

海洋温度差発電の放流水による 環境影響の予測

水質モデルの構築と数値シミュレーション

指導教員 多部田 茂 教授
環境システム学専攻 押味 良太

OTEC とは

- 海洋温度差発電(OTEC : Ocean Thermal Energy Conversion)
→ 表層水と深層水の温度差からエネルギーを取り出す発電方法
- 特徴 ①供給の安定性, ②スケールメリット, ③深層水複合利用
- 沖縄県久米島に、50 kW級のOTEC実証プラントが存在する
→ 新たに、1 MW級のOTECが建設される予定



環境影響

- 1 MW級OTEC新設の際に、環境アセスメントの一環でOTEC放流水のシミュレーションを行うことになっている
- OTEC放流水(表層水と深層水の混合)は、深層水の特徴を持つ
→ 表層に放流されると、水質の違いから環境を変化させる
- 特に懸念されているのはサンゴへの環境影響
例. サンゴはpH 7.90以下になると、石灰化(CaCO_3 の形成)速度が低下する
- 既存のOTEC放流シミュレーションのモデルでは「水温, NO_3 」しか扱っておらず、「pH」の変化に着目した研究は今までにない

	表層水(15m)	深層水(800m)	サンゴ閾値
水温	28.8 °C	5.4 °C	21.2 °C
NO_3	0.14 $\mu\text{mol/L}$	7.87 $\mu\text{mol/L}$	3.50 $\mu\text{mol/L}$
pH	8.11	7.62	7.90

研究の目的

1. pHの変化を再現する水質モデルの構築

- 既存の放流シミュレーションモデルを、pHまで考慮する形に改良する
- 熱帯・亜熱帯海域における、pH変化を再現するのに必要な自然現象を、新たに考慮に加える

2. 数値シミュレーションを用いた、放流水の環境影響の予測

モデル

物理-生態系結合モデル

- **物理モデル**：3次元流体モデル(MEC model)を使用した
 - 支配方程式 Navier-Stokes方程式、連続の式、移流拡散方程式など

濃度 C_i の計算式

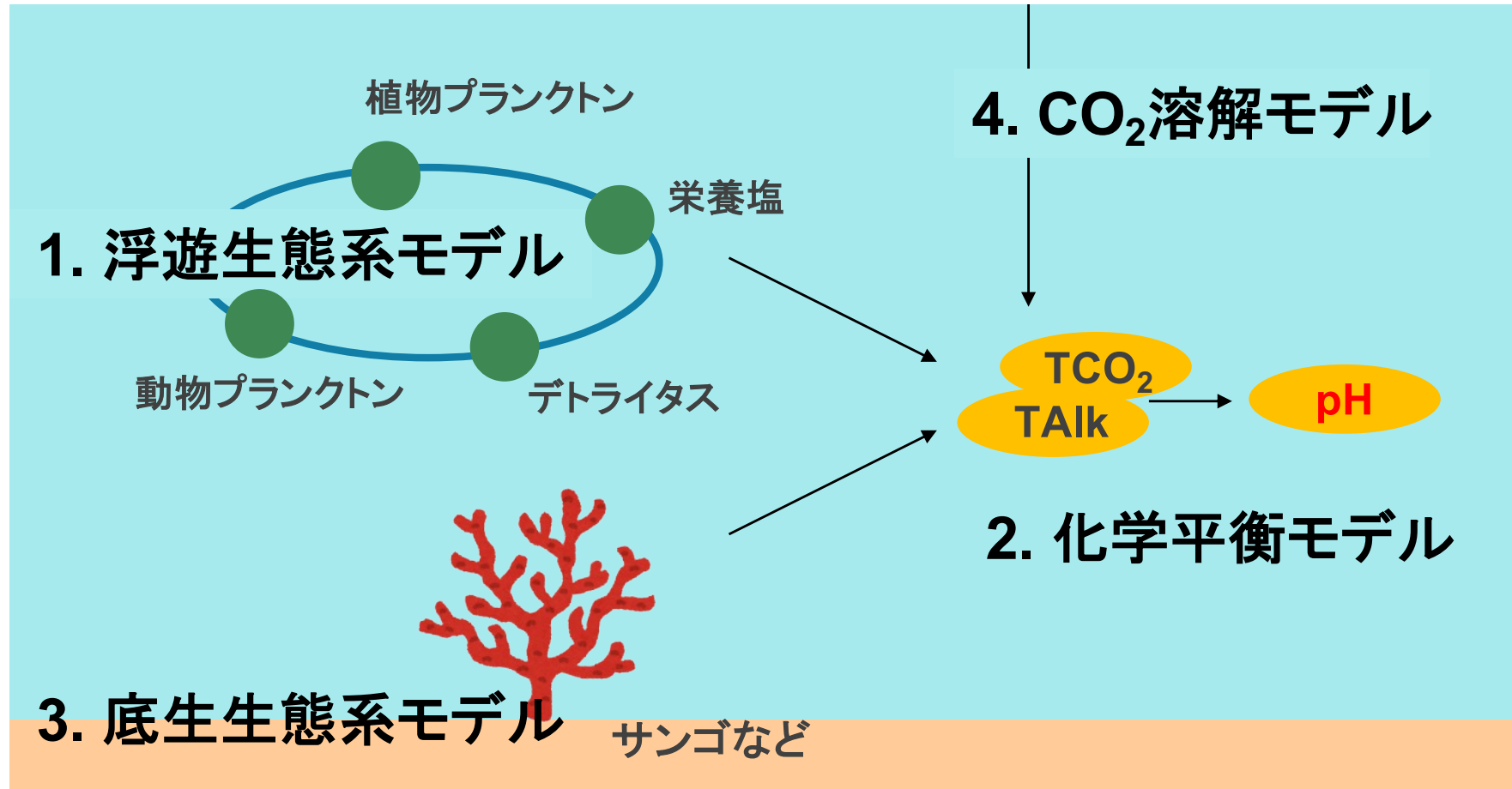
$$\frac{\partial C_i}{\partial t} + u \frac{\partial C_i}{\partial x} + v \frac{\partial C_i}{\partial y} + w \frac{\partial C_i}{\partial z} = A_c \left(\frac{\partial^2 C_i}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 C_i}{\partial y^2} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_c \frac{\partial C_i}{\partial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

移流拡散による濃度変化

生物化学的な濃度変化

- **生態系モデル**：本研究で、pHを計算する形に拡張した
 - 浮遊生態系モデル (Yamanaka et al. 2004)
 - 底生生態系モデル (Kleypas et al. 2014 など)
 - 化学平衡モデル (CO2SYS)
 - CO₂溶解モデル (Xiong et al. 2014など)

生態系モデル構築の流れ



- 既研究の構築した生態系モデルが考慮する要素範囲を考慮
TCO₂ : 全炭酸(=DIC: Dissolved Inorganic Carbon)
TAlk : 全アルカリ度

浮遊生態系モデル → pH

- 浮遊生態系モデル: 栄養塩やプランクトンの動態を計算するモデル
- pHは一度 TCO_2 とTAlkとして表し、化学平衡モデルでpHに変換する

$$\frac{d TCO_2}{dt} = \left(\left(\frac{d NO_3}{dt} \right)_{bio} + \left(\frac{d NH_4}{dt} \right)_{bio} \right) * R_{CN} + \left(\frac{d Ca}{dt} \right)_{bio}$$

$$\frac{d TAlk}{dt} = 2 \left(\frac{d Ca}{dt} \right)_{bio} - \left(\frac{d NO_3}{dt} \right)_{bio} + \left(\frac{d NH_4}{dt} \right)_{bio}$$

