

# 物理的指標による密度流拡散装置からの 吐出水の観測

福田賢一<sup>1</sup>・石黒貴裕<sup>2</sup>

## Observation of discharged flow from Density Current Generator using physical indicator

Kenichi Fukuda<sup>1</sup> and Takahiro Ishiguro<sup>2</sup>

**Abstract:** Water quality controlling in enclosed water is essential for human to maintain the valuable resource. One of main challenging issues is to improve concentration of oxygen and sludge in bottom during summer. Furthermore, recently we encounter oligotrophic conditions during seaweed (Nori) cultivation season in Japan coastal areas. To control or improve such issues, we attempted to install an innovative device, which could generate an artificial density current by mixing upper and lower waters in stratified environments in Kojima Bay, Okayama, Japan. Kojima Bay is struggling with impacts of low dissolved oxygen and eutrophic conditions, while the mouth of Kojima Bay, known as the area for seaweed cultivation, recently becomes oligotrophic conditions. The installed device has potential ability to transport water widely and improve bottom condition due to pumping up water. The designed device could discharge  $3.1 \times 10^4$  m<sup>3</sup>/day by intake of upper water ( $2.48 \times 10^4$  m<sup>3</sup>/day) and lower water ( $0.62 \times 10^4$  m<sup>3</sup>/day) with 5.5 kW motor. The field experiment started in 2011 and two detail physical field experiments were conducted to investigate artificial density current produced by the device on April and July, 2012. It was confirmed that salinity was changed during the device operation. The results indicated that the device can produce artificial density current properly.

**Key words:** salinity, temperature, density current, water improvement device, Kojima Bay

---

<sup>1</sup> ナカシマプロペラ (株) Nakashima Propeller Co. Ltd., Okayama 709-0625, Japan.

<sup>2</sup> 岡山県農林水産総合センター Okayama Prefectural Technology Center for Agriculture, Forestry and Fisheries, Setouchi 701-4303, Japan.

## はじめに

閉鎖性水域・海域は、様々な要因による水循環機能低下により水質問題が生じやすい環境である。夏場のプランクトンの異常増殖（赤潮・アオコ）、貧酸素水塊の発生及び底層のヘドロ化は、よく知られている現象である。また近年、沿岸域では、栄養塩濃度の低下による沿岸養殖水産業への被害等が挙げられている（藤原・駒井，2009；渡邊，2009）。現在、国内では水環境改善に関して様々な技術が実証実験されているが、確立されている技術は多くはない（岡井ほか，2007；木村ほか，2009；矢島・増木，2009）。薬剤，リサイクル品，機械装置さらに土木技術を活用して水環境改善が取り組まれているが，最終的には費用対効果との関係が明確でなく，普及に繋がっていない。複合的な技術の組合せが将来必要と考えられるが，一つの有望な技術としては，水平及び鉛直攪拌・拡散作用により，効率良く水を動かすことの理解を深めることが重要と考える（大内・山磨，2000；大内ほか，2002）。

岡山県児島湾奥部は，旭川及び児島湖の影響により上層部は塩分が低く，中・下層部は塩分が高い2成層水塊を形成している。よって，上下鉛直混合が通年を通して起りにくく，その結果として底層が特に夏場，貧酸素化が進み嫌気的な環境になっている（高木ほか，2009）。児島湾奥部の底質は，有機泥（粘度及びシルト）が主であるという報告が出されている（宮野・柴木，1998）。また，地形からも閉鎖性水域特有の水が停滞しやすい場所であることから，ここに何らかの方法で効率良く水を水平及び鉛直攪拌・拡散することが可能ならば，水質改善に繋がると考えられる。拡散・攪拌を促す技術として，自然現象である密度流を活用した水質改善装置「密度流拡散装置」がある。本技術は，まだ開発段階であるが，一つの興味深い技術である。

そこで今回，産学官共同プロジェクトとして，過去に水質改善装置として淡水及び海水域で実績のある密度流拡散装置の小型装置を設計・製作した（Nomura et al., 2003；大塚ほか，2007）。さらに，将来大型化への可能性を模索するために，平成23年冬から製作した装置を児島湾奥部の汽水域に設置し実験的に稼働させた。現在は，装置稼働後の経時変化の環境モニタリングを定期的に行っている。本装置の機能を理解するという視点から，児島湾奥部においてどの程度の水を広範囲に運ぶことが可能か，又は揚水による底層部の環境変化がどのくらい

