

# 深海への熱入力による湧昇 および海域肥沃化効果の検討

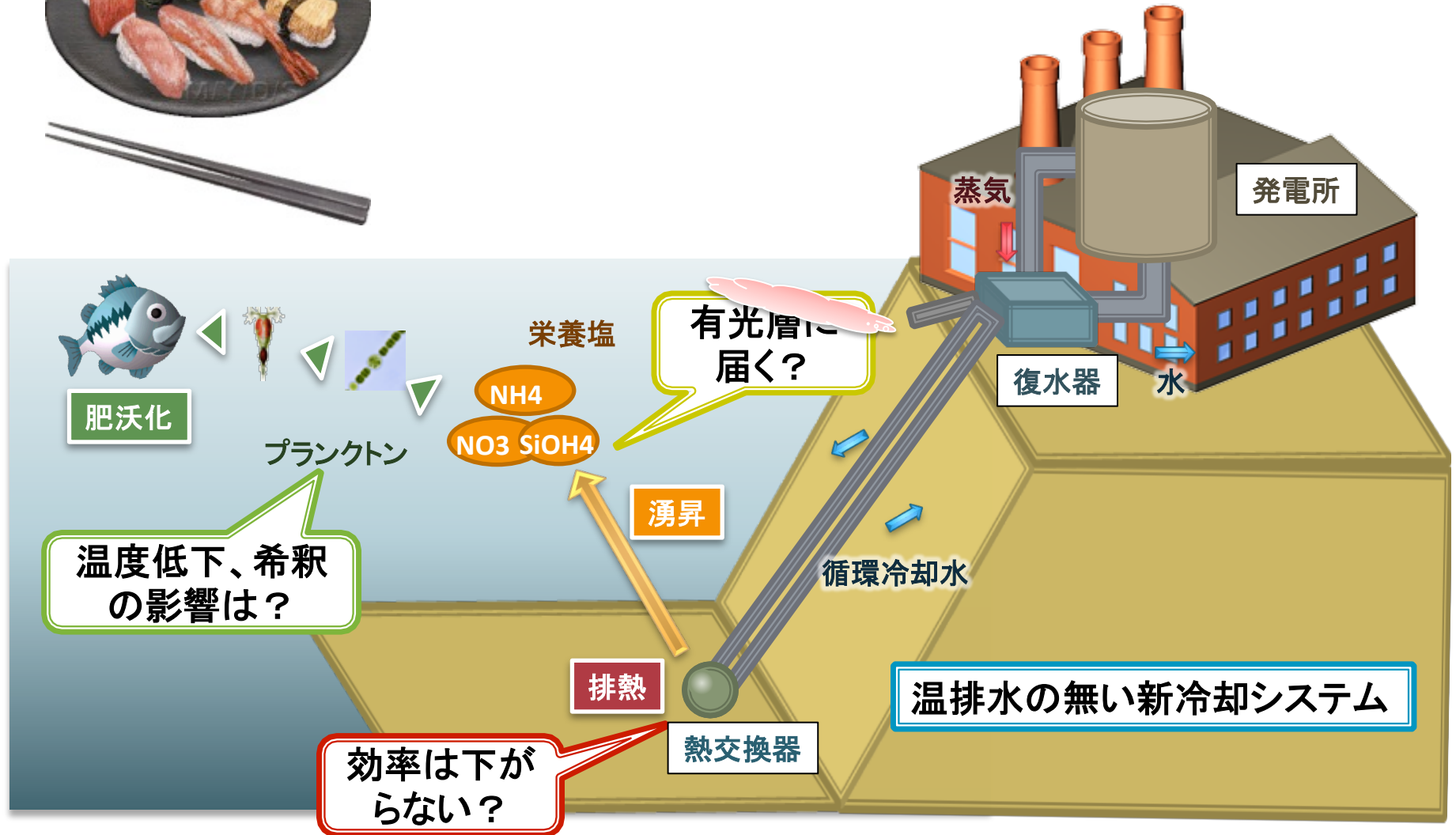
指導教員 多部田茂  
東京大学大学院新領域創成科学研究科  
環境システム学専攻  
修士2年 佐藤慎一

# 食糧問題



# 背景と目的

# 発電効率UP



肥沃化

プランクトン

栄養塩

NH4  
NO3  
SiOH4

湧昇

有光層に届く?

温度低下、希釈の影響は?

効率は下がらない?

排熱

熱交換器

蒸気

発電所

復水器

水

循環冷却水

温排水の無い新冷却システム

# 研究の手順

## 1. 湧昇 -熱入力で水は持ち上がるのか？-

- ・熱入力による湧昇流生成実験
- ・物理場モデルによる湧昇シミュレーション
- ・無次元数による環境条件と湧昇高さの整理

## 2. 冷却効率-深層水で発電効率は向上するのか？-

- ・排熱モデルによる効率低下シミュレーション

## 3. 肥沃化 -深層水でプランクトンは増えるのか？-

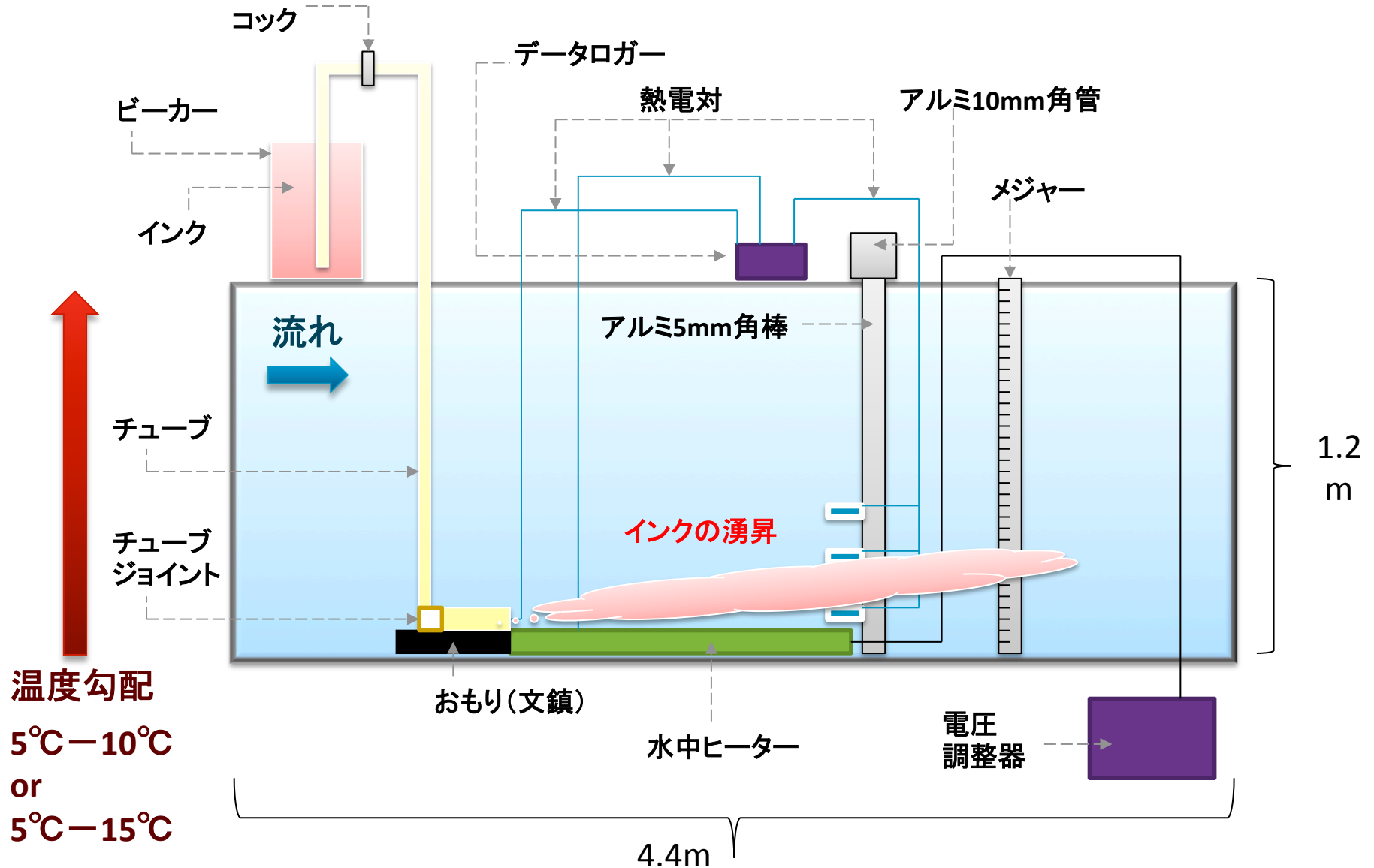
- ・深層水添加によるプランクトン増殖実験
- ・物理-生態系統合モデルによる肥沃化シミュレーション

