

# 温排水の拡散予測と生態系への影響に関する考察

環境システムコース・海洋環境工学分野  
16638 江原健太郎

指導教官 藤野正隆 教授  
多部田茂 助教授

## 背景1

温排水による熱エネルギー汚染が生態系へ与える影響が懸念されている。

- ・これまでに大きな生態系破壊報告はない。が、あさりの漁獲高の減少、のり養殖の被害などの噂が絶えない
- ・将来的なエネルギー需要を考えると発電所の増設・大容量化が見込まれる
- ・環境予測を行う際には、コストの面などからモデル計算が行われる場合が多い。

物理モデル(流速、水温、塩分、圧力、潮位等を考慮)

計算時間を短縮し、かつ精度の高い温度場への影響の予測

生態系モデル

水温上昇による直接的な影響はなくても、水質の変化による間接的な影響も考慮する必要がある。

生態系に与える影響についての予測が求められる

## 背景2

### 温排水に関する既存の研究

物理モデル: 電力中央研究所を中心に数多くの既存の研究

水中放水方式の主流化 静水圧近似を行わない3次元計算計算の必要性 (Full 3D計算)

局所細分化格子を用いて計算効率の向上 (ネスティング)

生態系モデル: モデル単体 数多くの研究

温排水に関して物理場と共にモデル計算を行った研究はほとんどない

## 目的

既存の物理モデルと化学・生物モデルを用いて温排水のある場合とない場合の計算を行い、温排水による生態系への影響を考察する。

物理モデル: ネスティングモデル

効率の良い計算 検証計算  
精度の良い計算 (Full 3D計算)

化学・生物モデル(浮遊・底生系モデル)を組み込んで計算を行い、状態変数の変化に注目する。

## 物理モデルの概要－支配方程式

座標系として、平均水面上に原点をとり水平方向をxy平面とし、鉛直下方をz軸正方向とするデカルト座標系を用いる。

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

$u, v, w$  : x, y, z 方向流速  
 $p$  : 圧力  
 $T$  : 水温  
 $S$  : 塩分

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

$$\frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} - g + A_M \left( \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( K_M \frac{\partial w}{\partial z} \right) \quad (3.1)$$

← 3次元計算の場合

$$0 = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} - g \quad (3.2)$$

← 静水圧近似計算の場合

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (4)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} + w \frac{\partial T}{\partial z} = A_C \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( K_C \frac{\partial T}{\partial z} \right) \quad (5)$$

$\rho$  : 海水密度  
 $f$  : コリオリパラメータ  
 $g$  : 重力加速度  
 $A_M, K_M$  : 水平及び鉛直方向の渦動粘性係数  
 $A_C, K_C$  : 水平及び鉛直方向の渦動拡散係数

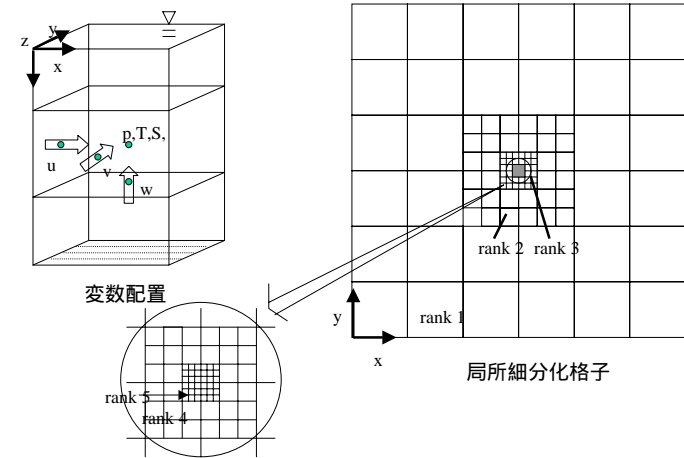
$$\frac{\partial S}{\partial t} + u \frac{\partial S}{\partial x} + v \frac{\partial S}{\partial y} + w \frac{\partial S}{\partial z} = A_C \left( \frac{\partial^2 S}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 S}{\partial y^2} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( K_C \frac{\partial S}{\partial z} \right) + \Delta R \quad (6)$$