の水域に生じるかが，本プロジェクトの大きな目的である。さらに拡散による栄養塩の輸送についても，本装置の評価の一つとして考えている。

そこで，今回は密度流拡散装置の特徴を紹介しつつ，平成24年度の春及び夏に装置稼働前後で行った装置性能に関しての物理的指標の変化について中間報告する。

## 装置と実験方法

### 密度流拡散装置の概要

#### 密度流

密度流は，密度差によって生じる流れであるため重力流とも言われており，自然界の様々な所で見ることができる。理想密度流のイメージを図1に示す。密度によって成層した水塊にある密度の水を吐出させると，その水はそれ自身と同じ密度の層に入り込み，その層に沿って水平移動して遠方まで流れる。吐出水（吐き出された水）は，くさび状に低密度水及び高密度水の間に入り，前進し（Intrusion），この時周囲の水を巻き込んで連行流を引き起こす（Entrainment）。

生成された密度流の厚さ及び速度については成層の条件（密度勾配）に由来する（Lemckert, and Imberger, 1993）。よって，到達距離はその時の自然条件に左右され，吐出量（吐き出された水量）が同じでも日々違う結果が生じると考えられる。なぜなら，密度成層が静力学的に安定な場合（粘性の効果によって振幅が時間の経過とともに減衰する場合）と不安定な場合（水塊が浮力の作用でもとの位置から離れる場合）が常に存在すると考えられるからである。

よって，実水域・海域において密度流を捉えようとするるとマルチ的な検証（例：数値シミュレーションと水槽試験及び実水域・海域試験）が必要であると同時に，何度か同じ条件で検証試験を行うという努力が必要である。

### 密度流拡散装置

図2に本プロジェクトに用いた密度流拡散装置の概要を示す。密度流拡散装置は，マリノフォーラム21の事業として三重県五ヶ所湾で実証実験されており，水質改善に効果があったとされている（大塚ほか，2007）。また，応用展開として，相模湾での栄養塩揚水装置の実証実験が行われた経緯がある（坂東ほか，2005）。栄養塩拡散の数値計算結果によ

