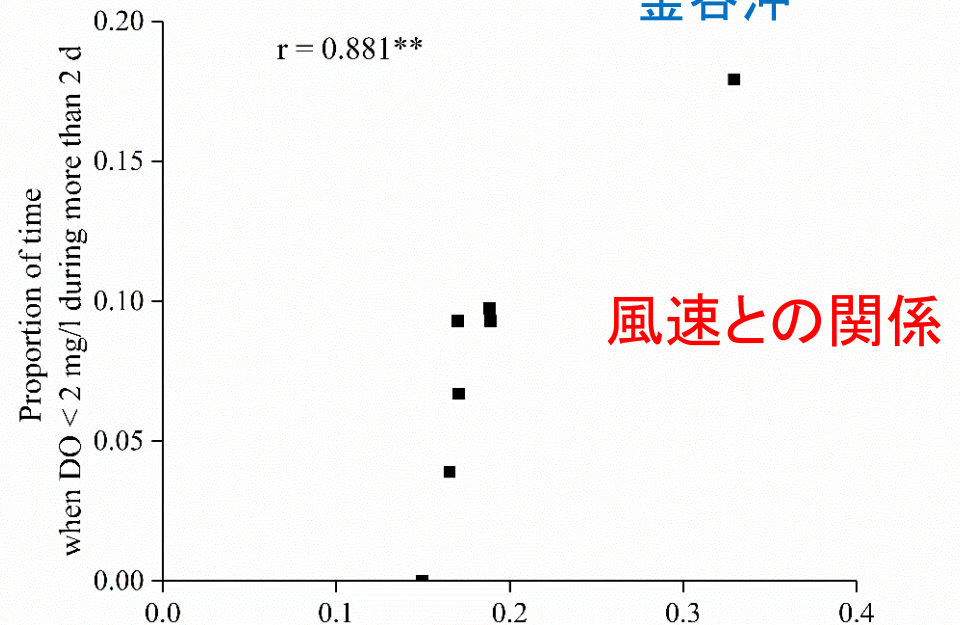
イベント例 釜谷沖



水深との関係

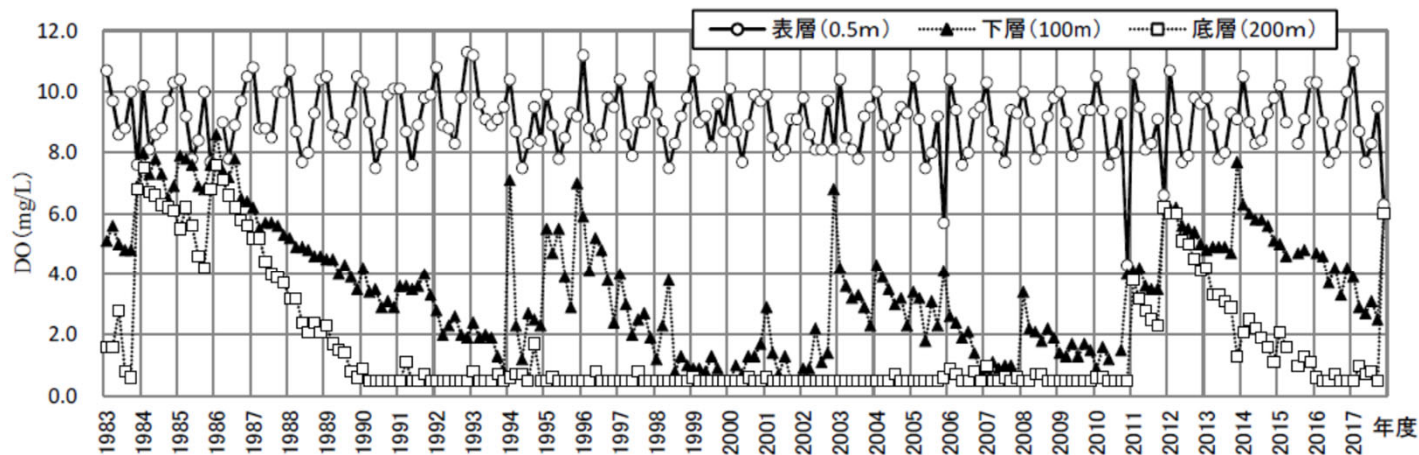


釜谷沖



低酸素イベント

in oligomictic/meromictic lakes



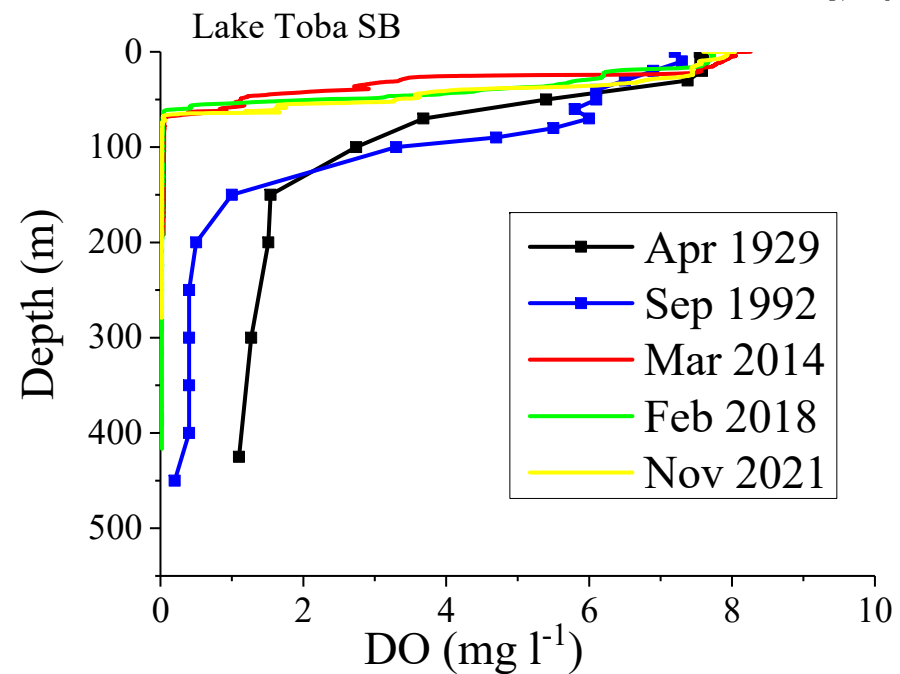
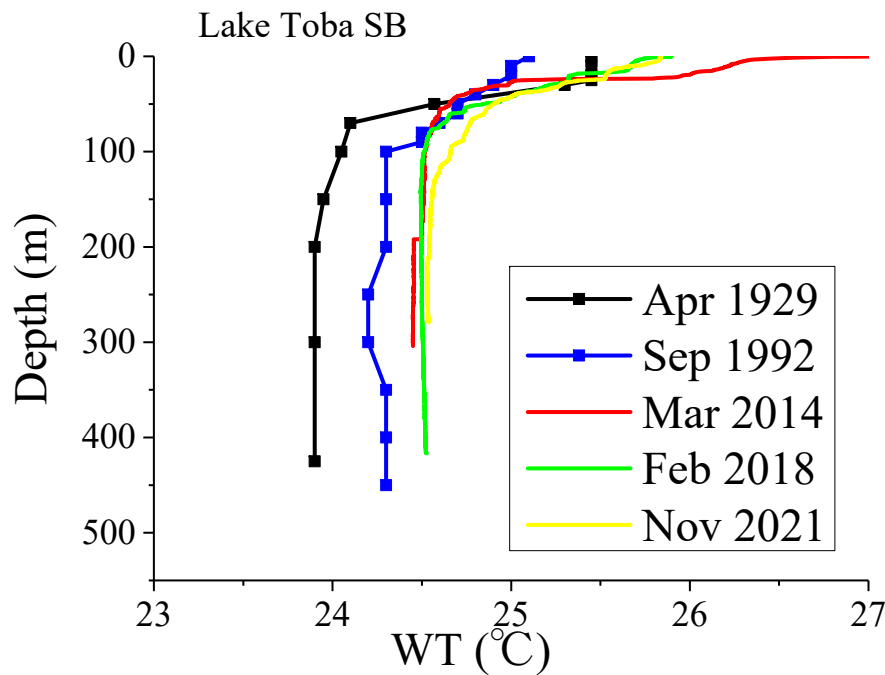
池田湖

牛垣他 (2018)

図2 DOの推移 (基準点2)

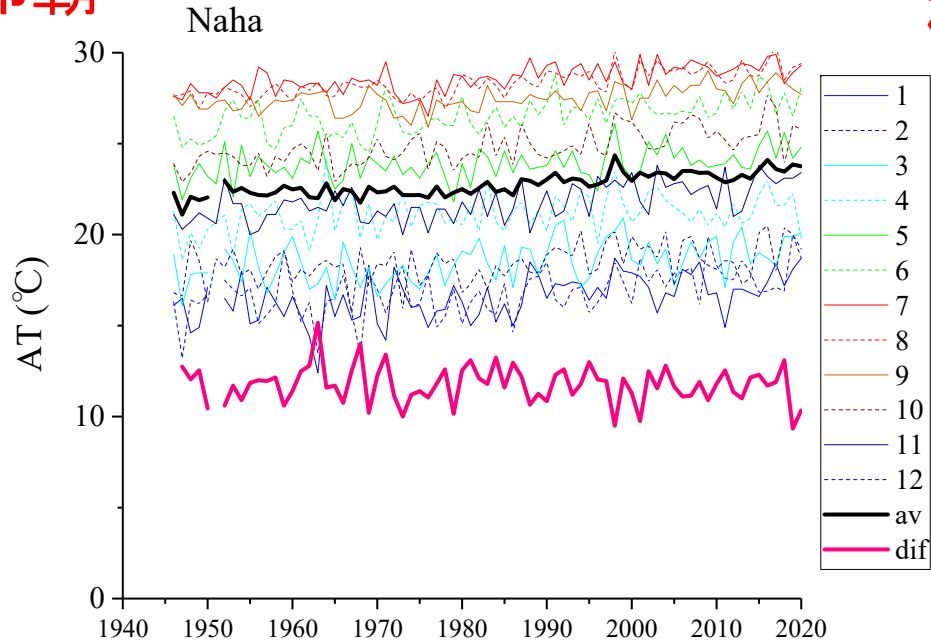
Toba湖

Fukushima et al. 投稿中

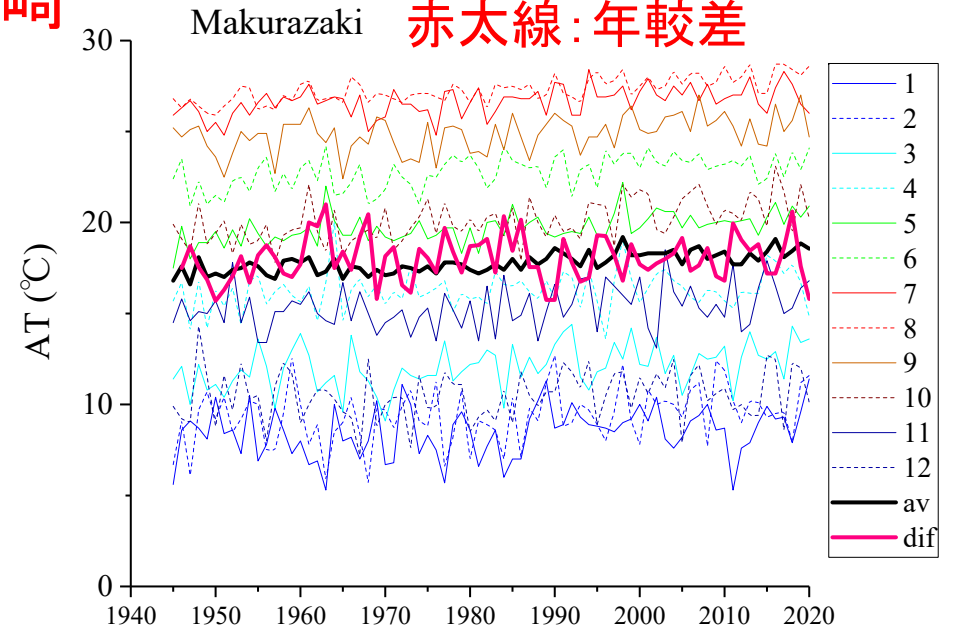


気温の長期変化：将来、年較差は？

那覇



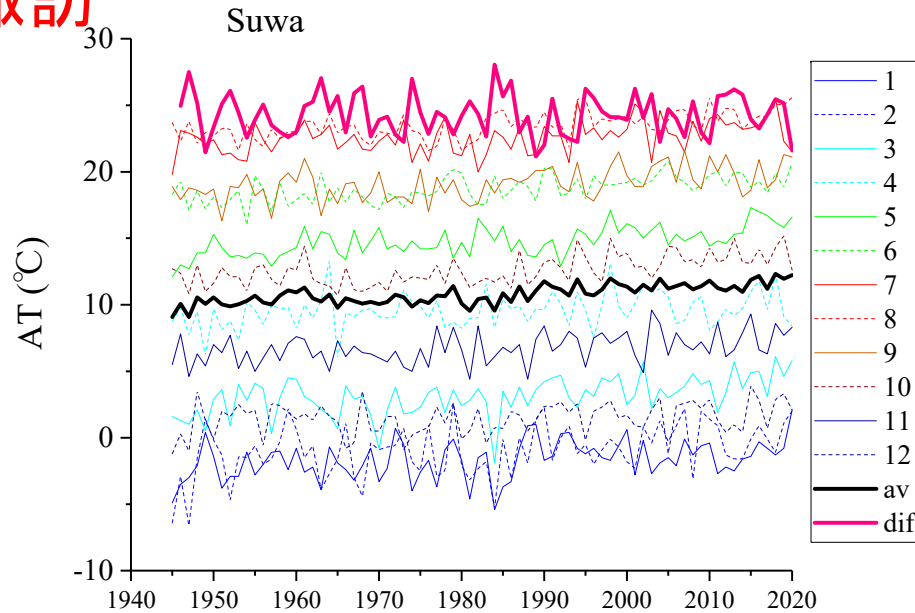
枕崎



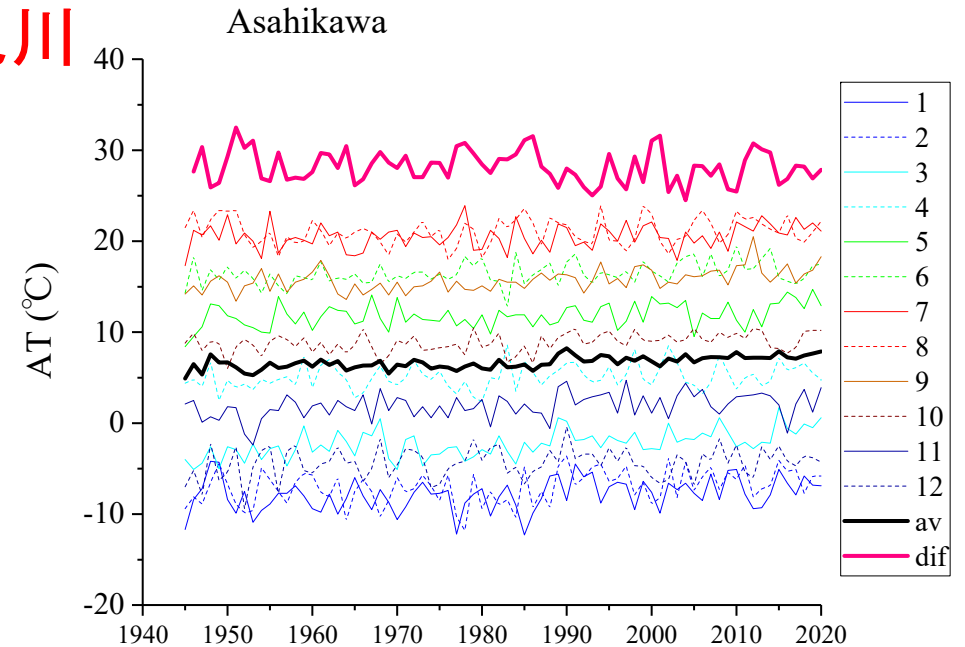
黒太線：年平均値

赤太線：年較差

諏訪



旭川



浅い湖沼では湖水と底泥と
の相互作用が重要？

霞ヶ浦の流域特性

Legend



- 霞ヶ浦
172 km², 120.5 km
- 北浦
36 km², 74.5 km
- 常陸利根川
12 km², 54.8 km

平均水深: 4 m

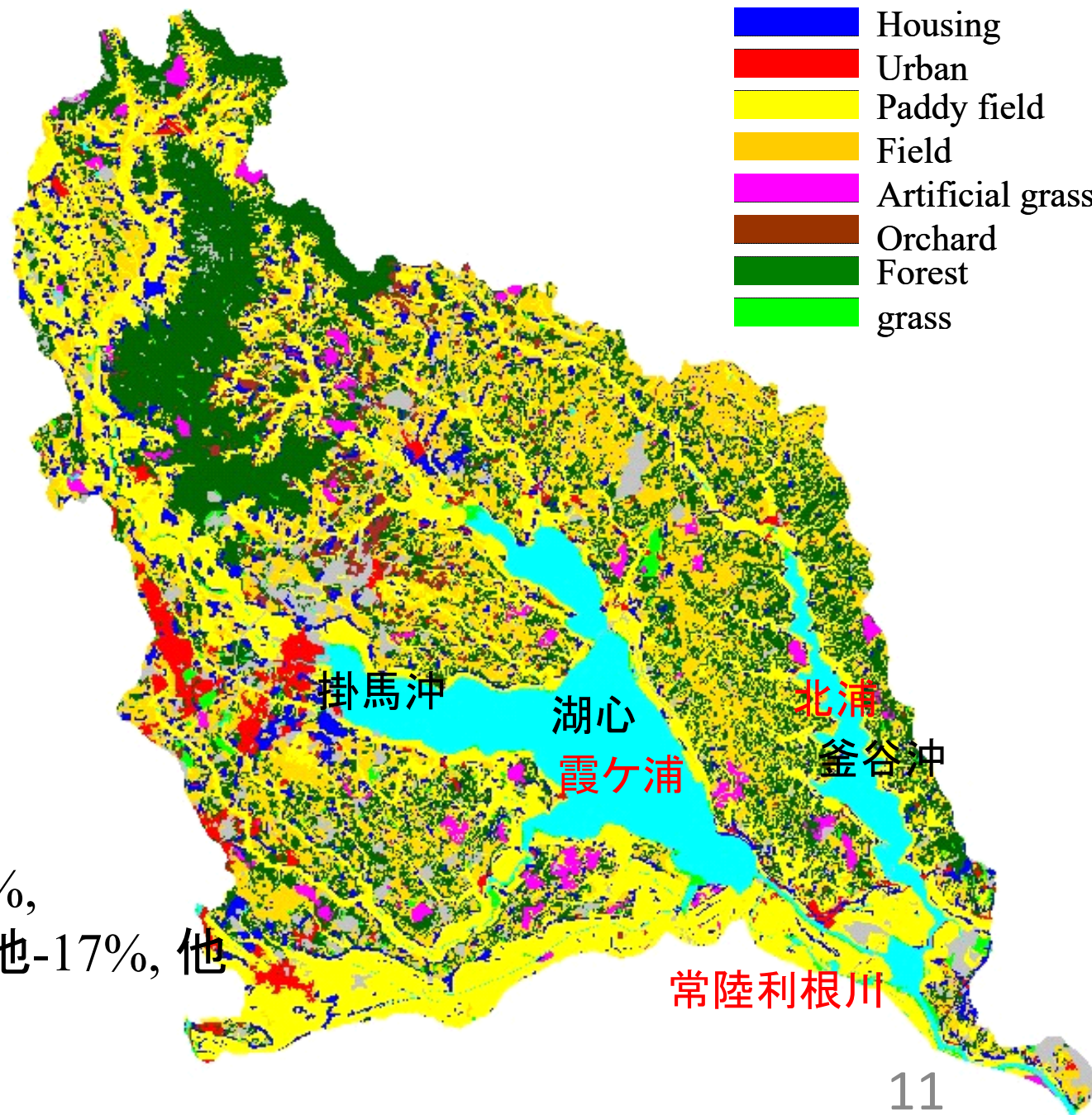
最大水深: 7 m

流域面積: 2156.7 km²

(湖面積を含む)

人口: 964,000

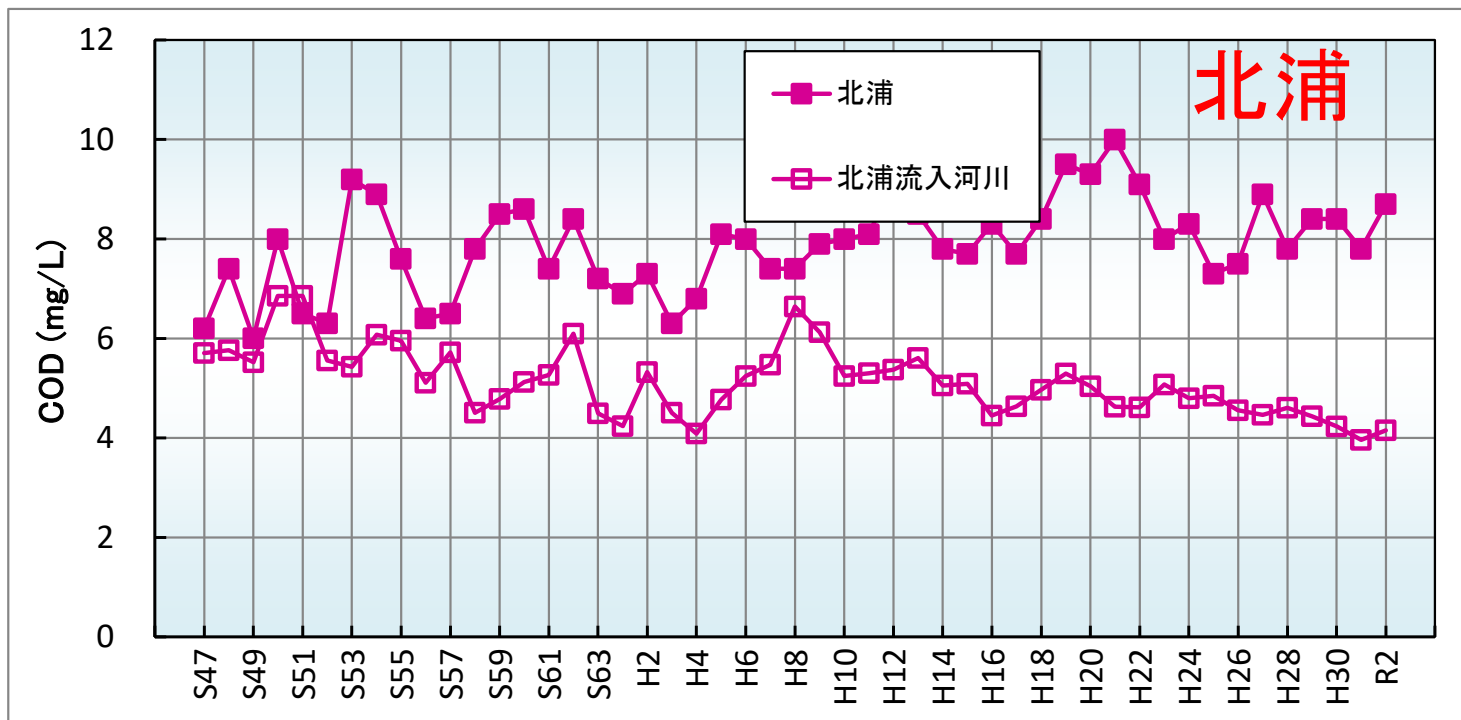
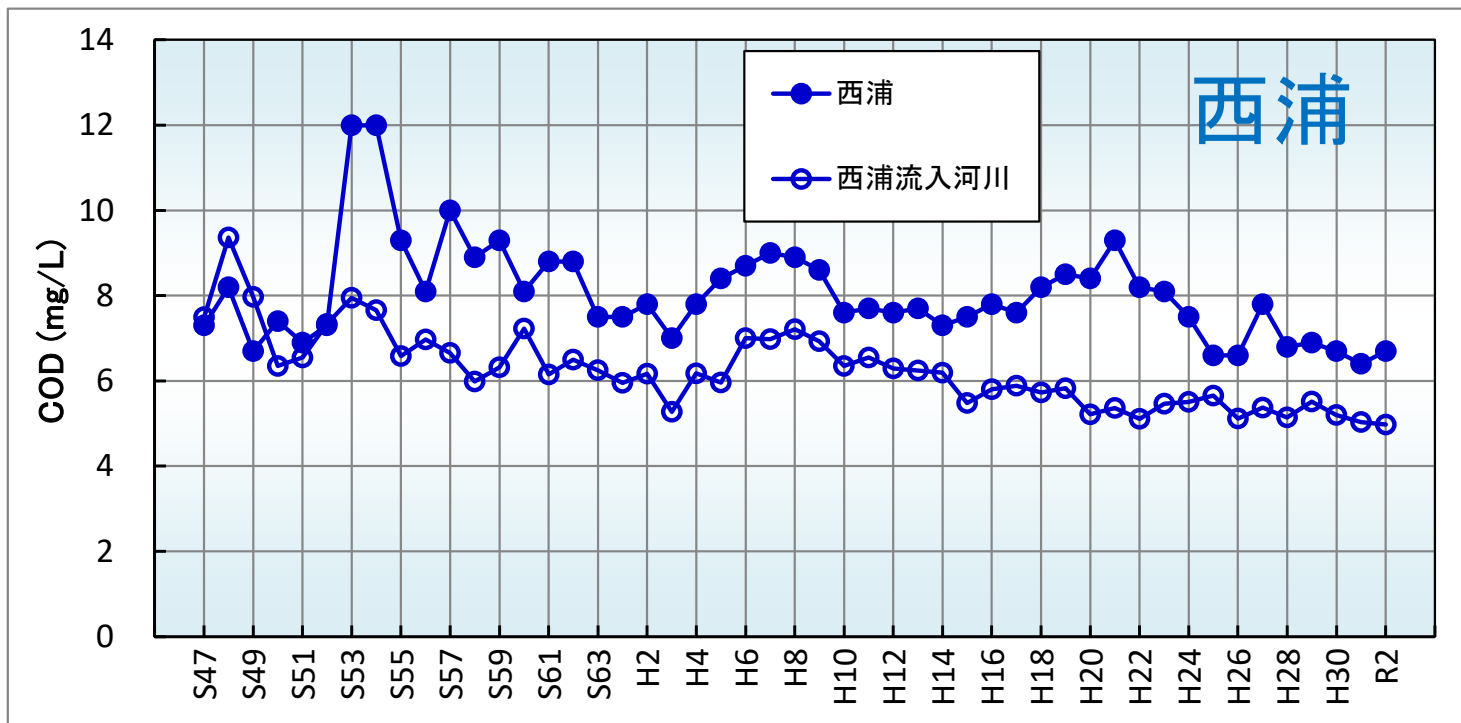
土地利用・被覆: 森林-20%,
水田-22%, 畑-16%, 市街地-17%, 他