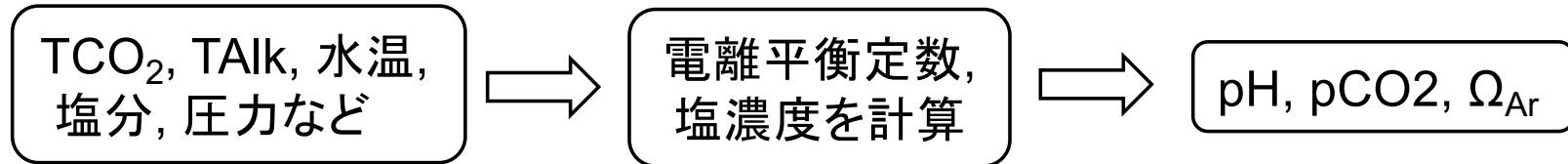
- NO_3 , NH_4 の変化量は、有機物の合成・分解(光合成、呼吸、有機物の無機化など)に関わる変化量を表す
- Caの変化量は、 $CaCO_3$ の合成・分解に関わる変化量を表す



- このうち、pH変化への寄与度が大きいのは、有機物の合成・分解

新たに加えたモデル

- 化学平衡モデル: TCO_2 , TAlk から、 pH , pCO_2 を計算



- 底生生態系モデル: サンゴ・大型藻類の光合成・呼吸・石灰化を計算

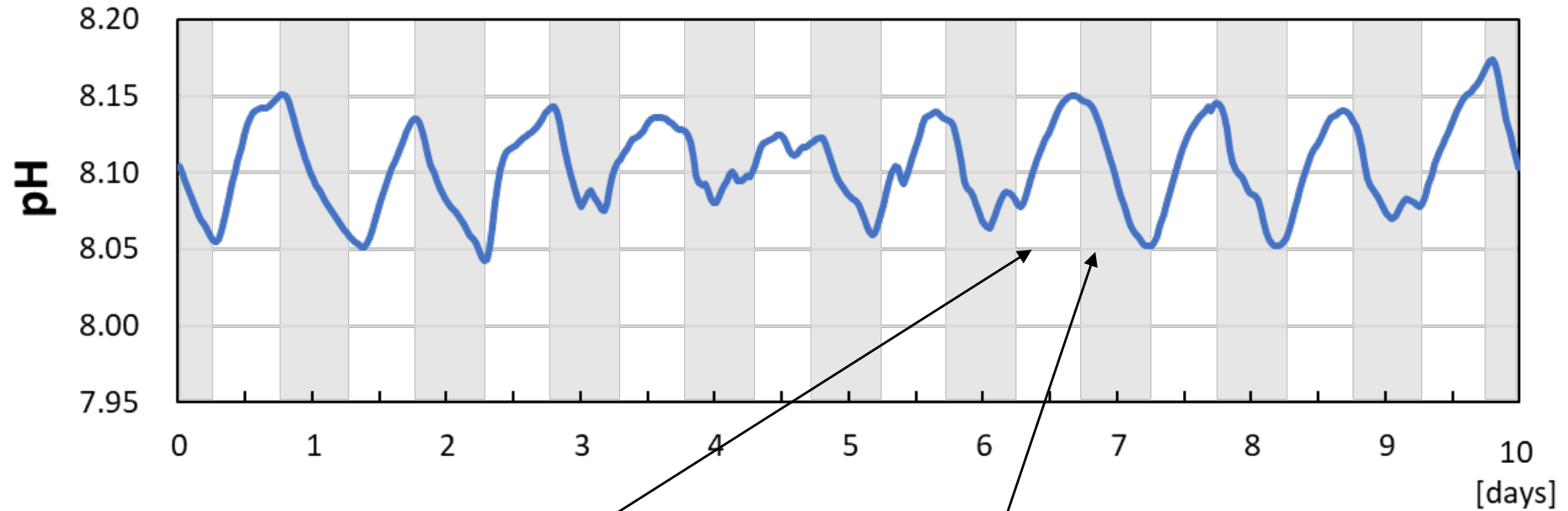
$$\text{有機物生成速度} \quad p_n = p_{max} \left(1 - \exp\left(-\frac{E}{E_k}\right) \right) - r_{night}$$

$$\text{無機物生成速度} \quad g_n = g_{max} \left(1 - \exp\left(-\frac{E}{E_k}\right) \right) + g_{night} \quad \begin{aligned} g_{max} &= k_{max}(\Omega_{Ar} - 1)^n, \\ g_{night} &= k_{night}(\Omega_{Ar} - 1)^n \end{aligned}$$

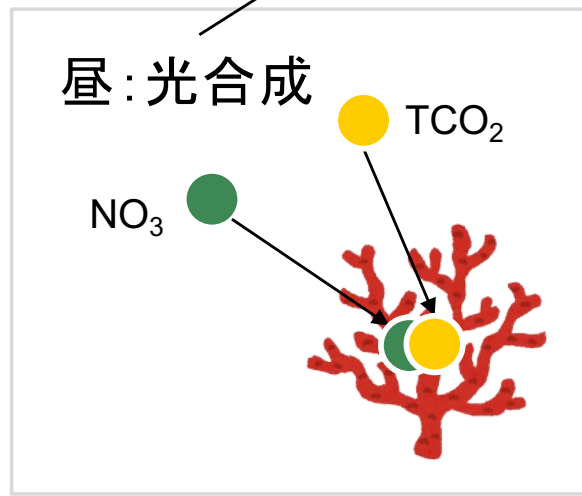
- CO_2 溶解モデル: pCO_2 , 風速から大気-海洋間のフラックスを計算

$$\text{大気-海洋間のフラックス} \quad F = \kappa \cdot (\text{pCO}_{2\text{ sea}} - \text{pCO}_{2\text{ air}})$$