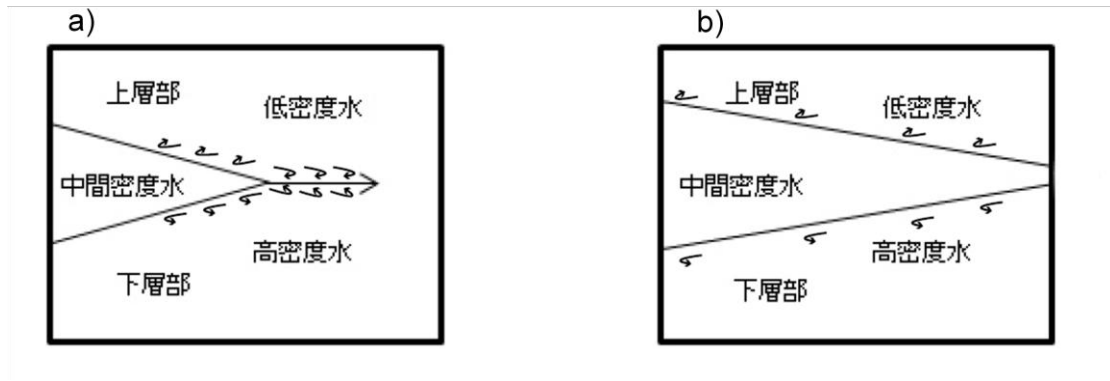


図1 密度流イメージ図. a) 初期段階, b) 後期段階

Fig. 1 Image of density current. a) early stage, b) late stage

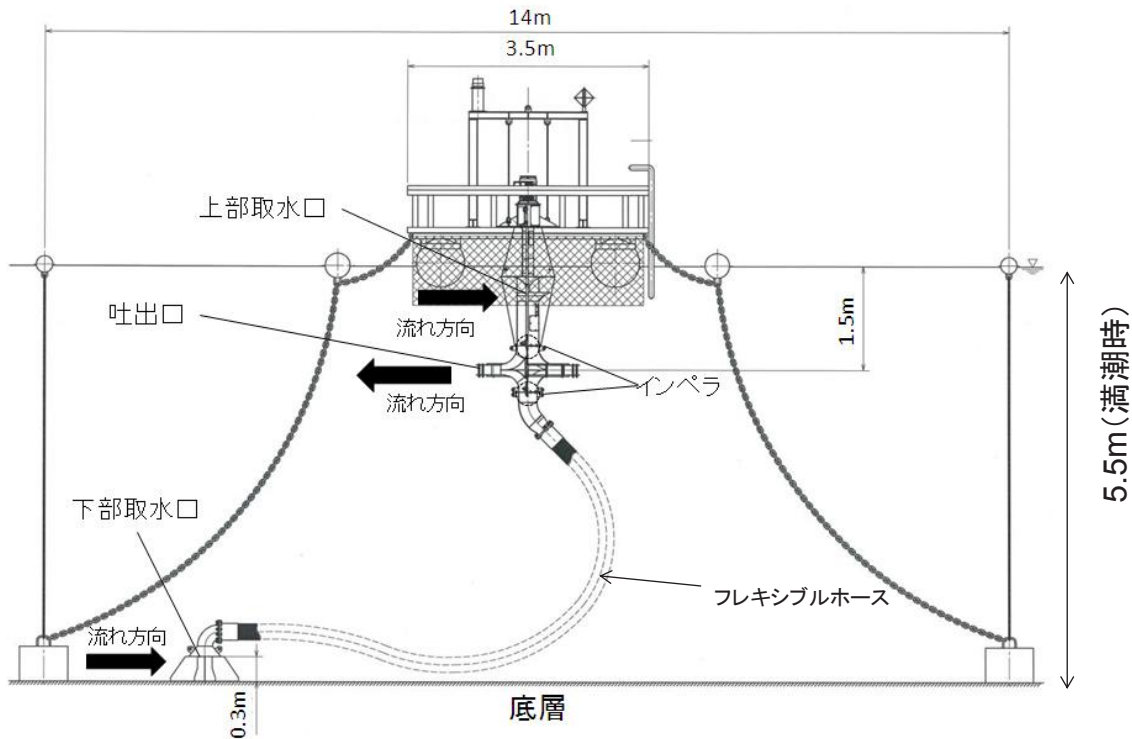


図2 密度流拡散装置システム概要.

Fig. 2 System of Density Current Generator.

ると、50万トン/日の能力で約80km空間においてもプランクトン増殖に寄与する可能性があるとの報告がある(佐藤ほか, 2003)。本プロジェクトの装置への期待は、児島湾奥部の底層改善及び停滞している未利用な栄養塩の拡散である。

本装置はプロペラを2基同軸に取り付けて、水面上の電動機によって駆動させる軸流ポンプである。2基のプロペラが、それぞれ水深0.5mと底層から0.3mの水を取水して、吐出口水深1.5mで強制混合・吐出して人工密度流(人工混合水)を360°全方向

に形成させる。本装置は、ポンツーンに吊下げて固定する。電源は商用電源を用い、陸から海底ケーブルを通して送電され、インバータを介して5.5kW電動機に送り込んでいる。正転・逆転が可能で正転時の取水口を吐出口に変更する事が可能である。装置本体は半径数mを移動するが、下部取水口は底層の所定の位置に固定設置している。干満差(最大:約2m)に対応可能なようにフレキシブルホースを用いた(図2)。装置の取水量は表層 $2.48 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{日}$ 、底層 $0.62 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{日}$ であり、合計 $3.1 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{日}$ の