以上の3点から、新冷却システムの有用性を検討する。



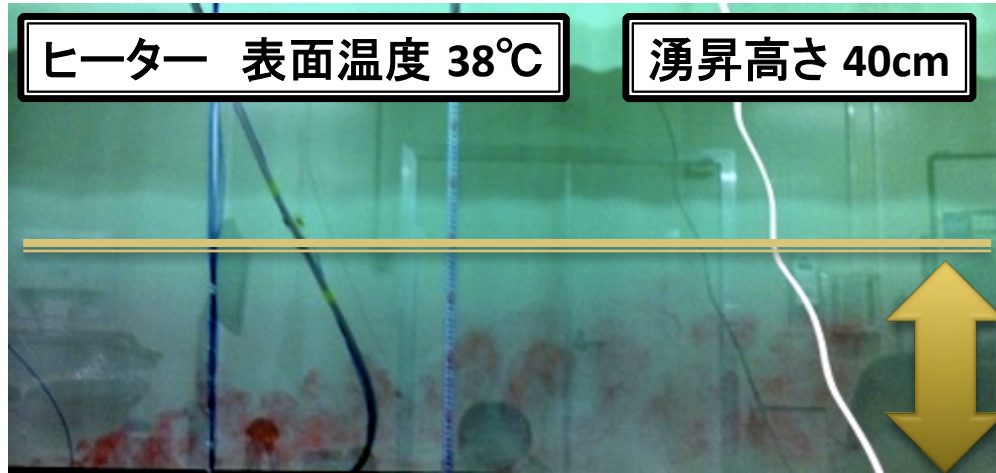
## 熱入力による湧昇流生成実験

温度成層と一様な流れを設定した水槽で、熱によるインクの湧昇を観測した。

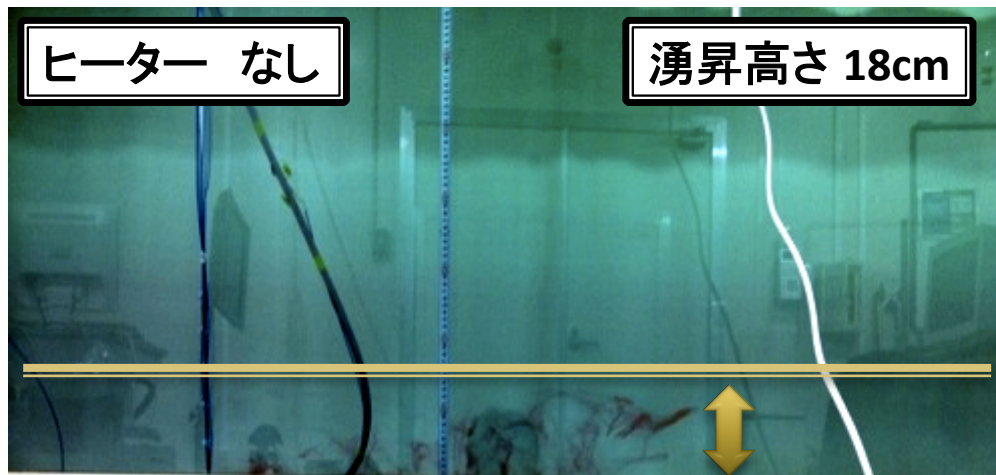




## 実験結果 — 熱変化による応答 —



ヒーター 電圧 [V]	温度 勾配	流速 [m/s]	観測値 [m]
100	5°C-10°C	0.01	0.4
55	5°C-10°C	0.01	0.3
100	5°C-10°C	0.02	0.28
100	5°C-15°C	0.01	0.3



熱を強める、  
流れを遅くする、  
勾配を弱くすると、  
湧昇が高くなる。



## 湧昇シミュレーションで使用する物理モデル( MEC OCEAN MODEL)

### 支配方程式

$$\nabla \vec{u} = 0 \quad (\text{連続の式})$$

$$\frac{D\vec{u}}{Dt} = \vec{K} - \frac{1}{\rho} \nabla p + \nu \nabla^2 \vec{u} \quad (\text{Navier - Stokes 方程式})$$

$$\frac{DT}{Dt} = a \nabla^2 T + \boxed{Qt} \quad \frac{DS}{Dt} = a \nabla^2 S \quad (\text{輸送方程式})$$

$\vec{u}$ : 流速ベクトル

$\vec{K}$ : 重力  $\rho$ : 密度  $p$ : 圧力

$\nu$ : 粘性係数  $a$ : 拡散係数

$T$ : 温度  $S$ : 塩分

$Qt$ : 熱交換器の効果

— 淡水の密度計算(実験室規模計算用) —

$$\rho = -6.23E - 06T^2 + 3.74E - 05T + 0.9999 (5 \leq T \leq 20)$$

— 海水の密度計算(実海域規模計算用) —

$$\rho = 1028.14 - 0.0735T - 0.00469T^2 + (0.802 - 0.002T)(S - 35.0) \quad (\text{mamaevの式})$$

### モデルの特徴

- ◆ 3次元マルチレベルモデル(Z座標)
- ◆ 直交格子 & Staggered配置
- ◆ 静水圧近似計算 or 非静水圧計算



# シミュレーション計算領域

## ZONE1

グリッドサイズ: 12m×12m  
条件: 静水圧近似計算

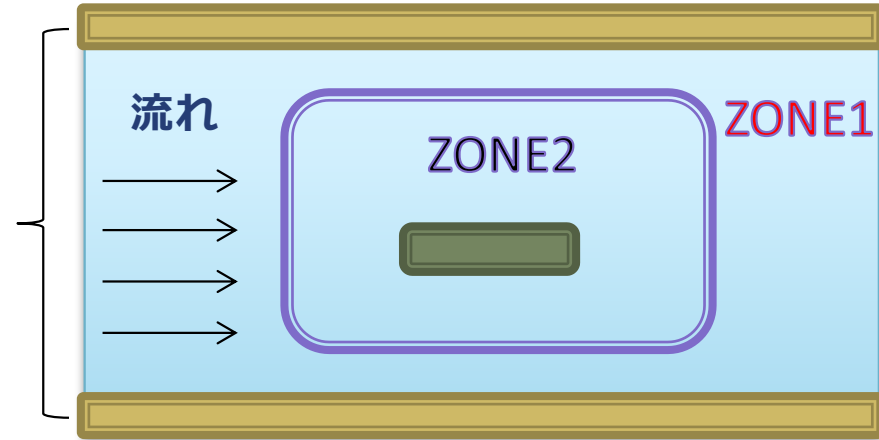
## ZONE2

グリッドサイズ: 36m×36m  
条件: 非静水圧計算

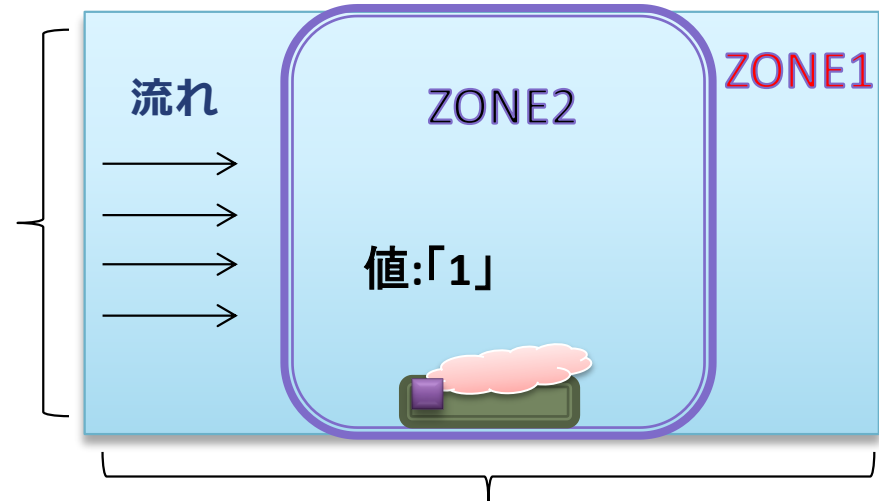
ZONE1:  
18cm × 7格子

ZONE2:  
6cm × 9格子

### 平面図



### 側面図



## インクの再現

ZONE2の上流の1つの  
計算格子の値を常に  
「1」として、値の広がり  
を計算した。

100cm  
(水面上 2格子  
10cm × 4格子  
5cm × 11格子  
2.5cm × 2格子)

## 水中ヒーター



ZONE1: 18cm × 10格子

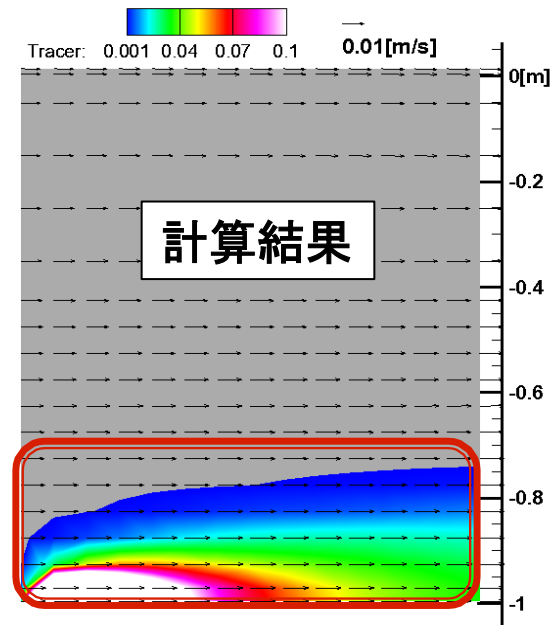
ZONE2: 6cm × 15格子



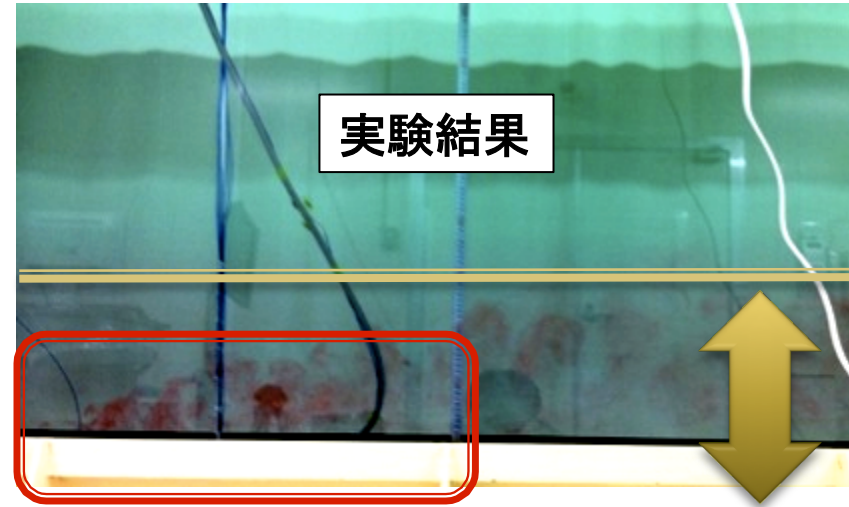
## 実験結果と計算結果の比較

ヒーター  
表面温度 38°C

温度勾配  
5°C-10°C



計算結果



実験結果

ヒーター 電圧 [V]	温度 勾配 [K/m]	流速 [m/s]	計算値 [m]	計算値 の比	観測値 [m]	観測値 の比
100	5	0.01	0.25	1	0.4	1
55	5	0.01	0.2	0.8	0.3	0.75
100	5	0.02	0.2	0.8	0.28	0.7
100	10	0.01	0.2	0.8	0.3	0.75

