

海洋深層水による海域肥沃化効果の検討
The effect of ocean fertilization
by deep sea water

2011/2/3

学籍番号 096648 塩苺 恵
指導教員 多部田 茂 准教授

1. 序論

研究背景

世界人口の増加



資源・エネルギー問題

食糧・水問題

地球温暖化, 砂漠化等
の環境問題

深刻化

日本: **低い食料自給率**
世界的な食糧難となった場合,
圧倒的に不利な状況となることが
予測される。



陸域の利用だけでは限界

これらの問題を解決するためには, **海洋利用が不可欠**

海洋深層水を利用した肥沃化により, 食糧を増産する
方法が検討されている

海域肥沃化の仕組み

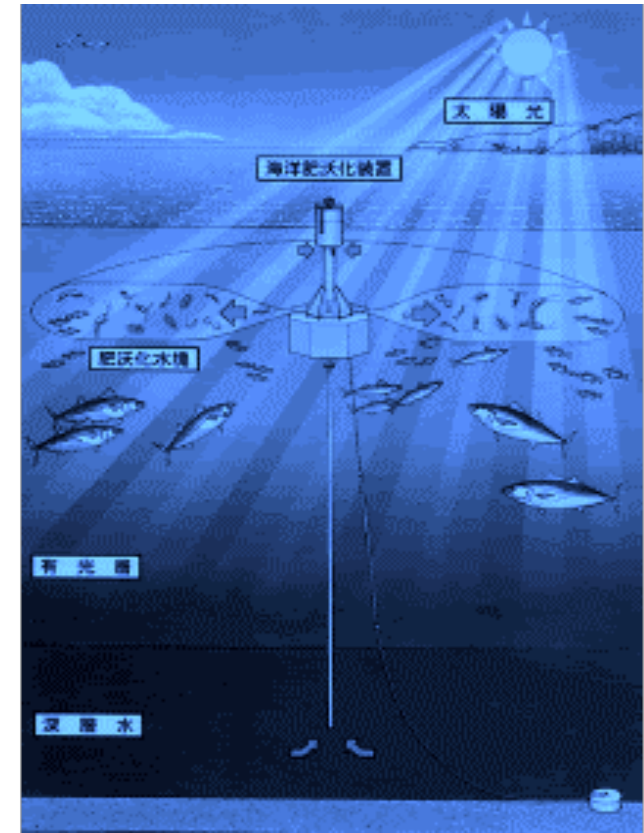
無機栄養塩の豊富な深層水を汲み上げ、
表層の貧栄養な有光層に放水する。



光合成が活発化し、植物プランクトンが増殖する。



植物プランクトン→動物プランクトン→小型魚→大型魚と、
食物連鎖が進み、水産資源が増加する。



Outline of Ocean Nutrient Enhancer
(Ouchi, Fukumiya et al., 2002)

東大の深層水汲み上げ施設がある伊豆大島を対象海域とし、シミュレーションによって海域肥沃化の効果を検討する。

先行研究との比較・研究の目的

大内(2004)

- ・相模湾での拓海プロジェクト
- ・海洋深層水を汲み上げ・放水
- ・放水後の深層水の挙動と一次生産の増加の様子を観測

Mizumukai et al.(2008)

- ・沖ノ鳥島付近での肥沃化効果を数値シミュレーションで検討
- ・一次生産の増加は認められたが、増加率で見れば微々たるものであった

先行研究:それぞれ実験, シミュレーションのみを行ったもの
一次生産の増殖効果のみに注目

本研究:実際の深層水を用いた**実験とシミュレーション**を合わせて行う
二次生産まで考慮した生態系モデルを使用
プランクトンの**種組成**まで考慮

海域肥沃化の効果を検討する上で重要となる要素や生態系プロセス,
パラメータを感度解析等によって抽出, それらの要素やパラメータの決定の仕方などの**ポイント**をまとめ, 肥沃化効果の**評価手法**を構築する

研究手法

<実験>

- ・表層水のみ tanks と、深層水を混ぜた tanks を用意
- ・ tanks 内でのプランクトン、無機栄養塩、有機物の濃度変化を観測

<パラメータ調査>

プランクトンの光合成、枯死等に関するパラメータを推定する

<実験の再現>

推定されたパラメータを生態系モデルに設定し、実験と同じ条件でシミュレーションを行う

<比較・モデルの検証>

比較結果が合わない

<パラメータ調整>

実験結果と計算結果を合わせるため、パラメータ等の調整を行う

比較結果が良好

<肥沃化効果の検討>

深層水を放水する場合としない場合の計算結果を比較、肥沃化効果の検討を行う

2. 生態系モデル

参考にした生態系モデル

NEMURO(Kishi et al., 2007):

- ・2種の植物プランクトン(PS, PL), 3種の動物プランクトン(ZS, ZL, ZP), 懸濁態有機窒素(PON), 溶存態有機窒素(DON), アンモニウム塩(NH_4), 硝酸塩(NO_3), 懸濁態有機ケイ素(Opal), ケイ酸塩($\text{Si}(\text{OH})_4$)の11のコンパートメントからなるone-boxモデル
- ・PLは大型珪藻類, PSはその他の小型植物プランクトンを想定
- ・窒素とケイ素の循環を別々に扱う

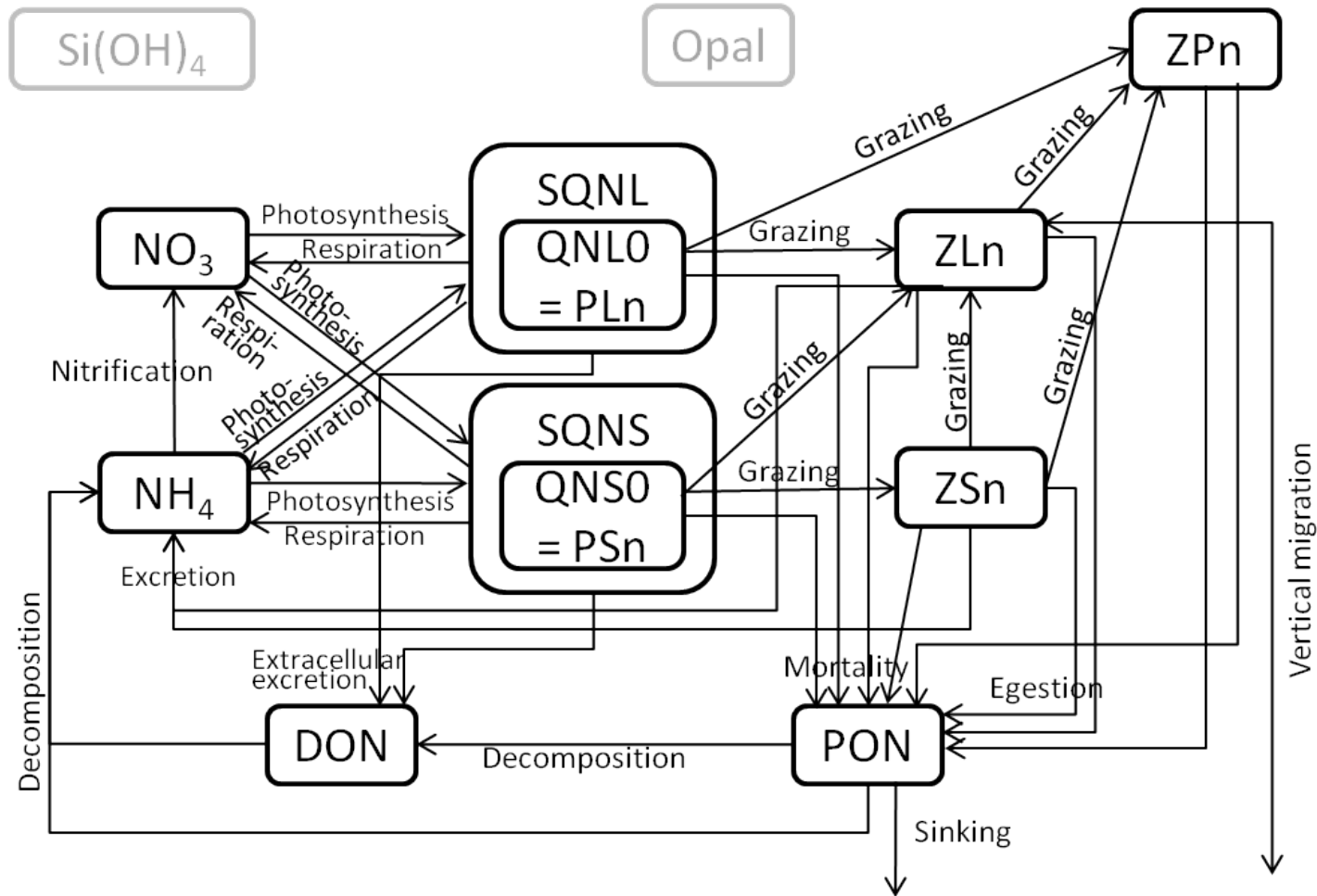
中田(1993):

- ・任意の種数の植物プランクトン, 動物プランクトン, 懸濁態有機物(POM), 溶存態有機物(DOM), アンモニウム塩(NH_4), 硝酸塩(NO_3), 亜硝酸塩(NO_2), リン酸塩(PO_4)から構成されるone-boxモデル
- ・セルクオタ(植物プランクトンの細胞内栄養塩保持量)を考慮



NEMUROをベースに, 中田(1993)によるセルクオタを導入

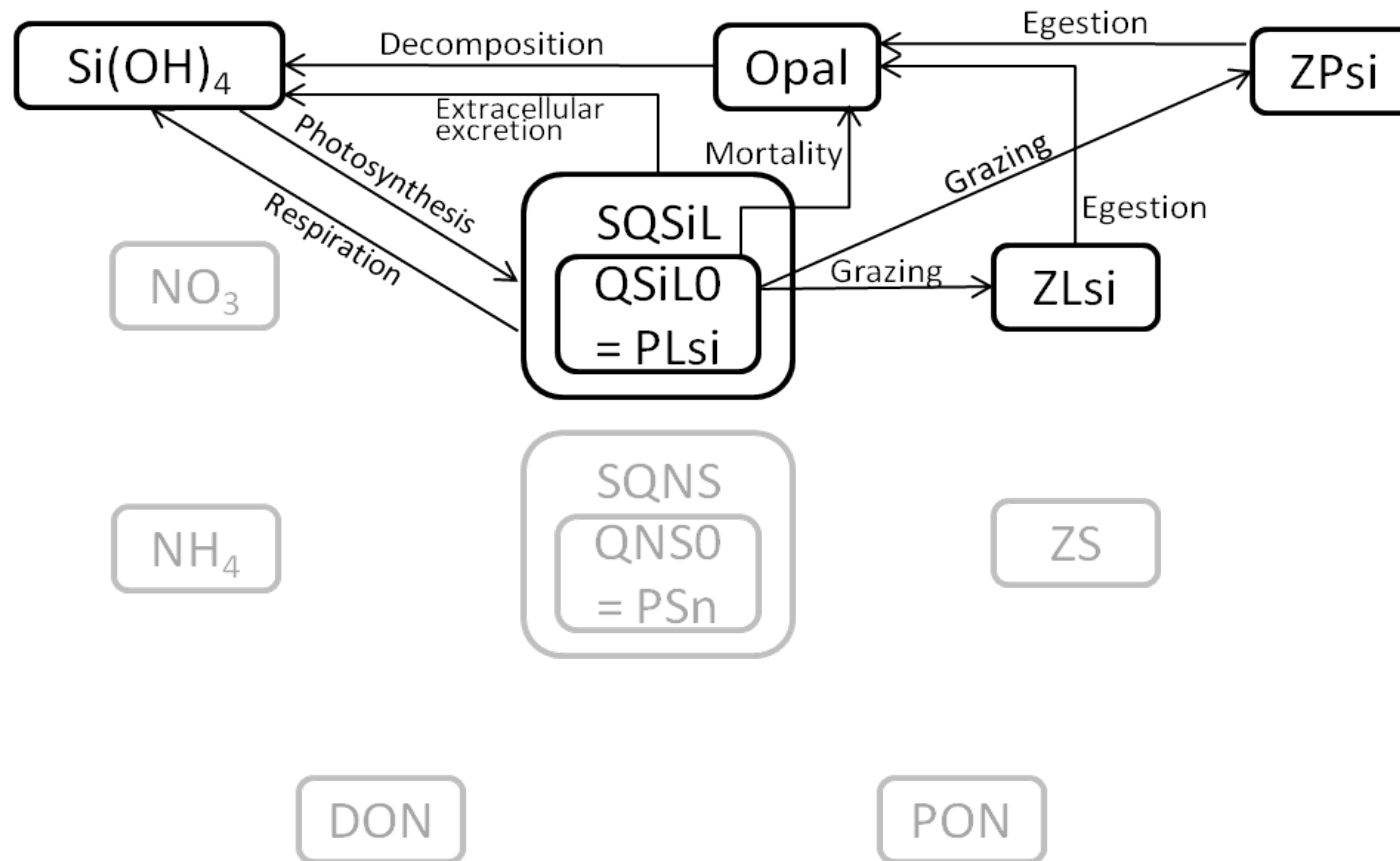
使用する生態系モデル



Schematic view of the ecosystem model. (For Nitrogen flows.)