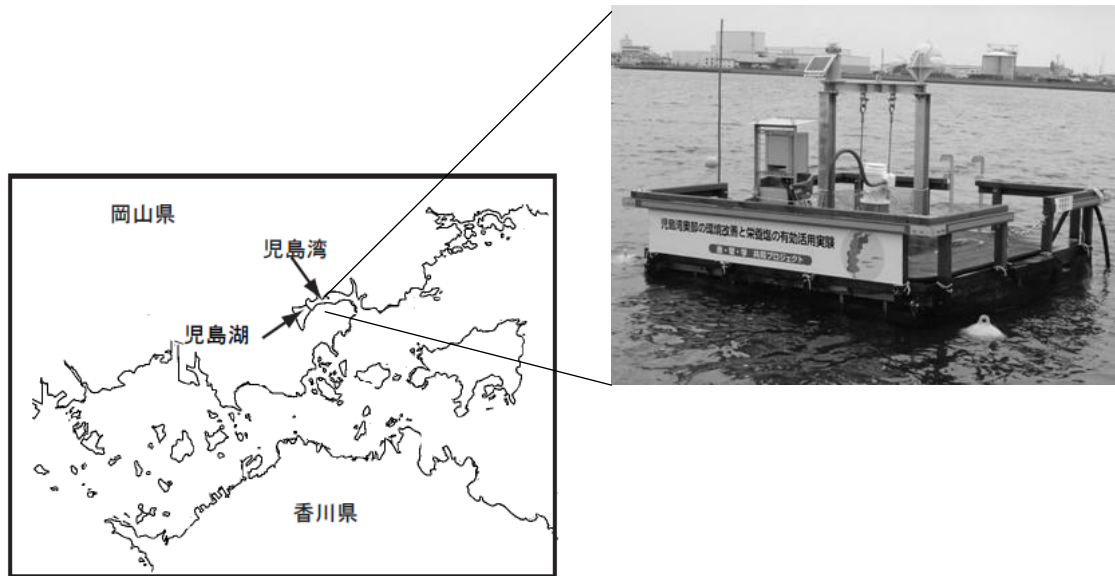


図3 密度流拡散装置の設置場所.

Fig. 3 Lactation of Density Current Generator.

混合水が吐出される。表層の取水量を多くした理由は、冬場のノリ養殖漁期の設置場所近辺において、表層は下層より栄養塩が多く存在していることが環境モニタリングから分かっており、その表層水を有効活用したいという本プロジェクトの目的による。

装置の効率化の点から言えば、遠心ポンプの方が優れているが、今後想定している実験に対応可能なために、敢えて今回軸流ポンプ型装置で試験を行った。密度流拡散装置を効率良く機能させるには、吐出口付近において乱流を生じないようにする吐出流速調整が必要であることが過去の経験から分かっている。これは、バブル型水質改善装置に関しても空気流入速度を調整する必要があり、同様なことが言える。また、装置の目的に応じて、全体移流量（吐出量+連行量）を重要視（水全体の循環作用を重要視する場合）するのか、吐出水の輸送距離を重要視（栄養塩の拡散を重要視する場合）するのかによって吐出流速を変化させる必要がある（大内ほか，2002）。

また、生成された人工密度流（人工混合水）は非常に緩やかな流れであるため、定量することは非常に難しいと思われるが、過去に装置から半径 100 m 以内で 0.5 cm/s~1.5 cm/s という微細な流れを捉えることができたという報告がある（渡辺・山磨，2004）。装置の能力又は自然環境によるが、過去の実証実験から中間人工密度流が数百 m から数 km という範囲で観測されている。

### 実証実験場所

#### 装置設置場所及び周辺部の環境

図3に本実証実験の設置場所を示す。装置は2011年12月14日に4点係留方式で設置を行い、12月17日から稼働させた。設置場所の水深は約6m（満潮時）であった。装置より西側は緩やかな駆け上がりになっており、東側は旭川河口付近まで等水深という地形である。北東部は航路筋になっており、若干水深が深い場所が確認されている。南西には児島湖と繋がっている樋門が一ヶ所あり、干潮時の状況によって約1時間開門する。事前の底部流速調査によると、樋門開時は流速10 cm/sに達するが、通常は上げ潮及び下げ潮に関係なく流速2 cm/s前後と底層部はほとんど動きがない環境であった。また、児島湾の堆積速度は2.0 cm/年という報告があり、航路筋では20 cm/年に達すると言われている（宮野・柴木，1998）。

事前の装置稼働による短期間での拡散シミュレーションによれば、吐出水深の半径400mに物理的変化（流向・流速）が起こるとの結果が出ている。この範囲での実験場所の水量は約 $2.5 \times 10^6 \text{ m}^3$ であり、装置の一日の吐出量の約80倍に相当する。過去の実績から長期的稼働により一日の装置吐出量の100倍の水域に生物相の変化が生じている結果も出ており、事前の拡散シミュレーション結果と一致している（大塚ほか，2007）。よって今回装置による期待される影響範囲（短期間では吐出水深付近の物理的

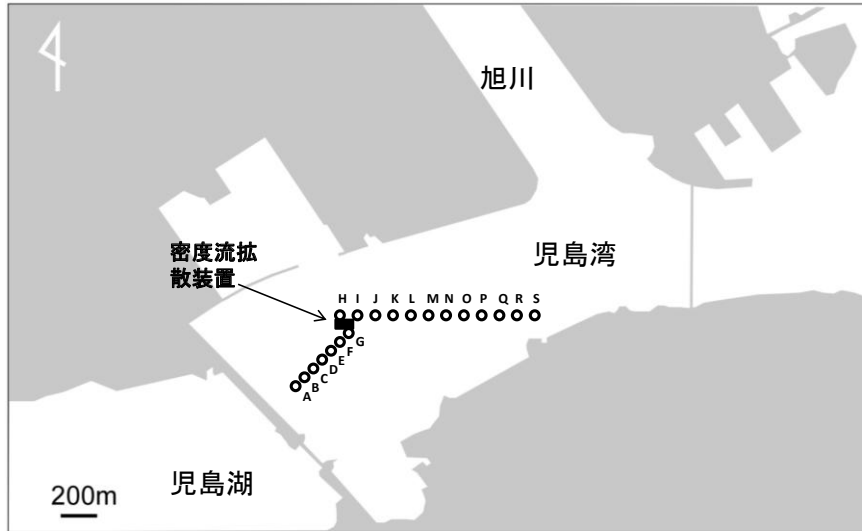


図4 4月サンプリング地点.