計算値の比と観測値の比がほとんど等しくなった。





# 実海域規模の計算結果

温度  
勾配  
[K/m]

2.5

5

10

流速[cm/s]

発電出力[万Kw]

1.5

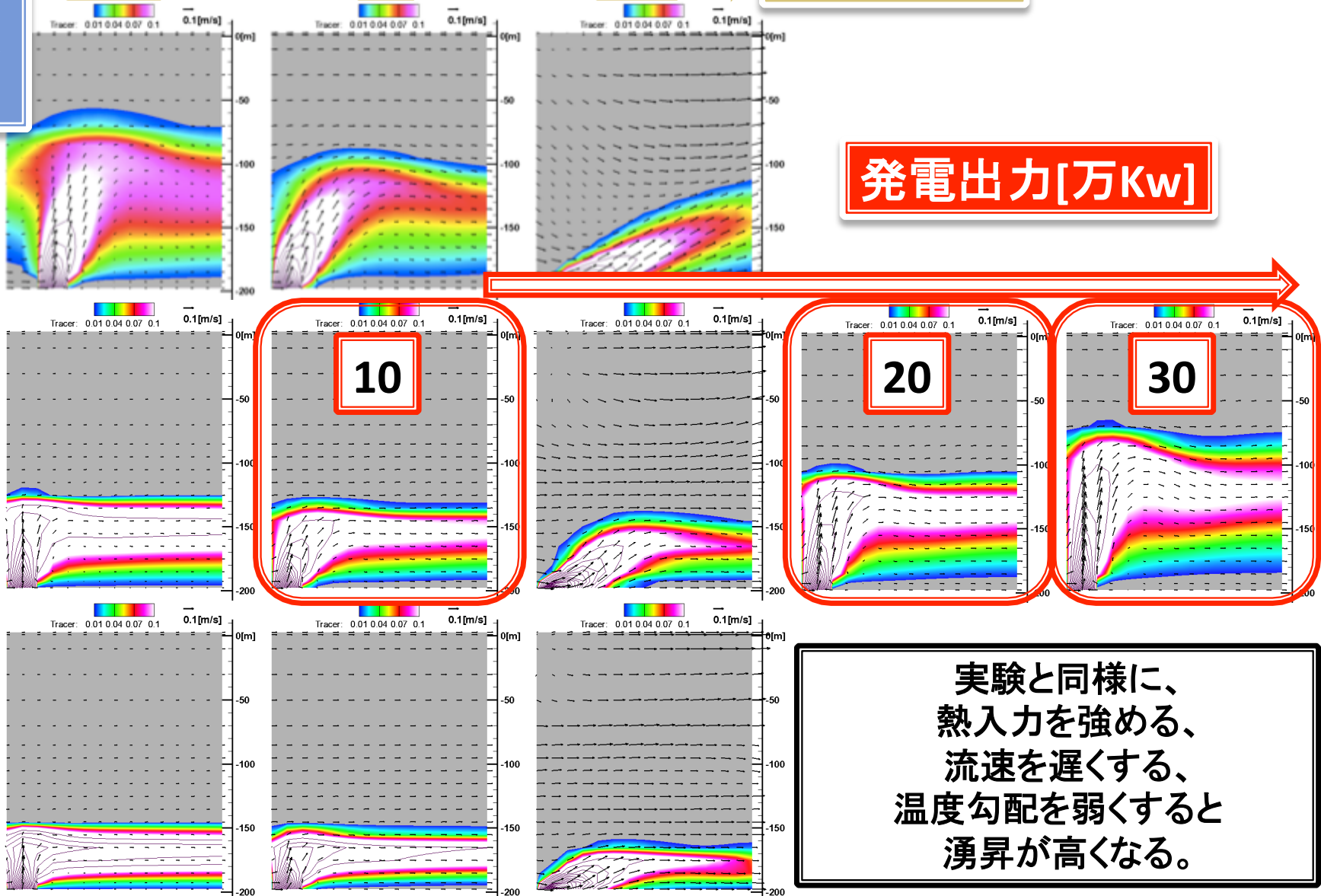
200

3.1

200

6.2

200



実験と同様に、  
熱入力を強める、  
流速を遅くする、  
温度勾配を弱くすると  
湧昇が高くなる。

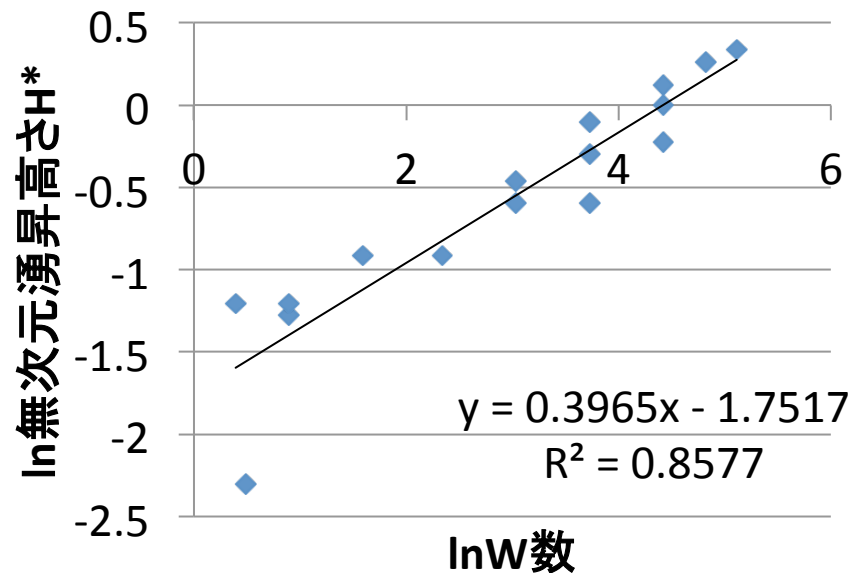


## 無次元数による環境条件と湧昇高さの整理

Buckinghamの $\pi$ 定理より、以下の無次元数を導いた。

$$H^* = \frac{h}{H} \quad W = \frac{Q_t}{UG_T} \quad Ri = \left(\frac{NH}{U}\right)^2 \quad Re = \frac{v}{US^{1/2}}$$

### <実海域規模計算+実験>



### <変数について>

$Q_t$ [K/s]: 伝温速度

$U$ [m/s]: 水平流速

$G_T$ [K/m]: 温度勾配

$N$ [1/s]: Brunt - Vaisala振動

$H$ [m]: 温度勾配の高さ

$\nu$ [ $m^2/s$ ]: 水の動粘性係数

$S$ [ $m^2$ ]: 熱源面積

W数の対数と無次元湧昇高さ $H^*$ の対数  
に強い相関があることが分かった。



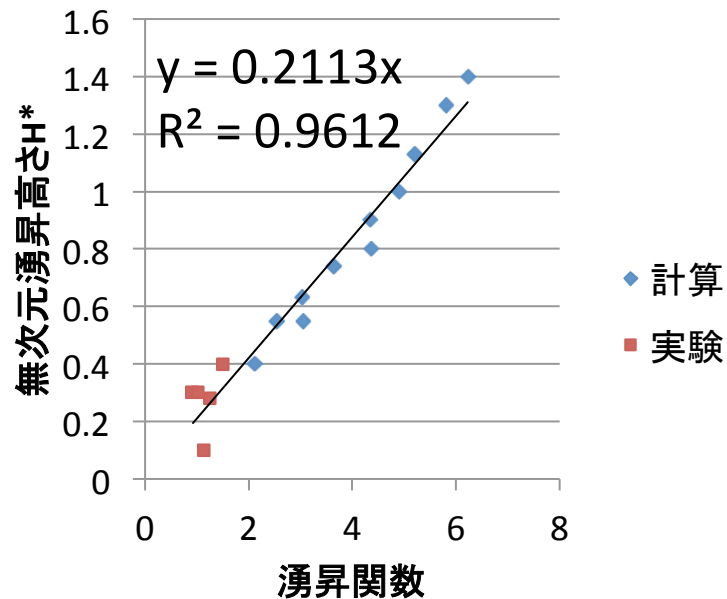
## 無次元数による環境条件と湧昇高さの整理

Buckinghamのπ定理より、以下の無次元数を導いた。

$$H^* = \frac{h}{H} \quad W = \frac{Q_t}{UG_T} \quad Ri = \left(\frac{NH}{U}\right)^2 \quad Re = \frac{v}{US^{1/2}}$$