$\Delta R$  : 河川からの一格子あたりの流入量

$$\rho = 1028.14 - 0.0735T - 0.00469T^2 + (0.802 - 0.002T)(S - 35.0) \quad (7)$$

## 物理モデルの概要 格子構造と特徴(ネスティングモデル)

・局所細分化格子を用い、ネスティングを行っている。



・長所: 計算時間の短縮、局所的な3次元流れ場の精度良い再現

・Full 3D計算を行う際には、計算安定化のため最内領域である程度の格子数が必要

## 化学・生物モデルの概要

浮遊系の各状態変数(P)および、底生系の各状態変数(B)の支配方程式

$$\frac{\partial P}{\partial t} + u \frac{\partial P}{\partial x} + v \frac{\partial P}{\partial y} + w \frac{\partial P}{\partial z} = A_C \left( \frac{\partial^2 P}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 P}{\partial y^2} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( K_C \frac{\partial P}{\partial z} \right) + \left( \frac{\partial P}{\partial t} \right)^* + q_{eco} \quad (7)$$

$$\frac{\partial B}{\partial t} = \left( \frac{\partial B}{\partial t} \right)^* \quad (8)$$

ただし  $\left( \frac{\partial P}{\partial t} \right)^*$  および  $\left( \frac{\partial B}{\partial t} \right)^*$  : 化学・生物的時間変化項

$q_{eco}$  : 河川水に含まれる物質の流入効果を表す項

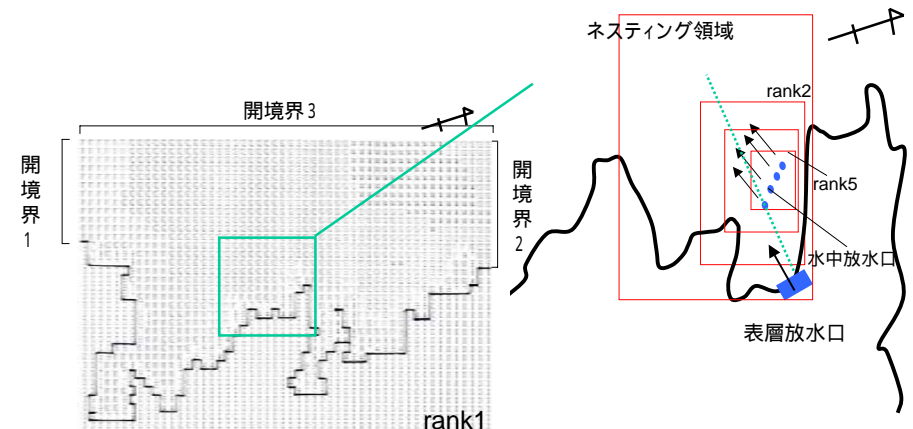
浮遊系状態変数(P)	単位	底生系状態変数(B)	単位
植物プランクトン1	(mgC/m <sup>3</sup> )	底生性珪藻類	(mgC/m <sup>2</sup> )
リンクオータ1	(mgP/m <sup>3</sup> )	マイオベントス	(mgC/m <sup>2</sup> )
窒素クオータ1	(mgN/m <sup>3</sup> )	堆積物食性マクロベントス	(mgC/m <sup>2</sup> )
珪素クオータ1	(mgSi/m <sup>3</sup> )	懸濁物食性マクロベントス	(mgC/m <sup>2</sup> )
植物プランクトン2	(mgC/m <sup>3</sup> )	底生性バクテリア(好気性)	(mgC/m <sup>2</sup> )
リンクオータ2	(mgP/m <sup>3</sup> )	底生性バクテリア(嫌気性)	(mgC/m <sup>2</sup> )
窒素クオータ2	(mgN/m <sup>3</sup> )	デトリタス(好気性)	(mgC/m <sup>2</sup> )
珪素クオータ2	(mgSi/m <sup>3</sup> )	デトリタス(嫌気性)	(mgC/m <sup>2</sup> )
動物プランクトン	(mgC/m <sup>3</sup> )	難分解性粒状有機物	(mgC/m <sup>2</sup> )
懸濁態有機物	(mgC/m <sup>3</sup> )	好気層厚さ	(mgC/m <sup>2</sup> )
溶存態有機物	(mgC/m <sup>3</sup> )	硫化物	(cm)
リン酸態リン	(mgP/m <sup>3</sup> )	間隙水中リン酸態リン	(mgP/m <sup>3</sup> )
アンモニア態窒素	(mgN/m <sup>3</sup> )	間隙水アンモニア態窒素	(mgN/m <sup>3</sup> )
亜硝酸態窒素	(mgN/m <sup>3</sup> )	間隙水亜硝酸態窒素	(mgN/m <sup>3</sup> )
硝酸態窒素	(mgN/m <sup>3</sup> )	間隙水硝酸態窒素	(mgN/m <sup>3</sup> )
珪酸態珪素	(mgSi/m <sup>3</sup> )	間隙水珪酸態珪素	(mgSi/m <sup>3</sup> )
溶存酸素	(mg/l)		

