

久米島真謝漁港における放流深層水の挙動に関する 現場観測

Measurement on behavior of deep ocean water discharged in Maja Port in Kume Island

多部田茂¹・井関和夫²・加藤孝義³・有井祐人⁴・高橋祐人¹・大内一之^{1,5}

Shigeru TABETA¹, Kazuo ISEKI², Takayoshi KATO³, Yuto ARII⁴,

Yuto TAKAHASHI¹ and Kazuyuki OUCHI^{1,5}

Abstract

The deep ocean water (DOW) which has low temperature and high nutrients will be effective for regenerating subpolar/temperate seaweed bed and aquaculture of those seaweeds. In the present study, a semi-enclosed small fishing port near the pumping facility of DOW in Kume Island of Okinawa in Japan is chosen for the field experiment of seaweed bed development, because it could be possible to prevent the discharged DOW from diffusing rapidly. Additionally, in order to keep low temperature and high nutrient concentration of DOW more effectively, a box-shaped pool is installed on the bottom of the port in which DOW is discharged. In the field experiment, water temperature and nutrients concentrations in and out of the pools, and current velocity just above the top of the pool have been measured to detect the behaviour of discharged DOW. Through the field experiment, it is clarified that the box-shaped pool installed on the bottom of the port is quite effective to retain the discharged DOW. It is also found that DOW hardly affect surrounding environment since it will rapidly mix with ambient seawater when it goes out of the pool.

Key Words: Deep ocean water discharge, Field experiment, Seaweed culture, Kume Island

要 旨

栄養塩を豊富に含む海洋深層水を閉鎖海域に放流し、藻場造成や海藻養殖を行うことを目的とした実海域実験を、沖縄県久米島の真謝漁港にて実施した。効率的に藻場造成を行うためには深層水を滞留させる必要があると考えられるため、漁港内の海底にコンテナ（以下、実験区）を設置しその内部に深層水を連続的に放流した。実験区とその周辺環境のデータを継続的に得るために、実験区およびその周辺に水温計や流速計等を設置するとともに、年間を通して海水のサンプリングを行い栄養塩濃度の変動を把握した。また、実験区に導入する深層水の流量を変化させ、実験区内での深層水の滞留状況への影響を調べた。港の底に設置された箱形のコンテナは深層水を滞留させるのに有効であり、容積5.5 m³のコンテナに2.4 m³/hの深層水を放流することでコンテナ中層より下部は低温・高栄養塩の環境が保たれた。一方、コンテナ中層より上部では周辺海域の水平流速が大きくなると、外部海水と混合しやすくなる。また、実験区から流出した深層水は速やかに周辺海水と混合し、実験区のごく周辺においても海底付近の水温や栄養塩濃度に深層水の影響はほとんど見られなかった。

キーワード: 深層水放流, 実海域実験, 海藻養殖, 久米島

¹ 東京大学新領域創成科学研究科 (〒277-8563 千葉県柏市柏の葉5-1-5)

² 広島大学名誉教授 (〒872-1652 大分県国東市国東町来浦1938)

³ 東京大学工学系研究科 (〒113-8656 東京都文京区本郷7-3-1)

⁴ 東京大学工学部 (〒113-8656 東京都文京区本郷7-3-1)

⁵ 大内海洋コンサルタント (〒389-0111 長野県北佐久郡軽井沢町長倉193-111)

1. 緒 言

近年日本の沿岸海域では磯焼け等による藻場の減少が顕著であり、生産性豊かな海が失われつつある。窒素・リンなどの栄養塩を豊富に含む海洋深層水（本論文では海洋学での定義ではなく産業利用上の定義を前提とする）の有光層への放流は、海域の生産力を回復させ、磯焼けの防止や養殖等による水産物生産の増大に資する可能性がある。深層水の海藻養殖への利用については、オフシーズンのワカメの屋内タンク培養（大野ら，2000），大型紅藻ツルシラモの生長促進（垣田ら，2000），紅藻トゲキリンサイとトサカノリのタンク培養（大野ら，2001），アワビ好適餌料となる褐藻類（ワカメ，ホソメコンブ）を周年生産する集約的タンク養殖システムの検討（岡，2006），スジアオノリのタンク内での養殖実験（Hiraoka and Oka, 2008），ネッタキリンサイの培養と海面養殖の検討（Shahoo and Ohno, 2010），などが行われている。海域への放流による磯焼け対策等については、瀬戸ら（2001）が、コンブの培養試験によって配偶体の生長に関わる栄養依存性を調べ、コンブの発生や生産増などに対する深層水の放流効果について検討している。また、新エネルギー・産業技術総合開発機構（2005）は、海洋深層水の放流が藻場造成に与える影響のシミュレーションにより、放流周辺海域で海藻類の生長が促進される可能性を示している。大塚（2006）は、室戸岬周辺の磯焼け海域を対象とした藻場生態系モデルを構築し、沿岸生態系に及ぼす海洋深層水の放流影響を数値シミュレーションによって推定している。室戸では実際に磯焼け海域への深層水放流を実施し、深層水の放流口付近で小規模な藻場を確認している。しかし放流開始前の藻場の分布は詳しく調べられていなかったため、深層水の寄与がどの程度あったかについては確認できていない（藤田ら，2006）。