COD

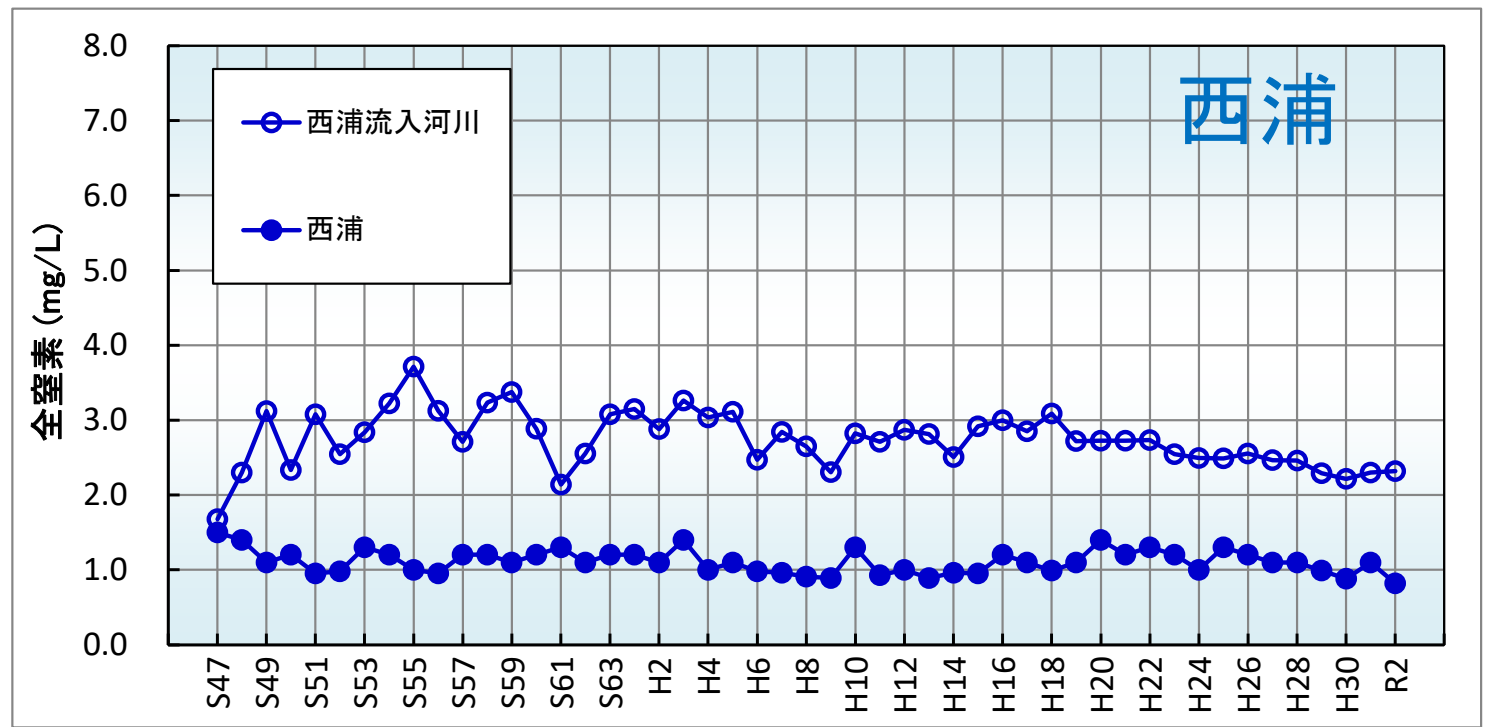
内部生産

西浦と北浦
の差は？

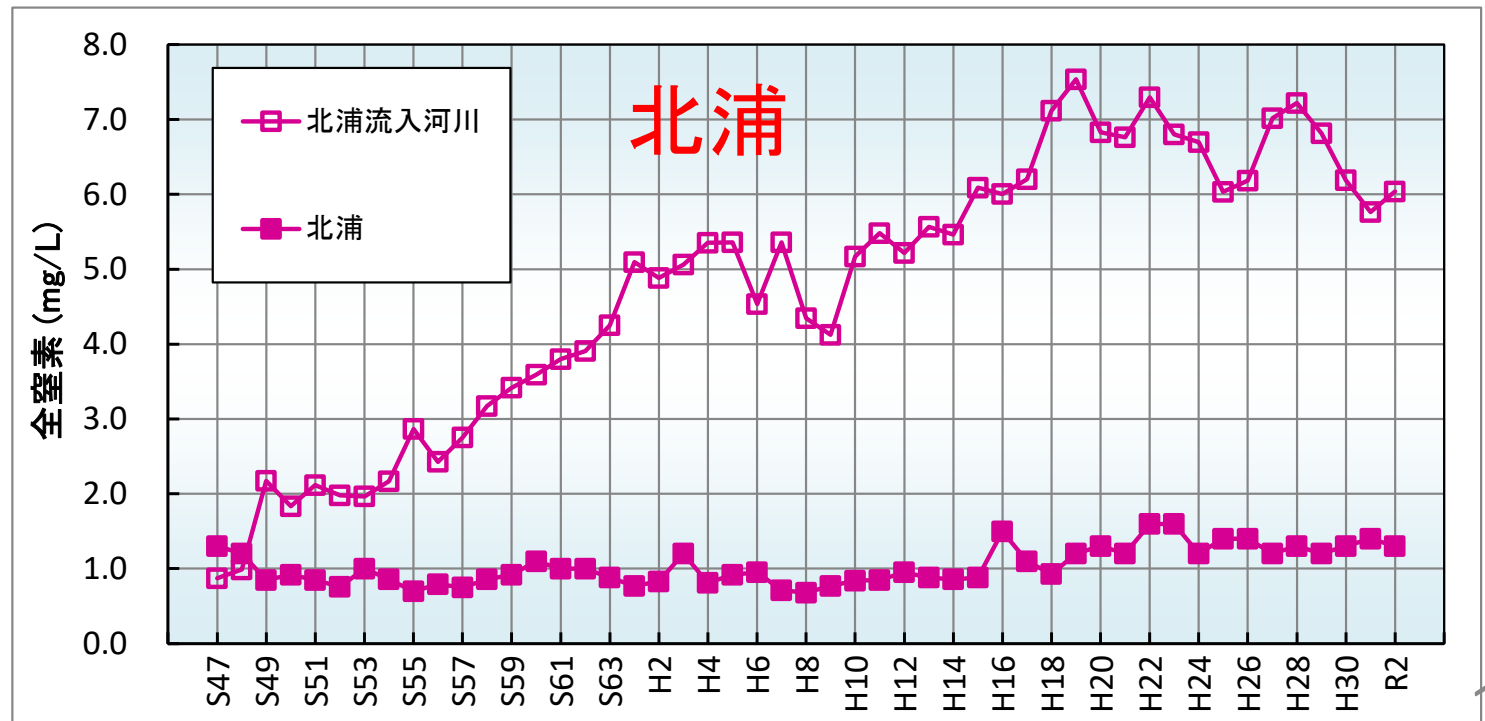


TN

脱窒



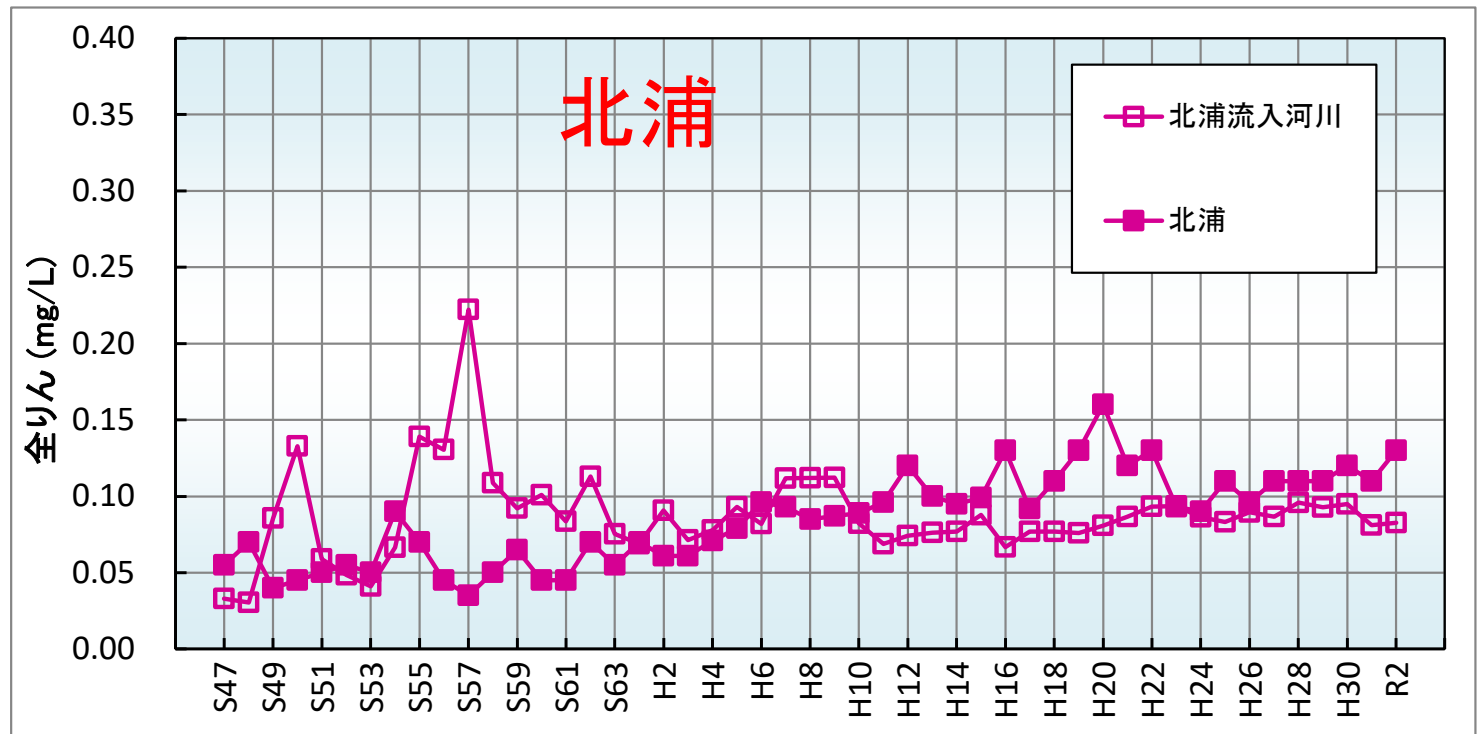
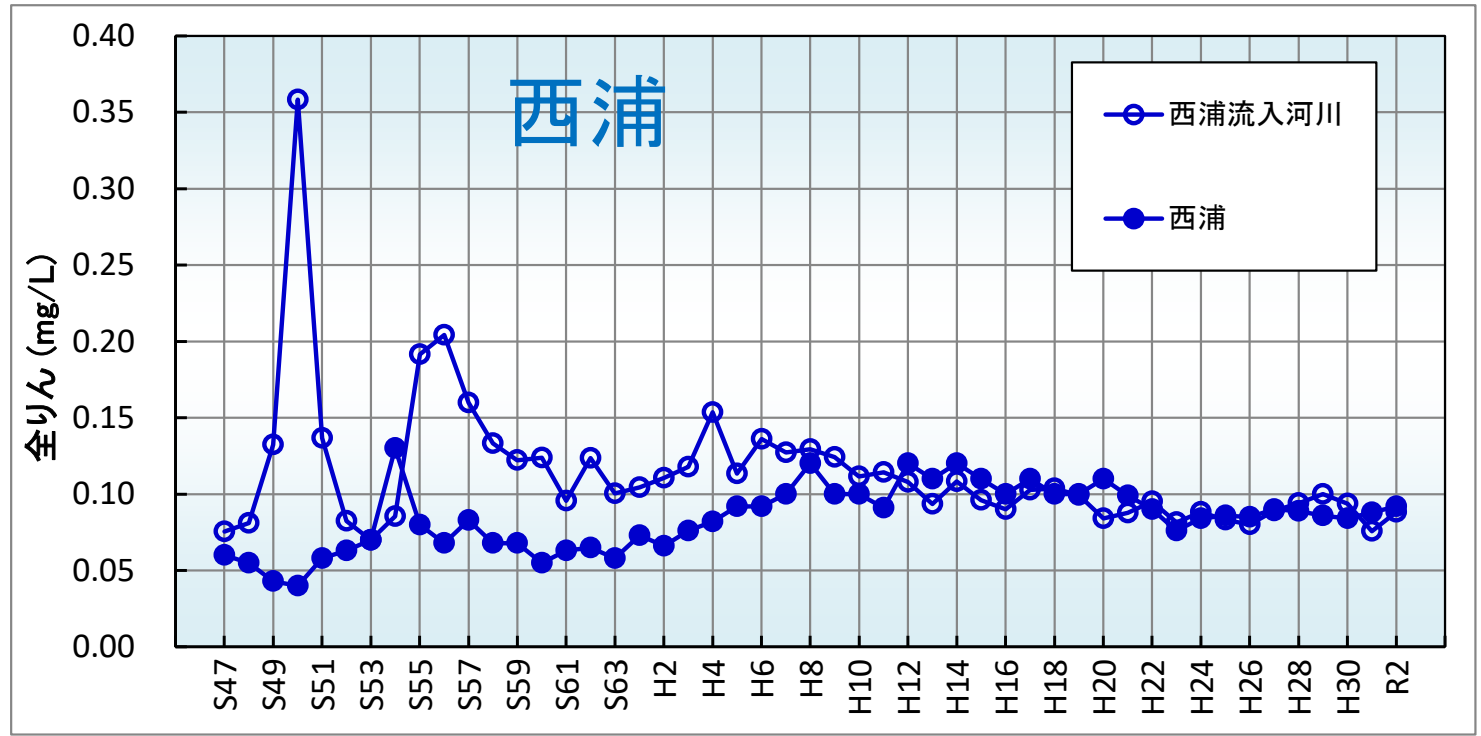
底層のDO 状態の差？



TP

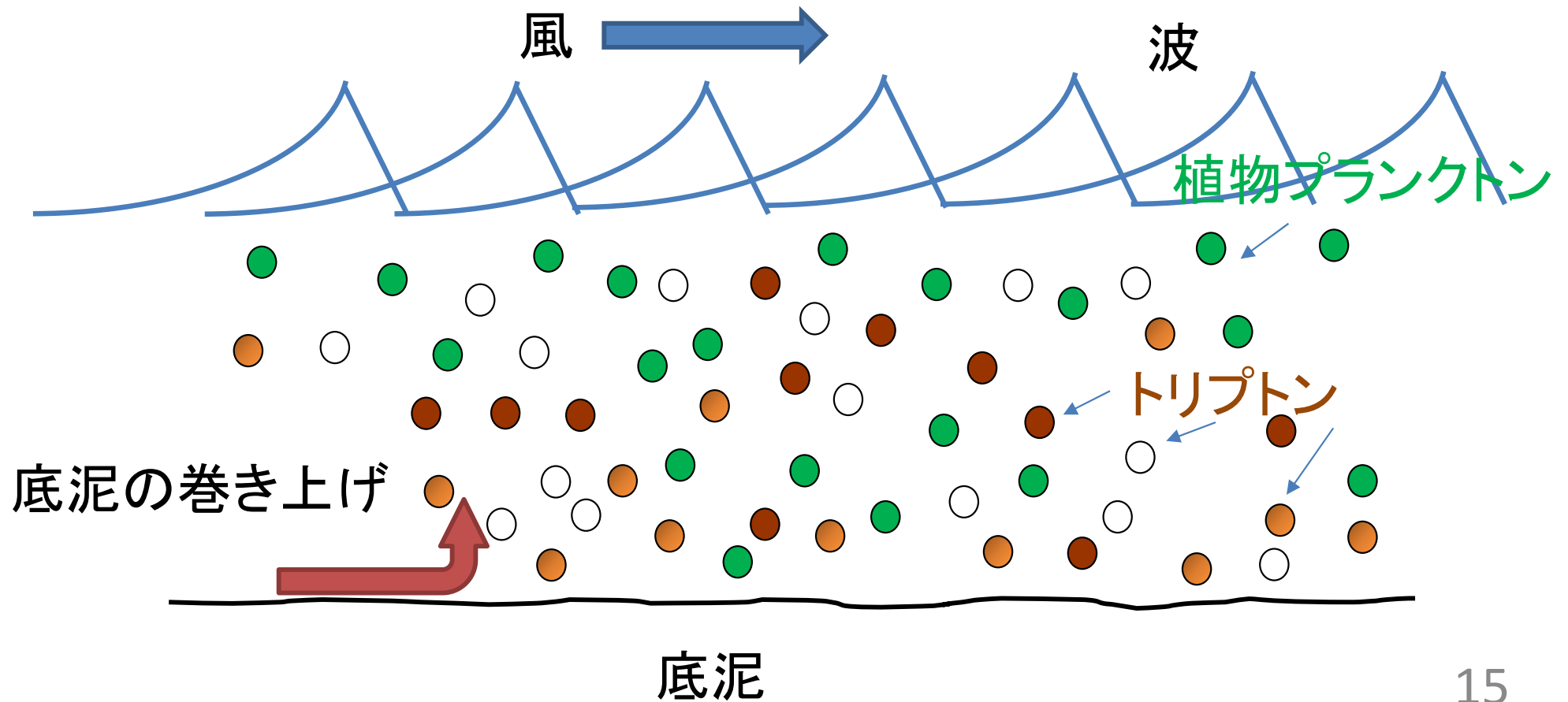
溶出

底層のDO 状態の差？



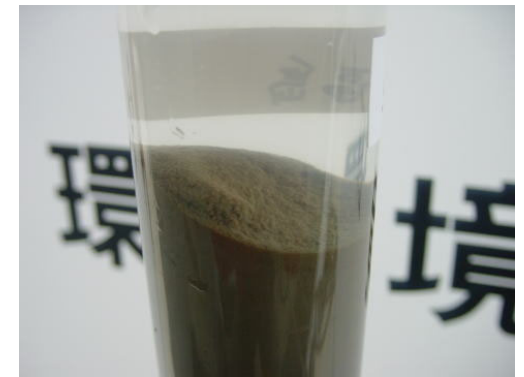
底泥の巻き上げ

光環境
ケイ素濃度
美観



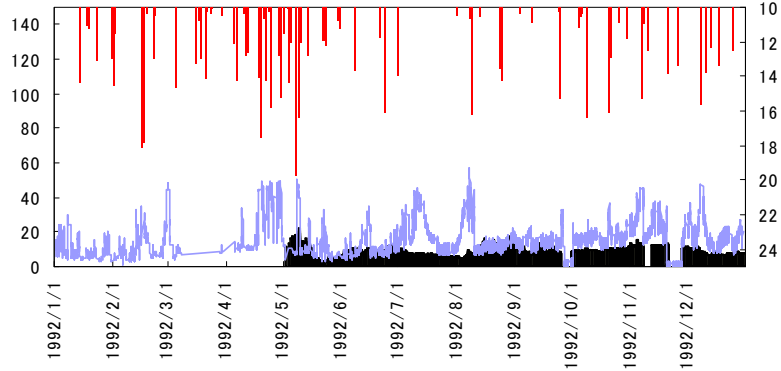
濁度の上昇

関他 (2006)



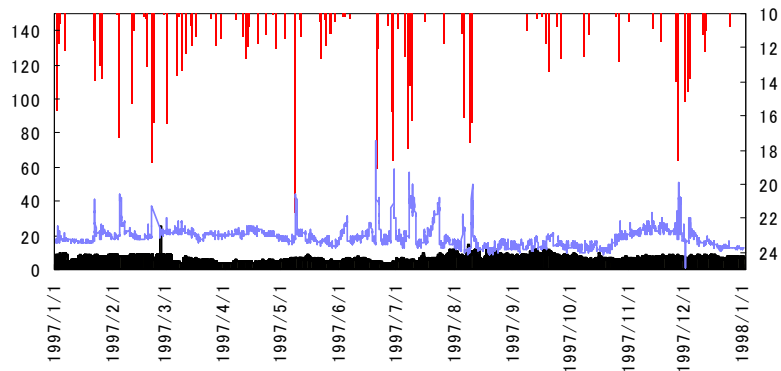
1992

1992 表層濁度



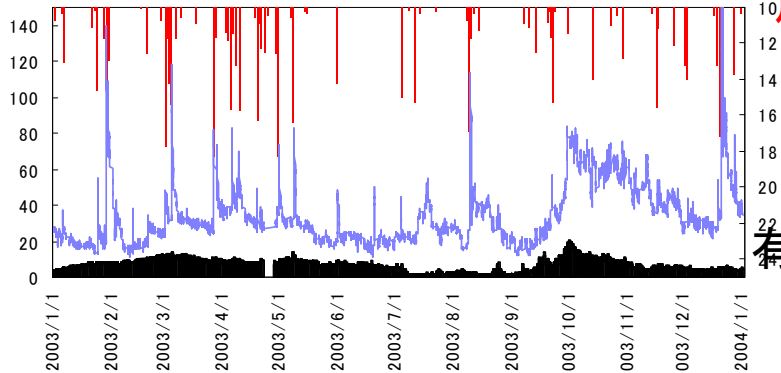
1997

1997 表層濁度



2003

2003 表層濁度



風速

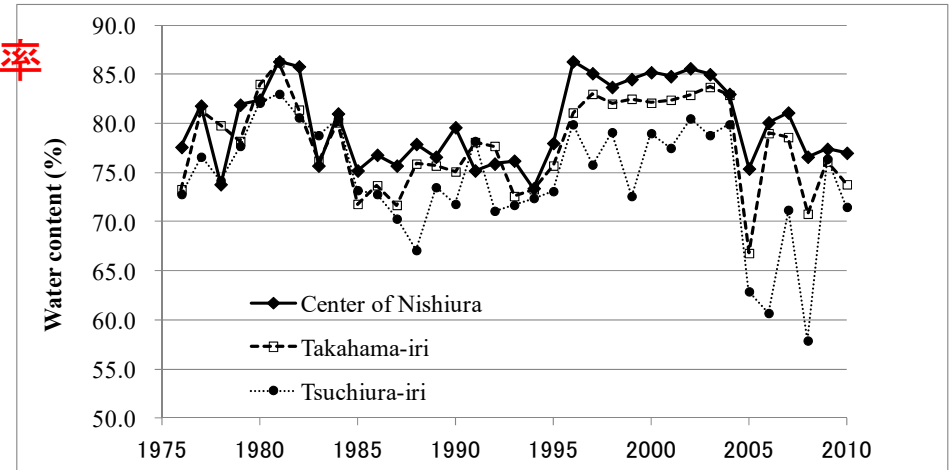
濁度

有機態SS

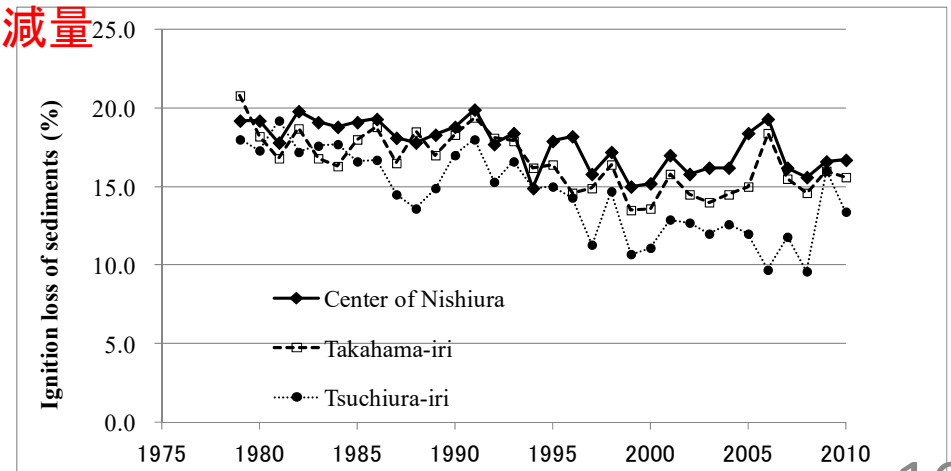
霞ヶ浦河川事務所

底泥組成

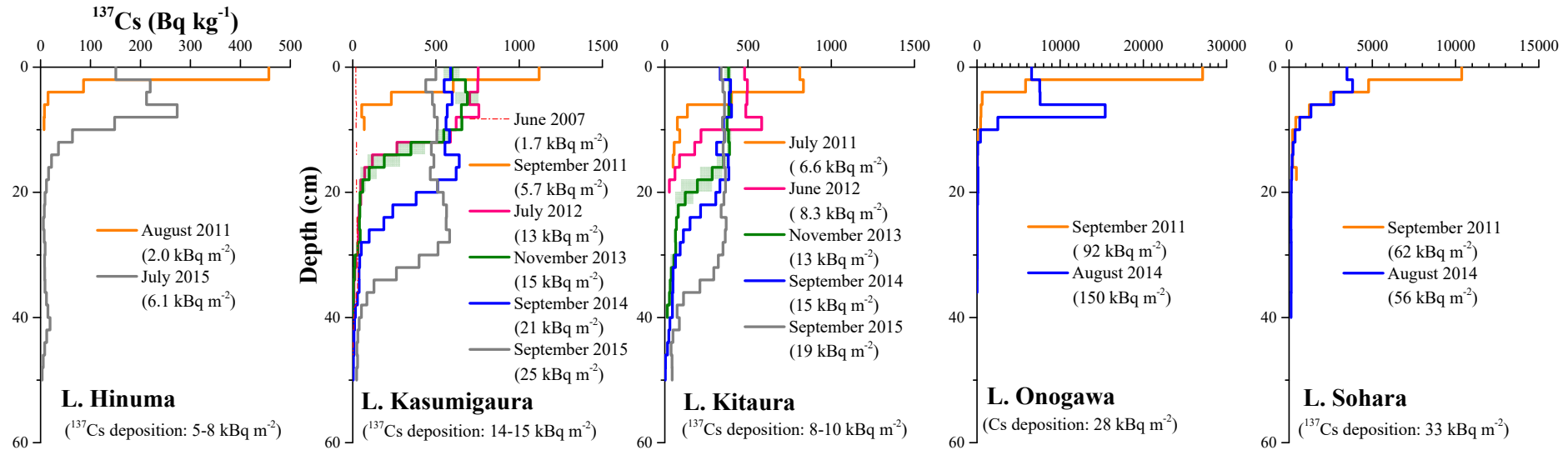
含水率



強熱減量



湖沼底泥中の ^{137}Cs の鉛直分布変化



澗沼

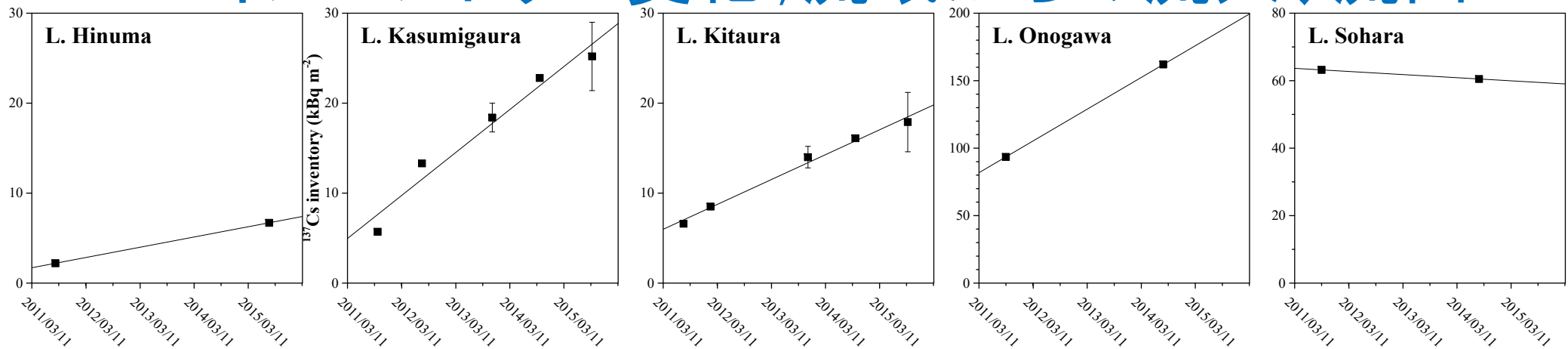
霞ヶ浦

北浦

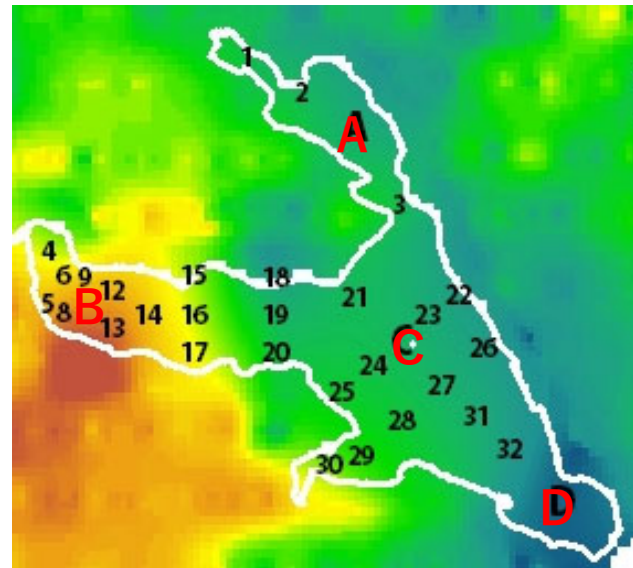
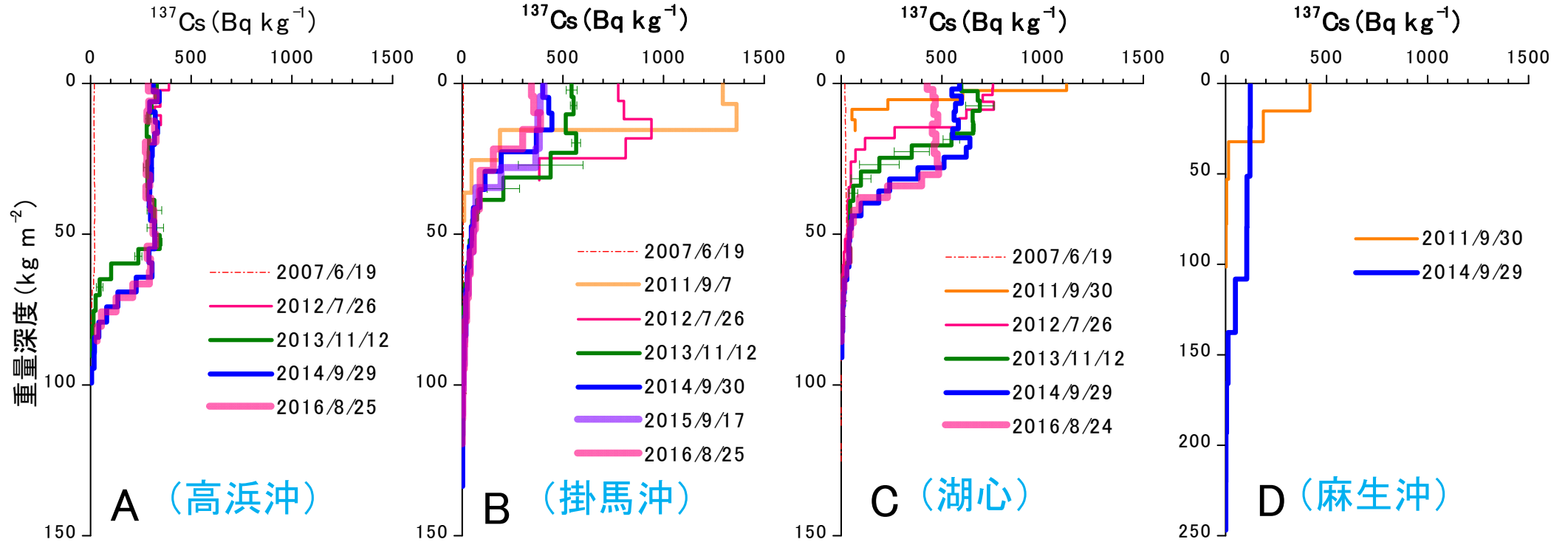
小野川湖