(Kishi et al.(2007)を基に、中田(1993)を参考にセルクオタを加えて作成、末尾にnの記号が付加されているコンパートメントは、それらの量を窒素量で表現することを意味する。)

使用する生態系モデル



Schematic view of the ecosystem model. (For Silicon flows.)

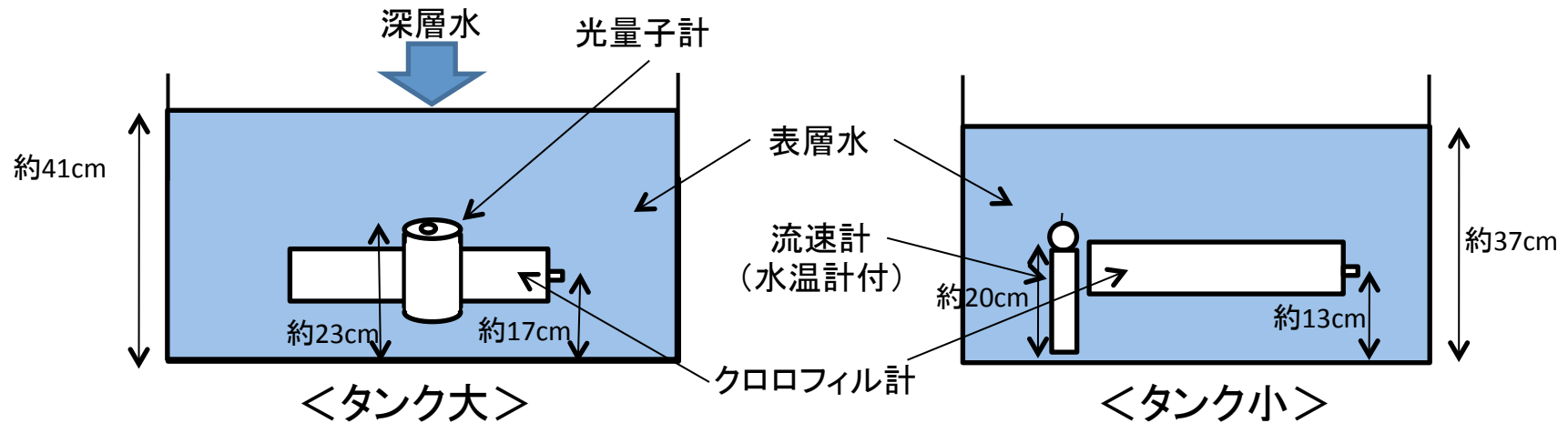
(Kishi et al.(2007)を基に, 中田(1993)を参考にセルクオタを加えて作成, 末尾にsiの記号が付加されているコンパートメントは, それらの量をケイ素量で表現することを意味する。)

3. 実験

実験内容

大小2つのタンクを用意

実験期間: 10月14日から11月12日



The outline of the experiment.

測定項目:

①水温 ②日照量 ③クロロフィルa濃度 ④プランクトン濃度 ⑤無機栄養塩, 有機物濃度

①タンク大: クロロフィル計により10分ごとに計測, タンク小: 流速計により10分ごとに計測

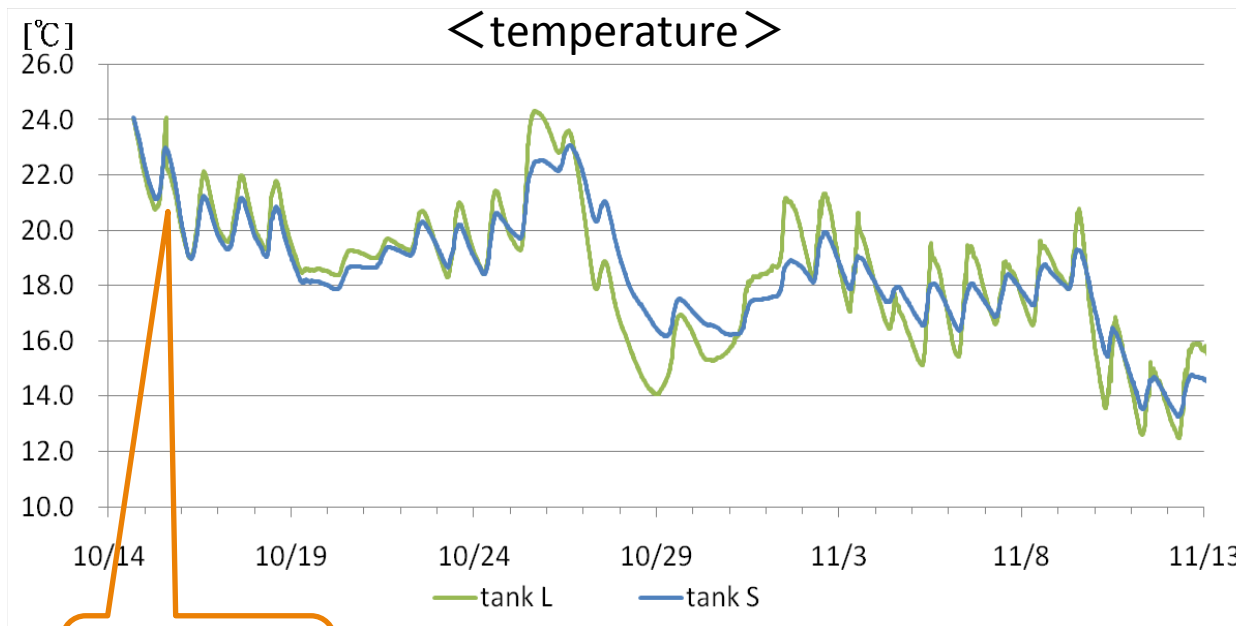
②光量子計により10分ごとに計測(タンク大のみ)

③両タンクに設置したクロロフィル計により10分ごとに計測

④10月14日から10月19日までは毎日, その後は10月28日及び11月12日に各1L採水を行い, すぐにルゴール液5%を加えて固定⇒プランクトン種の同定・計数, 体積・重量の推定(外注)

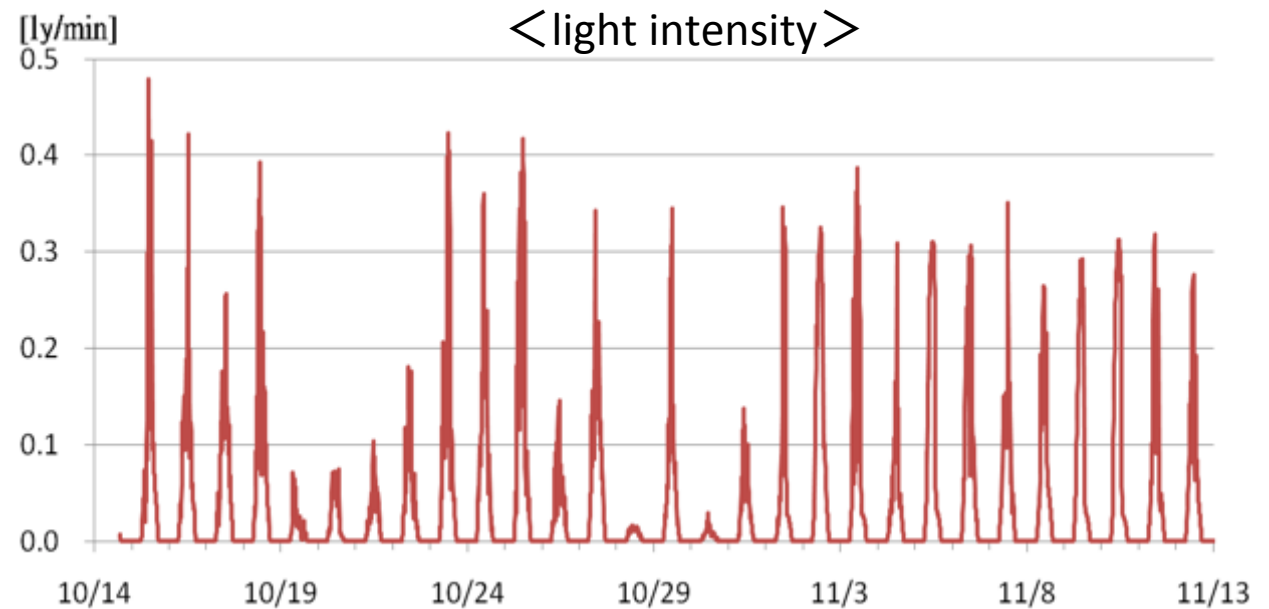
⑤10月14日から10月19日までは毎日, その後は10月28日及び11月12日に各50ml程度採水し, フィルターにかけて濾過後, 冷凍保存して持ち帰り, オートアナライザーによって分析

実験データ 水温・日照量



これらのデータは生態系モデルのinputデータとして使用。

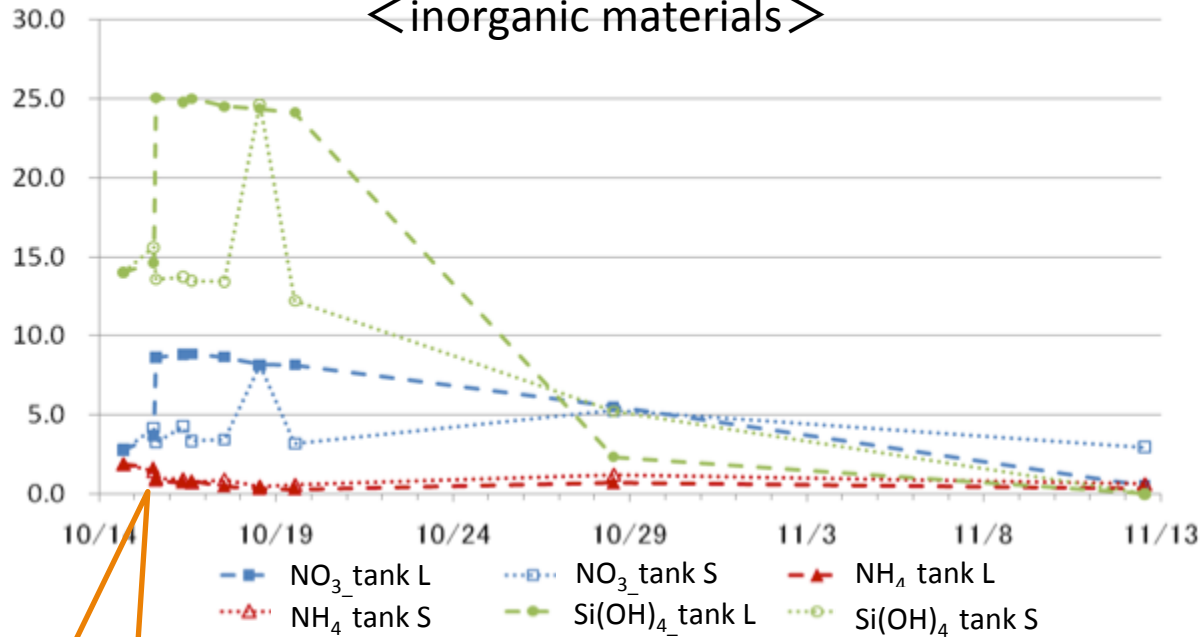
深層水を
加える



実験データ 無機物・プランクトン濃度

[$\mu\text{molN/L}$]または[$\mu\text{molSi/L}$]