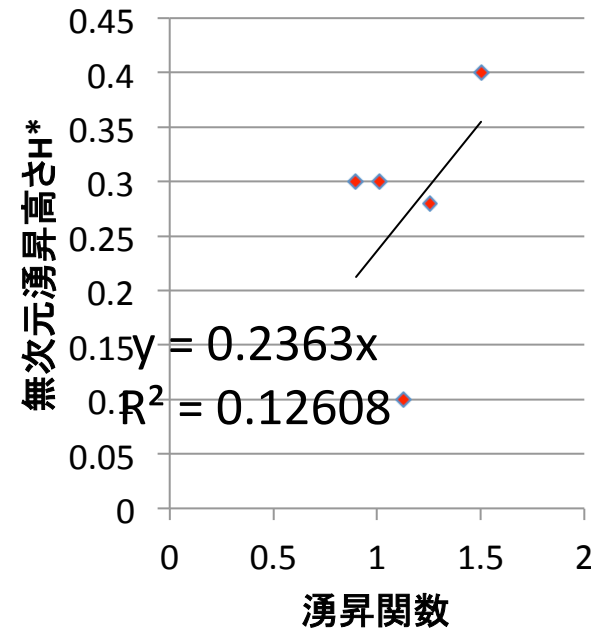
### <実海域規模計算+実験>

$$H^* = 0.211 \cdot W^{0.429} Ri^{-0.0843}$$



### <実験のみ>

$$H^* = 0.236 \cdot W^{0.429} Ri^{-0.0843}$$



計算結果はW数とRi数で説明できるが、実験結果は不十分である。



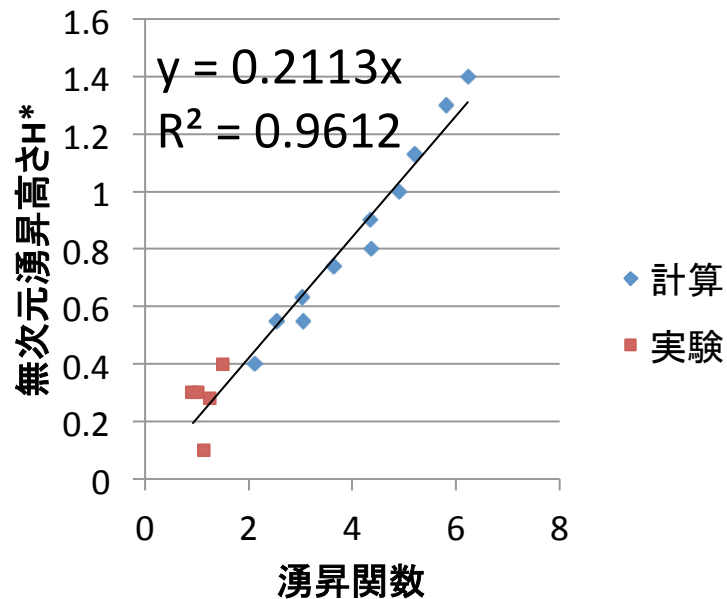
## 無次元数による環境条件と湧昇高さの整理

Buckinghamのπ定理より、以下の無次元数を導いた。

$$H^* = \frac{h}{H} \quad W = \frac{Q_t}{UG_T} \quad Ri = \left(\frac{NH}{U}\right)^2 \quad Re = \frac{v}{US^{1/2}}$$

