

# 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

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 環境生態システム学分野  
47-106670 佐藤 慎一(2012年3月修了)  
指導教員 多部田 茂 准教授

キーワード：海洋深層水、発電排熱、熱交換器、湧昇、海域肥沃化、数値モデル

## 1 背景

人口増加により食糧問題のますますの深刻化が危惧されている。陸地のみによる食糧生産には限界があり、海洋における食糧生産の増加が不可欠である。その対策の1つとして、海洋深層水を用いる手法が研究されている。

海洋深層水は表層に不足している無機栄養塩類を豊富に含むため、有光層に添加することで植物プランクトンの増殖を促し、海域が肥沃化される可能性がある[1]。

一方、「取排水の無い発電所冷却水システム」(以下、新冷却システム)は、冷却用媒体を海の深層に設置した熱交換器と発電所の復水器の間で閉鎖的に循環させ、取排水無く深層の冷熱を蒸気冷却に利用する新たな発電所冷却水システムである[2]。取排水による生態系の破壊を防ぎ、季節変動無く高い発電出力を得ることができると期待されている。また、この新冷却システムは、深層に多量の排熱をするため、浮力で湧昇流を引き起こす可能性があり、肥沃化効果をもたらす可能性がある。

海洋深層水を表層に添加する手段は単にパイプで汲み上げるだけでなく、人工マウンドによる湧昇流や密度流拡散装置といった様々な手段が検討されているが、上記のような他の便益が期待できる点で、新冷却システムは肥沃化の手段として費用対効果のポテンシャルが高く、検討することが重要であると考えられる。

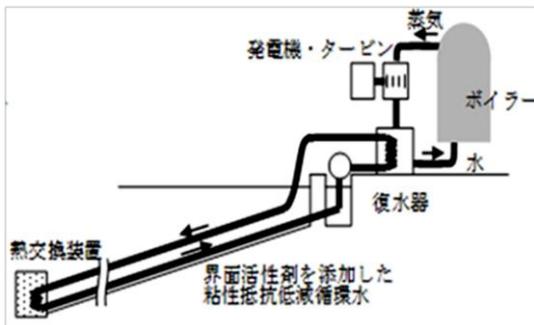


図 1 新冷却水システムの概略図

## 2 目的

本研究では、熱入力や流速などの環境条件による湧昇効果を数値モデルで計算し、無次元数で整理することで現象を一般化することを目的とする。また、熱入力によって引き起こされた湧昇がどのような肥沃化効果をもたらすのかを考察する。

## 3 実験手法

### 3.1 熱入力による人工湧昇流の可視化実験

長さ 10m(観測部 4.4m)、幅 1.0m、水深 1.2m の成層回流水槽に温度勾配と流速を設定し、下部に水中ヒーターを設置した。その上部にチューブからインクで色づけした液体を流すことで、熱入力による流体の挙動を可視化した。

### 3.2 深層水によるプランクトンの増殖実験

冷却器で温度を一定に保った水で満たした小型タンク内に、表層水と深層水を混入させた透明な 500ml のサンプル瓶を設置し人工光を連続照射することで、無機栄養塩と Chl-a の変化を観測した。

## 4 計算モデルと条件

### 4.1 計算領域

単純な直方体を計算領域とした。一方向の海流と平行な両側の境界に Free-slip (摩擦なし) の壁を設置した。実海域規模計算と実験室規模計算の領域はほとんど幾何学的に相似であり、相似比は 200 である。実験室規模は数 m の規模であり、実海域規模は数百 m の規模である。熱源の近傍では、湧昇効果をより正確に計算するために、静水圧近似を用いない Full-3D 計算を行った。それ以外の部分では、計算時間がより短い静水圧近似の計算を行った。