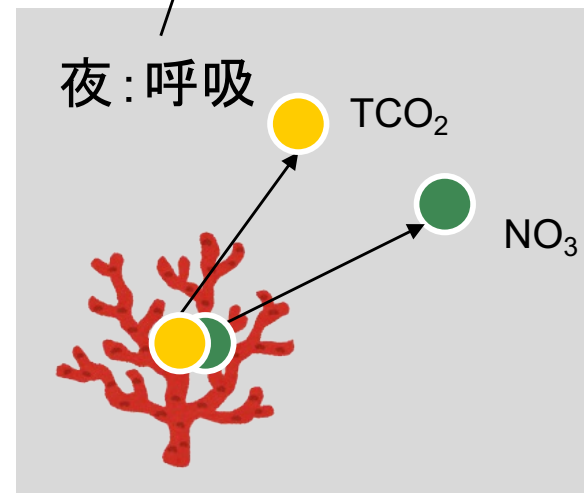
pHの日変化



- 計算結果 - 底生生態系モデル

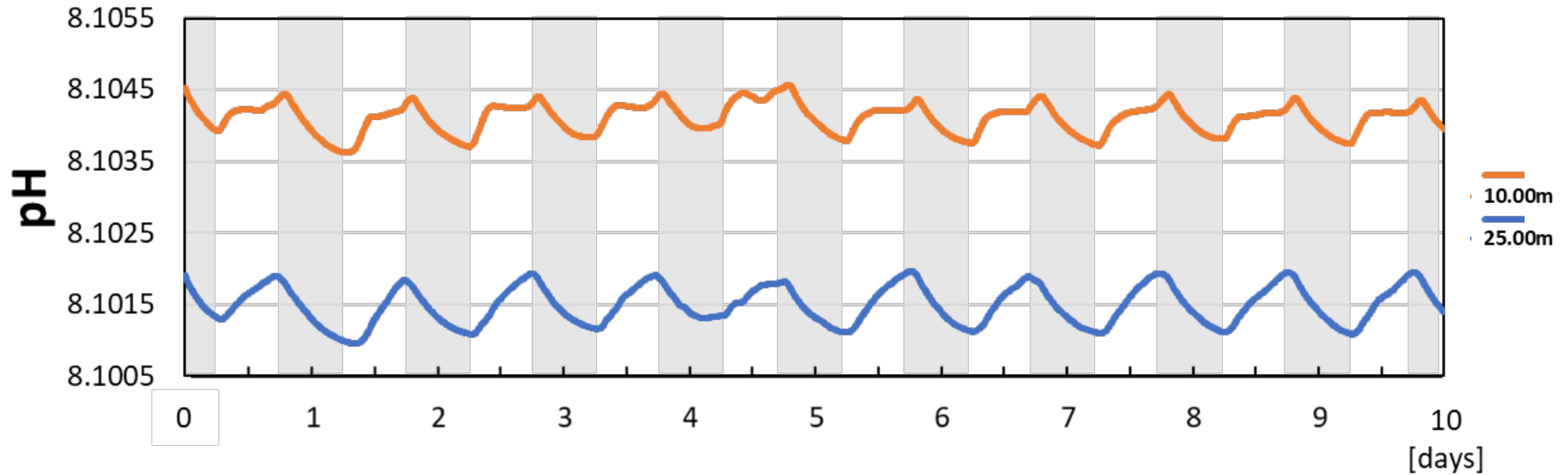


→ CO₂減少 → pH増加



→ CO₂増加 → pH減少

pHと光合成速度



- 計算結果 – 浮遊生態系モデル
- 浮遊: 植物プランクトンの光合成速度 p_n

$$p_n = V_{max} \cdot \left\{ \frac{[NO_3]}{[NO_3] + K} \cdot \exp(-\psi[NH_4]) + \frac{[NH_4]}{[NH_4] + K} \right\} \cdot \exp(K \cdot T) \cdot \frac{I(z)}{I_{opt}} \exp\left(1 - \frac{I(z)}{I_{opt}}\right)$$

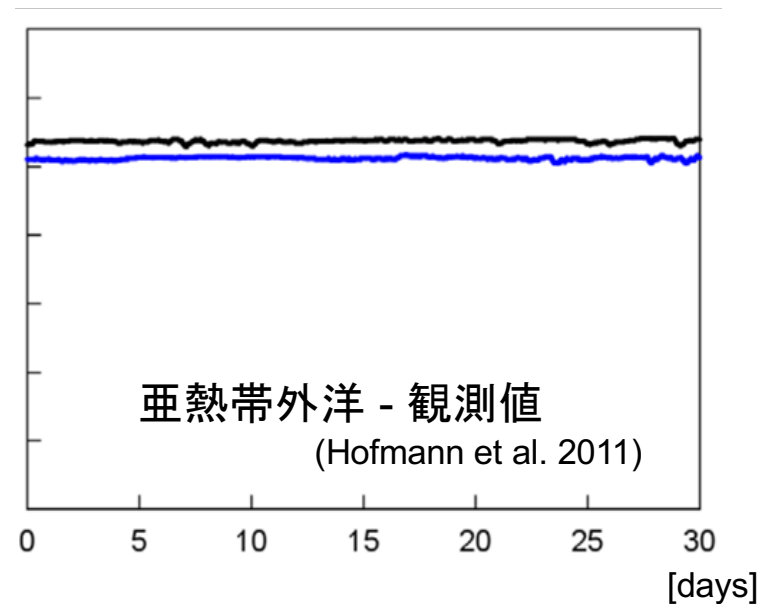
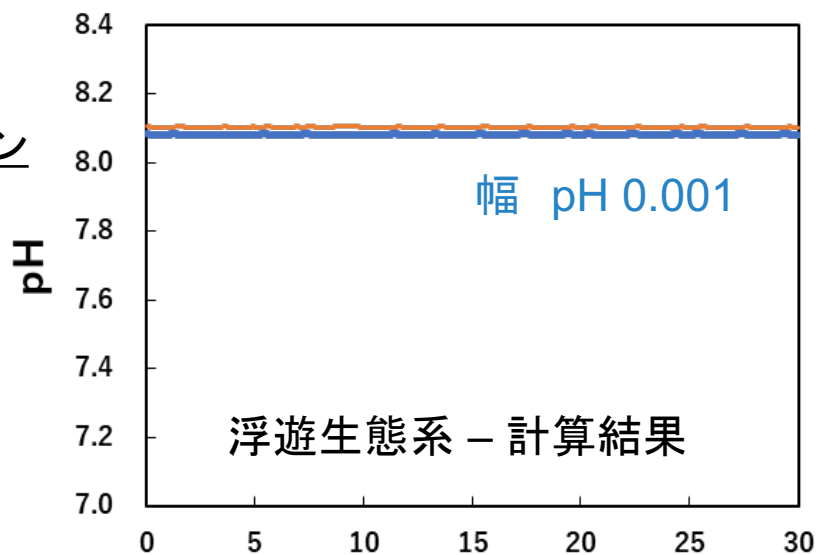
- 底生: サングの光合成速度 p_n

$$p_n = V_{max} \cdot \left(1 - \exp\left(\frac{E}{E_k}\right)\right)$$

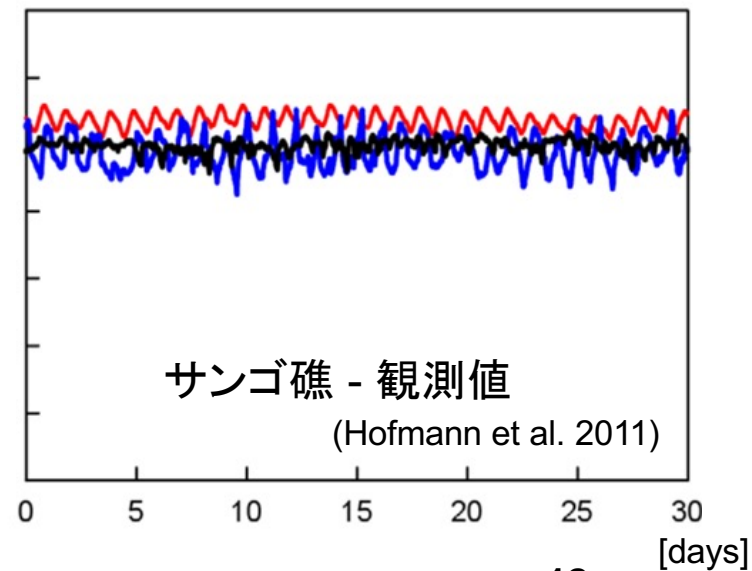
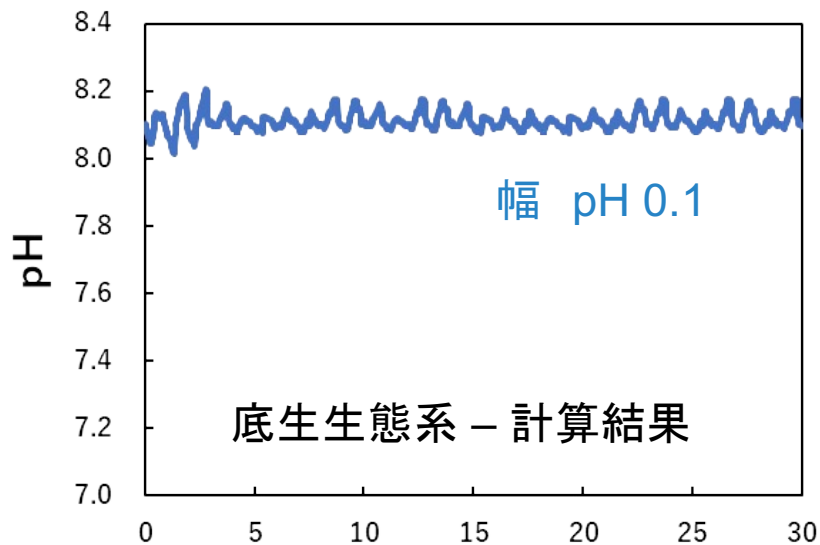
- 異なる式で同様のpHの日変化が計算された