そこで著者らは、栄養塩を豊富に含む海洋深層水を閉鎖海域に放流し、藻場造成や海藻養殖を行うことを目的とした実海域実験を、沖縄県久米島の真謝漁港にて実施した。効率的に藻場造成や海藻養殖を行うためには深層水を滞留させる必要があると考え

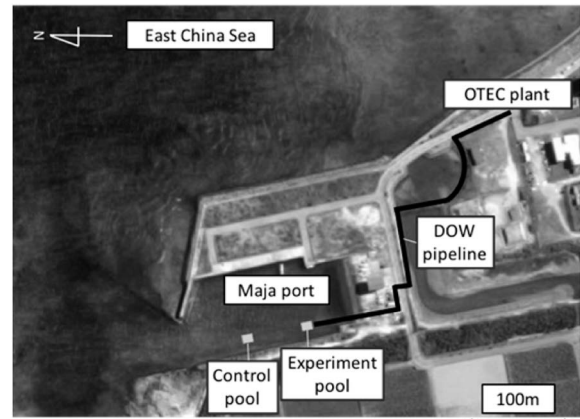


図1. 実験海域（真謝港）における実験区と対照区の配置

られるため、漁港内の海底に容量約 5.5 m^3 のコンテナ（以下、実験区）を設置しその内部に海洋温度差発電（OTEC）に使用した後の深層水を連続的に放流した（図1）。コンテナ内外の海水交換速度が滞留時間0.1日程度でもコンテナ内に深層水が保持されるように、通常時には約 $2.4\text{ m}^3/\text{h}$ の深層水（1日あたりコンテナの容積の約10倍）を導入した。また比較のために同じ大きさのコンテナを約50 m離れた場所に設置し（以下、対照区）、実験区と対照区における海藻の生育の違いを調べた。今回の実験では、冬季でも 20°C 程度の水温が維持される当該海域で温帯性の海藻の養殖が可能であるかを検討するために、ワカメとカジメを用いた。

本研究では、上記実験における放流深層水の挙動を把握することを目的として、現場観測を行った。

2. 方 法

2.1 水温等の連続モニタリング

実験区内部とその周辺環境のデータを継続的に得るために、実験区のコンテナに図2のような各種機器を設置した。水温計は、実験区コンテナ（Experiment pool）の深層水（DOW）放流口（T1）、コンテナ底層（T2）、中層（T3）、コンテナ直上（T4）、および対照区コンテナ（Control pool）の底面（T5）に設置した。なお、OTECで使用した直後の深層水の温度はおおよそ $10\text{--}11^\circ\text{C}$ であるが、真謝港まで輸送される間に温められ温度が上昇する。実験区コンテナ直上では電磁流速計により流速も記録した。また、

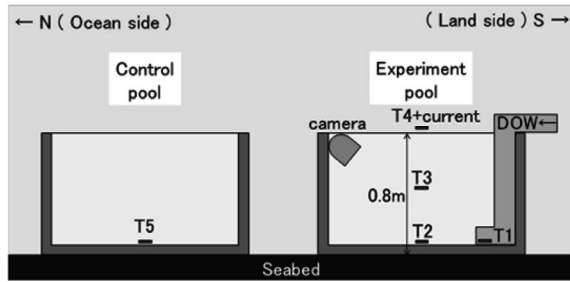


図2. 連続モニタリング用の計測機器の配置

実験区コンテナ内の様子を観察するためにCCDカメラを設置した。水温と流速は10分間隔、水中カメラ映像は1 fpsでロガーに記録するとともに、T1, T2, T5と水中カメラについては、データ通信によってインターネットを介して遠隔地からのリアルタイムモニタリングが可能にようにした。

2.2 実験区および対照区における栄養塩濃度の調査

実験区および対照区のコンテナ内の栄養塩濃度の変動を把握するために、約2週間に1回の頻度で海水のサンプリングを行った。実験区コンテナの底層、中層、コンテナ直上、対照区コンテナの底層、およびコンテナ外（ほぼ港の中央）の底層において、ダイバーによる採水を行った。サンプリングした海水はオートアナライザ（BRAN+LUEBBE: TRAACS 2000）を用いて栄養塩濃度分析を行った。なお、深層水の栄養塩濃度は、硝酸態窒素が約 $26 \mu\text{mol/L}$ 、リン酸態リンが約 $2.0 \mu\text{mol/L}$ 、ケイ酸態ケイ素が約 $90 \mu\text{mol/L}$ である。

2.3 実験区周辺および漁港内の水質調査

放流した深層水が実験区周辺や漁港内の水質に影響を与えているかを把握するために、図3の地点において、CTDによる水温塩分の鉛直プロファイル計測と、栄養塩分析のための2Lニスキン採水器を用いた表層、中層、及び海底直上の海水サンプリングを行った。まず、実験開始前の2014年12月9日に事前調査を行い、深層水放流開始後は2015年1月15日、2月23日、6月18日、9月15日、12月15日に調査を行った。