<inorganic materials>

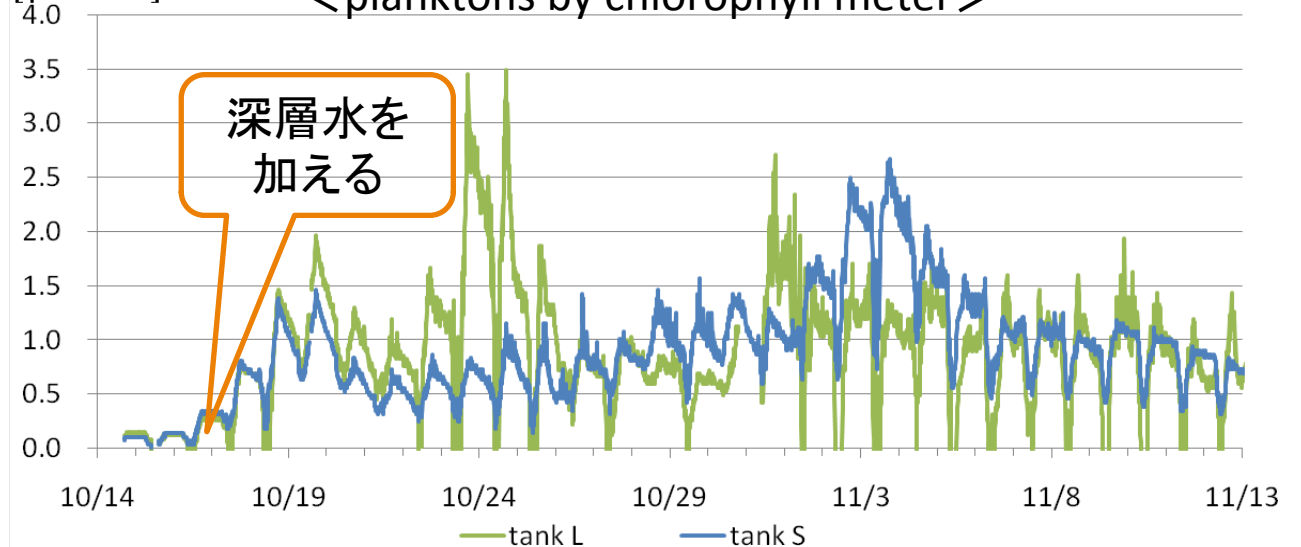


これらのデータは実験開始時の値を初期値に使用。
残りは生態系モデルのoutputと比較。

深層水を
加える

[$\mu\text{molN/L}$]

<planktons by chlorophyll meter>



深層水を
加える

実験データ 採水によるプランクトン濃度

PSに分類されるプランクトン種の内訳を下表に示す。PL 48種, ZS 11種についても同様に求められた。ZL, ZPについては, 今回の実験タンク中にはほとんど存在しなかった。

No.	門	綱	目	科	種名	学名		
1	藍藻植物	藍藻	ユレモ	ユレモ	藍藻類	Oscillatoria sp.		
2	クリプト植物	クリプト藻	不明	不明	クリプト藻類	Cryptophyceae		
3	渦鞭毛植物	渦鞭毛藻	プロケントム	プロケントム	渦鞭毛藻類	Prorocentrum micans		
4					渦鞭毛藻類	Prorocentrum minimum		
5			ディノフィシス	ディノフィシス	渦鞭毛藻類	Dinophysis caudata		
6					渦鞭毛藻類	Dinophysis sp.		
7			ノクティルカ	ノクティルカ	渦鞭毛藻類	Pronoctiluca spinifera		
8			ギムノディニウム	不明	渦鞭毛藻類	Gymnodiniales		
9					渦鞭毛藻類	Gymnodiniales(Gyrodinium?)		
10			ゴニオラックス	ケラチウム	渦鞭毛藻類	Ceratium furca		
11					渦鞭毛藻類	Ceratium fusus		
12					オキソトサム	渦鞭毛藻類	Oxytoxum sp.	
13			ペリディニウム	カルキオディネラ	ペリディニウム	渦鞭毛藻類	Scrippsiella spp.	
14						渦鞭毛藻類	Heterocapsa triquetra	
15						プロトペリディニウム	渦鞭毛藻類	Protoperidinium bipes
16							渦鞭毛藻類	Protoperidinium oblongum
17							渦鞭毛藻類	Protoperidinium pallidum
18							渦鞭毛藻類	Protoperidinium pellucidum
19							渦鞭毛藻類	Protoperidinium spp.
20						不明	不明	渦鞭毛藻類
21			渦鞭毛藻類	Peridinales				
22			不明	不明	不明	不明	不明微小鞭毛藻	

プランクトン種別濃度の変化

the numbers and concentrations of the planktons by bottling

上:タンク大, 下:タンク小, n[cell/L]: 個体数, N[μmol/L]: 窒素量

time	PS		PL		ZS	
	n	N	n	N	n	N
10/14 16:50	20	1.89×10^{-4}	490	2.65×10^{-2}	13	4.85×10^{-4}
10/15 13:00	50	2.38×10^{-5}	800	2.97×10^{-3}	16	2.82×10^{-4}
10/16 9:00	10	5.77×10^{-6}	2460	9.92×10^{-3}	42	1.18×10^{-3}
10/16 15:00	10	2.58×10^{-5}	4450	6.12×10^{-3}	55	1.48×10^{-3}
10/17 13:00	500	1.00×10^{-3}	12960	7.35×10^{-3}	75	1.91×10^{-3}
10/18 13:00	11760	2.15×10^{-2}	35370	1.97×10^{-2}	138	4.06×10^{-3}
10/19 13:00	8160	2.28×10^{-2}	95270	5.69×10^{-2}	476	1.52×10^{-2}
10/28 13:00	885250	1.42	34650	2.24×10^{-2}	77766	2.50
11/12 13:00	1259250	2.25	450	2.37×10^{-3}	7368	1.16×10^{-1}

time	PS		PL		ZS	
	n	N	n	N	n	N
10/14 16:50	20	1.89×10^{-4}	490	2.65×10^{-2}	13	4.85×10^{-4}
10/15 13:00	20	1.27×10^{-4}	420	1.43×10^{-3}	11	2.39×10^{-4}
10/16 9:00	30	5.16×10^{-5}	1400	7.73×10^{-3}	23	6.06×10^{-4}
10/16 15:00	30	6.69×10^{-5}	3610	4.96×10^{-3}	51	1.27×10^{-3}
10/17 13:00	600	1.01×10^{-3}	6360	2.35×10^{-3}	56	1.59×10^{-3}
10/18 13:00	3600	7.82×10^{-3}	12460	9.73×10^{-3}	432	7.73×10^{-3}
10/19 13:00	5180	1.86×10^{-2}	49210	2.22×10^{-2}	1428	4.04×10^{-2}
10/28 13:00	89240	2.35×10^{-1}	102420	2.58×10^{-2}	69764	2.24
11/12 13:00	1253780	2.26	9540	2.23×10^{-2}	9608	3.09×10^{-1}

PS, PLの
濃度が逆転

4. パラメータ調査

パラメータ調査結果

The values of the parameters used in the model.

PS			PL		
symbol	value	unit	symbol	value	unit
V_{maxS}	0.534 * ¹	[/day]	V_{maxL}	1.58 * ¹	[/day]
k_{NO_2S}	2.61 * ¹	[$\mu\text{molN/L}$]	k_{NO_2L}	1.38 * ¹	[$\mu\text{molN/L}$]
k_{NH_4S}	0.790 * ¹	[$\mu\text{molN/L}$]	k_{NH_4L}	1.33 * ¹	[$\mu\text{molN/L}$]
ψ_S	1.50	[L/ μmolN]	k_{SiL}	0.888 * ¹	[$\mu\text{molSi/L}$]
k_{GppS}	6.93×10^{-2}	[$^{\circ}\text{C}$]	ψ_L	1.50	[L/ μmolN]
Mor_{PS0}	5.85×10^{-2}	[/day]	k_{GppL}	6.93×10^{-2}	[$^{\circ}\text{C}$]
k_{MorPS}	6.93×10^{-2}	[$^{\circ}\text{C}$]	Mor_{PL0}	5.85×10^{-2}	[/day]
Res_{PS0}	9.40×10^{-2} * ²	[/day]	k_{MorPL}	6.93×10^{-2}	[$^{\circ}\text{C}$]
k_{ResPS}	5.19×10^{-2}	[$^{\circ}\text{C}$]	Res_{PL0}	9.40×10^{-2} * ¹	[/day]
Y_S	0.135	—	k_{ResPL}	5.19×10^{-2}	[$^{\circ}\text{C}$]
PQN_{maxS}	10.0	—	Y_L	0.135	—
UN_{maxS}	10.0	[/day]	PQN_{maxL}	10.0	—
I_{optS}	7.00×10^{-2}	[ly/min]	$PQSi_{maxL}$	10.0	—
both PS and PL			UN_{maxL}	10.0	[/day]
symbol	value	unit	USi_{maxL}	10.0	[/day]
α_1	3.50×10^{-2}	[/m]	I_{optL}	7.00×10^{-2}	[ly/min]
α_2	2.81×10^{-2}	[$\mu\text{molN/m}$]	$RSiN$	1.00	[molSi/molN]

*¹ ECOTOX(Jørgensen et al., 2000)より, *² データがないのでPLのデータを使用

その他はKishi et al. (2007)より, ただし窒素のセルクオタに関するパラメータは中田(1993)によるパラメータを引用し, ケイ素のセルクオタに関するものはSi/N = 1.0より窒素と同じ値を用いた。

