

海洋深層水を用いた藻場造成法の研究

A Study on the Development Seaweed Bed
Using Deep Ocean Water

東京大学工学部システム創成学科
環境・エネルギーシステムコース
多部田研究室B4

有井祐人

発表の流れ

- 背景・目的
- 現地調査
- シミュレーション
- 結論・課題

藻場の機能・役割

- 物質循環機能

- **一次生産**（太陽光エネルギーから有機物を作り出す）
- **分解・物質循環**（枯死後の海底への有機物供給、魚類の餌）

- 生物共存機能

- **生物多様性維持**（多種多様な水生生物の生息場、採餌場、隠れ場）
- **幼稚魚育成**（幼稚魚の隠れ家としての保護機能）
- **餌料供給**（珪藻類はエビやアミ類など小動物の、小動物は幼稚魚の餌）
- **産卵場形成**（付着卵を産む魚類・イカ類の産卵基質）

- 環境保全機能

- **水質浄化**（富栄養化原因のリンや窒素の吸収・除去、葉部による流動抑制、懸濁物質の沈降）
- **底質安定化**（波力の減衰、地下茎による底質安定化、漂砂の抑制による砂浜や干潟の縮小を抑制）
- **環境形成・維持**（光合成による海水溶存炭酸ガスの吸収と酸素供給）

磯焼け



<http://minamata2008.at.webry.info/theme/1065519931.html>



<http://www.fishexp.hro.or.jp/exp/central/zousyoku/zousyoku/Isoyake.htm>

藻場の減少
→海洋環境の汚
染
→水産資源の減
少
→水産業の停滞

(磯焼けの原因)

- ・埋め立て等による生育場の消失
- ・海水の透明度低下による光合成不足
- ・温暖化による海水温度の上昇
- ・農薬などの化学有害物質による水質汚染
- ・摂食動物増加による生態バランスの変化

海洋深層水の特徴

低水温性

- 表層水が接する外界の気象などの影響を受けないため温度が低く一定
- 水質も変化がなく安定

富栄養性

- 光合成に必要な窒素やリン、ケイ素、硝酸などの栄養塩が消費されず高濃度で残っている



沖縄県海洋深層水研究所
日本最大の深層水取水施設
→農業分野・水産分野で多くの研究実績
→藻場造成でも利用

清浄性

- 工場・農業・生活排水の影響を受けないため、化学物質による汚染が少ない
- 太陽光の影響を受けないため、プランクトン等が生育せず、有害な雑菌なども格段に少ない

深層水の放水量・放水方法

海洋環境改善(CODの低減、低水温・高栄養塩濃度の維持、藻場再生など)に必要な量

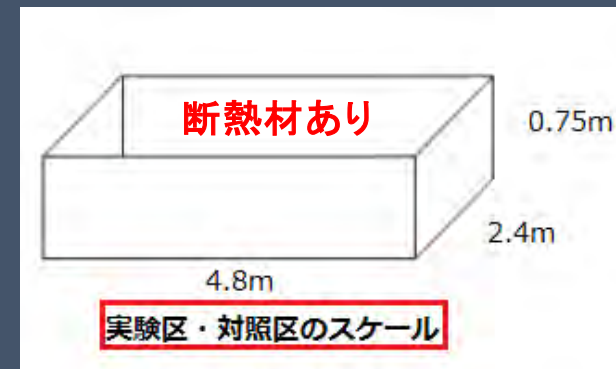
- ・ **1,000,000t/day** (大塚ら,2010, 高知県室戸岬におけるシミュレーション)
- ・ **200,000t/day** (増山ら,2003, 静岡県清水港折戸湾におけるシミュレーション)
- ・ **3,000~4,000t/day** (瀬川ら,2006, 北海道西岸域におけるシミュレーション)
- ・ **144t/day** (松井敦,2012, 高知県室戸岬におけるシミュレーション)

大量に放流しなければ深層水は容易に拡散してしまう

→コスト面や対象域周辺の海洋環境の変化、生物多様性の喪失などの懸念

→**深層水の多段階利用・内湾などの小規模放水・海底構造物などによる滞留**の提案

久米島真謝漁港では対象区域の港の海底に**箱型の構造物**を設置して放水($60\text{m}^3/\text{day}$)
(※実海域への深層水放流実験は今回が初めての試み)



本研究の目的

- 実海域において深層水の放水実験を行い、効率的な滞留方法や藻場造成の効果について確認する
→特に、水温と栄養塩濃度の変化に着目
- 構造物内に海藻(ワカメ・カジメ)を設置し、深層水の影響による実海域での生長を観察する
- 港内に放水した深層水の挙動のシミュレーションを行い、流れや滞留構造物の影響を考察する

発表の流れ

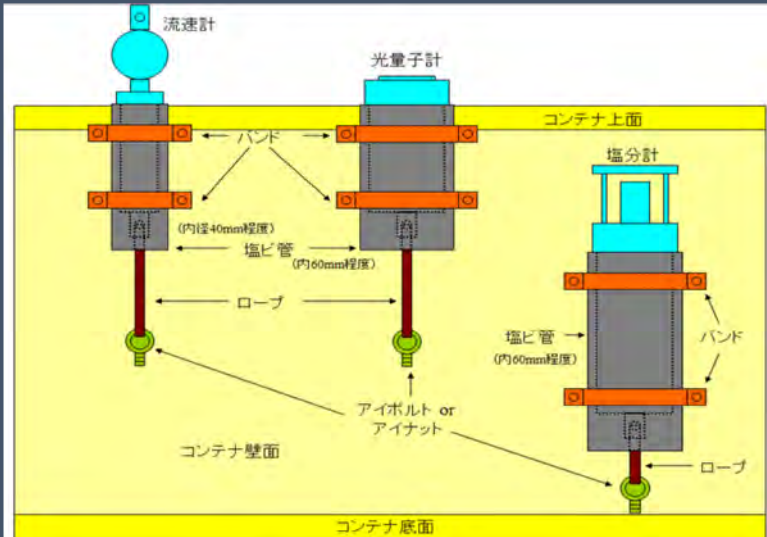
- 背景・目的
- 現地調査
- シミュレーション
- 結論・課題

実験対象海域(沖縄県久米島町真謝漁港)