曾原湖

^{137}Cs インベントリー変化; 流域からの流入、流出

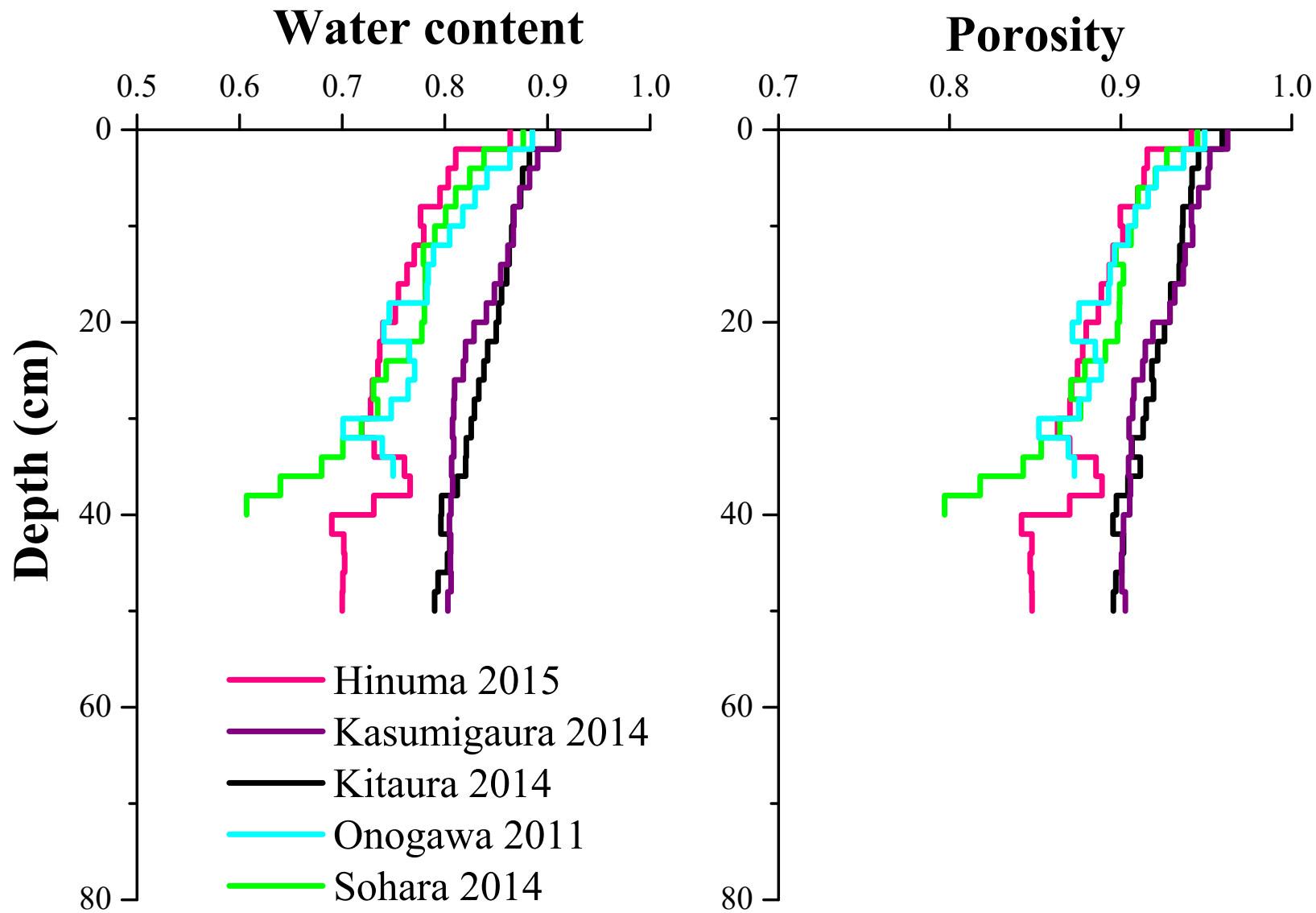


底質中の ^{137}Cs 濃度鉛直分布の経年変化(西浦)



Arai et al. 投稿中

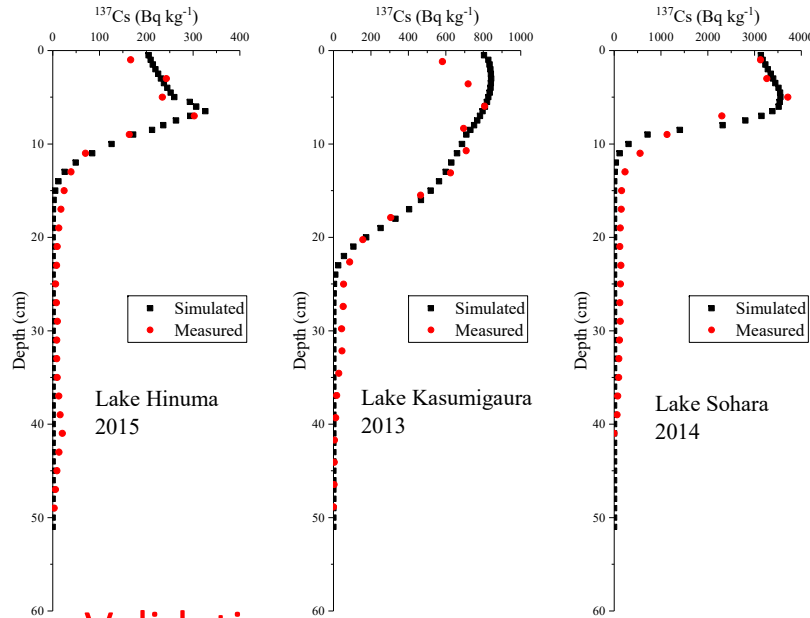
底質の含水率、間隙率の鉛直分布



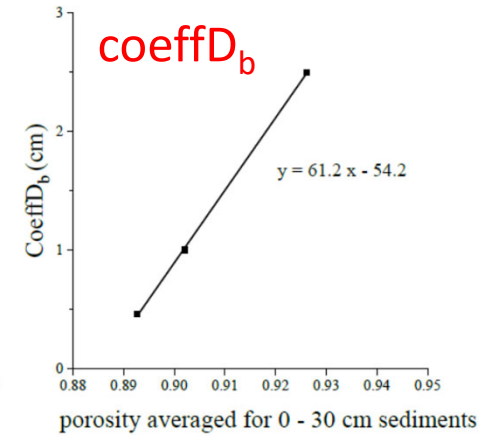
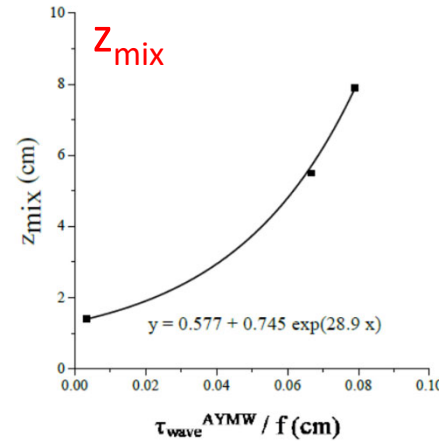
Fukushima et al. (2018) STOTEN

底質中の¹³⁷Cs濃度鉛直分布の数値シミュレーション

Calibration



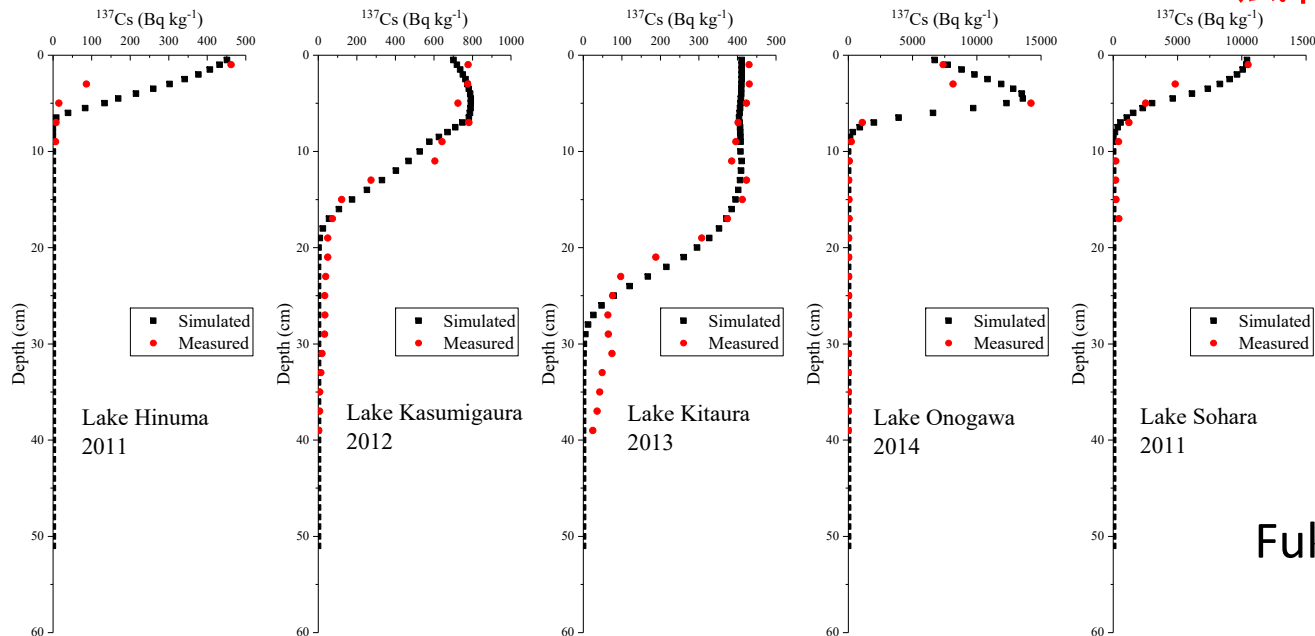
$$\begin{aligned}
 D_{pd} &= \beta_1, & z \leq z_{mix} \\
 D_{pd} &= \beta_1 \exp(-(z-z_{mix})/coeffD_b), & z_{mix} < z \leq z_b \\
 D_{pd} &= 0, & z > z_b
 \end{aligned}$$



風特性

底泥間隙率

Validation



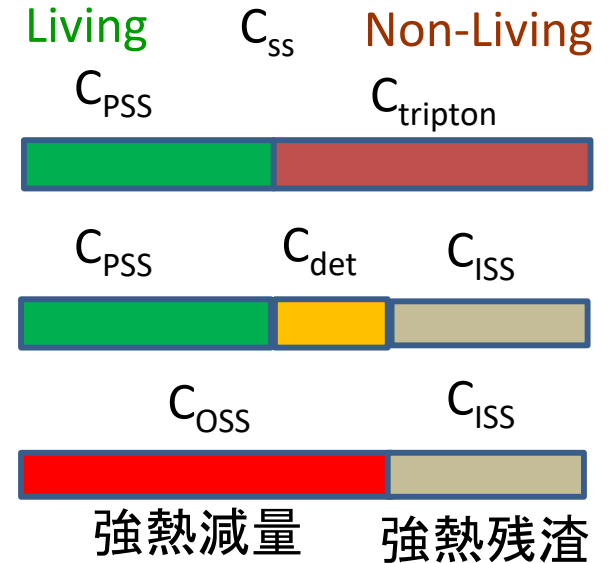
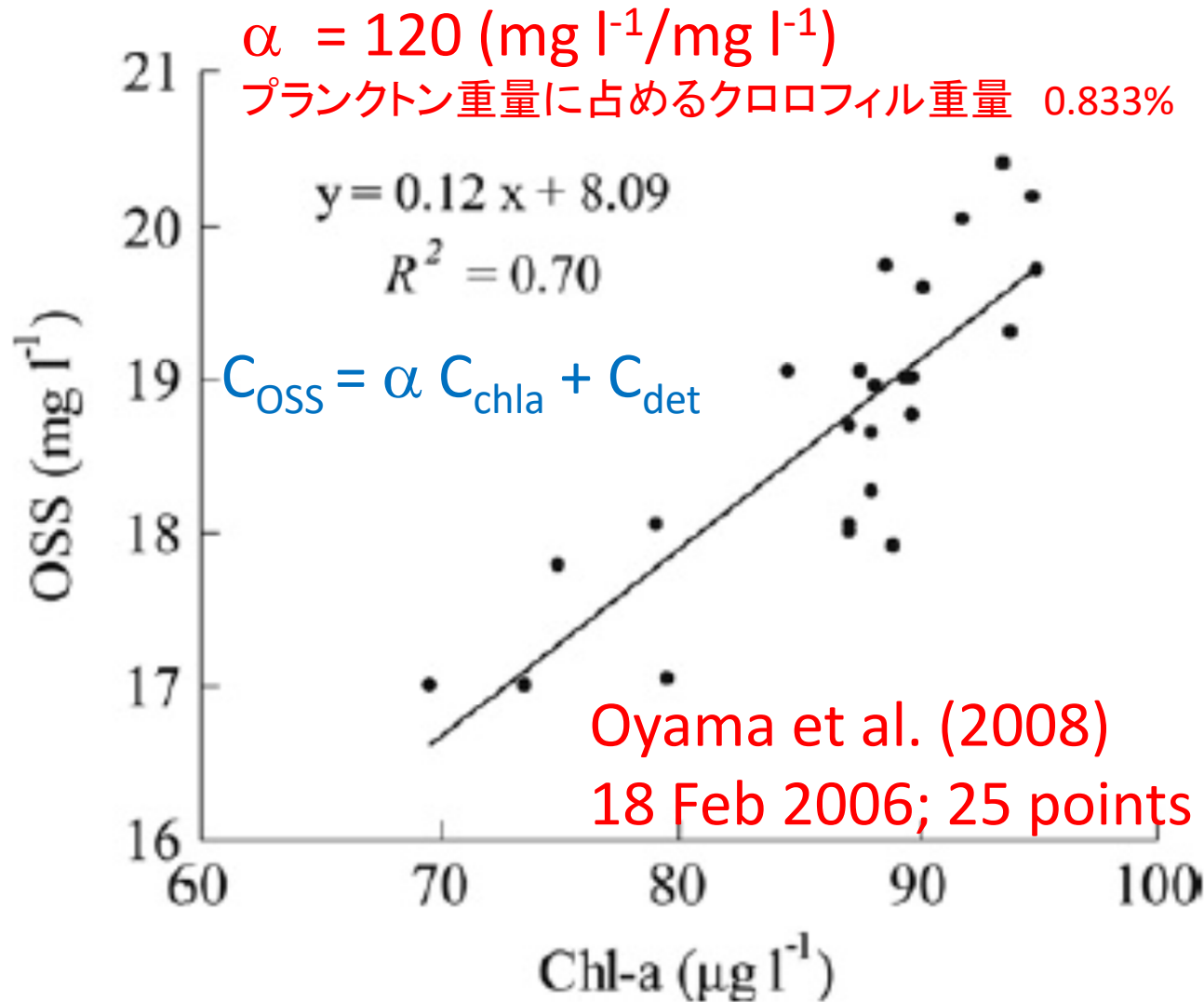
Fukushima et al. (2018) STOTEN

トリプトン (tripton) 濃度の
長期変化の原因は？

トリプトン濃度の推定方法

Fukushima et al. (2019)

SN App Sci



C_{SS} : SS

$C_{tription}$: tripton

C_{PSS} : planktonic SS

C_{det} : detritus SS

C_{ISS} : inorganic SS

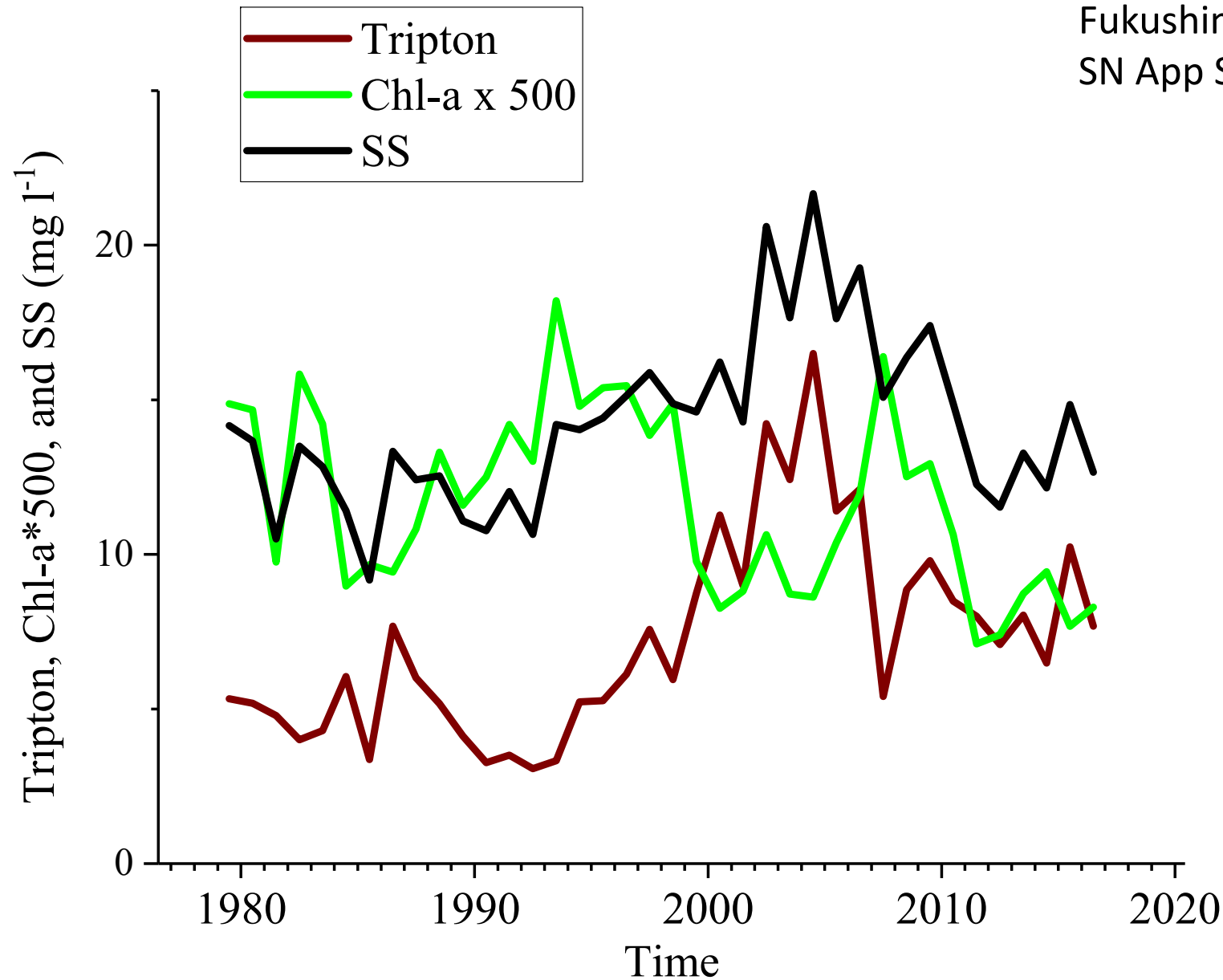
C_{OSS} : organic SS

$C_{chl a}$: chlorophyll a

- ◆ $C_{SS} = C_{PSS} + C_{tription} = C_{PSS} + C_{det} + C_{ISS} = C_{OSS} + C_{ISS}$
- ◆ $C_{PSS} = \alpha C_{chl a}$, then $C_{OSS} = \alpha C_{chl a} + C_{det}$, $C_{tription} = C_{SS} - \alpha C_{chl a}$
- ◆ α and C_{det} are constant over the whole lake.

霞ヶ浦湖心でのトリプトン、クロロフィルa、 SSの経年変化

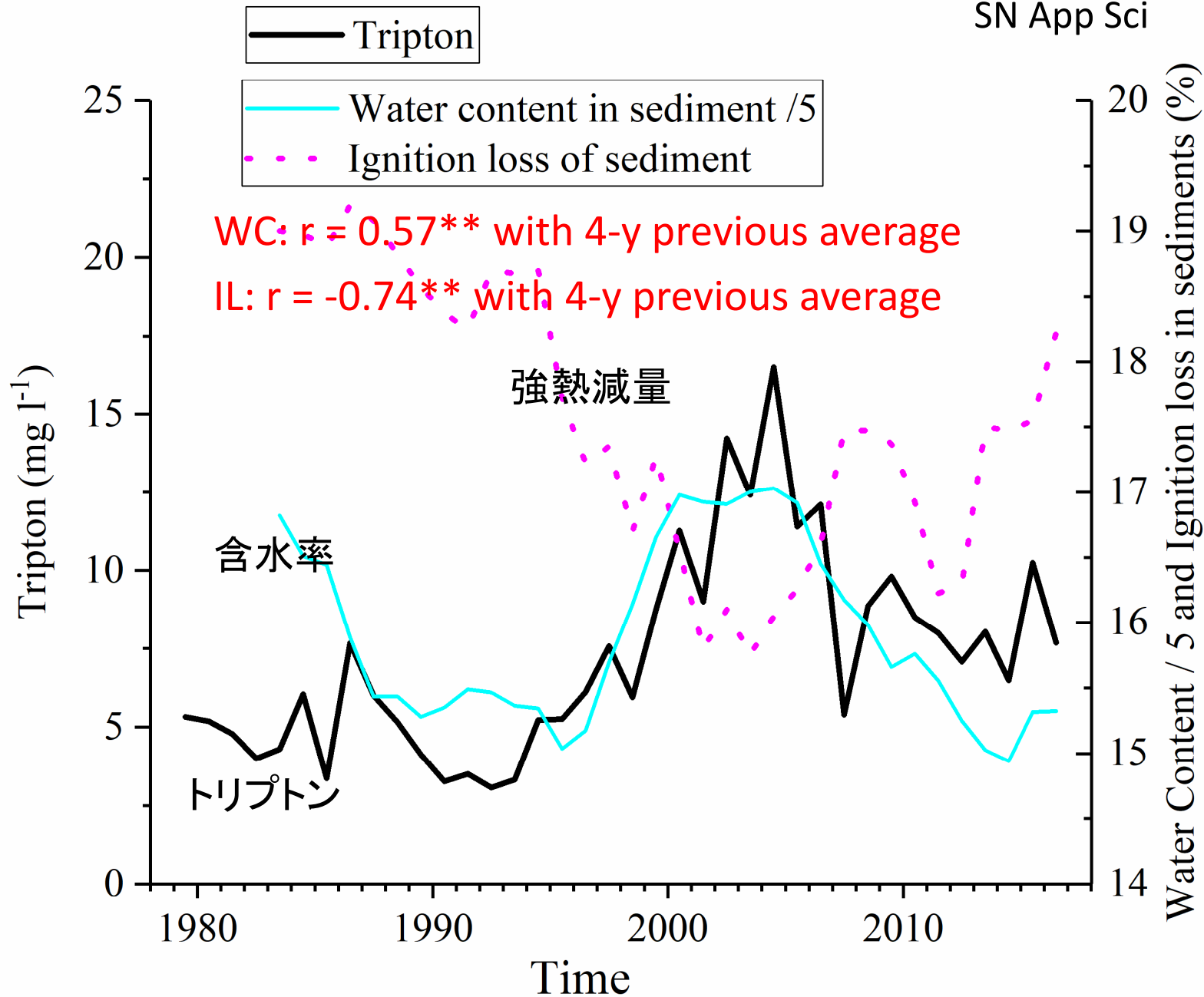
Fukushima et al. (2019)
SN App Sci



トリプトン濃度と底泥含水率、強熱減量の経年変化

Fukushima et al. (2019)

SN App Sci



水理実験での底泥巻き上げ特性

底泥流送限界の応力

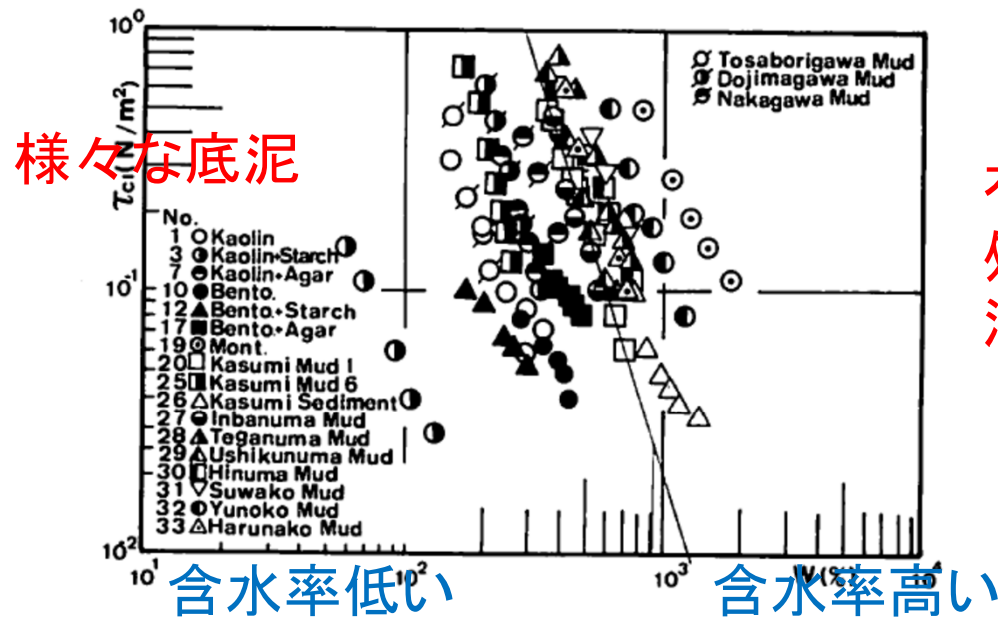


図 8-1 流送限界と含水比の関係

Fig. 8-1 Relationships between the shear stress for the limit of mud particle's movement and water content in percent of dry weight

大坪 (1983)

底泥流送限界の応力

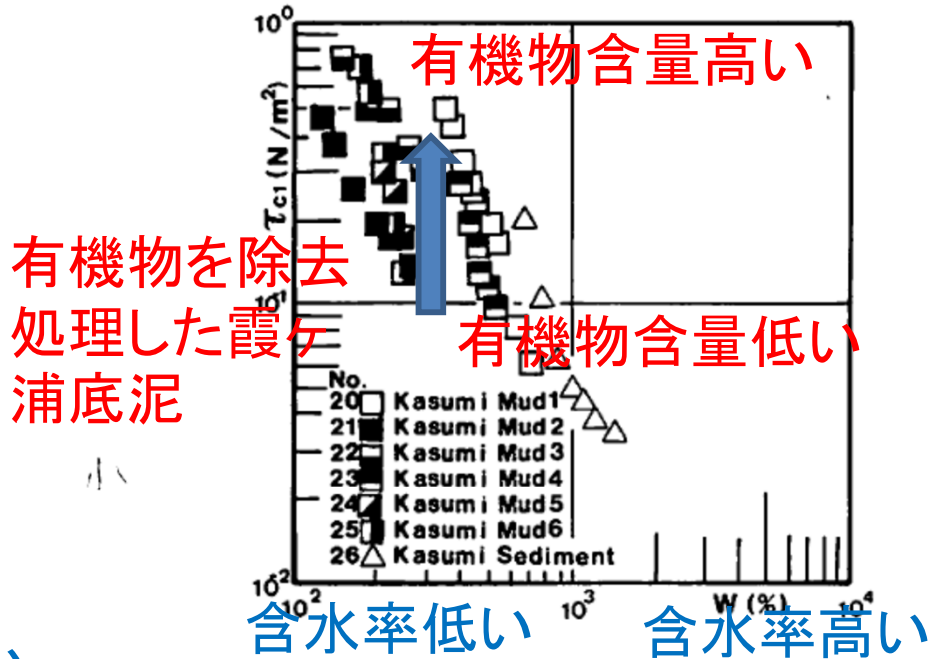


図 8-3 流送限界に及ぼす底泥の有機物処理の影響

Fig. 8-3 Effects of treatments for the organic matter in mud on the shear stress of the limit of mud particle's movement

底泥含水率と強熱減量によるトリプトン濃度推定モデル

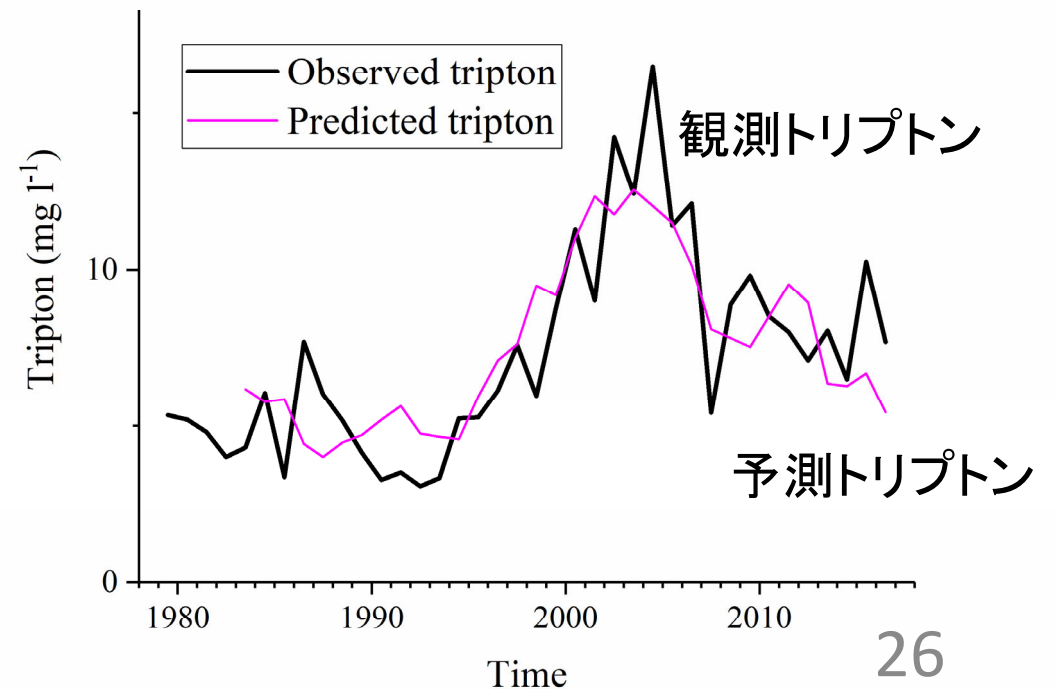
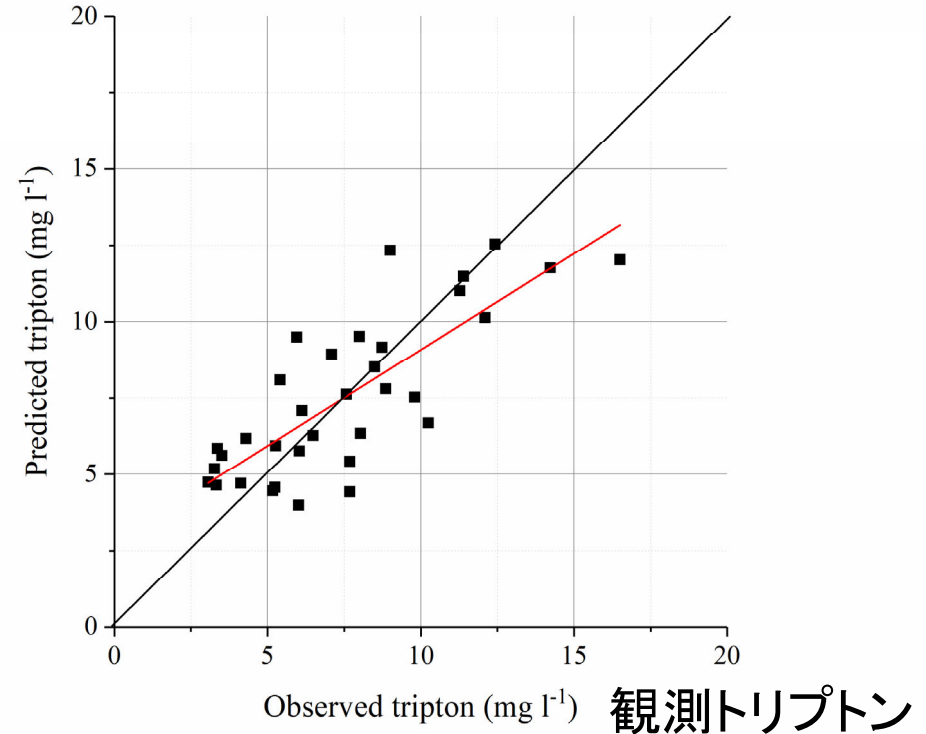
$$C_{\text{tripton}} = 0.294 S_{\text{WC } 4\text{yav}} - 1.88 S_{\text{IL } 4\text{yav}} + 17.10$$

$S_{\text{WC } 4\text{yav}}$ and $S_{\text{IL } 4\text{yav}}$ are sediment WC and IL averaged for the previous 4 y, respectively.