## 物理モデルの検証計算 - 玄海原子力発電所を対象海域とした計算

### 地形条件

・rank1での水平方向の格子間隔は200mで領域間の格子比は3:1

・鉛直方向の格子間隔は水深14mまでは2m間隔、それ以降は順に4,6,8,10,10m間隔



## 計算条件

温排水条件							
ケース	放水方式	水温( )	環境水温( )	温度差( )	流量(m <sup>3</sup> /s)	流速(m/s)	気温( )
ケース1	水中	27.6	20.8	6.8	6.8	164	15
	表層	26.9	20.8	6.1	6.1	37.8	
ケース2	水中	19.5	12.5	7	7	160	2
	表層	19.5	12.5	7	7	70	

流速は実際の流量を基に本計算用に換算している

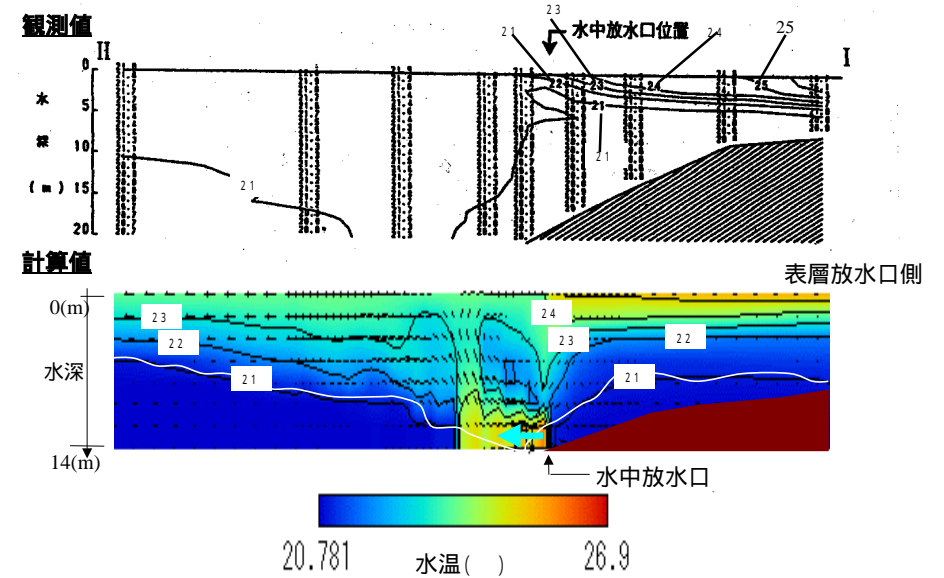
・海面での熱フラックスの計算には大気との熱交換係数 ( $1.86 \times 10^{-3}(\text{cal}/\text{cm}^2 \cdot \text{s} \cdot )$ ) を用いた。