久米島全体図



調査について

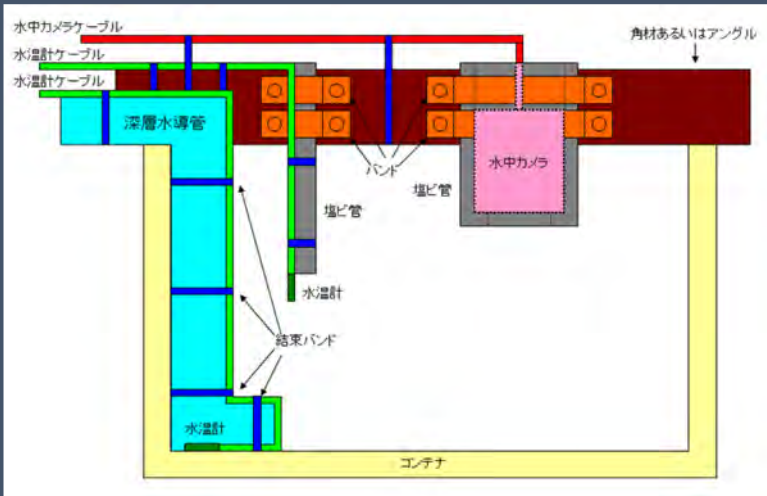


期間：2014/12/11～

第1回調査(実験開始前)と第2回調査(実験開始35日後)

調査：CTDによる水温・塩分濃度計測と、採水による栄養塩濃度分析

実験期間中：実験区に設置した流速計・塩分計・水温計・水中カメラで実験区内部の水温・塩分濃度・流速の継続的な計測と、海藻の生長の観察

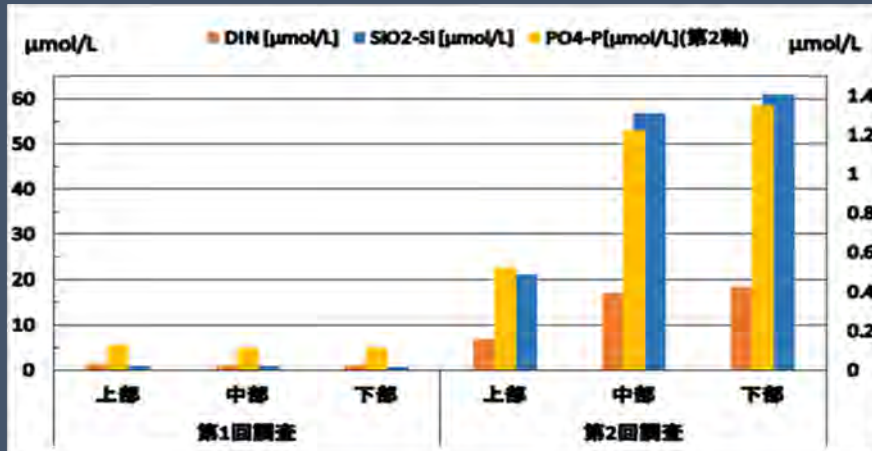


流速：実験区コンテナ直上

水温：①コンテナ底面(下層)
：②コンテナ中層(中層)
：③コンテナ上層(上層)

栄養塩濃度(サンプリング)：コンテナ底面・コンテナ中層・コンテナ上層

実験区内部の様子



(栄養塩濃度変化)

(栄養塩濃度)

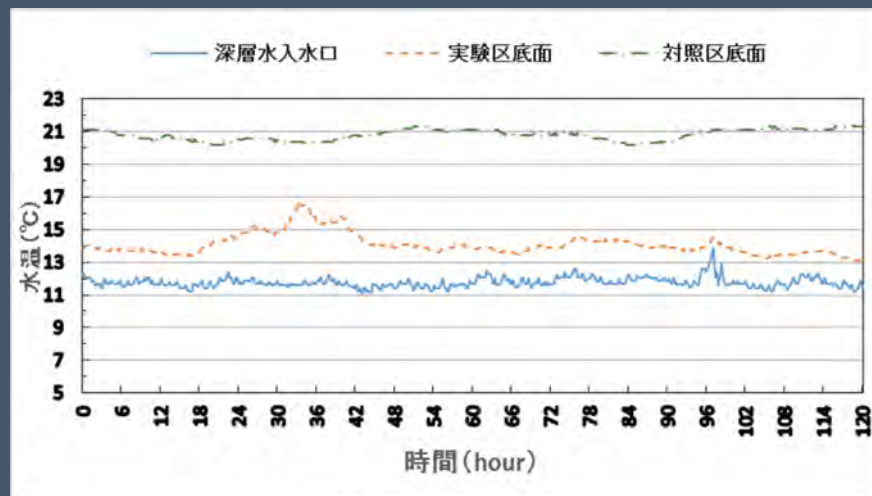
実験区内部では栄養塩濃度は非常に高濃度で維持されている

DIN(無機態溶存窒素)濃度

上層: 1.3 μmol/L → 6.8 μmol/L

中層: 1.2 μmol/L → 17.1 μmol/L

下層: 1.1 μmol/L → 18.5 μmol/L



(水温変化)

(水温)