観測値との比較

亜熱帯域の
植物プランクトン
(円石藻類)



サンゴ



研究の目的

1. pHの変化を再現する水質モデルの構築

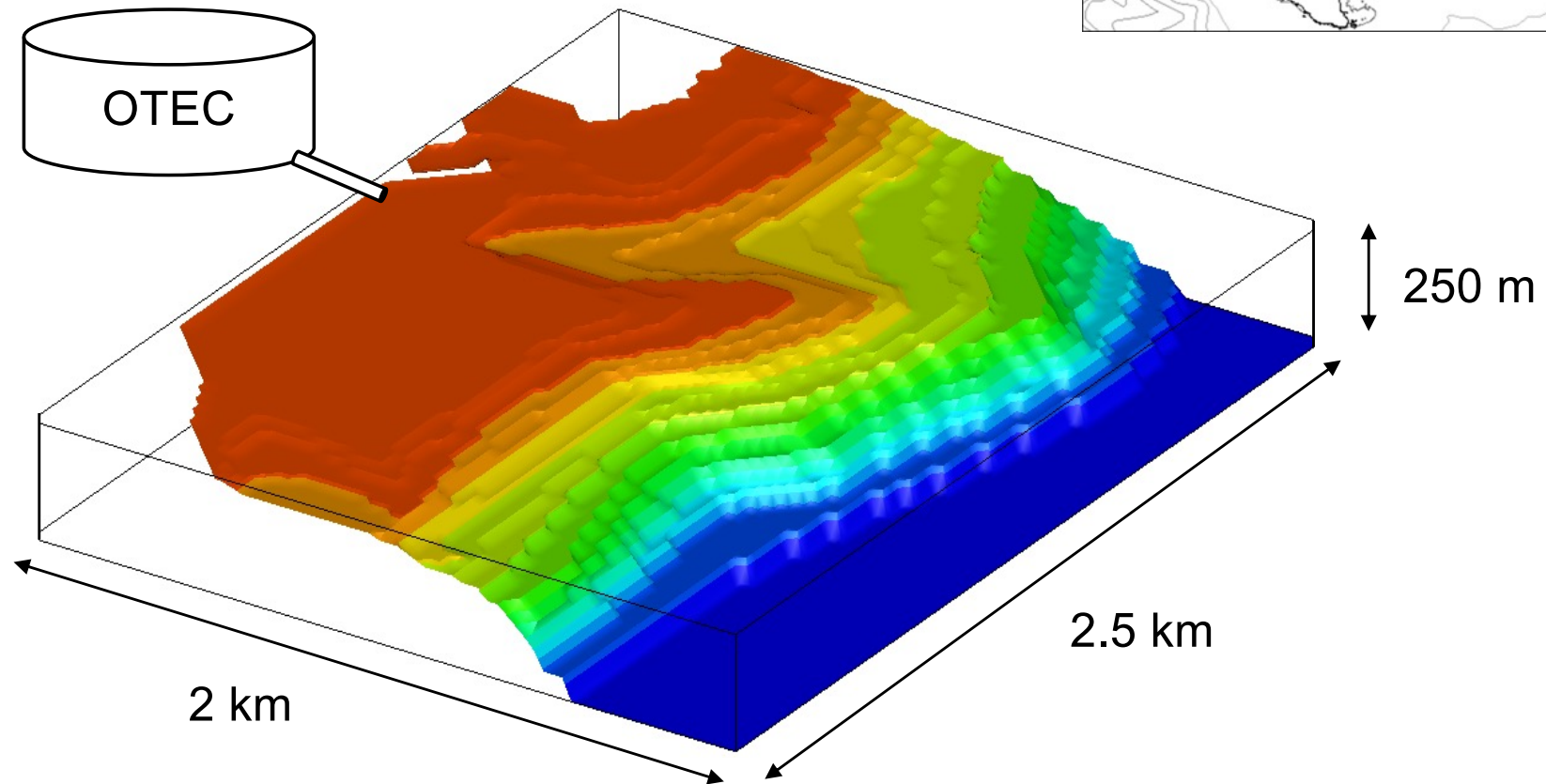
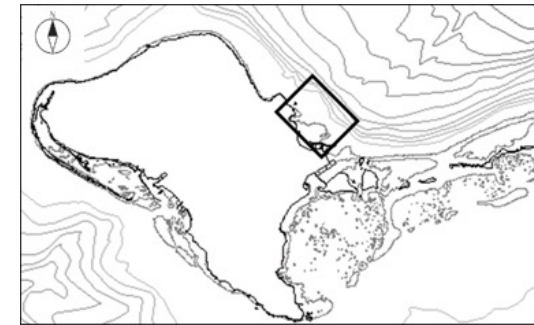
2. **数値シミュレーション**を用いた、**OTEC放流水による環境影響の予測**

- 本研究で構築した水質モデルを用いて、1MW級OTECの放流水による環境変化を調べ、サンゴへの影響を考察する
- 放水位置・複合利用の有/無を変えて、環境負荷の比較を行う