表層水温を (表層水温) - (熱交換係数)  $\times$  {(表層水温) - (気温)} から求める。

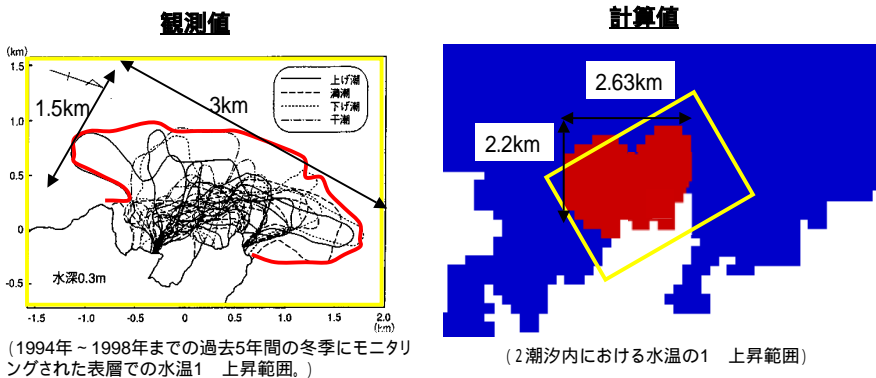
・風は南方向の風と北西方向の風を周期的に与えた。

・全領域で水温の初期値は環境水温、塩分の初期値は34%とした。

## 計算結果1(ケース1) 放水口近傍での鉛直方向の水温分布(干潮時)



## 計算結果2(ケース2) 水温の1 上昇範囲



(1994年～1998年までの過去5年間の冬季にモニタリングされた表層での水温1 上昇範囲。)

(2潮汐内における水温の1 上昇範囲)

ケース : 静水圧近似計算による結果 観測値とはおおまかな一致を見せている。

→ 水中放水の温排水に関して、静水圧近似計算で行っても大まかな表層の水温場は再現できると思われる。

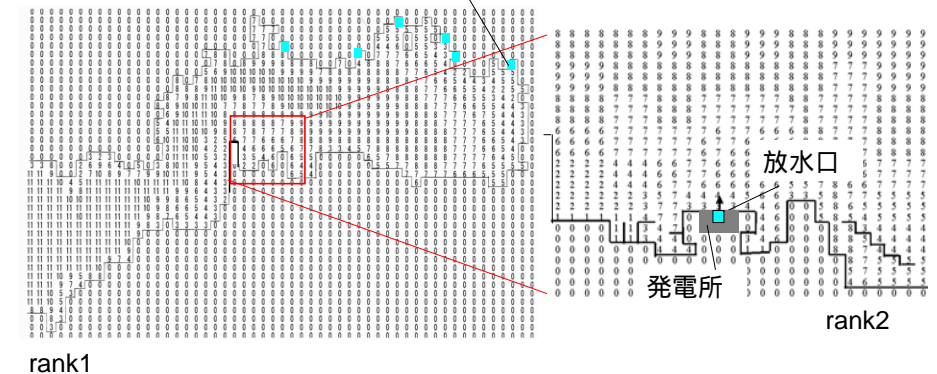
## 温排水の生態系への影響を考慮した計算 - 富津火力発電所を対象海域とした計算

・東京湾周辺で最大の出力、周辺海域: 盤州干潟、富津岬周辺(あさり)

### 地形条件

・rank1での水平方向の格子間隔は1350mで領域間の格子比は3:1

・鉛直方向の格子間隔は水深14mまでは2m間隔、それ以降は順に4,6,8,18,20m間隔  
河川(江戸川、中川、荒川、隅田川、多摩川、鶴見川)