各地点の装置からの距離は西側方向：A = 430 m, B = 330 m, C = 250 m, D = 180 m, E = 110 m, F = 30 m, G = 5 m, 東側方向：H = 5 m, I = 50 m, J = 110 m, K = 160 m, L = 210 m, M = 270 m, N = 410 m, O = 510 m, P = 600 m, Q = 700 m, R = 810 m, S = 910 m.

Fig. 4 Sampling location in April.

Westerly distance from device is A = 430 m, B = 330 m, C = 250 m, D = 180 m, E = 110 m, F = 30 m, G = 5 m, Easterly distance from device is H = 5 m, I = 50 m, J = 110 m, K = 160 m, L = 210 m, M = 270 m, N = 410 m, O = 510 m, P = 600 m, Q = 700 m, R = 810 m, S = 910 m.

変化：塩分、水温等)は、半径400mとした。

## サンプリング方法

### 調査の概要及び調査対象水域

調査は、装置稼働約4ヵ月後の4月12、13、14、15、17日及び装置稼働約7ヵ月後の7月25日～26日の小潮時の干潮及び満潮時の潮止まりを中心に行った。小型船舶を利用してCTD (RINKO-Profilier (ASTD102)) 及び Compact-CTD (ASTD 687) により深度、水温及び塩分を計測した。

4月と7月の調査地点及び潮汐を図4及び図5に示す。すべての調査期間において概ね快晴で、雨等の影響はなかった。また樋門の影響を考慮して、樋門の開放時は避けて調査を行った。表1及び表2に4月及び7月の調査の詳細を示す。

### 4月調査時の条件 (スナップショット観測)

4月12日調査時は、12月17日から連続稼働している条件で装置稼働中の状態を測定した。4月13日は、12日の調査終了後に装置を停止させて、18

時間後の干潮時と24時間後の満潮時の装置停止中の水温・塩分を測定した。4月14日は13日の調査後に装置を再稼働して、18時間後の干潮時と24時間後の満潮時の装置稼働中の水温・塩分を測定した。また、装置再稼働2日後の干潮時の15日と4日後の干潮時の17日は、スポット的に装置の近傍の水温・塩分を測定した。

### 7月調査時の条件 (連続観測)

7月25日調査時は、3日前から装置を停止し、干潮時に装置を停止した状態から装置東側の測定を開始した。停止から稼働状態の水温・塩分変化を調べるために停止中から6分間隔で装置稼働24分後まで合計8回(停止中3回、稼働中5回)の水温・塩分を測定した。さらに追加で装置稼働60分後、66分後及び72分後の水温・塩分を測定した。装置稼働72分後に再度装置を停止させた。稼働から停止状態の水温・塩分変化を調べるために停止後6分間隔で24分後まで合計5回の水温・塩分を測定した。地点間の時間差が、なるべく生じないように複数の