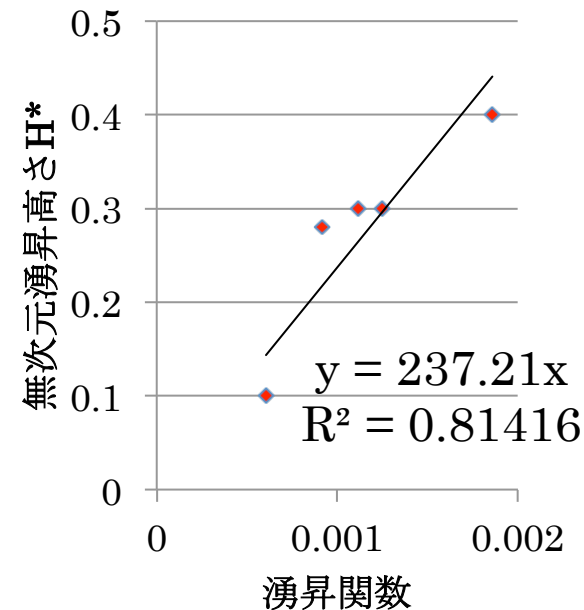
### <実海域規模計算+実験>

$$H^* = 0.211 \cdot W^{0.429} Ri^{-0.0843}$$



### <実験のみ>

$$H^* = 237 \cdot W^{0.429} Ri^{-0.0843} Re^{-0.761}$$



Re数も加えると、実験結果もW数とRi数で計算と同様に説明できる。



## 排熱モデルによる効率低下シミュレーション

$$T2 = (1 - F) \times Tw + F \times T1$$

$$Qt[K/s] = \frac{v[m^3/s]}{V[m^3]} \times (T2 - T1)$$

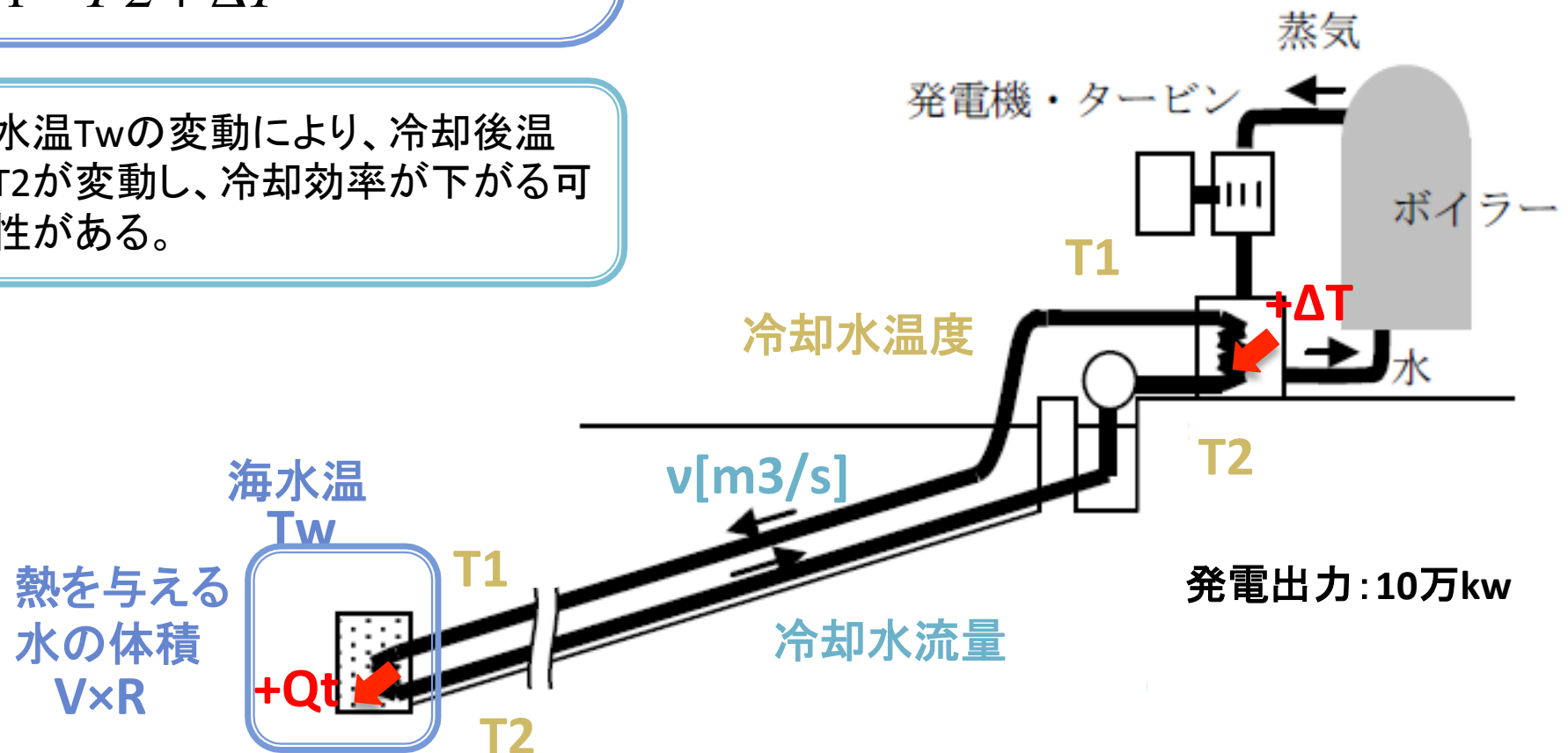
$$T1 = T2 + \Delta T$$

海水温 $T_w$ の変動により、冷却後温度 $T2$ が変動し、冷却効率が下がる可能性がある。

$\Delta T$ : 蒸気による冷却水の温度上昇