底泥巻き上げやすい → 高いトリプトン濃度

Fukushima et al. (2019)
SN App Sci

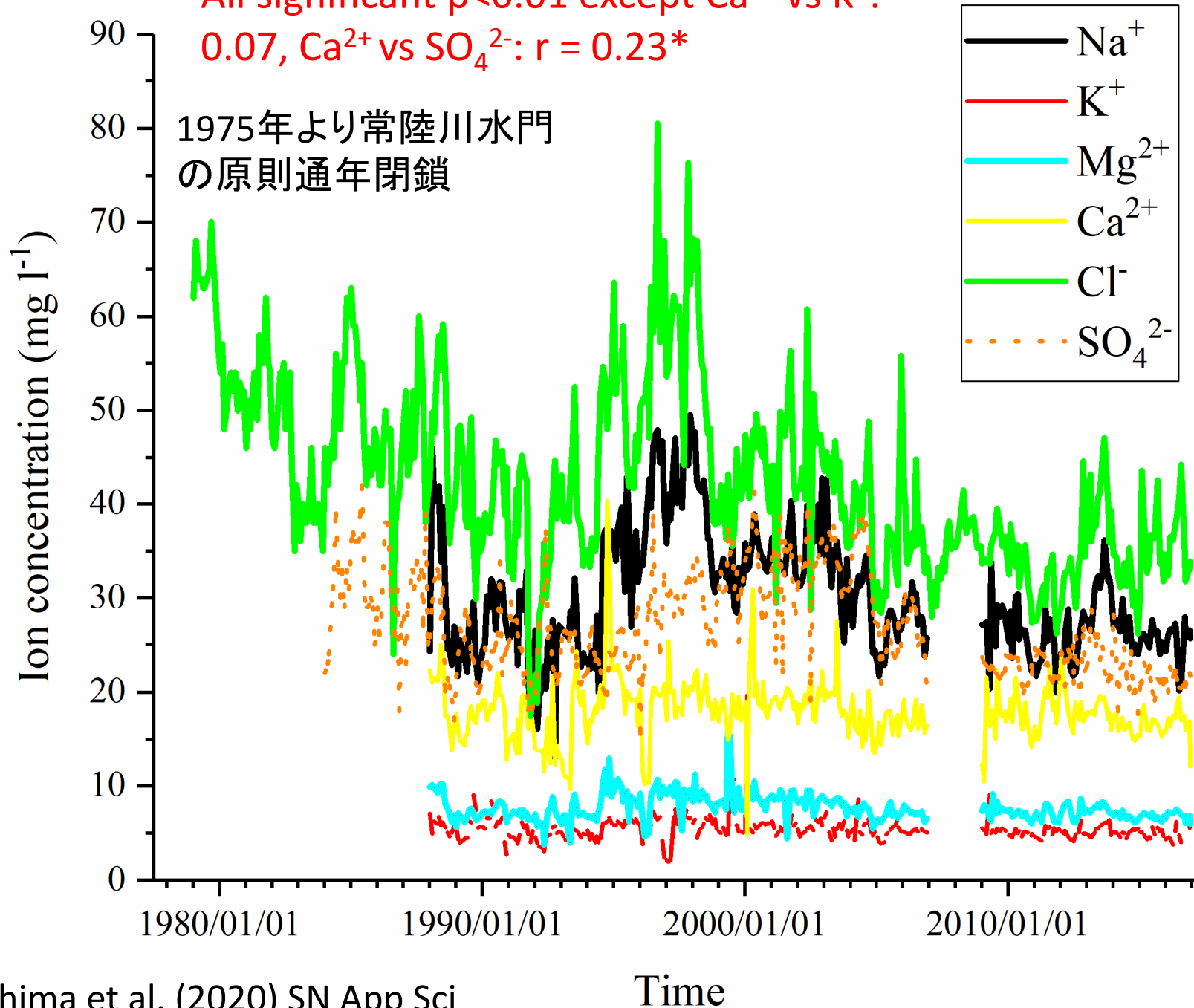
予測トリプトン $r^2 = 0.63$, adjusted $r^2 = 0.61$, $n=34$



底泥含水率の長期変化は
なぜ生じたか？

霞ヶ浦湖心におけるミネラル成分濃度の変化

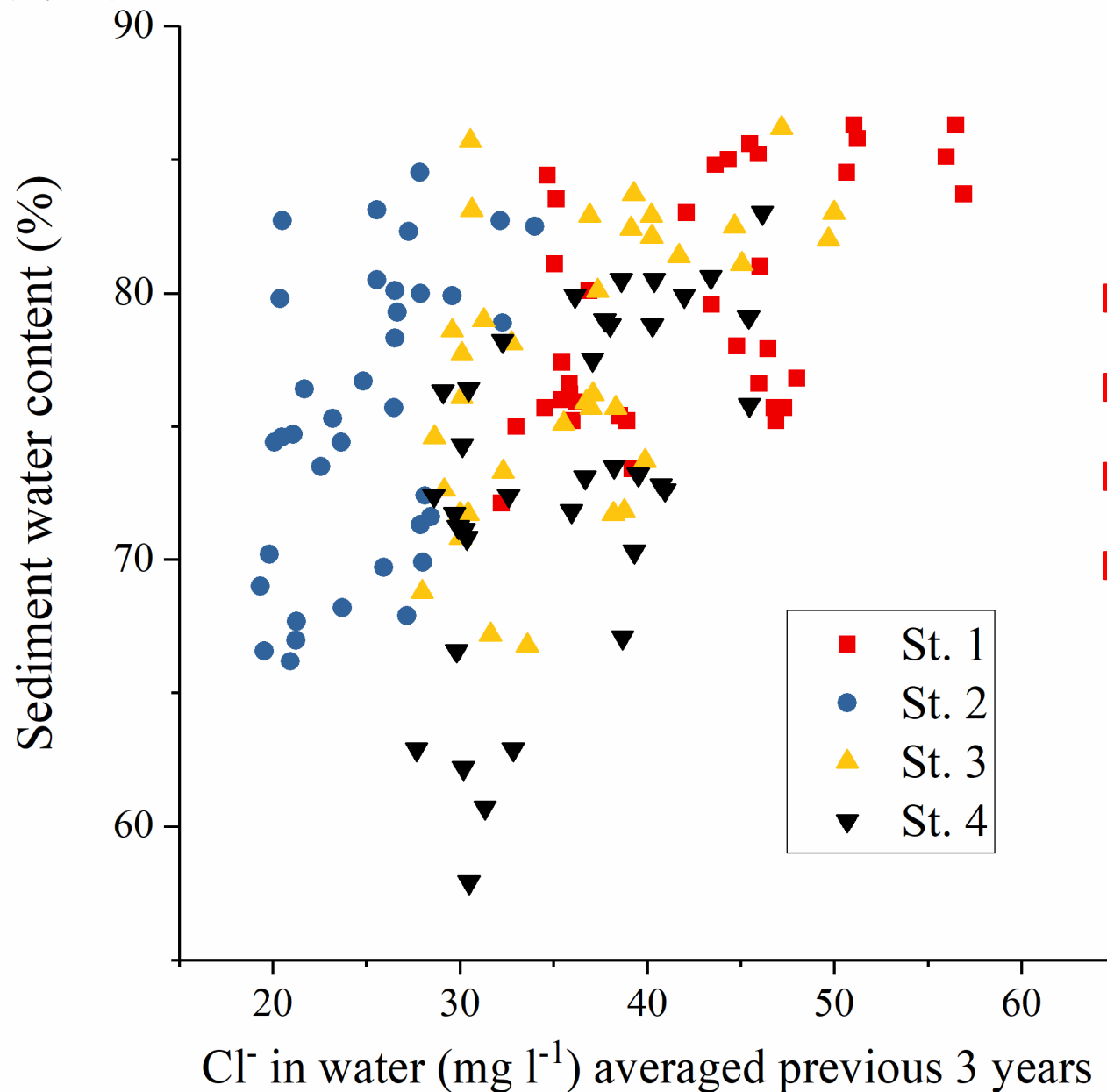
All significant $p < 0.01$ except Ca^{2+} vs K^+ :
 0.07 , Ca^{2+} vs SO_4^{2-} : $r = 0.23^*$



湖水中の塩化物イオン濃度と底泥含水率の関係

底質の含水率

Fukushima et al. (2020) SN App Sci



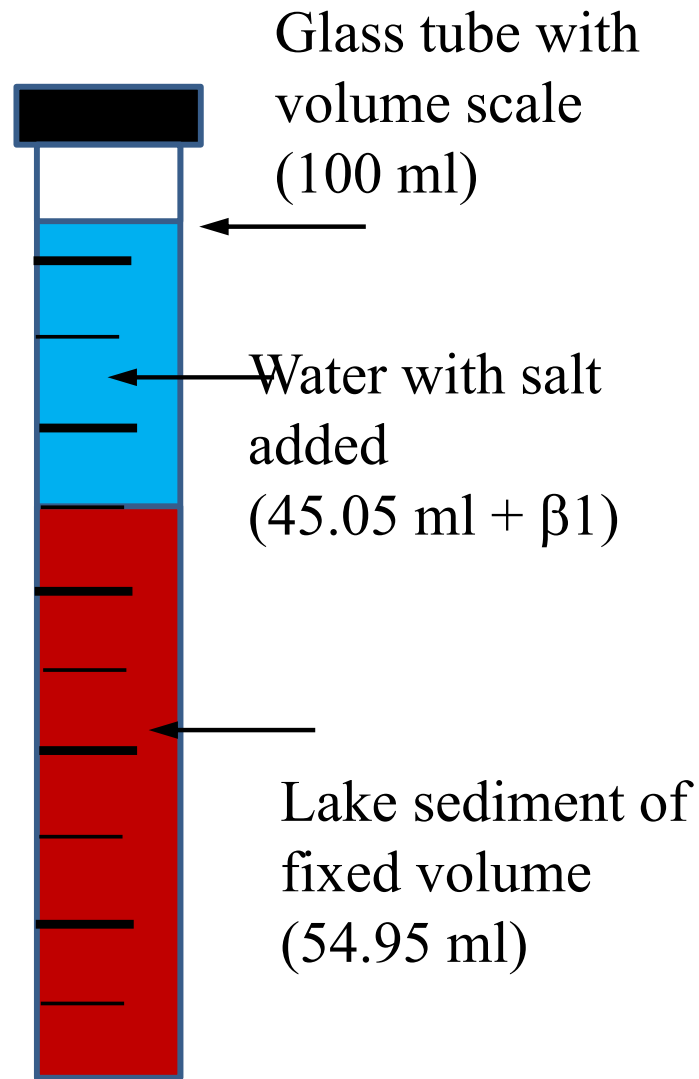
$r = 0.55^{**}$ at St. 1

$r = 0.46^{**}$ at St. 2

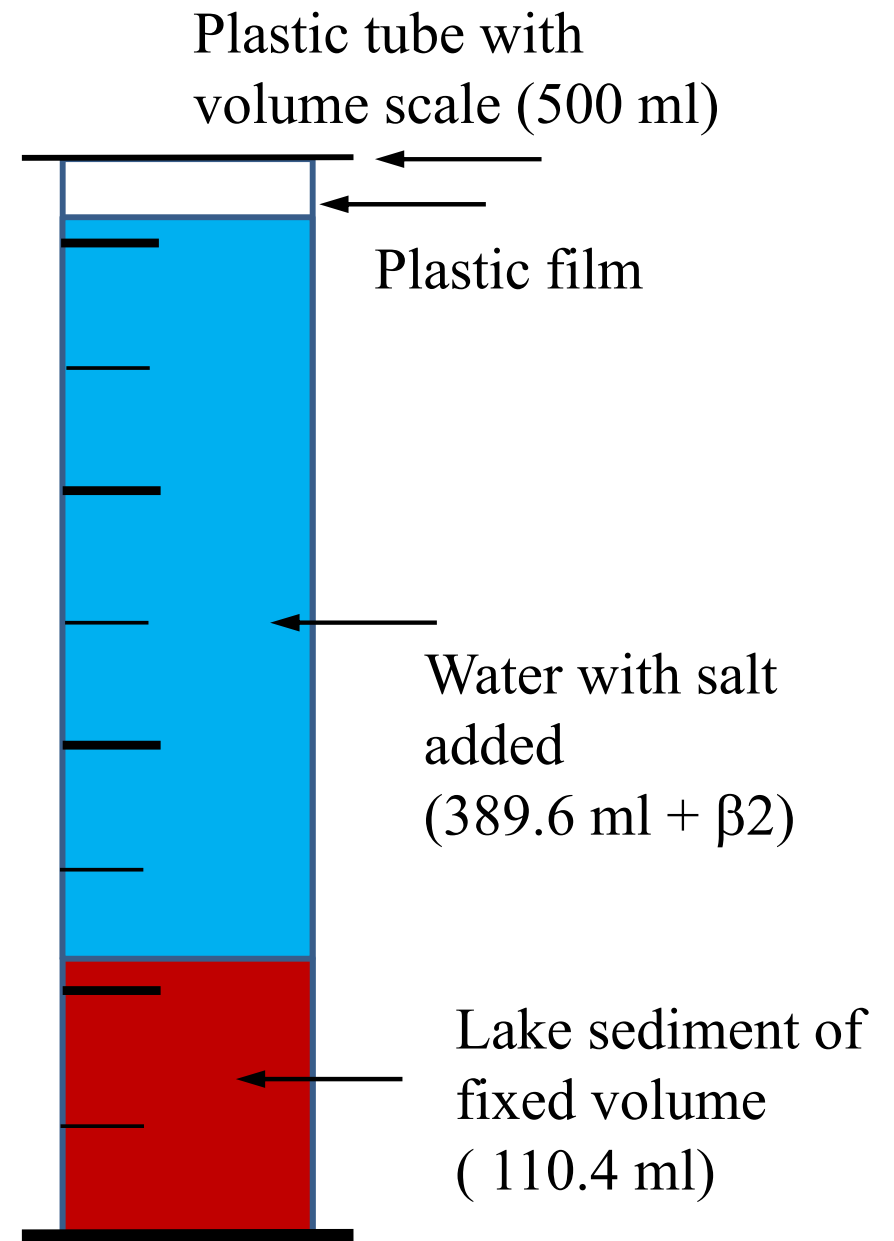
$r = 0.53^{**}$ at St. 3

$r = 0.59^{**}$ at St. 4

室内実験での確認

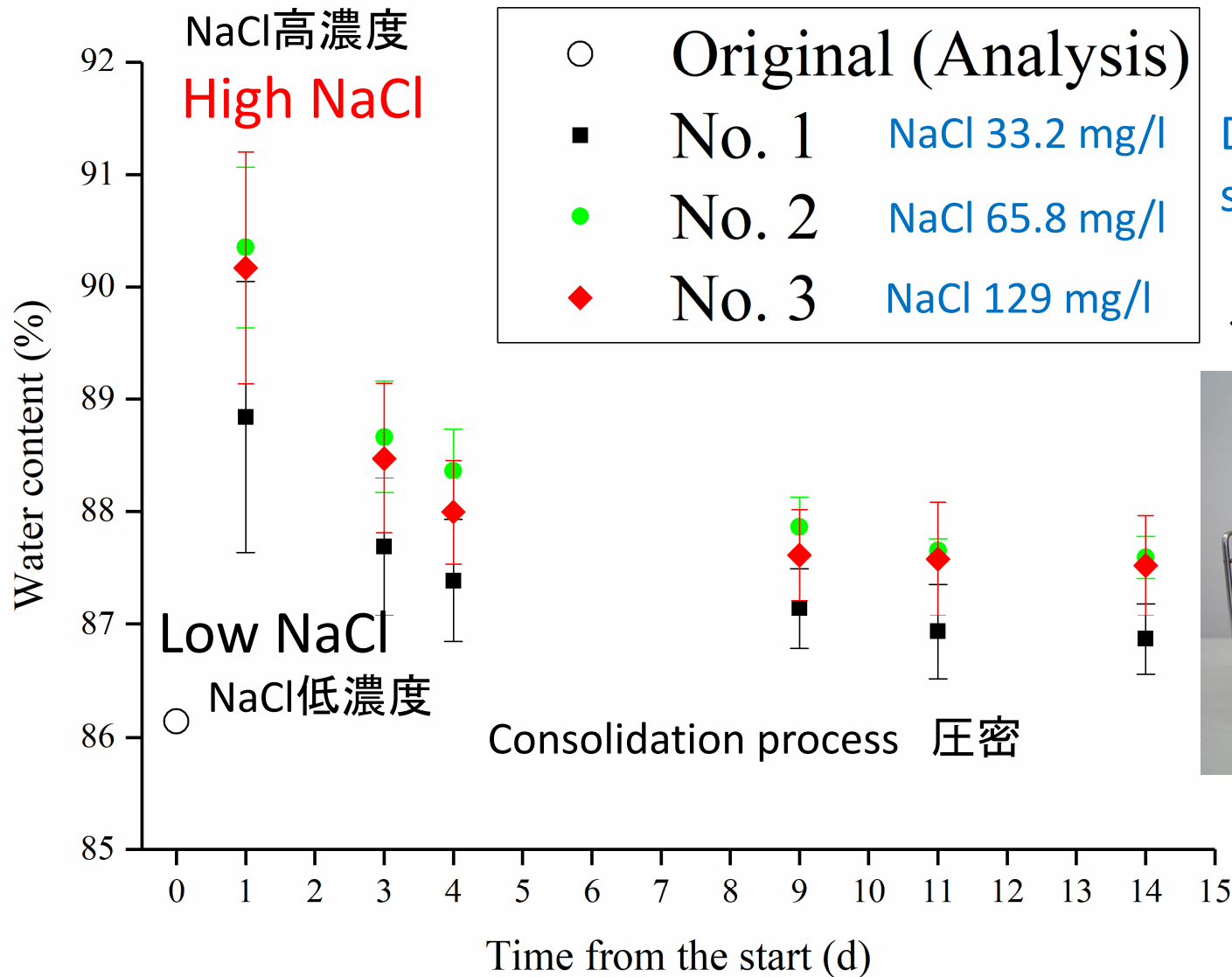


(1) イオン濃度の底泥含水率への影響



(2) イオン濃度の湖水中濁度への影響

含水率の実験結果



Agree to Shiraki
(1964)

Disagree to Yilmaz &
Marschalko (2014)

Difference in clay or
salinity range

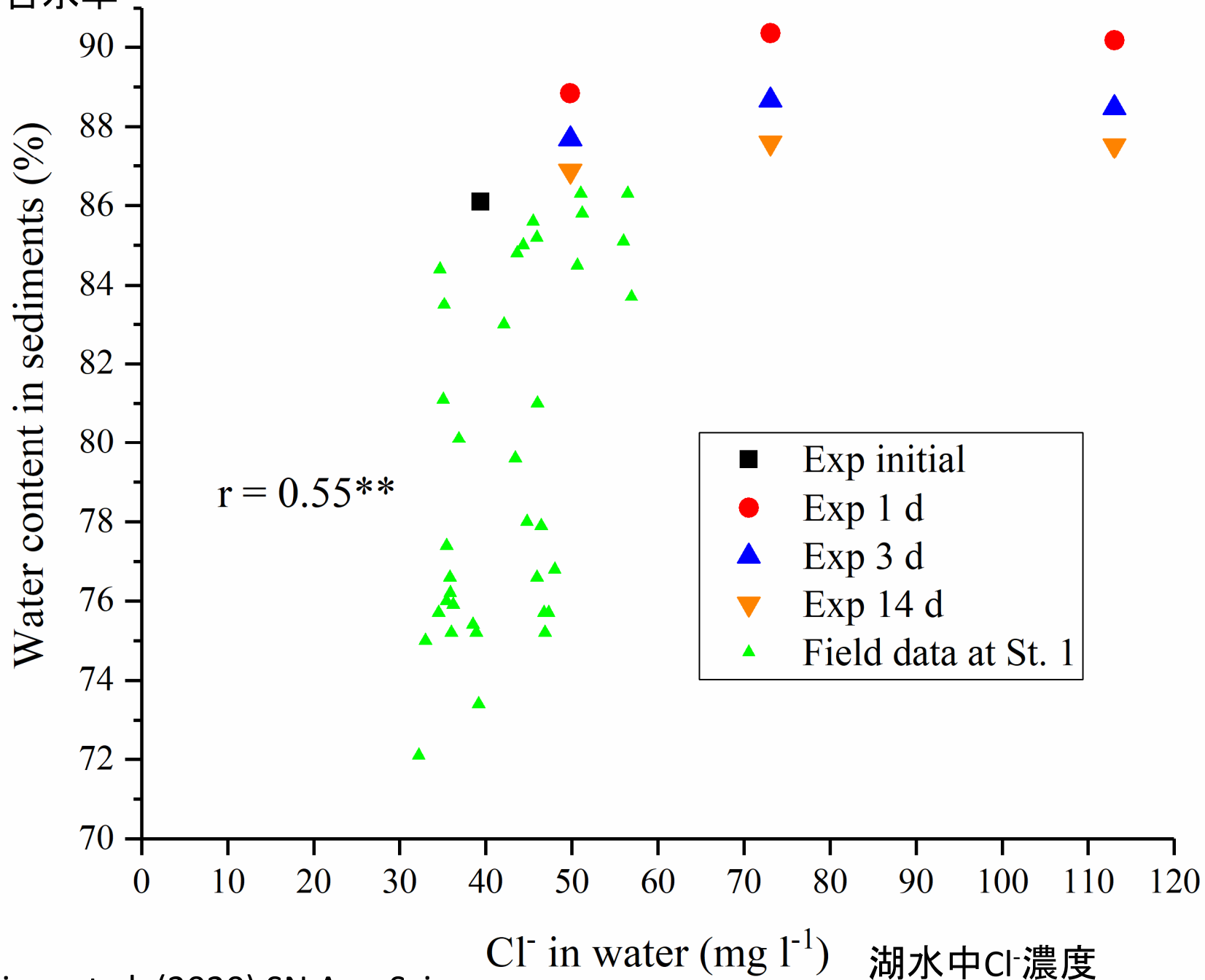
低い NaCl | 高い NaCl



Fukushima et al. (2020)
SN App Sci

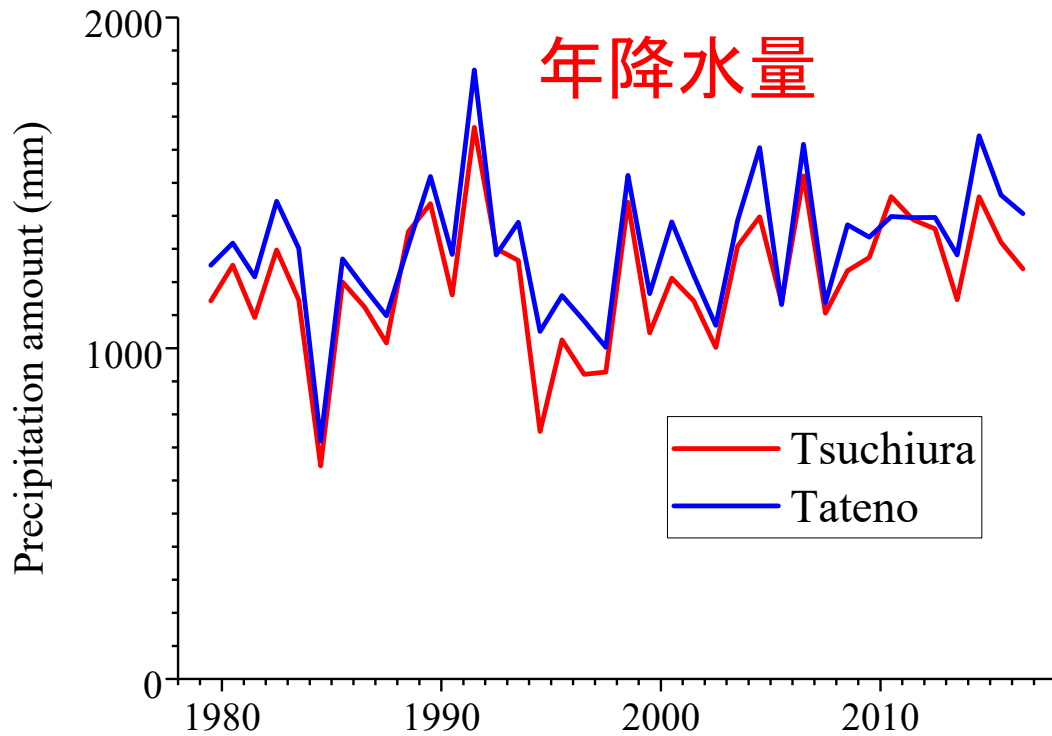
塩化物イオン濃度と底泥含水率：現地、実験

底質の含水率



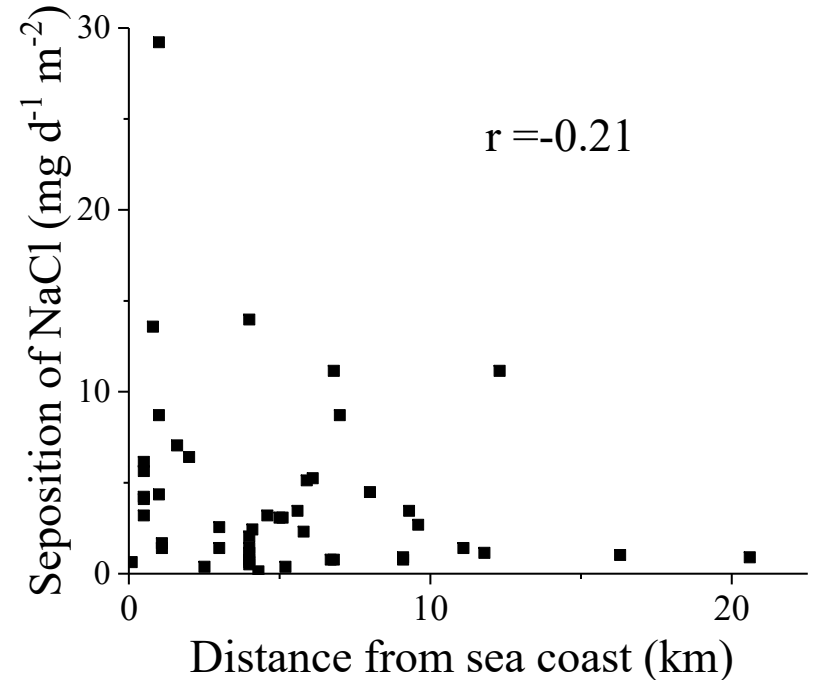
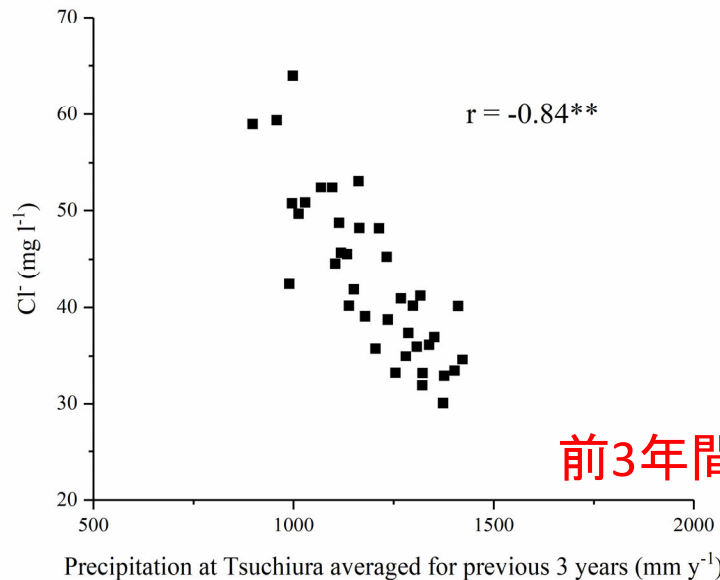
なぜ、ミネラルイオン濃度は変化したか？