#### 4.2物理場モデル

物理場モデルは、MEC-OCEAN モデル[3]を使用した。実験スケールと実海域スケールに共通する支配方程式は連続の式、navie-stokes の式、輸送方程式である。各式を以下に示す。

$$\nabla \vec{u} = 0$$

$$\frac{D\vec{u}}{Dt} = \vec{K} - \frac{1}{\rho} \nabla p + \nu \nabla^2 \vec{u}$$

$$\frac{DT}{Dt} = a \nabla^2 T + Qt \quad \frac{DS}{Dt} = a \nabla^2 S$$

$\vec{u}$ : 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

実験スケールの密度の計算式は mamaev の式を、実海域スケールの密度の計算式は既知の淡水密度から作成した近似曲線の式を使用した。各式を以下に示す。

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

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

#### 4.3排熱モデル

実験スケールの排熱を以下の式で計算した。

$$Qt = \frac{Q_s \times S}{C \times V \times \rho}$$

$Qt$ [K/s]: 温度上昇速度

$Q_s$ [W/cm<sup>2</sup>]: 水中ヒーター発熱密度

$V$ [cm<sup>3</sup>]: 水中ヒーター設置セル体積

$S$ [cm<sup>2</sup>]: 水中ヒーター面積

$C$ [J/K·g]: 熱容量

$\rho$ [g/cm<sup>3</sup>]: 密度

実海域スケールの排熱を以下の式で計算した。

$$Qt = \frac{\nu}{V \times R} \times (t1 - t2)$$

$Qt$ [K/s]: 温度上昇速度

$\nu$ [m<sup>3</sup>/s]: 循環冷却水流量

$R$ : 間隙率

$V$ [m<sup>3</sup>]: 熱交換器設置セル体積

$t1$ [K]: 初期復水器出口温度

$t2$ [K]: 初期復水器入口温度

#### 4.4生態系モデル

生態系モデルは、NEMURO[4]と中田[5]のモデルを組み合わせた。各要素は以下の式で移流拡散の効果と生物プロセスの効果の和で計算した。

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

$B$ : 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)

(栄養塩)

NO3: 硝酸塩

NH4: アンモニウム塩

SiOH4: ケイ酸塩

(プランクトン)

PS: 小型植物プランクトン

PL: 大型植物プランクトン

ZS: 小型動物プランクトン

ZL: 大型動物プランクトン

ZP: 肉食性高次動物プランクトン

(セルクオタ)

QNS: PS の窒素態セルクオタ

QNL: PL の窒素態セルクオタ

QSiL: PL のケイ素態セルクオタ

(有機物)