$Qt$ : 排熱による海水の温度上昇

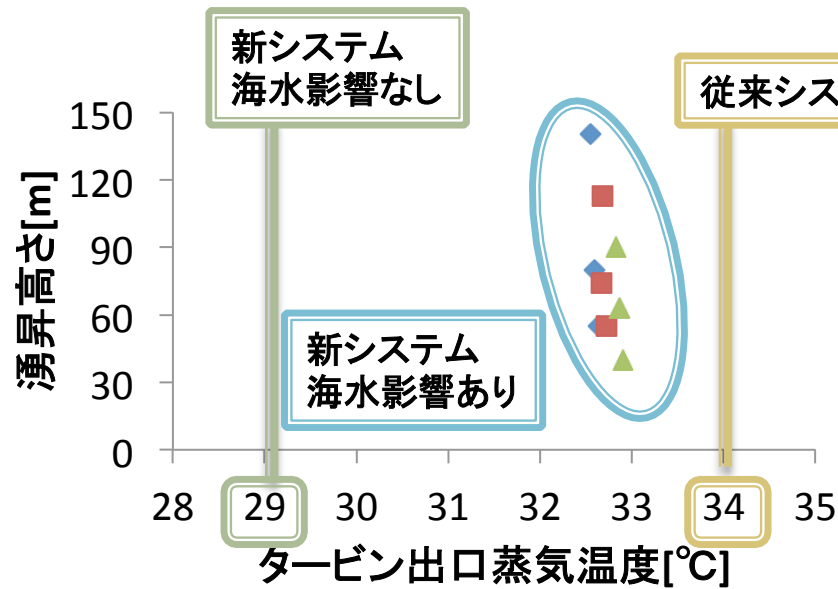
$F$ : 熱交換器の性能



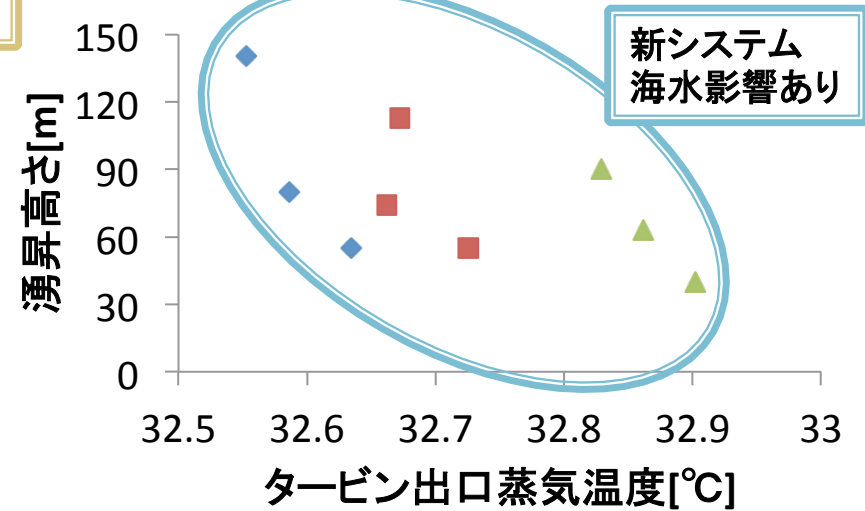


## 計算結果

本計算の条件の範囲では、湧昇と冷却効率はトレードオフではなく、両立する条件が存在することが分かった。



◆ 2.5cm/s ■ 5cm/s ▲ 10cm/s



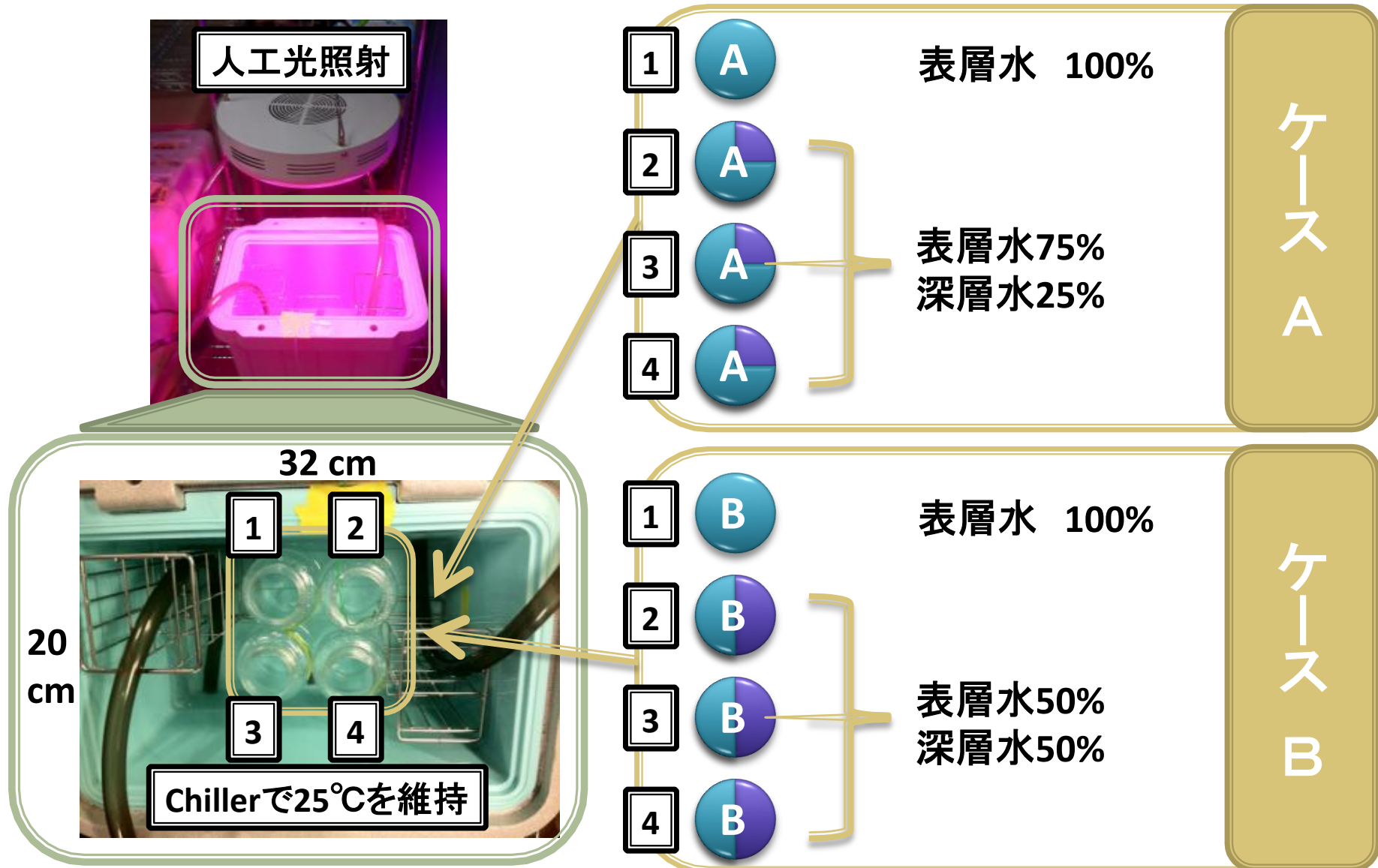
◆ 2.5cm/s ■ 5cm/s ▲ 10cm/s

湧昇が熱を上方に逃がしている可能性がある。



## 深層水添加によるプランクトン増殖実験

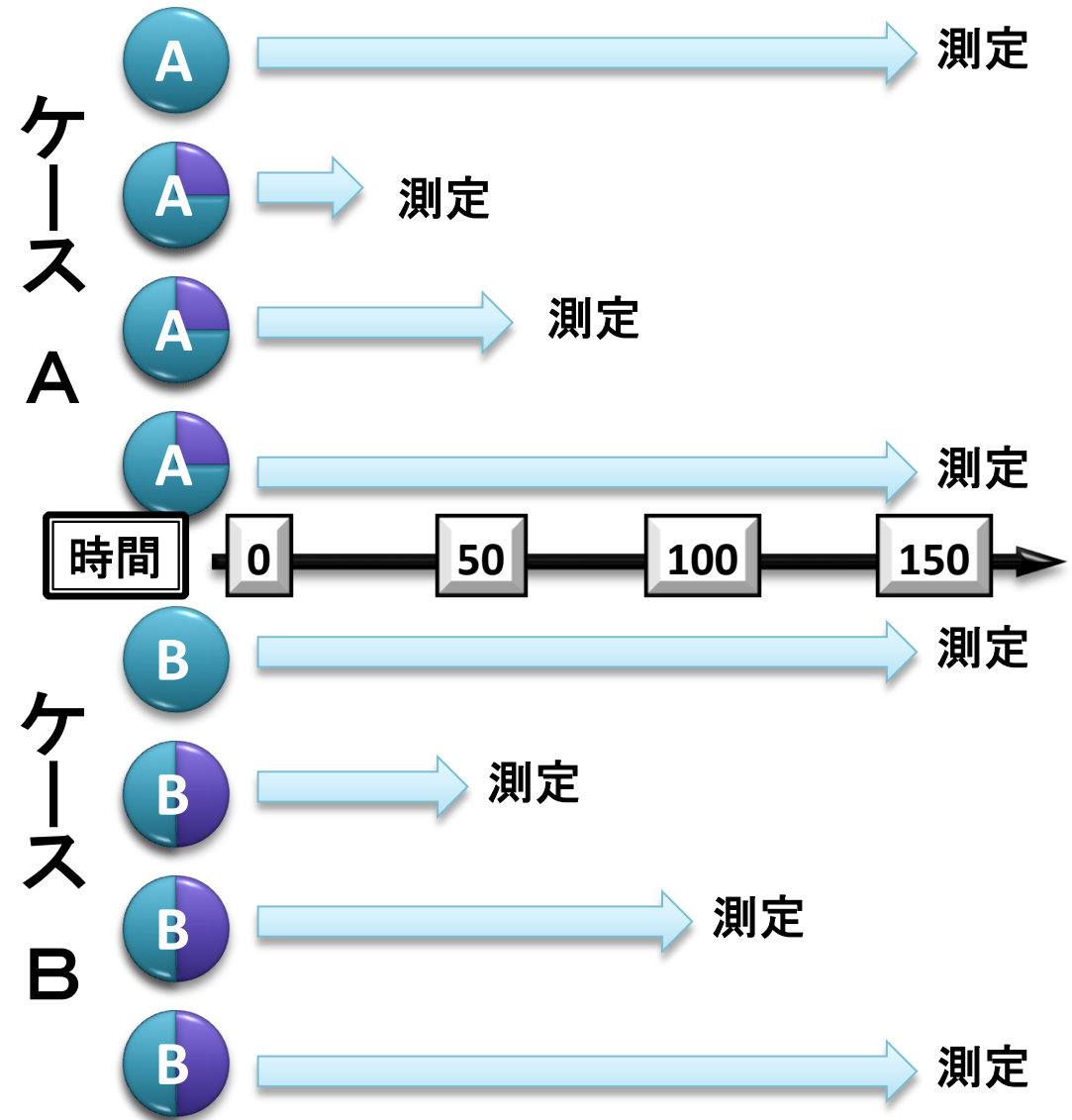
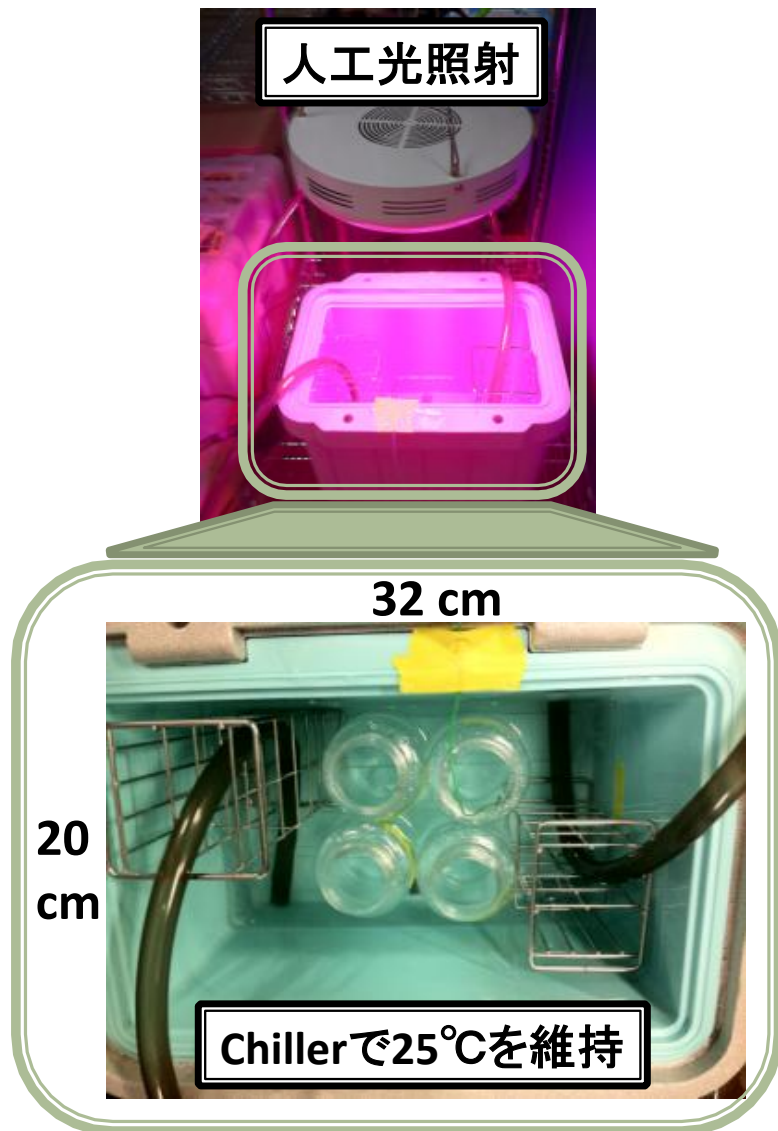
温度・光が十分な環境で、深層水添加後にChl-aや無機栄養塩を異なる時間で測定した。