Fukushima et al. (2020) SN App Sci



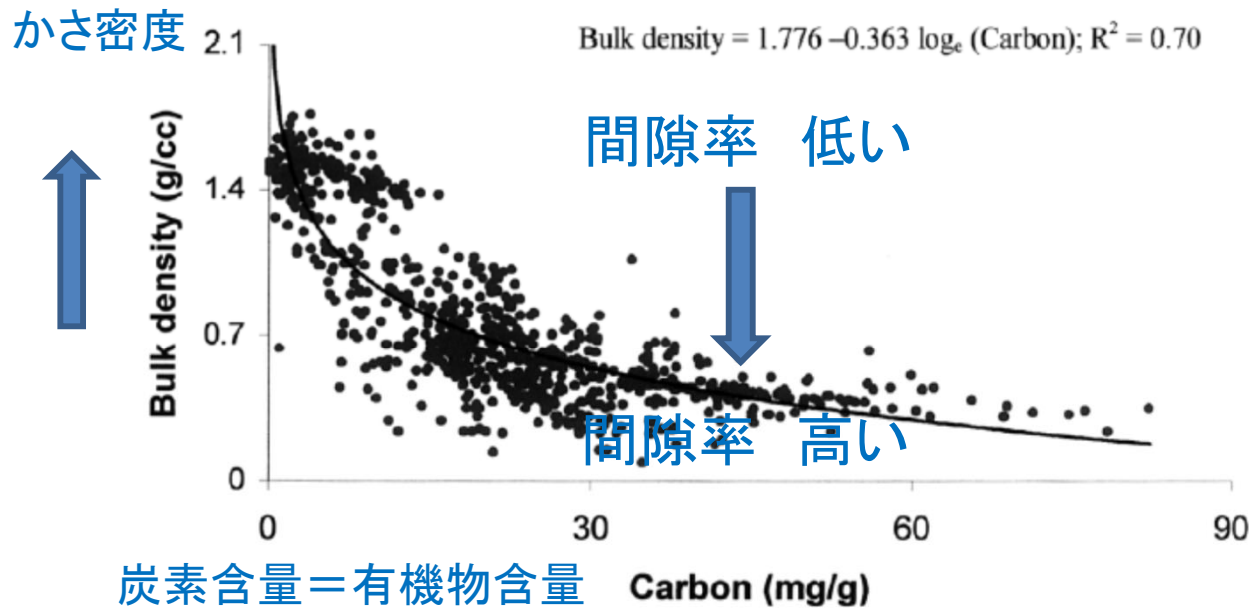
海塩粒子の堆積量
(mgNaCl/d/m²)

湖水中Cl⁻濃度



海岸からの距離 (km) 33

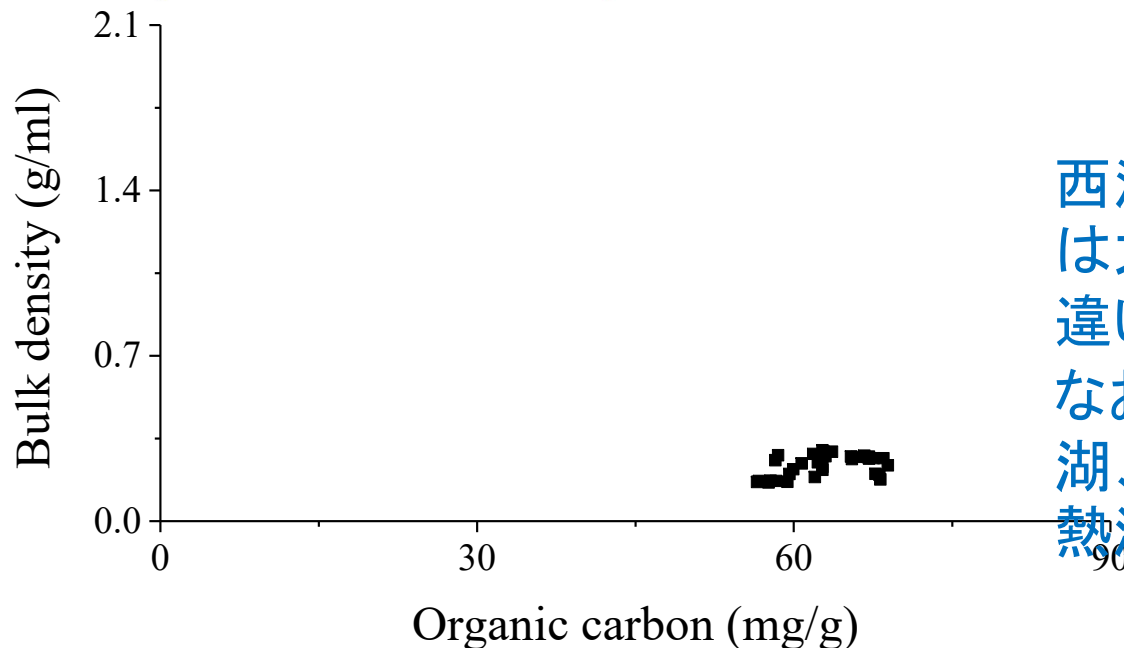
強熱減量と間隙率・含水率の関係



Avnimelech et al. 2001

一般的に有機物含量が高いと間隙率高くなることが知られている。霞ヶ浦では強熱減量の減少と含水率の上昇が同時期に生じていたが、含水率に影響する程、有機物含量が変化していない。

Fig. 1. Bulk density vs carbon for 868 sediment samples from six different locations world wide.

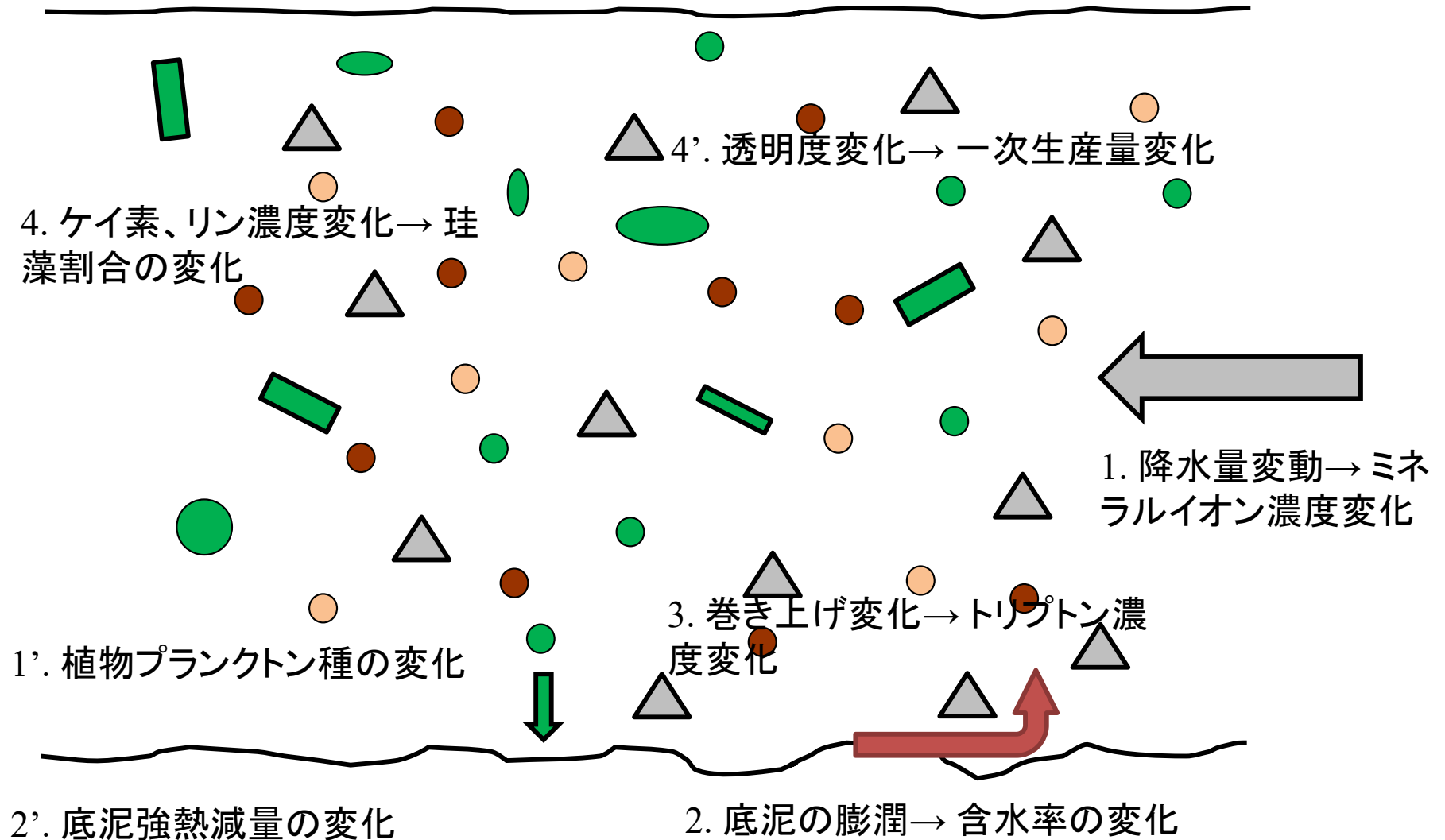


西浦と北浦のハス田の強熱減量は大きく異なる→流出水の濁度の違い

なお、霞ヶ浦、北浦、涸沼、小野川湖、曾原湖の含水率の違いは強熱減量で説明できない

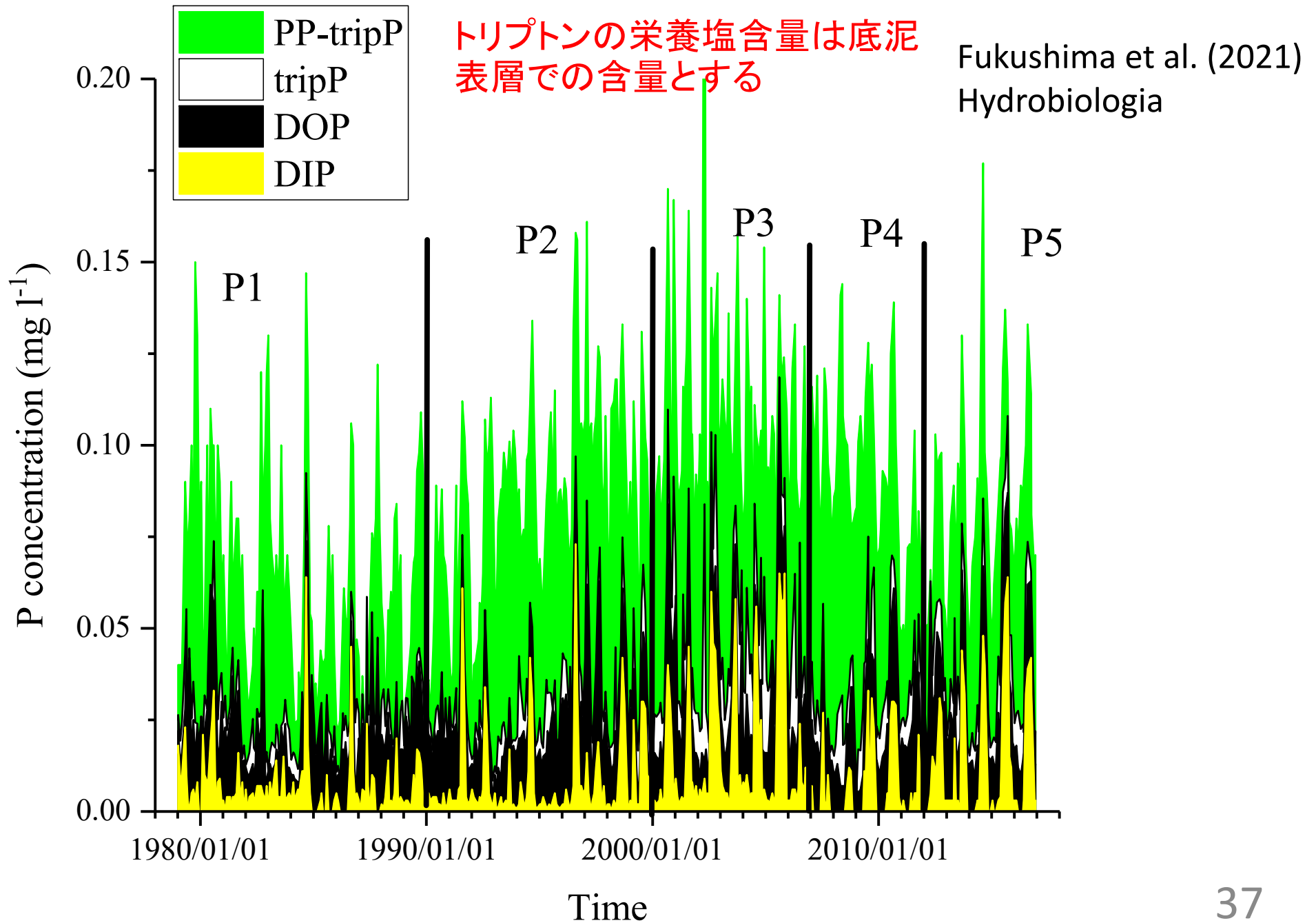
浅い湖沼での水質、底質相互作用と長期的変化

5. 植物プランクトン種のレジームシフト→生態系サービスの変化

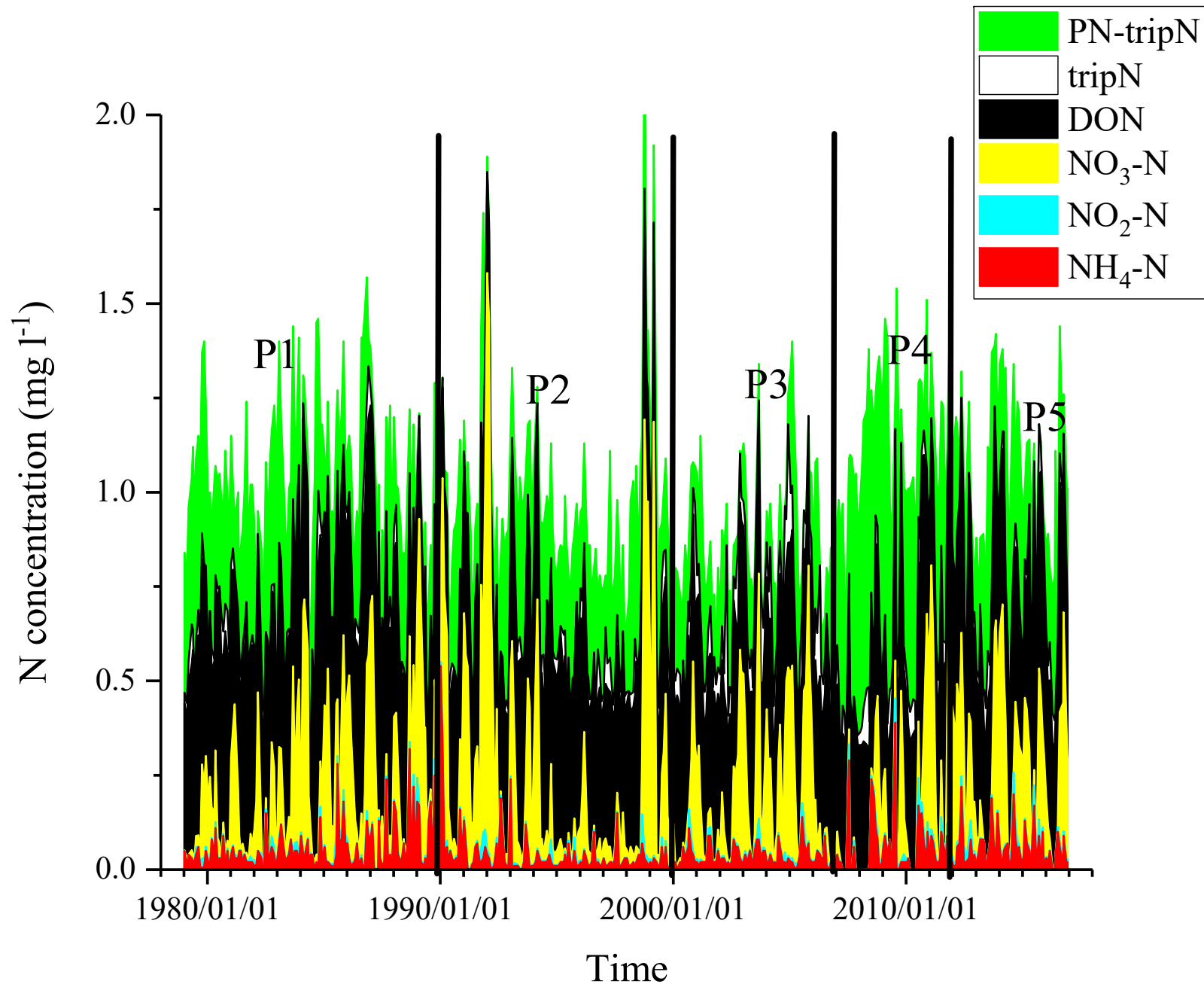


植物プランクトンの制限栄養塩は？

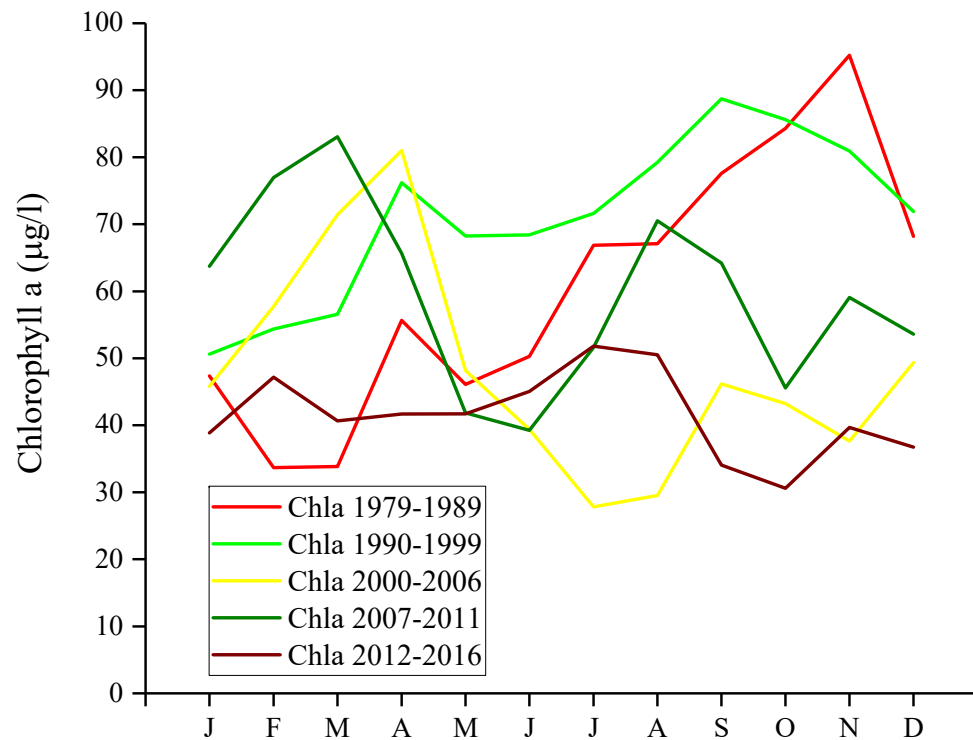
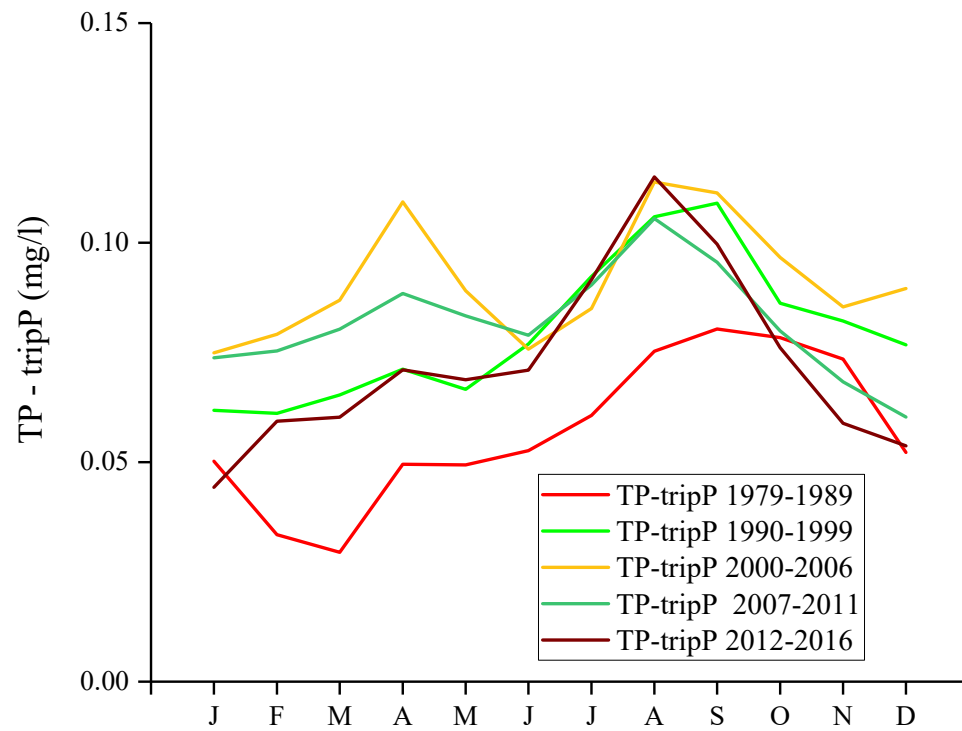
栄養塩の中身(リン) 霞ヶ浦湖心



栄養塩の中身(窒素)



クロロフィル季節変化パターンの時期による違いは栄養塩の季節変化パターンの時期変化で説明できるか？



III, V期(珪藻優占期)における夏期P上昇がChlaでは見られない。
Nは時期変化があまりない。
高水温による抑制？

仮説

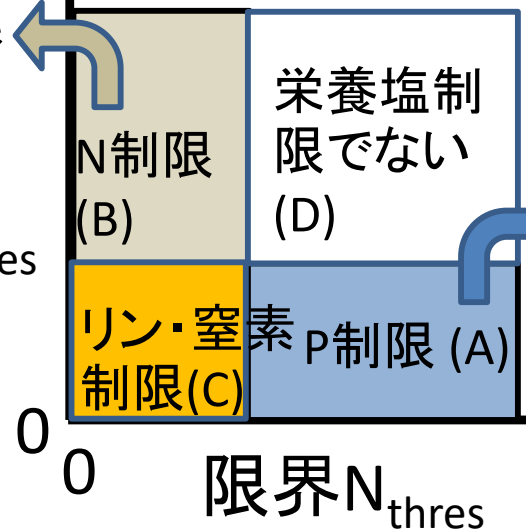
増殖速度: Michaelis-Menten式: 半飽和常数

(1)

利用可能窒素で
生物量が決まる

限界 P_{thres}

溶存態リン



Fukushima et al. (2021)
Hydrobiologia

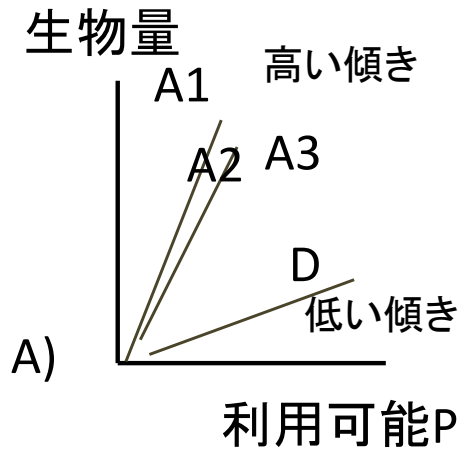
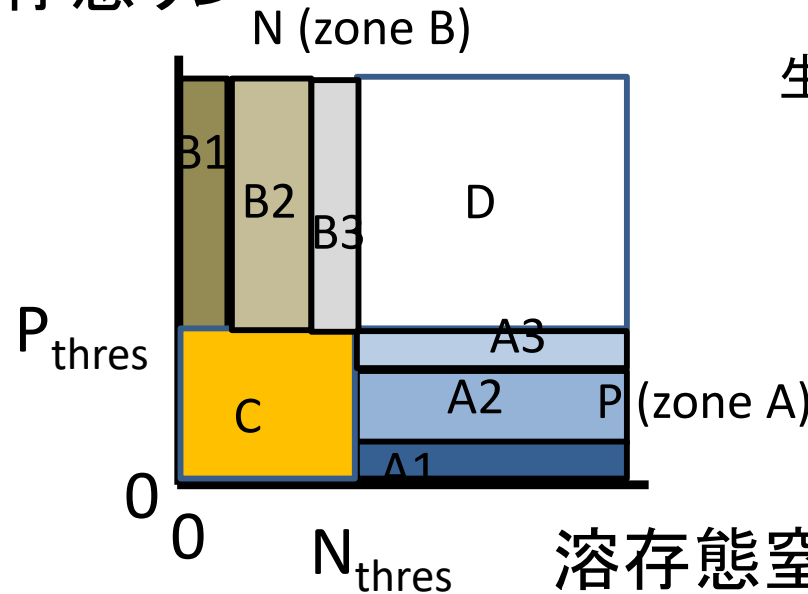
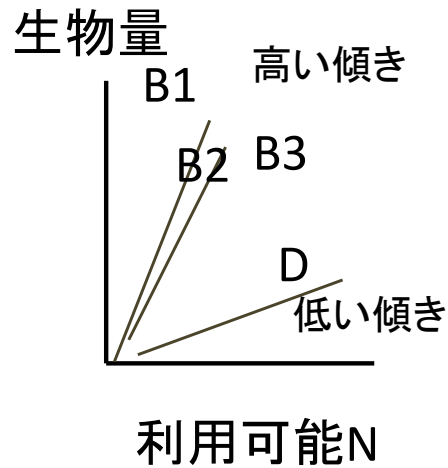
利用可能リンで
生物量が決まる

溶存態窒素

(2)

生物量: Carrying capacity: 分解過程を含め
利用可能な総量

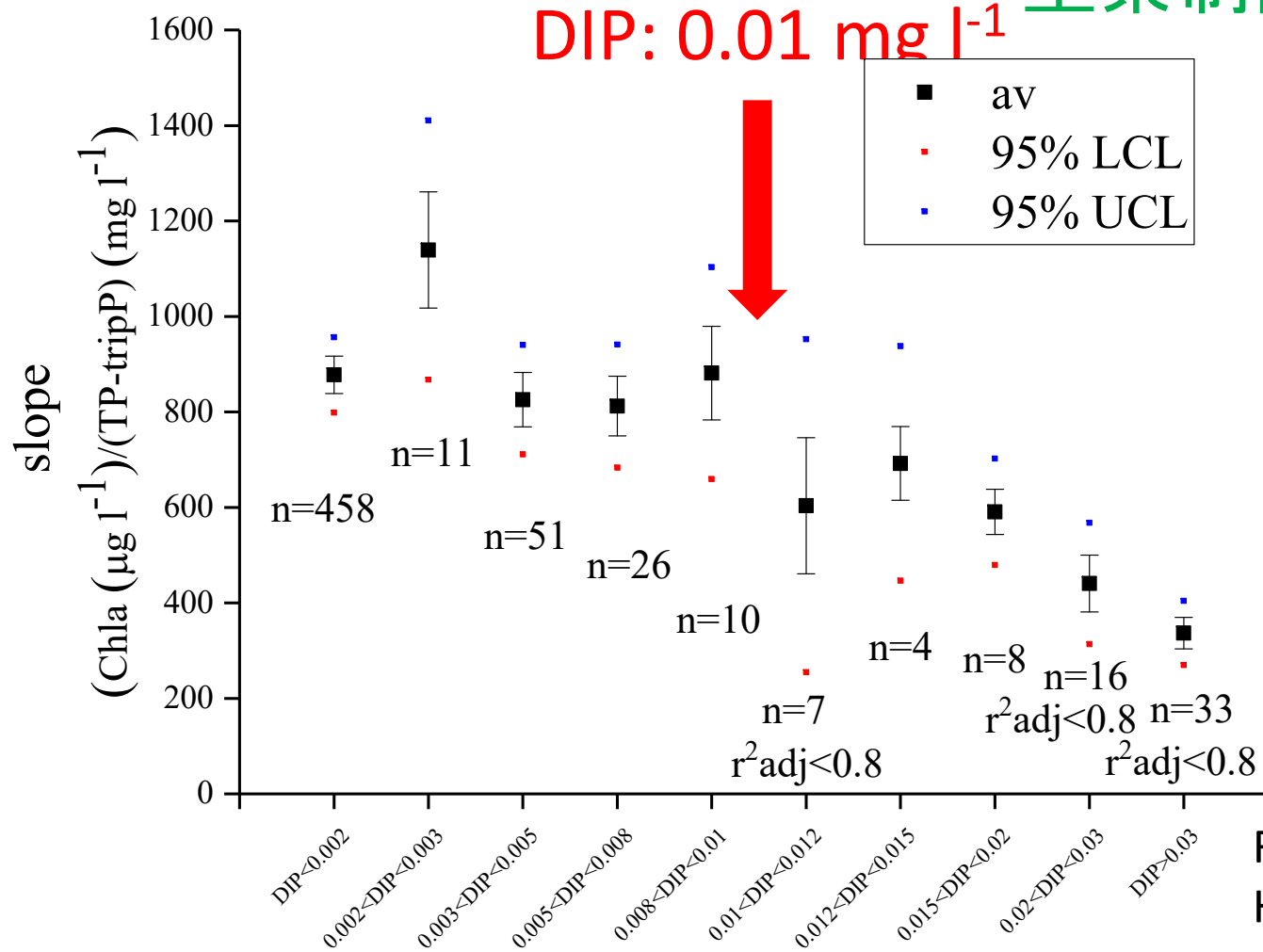
溶存態リン



DIPの濃度範囲ごとの回帰直線の傾き (原点を通る直線)

Chla ($\mu\text{g l}^{-1}$)/TP (mg l^{-1})