上下変動は見られるものの、下層・中層では安定して低水温

→ 滞留構造物の有用性

流れの水温に与える影響



流速・風速と水温変化(上層・下層)のグラフ

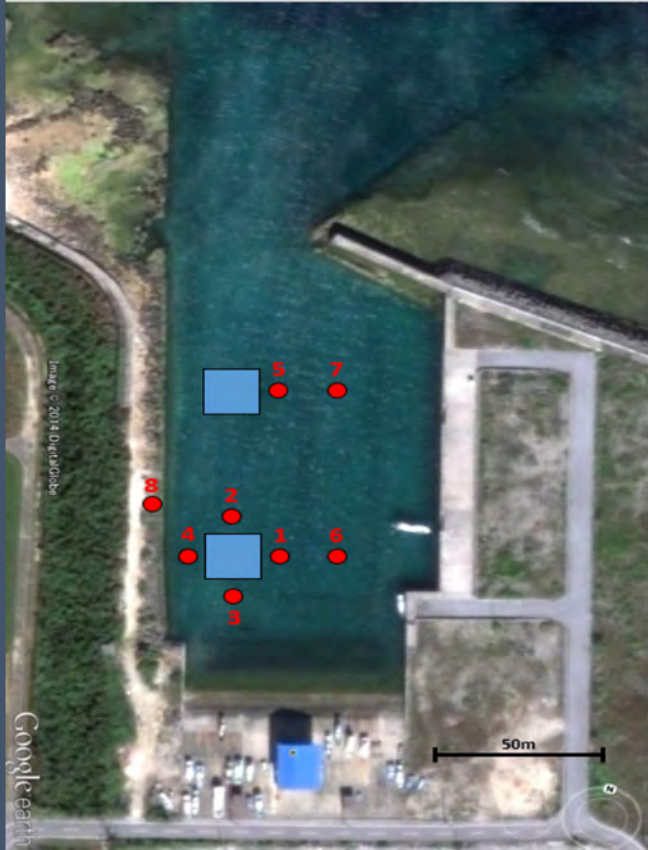
実験区内部の水温変化と上部の流速の変化に相関

- ・流れが強く観測されている時間帯では中層の水温も同様に変化(外部海水との混合)
- ・流れが弱い時間帯では上層の水温が低下(下層からの深層水の影響)

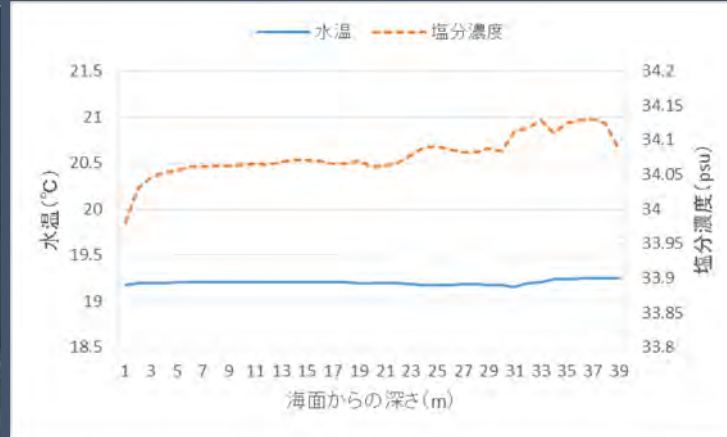
流速に影響を与える要因として、風の影響が大きいと考えられる

潮汐(大潮・小潮)との相関は弱い

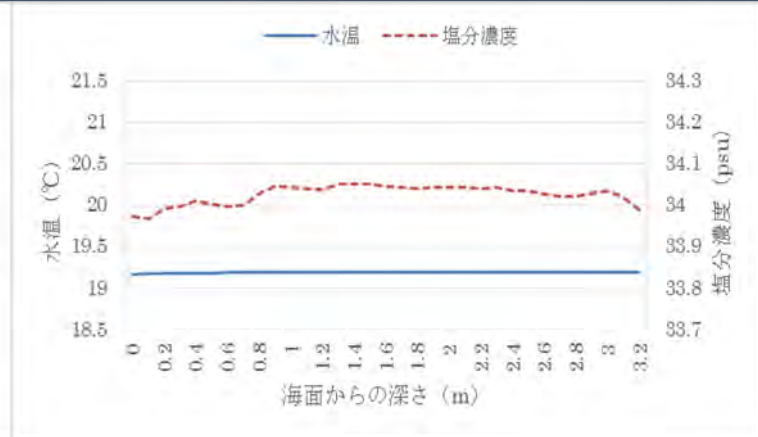
実験区外部での深層水の影響について(実験区4方向)



