

卒業論文発表

シンガポール沿岸における  
浮体式構造物の環境影響シミュレーション

東京大学工学部システム創成学科

E&Eコース4年 多部田研究室

土倉 憧太

- 背景と目的
- 計算モデル
- 計算条件
- 計算結果・考察
- 結言

# 研究背景

## 一熱帯域の海洋における浮体式建造物の利用



TAKAGI et al. (2017):より引用

### ・ブラジルの事例

沖合での海洋開発における物資の供給の中継地点として、海上に浮体式建造物を設置する取り組みが進んでいる。

### ・シンガポールの事例

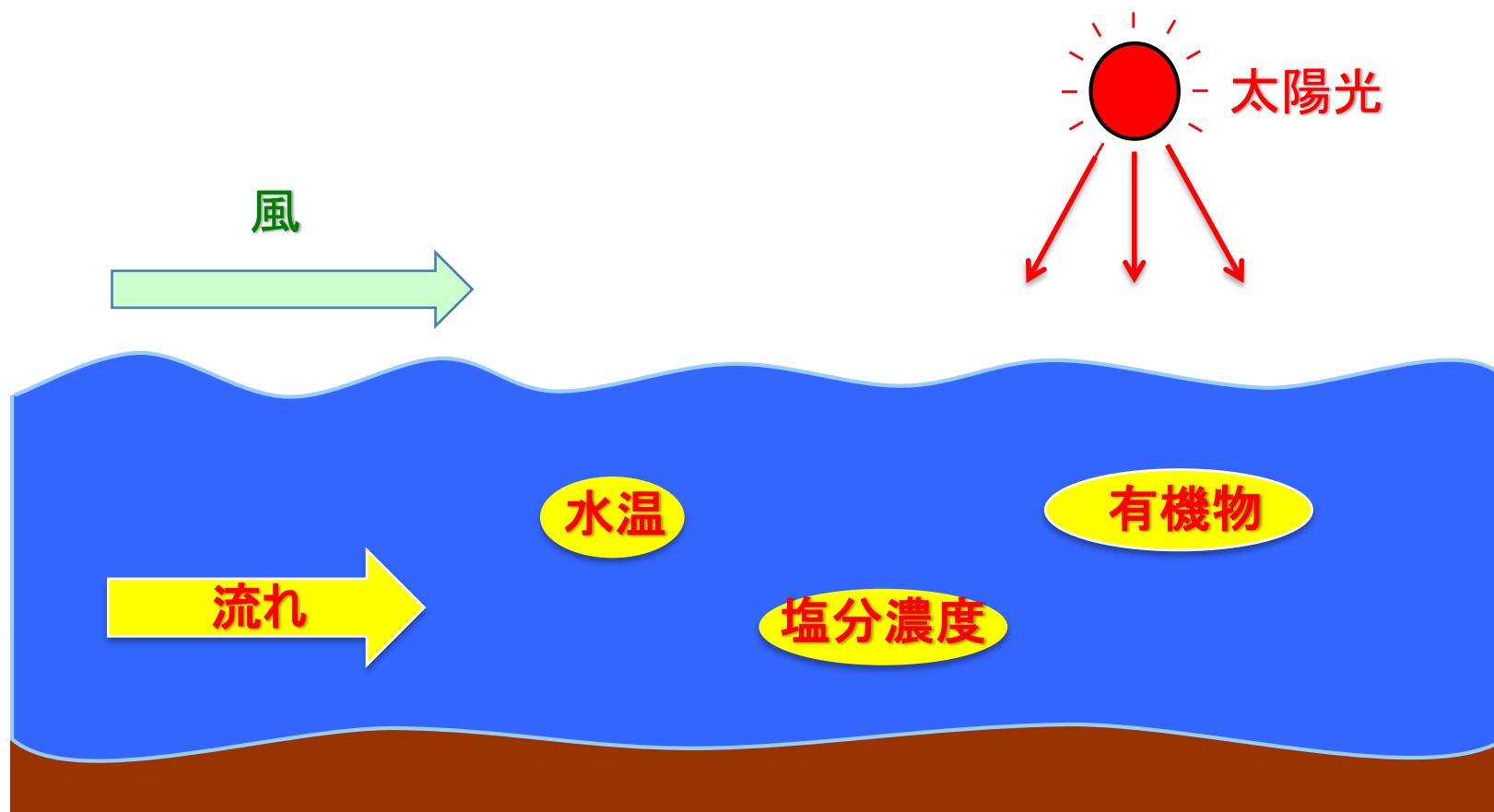
海洋において、潮力発電などの再生可能エネルギーの実験を行う基地として、浮体式建造物の設置が計画されている。



これらの利用をしていく上で、浮体式建造物が環境に悪影響を及ぼさないか、評価する必要がある。

# 浮体が海洋に与える影響

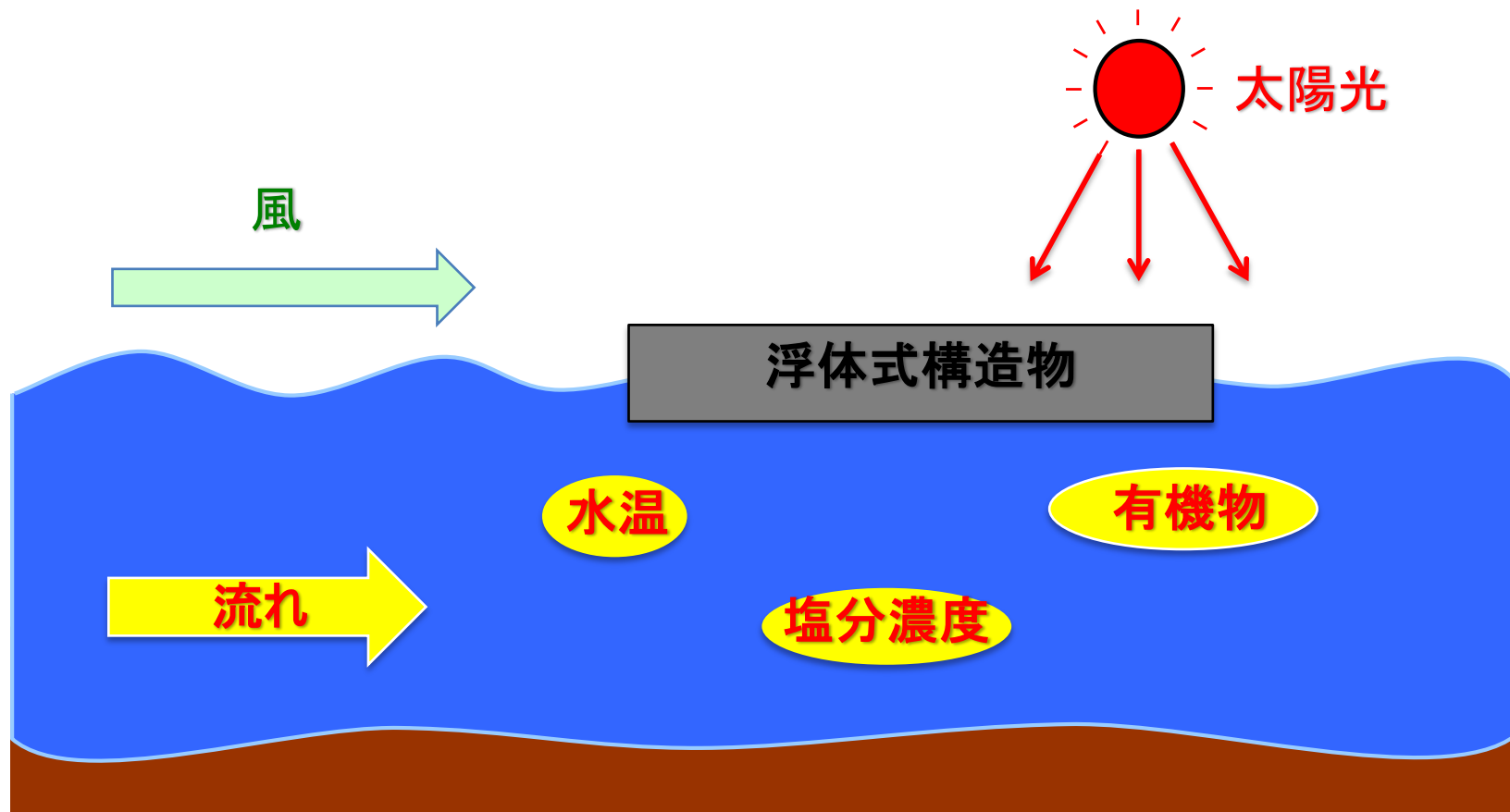
海の状態を表す環境因子として、流れ、水温、塩分濃度、栄養塩、有機物、プランクトンなどが挙げられる。