## 深層水添加によるプランクトン増殖実験

温度・光が十分な環境で、深層水添加後にChl-aや無機栄養塩を異なる時間で測定した。

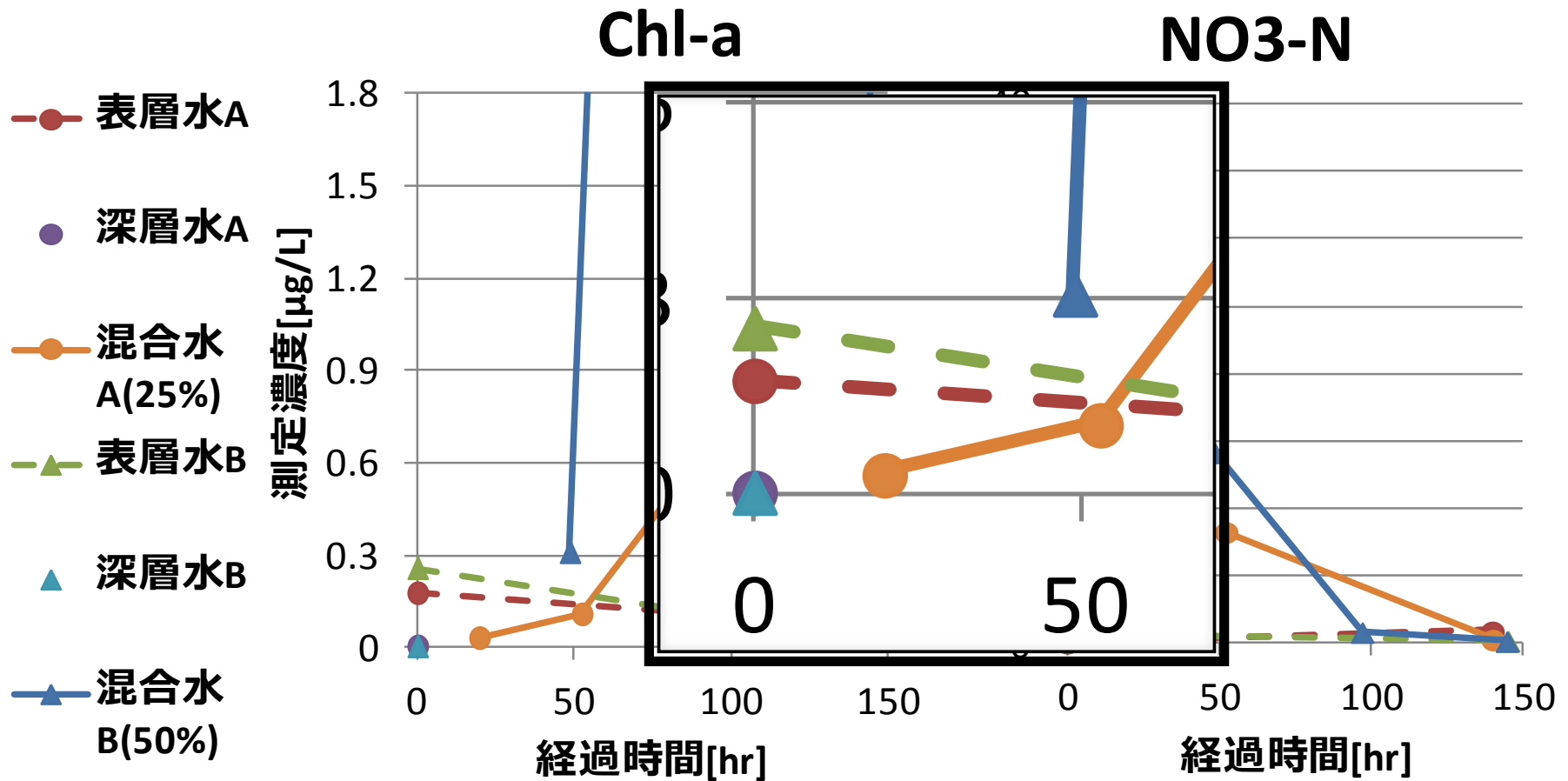






## 深層水添加によるプランクトン増殖実験結果

混合水のChl-aは、はじめ希釈化により、表層水と深層水の値の間の値を取る。その後、栄養塩を使って増加するが、栄養塩が枯渇すると、減少する。

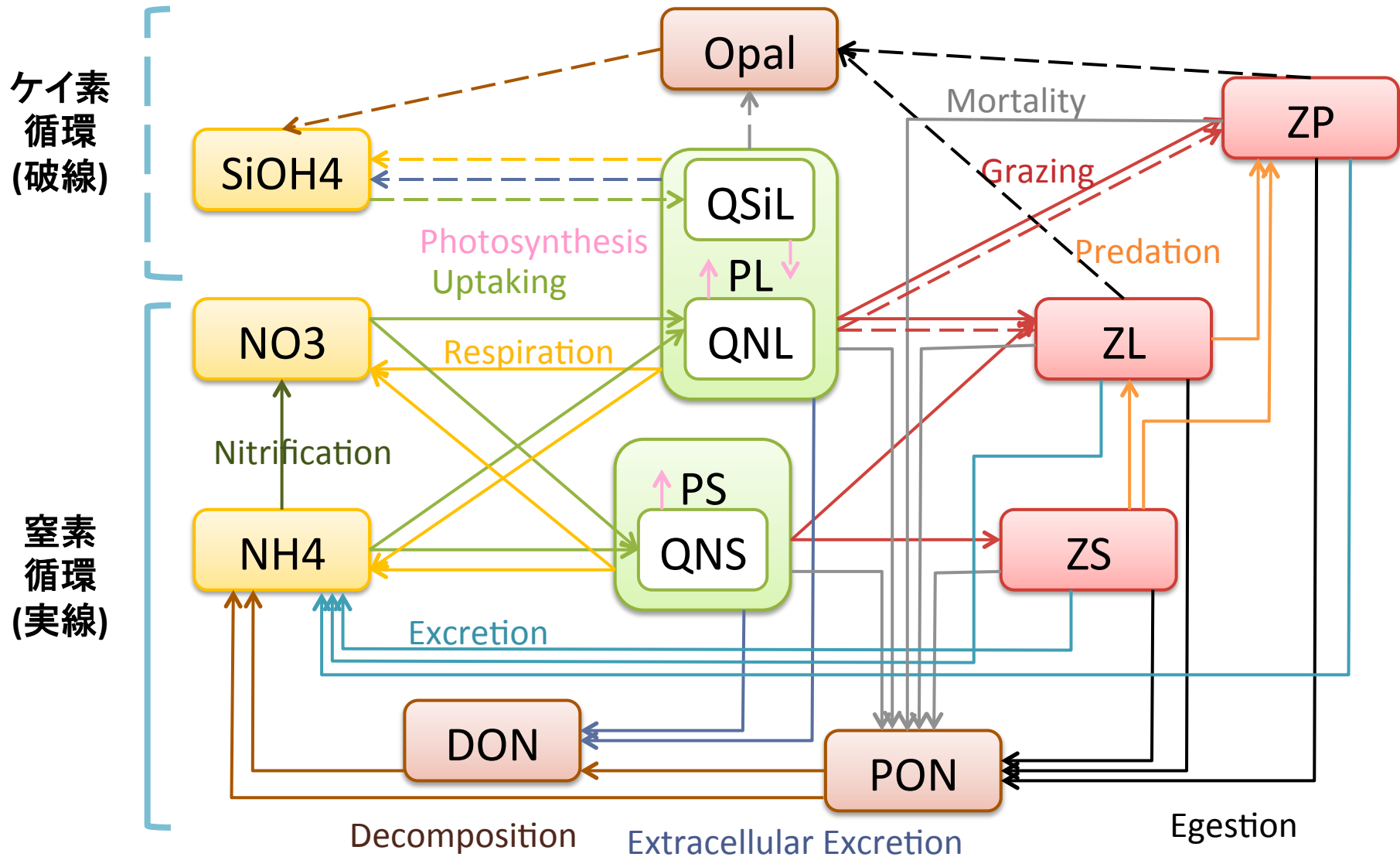




# 生態系モデル(NEMURO,2007 & 中田,1993)

$$\frac{DB}{Dt} = a\nabla^2 B + Qb$$

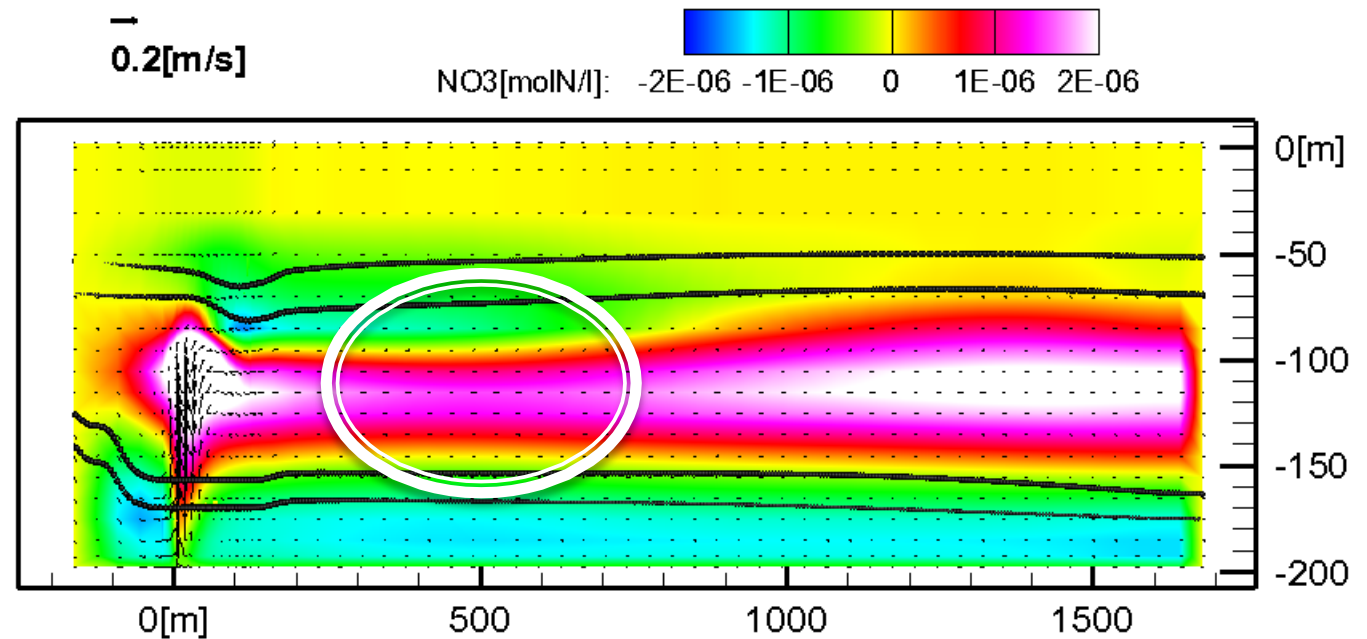
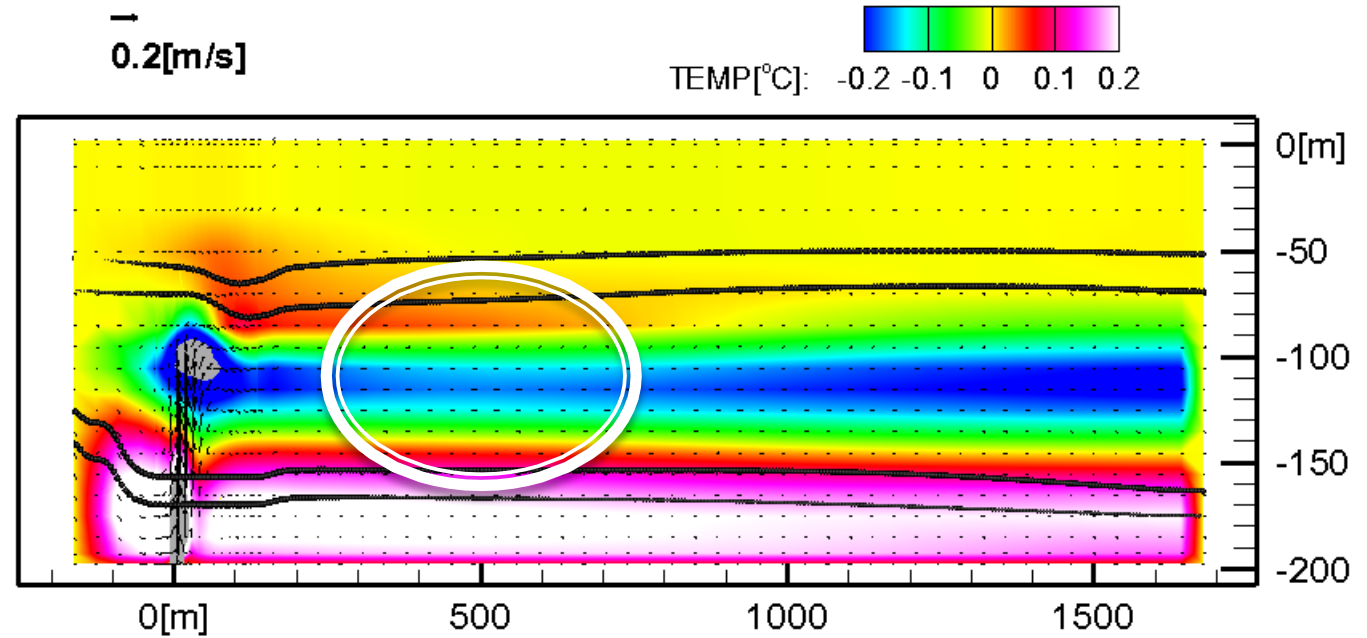
$B$ :生態系コンパートメント  $Qb$ :生物プロセス  
(栄養塩、プランクトン、有機物など)