また、特に実験区コンテナの極近傍における放流深層水の影響を調べるために、2015年1月15日の調

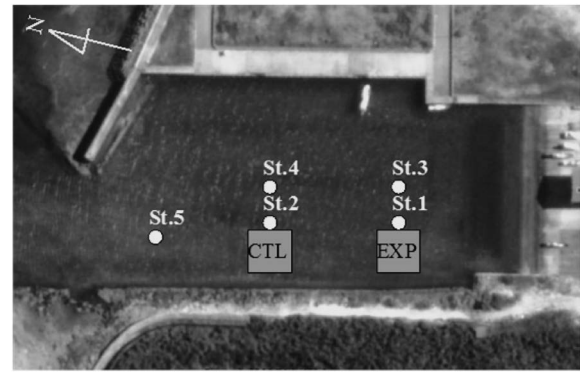


図3. 水質調査地点

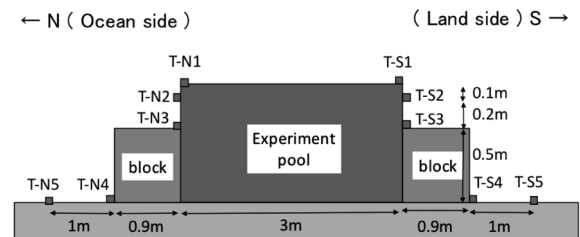


図4. 実験区近傍の水温変動計測のための小型水温ロガー配置

査ではコンテナ近傍におけるCTD調査と海底直上の海水サンプリングを行った。

2.4 放流量の影響調査

深層水の放流量を減少させた場合に滞留状況がどのように影響を受けるかを調べるために、放流する深層水の流量を変えた実験を行った。流量の調節は以下のように行った。

- ・ 調節前：基準流量 $2.4 \text{ m}^3/\text{h}$
- ・ 2015年10月7日 17:30
流量を基準の $1/2$ ($1.2 \text{ m}^3/\text{h}$) に変更
- ・ 2015年10月9日 17:30
流量を基準の $1/4$ ($0.6 \text{ m}^3/\text{h}$) に変更
- ・ 2015年10月11日 14:00
流量を基準の $1/2$ ($1.2 \text{ m}^3/\text{h}$) に変更
- ・ 2015年10月13日 17:30
流量を基準量 ($2.4 \text{ m}^3/\text{h}$) に変更

その際、実験区内の水温分布をより詳細に計測するために、実験区内部壁面の底面から 0.05 m 、 0.25 m 、 0.45 m 、 0.55 m 、 0.65 m の場所にボタン型の小型水温ロガー（Onset社：ティドビットv2）を設置した。

2.5 実験区側壁等の水温変動調査

実験区から流出直後の放流深層水の影響を調べるために、6月19日から8月15日にかけて、ボタン型の小型水温ロガー（Onset社：ティドビットv2）10個を、図4のように実験区側壁等に設置して水温変動を計測した。

3. 結果

3.1 水温等の連続モニタリング

深層水放流口、実験区コンテナ底層、実験区コンテナ中層、実験区コンテナ直上、対照区コンテナ底層における水温変化について、全期間の24時間移動平均（図5）、および冬季と夏季のそれぞれ約2カ月間のデータを10分間隔でプロットしたもの（図6）を示す。実験開始から1月中旬、および4月中旬から7月中旬の深層水放流口、実験区コンテナ底層、対照区コンテナ底層のデータはロガー設置場所の電気工事等のため欠損している。

2月25～26日、5月15～18日、7月16～25日、8月24～27日、9月29日～10月2日に放流口水温が大きく上昇しているのはOTECからの深層水の供給が停止もしくは供給量が大幅に減少していたためである。また10月7～13日は、後述の流量調節実験を行ったために供給量が少なくなっている。また、夏季には放流口水温が日中と夜間で大きく変動している。これは夏季の日中には深層水がOTECから実験区に到達する間に日射等で温められるからである。

実験区内（底層および中層）の水温は、夏季（6月下旬～8月中旬）以外の時期にはほぼ15℃以下を保ち、夏季には導入深層水温度の変化に伴って上昇するが周辺海域（対照区や実験区直上）の水温が25℃以上になってもおおむね20℃以下に保たれていた。

3.2 実験区および対照区における栄養塩濃度の調査

実験区上層・中層・底層と対照区（底層）における溶存態無機窒素濃度の変動を図7に示す。実験区の底に近いほど濃度が高く、特に底層では安定して対照区の20倍前後の濃度を保っていた。これに対し実験区上層においては、しばしば対照区（周辺海域とほぼ同濃度と考えられる）に近い濃度まで低下している。

3.3 実験区周辺および漁港内の水質調査

図8にCTDによる計測結果の一例を示す。最も外海に近いSt.5を除いて、1月は水温、塩分ともにほぼ鉛直に一樣となっていたが、6月には表層は底層より水温は約0.1–0.2℃高く、塩分は表層付近でやや低くなっていた。St.5では、1月は底層に高温・高塩分水が見られ、6月には中層から底層にかけてやや低水温、高塩分となっていたが、これらはいずれも外洋水の影響と考えられる。他の季節における計測も含めて、実験区コンテナ近傍のSt.1においても深層水の影響は見られなかった。