# 浮体が海洋に与える影響

浮体式構造物を設置することで、

- ・風が遮断される
  - ・太陽光が遮断される
  - ・流れが変化する
- などの影響が考えられる。



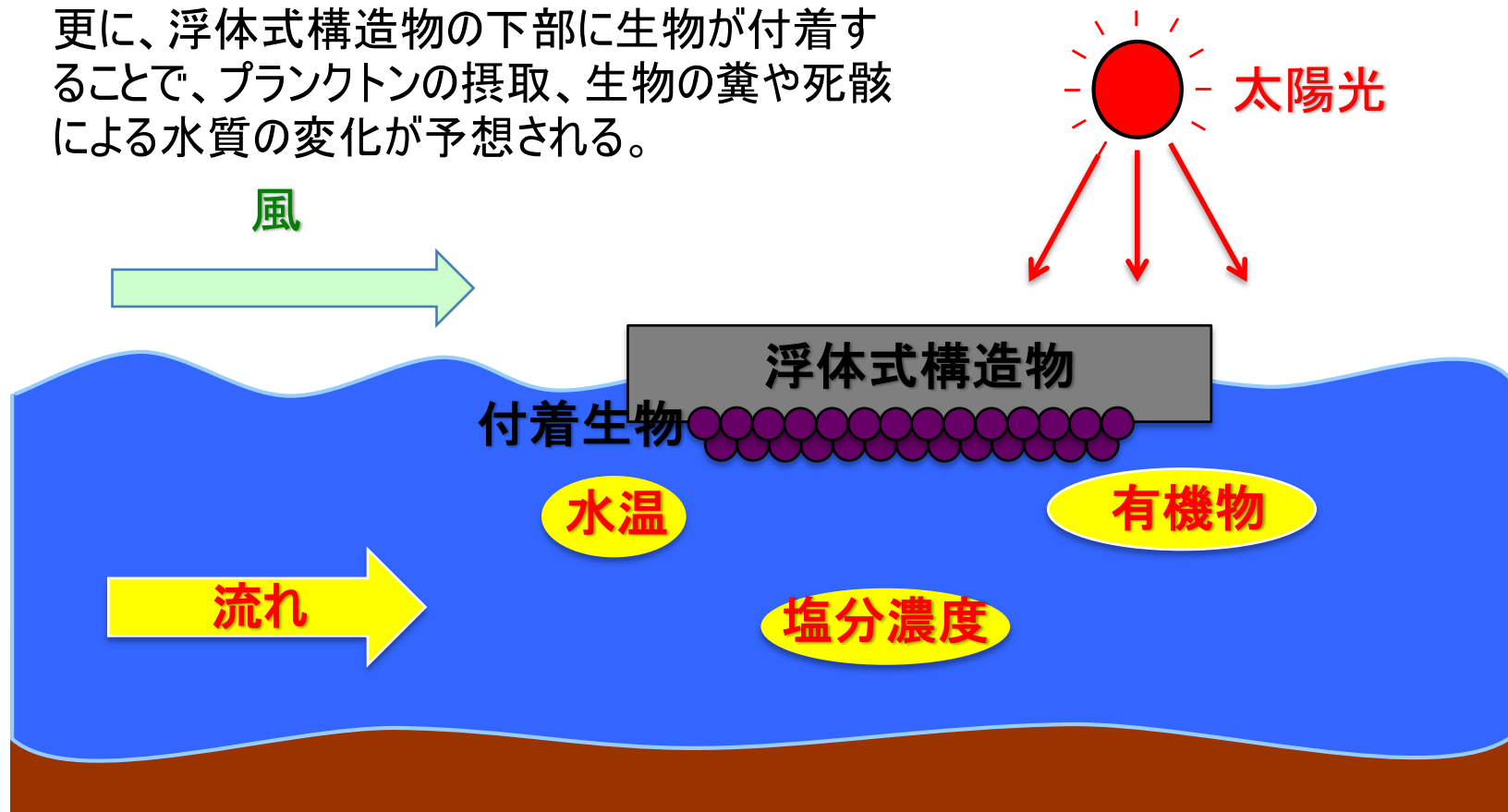
# 浮体が海洋に与える影響

浮体式構造物を設置することで、

- ・風が遮断される
- ・太陽光が遮断される
- ・流れが変化する

などの影響が考えられる。

更に、浮体式構造物の下部に生物が付着することで、プランクトンの摂取、生物の糞や死骸による水質の変化が予想される。



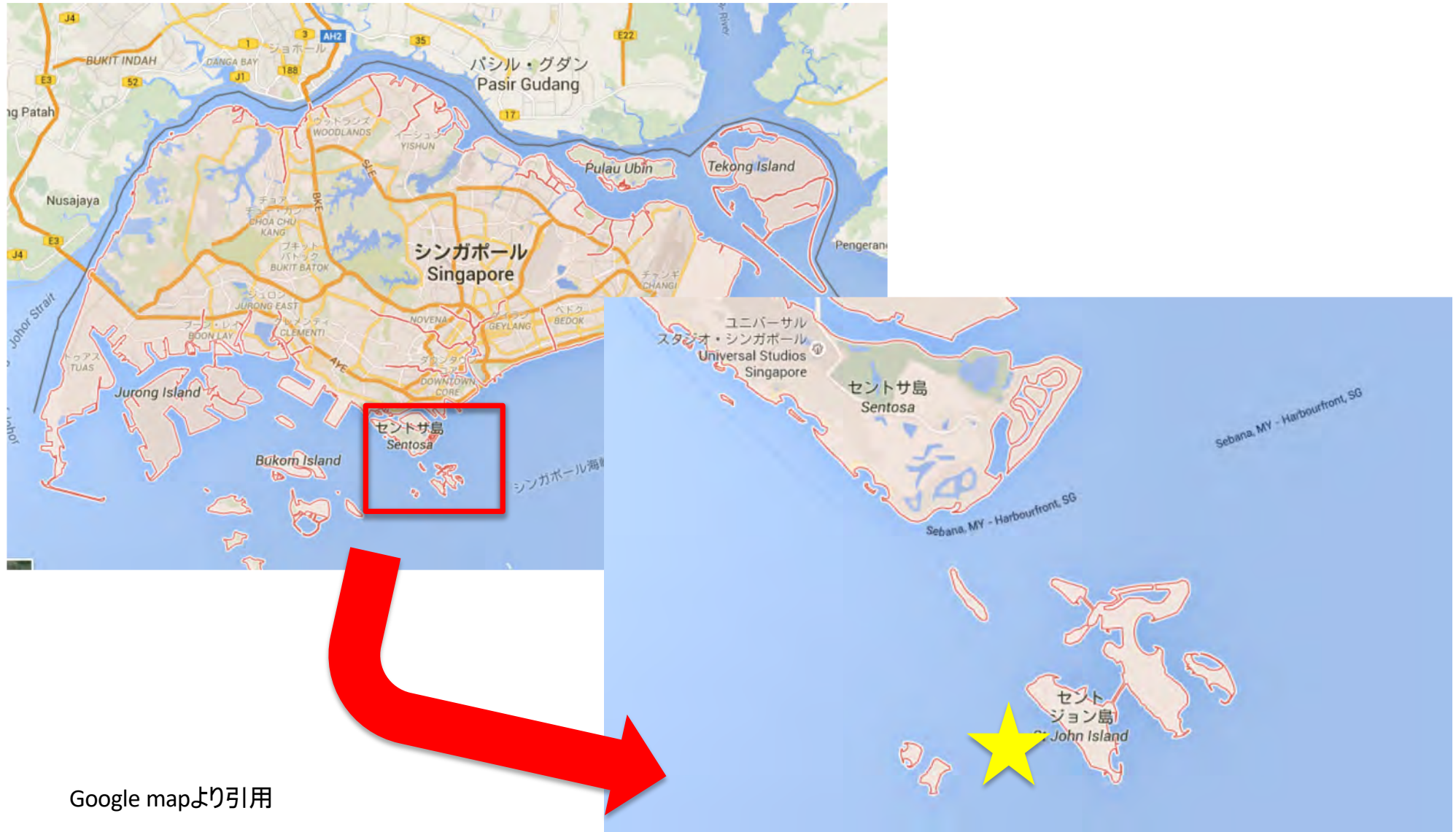
# 先行研究

- 北澤(2001)では、東京湾を対象として、生態系モデルを用いた数値シミュレーションを行い、超大型浮体式構造物が周辺の海洋生態系に及ぼす影響について予測。



- 実海域の実測データとの比較により、生態系モデルが妥当性を示した。
- 浮体式構造物が海洋環境に与える影響として、付着生物の活動が非常に重要であることがわかった。
- 一方、熱帯域における浮体式構造物の海洋環境影響に関する研究はない。