# 物理-生態系統合モデル 計算結果

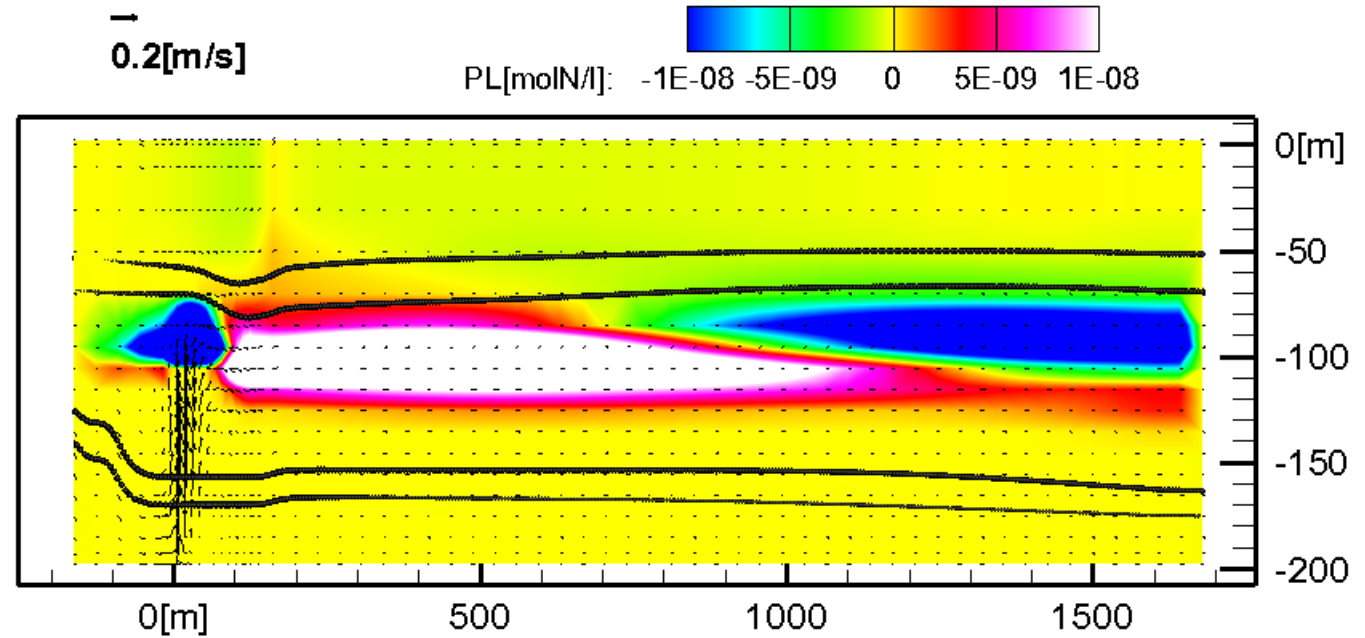
深層水による栄養  
塩増加・温度低下が  
緩和される区域があ  
る。



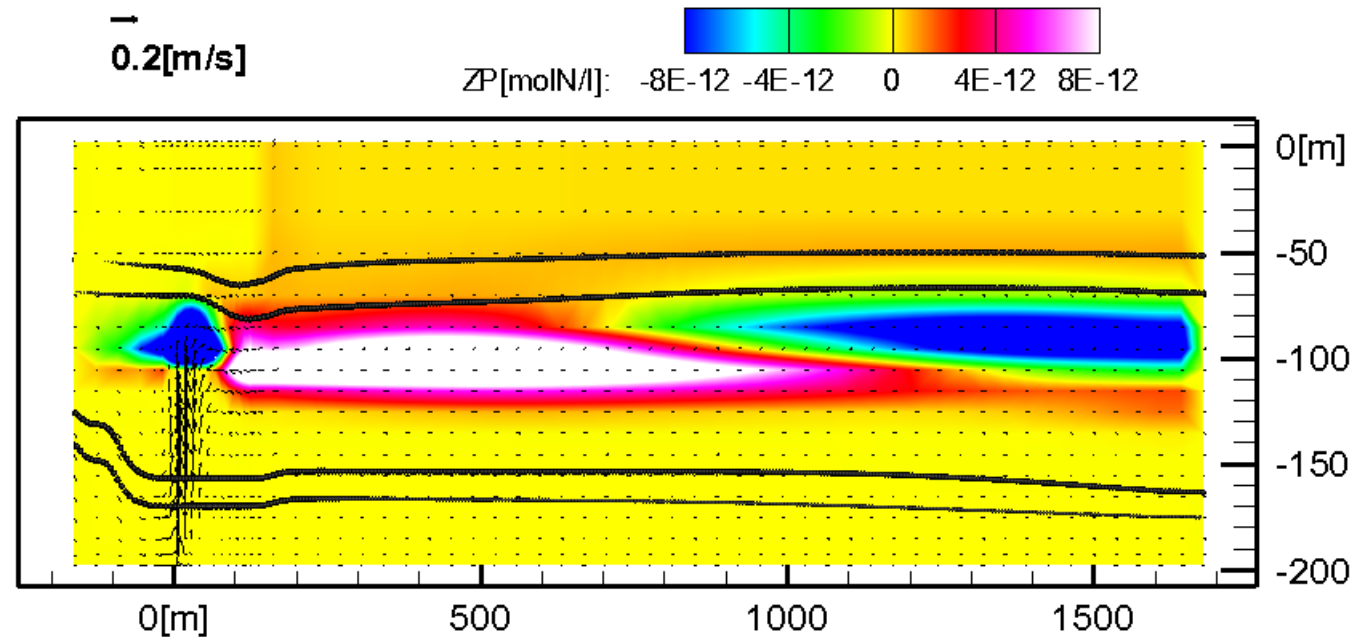


## 物理-生態系統合モデル 計算結果

深層水による栄養  
塩増加・温度低下が  
緩和される区域があ  
る。



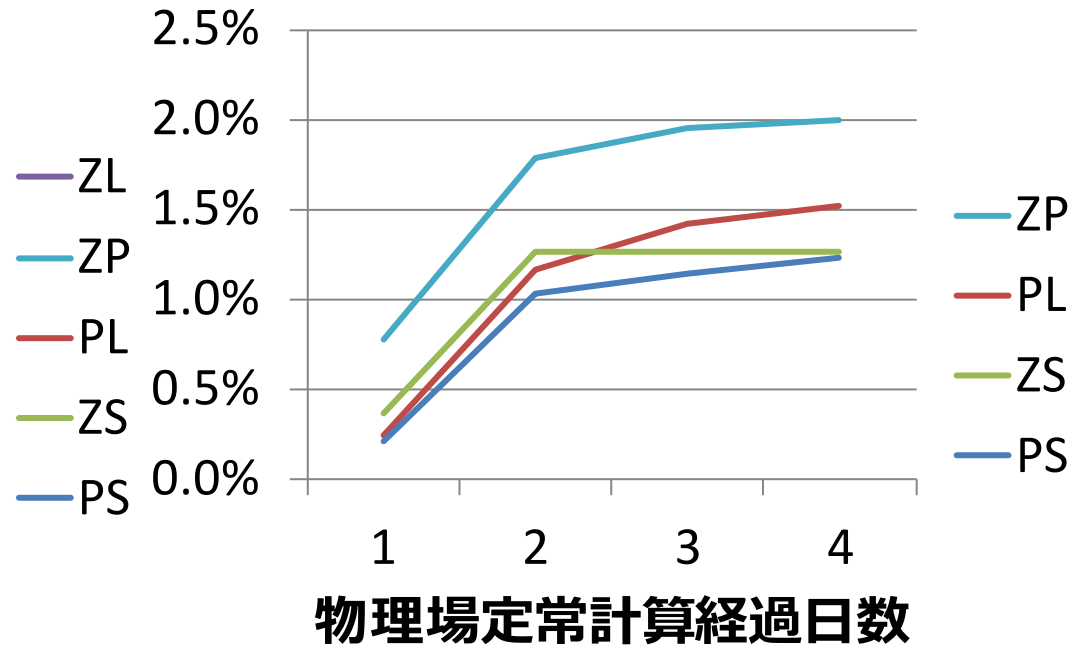
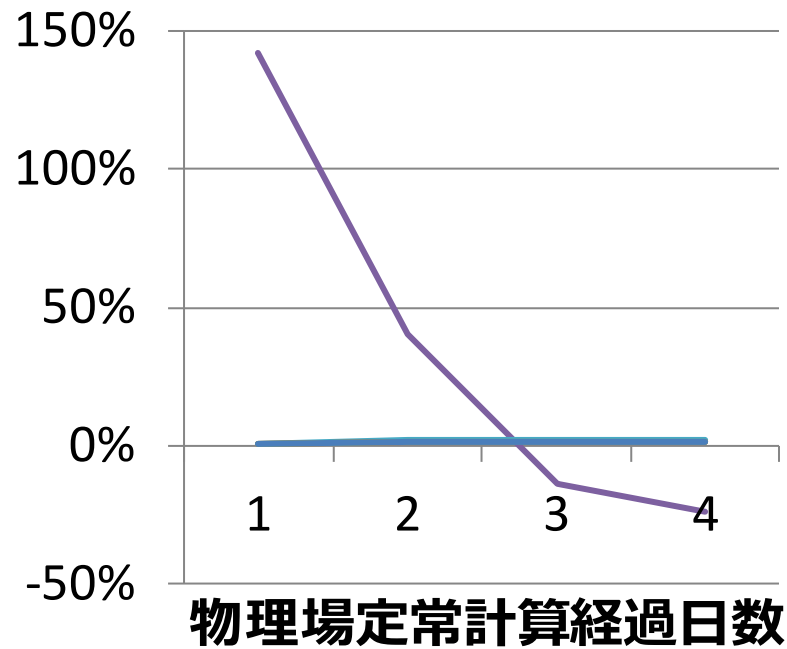
緩和区域でプランク  
トンが増殖する。





## 物理-生態系統合モデル カイアシ類(ZL)の計算結果

日周鉛直移動をするZLは、他のプランクトンと比べて、桁違いに大きく変化する。  
動物プランクトンの移動のパラメータは、肥沃化の鍵となる可能性がある。





## 結論

新冷却システムによる湧昇・肥沃化効果を検討するための数値モデルを構築した。

実験と計算により、流れのある成層海域における湧昇高さは、熱入力( $Q$ )が大きく、成層の温度勾配( $G_T$ )が小さく、流れ( $U$ )が小さいほど大きくなり、 $U \cdot G_T / Q$ とリチャードソン数に依存することを明らかにした。

この湧昇の条件は、特定の条件範囲では冷却効率の点でもプラスに働く。

湧昇による水温変化がプランクトンの空間分布に強く影響する。特に、鉛直移動する大型動物プランクトンは大きく増殖する可能性がある。