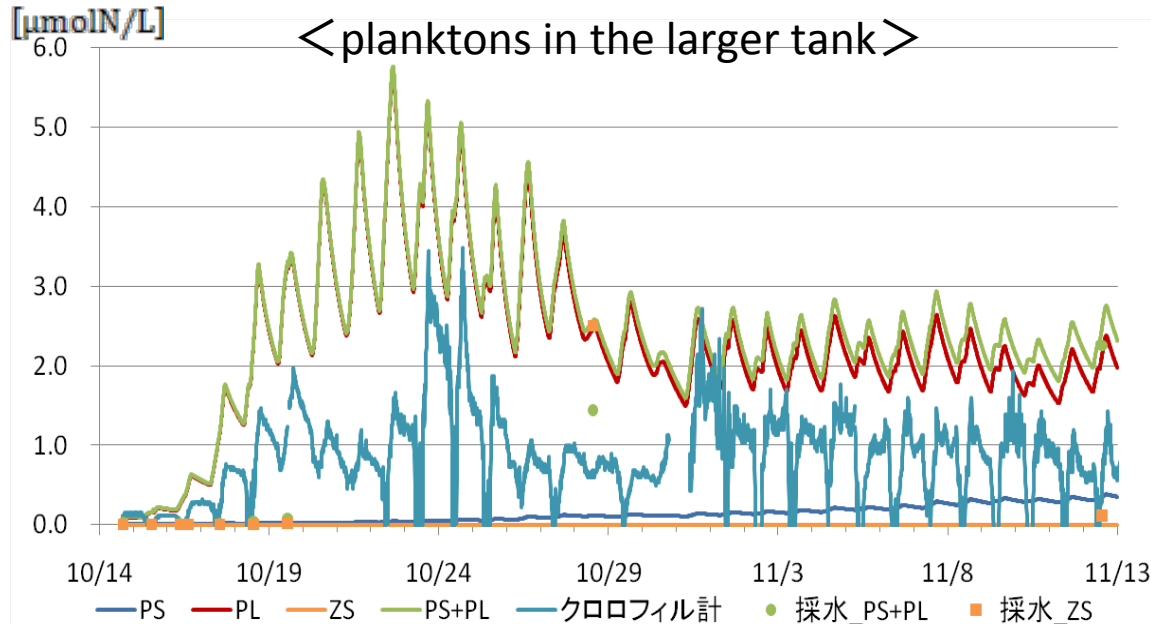
5. 実験の再現

実験の再現 -計算条件-

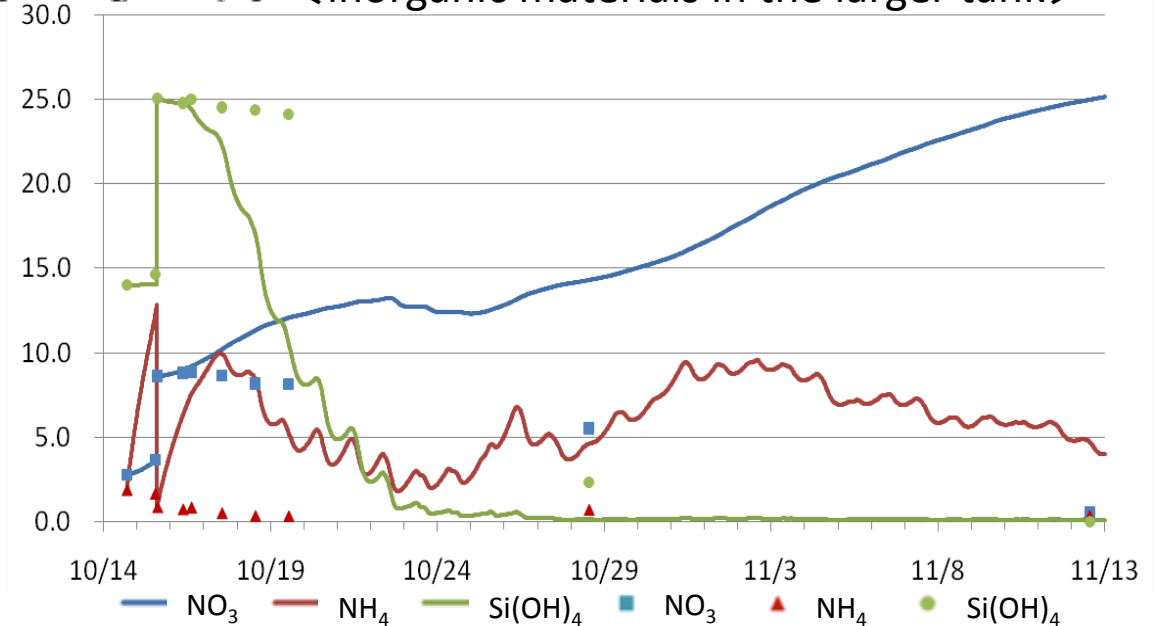
conditions of the calculations.

	タンク大	タンク小
水温	タンク大における観測値	タンク小における観測値
日照量	タンク大における観測値	タンク大における観測値
プランクトン濃度初期値	植物：タンク大におけるクロロフィル計データの窒素換算値 動物：10/14の採水による観測値	植物：タンク大におけるクロロフィル計データの窒素換算値 動物：10/14の採水による観測値
無機栄養塩濃度初期値	10/14の採水による観測値	10/14の採水による観測値
有機物濃度初期値	窒素：有機窒素濃度を懸濁態と溶解態に2分割して使用 ケイ素：窒素の[有機：無機]比を用いて、無機ケイ素量から推算	窒素：有機窒素濃度を懸濁態と溶解態に2分割して使用 ケイ素：窒素の[有機：無機]比を用いて、無機ケイ素量から推算
深層水投入の影響	深層水投入時刻に、プランクトン濃度、有機物濃度を8割に減じ、無機栄養塩濃度については、タンク大における <u>深層水投入後の観測値</u> を使用	初期値変更なしで最後まで計算
パラメータ	文献調査の結果	文献調査の結果

実験の再現 -タンク大・パラメータ調整前-



＜inorganic materials in the larger tank＞



(the lines of NO_3 , NH_4 and Si(OH)_4 are calculated, and the points of them are observed.)

パラメータの感度解析と調整結果

- プラクトン濃度の変化に対する影響
 - V_{\max} を大きく \Rightarrow プラクトン濃度が増加
 - k_{GppS} を大きく \Rightarrow プラクトン濃度が増加, V_{\max} よりも影響大, 水温の違いによる差が拡大
 - M_{or} を大きく \Rightarrow プラクトン濃度が減少
 - k_{Mor} を大きく \Rightarrow プラクトン濃度が減少, M_{or} よりも影響大, 水温の違いによる差が拡大
- 無機栄養塩濃度, 有機物濃度の変化に対する影響
 - $VP2\text{N0}$, $VD2\text{N0}$, $VP2\text{Si0}$ を大きく \Rightarrow 無機栄養塩濃度増加, 有機物濃度減少
 - $KP2\text{N}$, $KD2\text{N}$, $KP2\text{Si}$ を大きく \Rightarrow 無機栄養塩濃度増加, 有機物濃度減少, $VP2\text{N0}$, $VD2\text{N0}$, $VP2\text{Si0}$ よりも影響小

これらの結果を基に調整

$$V_{\max\text{L}} = 0.632 \text{ [}/\text{day]} \text{ (前後比0.4倍)},$$

$$M_{\text{orPL0}} = 11.7 \times 10^4 \text{ [}/\text{day]} \text{ (前後比2.0倍)},$$

$$V_{\max\text{S}} = 0.6408 \text{ [}/\text{day]} \text{ (前後比1.2倍)},$$

$$VP2\text{N0} = 5.0 \times 10^{-3} \text{ [}/\text{day]} \text{ (前後比0.1倍)},$$

$$VP2\text{Si0} = 5.0 \times 10^{-4} \text{ [}/\text{day]} \text{ (前後比0.1倍)}$$

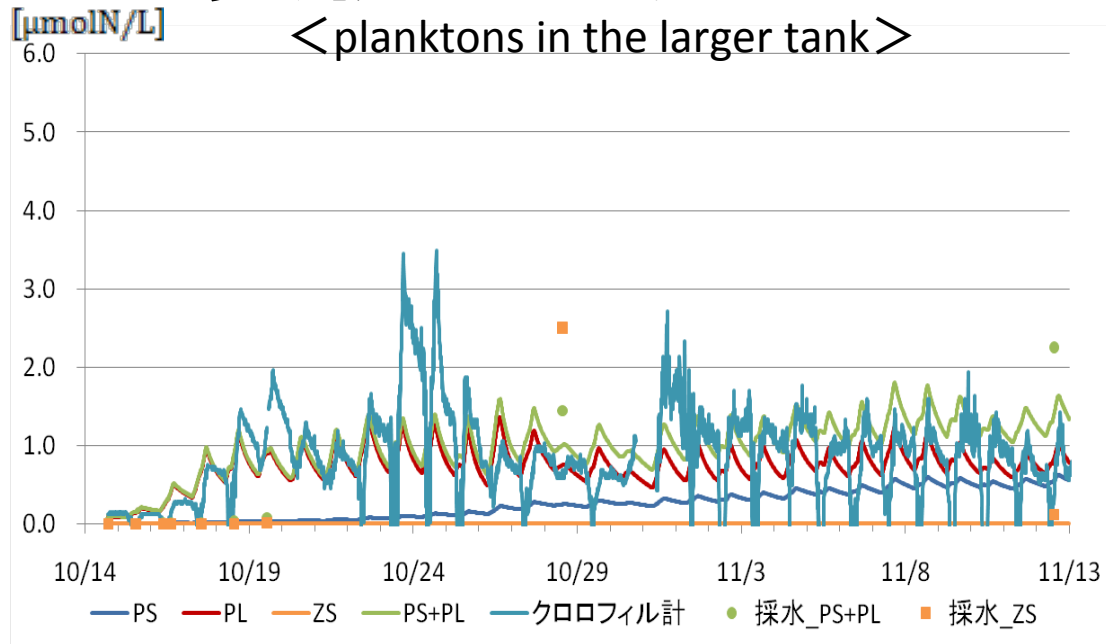
$$k_{\text{GppL}} = 11.781 \times 10^{-2} \text{ [-]} \text{ (前後比1.7倍)}$$

$$k_{\text{MorPL}} = 11.088 \times 10^{-2} \text{ [-]} \text{ (前後比1.6倍)},$$

$$k_{\text{MorPS}} = 9.702 \times 10^{-2} \text{ [-]} \text{ (前後比1.4倍)},$$

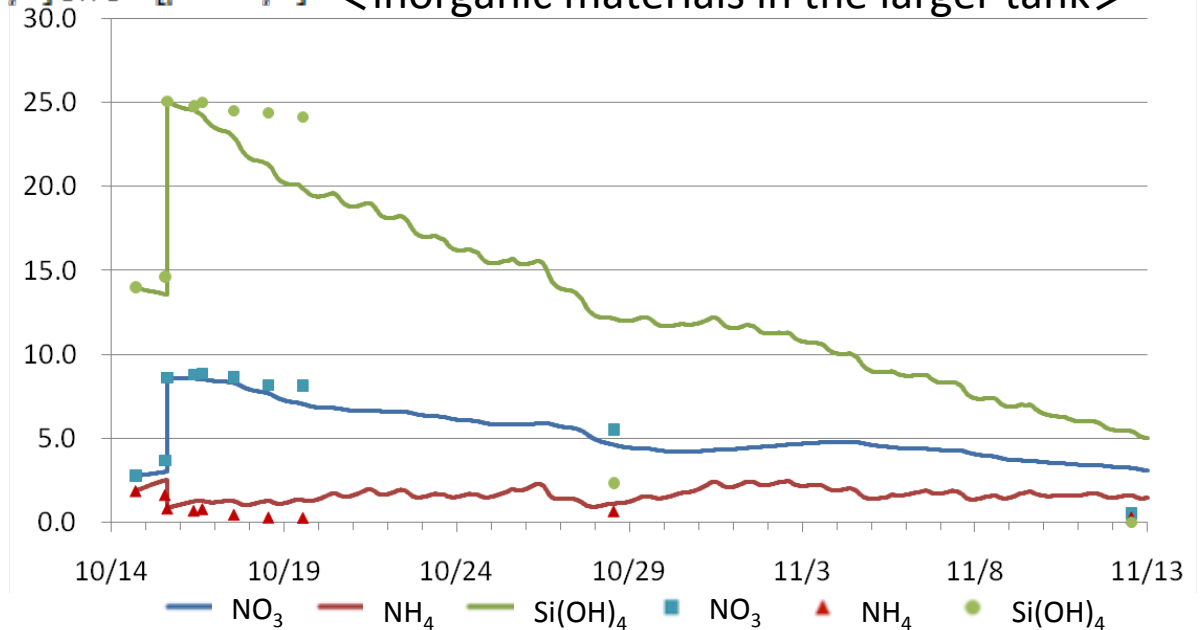
$$VD2\text{N0} = 5.0 \times 10^{-3} \text{ [}/\text{day]} \text{ (前後比0.1倍)},$$

実験の再現 -タンク大・パラメータ調整後-



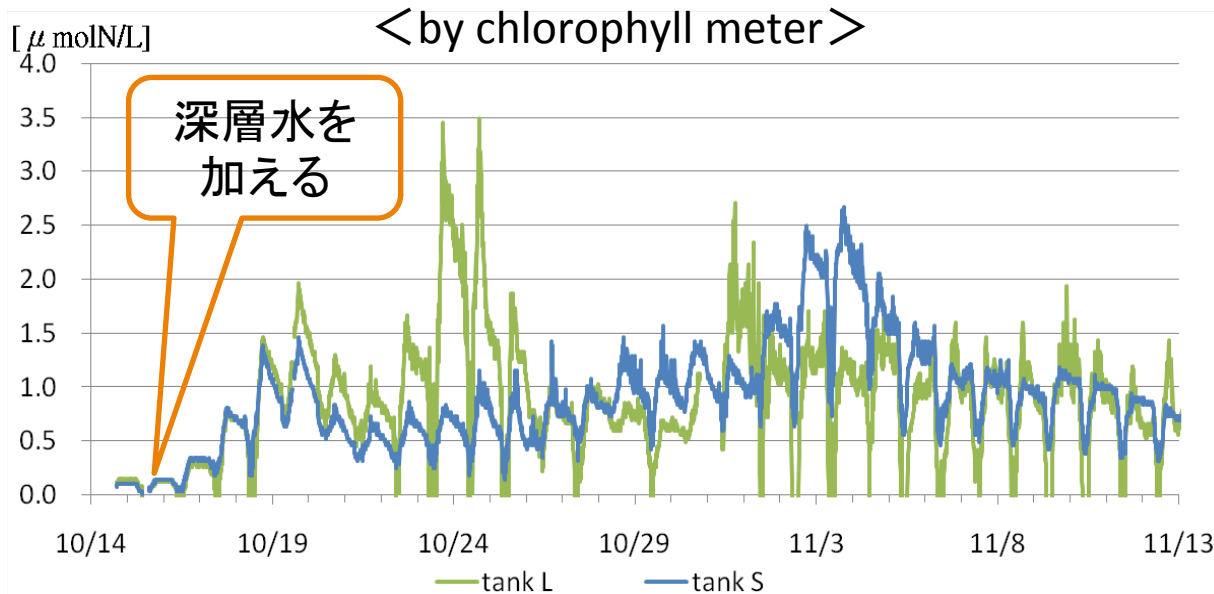
(the lines of PS, PL, ZS and PS+PL are calculated, and the points of PS+PL and ZS are observed.)