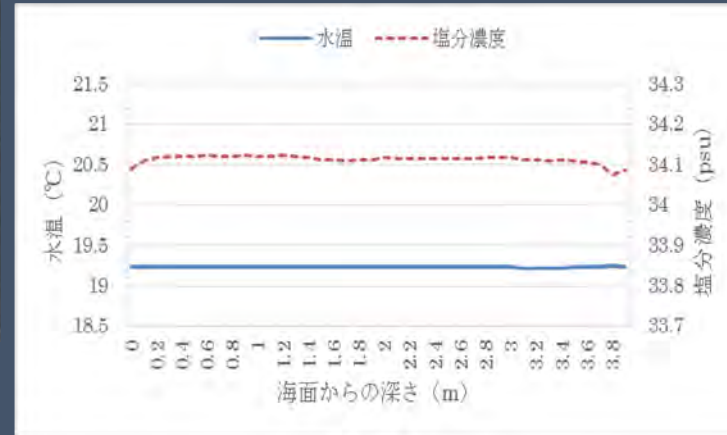
調査地点



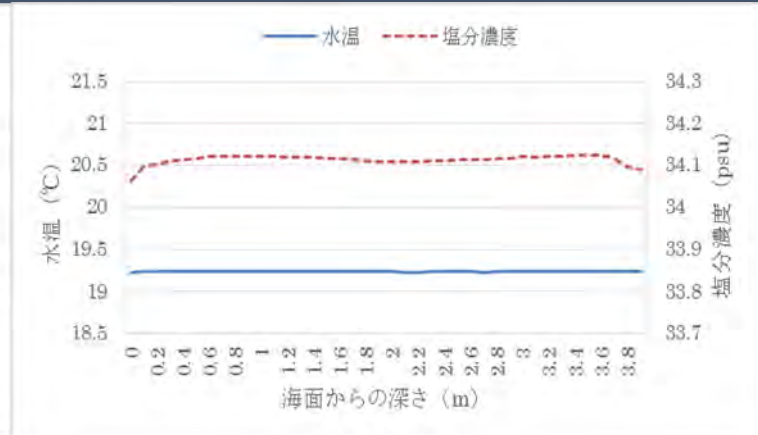
地点①



地点②



地点③



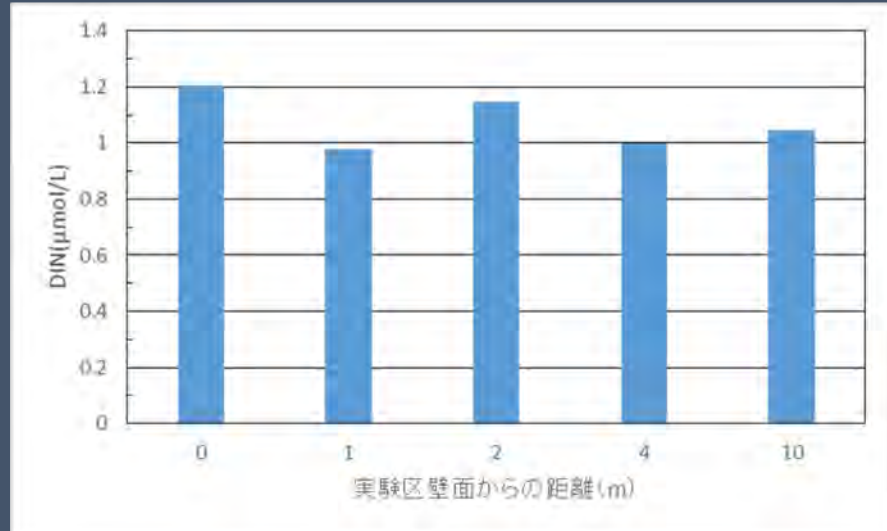
地点④

深さによる水温や塩分濃度に変化はほぼない
 → 深層水の影響は見られない

実験区外部での深層水の影響について(栄養塩濃度)



採水地点



実験区南側壁面直下から0m,1m,2m,4m,10mの海底で採水

→栄養塩濃度の分析

→距離に無関係にほぼ均一な値

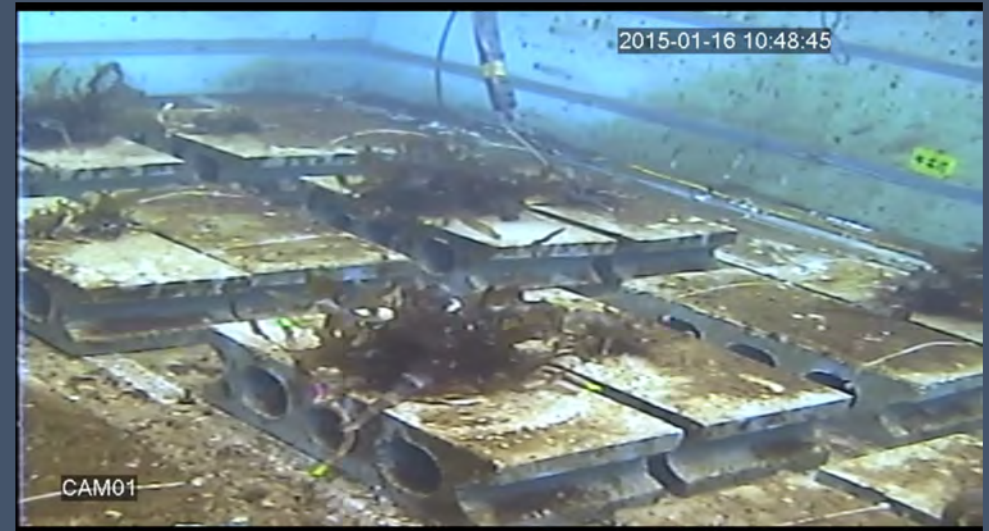
→深層水の影響は見られない

→実験区外部に出ると一気に拡散してしまう

海藻(ワカメ・カジメ)の生長



実験初日(手前:ワカメ 奥:カジメ)



実験開始35日目(手前:ワカメ 奥:カジメ)

- ・順調に生長していることが確認される
- 定量的な評価の必要性
- 深層水の影響の評価

発表の流れ

- 背景・目的
- 現地調査
- シミュレーション
- 結論・課題

MEC(Marine Environmental Committee)モデル

日本造船学会海洋環境研究委員会開発

支配方程式：運動方程式、連続の式、水温・塩分・栄養塩・密度の式

$$\frac{Du}{Dt} = -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p}{\partial x} + fv + A_M \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_M \frac{\partial u}{\partial z} \right)$$

$$\frac{Dv}{Dt} = -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p}{\partial y} - fu + A_M \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_M \frac{\partial v}{\partial z} \right)$$

$$0 = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} - g \quad (\text{静水圧近似})$$

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

$$\frac{DT}{Dt} = A_C \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{K_C}{\delta} \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \Delta T_{RIV}$$

$$\frac{DS}{Dt} = A_C \left(\frac{\partial^2 S}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 S}{\partial y^2} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{K_C}{\delta} \frac{\partial S}{\partial z} \right) + \Delta S_{RIV}$$

$$\frac{DN}{Dt} = A_C \left(\frac{\partial^2 N}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 N}{\partial y^2} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{K_C}{\delta} \frac{\partial N}{\partial z} \right) + \Delta N_{RIV}$$

$$\delta = \begin{cases} 0 & (\partial \rho / \partial z > 0) \\ 1 & (\partial \rho / \partial z \leq 0) \end{cases}$$