DIN $\geq 0.15 \text{ mg l}^{-1}$
窒素制限でない



Fukushima et al. (2021)
Hydrobiologia

DIP濃度低い

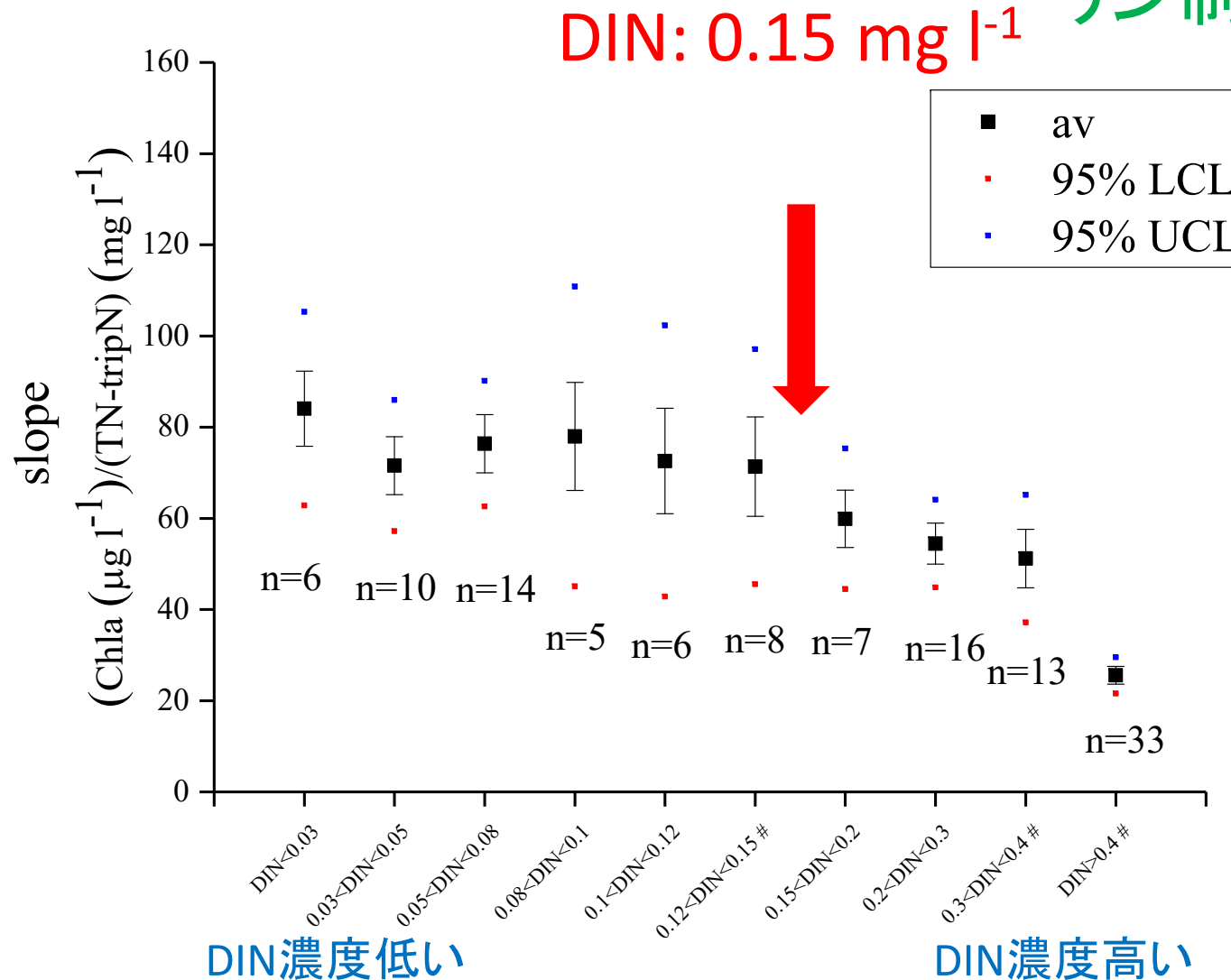
DIP濃度高い

DINの濃度範囲ごとの回帰直線の傾き (原点を通る直線)

Fukushima et al. (2021)
Hydrobiologia

Chla ($\mu\text{g l}^{-1}$)/TN (mg l^{-1})

DIP $\geq 0.01 \text{ mg l}^{-1}$
リン制限でない



補正済み重回帰係数

限界P_{thres}

r ² _{adjus} (number)		P _{thres} (mg l ⁻¹)		
		0.005	0.01	0.02
N _{thres} (mg l ⁻¹)	0.10	0.54 (1016)	0.54 (1583)	0.47 (1897)
	0.15	0.54 (889)	0.54 (1376)	0.47 (1639)
	0.20	0.55 (783)	0.54 (1214)	0.47 (1450)

限界N_{thres}

偏回帰係数

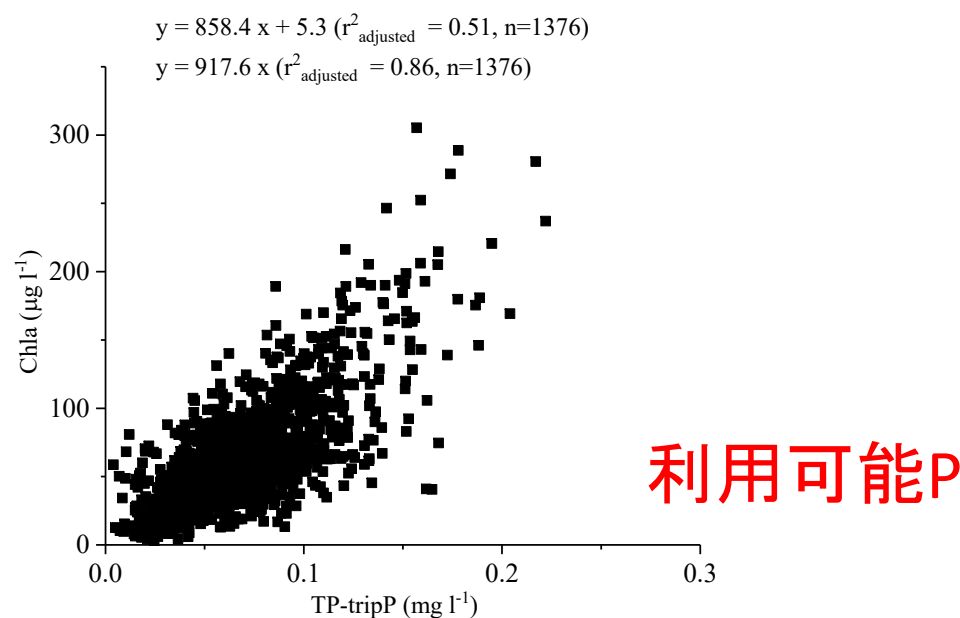
限界P_{thres}

Partial correlation coefficient with Chla (significant regression parameter p<0.01)		P _{thres} (mg l ⁻¹)								
		0.005			0.01			0.02		
		TP'	TN'	WT	TP'	TN'	WT	TP'	TN'	WT
N _{thres} (mg l ⁻¹)	0.10	0.64	0.16	0.19	0.65	0.16	0.16	0.62	0.12	0.08
	0.15	0.63	0.17	0.19	0.64	0.15	0.16	0.61	0.11	0.07
	0.20	0.63	0.18	0.18	0.64	0.17	0.16	0.60	0.13	0.08

限界N_{thres}

クロロフィル量は利用可能な窒素量、水温にも影響されるが、利用可能なリン濃度に圧倒的に支配されている

生物量



利用可能P

B領域

補正済み重回帰係数

限界P_{thres}

r ² _{adjus} (number)		P _{thres} (mg l ⁻¹)		
		0.005	0.01	0.02
N _{thres} (mg l ⁻¹)	0.10	0.50 (557)	0.55 (254)	0.48 (114)
	0.15	0.52 (723)	0.55 (340)	0.50 (149)
	0.20	0.51 (844)	0.55 (405)	0.51 (187)

限界N_{thres}

偏回帰係数

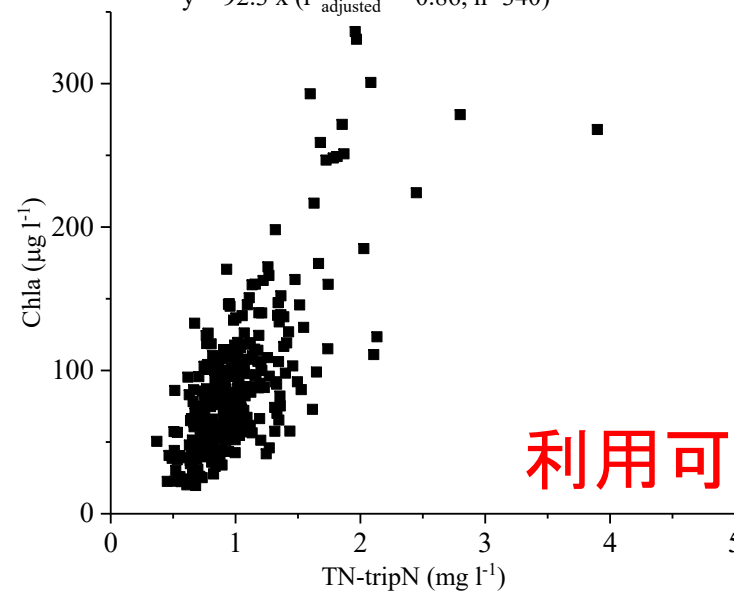
限界P_{thres}

Partial correlation coefficient with Chla (significant regression parameter p<0.01)		P _{thres} (mg l ⁻¹)								
		0.005			0.01			0.02		
		TP'	TN'	WT	TP'	TN'	WT	TP'	TN'	WT
N _{thres} (mg l ⁻¹)	0.10	0.22	0.61			0.74			0.70	
	0.15	0.25	0.61	-0.11		0.74			0.71	
	0.20	0.27	0.61	-0.13	0.14	0.66		0.20	0.54	

限界N_{thres}

$$y = 114.6x - 25.4 \quad (r^2_{\text{adjusted}} = 0.55, n=340)$$

$$y = 92.3x \quad (r^2_{\text{adjusted}} = 0.86, n=340)$$



生物量

クロロフィル量は利用可能な窒素濃度により決まっている

利用可能N

No. 1 湖沼間比較

Long-term constraints on potential algal biomass
: TP, TN and TN/TP

1) 日本の90湖沼データ 福島他(1986)
 $\text{Chla} = 683 \text{Nu}^{1.081}$ ($T > 0.1 \text{ y}$) ($\text{SE} = 0.174$)
年平均値同士の関係

ここで、 Chla ($\mu\text{g l}^{-1}$), $\text{Nu} = \text{TP} (\text{TN}/\text{TP} > 11)$ (mg l^{-1})

$\text{TP} = 0.1 \text{ mg l}^{-1}$ の時、 Chla は $57 \mu\text{g l}^{-1}$

2) 世界の77湖沼 OECD (1982)
 $\text{Chla} = 0.28 \text{TP}^{0.96}$ ($\text{SE} = 0.251$)
ここで、 Chla ($\mu\text{g l}^{-1}$), TP ($\mu\text{g l}^{-1}$)

$\text{TP} = 0.1 \text{ mg l}^{-1}$ の時、 Chla は $31 \mu\text{g l}^{-1}$

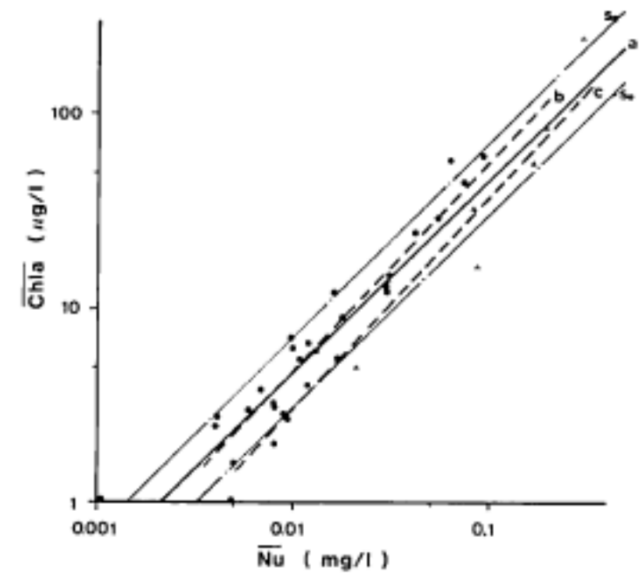
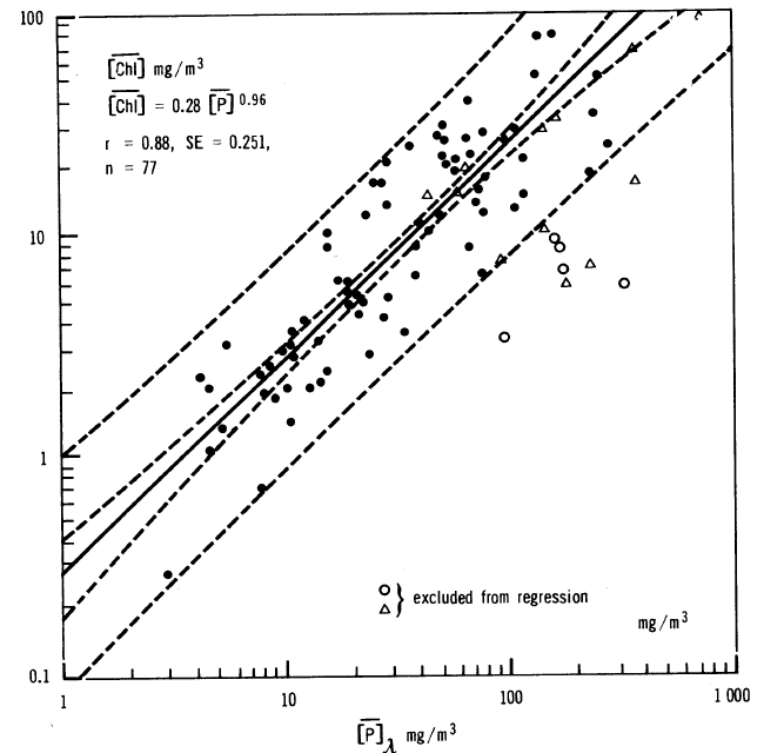


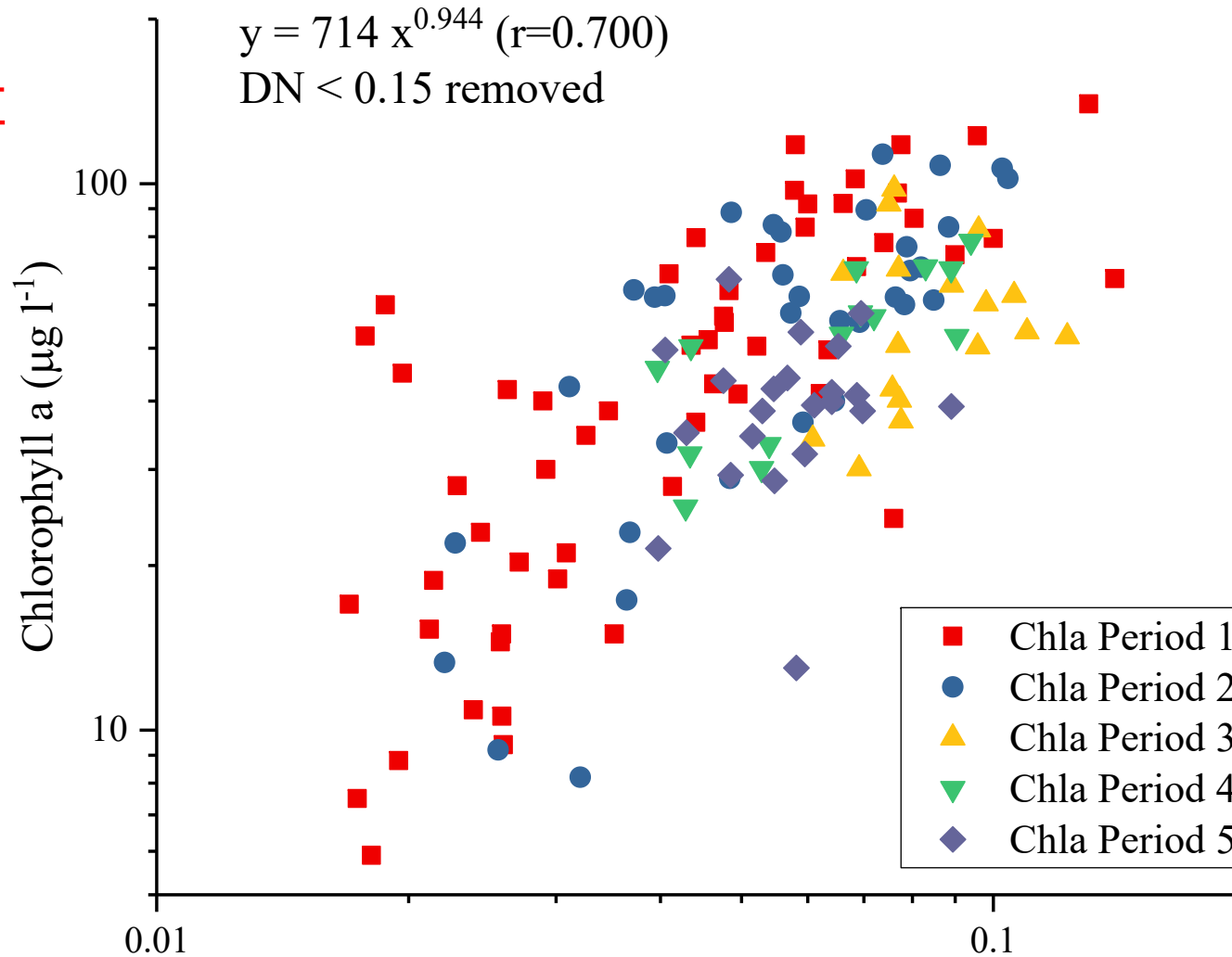
Fig. 13 Relationship between $\overline{\text{Nu}}$ and $\overline{\text{Chla}}$. The regression line a is $\overline{\text{Chla}} (\mu\text{g l}^{-1}) = 457 \overline{\text{Nu}}^{1.00} (\text{mg l}^{-1})$ ($n = 38, r = 0.95, s_e = 0.183$). The regression lines b, c are shown in eq. (6). ● : T is greater than 0.1y. △ : T is less than 0.1y.



両対数表示

TP' = 0.1 mg l⁻¹の時、Chla = 81 μg l⁻¹

生物量



TP - tripP when DP < 0.01 (mg l⁻¹) 利用可能P

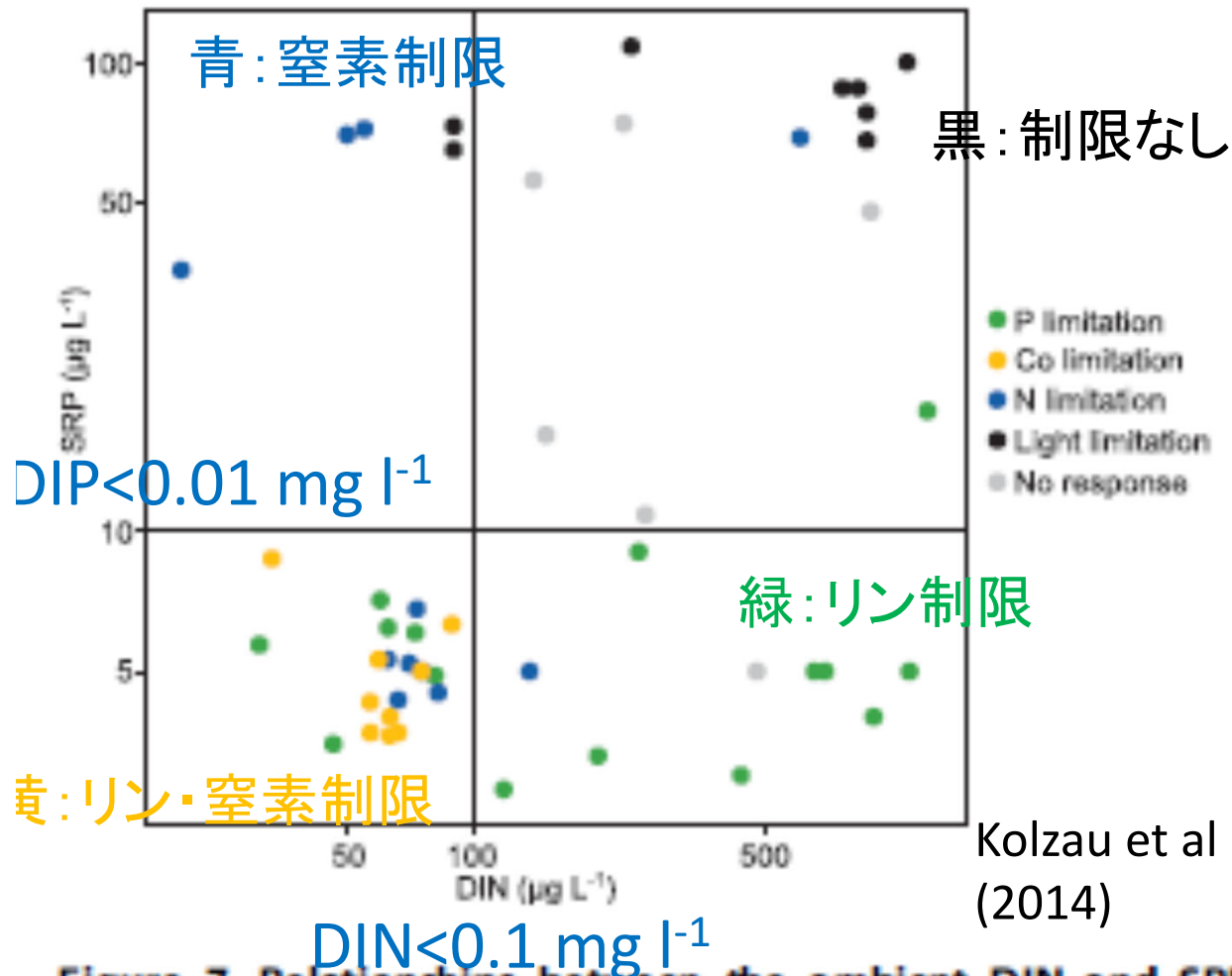


Figure 7. Relationships between the ambient DIN and SRP concentrations and the limitation categories. The vertical line marks the DIN concentration and the horizontal line marks the SRP concentration below which N or P limitation are possible according to Maberly et al. [41]. This plot shows that the results of the bioassays agree with the values given by Maberly et al. as SRP was predominantly below 10 $\mu\text{g L}^{-1}$ when P limitation was observed and DIN was predominantly below 100 $\mu\text{g L}^{-1}$ when N limitation was observed. Both dissolved nutrients were usually above these thresholds when light limitation or no response was observed.
doi:10.1371/journal.pone.0096065.g007

No. 2 栄養塩要求性

Kolzau et al. (2014) Seasonal patterns of nitrogen and phosphorus limitation in four German lakes and the predictability of limitation status from ambient nutrient concentrations. *Pro One*, 9-4, e96065

Marberly et al. (2002) Nutrient limitation of phytoplankton and periphyton growth in upland lakes. *Freshwater Biology*, 47, 2136-2152.
DIN < 6.5 mmol m^{-3} (0.091 mg l^{-1})
TDP < 0.18 mmol m^{-3} (0.005 mg l^{-1})

AGP試験結果と制限条件下でのDIP, DIP濃度の関係

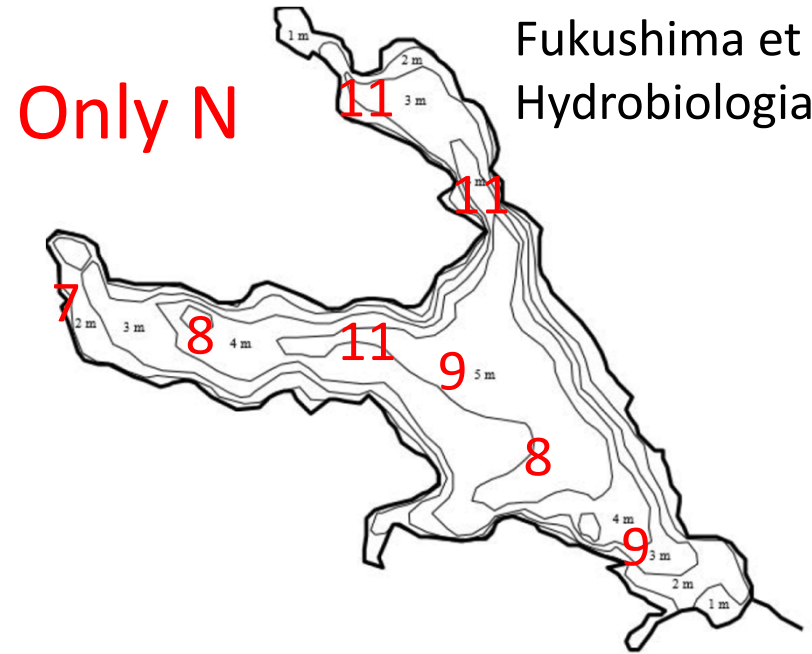
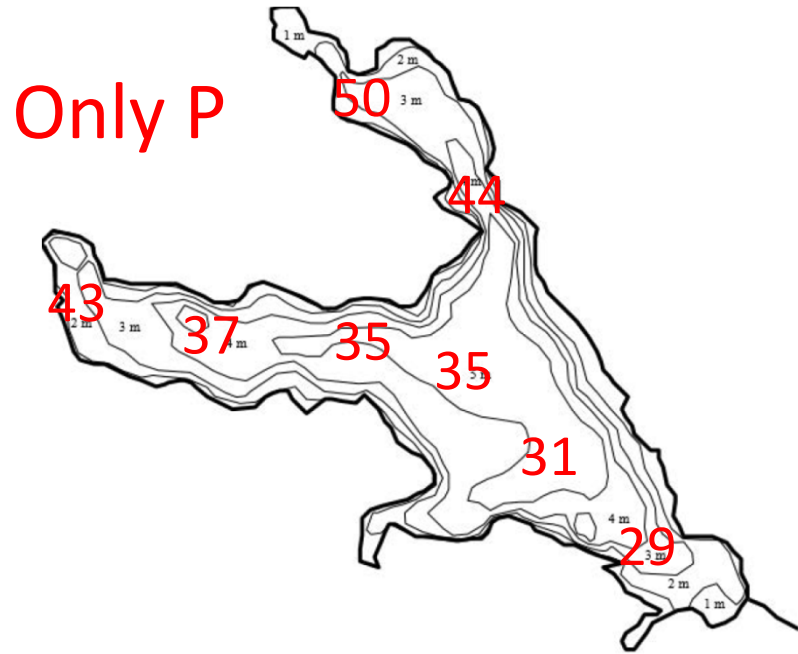
DIP: 0.01, DIN: 0.15 mg l⁻¹を閾濃度とした場合 の各時期の制限栄養塩(霞ヶ浦湖心)

Koshin	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
1979	2	3	2	2	2	3	3	3	3	1	1	1
1980	1	0	0	1	1	2	2	2	3	3	3	3
1981	1	1	1	1	3	3	3	3	2	3	3	3
1982	3	1	1	3	3	3	1	3	3	1	1	3
1983	3	1	1	2	2	3	3	3	0	1	1	1
1984	3	1	1	1	1	3	2	2	2	2	1	1
1985	1	1	1	3	3	3	1	0	3	1	1	1
1986	1	1	1	1	3	3	3	2	2	0	1	1
1987	1	1	1	3	0	3	3	2	1	3	3	3
1988	1	1	1	2	3	3	3	3	0	1	1	1
1989	1	1	1	1	1	2	1	0	2	0	1	1
1990	1	1	1	1	1	3	3	3	3	3	1	1
1991	1	1	1	3	3	3	1	0	2	1	1	1
1992	1	1	1	1	3	1	3	0	2	3	3	3
1993	1	1	1	3	3	3	3	3	0	1	1	3
1994	1	1	1	3	3	3	2	2	2	1	3	3
1995	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
1996	3	1	1	3	3	3	3	2	2	3	3	3
1997	3	2	3	3	3	3	2	0	2	3	1	3
1998	3	3	3	3	3	3	2	2	0	0	0	1
1999	1	1	0	3	3	3	0	0	0	2	3	3
2000	3	3	3	3	3	3	3	0	0	0	0	1
2001	1	1	1	3	3	3	2	0	3	3	3	3
2002	3	1	3	3	3	3	3	0	0	0	0	0
2003	0	1	1	3	3	3	2	0	0	3	2	1
2004	1	1	0	3	3	3	0	0	2	0	1	1
2005	1	1	1	3	3	3	0	0	0	0	0	1
2006	3	1	3	3	3	3	2	3	3	2	3	3
2007	3	3	3	3	3	3	0	3	3	2	3	3
2008	3	3	3	3	3	3	1	1	0	0	1	3
2009	1	1	3	3	2	3	0	3	2	0	1	3
2010	3	3	3	3	3	3	0	2	0	0	1	1
2011	1	1	1	3	3	3	1	3	3	0	1	1
2012	1	1	1	1	0	0	1	2	0	0	3	1
2013	3	3	1	3	2	3	3	3	0	0	0	1
2014	1	1	1	1	3	3	2	0	0	0	1	1
2015	1	1	1	1	3	2	0	2	0	0	0	1
2016	1	3	3	3	3	3	2	0	0	0	1	1