図9には漁港内の各観測点における溶存態無機窒素

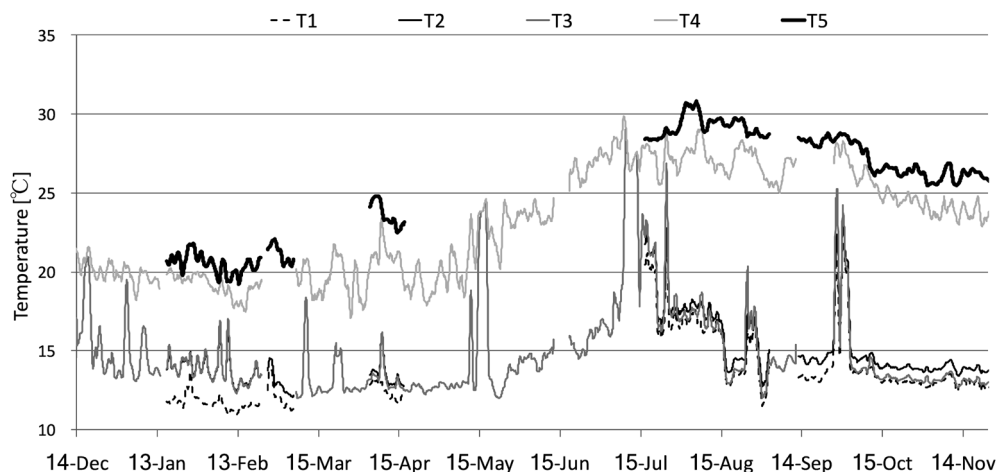


図5. 実験区と対照区の水温変化（2014年12月–2015年11月の24時間移動平均）

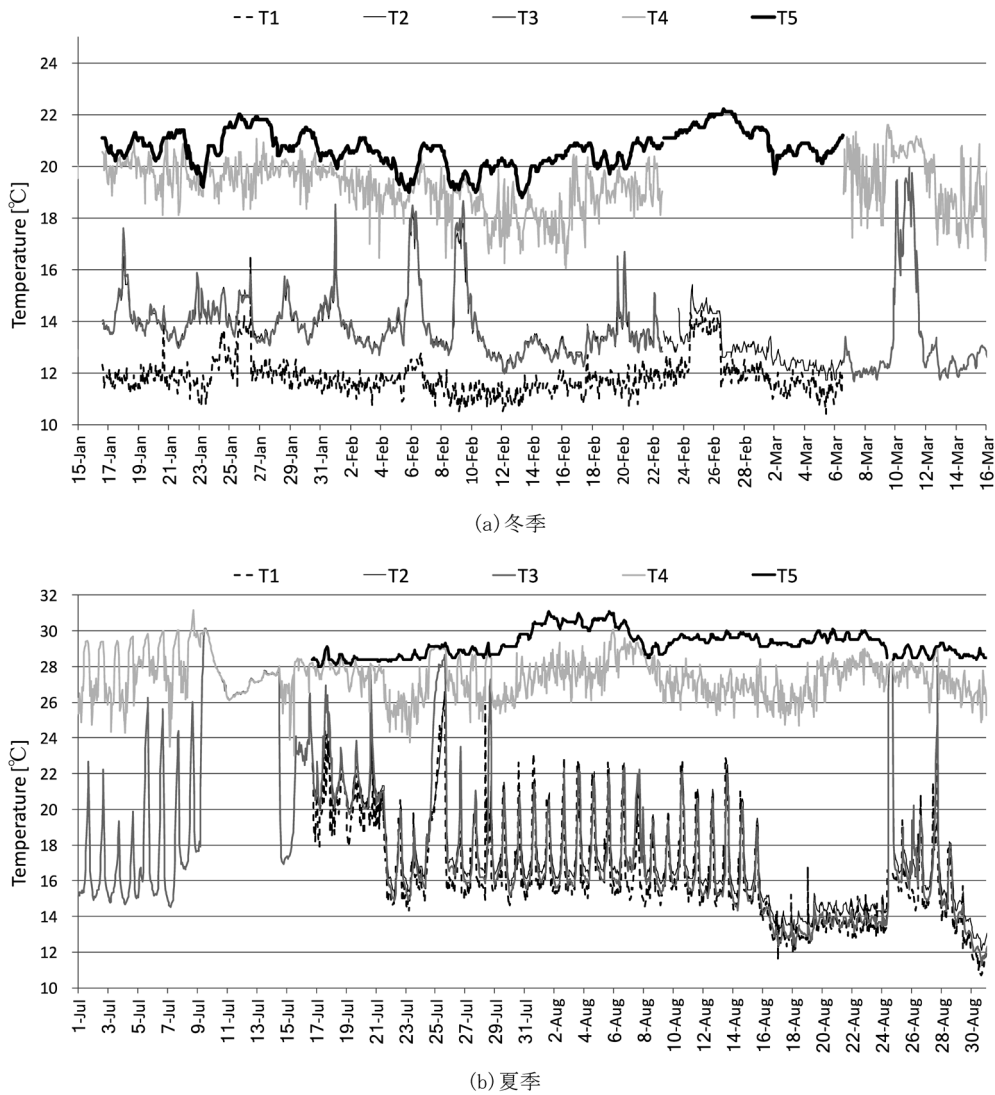


図6. 実験区と対照区の水温変化(10分間隔の計測値)