# 本研究の目的



Google mapより引用



# 本研究の目的

- 対象地点：シンガポール南部、セントジョン島沿岸
- 既存の海洋生態系シミュレーションモデルに、浮体式構造物及びその直下に付着する生物のモデルを組み込む。

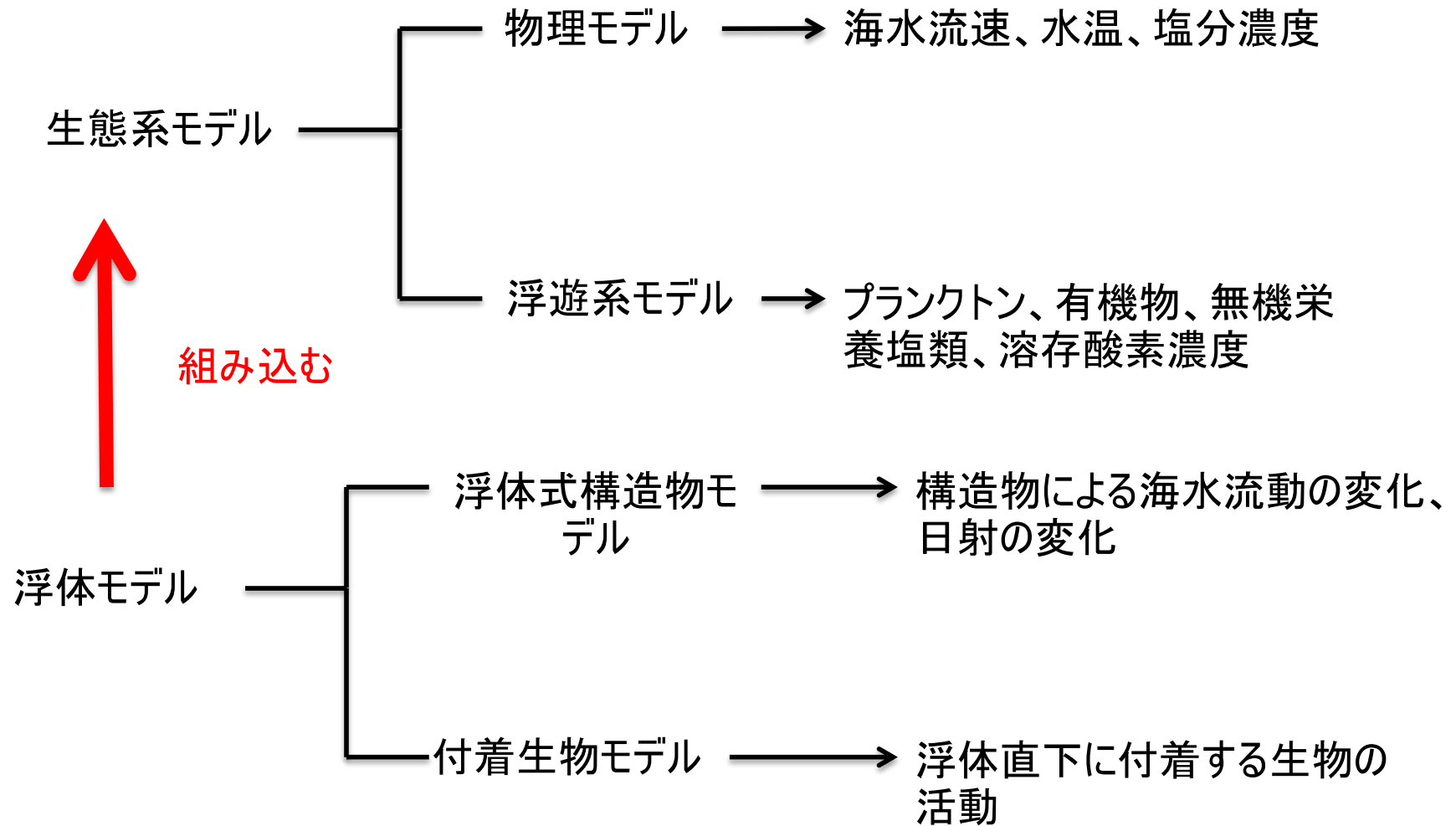


- 構築したモデルを用いて、シンガポールの対象海域における浮体式構造物の環境影響シミュレーションを行う



- 背景と目的
- 計算モデル
- 計算条件
- 計算結果・考察
- 結言

# 計算モデル



# 物理モデル

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

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

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

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

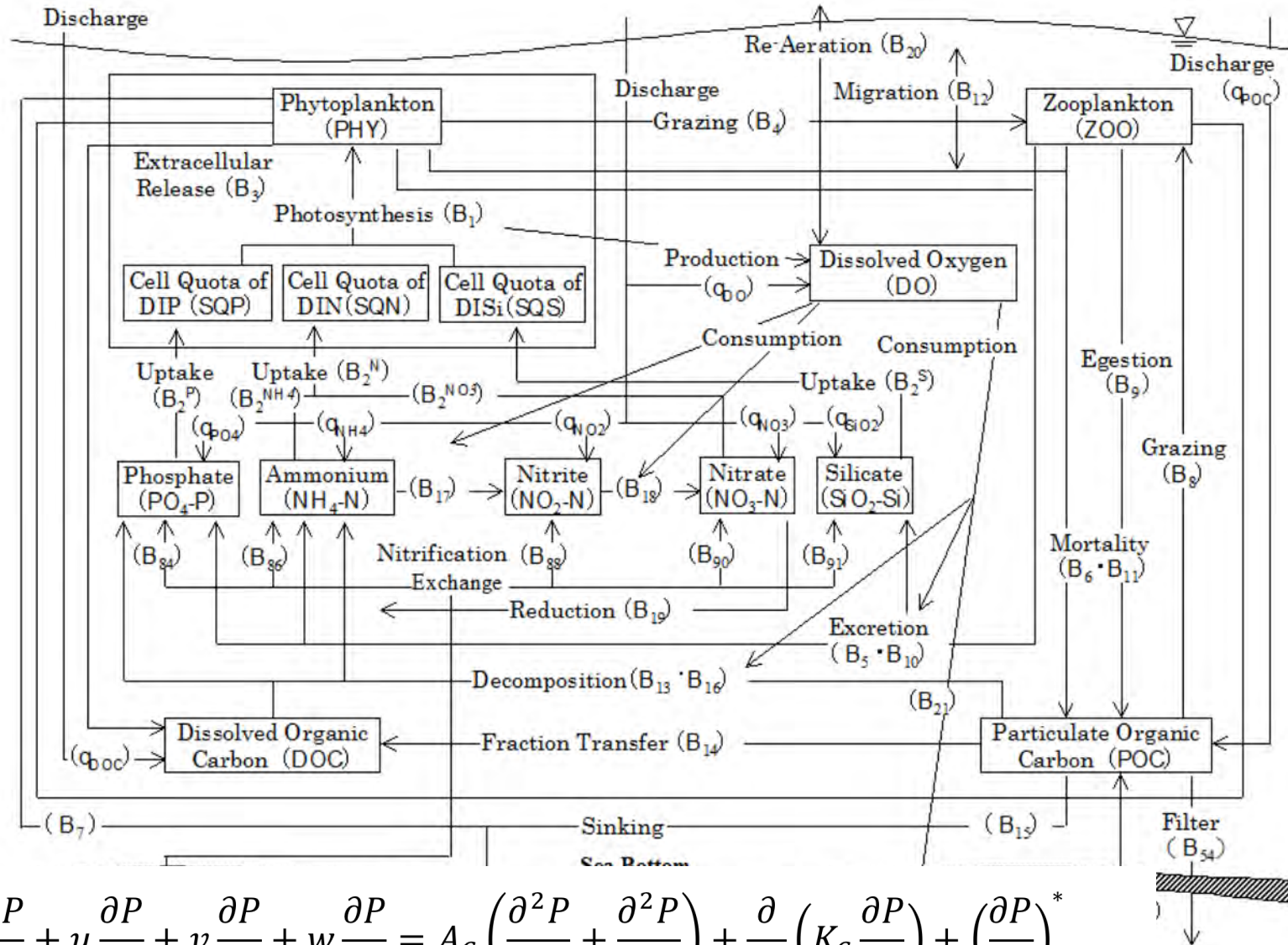
$$\frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} + w \frac{\partial T}{\partial z} = A_c \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{K_c}{\delta} \frac{\partial T}{\partial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

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

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

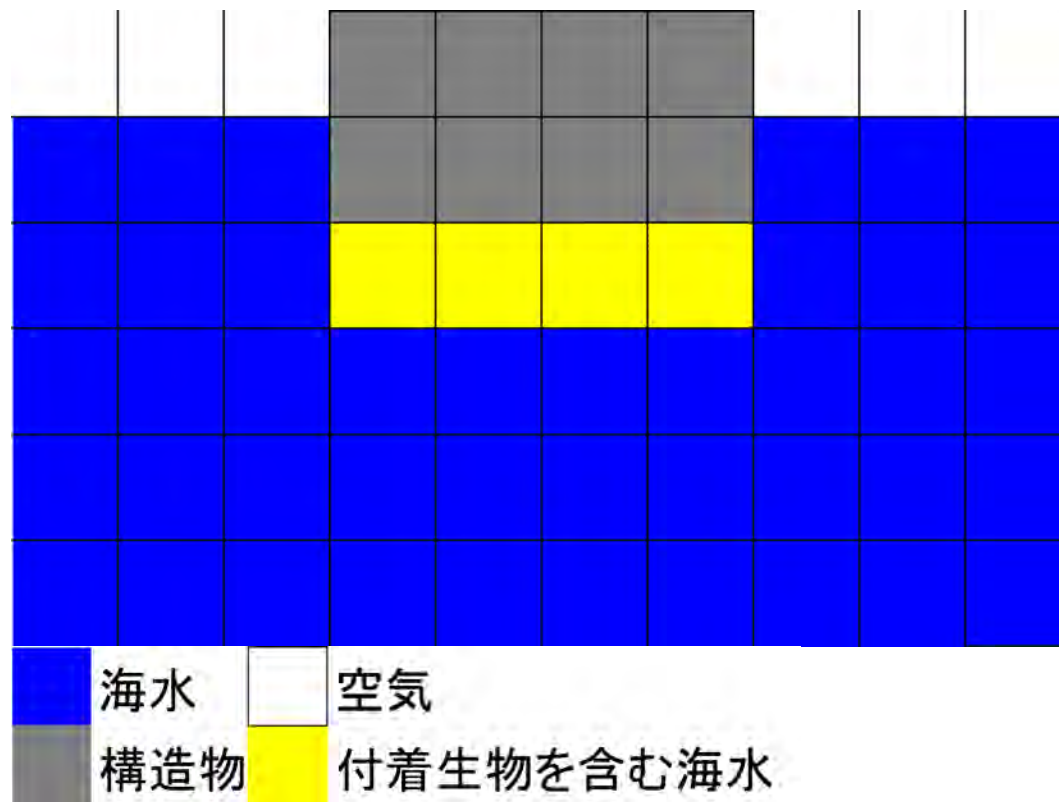
以上7式により、圧力 $p$ 、3方向の流速 $u$ 、 $v$ 、 $w$ 、水温 $T$ 、塩分濃度 $S$ 、密度 $\rho$ の7つの変数について解く。

# 浮遊系モデル



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

# 浮体モデル



構造物のグリッドと海水のグリッドの境界では、流れ及び拡散がないものとする。