計算条件

地形

- 対象海域: 久米島北東部 2 km x 2.5 km
- 水平方向: 25 m メッシュ (80 x 100)
- 鉛直方向: 20層 最大水深 250 m

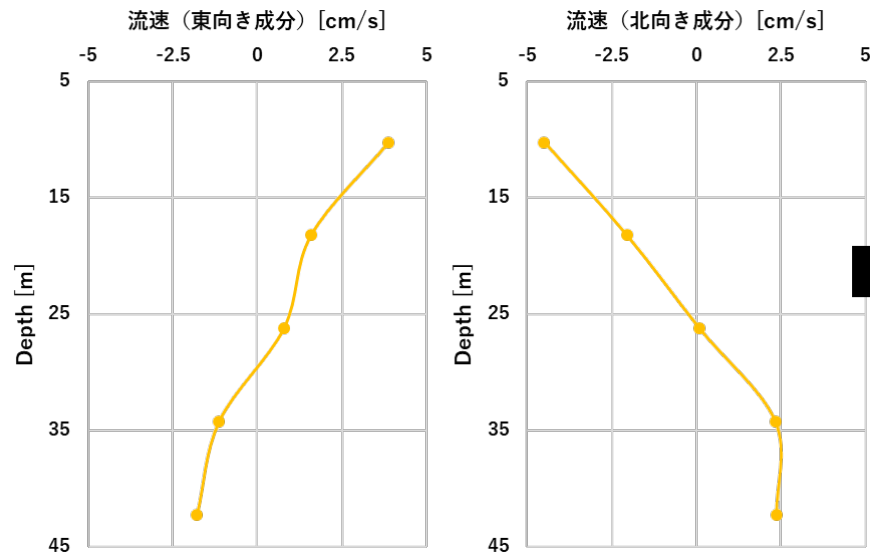


- 本研究では、対象海域で水質・流れ・サンゴ被度の観測を行い、計算条件の設定

流れ

観測結果

- ADCP(超音波流速計)を用いて、流速の鉛直分布を観測した

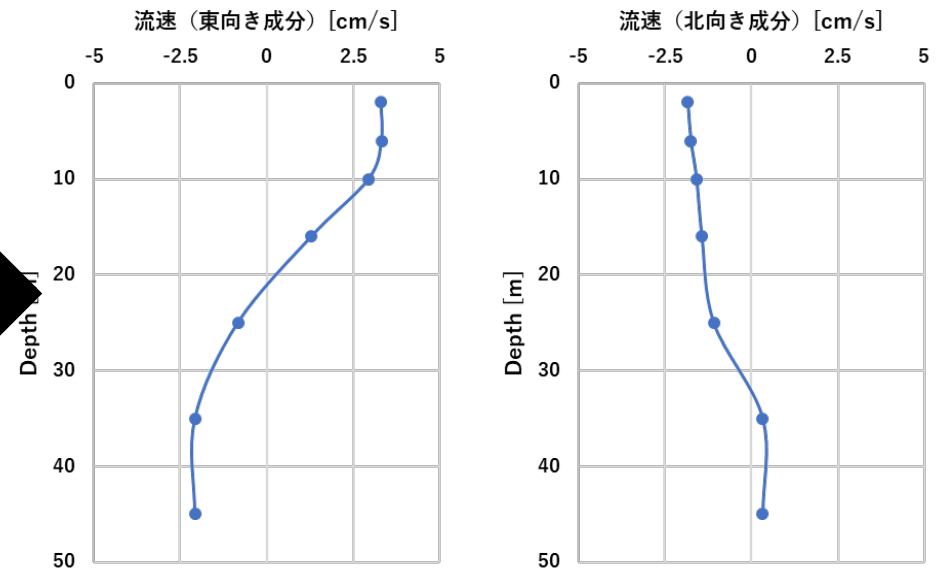


観測結果の特徴

- 流速 5.0 cm/s 程度
- 上層下層で流速が逆向き

計算条件

- 流速の計算結果が観測結果に合うよう、潮汐の振幅を調節した

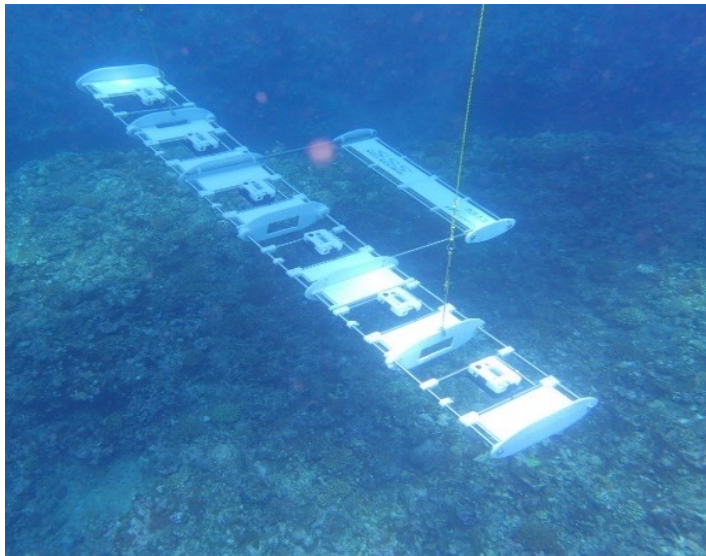


- 対象海域が急峻な地形であるため、計算の安定性を確保するため、計算領域の外側に粘性係数を変えたダミーグリッドを設定した

サンゴ被度

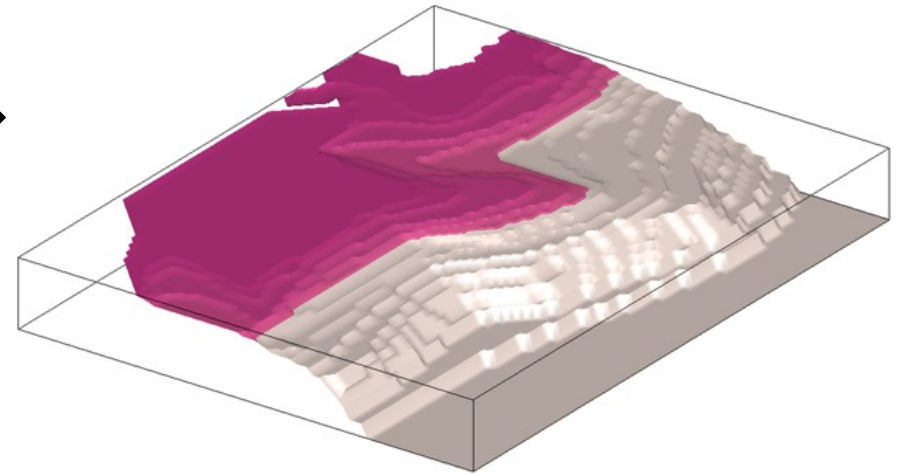
観測結果

- 海底写真を撮る観測機器、SSS (Speedy Sea Scanner) を用いて観測を行った
- 解析は途中段階



計算条件

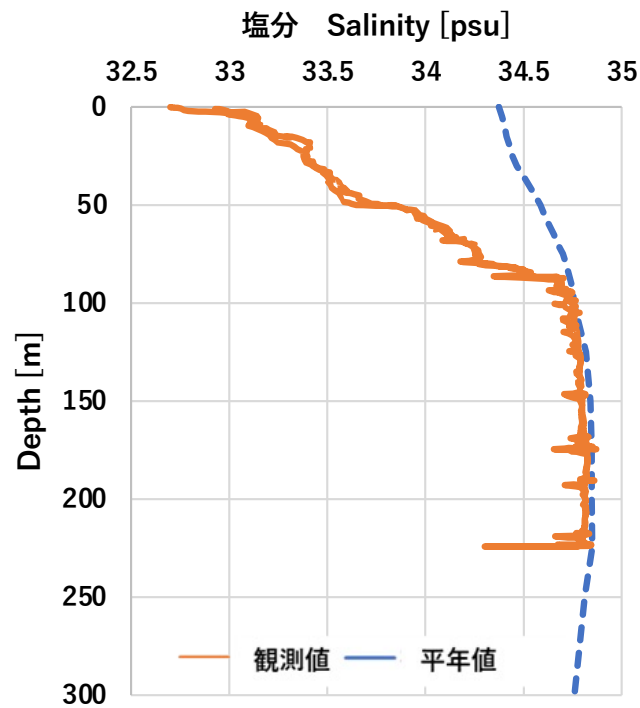
- 大まかに以下のように設定した
 - ✓ 水深 4 ~ 40 m に生息
 - ✓ 被度は 60 %