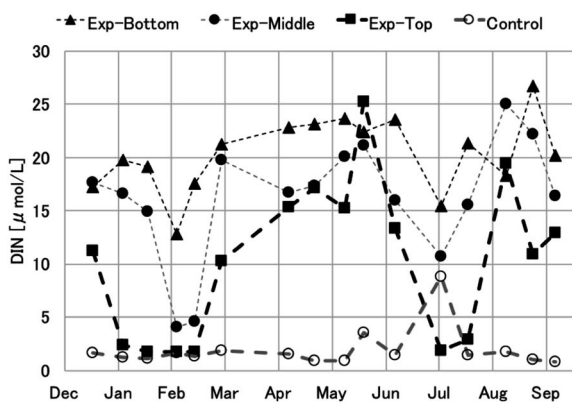


図7. 実験区および対照区コンテナ内の栄養塩(溶存態無機窒素)濃度

素濃度を示す。1月のSt.4や6月のSt.3で高い値が見られたが、同じ時期に実験区付近では高い濃度にはなっておらず、また同地点でリン酸塩やケイ酸塩の濃度は高くなっていないことから、異常値もし

くは偶発的なものと考えられる。実験開始前(2014年12月9日)と実験開始後で差異はほとんどなく、深層水放流の影響と考えられる変化はみられなかった。

2015年1月15日に行った実験区コンテナの近傍における海底直上の水質調査結果を図10に示す。実験区コンテナの南側の外壁直下(外壁から0m)および外壁から南側に1m, 2m, 4m, 10mの地点における海底直上の栄養塩濃度は、いずれもほぼ周辺海域における濃度と同程度であった。

3.4 放流量の影響調査

図11に流量調整実験中の実験区直上水平流速と各測点における水温の関係を示す。いずれの深層水供給量の場合にも、実験区コンテナの底から0.25m

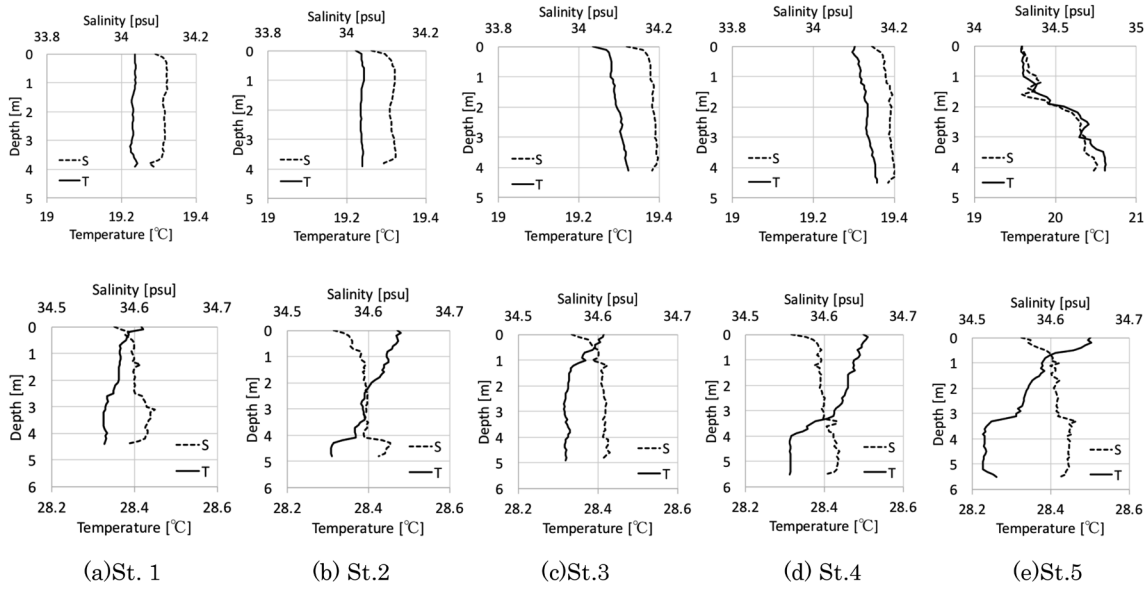


図8. CTDによる水温、塩分の鉛直プロファイル (上段：2015年1月15日，下段：2015年6月18日)