＜inorganic materials in the larger tank＞



(the lines of NO₃, NH₄ and Si(OH)₄ are calculated, and the points of them are observed.)

実験結果に対する仮説とその検証



タンク大・小のプランクトン濃度の変化を比較

↓

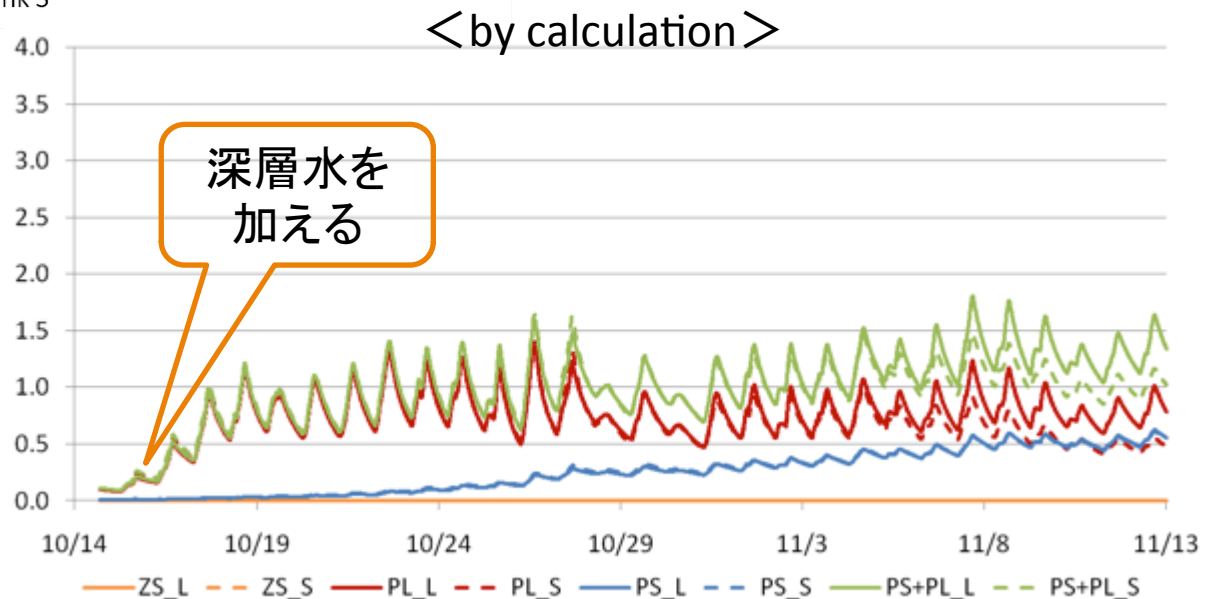
深層水添加による栄養塩濃度の上昇にもかかわらず、プランクトン濃度はそれほど上昇していない。

< 仮説 >

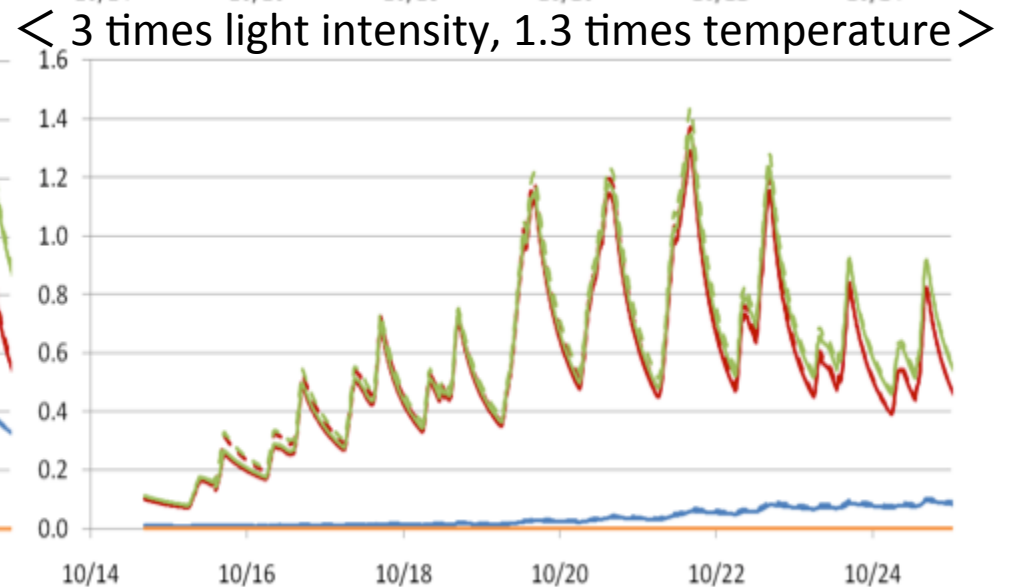
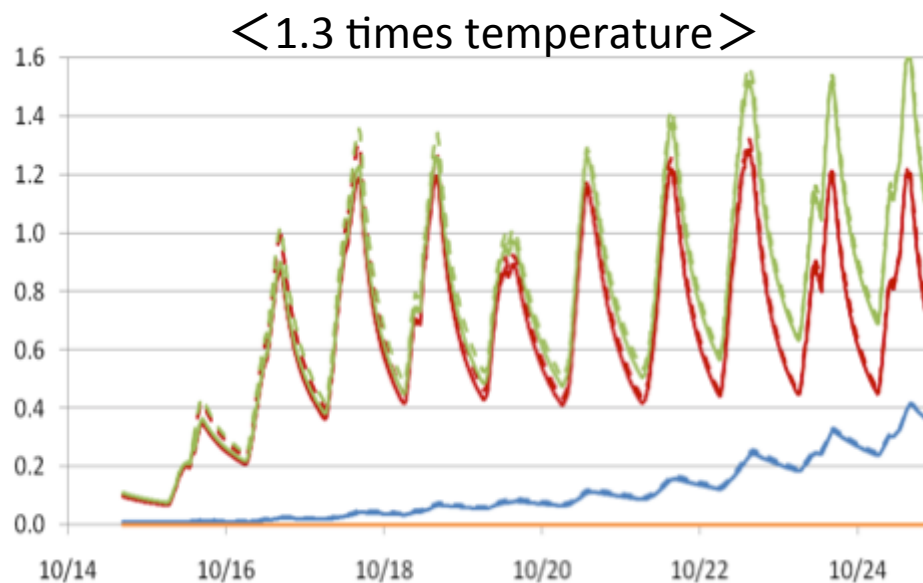
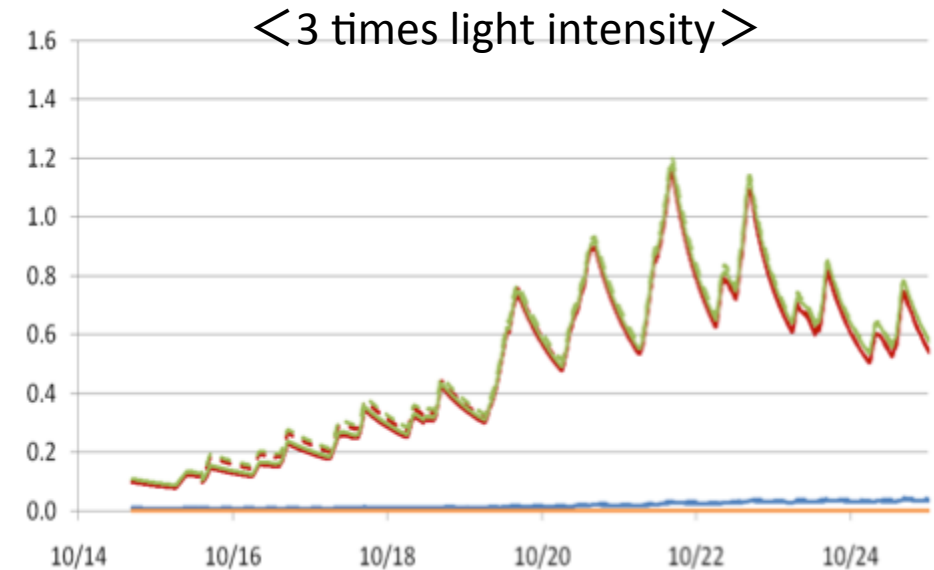
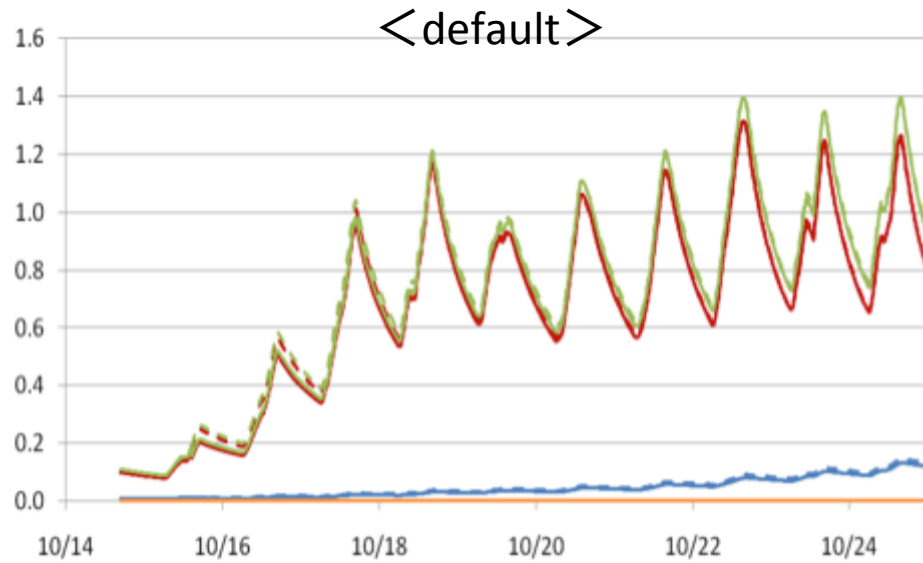
今回の実験では、植物プランクトンの光合成に対して、無機栄養塩濃度による制限がかかっていなかったと考えられる。