水質

観測結果

- CTDやpH計による観測と、採水した海水の吸光光度計による分析を行った
- 期間中、50年に一度の大雨(1時間90mm)が降り、雨水の影響の観測結果



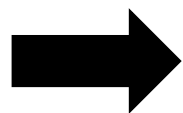
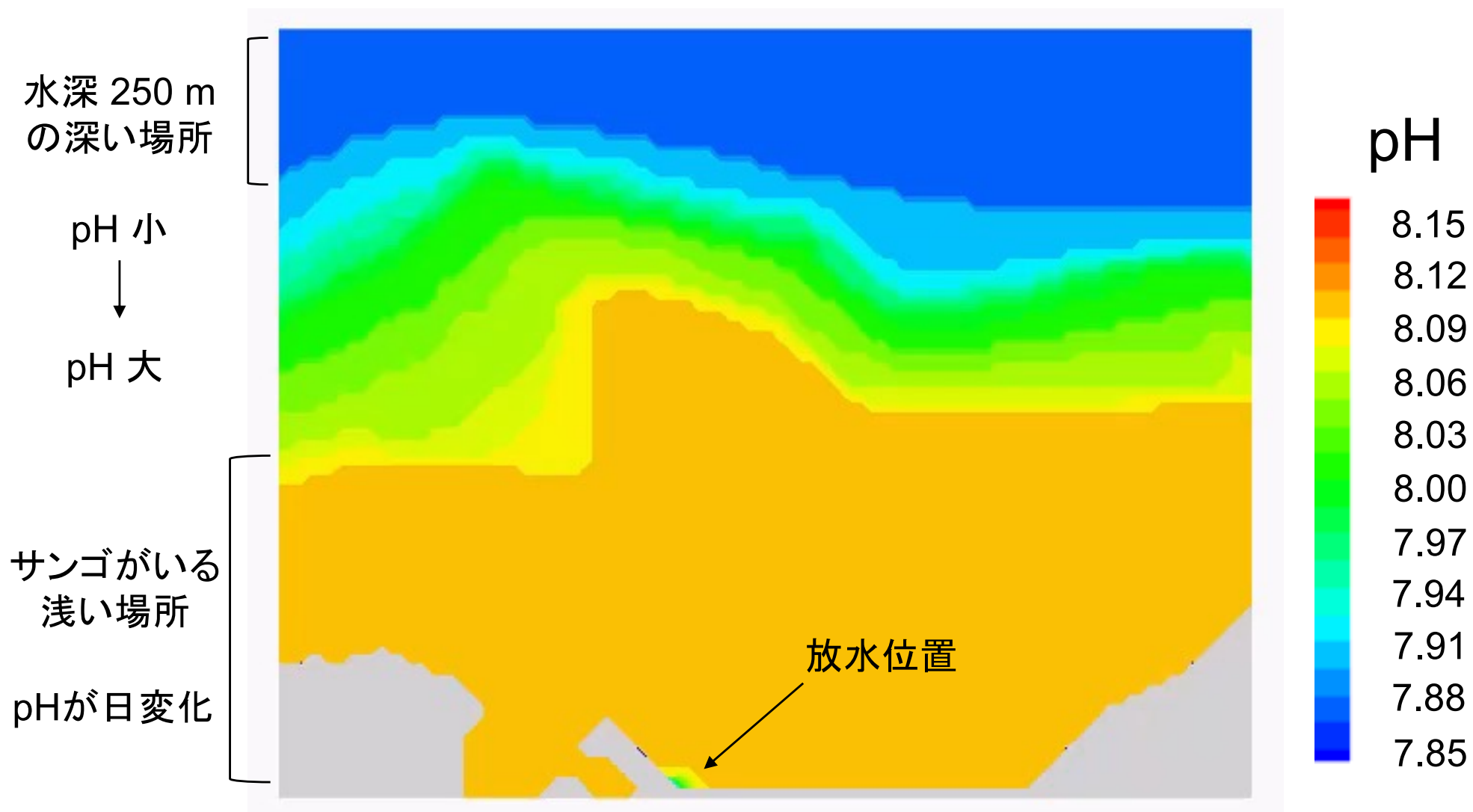
計算条件

- 観測値は計算に使用できなかった
- 文献・データサイトから、熱帯・亜熱帯域の水質を推定し、使用した

- 例. 塩分の鉛直分布(100mまで影響)

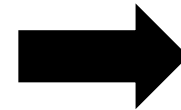
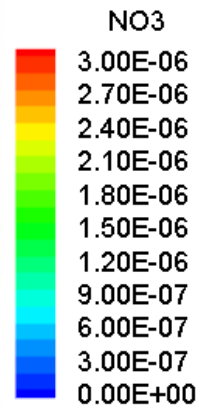
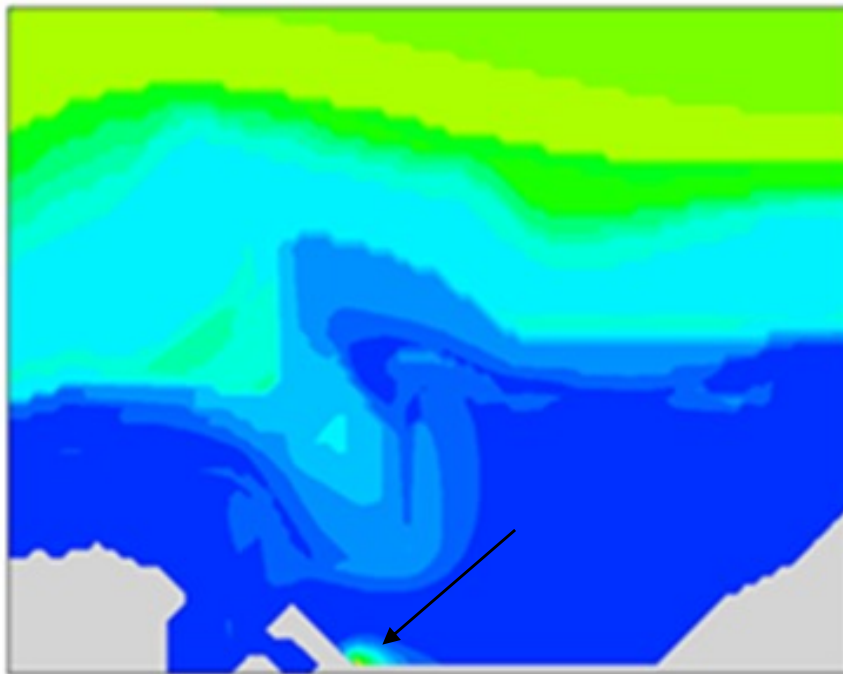
結果

海底面のpH分布



サンゴの閾値 7.9 影響ほとんどない

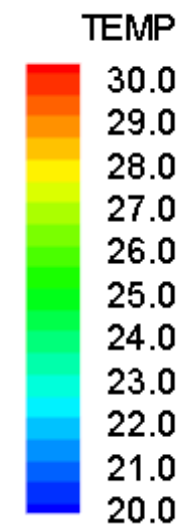
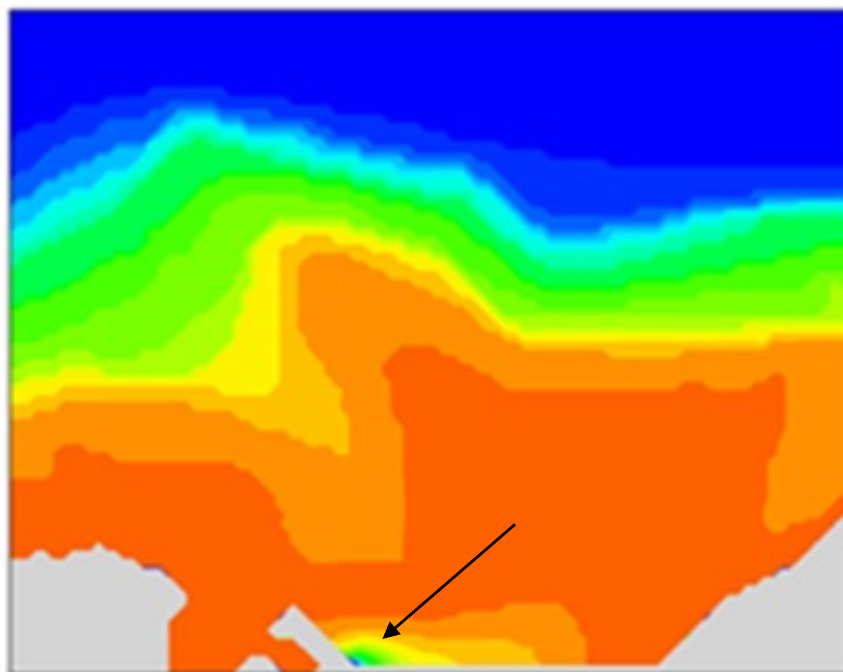
NO₃