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

$u \cdot v \cdot w$: $x \cdot y \cdot z$ 方向の流速(m/s)

p : 圧力(N/m²)

ρ : 海水の密度(kg/m³), ρ_0 : 標準の海水密度(=1020.0kg/m³)

g : 重力加速度(=9.807m/s²)

f : コリオリパラメータ(=8.42×10⁻⁵rad/s)

A_M : 水平渦動粘性係数(=50m²/s)

K_M : 鉛直渦動粘性係数(m²/s)

T : 水温(°C) S : 塩分濃度(‰) N : 栄養塩濃度(μM)

A_C : 水平渦動拡散係数(=10m²/s)

K_C : 鉛直渦動拡散係数(m²/s)

$$\Delta T_{RIV} = \begin{cases} 0 & (\text{深層水放水箇所以外}) \\ \frac{R(T_R - T)}{V_R} & (\text{深層水放水箇所}) \end{cases}$$

$$\Delta S_{RIV} = \begin{cases} 0 & (\text{深層水放水箇所以外}) \\ \frac{R(S_R - S)}{V_R} & (\text{深層水放水箇所}) \end{cases}$$

$$\Delta N_{RIV} = \begin{cases} 0 & (\text{深層水放水箇所以外}) \\ \frac{R(N_R - N)}{V_R} & (\text{深層水放水箇所}) \end{cases}$$

硝酸のみを対象

R : 深層水流入量(m³/s)

$T_R \cdot S_R$: 深層水の水温(°C)・塩分(‰)

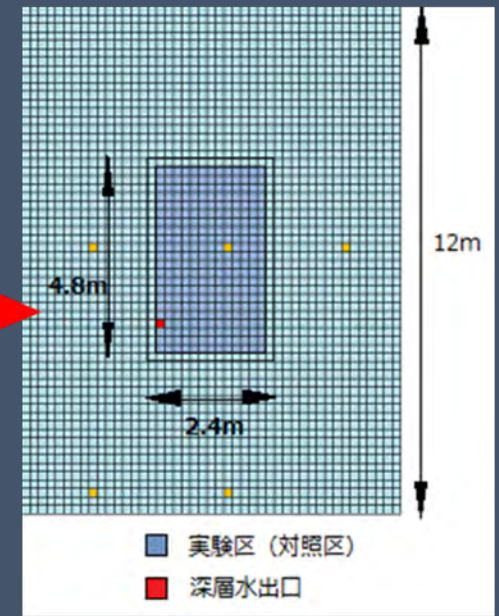
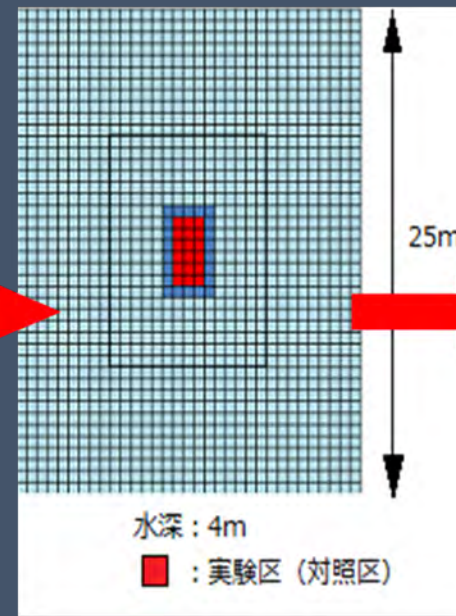
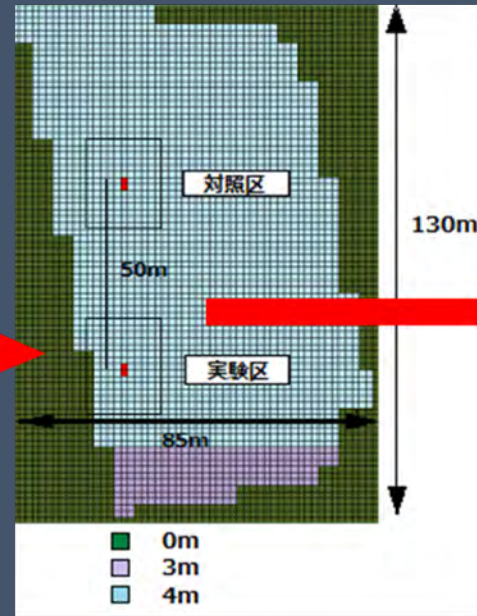
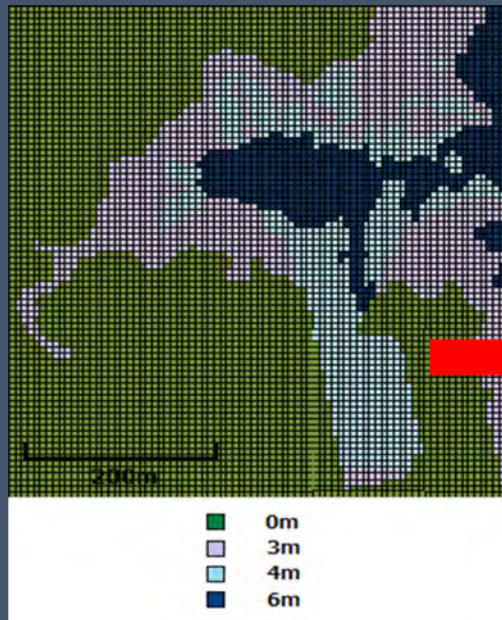
V_R : 深層水が流入する体積(m³)