構造物の存在するグリッドの直下は全て日射が入らないものとする。

構造物の1つ下のグリッドに付着生物が存在するものとする。

# 付着生物モデル

$$\frac{\partial ADH}{\partial t} = B_{101} - B_{102} - B_{103}$$

ここで、ADH(mgC/m<sup>2</sup>)は付着生物の量である。  
B<sub>101</sub>は餌料の摂取量であり、懸濁態物質の量によって決定する。  
B<sub>102</sub>は呼吸・排泄、B<sub>103</sub>は排糞・自然死亡であり、それぞれ以下の式で表される。

$$B_{102} = \alpha_{102a} \cdot (1 - \alpha_{103a}) \cdot B_{101} + \alpha_{102r} \cdot ADH$$

$$B_{103} = \alpha_{103a} \cdot B_{101} + \alpha_{103r} \cdot ADH^2$$

ここで、 $\alpha_{102a}$ は摂取活動に伴う呼吸排泄の割合、 $\alpha_{103a}$ は摂食量の内同化されないものの割合、 $\alpha_{102r}$ は0°Cにおける相対静止呼吸排泄速度、 $\alpha_{103r}$ は0°Cにおける相対静止排糞・自然死亡速度である。

# 付着生物による浮遊系モデルの変更

付着生物は植物プランクトン、動物プランクトン、懸濁態有機物を摂取するため、以下の式のように減少する。

$$\left(\frac{\partial PHY_i}{\partial t}\right)^* = \left(\frac{\partial PHY_i}{\partial t}\right) - \frac{B_{101}}{h_s \left(\sum_{i=1}^{N_P} PHY_i + \sum_{j=1}^{N_Z} ZOO_j + POC\right)} \cdot PHY_i$$

ここで、 $h_s$ (m)は付着生物の厚さである。

動物プランクトン、懸濁態有機物に対しても同様の式を加える。

また、付着生物の死体の分解に伴い、以下の式のように栄養塩濃度が増加する。

$$\left(\frac{\partial NH_4 - N}{\partial t}\right)^* = \left(\frac{\partial NH_4 - N}{\partial t}\right) + \frac{[N:C] \cdot (B_{102} + B_{103r})}{h_s}$$