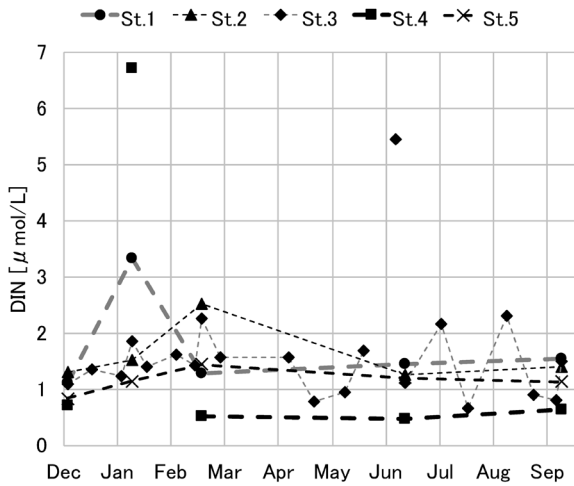


図9. 漁港内の栄養塩（溶存態無機窒素）濃度

以下においては非常に水温が安定している。底から0.45 m以上の計測点においては、流速が増加すると水温が上昇しているが、深層水供給流量が小さくなるにしたがって、より小さい水平流速によって水温が上昇し始めることがわかる。

3.5 実験区側壁等の水温変動調査

表1に、実験区側壁等の水温変動調査の各測点における計測期間中の水温の変動幅を示す。実験区コンテナ開口部（上面）の湾口側（TN-1）において水温の変動幅が約8℃であるのに対し、湾奥側（TS-1）の水温の変動幅は約4℃であった。また、湾口側の海底上水温（TN-4,5）は、湾奥側（TS-4,5）より0.6-

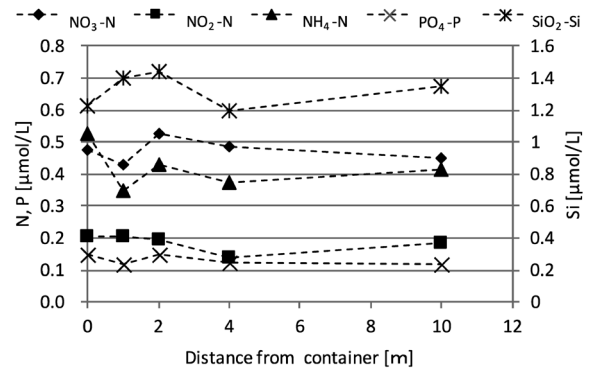


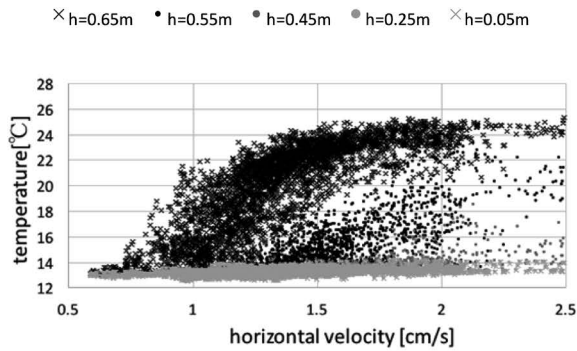
図10. 実験区コンテナ近傍底層の栄養塩濃度（2015年1月15日）

0.7℃低くなっており、水温の変動幅はコンテナ開口部から離れるに従って急速に小さくなっている。

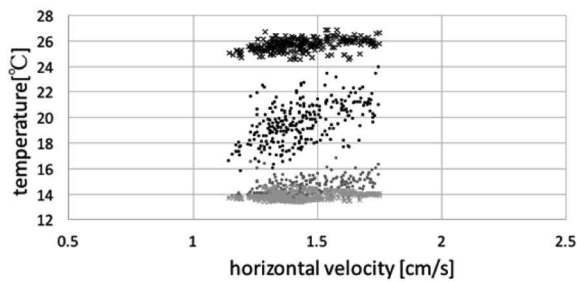
4. 考 察

4.1 実験区内における深層水の挙動

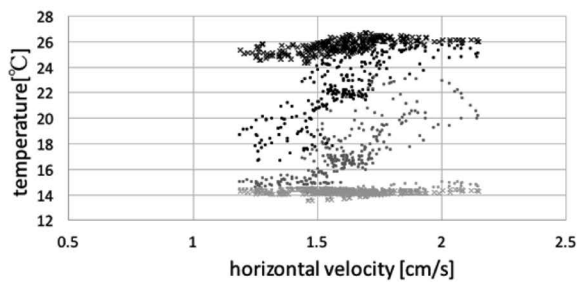
放流口の水温と実験区底層、中層の水温が年間を通して近い値で推移していることや、栄養塩濃度も深層水に近い値を保っていることから、実験区に放流した深層水がおおむね実験区の底～中層まで安定的に滞留していることが示唆され、本研究で用いた箱型のコンテナが海藻生育環境を創出するために有効であることが示された。1日あたりコンテナの容積の約10倍の深層水を導入することによってコン



(a)流量 2.4 m³/h



(b)流量 1.2 m³/h



(c)流量 0.6 m³/h

図11. 深層水供給流量による流速と実験区内部の水温の関係の変化

表1 実験区近傍の水温変動

(2015.6.18-2015.8.15)