入力データ

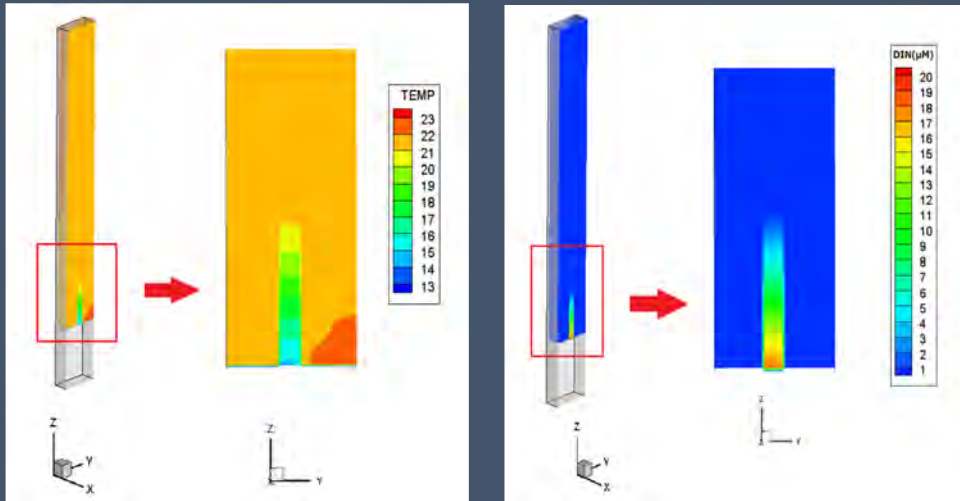
- ・現地の潮汐のデータ
 - 海上保安庁水路部発行 書誌742号「日本沿岸潮汐調和定数表」より引用
- ・気象データ
 - 気象庁データベースから引用
(ただし、全天日射量と雲量の久米島のデータは計測されていないため、沖縄県那覇市のものを代用した)
 - 気温(°C)
 - 気圧(hPa)
 - 全天日射量(J/m²/s)
 - 雲量(0-1)
 - 湿度(0-1)
 - 降水量(mm/m²/s)
 - 風速(m/s)
- ・放水する深層水データ
 - 実際に使用する久米島の深層水のものを入力
 - 深層水出口での水温計による計測
 - 沖縄県海洋深層水研究所による深層水水質調査結果を参照
- ・地形データ
 - 現地における水深調査と航空写真より