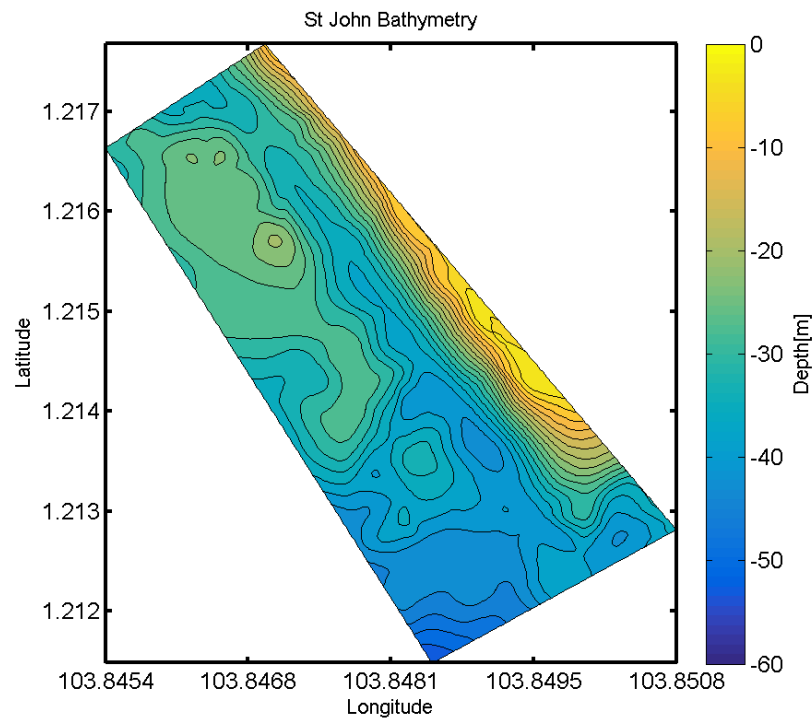
ここで、[N:C]は付着生物の体内のリンと炭素の比である。

$SiO_2$ 、 $PO_4$ についても同様の式を加える。

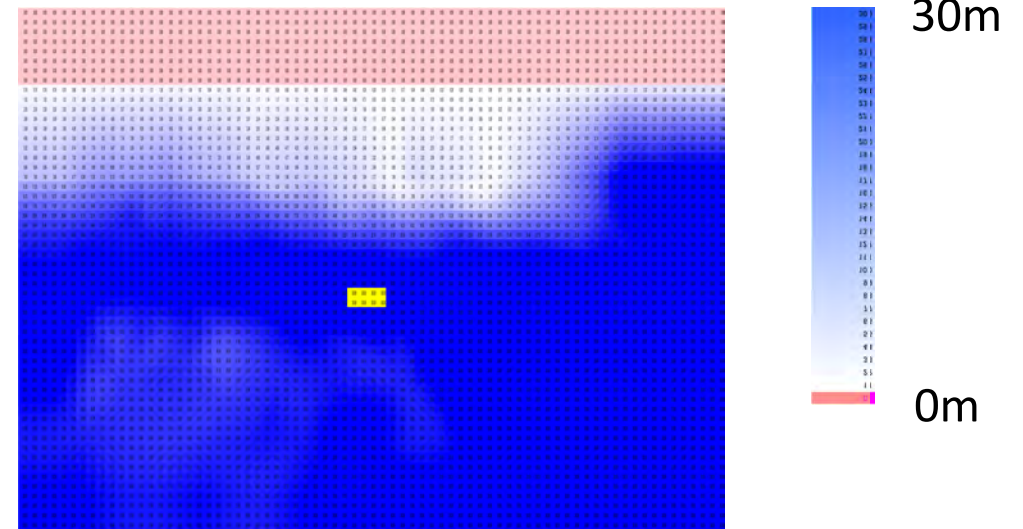


- 背景と目的
- 計算モデル
- 計算条件
- 計算結果・考察
- 結言

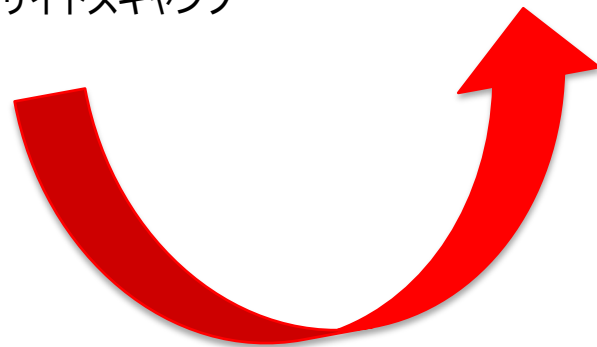
# 計算領域



高木教授より提供、サイドスキャンソナーにより計測



8m四方のグリッドを73×54で設定。黄色部分に浮体式構造物を設置。



# 境界条件

- 日射量

東京湾の平均日射量(気象庁)を満たすように、正午に最大、夜間は0になるように調整。

- 潮汐

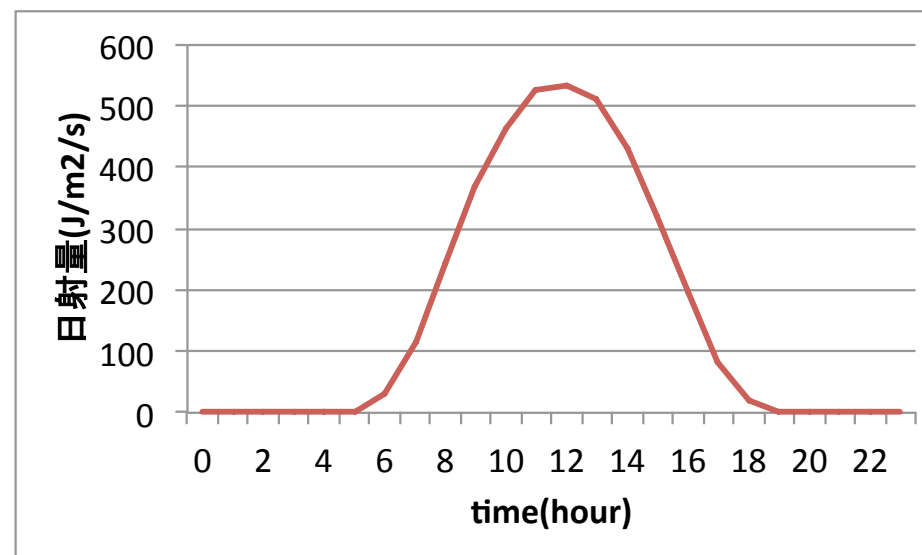
先行研究と同様に、東京湾における主要4分潮を考慮

- 水温

それぞれ年間の平均温度として東京は18.5°C、シンガポールは29.8°Cで一定とした。

- 塩分濃度

どちらも34(psu)とした。

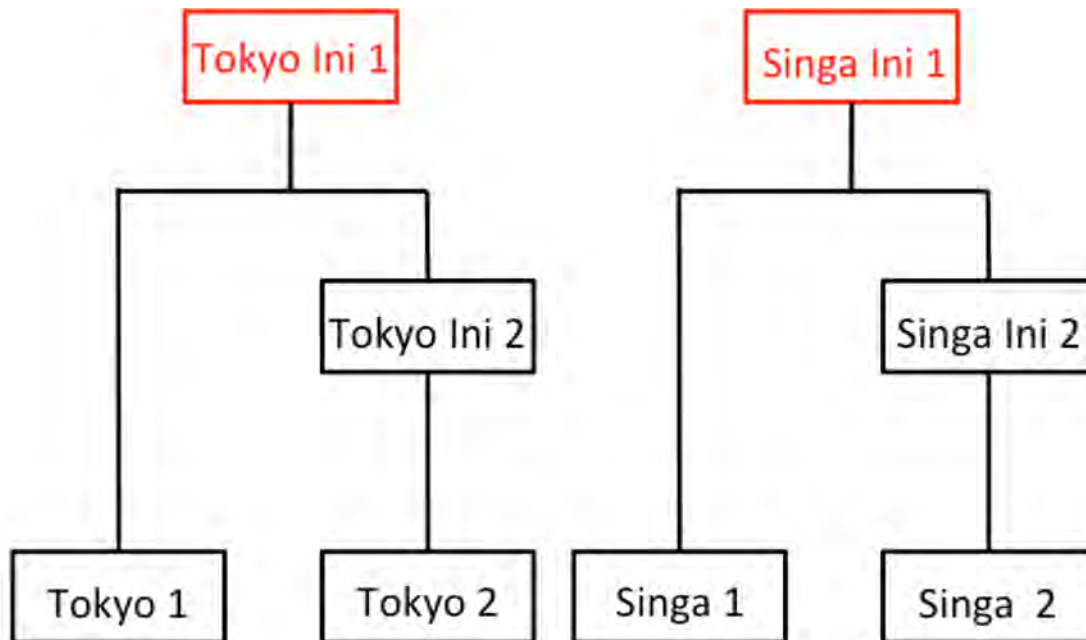


1日の日射量

要素	周期(sec)	振幅(m)	位相(deg)
M2	44714.16	0.373	328.08
K1	86164.09	0.229	261.10
S2	43200.00	0.168	195.66
O1	92949.63	0.197	243.02