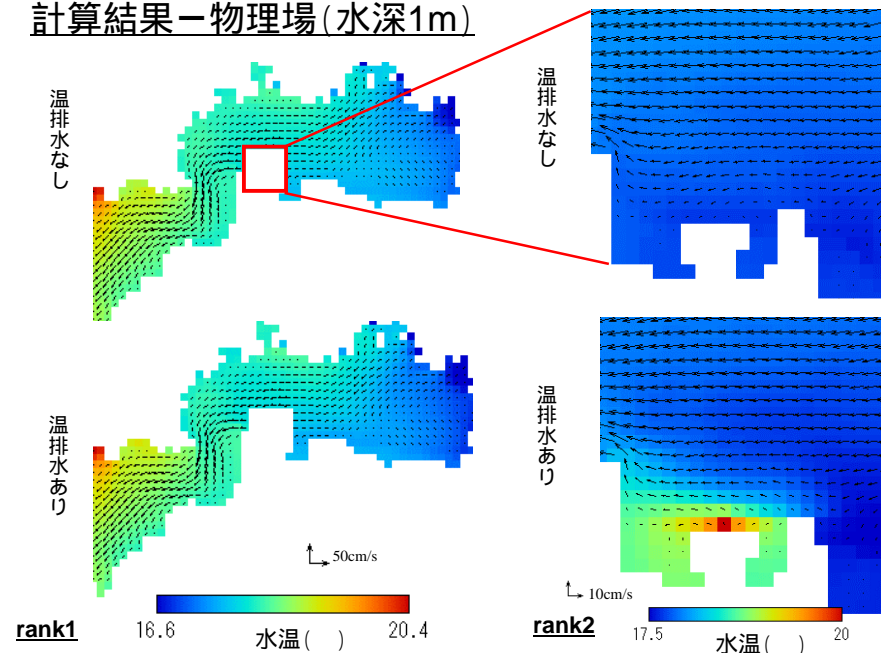
## 計算条件

- ・計算は**静水圧近似計算**で行った。
- ・計算想定時期を11月とし、11月の**平均場**を求めるために、気象・河川・風・開境界データには11月の平均値を用いた。
- ・潮汐は振幅0.23m、周期12時間のM2分潮を開境界で与えた。
- ・計算期間は約5年。

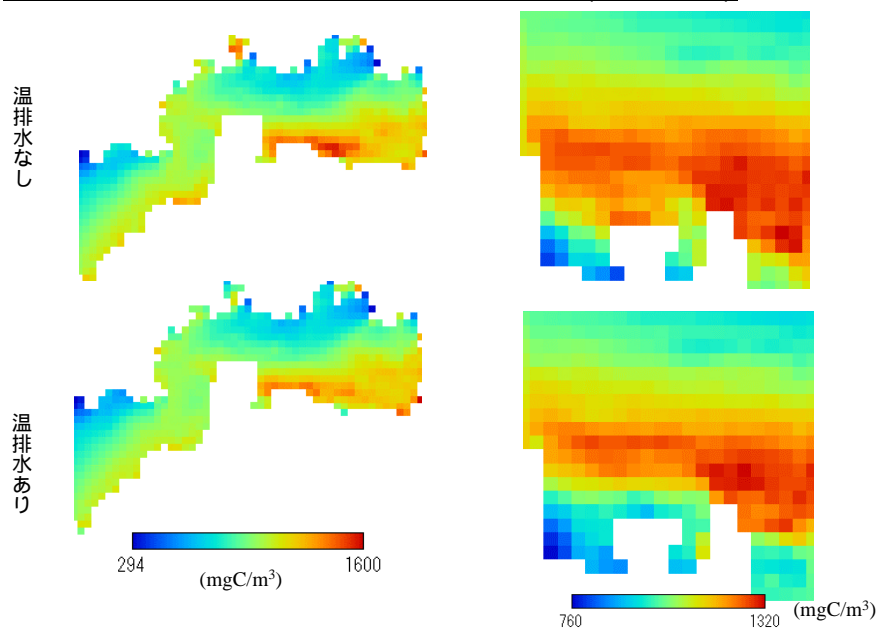
温排水条件	
放水方式	水中
温度差 ( )	6.5
放水流量 (m <sup>3</sup> /s)	80
放水流速 (m/s)	0.089