ロガー位置	水温変動幅 [°C]	ロガー位置	水温変動幅 [°C]
T-N1	22.8-31.1°C	T-S1	27.0-31.4
T-N2	26.2-31.1°C	T-S2	28.1-31.4
T-N3	26.7-30.8°C	T-S3	28.0-31.4
T-N4	27.4-30.9°C	T-S4	28.0-31.3
T-N5	27.4-30.7°C	T-S5	28.1-31.3

テナ内には深層水がほぼ安定的に滞留したことから、テナ内外の海水交換速度は滞留時間0.1日より十分長いと考えられる。一方、漁港区内外

の海水交換速度を見積もるためにはより詳細な観測や数値シミュレーション等による検討を行う必要がある。著者らは実際に、この海域では通常生育不可能なワカメやカジメを、実験区内で育成することに成功している(大内ら, 2016)ことから、本方式の海藻養殖への利用可能性が示唆される。また、実験区直上の水温は対照区の水温(周辺海域の水温はおおむねこれに近いと考えてよい)に近いが、やや低めでありテナ内の深層水の影響を受けている可能性がある。

図12に放流開始から35日間のテナ直上の水平流速と実験区テナ直上水温、実験区テナ中層水温の変動を示す。なお、ここでは潮汐や昼夜の変動を除くために25時間移動平均をとった。流速が大きくなると実験区中層の水温が上昇しテナ直上の水温に近付いていることから、流れによって実験区の深層水が外部の海水と混合していると考えられる。また、図6に見られる水温の日周期の変動は、ほぼ昼夜の熱収支の変動によるもので、潮汐の影響はほとんど見られなかった。経日変動も日射や気温の変化の影響が主で、図12に示したように大潮小潮の影響もほとんど見られない。流速の変動には風速との関連が見られることから、テナ内外の海水交換は潮汐よりも風による吹送流の影響を強く受けていると考えられる。

図13に実験区内の栄養塩濃度と実験区直上の水平流速の関係を示す。水温から示唆されたのと同様に、水平流速が大きくなると周辺海水との混合により栄養塩濃度は低下し、その程度は底層、中層、上層の順に大きくなっている。

以上のように実験区に放流した深層水は、おおむね実験区の底層から中層付近までは滞留していると考えられるが、これは実験区の体積(5.5 m³)に比して十分な量の深層水(約58 m³/d)が放流されているためであると考えられる。そこで、深層水の放流量を減少させた場合に滞留状況がどのように影響を受けるかを調べるために、放流する深層水の流量を変えた実験を行った。

放流量調整実験からは、実験区の中層より下部においては、実験期間における水平流速の範囲ではい

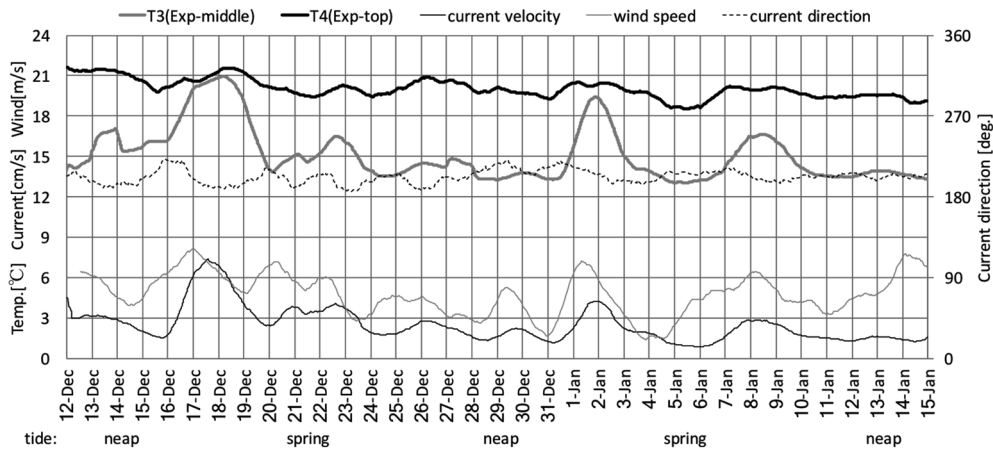


図12. 流速と実験区内部の水温の関係（流向は北向きを0°とした時計回りの角度）

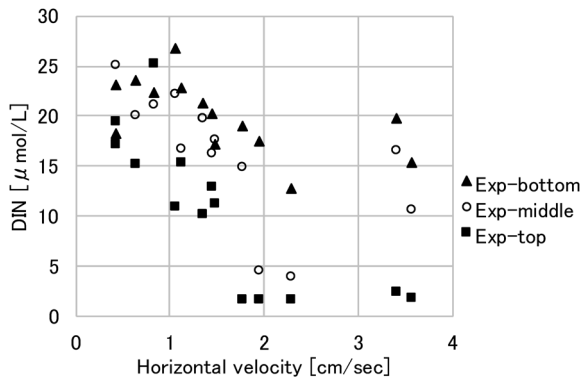


図13. 実験区内の栄養塩（溶存態無機窒素）濃度と実験区直上の水平流速の関係

ずれの深層水供給量の場合でも、深層水が滞留していると考えられる。また、実験区中層から上層では、深層水供給量が小さい場合にはより小さい水平流速下でも実験区外部の海水との混合が生じていると考えられる。これらのことから、小型海藻群落を造成する場合など海藻の生育に必要な層厚がコンテナ高さの半分 (0.4 m) よりも十分小さい場合には、本研究と同程度の放水量でコンテナ底面積を増やすことで造成可能面積を拡大できる可能性がある。一方、大型の海藻を対象とする場合などには、コンテナ形状の工夫や静穏な海域への設置などにより、外部海水との混合を抑制する必要があることが示唆された。