潮汐

# 計算ケース



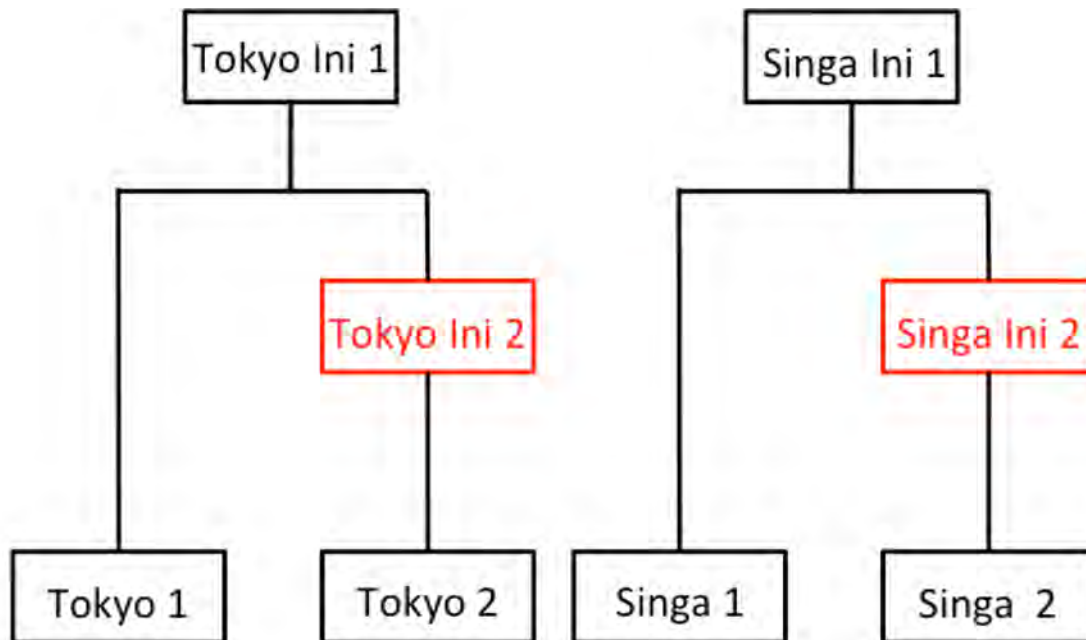
異なる8つの条件を順次計算していく。

水温の異なる2つの異なる環境Tokyo Initial 1及びSingapore Initial 1において、浮遊系モデルの各変数が定常状態になるまで、計算



このときの値を、以降のTokyo、Singaporeの計算のそれぞれ初期条件、開境界条件とする。

# 計算ケース

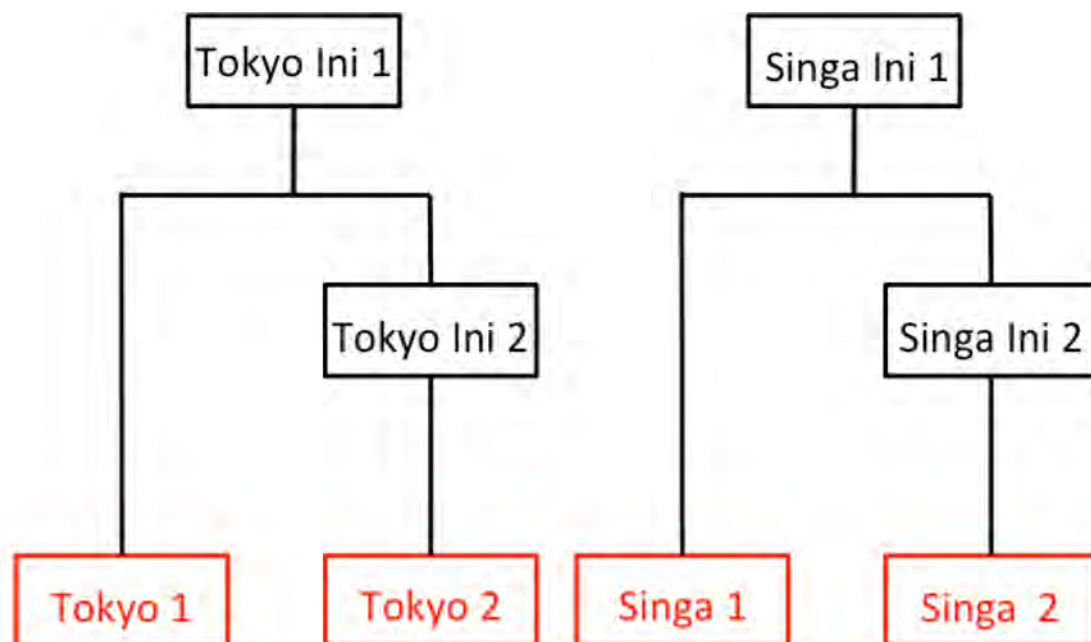


浮体及び付着生物モデルを組み込んだモデルで、Tokyo Initial 2及びSingapore Initial 2を、付着生物の量が定常状態になるまで計算する。



この定常状態での付着生物の量をTokyo Initial 2、Singapore Initial 2での初期条件とする。

# 計算ケース



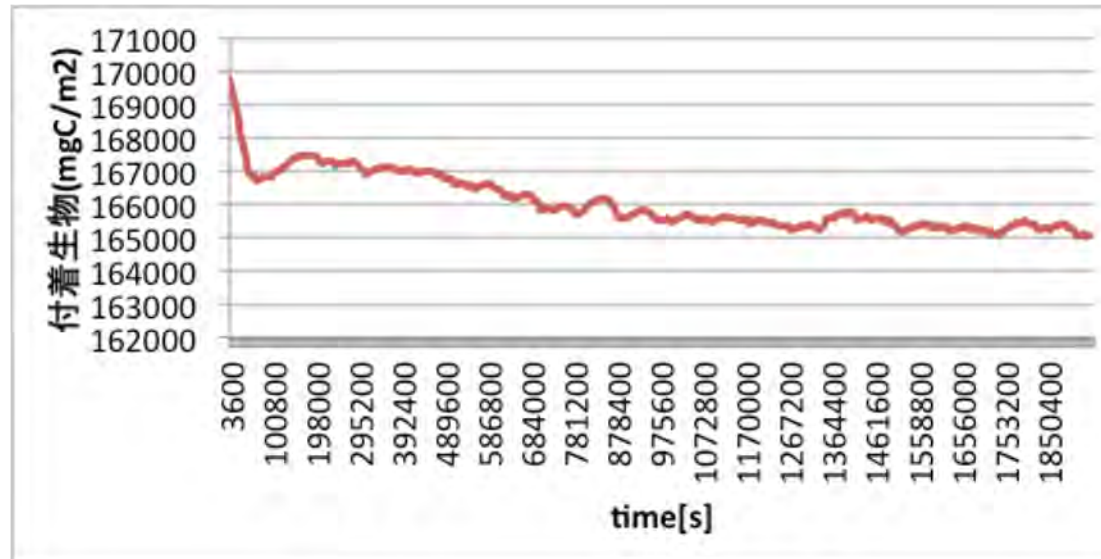
以上の条件の下、浮体式構造物のないTokyo 1及びSingapore 1、浮体式構造物のあるTokyo 2及びSingapore 2を計算。