流速は実際の流量を基に本計算用に換算している

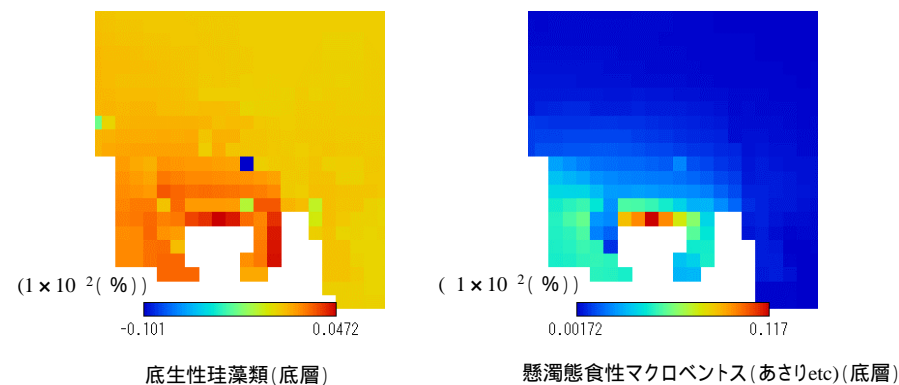
## 計算結果—物理場(水深1m)



## 計算結果—浮遊系・植物プランクトン1(水深1m)

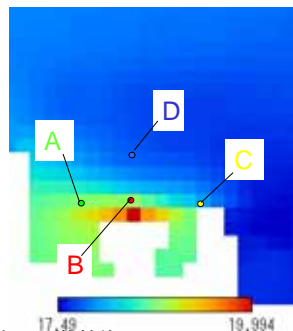


## 計算結果—温排水がない場合とある場合の生物量の差



## 計算結果－発電所近傍における状態変数の変化

	B	A	C	D
放水前との温度差( )	1.3	0.9	0.3	0.1
植物プランクトン(-)	14%減	8%減	4%減	1%減
動物プランクトン(-)	2%減	3%減	2%減	2%減
リン酸態リン(-)	35%増	23%増	2%増	
アンモニア態窒素(-)	4%増	17%増	10%増	5%増
珪酸態珪素(-)	200%増	250%	120%増	40%増
底性珪藻類(-)	16%増	10%増	5%増	
メイオベントス(-)	30%減	8%減	1%減	
懸濁物食性マクロベントス(-)	12%減	2%減	0.05%減	



### ・A～D点での傾向

- 浮遊系: 植物プランクトン、懸濁態有機物、溶存態有機物、栄養塩
- 底生系: 底生性珪藻類、ベントス類、バクテリア、デトライタス、各種栄養塩

### ・取水口から取水した海水 温排水として放水口から放水し、放水口近傍における浮遊系の状態変数を減少、あるいは増加させている可能性が高い

- 例) 植物プランクトン 取水口での植物プランクトンは表層の約0.5倍の量
- 底生系に関しては、取水に起因する影響も考えられるが、水温の影響を間接的にうけている可能性もある。

## 結論1

生態系計算を行う前の検証として、ネスティングモデルを用いて水中方式による温排水を考慮した物理場の計算を行い、以下のことがわかった。

- ・放水口近傍での温排水の3次元的な挙動をFull-3D計算を用いて再現できることを確認した。
- ・表層の水温1 上昇範囲をだまかに再現することができた。
- ・課題 最内領域の広さ、鉛直方向の格子間隔

## 結論2

生態系モデルを用いて温排水の拡散計算を行った。その結果以下の事がわかった。

- ・温排水の放水後に、浮遊系・底生系の状態変数が発電所近傍の海域において減少、あるいは増加していることを確認した。
- ・状態変数のうち、懸濁態食性のマクロベントスは温排水によって、発電所近傍海域から富津岬にかけてわずかながら減少していることがわかった。これによりあさが温排水によって減少する可能性が示唆された。
- ・状態変数の変化量と海域の水温の上昇幅にある程度の相関があったが、変化が水温の変化に直接起因したわけではなく、水温の影響を受けて相互に複雑に影響し合った結果、間接的に各々において増加・減少していることも考えられる。また浮遊系の状態変数に関しては、取水された海水による影響がかなり大きいと考えられる。
- ・温排水による水温を代表する物理場を精度良く再現することも重要であるが、生態系への影響を目的とする場合には、それ以上に生態系モデルを用いた予測計算が重要になることが考えられる。