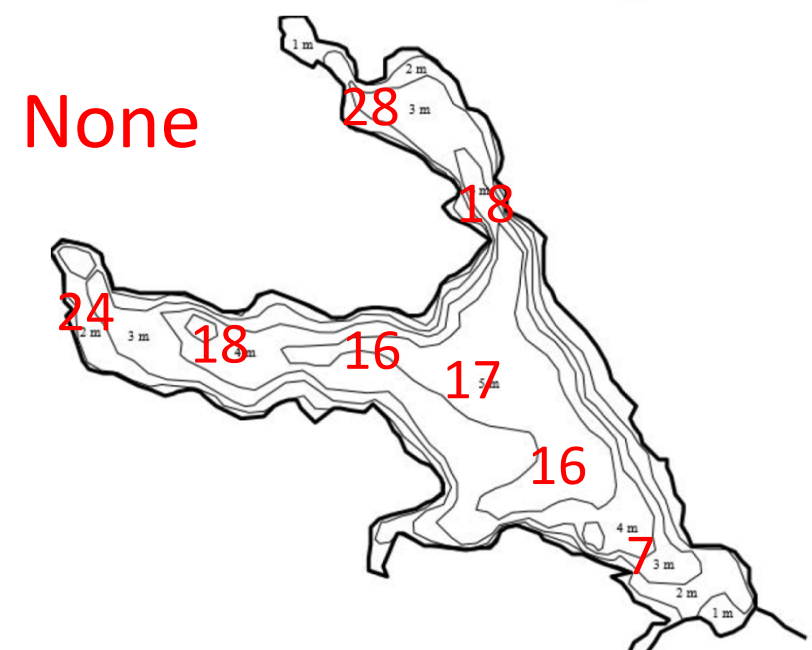
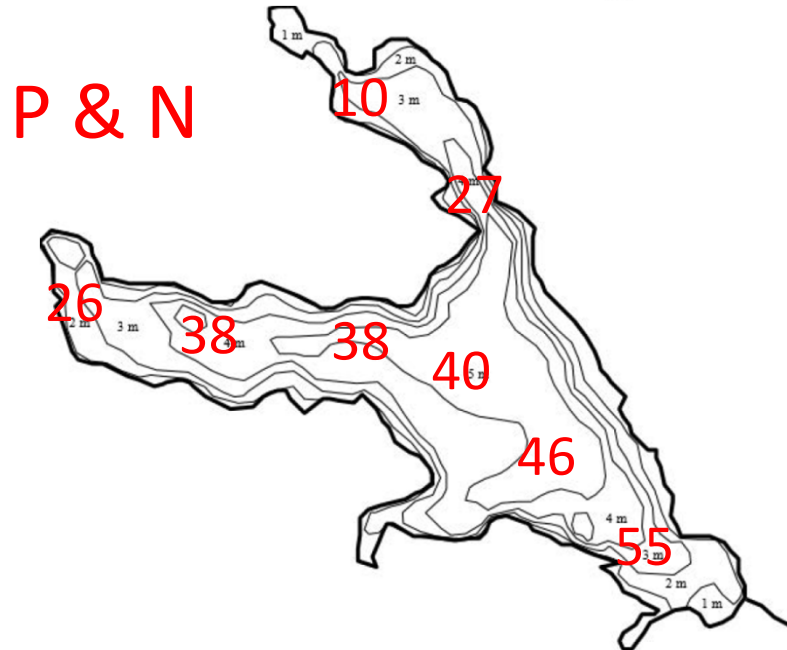
Fukushima et al. (2021)
Hydrobiologia

赤: P制限、
青: N制限、
紺: PN制限、
白: 栄養塩
制限なし

DIP: 0.01, DIN: 0.15 mg l⁻¹を閾濃度とした場合の 制限栄養塩は何か？全456回の中の%

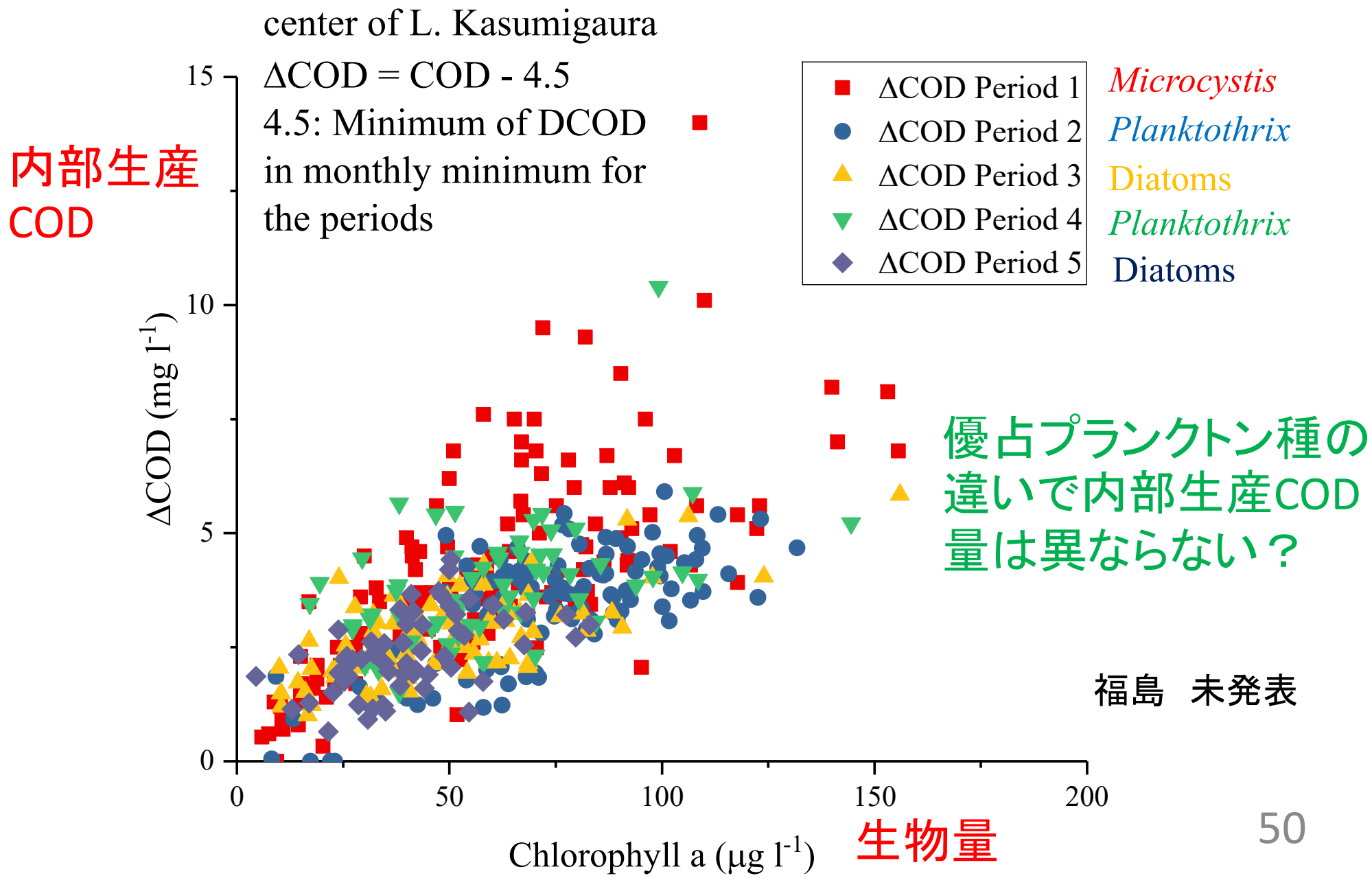


Fukushima et al. (2021)
Hydrobiologia



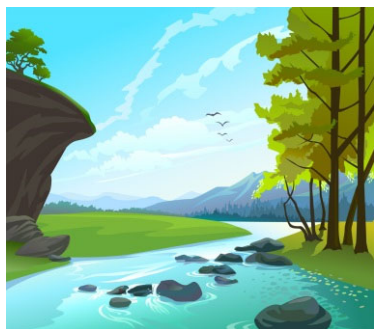
クロロフィルaと Δ CODの関係(湖心:時期別)

時期により優占プランクトン種は異なる



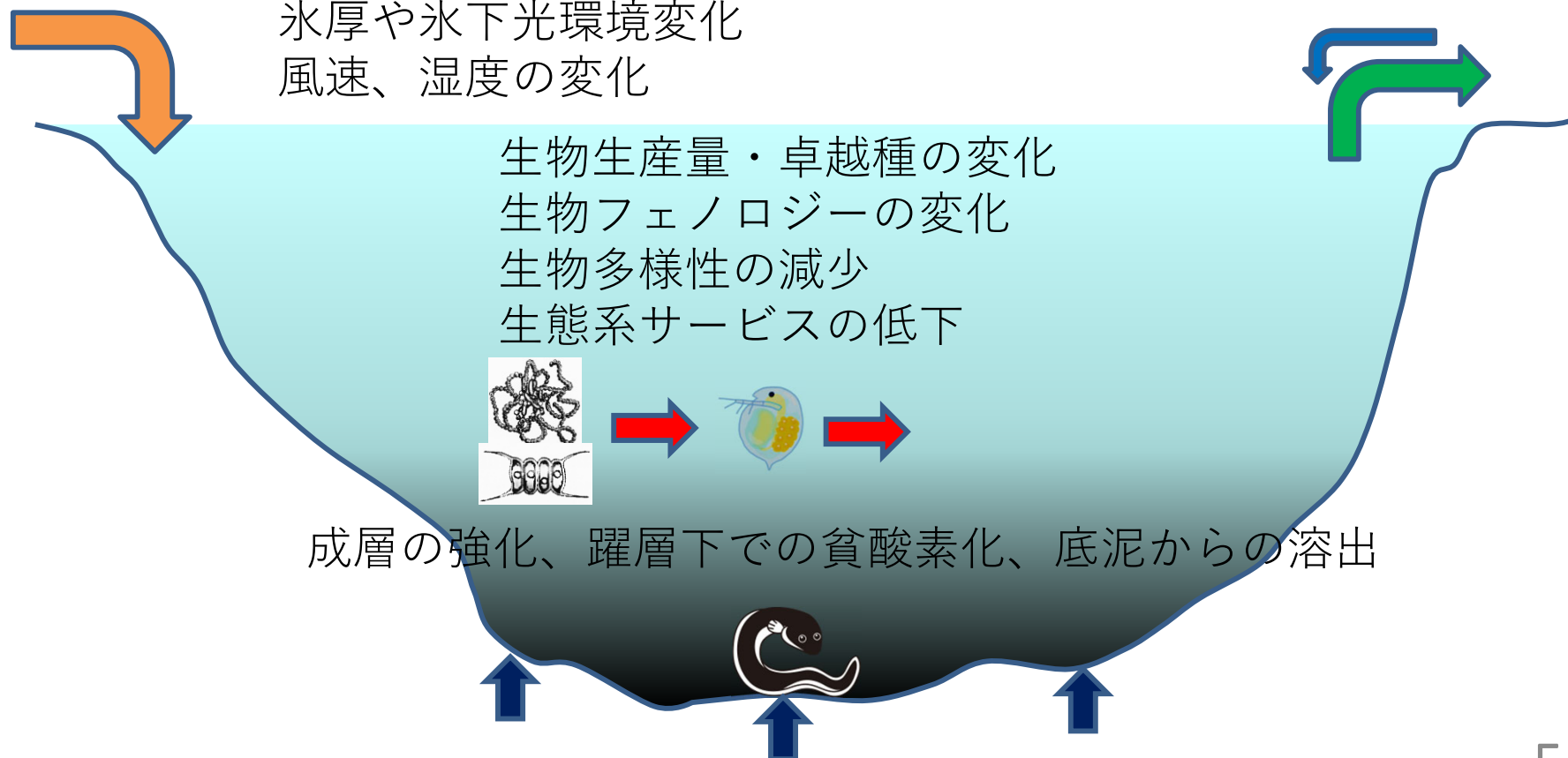
気象・気候変化は湖沼水質に
どのような影響を及ぼすか？

地球温暖化の湖沼生態系に及ぼす影響



多降水：流入負荷の増加
小降水：混合低下、滞留時間増加
降雪量の変化：季節パターン変化
氷厚や氷下光環境変化
風速、湿度の変化

海水面上昇による海水の侵入



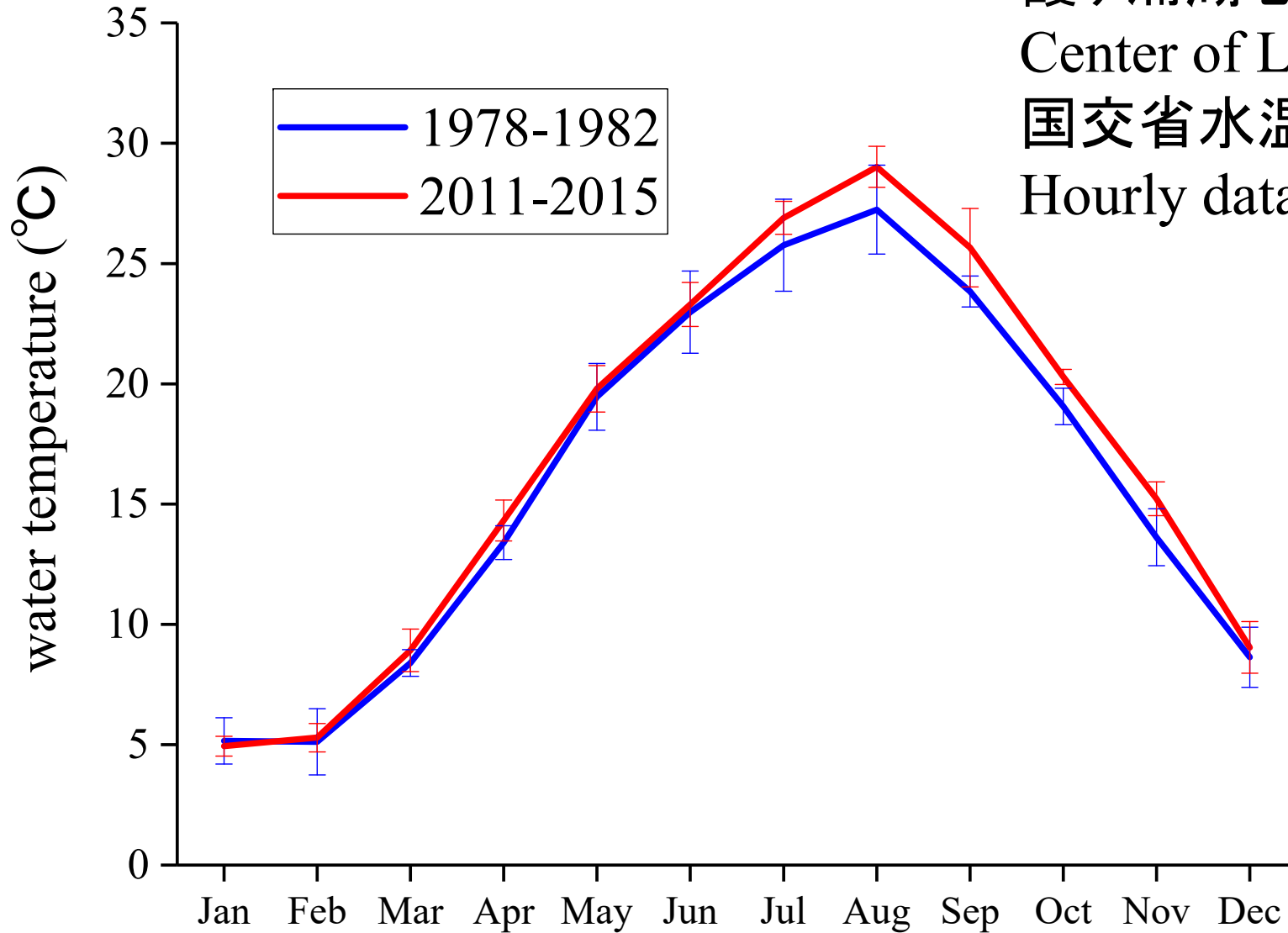
温暖化 Warming

霞ヶ浦湖心

Center of Lake Kasumigaura

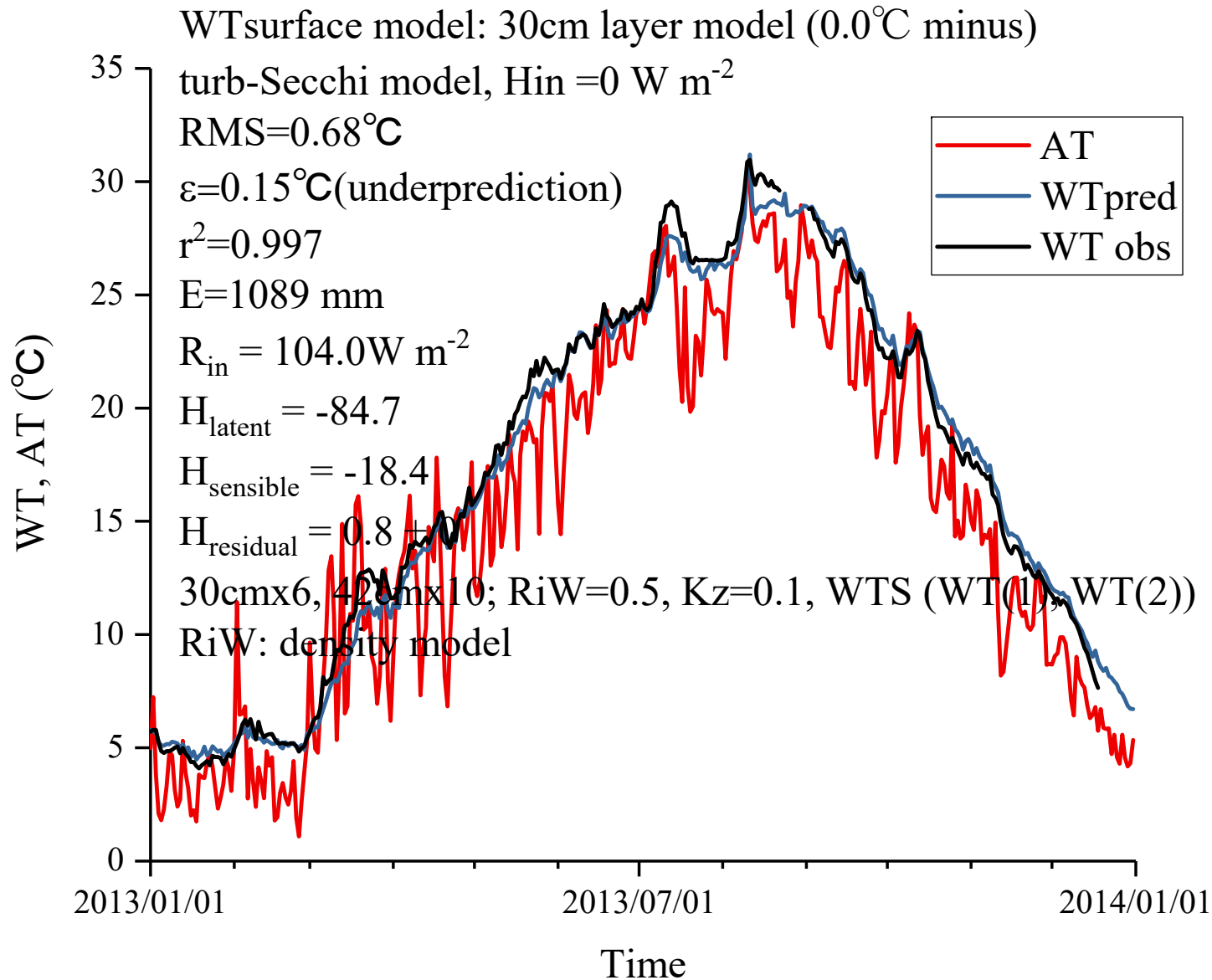
国交省水温時間データ

Hourly data of WT by MLIT



霞ヶ浦湖心での水温予測

気温、風速、湿度、濁度、日射量、等が必要、底泥熱容量の考慮
表面水温の予測が重要(潜熱、顕熱、逆放射量に影響)

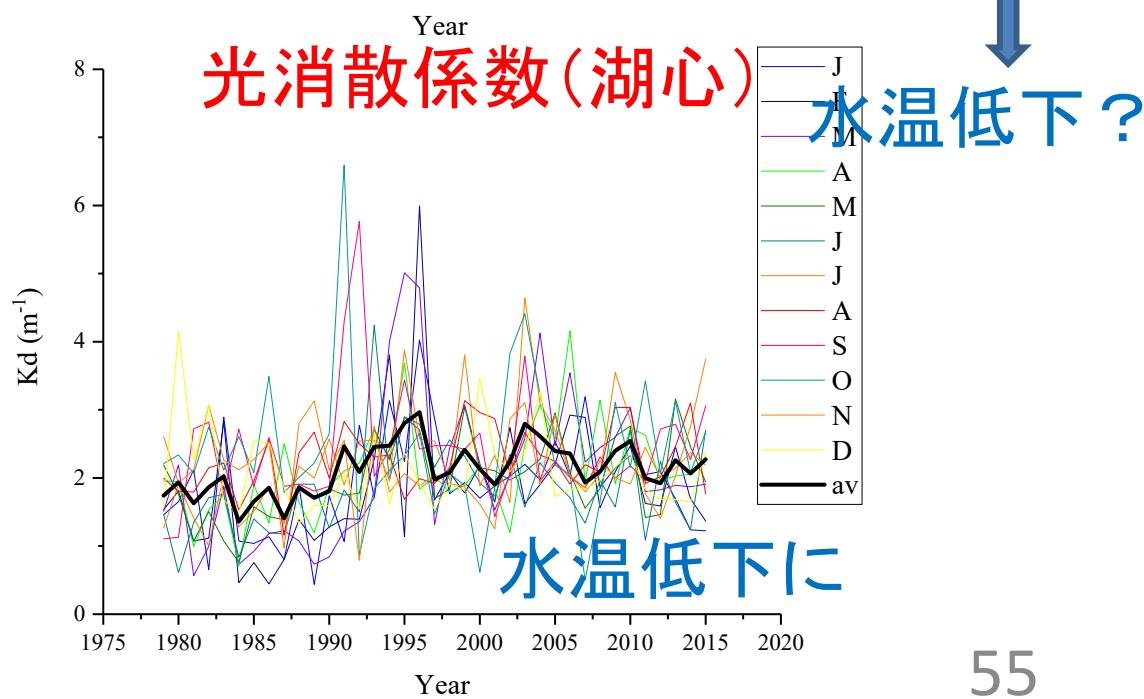
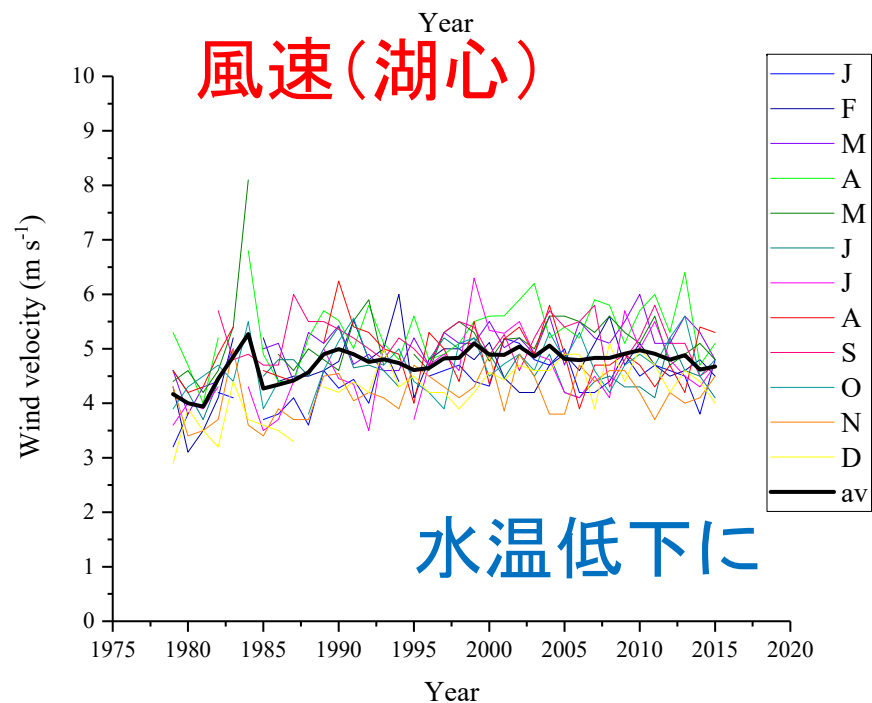
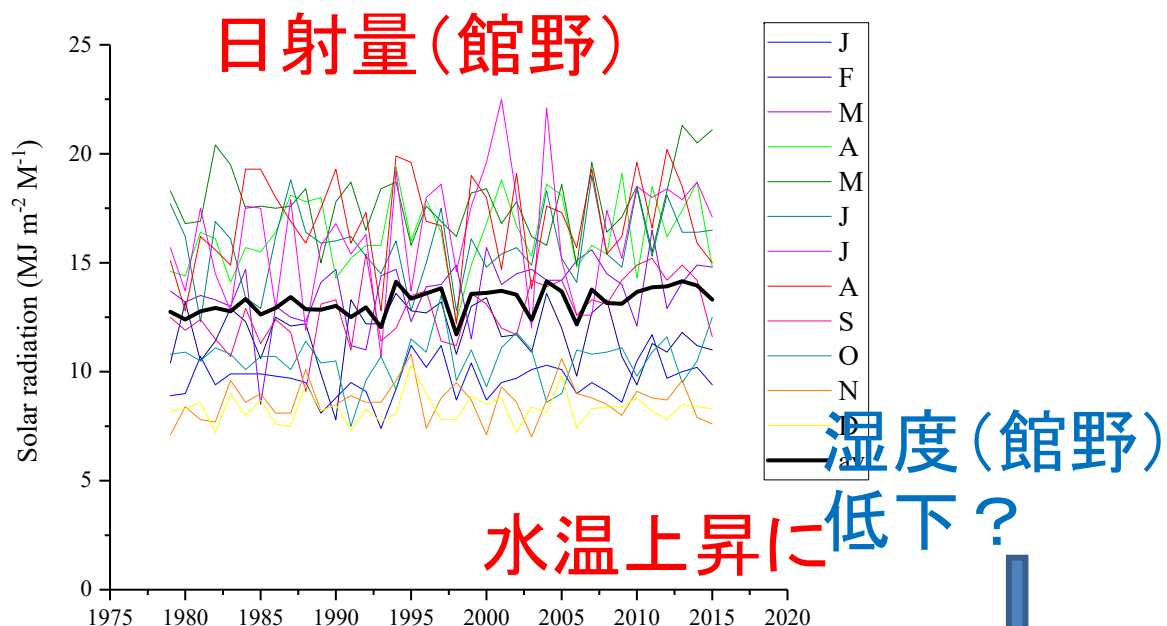
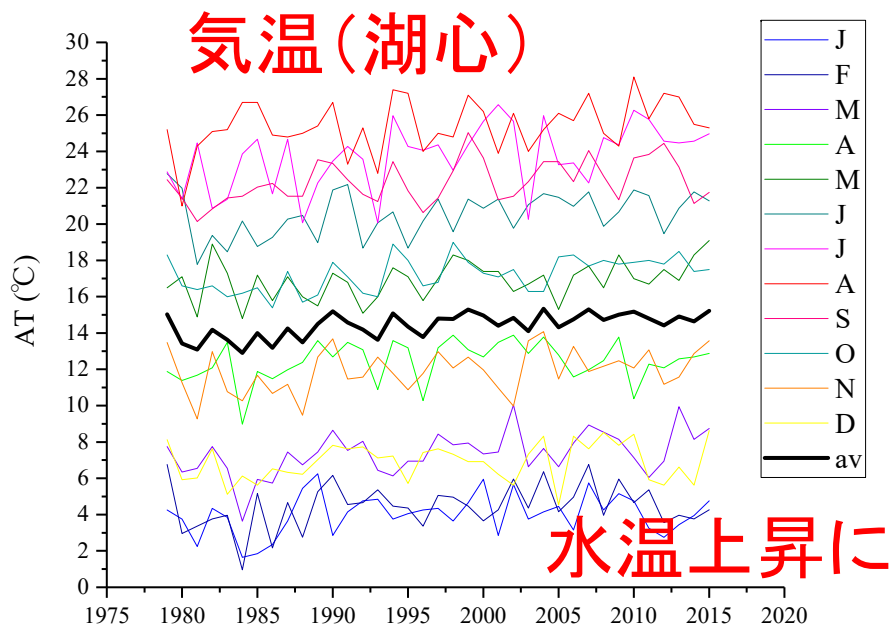