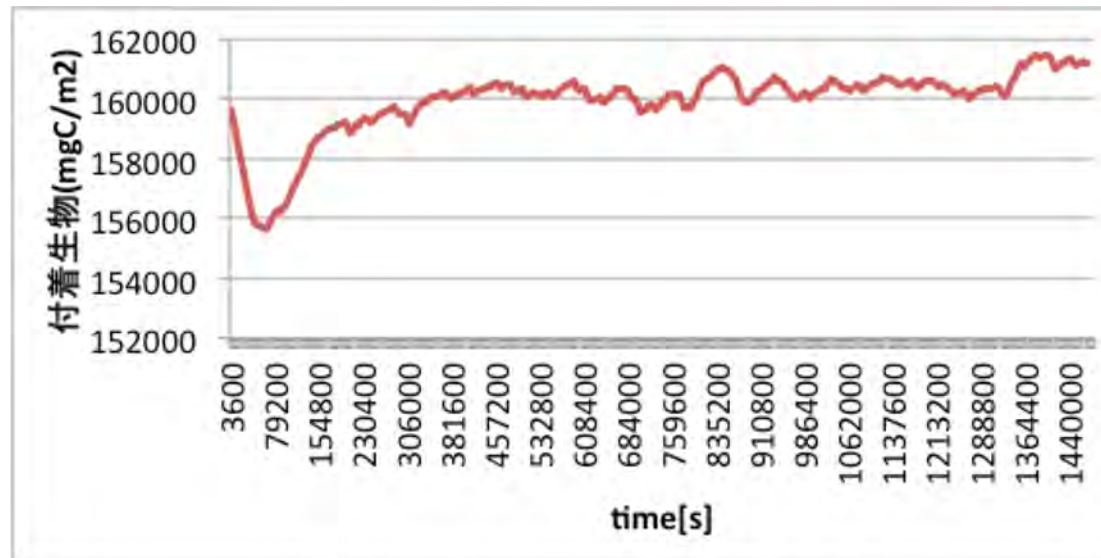
Tokyo 1からTokyo 2、Singapore 1からSingapore 2への変化率を可視化し、比較する。

- 背景と目的
- 計算モデル
- 計算条件
- **計算結果・考察**
- 結言

# 付着生物の定常状態



Tokyo における付着生物の量の推移



Singapore における付着生物の量の推移



# 付着生物に関するパラメータの設定について

$$B_{102} = \alpha_{102a} \cdot (1 - \alpha_{103a}) \cdot B_{101} + \alpha_{102r} \cdot ADH$$

- $\alpha_{102r}$ (0° Cにおける相対静止呼吸・排泄口度)

この値が大きいと、付着生物の量が大きくなった際に餌料の摂取による付着生物の増加分を排泄による減少分が上回ってしまい、付着生物が減り続けるという非現実的な減少が起きてしまうことがわかった。よって、この値を $1.74 \times 10^{-9}$ (1/s)とした。

$\alpha_{102r}=1.74 \times 10^{-8}$ のとき

$\alpha_{102r}=1.74 \times 10^{-9}$ のとき

# 付着生物に関するパラメータの設定について

$$B_{103} = \alpha_{103a} \cdot B_{101} + \alpha_{103r} \cdot ADH^2$$

- $\alpha_{103r}$  (0° Cにおける相対静止排糞・自然死亡口度)

この値は付着生物の2乗の項の係数であり、また不確実な値であることがわかっている。従って、本研究ではこの値を $2.31d^{-1}2(1/(mgC/m^2)/s)$ とすることにより、付着生物の量が現実的な値で収束するようにした。

- 温度変化を表すパラメータ $\beta$

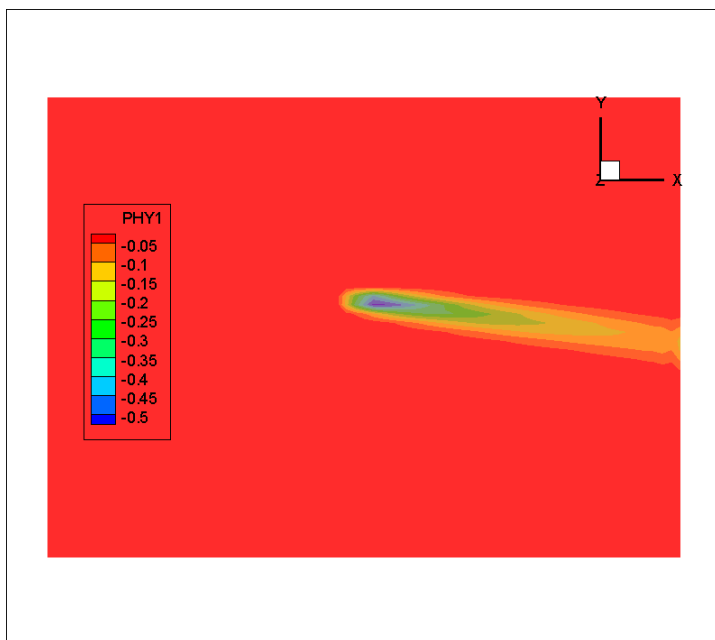
先行研究では、 $\alpha_{102r}$ や $\alpha_{103r}$ は温度に依らない定数を用いていた。