↓

では制限になっていたのは日照量？水温？

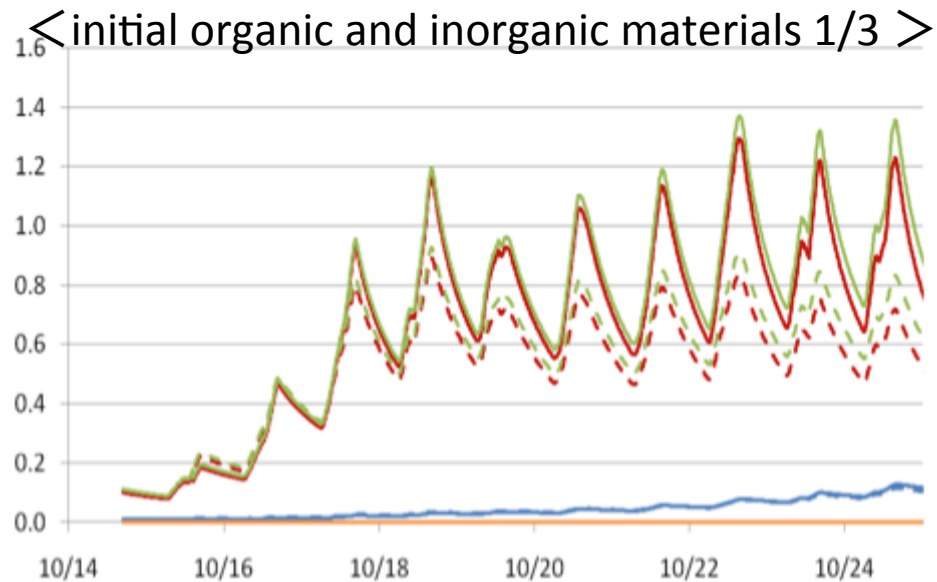
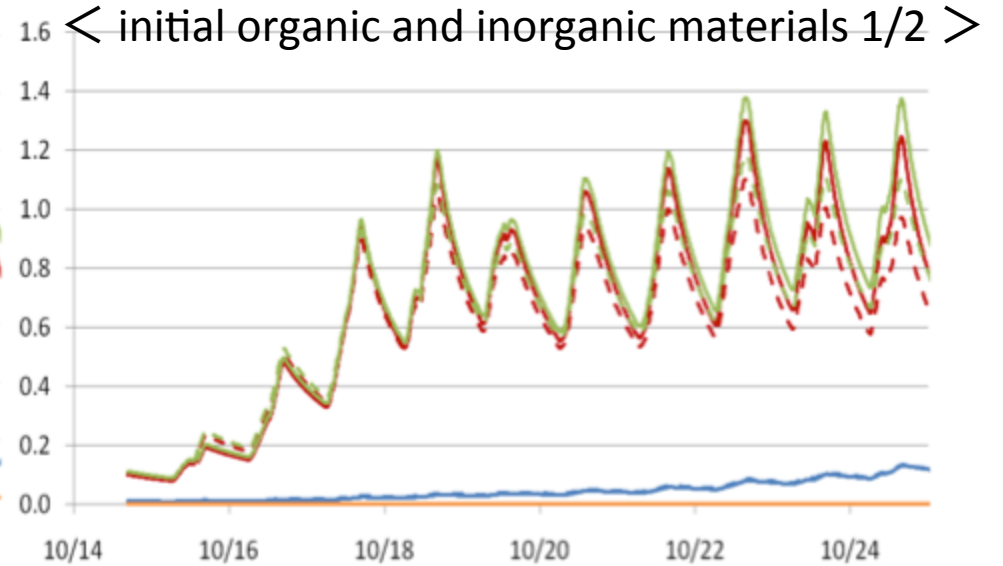
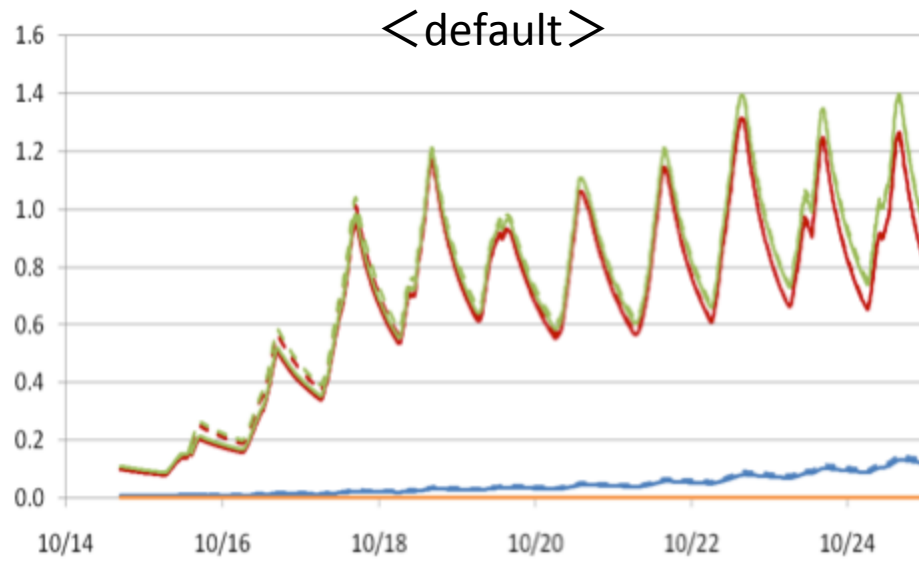


日照量・水温の変化に対する応答



— PS_L - - PS_S — PL_L - - PL_S — ZS_L - - ZS_S — PS+PL_L - - PS+PL_S

栄養塩濃度の変化に対する応答(1)



— PS_L - - PS_S — PL_L - - PL_S
— ZS_L - - ZS_S — PS+PL_L - - PS+PL_S

栄養塩摂取に関する式

$$\text{UptakeNS} = v_{S1}(\text{NH}_4, \text{NO}_3) \cdot \text{QNS0} \quad (1)$$

$$\text{UptakeNL} = v_{L1}(\text{NH}_4, \text{NO}_3) \cdot \text{QNL0} \quad (2)$$

$$v_{S1}(\text{NH}_4, \text{NO}_3) = \text{UN}_{\text{maxS}} \left(\frac{\text{GppNPSn}}{\text{K}_{\text{NO}_3\text{S}} + \text{NO}_3} \exp(-\psi_S \text{NH}_4) + \frac{\text{GppAPSn}}{\text{K}_{\text{NH}_4\text{S}} + \text{NH}_4} \right) \cdot v_{S2}(\text{QNS0}, \text{SQNS}) \quad (3)$$

$$v_{L1}(\text{NH}_4, \text{NO}_3) = \text{UN}_{\text{maxL}} \left(\frac{\text{GppNPLn}}{\text{K}_{\text{NO}_3\text{L}} + \text{NO}_3} \exp(-\psi_L \text{NH}_4) + \frac{\text{GppAPLn}}{\text{K}_{\text{NH}_4\text{L}} + \text{NH}_4} \right) \cdot v_{L2}(\text{QNL0}, \text{SQLN}) \quad (4)$$

$$v_{S2}(\text{QNS0}, \text{SQNS}) = \text{PQN}_{\text{maxS}} - \frac{\text{QNS0} + \text{SQNS}}{\text{QNS0}} / (\text{PQN}_{\text{maxS}} - 1) \quad (5)$$

$$v_{L2}(\text{QNL0}, \text{SQLN}) = \text{PQN}_{\text{maxL}} - \frac{\text{QNL0} + \text{SQLN}}{\text{QNL0}} / (\text{PQN}_{\text{maxL}} - 1) \quad (6)$$

$\text{K}_{\text{NO}_3\text{S}}$ $\text{K}_{\text{NH}_4\text{S}}$: PS Half saturation constant for Nitrate, Ammonium

QNS0 = PS

$\text{K}_{\text{NO}_3\text{L}}$ $\text{K}_{\text{NH}_4\text{L}}$: PL Half saturation constant for Nitrate, Ammonium

QNL0 = PL

ψ_S ψ_L : PS and PL Ammonium Inhibition Coefficient

UN_{maxS} : PS Maximum Uptake rate for Nitrogen

UN_{maxL} : PL Maximum Uptake rate for Nitrogen

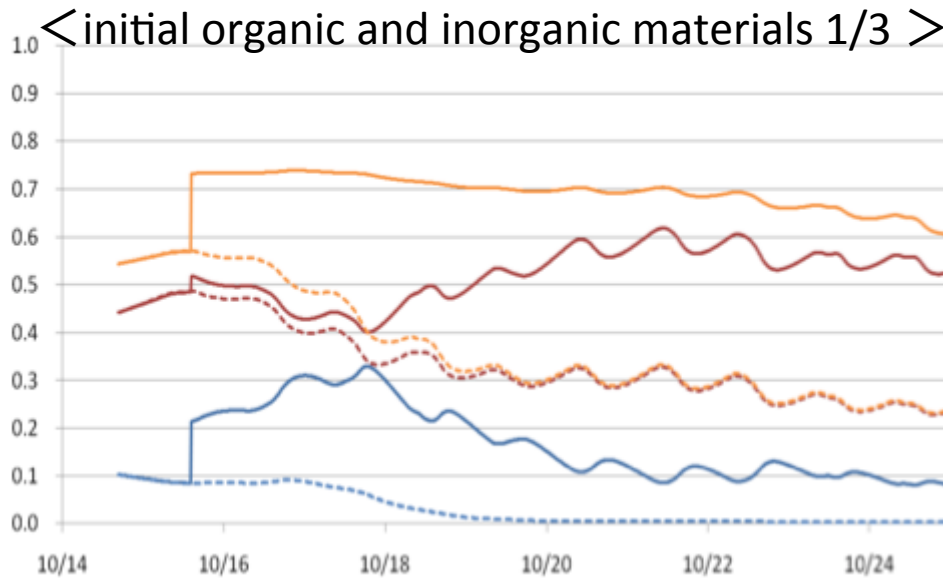
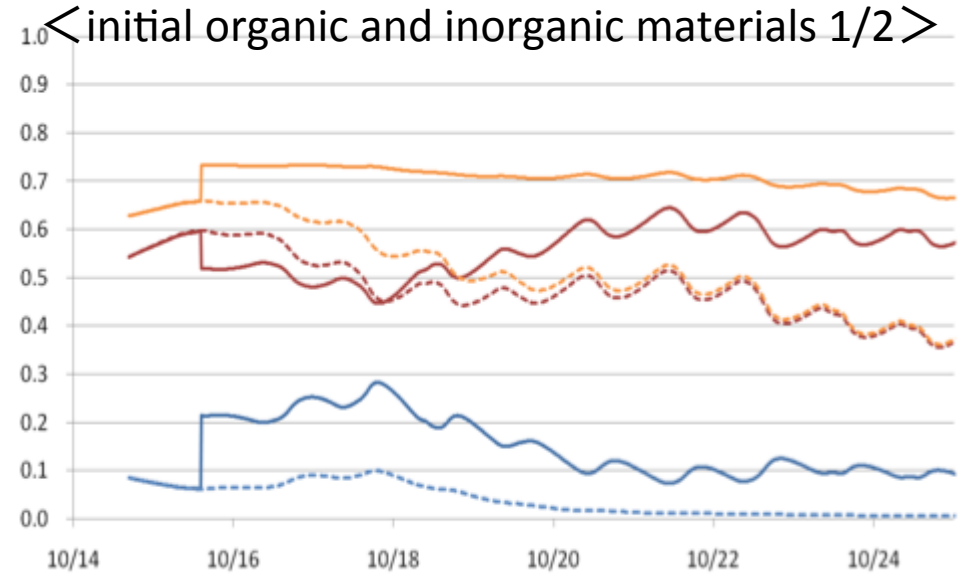
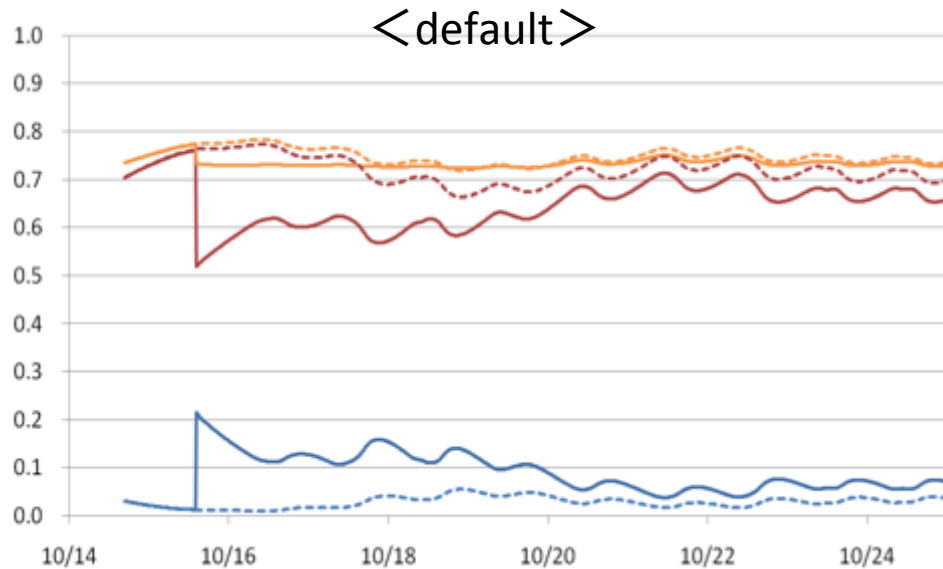
PQN_{maxS} : PS Maximum Quota for Nitrogen