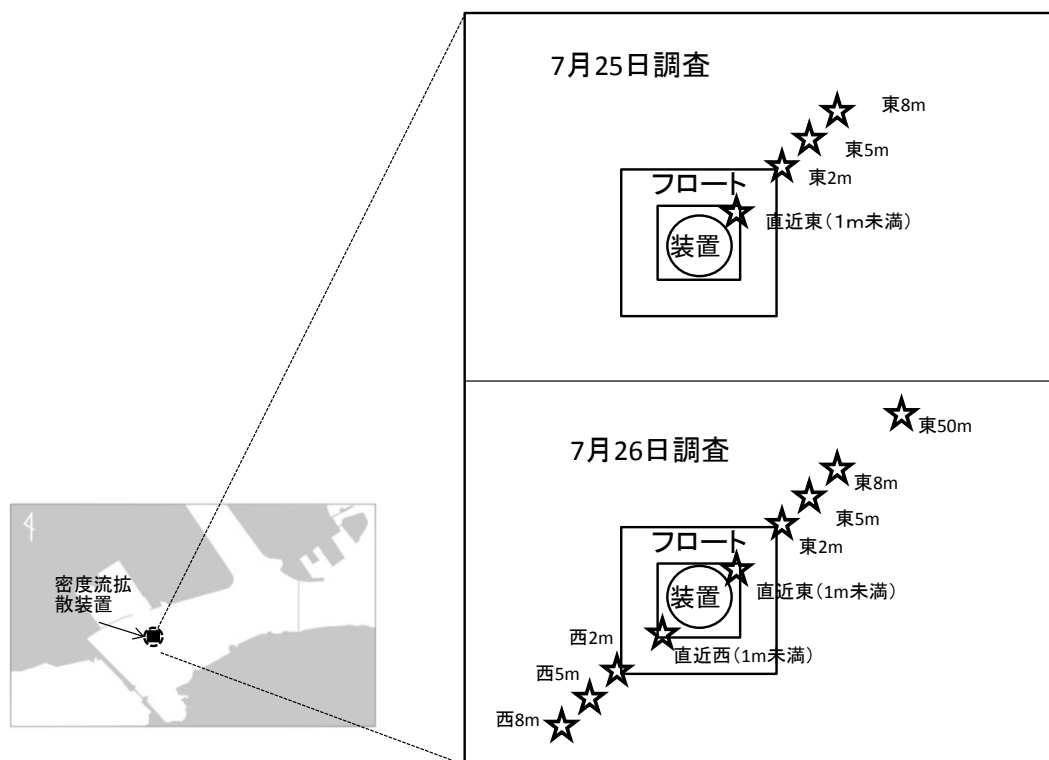


図5 7月サンプリング地点.  
Fig. 5 Sampling location in July.

表1 4月サンプリング概要.

Table 1 Information on April sampling.

2012年4月サンプリング				
日	潮汐状況	稼動状況	測定時の装置運行状況	測定地点
12日	干潮	稼動時	4ヶ月連続稼動	A,B,C,D,E,F,G,H,I,J,K,L,M,N,O,P,R,S
	満潮			
13日	干潮	停止時	停止後18時間	A,B,C,D,E,F,G,H,I,J,K,L,M,N,O,P,R,S
	満潮		停止後24時間	
14日	干潮	稼動時	再稼動後18時間	A,B,C,D,E,F,G,H,I,J,K,L,M,N,O,P,R,S
	満潮		再稼動後24時間	
15日	干潮	稼動時	再稼動後2日	H
17日	干潮	稼動時	再稼動後4日	A,B,C,D,E,F,J,K,L,M,N,O,P,R,S

西側方向:A = 430 m, B = 330 m, C = 250 m, D = 180 m, E = 110 m, F = 30 m, G = 5 m, 東側方向:H = 5 m, I = 50 m, J = 110 m, K = 160 m, L = 210 m, M = 270 m, N = 410 m, O = 510 m, P = 600 m, Q = 700 m, R = 810 m, S = 910 m

表2 7月サンプリング概要.

Table 2 Information on July sampling.

2012年7月サンプリング				
日	潮汐状況	稼動状況	装置稼動又は停止後の測定間隔	測定地点
25日	干潮	停止→稼動	停止時に3回測定し稼動後は稼動直後(0分から)から6分間隔で4回測定	直近東(1m未満), 東2m, 東5m, 東8m
		稼動→停止	稼動60分後、66分後、72分後及び停止直後(0分)からは6分間隔で4回測定	直近東(1m未満), 東2m, 東5m, 東8m
26日	満潮	停止→稼動	停止時に1回測定し、稼動後6分間隔で10回測定	直近西(1m未満), 西2m, 西5m, 西8m
			停止時に1回測定し、稼動後6分間隔で10回測定、稼動60分後から東50mを追加して15分間隔で4回測定	直近東(1m未満), 東2m, 東5m, 東8m, 東50m