DON: 溶存有機物

PON: 粒子状有機物

Opal: 粒子状ケイ素

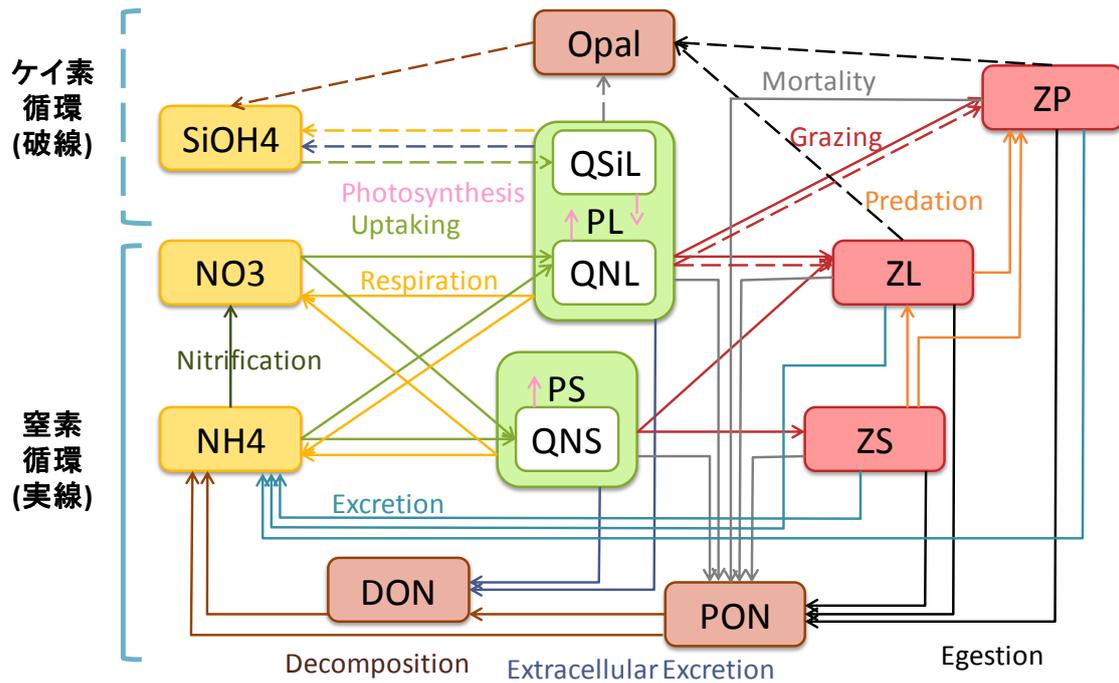


図 2 生態系モデルの概要図

## 5 結果

### 5.1 湧昇について

#### 5.1.1 実験と計算の結果の比較

表 1 に示すように、実験結果を定性的に計算で再現できた。表 1,2 より高い湧昇のためには、高熱・弱勾配・遅流が必要であることが分かった。

表 1 実験室規模での計算結果

伝温速度 [K/s]	温度勾配 [K/m]	流速 [m/s]	計算値 [m]	観測値 [m]
0.2452	5	0.01	0.25	0.4
0.0742	5	0.01	0.2	0.3
0.2452	5	0.02	0.2	0.28
0.2452	10	0.01	0.2	0.3

表 2 実海域規模での計算結果

伝温速度 [K/s]	温度勾配 [K/m]	流速 [m/s]	湧昇高さ [m]
0.0638	0.010683	0.025	140
0.0638	0.010683	0.05	113
0.0638	0.010683	0.1	85
0.0638	0.021366	0.025	80
0.0638	0.021366	0.05	74
0.0638	0.021366	0.1	63
0.0638	0.042732	0.025	55
0.0638	0.042732	0.05	55
0.0638	0.042732	0.1	40
0.1276	0.021366	0.05	100
0.1914	0.021366	0.05	130

#### 5.1.2 無次元数による整理

Buckingham の  $\pi$  定理に則り、以下の物理量から湧昇現象を表現する無次元数の関数を作成した。

$Q_t$  [K/s]: 伝温速度

$U$  [m/s]: 水平流速

$G_T$  [K/m]: 温度勾配

$N$  [s]: Brunt-Vaisala 振動

$H$  [m]: 温度勾配の高さ

$\nu$  [m<sup>2</sup>/s]: 水の動粘性係数

$S$  [m<sup>2</sup>]: 熱源面積

無次元数による湧昇関数を以下に示す。

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

(実海域スケール)

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

(実験スケール)

ただし、

$$H^* = \frac{h}{H} \quad W = \frac{UG_T}{Q_t}$$

$$Ri = \left(\frac{NH}{U}\right)^2 \quad Re = \frac{\nu}{US^{1/2}}$$

## 5.2 肥沃化効果について

実験により、深層水添加後に時間をおいて植物プランクトンが増加することが示唆された。

表 3 より、ZL の変化量が大きく、他のプランクトンは増加することが分かった。これは、ZL が日周鉛直移動をするに関係していると考えられる。

図 3 より、ZL 以外のプランクトンは熱近傍と遠方で減り、その間で増えることが分かった。なお、栄養塩は破線で表示してある。図 4 のように、プランクトンの空間分布性が水温に由来することが示唆された。