影響ほとんどない

サンゴの閾値 3.5 μ mol/L

水温



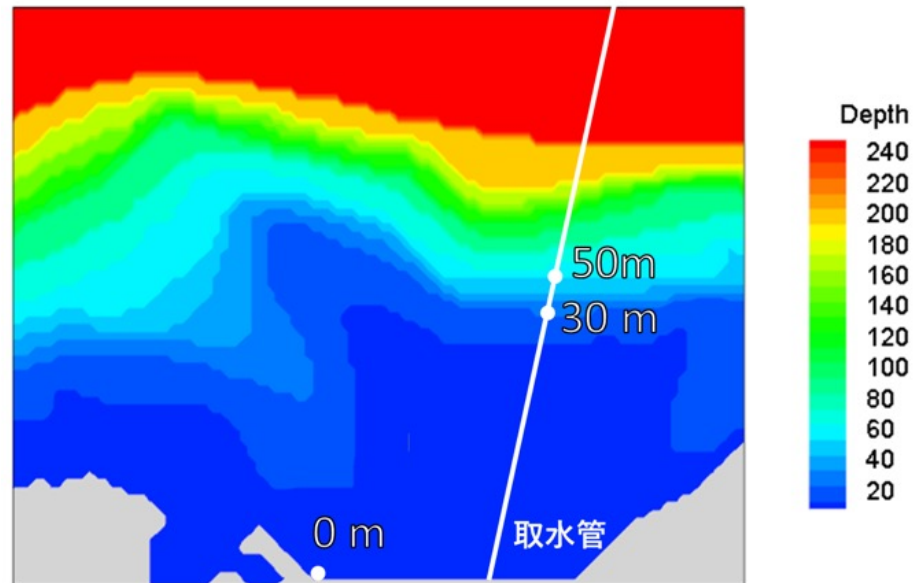
放水位置のグリッドで
注意が必要

サンゴの閾値 21.2 $^{\circ}$ C

放水位置・複合利用の有/無

背景 放水位置・複合利用

- 計画中の1 MW級OTECは、「放水位置」がまだ決まっていない
→ 放水位置 3地点 (0 m, 30 m, 50 m) で、環境影響を比較した

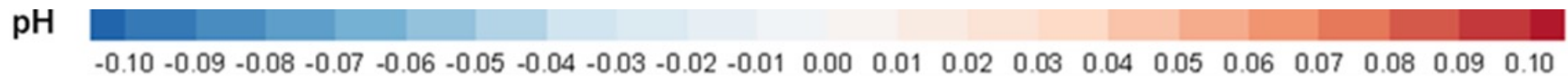
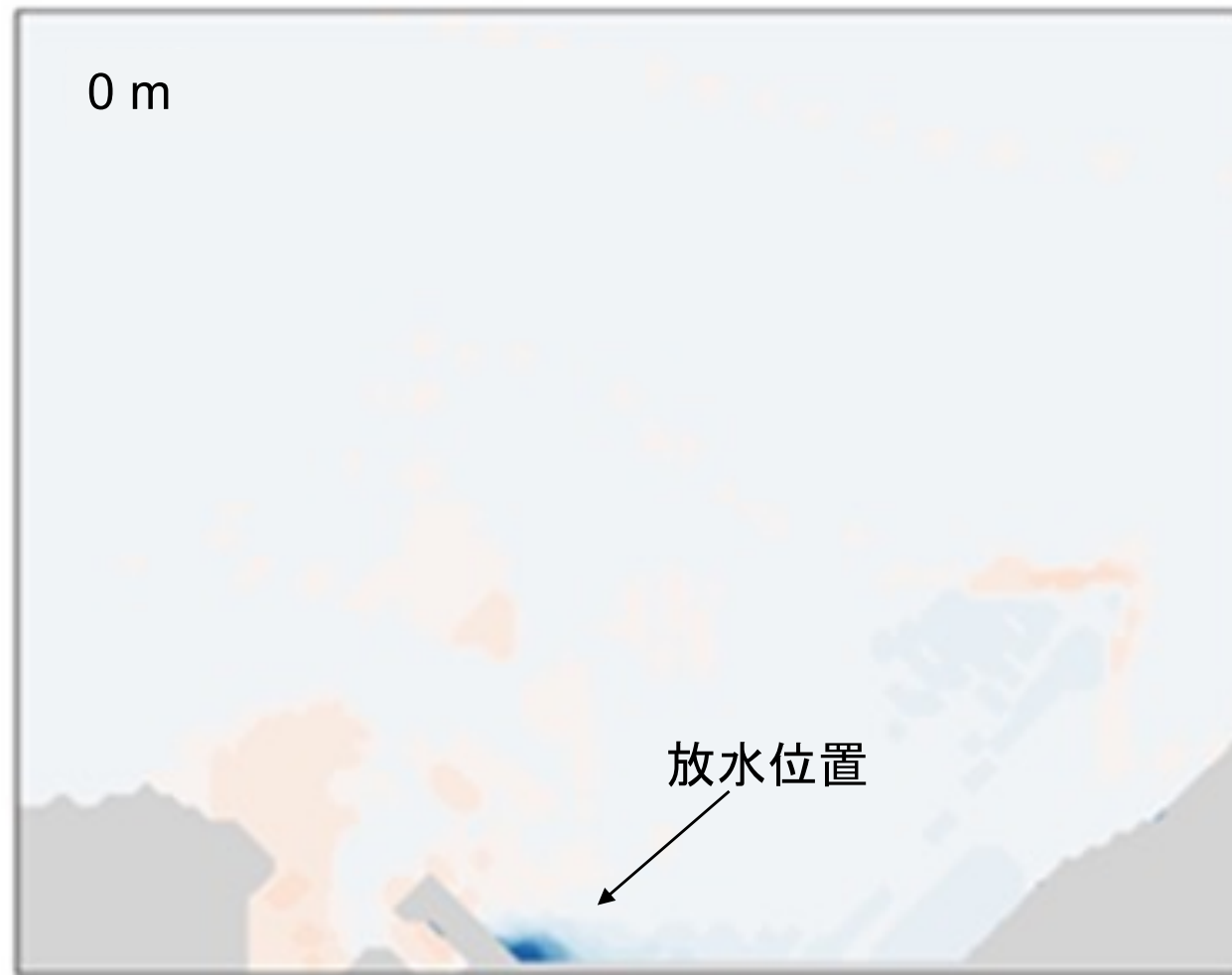


- 深層水の「複合利用」には、環境負荷の低減効果がある
→ 複合利用する場合としない場合を比較し、その程度を調べ
 - 建物の冷空調に深層水の冷熱を利用 → 水温上昇
 - 藻類の養殖(アオサなど)に栄養塩を利用 → NO_3 , TCO_2 減少