物理的指標による密度流拡散装置からの吐出水の観測

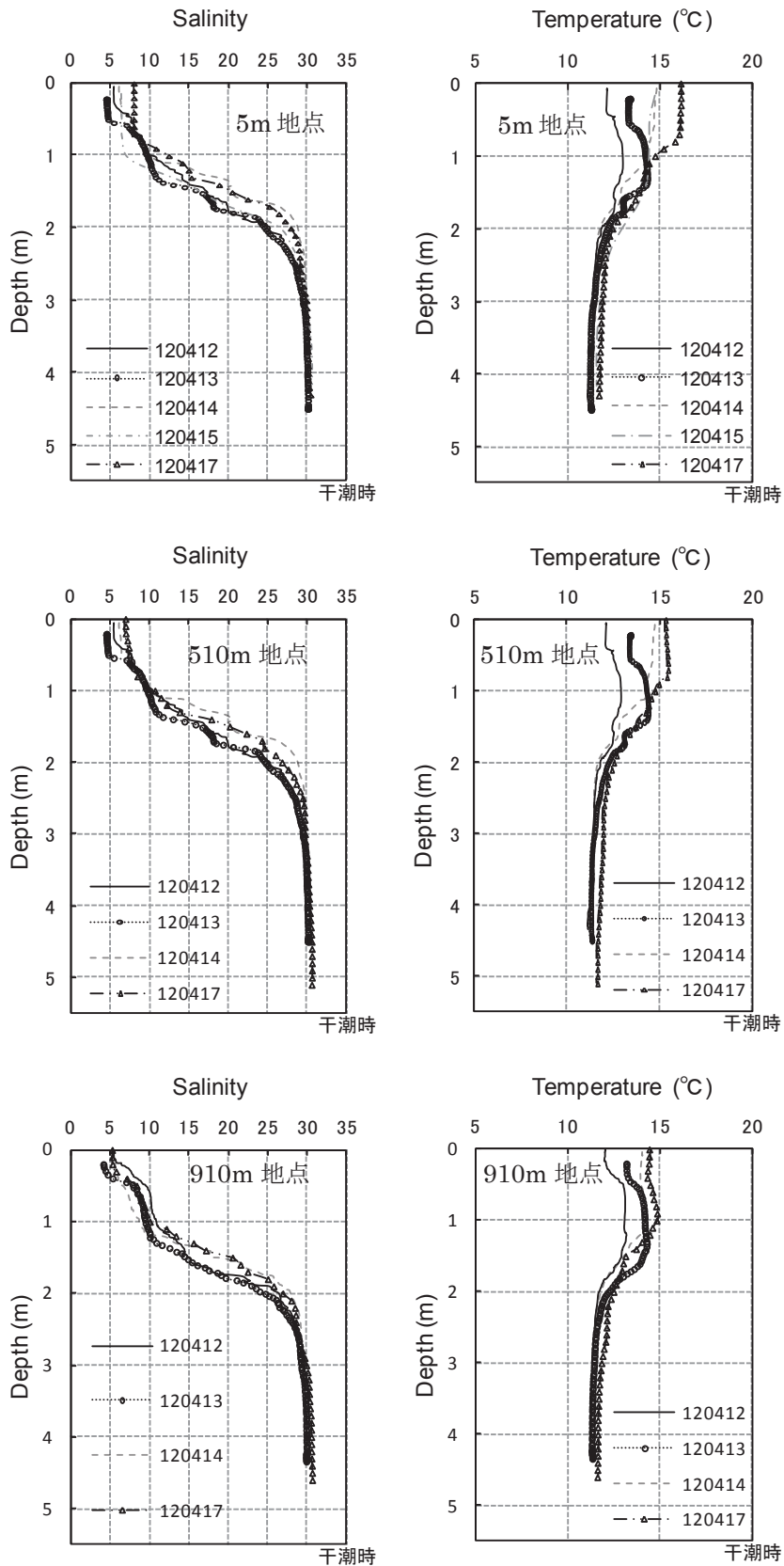


図6 装置から5m, 510m, 910mの塩分・水温測定結果:干潮時の4月調査. 120412:4月12日調査, 120413:4月13日調査, 120414:4月14日調査, 120415:4月15日調査, 120417:4月17日調査.

Fig. 6 Salinity and temperature profiles at 5 m, 510 m and 910 m from device -low tide sampling in April. 120412: April 12 sampling, 120413: April 13 sampling, 120414: April 14 sampling, 120415: April 15 sampling, 120417: April 17 sampling.