PQN_{maxL} : PL Maximum Quota for Nitrogen

SQNS : PS Nitrogen Cell Quota

SQLN : PL Nitrogen Cell Quota

栄養塩濃度の変化に対する応答(2)



- GppNPSn_L — GppAPSn_L — GppNPSn+GppAPSn_L
- - - GppNPSn_S - - - GppAPSn_S - - - GppNPSn+GppAPSn_L

6. 生態系モデルによる肥沃化 効果の検討

深層水の添加

深層水の添加による影響は次の式(7)によって表現した。

$$C_{i+1} = (C_i V + C_d V_d) / (V + V_d) \quad (7)$$

ここで、

C_{i+1} : 次タイムステップのボックス内濃度($\mu\text{mol/L}$)

C_i : 現在のボックス内濃度($\mu\text{mol/L}$)

C_d : 深層水中の濃度($\mu\text{mol/L}$)

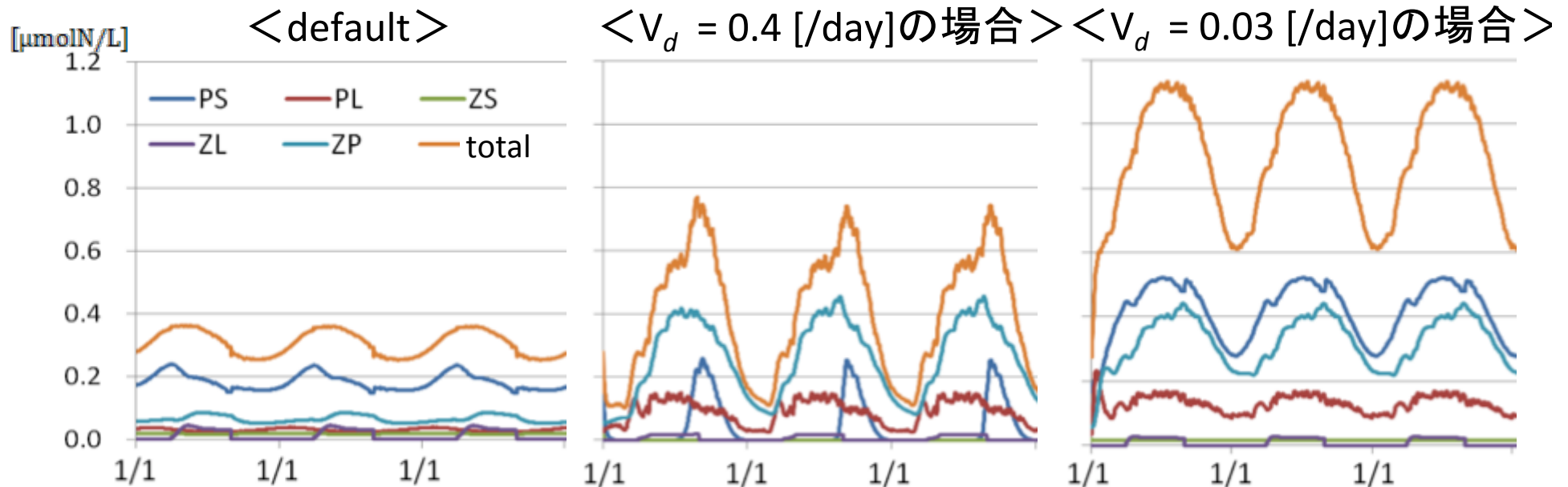
V : 計算ボックスの海水体積(L)

V_d : 加える深層水の体積(L/dt)

である。ただし、dt は深層水を加える時間間隔

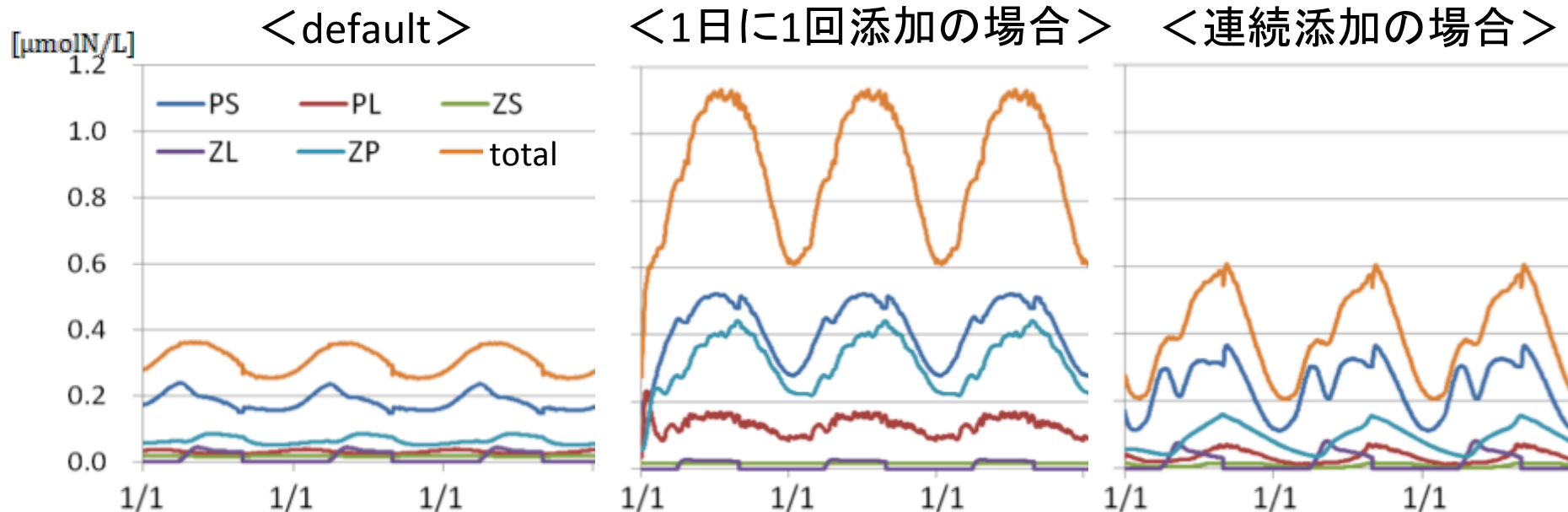
実際の計算では、 V を1.0とし、 V_d を V に対する比で表現した。

深層水を1日1回加える場合の検討



- 深層水添加率0.4/dayの場合のPS濃度を見ると、1月から8月の期間においてほとんど存在しない。また、totalのプランクトン濃度をdefaultと比較すると、夏季にはdefaultより増加しているが、冬季はむしろ減少しており、年隔差が拡大している。
- 年隔差が拡大するだけでは、魚類の餌量が季節によって大きく変動することになり、食糧の安定供給の面では望ましくない。
- 深層水添加率0.03/dayの場合には、ほとんどのプランクトン濃度が増加しており、肥沃化効果が認められる。
- 深層水を対象海域に与えすぎると、無機栄養塩濃度の上昇による植物プランクトンの光合成活発化の効果よりも、深層水による希釈の方が優越してしまうためと考えられる。

深層水を加える時間間隔による差



(どちらも1日に与える深層水のtotal量は $V_d = 0.03/\text{day}$)

- 深層水を1日に1回、断続的に添加する場合(中央図)と、連続的に添加する場合(右図)を比較すると、1日に加えるtotalの深層水量としてはほとんど変わらないにもかかわらず、前者の方が高い肥沃化効果が認められる。
- 後者は夏季にはプランクトン濃度が増加しているが、冬季はdefaultより減少しており、年隔差が拡大している。
- 深層水を連続的に与えると、植物プランクトンの光合成活発化の効果よりも、深層水による希釈の方が優越してしまうためと考えられる。
- 今回検証したものより肥沃化効果が高い時間間隔がある可能性もある。

7. 物理モデルとの結合

物理モデル MEC-NEST

<ナビエ・ストークス式>

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} = -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p}{\partial x} + f_v + A_M \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_M \frac{\partial u}{\partial z} \right)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} = -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p}{\partial y} + f_u + A_M \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_M \frac{\partial v}{\partial z} \right)$$

$$0 = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} - g$$

<連続の式>

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0$$

<水温>

$$\frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} + w \frac{\partial T}{\partial z} = A_c \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_c \frac{\partial T}{\partial z} \right)$$

<塩分濃度>

$$\frac{\partial S}{\partial t} + u \frac{\partial S}{\partial x} + v \frac{\partial S}{\partial y} + w \frac{\partial S}{\partial z} = A_c \left(\frac{\partial^2 S}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 S}{\partial y^2} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_c \frac{\partial S}{\partial z} \right)$$