表 3 空間平均した熱による各要素の増減量

	1day	2day	3day	4day
TEMP	1.5.E-02	1.5.E-02	1.5.E-02	1.5.E-02
NO3	1.8.E-07	4.6.E-08	3.8.E-08	3.4.E-08
NH4	7.5.E-08	1.1.E-07	1.1.E-07	1.1.E-07
SiOH4	2.3.E-07	3.6.E-08	2.8.E-08	2.6.E-08
PS	8.5.E-12	4.4.E-11	4.9.E-11	5.2.E-11
PL	1.2.E-10	4.6.E-10	5.1.E-10	5.9.E-10
ZS	8.7.E-13	3.0.E-12	3.0.E-12	3.0.E-12
ZL	5.9.E-10	6.9.E-10	1.2.E-10	-1.9.E-10
ZP	1.9.E-13	4.3.E-13	4.3.E-13	4.7.E-13

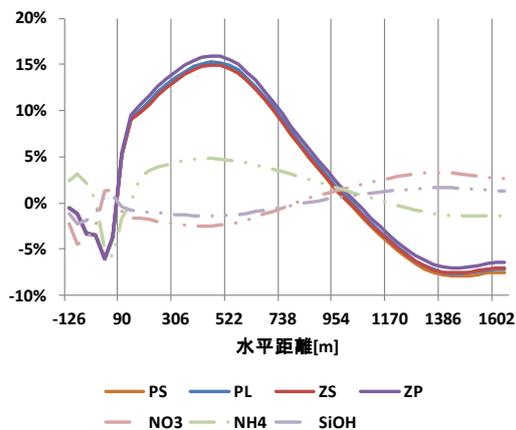


図 3 熱からの距離と各要素の増減率(4day)

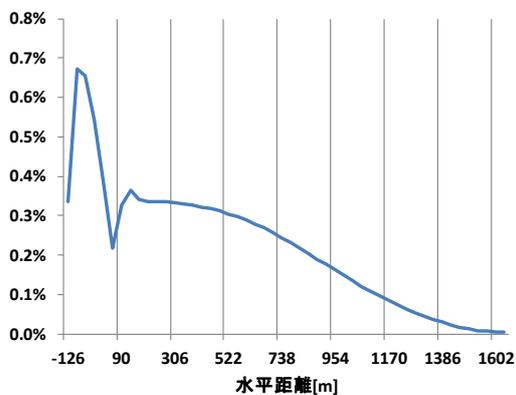


図 4 熱からの距離と水温の増減率(4day)

## 6 結論

・湧昇による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、成層の温度購買 (Gr) が小さく、流れ (U) が小さいほど大きくなり、 $U \cdot Gr/Q$  とリチャードソン数に依存することを明らかにした。

・肥沃化によるプランクトンの空間分布は、湧昇による水温変化の影響を強く受ける。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。

### 6.1 今後の課題

・本研究では検討しなかった、熱源の大きさや地形と湧昇高さの関係について検討する。

・生態系モデルのパラメータが肥沃化に及ぼす影響を検討する。特に、鉛直移動する動物プランクトンの湧昇による増減は、移動速度に Sensitive であると考えられる。

### 参考文献

- [1] 井関和夫『海洋深層水による洋上肥沃化—持続生産・環境保全型の海洋牧場構想—』月刊海洋/号外, 22, 170-178. 2000
- [2] 尾崎雅彦, 大内一之: 取排水の無い発電所冷却システムに関する基礎研究 第一報; 全体構想および発電効率への影響 日本船舶海洋工学会講演会論文集, 第 12 号, 2011, pp.359-362.
- [3] S. Tabeta, T. Kinoshita, Y. Shimizu(2005): Numerical Simulation of Tidal Current in the Coastal Region with an Artificial Seabed Mound for Upwelling, Proc. 24th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering.
- [4] Kishi, Michio J., Makoto Kashiwai, Daniel M. Ware et al. (2007): NEMURO—a lower trophic level model for the North Pacific marine ecosystem. Ecological Modelling, 202, 12-25.
- [5] K. Nakata, "Ecosystem Model; its formulation and estimation method for unknown rate parameters," J. Adv. Mar. Tech. Conf, vol. 8, pp. 99-138, 1993