4.2 実験区周辺における深層水の挙動

漁港内の水質調査では、水温、栄養塩ともに深層水放流の明らかな影響は見られなかった。つまり実

験区から出た深層水は速やかに周辺海水と混合し、その体積が相対的に小さいために漁港内の水質への影響はほとんどなく、影響があるとしても実験区の極近傍に限られると考えられる。

また実験区側壁等の水温変動調査において、コンテナ開口部（上面）の湾口側において、水温の変動幅が相対的に大きくなっているのは、周囲水と混合した深層水が流出しているためであると考えられる。一方、湾奥側の水温の変動幅は小さいことから、流出は主に湾口側で生じていることが示唆される。この原因としては、実験区コンテナが湾口側にやや傾斜していたことによる影響と考えられる。湾口側の海底上水温が湾奥側より低くなっているのも、実験区から流出した深層水の影響であると考えられる。また、水温の変動幅がコンテナ開口部から離れるに従って急速に小さくなっていることから、コンテナからの流出水が周辺海水と急速に混合していることが推察された。

5. 結 言

本研究では、効率的に藻場造成実験を行うために漁港内の海底に設置した実験区コンテナ内に深層水を放流し、その挙動を観測した。本実験環境下では、年間を通して実験区コンテナの下半分程度には深層水が安定的に滞留し、周辺海域と比較して低温、高栄養塩環境が保たれることが示された。一方で、コンテナ中層から上層にかけての深層水は、実

験区上部の水平流速が大きくなったり深層水の流入量が小さくなると周辺海水と混合しやすくなることが確認された。また、実験区から流出した深層水は速やかに周辺海水と混合するため、周辺海域の水質への影響は非常に限定的であった。これらの知見は、藻場造成を効率的に行うための放流深層水滞留方法の設計に資するものと考えられる。

謝 辞

実験に際して便宜を図っていただいた沖縄県海洋深層水研究所、久米島町漁業協同組合、(株)久米島海洋深層水開発、BLUE DOME・伊関ありさ氏、大内海洋コンサルタント・大内ララ氏に感謝いたします。

参考文献

- 藤田大介・高橋正征 (2006) 海洋深層水利用学—基礎から応用・実践まで—, 成山堂書店, 209 pp.
- Hiraoka, M. and N. Oka (2008) Tank cultivation of *Ulva prolifera* in deep seawater using a new “germling cluster” method. *J. Appl. Phycol.*, 20 (1), 97–102.
- 岡 直弘 (2006) 海洋深層水による褐藻類とアワビの集約的タンク養殖システムに関する研究. 高知大学海洋生物研究報告, 24, 11–57.
- 大野正夫・團 昭紀・平岡雅規・鍋島 浩 (2000) 海洋深層水と表層海水を用いたオフシーズンの

ワカメの屋内タンク培養. 日本水産学会誌, 66 (4), 737–738.

大野正夫・矢野 誠・平岡雅規・岡 直宏・谷口道子 (2001) 海洋深層水を用いた紅藻トゲキリンサイとトサカノリのタンク培養. 高知大学海洋生物研究報告, 20, 35–40.

大塚耕司 (2006) 室戸海岸の磯焼け海域を対象とした海洋深層水放流影響の予測. 水産工学, 43 (1), 21–33.

大内一之・倉橋みどり・多部田茂・井関和夫・渋谷正信 (2016) 米島真謝漁港における海洋深層水を使った藻場造成実海域実験, 海深研, 17(2), 32.

Sahoo, D. and M. Ohno (2010) Culture of *Kappaphycus alvarezii* in Deep and Nitrogen enriched medium. *Bulletin of marine sciences and fisheries*, Kochi University, 26, 23–28.

瀬戸雅文・川井唯史・巻口範人 (2001) 海洋深層水の放水による岩礁性藻場造成に関する基礎的研究. 海洋開発論文集, 17, 123–128.

新エネルギー・産業技術総合開発機構省エネルギー技術開発部 (2005) 「エネルギー使用合理化海洋資源活用システム開発プロジェクト」事業原簿. 第1回「エネルギー使用合理化海洋資源活用システム開発」(事後評価) 分科会資料, 116pp.

垣田浩孝・小比賀秀樹・上嶋 洋・北村孝雄 (2000) 大型海藻ツルシラモの生長への室戸海洋深層水の影響. 日本海水学会誌, 54(4), 310–315.

(2017年6月1日受付; 2017年7月19日受理)