<海水密度>

$$\rho = 1028.14 - 0.0735T - 0.00469T^2 + (0.802 - 0.002T)(S - 35.0)$$

u, v, w : x, y, z 方向流速

p : 圧力

T : 水温

S : 塩分濃度

ρ : 海水密度

g : 重力加速度

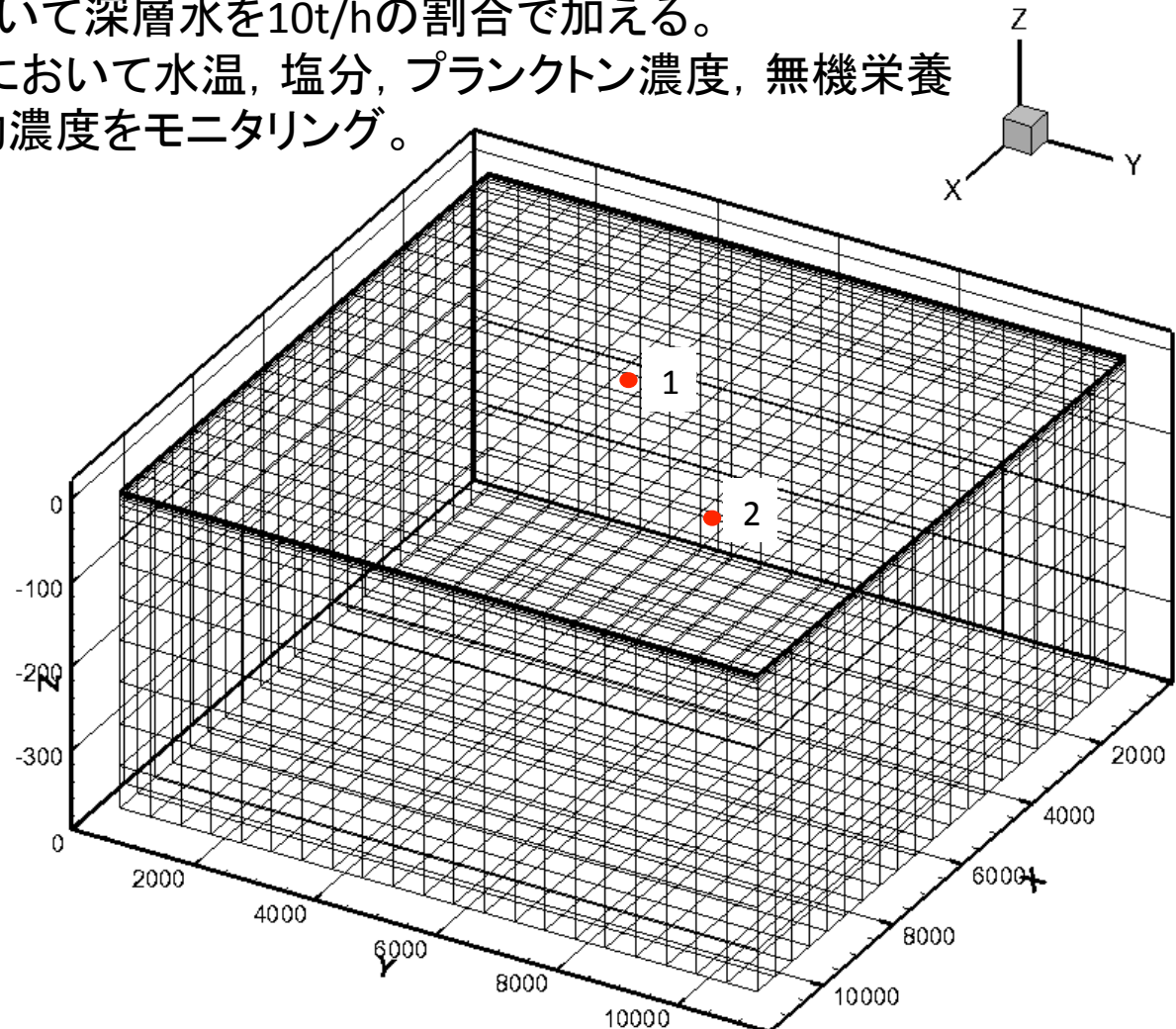
f_v : コリオリパラメータ

A_M, K_M : 水平および鉛直方向の渦動粘性係数

A_c, K_c : 水平および鉛直方向の渦動拡散係数

計算格子

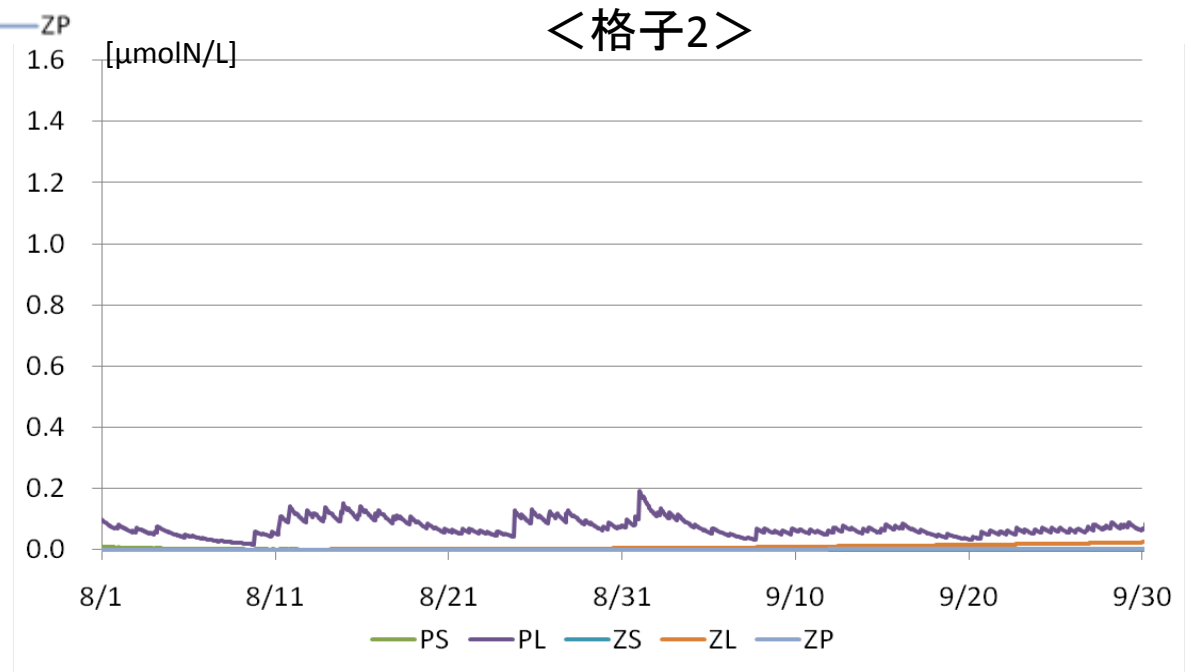
- 計算領域は10000 m×10000 m×400 m
- 500 m×500 m×(深度)の格子
- 深度は表層ほど浅く, 深層に行くほど深い。
- 図の点1において深層水を10t/hの割合で加える。
- 点1及び点2において水温, 塩分, プラクトン濃度, 無機栄養塩濃度, 有機物濃度をモニタリング。



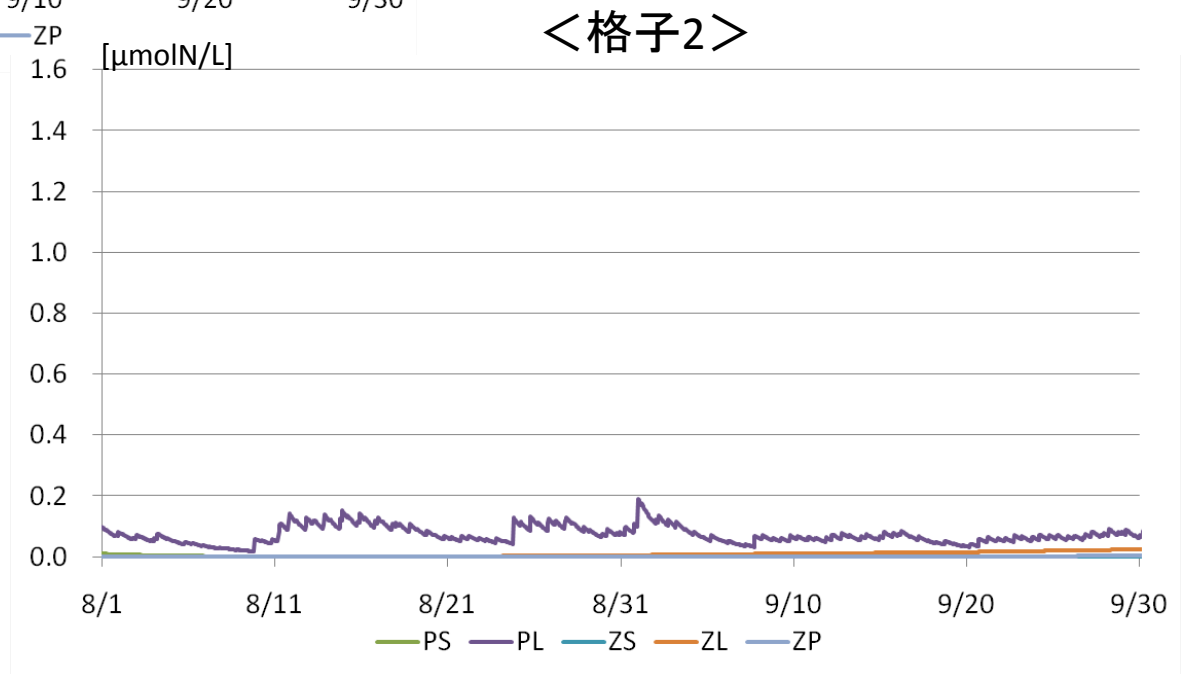
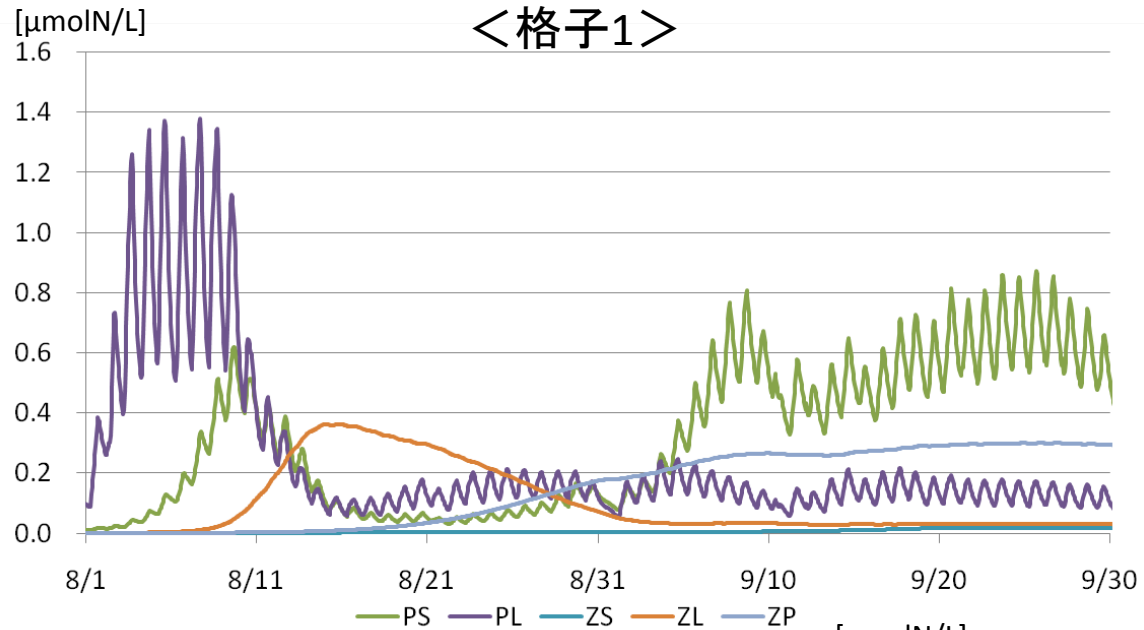
計算条件

- 気象条件として、大島における2009年8月から9月の気温、気圧、全天日射量、雲量、相対湿度、降水量を設定。
- 水温、塩分、無機栄養塩濃度、有機物濃度の境界条件は、JODCのデータより深度ごとに設定。プランクトン濃度は深度100 mまでは一定、それ以深では存在しない設定。
- 水温、塩分、プランクトン濃度、無機栄養塩濃度、有機物濃度の初期条件は、境界条件と同じ値を使用。
- 生態系モデルについては、結合前の生態系モデル内の設定と同様。

計算結果 深層水を加えない場合



計算結果 深層水を加えた場合



8. 結論

結論(1)

- 実験と文献調査, 種の構成を考慮した生態系モデルによるシミュレーションにより, 対象海域に存在するプランクトンのタンク内での増減を再現できた。
- 実験の再現によって, これらプランクトンの増殖に関するポイントを明らかにした。
 - 今回の実験の条件下では, 日照量は十分であり, 光合成速度に対して制限にはなっていない。
 - 水温の上昇は光合成速度を速めるが, 同時に枯死速度も速めるため, プランクトン濃度の日隔差を拡大させるが, 必ずしも全体量を上昇させるわけではない。
 - 深層水の添加は, 植物プランクトンの全窒素摂取速度に対する NO_3 摂取速度と NH_4 摂取速度の関係の影響により, 必ずしも植物プランクトンを増殖させるとは限らない。

結論(2)

- 深層水による肥沃化を行う場合、深層水の対象海域への添加率が高すぎると、無機栄養塩濃度の上昇による植物プランクトンの増殖効果よりも、深層水による希釈の影響が大きく現れる。
- 深層水を加える時間間隔が小さい場合も希釈効果が大きく、連続的に加える場合よりも1日に1回加える場合の方が、肥沃化効果が高い。

今後の課題

- 動物プランクトンの増減を詳細に再現できるようにすること。
- ZLが表層に存在する季節に実験を行うこと。
- 実際の海域を物理モデルで計算できるようにすること。
- 物理・生態系結合モデルで、放水した深層水がどのような挙動をするのかを考慮に入れて評価すること。
- 深層水の密度調整等の効果を、そのまま深層水を放水する場合と比べて評価すること。



これらの課題を克服することで、より正確な検証が可能となる。

ご清聴ありがとうございました