しかし、一般的に、生物の摂食や呼吸活動は、温度が高くなるほど活発になることが知られている。

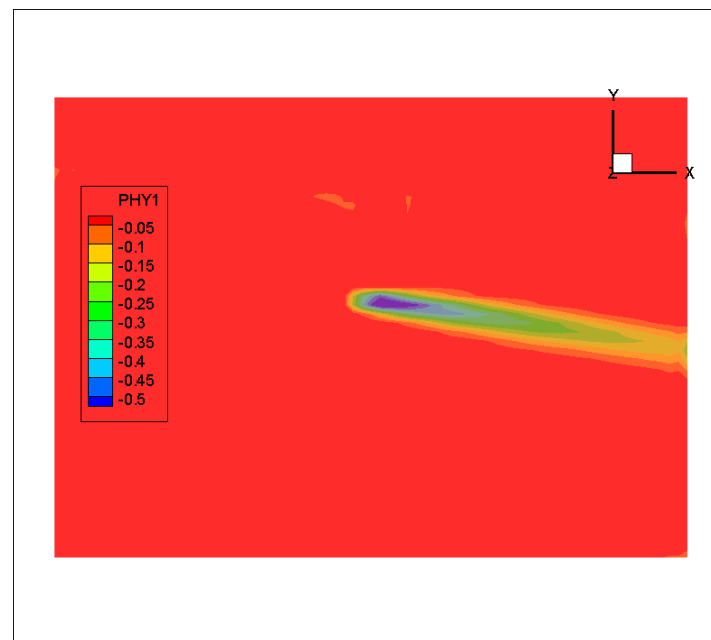
$$\beta = \exp(0.0693 \cdot T)$$

本研究ではこの $\beta$ を掛け合わせるにより、温度によりパラメータが変化するように設定した。

# 計算結果・考察—植物プランクトン



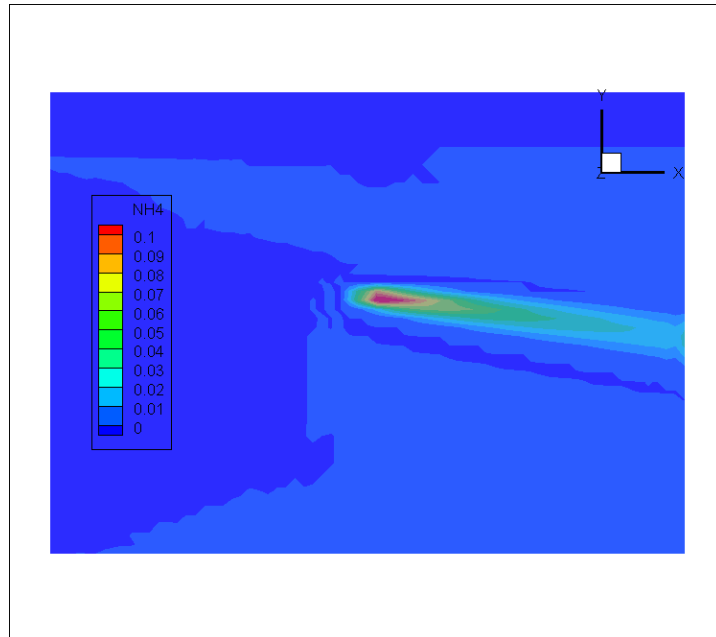
Changing Rate at Tokyo



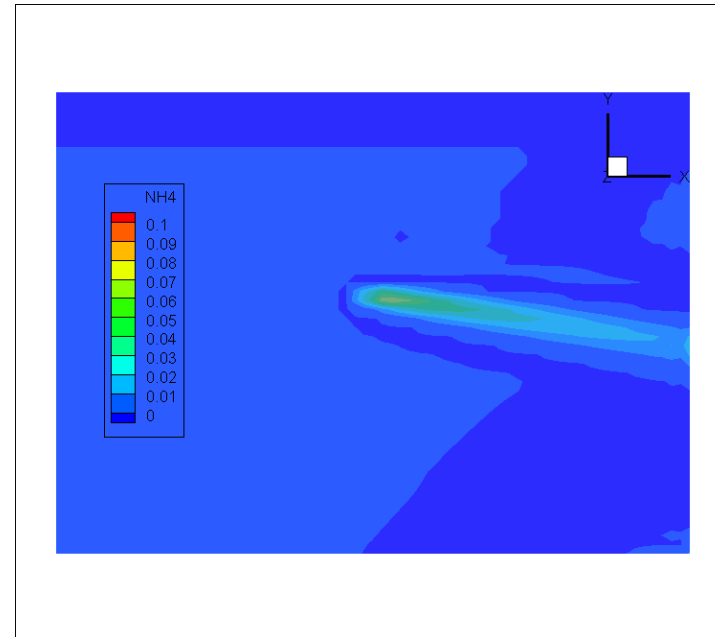
Changing Rate at Singapore

浮体直下において約50%の減少が見られた。また、海流の速度方向にその影響が及んでいることがわかった。これらは付着生物の摂食活動によるものと考えられる。動物プランクトン、懸濁態有機物に関しても同様の変化が見られた。減少率はSingaporeの方がやや大きくなっている。これは、温度が高い方が付着生物の摂食活動が活発であるためと考えられる。

# 計算結果・考察ーアンモニア



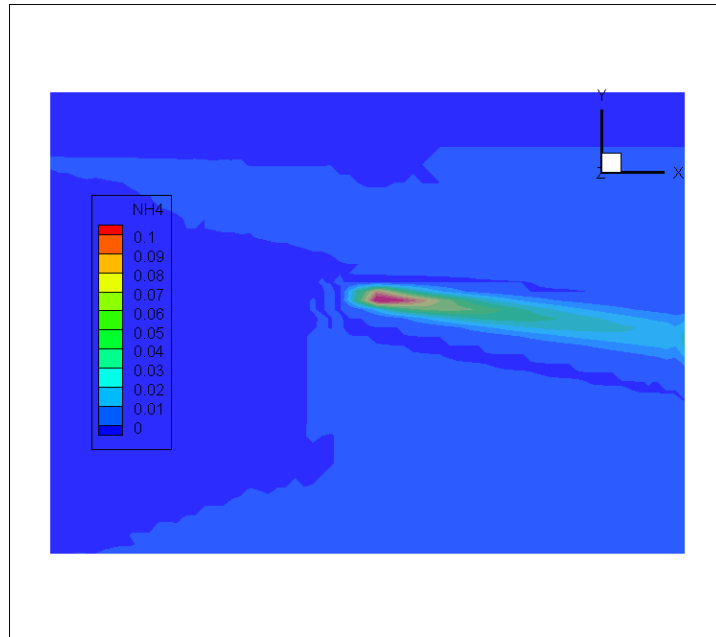
Changing Rate at Tokyo



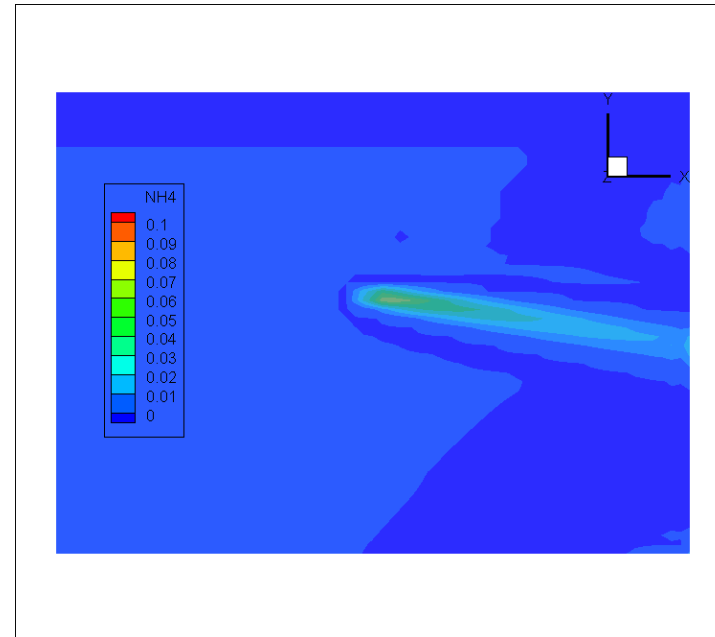
Changing Rate at Singapore

浮体直下において約10%の増加が見られた。また、海流の速度方向にその影響が及んでいることがわかった。PO<sub>4</sub>、SiO<sub>2</sub>に関しても同様の変化が見られた。増加率はTokyoの方がやや大きくなっている。温度が高い方が付着生物の分解量も多いが、ここではSingaporeの栄養塩濃度の方が元々大きかったため、増加率としてはTokyoの方が大きくなったと考えられる。

# 計算結果・考察—溶存酸素濃度



Changing Rate at Tokyo



Changing Rate at Singapore

浮体直下において約10%の増加が見られた。また、海流の速度方向にその影響が及んでいることがわかった。PO<sub>4</sub>、SiO<sub>2</sub>に関しても同様の変化が見られた。増加率はTokyoの方がやや大きくなっている。温度が高い方が付着生物の分解量も多いが、ここではSingaporeの栄養塩濃度の方が元々大きかったため、増加率としてはTokyoの方が大きくなったと考えられる。

- 背景と目的
- 計算モデル
- 計算条件
- 計算結果・考察
- **結言**

# 結言

- 既存の生態系モデルに浮体モデルを加えることで、浮体式構造物が設置された周辺での海洋環境の変化を計算することができた。
  - 水温が変化した場合での付着生物の量は、それに伴い変化する成長速度と死亡速度のバランスで決まり、本研究の条件では、東京とシンガポールの平均水温下で同程度の値になった。
  - 本研究での仮定の下では、浮体の直下ではプランクトンが数10%減り、栄養塩濃度が10%程度増えた。
- 
- 付着生物を実測し、計算結果と調整していくことで、より高精度なパラメータを推定することができると考えられる。
  - 本研究では水温や塩分濃度、日射量等を一定として計算したが、実測データを基にした時々刻々と変化する値として入れることで、より現実的かつ実用的な計算シミュレーションが可能になると考えられる。また、本研究では実測データとの比較を行わなかったが、計算結果と実測データとの比較を繰り返し行うことにより、各パラメータをより正確なものにしていくことができる。更に、本研究のように温度の条件を変えた計算を行うことで、温度依存性のあるパラメータ、温度に依らないパラメータの区別をつけることができると期待される。