対象場所（沖縄県久米島真謝漁港）

計算領域



深層水の実験区内部の滞留の様子

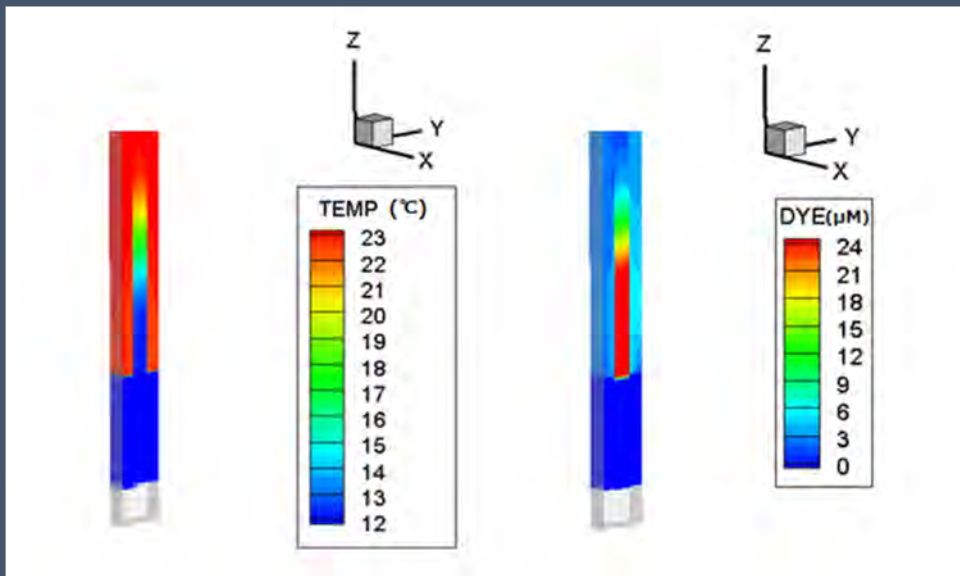


(上図)熱伝導あり (下図)完全断熱

(上図)下層と中層で水温・栄養塩濃度の差が大きい

- 実際(実験)より熱が大きく外部に拡散
- 下層に滞留せず、容易に上層に移動
- 栄養塩濃度も下層から中層にかけて低下

実験:下層から中層にかけて高濃度の栄養塩と低水温が維持されている



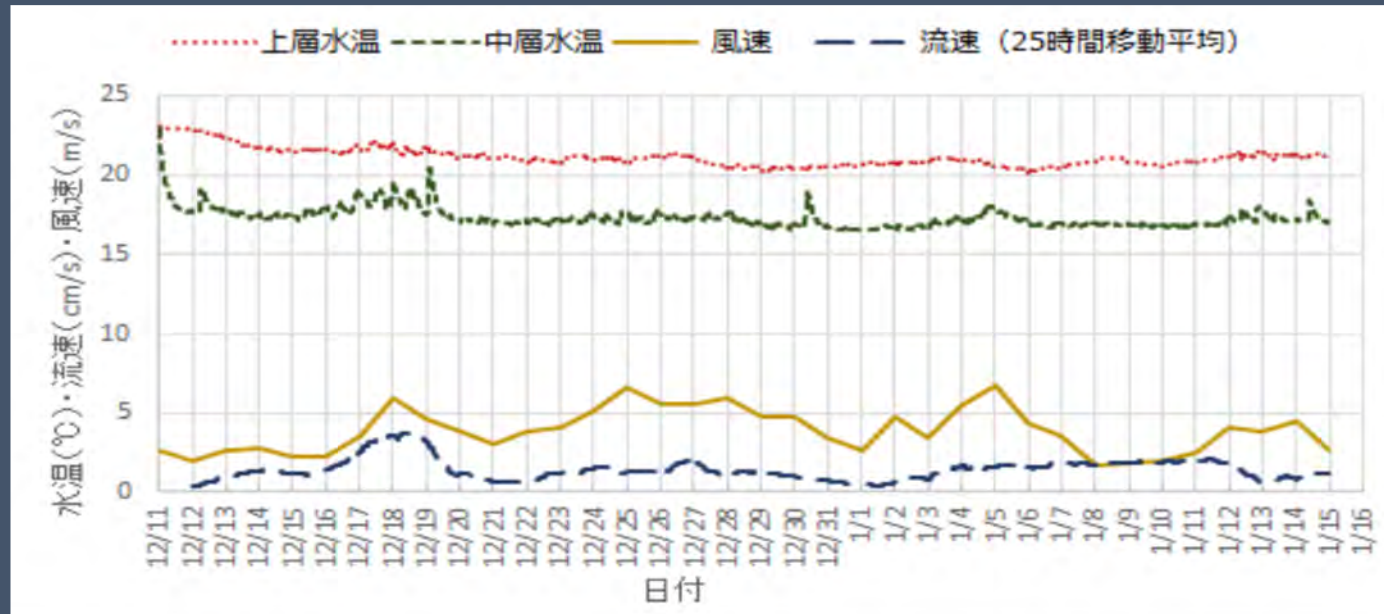
(下図)下層と中層で水温・栄養塩濃度の差が小さい

- 深層水の実験区内部での密度差が小さく、下層に滞留
- 栄養塩濃度も実験区中層まで高濃度

実験に極めて近い結果となっている

- 実験の断熱はうまくできており、断熱がうまくできていなければ、上手のような滞留が起こると考えられる

風・潮汐の流れへの影響

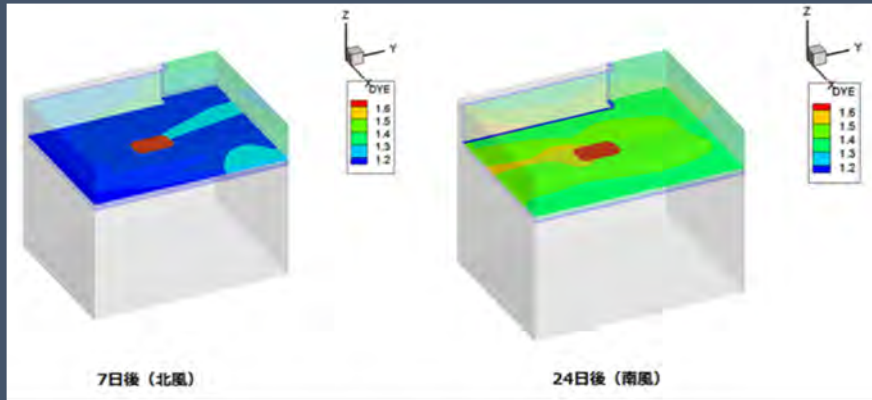


流速・風速と水温変化(上層・中層)のグラフ

風の影響を受けて流れの大きさも変動していることがわかる

→シミュレーションにおいても実験と似た結果が得られた

風・潮汐による栄養塩の実験区上層における拡散の様子

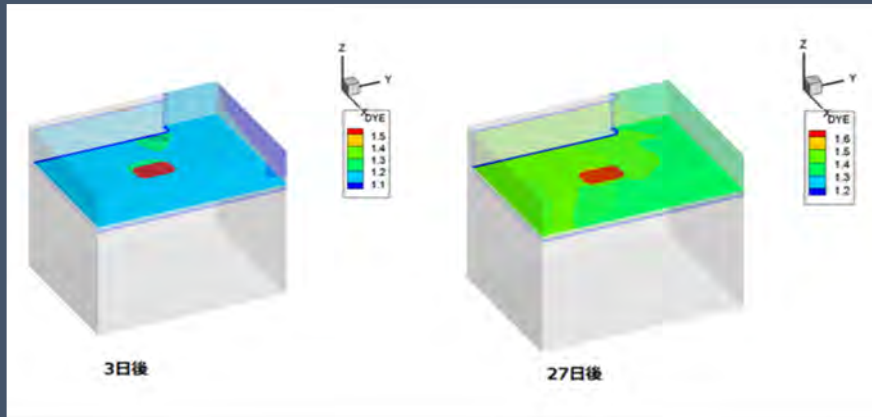


強風日 (左) 北風 (右) 南風

・強風日・・・大きく拡散

北風では北側に拡散 南風では南側に拡散

→海表面付近と海底付近で流れの方向が異なる

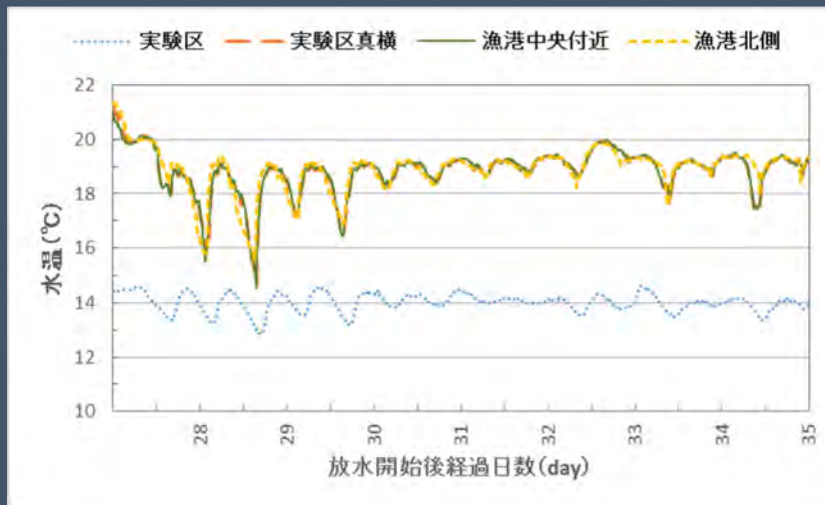


弱風日

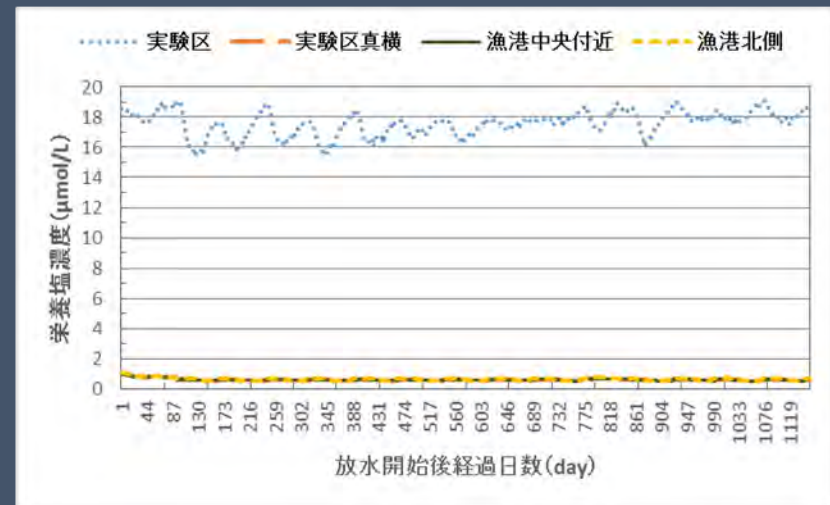
・弱風日・・・大きな拡散は見られない