結果

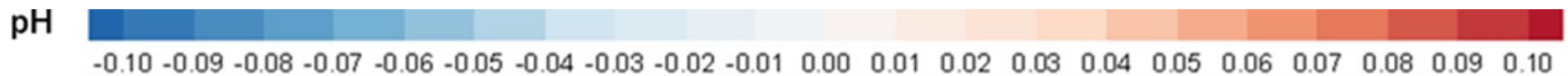
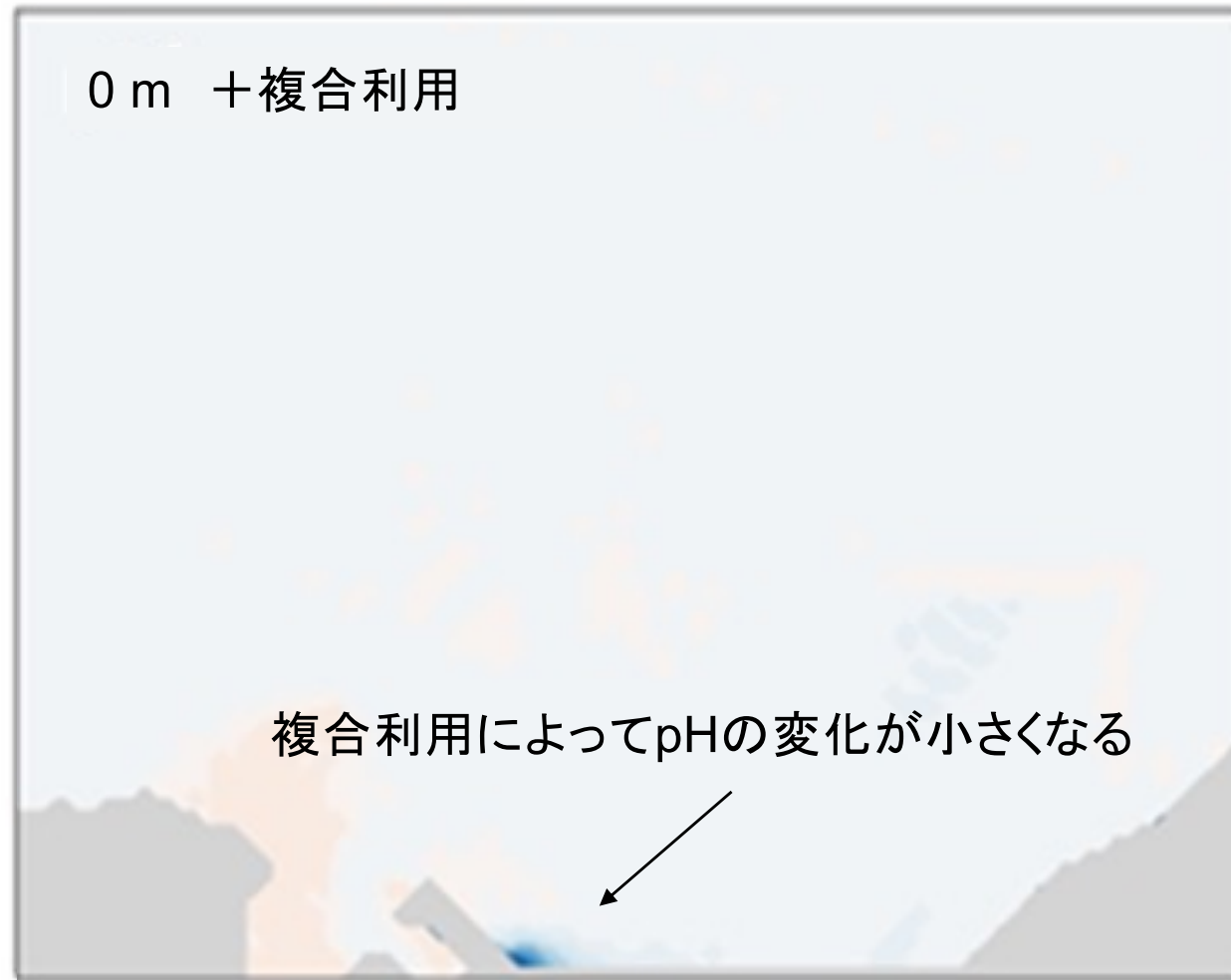
海底面のpHの変化量

- 「放流水による 海底面のpHの変化量」 = 放流水あり - 放流水なし



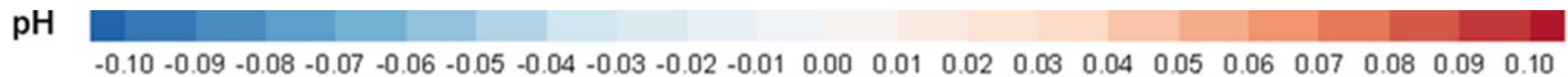
pH 複合利用の効果

- 同じ放水位置でも、複合利用をすることで、pHの変化が小さくなった

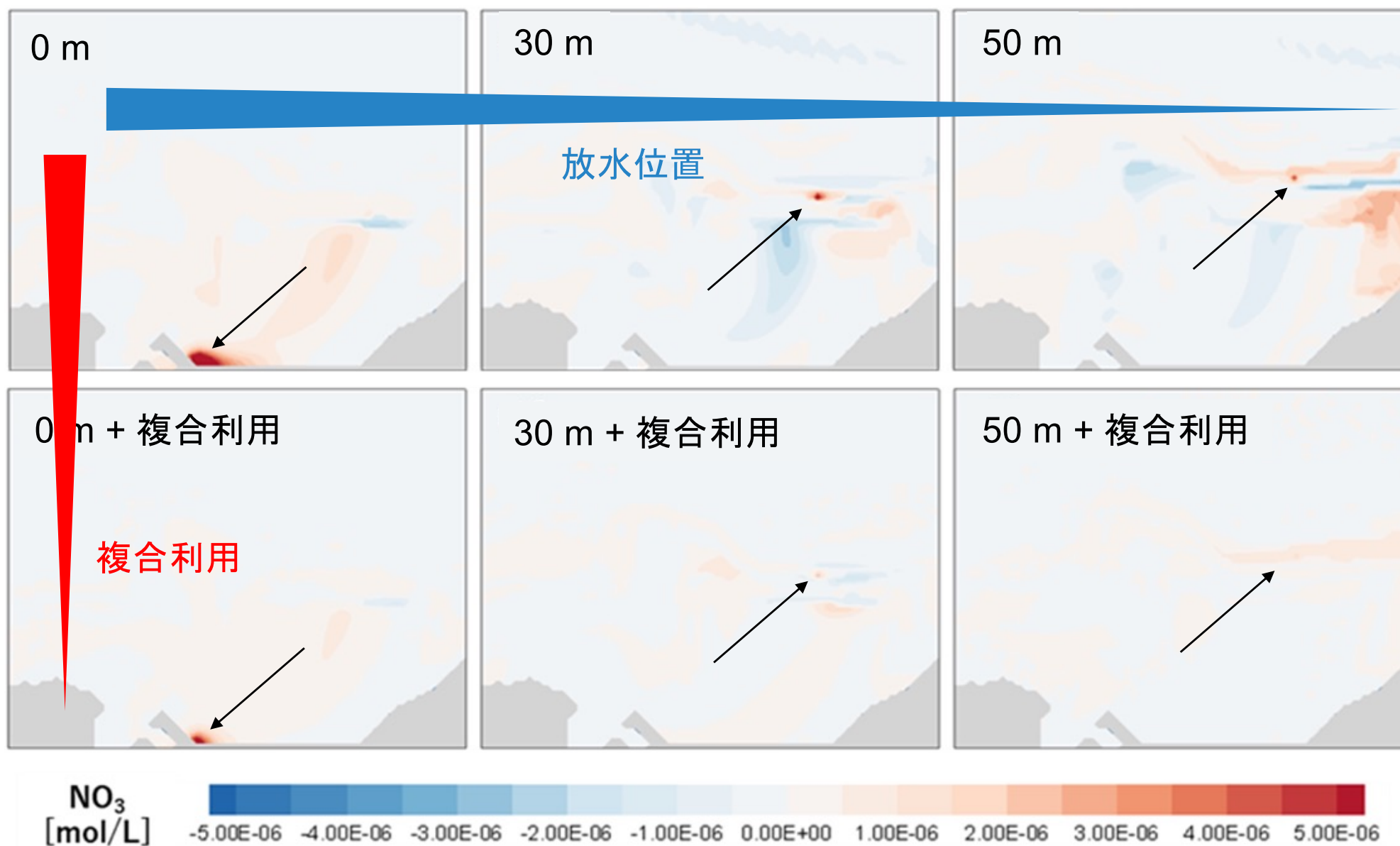


pH 放水深度による違い

- 放水深度を下げることで、さらに環境影響が小さくなる



NO₃ 放水位置3地点 x 複合利用の有/無



結言

1. モデル開発

- 本研究では、化学平衡モデル、底生生態系モデル、CO₂溶解モデルを実装し、亜熱帯海域のpHの日変化を再現することに成功した
- 現地の環境を再現するという点において、課題がある
 - 初期値や境界条件を推定値で与えている
 - パラメーターのチューニングをほとんど行っていない
- 今後は、観測を行って、モデルの精度を上げていく必要がある

2. 放流シミュレーション

1MW級OTEC

- pH, NO₃, 水温のどの項目に関しても、サンゴに深刻な影響が出るほどの環境変化は起こらない

放水位置・複合利用の有/無

- 放水位置が深い場所ほど、環境負荷が小さくなる
- 深層水の複合利用は、環境負荷の低減に有効である