表面水温上昇
↓
潜熱、顕熱、逆放射量の増加
↓
湖水温低下

福島他 投稿準備中

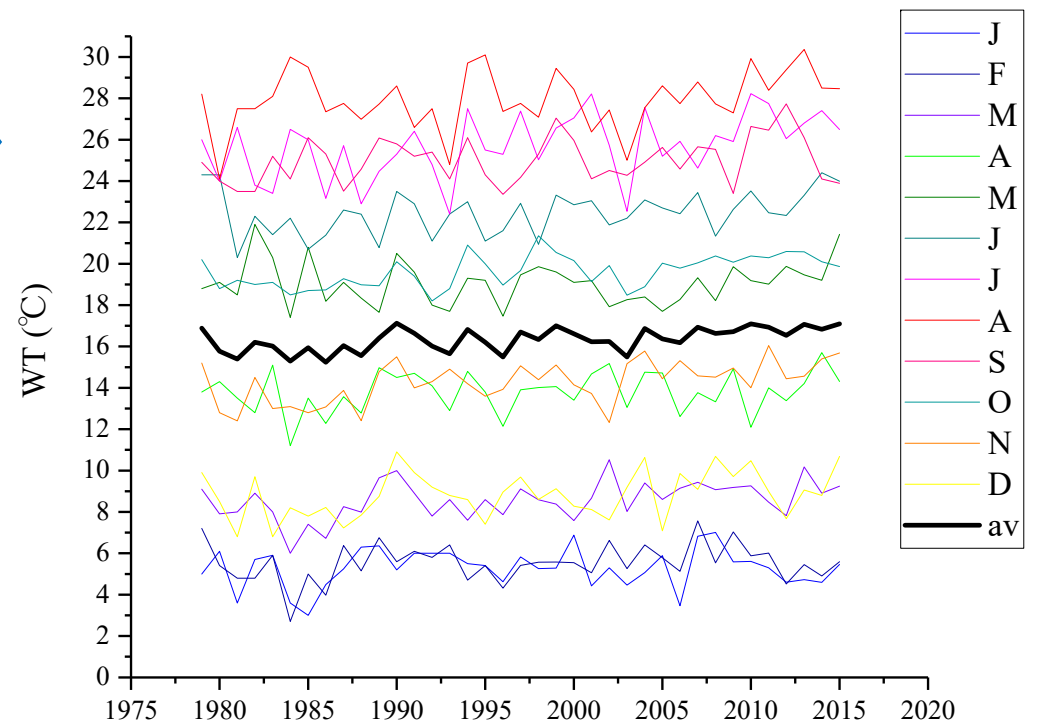
表層水温に影響を及ぼす項目の変化

福島他 投稿準備中



水温変化をモデル で予測する

福島他 投稿準備中

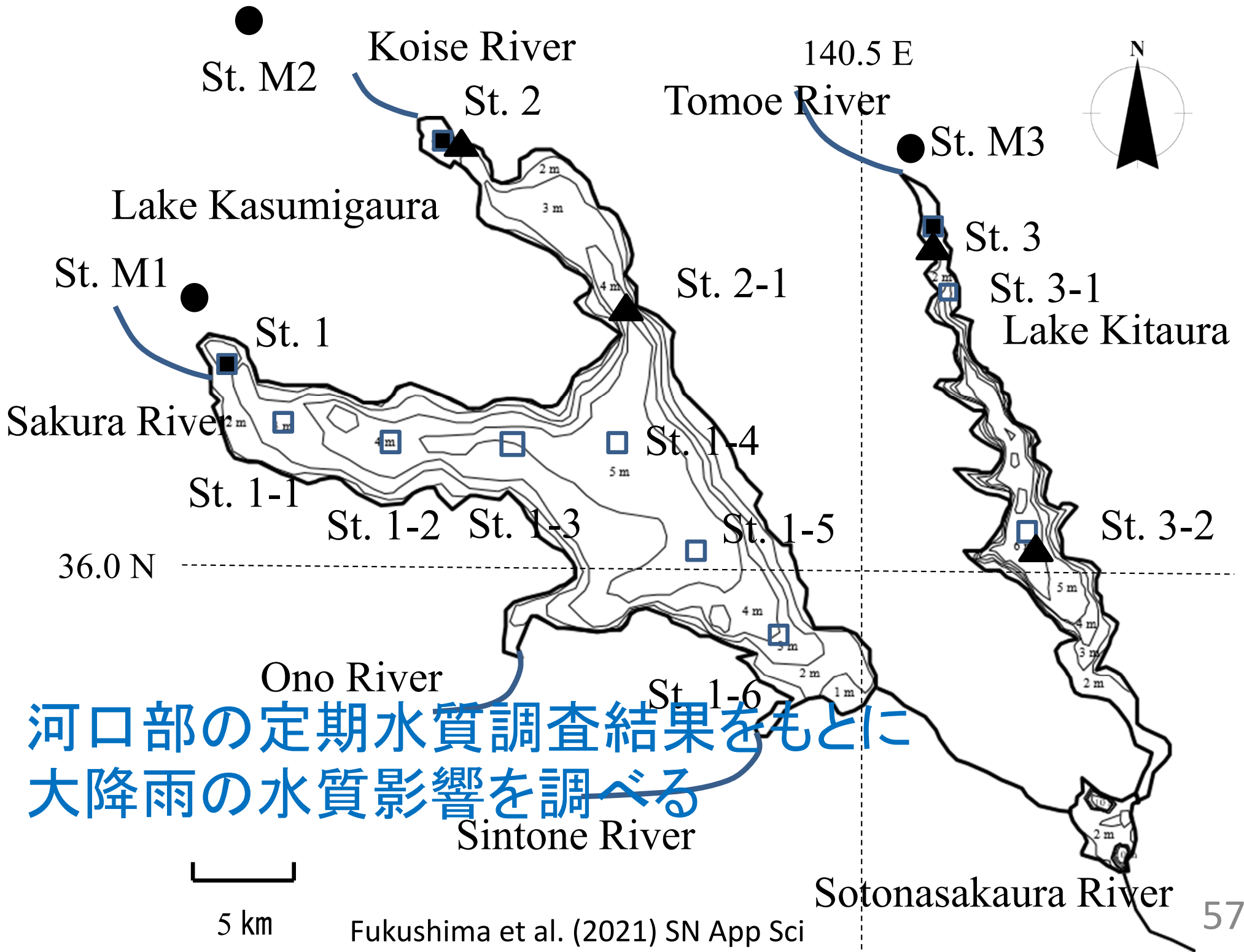


Change in annual averaged WTS (°C)	Year			
	using 2012	using 2013	using 2015	
Air temperature 1°C decrease	-0.78	-0.79	-0.82	気温上昇
Solar radiation 10% decrease	-0.46	-0.46	-0.44	日射量増加
Wind velocity 10% decrease	0.13	0.10	0.10	風速上昇
Kd 10 decrease	0.08	0.09	0.10	消散係数増加
Relative humidity 10% decrease	-0.61	-0.60	-0.65	相対湿度低下
Expected during 1979-2015*	-1.15	-1.13	-1.15	予測された水温上昇
Observed during 1979-2015	-1.10			実測の水温上昇

*: AT -1.4°C, SR 0.927, W 0.902, Kd 0.781, RH 1 in 1979 compared with 2012, 2013, and 2015

Expected evaporation change: 949 mm in 1979 vs 1089 mm in 2013 using the data of 2013,

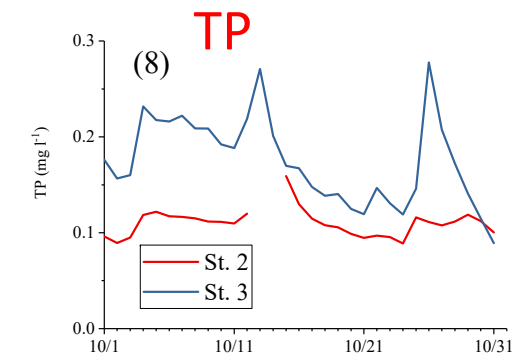
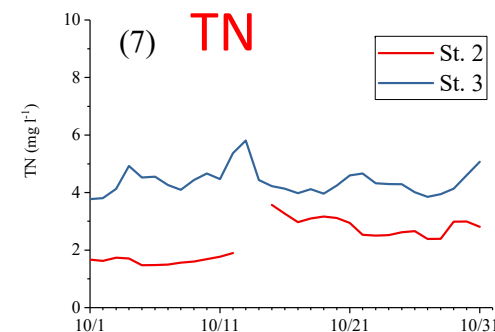
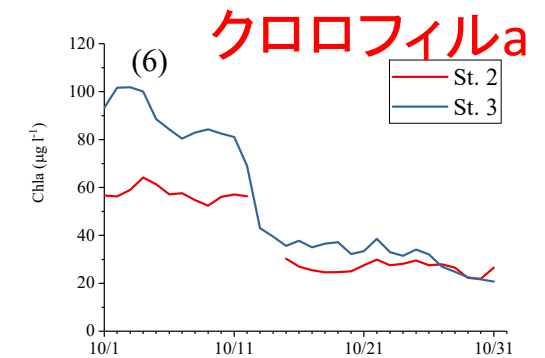
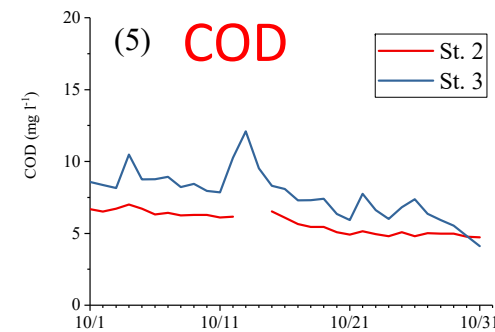
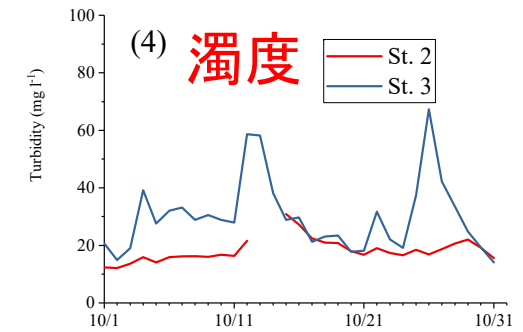
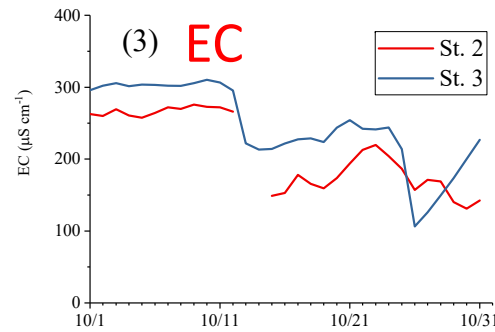
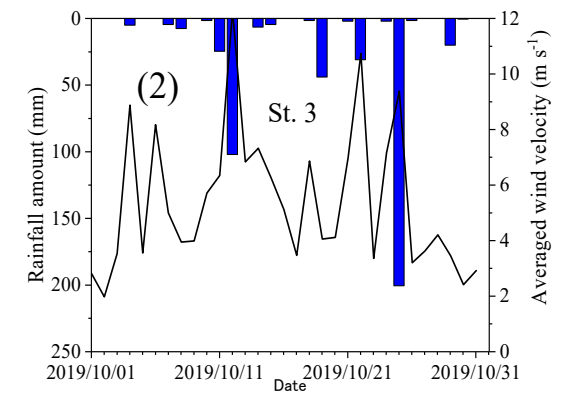
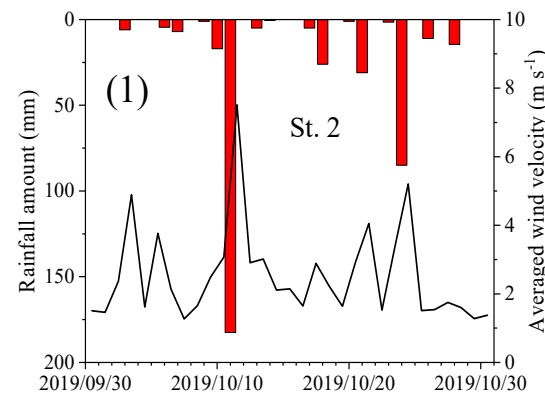
880 mm in 1979 vs 1011 mm in 2014 using the data of 2014, 912 mm in 1979 vs 1046 mm in 2015 using the data of 2015



河口部の定期水質調査結果をもとに
大降雨の水質影響を調べる

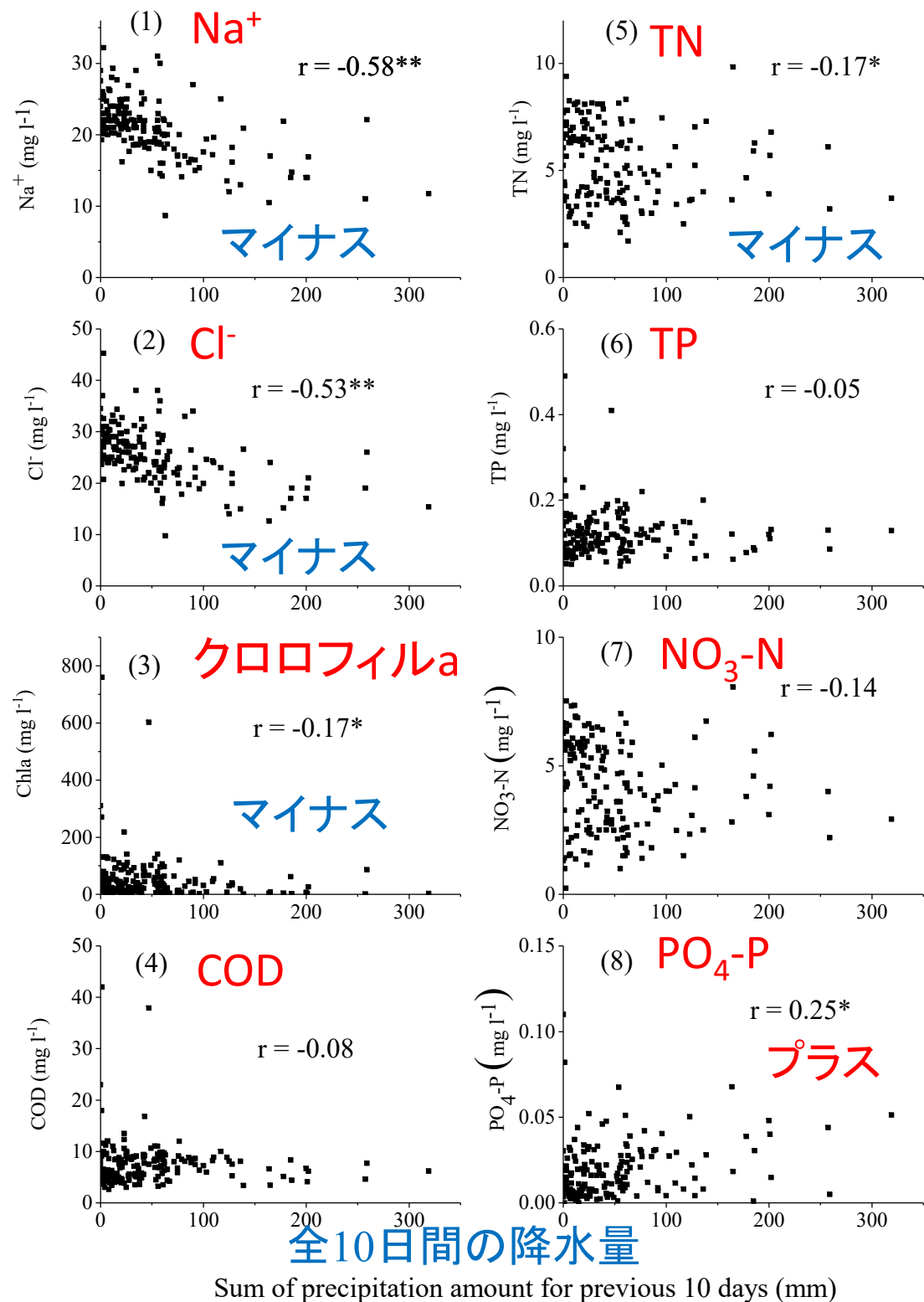
大降雨時の の水質変化

Fukushima et al. (2021) SN App Sci



St. 3

明確な差: 100 mm, 140 mm
以上の降雨



G1 (影響あり) vs G2 (影響小さい)

G1: < 0.2 for Na, Cl, Chla

R > 140 mm

Fukushima et al. (2021)
SN App Sci

Station	Group	Sampling date	Rainfall amount before 10 days to the date (mm)	The ratio of the order to the total number (n=166)			
				Na ⁺	Cl ⁻	Chlorophyll a	SS
St. 1	G1	2006/10/13	142	0.02	0.02	0.20	0.25
		2007/1/5	144	0.04	0.03	0.03	0.28
		2013/10/19	174	0.07	0.11	0.14	0.39
		2014/10/10	201	0.18	0.01	0.14	0.21
		2019/10/31	179	0.01	0.02	0.01	0.18
	G2	2006/7/27	149	0.10	0.15	0.72	0.28
		2007/9/14	143	0.06	0.07	0.66	0.26
		2015/9/19	212	0.03	0.04	0.40	0.21
2016/8/26		250	0.73	0.77	0.82	0.40	
St. 2	G1	2007/1/5	145	0.04	0.07	0.03	0.29
		2014/10/10	282	0.05	0.01	0.05	0.31
		2019/10/31	144	0.01	0.01	0.02	0.23
	G2	2006/7/27	173	0.25	0.43	0.55	0.35
		2007/9/14	155	0.25	0.36	0.65	0.35
		2015/9/19	229	0.05	0.06	0.36	0.23
		2016/8/26	324	0.88	0.87	0.77	0.35
		2016/9/16	149	0.07	0.27	0.60	0.31
2017/7/13	170	0.78	0.62	0.37	0.53		
St. 3	G1	2007/1/5	165	0.17	0.20	0.18	0.10
		2013/10/19	319	0.02	0.04	0.08	0.22
		2014/2/18	186	0.08	0.10	0.03	0.09
		2014/10/10	178	0.03	0.03	0.10	0.04
		2015/9/19	164	0.01	0.01	0.08	0.10
		2018/9/27	200	0.05	0.05	0.14	0.09
		2019/10/31	258	0.02	0.09	0.01	0.11
	G2	2006/7/27	185	0.05	0.05	0.73	0.10
		2006/10/13	202	0.16	0.17	0.40	0.11
		2016/8/26	259	0.68	0.51	0.83	0.11

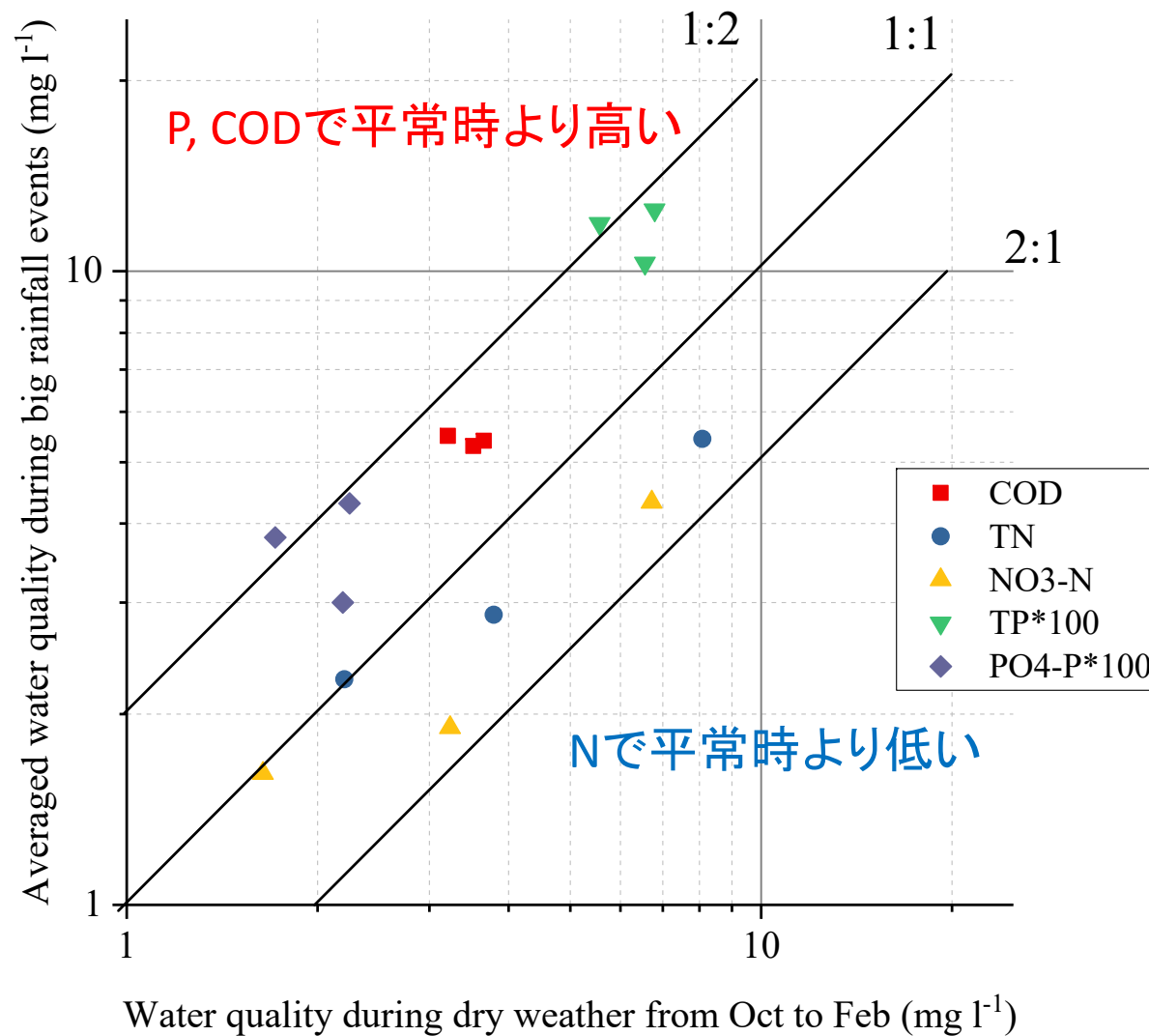
パーセンタイル値を100で割った数値

赤: 6-9月

青: 10-5月

降雨時水質と河川水質の関係(10月-2月)

Fukushima et al. (2021) SN App Sci

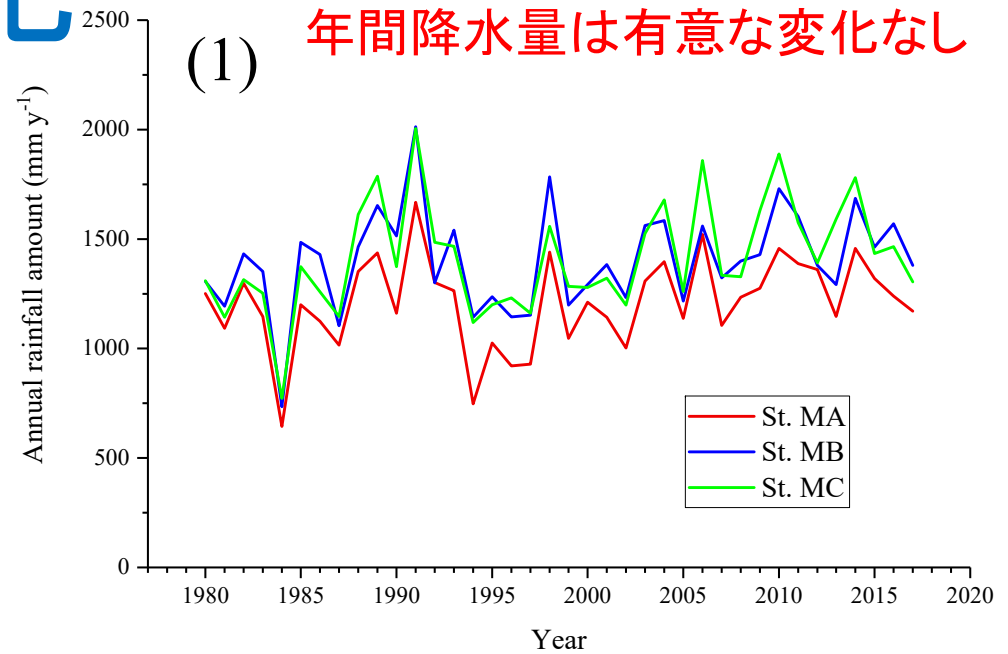


河川降雨時水質（海老瀬モデル）と 今回の大降雨時水質との比較

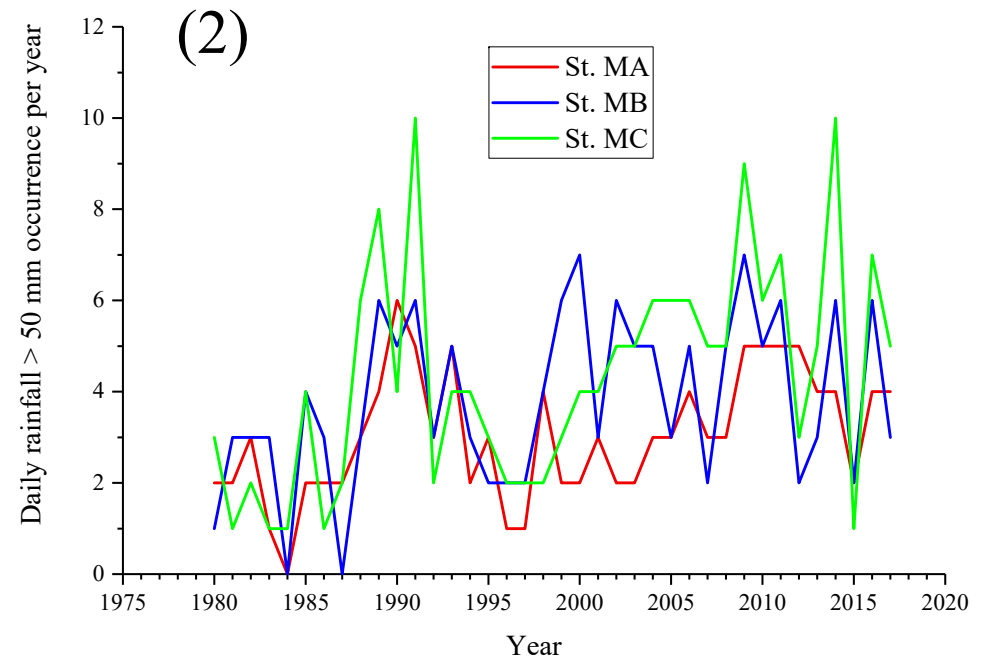
Fukushima et al. (2021) SN App Sci

	Average of St. 1, St. 2 and St. 3 in G1	Model estimation
COD	5.4	3.9
DCOD	4.1	3.6
TN	3.5	3.5
NO ₃ -N	2.6	2.0 (DTN)
TP	0.12	0.05
PO ₄ -P	0.04	0.04 (DTP)
Cl ⁻	13.2	4.5

降水形態の変化



50mm以上の降水量の日数が有意に増加



Fukushima et al. (2021) SN App Sci

今後の研究課題

- 湖沼水環境に影響が大きい気候変化、気象イベントを明確にし、その将来予測結果から水環境の問題を考える
- 底質形成の一般化モデル(流入粒子特性や植物プランクトン組成を考慮したbiogeochemicalモデル)の作成
- 湖沼と海域の水質浄化メカニズムの違い:沿岸植生、干潟...:湖沼における活用可能な浄化エネルギーは何か
- レジームシフトの要因:経年蓄積効果をもたらすものは何か
- リン資源としての底泥管理(例 European Sustainable Phosphorus Platform、リン循環産業振興機構)
- 生態系サービスの評価(下流型湖沼の特質、水質浄化の価値をいかに評価するか)

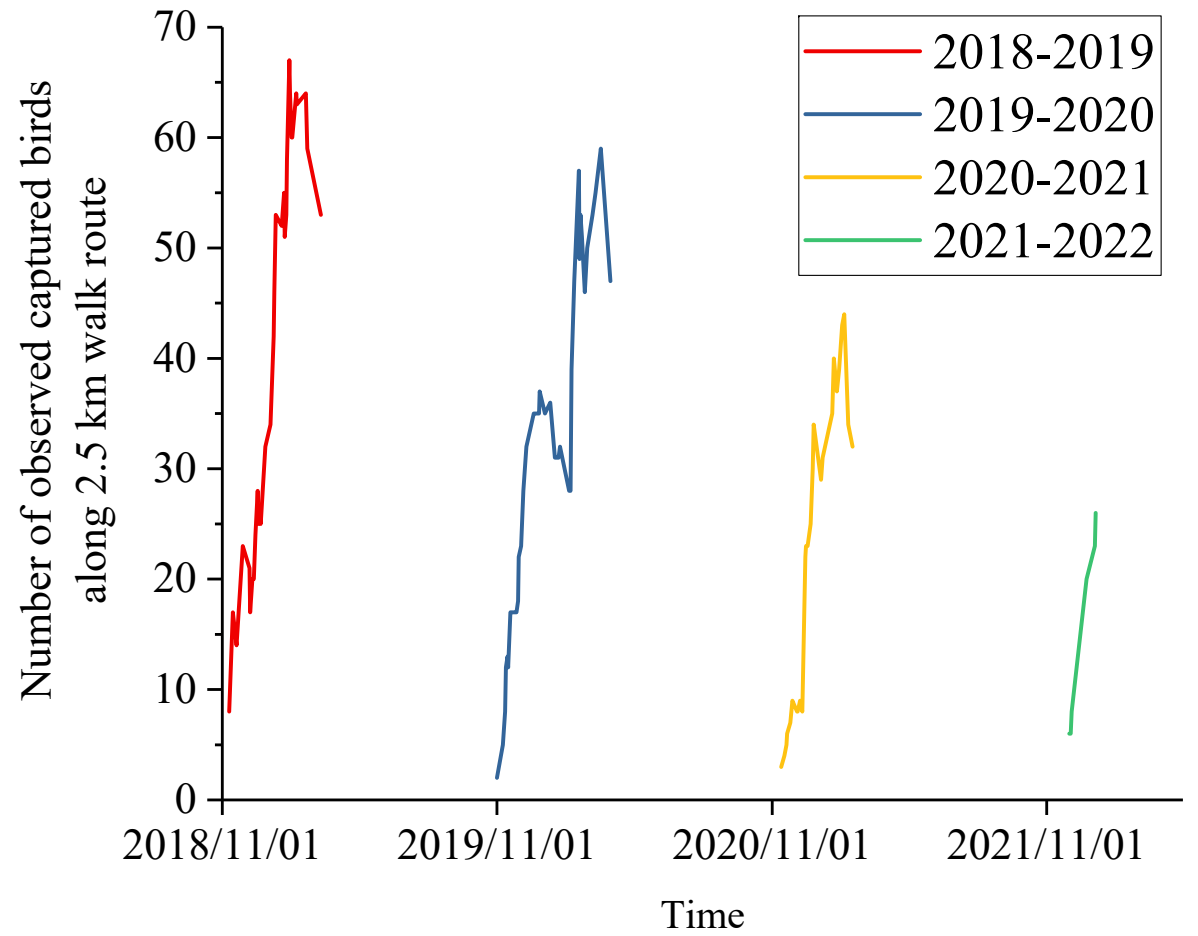
昼の散歩



自然再生湖岸 霞ヶ浦

ポンプ音 ヨシのさえずり 皐月の空へ
用水路 うごめく魚と 並ぶ鷺
湖岸道 薄い地平と ヨシの原

羅網数の変化



霞ヶ浦の管理に向けて

- 平常時水質管理目標値の再検討
目標水質、地域性（外来性生物、生態系管理、、、）
- 緊急時のレジリエントな対応（洪水、地震、水質事故、、、）
- 施設の適切な運用
導水、水門、自然再生地区、河口ウェットランド、、、
- 最新技術の活用（空中・水中ドローン、水中DNA情報、、、）

謝辞

- 茨城県霞ヶ浦環境科学センター、国立環境研究所、国土交通省霞ヶ浦河川事務所・霞ヶ浦導水工事事務所、水資源機構
- 筑波大学生命環境系、広島大学工学部、茨城大学水圏環境フィールドステーション、琵琶湖環境科学研究センター、インドネシア陸水研究所、環境省
- 科研費17H04475, 17H01850