※拡散の様子を見るため、 $1.2 \sim 1.6 \mu\text{mol/L}$ の狭い範囲で設定しており、実験区外部にも深層水の影響が及んでいる様に見える。

実験区外部での深層水の影響について(シミュレーション結果)



外部の水温変化



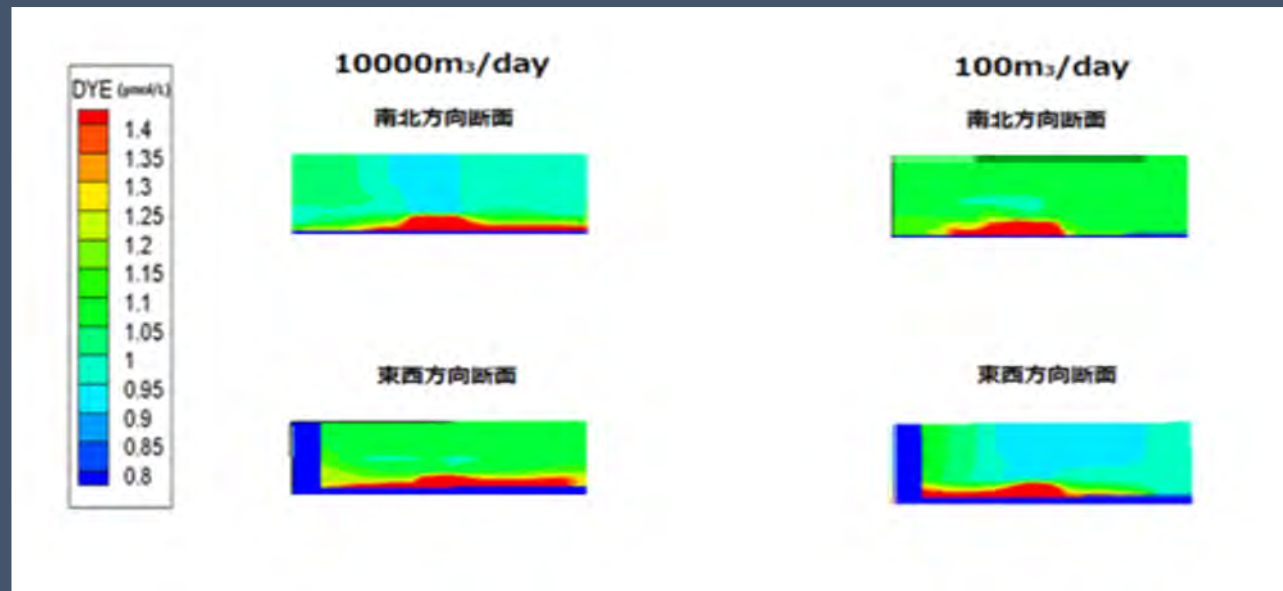
外部の栄養塩濃度変化

・シミュレーションにおいても実験区外部に深層水の影響は見られない

→十分な放水量がないと海底に広がる前に容易に拡散してしまう可能性

→滞留構造物の複数設置や設置場所、設置の向きなど、様々な点で改善できる可能性

放水量の多くした場合の実験区外部での栄養塩の挙動の違い



- ・放水量が小さい(60m³/day)と、実験区外部で容易に拡散する
- ・放水量が大きくなると、**実験区外部でも漁港内の広範囲に渡って影響が及ぶ**様子が見られる
→現地の実験でも放水量を変えた場合の漁港内の環境変化の調査の必要性

発表の流れ

- 背景・目的
- 現地調査
- シミュレーション
- 結論・課題

結論・課題

(結論)

- 実海域での深層水放流において、実験区内部には高濃度の栄養塩が維持されており、滞留構造物の有用性が確認できた。さらに、深層水放水による海藻の生長も確認された。
- 実験区内部に滞留した深層水が、流れの影響によって外部の海水と混合する場合があることが確認され、その要因として風が考えられる。
- 断熱の程度によって実験区内部での滞留の仕方が異なること、放水量によって実験区外部での深層水の挙動が異なる可能性がシミュレーションから示唆された。

(今後の課題)

- 対象域の地形や気象条件を考慮した、構造物の数や設置方法、放水量の違いによる拡散の様子を検討、海藻の定量的評価を行う。
- 実験と同じ期間の気象条件を与えて実験結果と比較を行う。