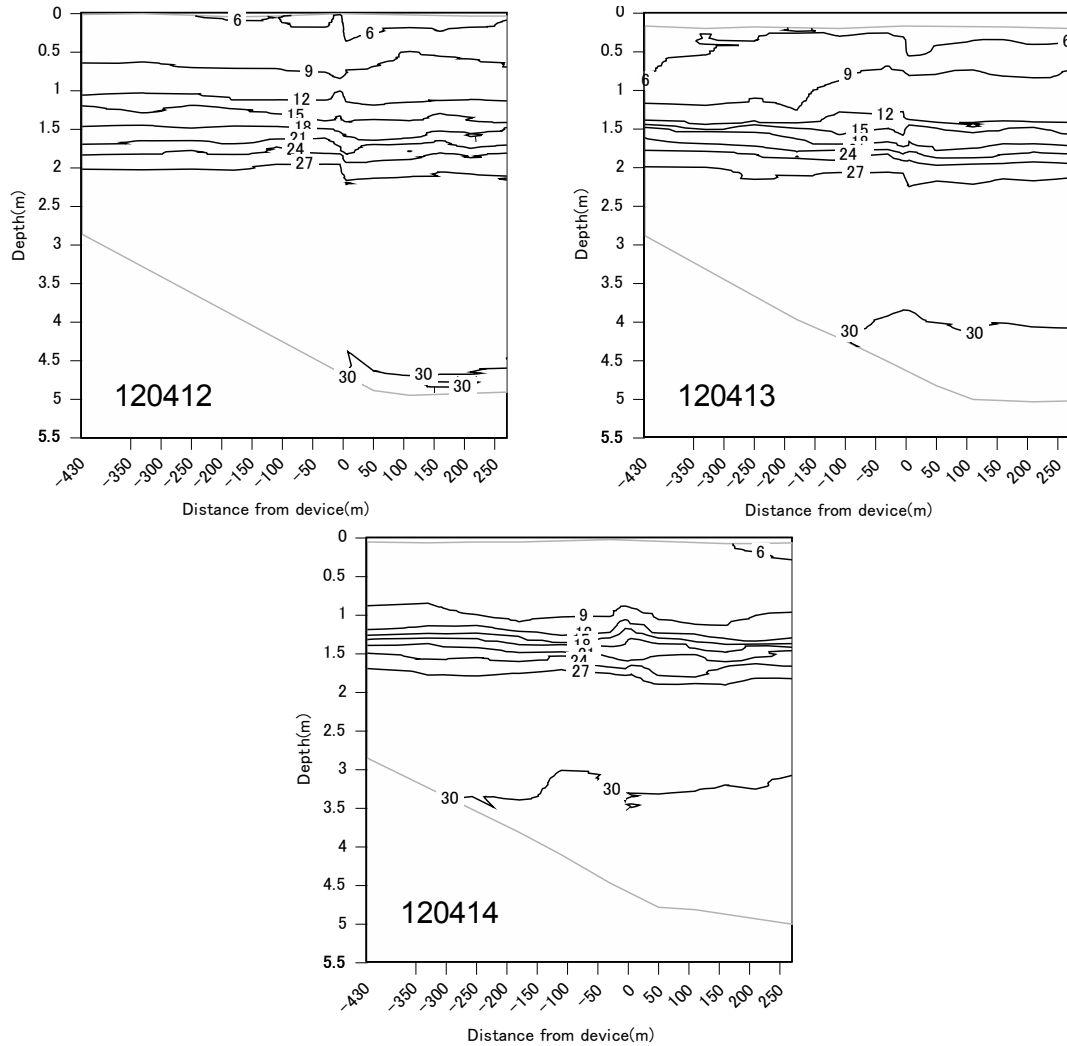


図7 各稼働条件時の干潮時の塩分分布図. マイナスは西側, プラスは東側を示す. 120412 : 連続稼働時, 120413 : 停止時, 120414 : 再稼働時.

Fig. 7 Cross-section of salinity at low tide under different operational conditions. -: westerly distance from device, +: easterly distance from device.

CTD を用いて水温・塩分を測定した.

7月26日調査時は, 25日から装置停止約27時間後の満潮時に測定し, その後装置を稼働させてから6分間隔で装置東及び西側の水温・塩分を測定した. 75分後から東側を中心に装置から50m離れた地点まで測定した(75分後, 90分後, 105分後, 120分後). 地点間の時間差が, なるべく生じないように複数のCTDを用いて水温・塩分を測定した.

## 結果

### 4月調査干潮時

図6に干潮時の主要な測定地点における, 水温・

塩分鉛直分布を示す. 図6より, 装置長期稼働時(120412)の吐出口水深付近(1-2m)の鉛直塩分変化は, 装置から5m, 510m及び910m地点において段差のない緩やかな勾配を示した. また, 長期稼働時においては, どの地点でも顕著な塩分躍層は観測されなかった. しかし, 装置停止時(120413)は, 5m及び510m地点において水深0.5, 1.5及び1.8m付近に3段階の急激な水温・塩分変化(躍層)及び910m地点においては水深0.5及び1.5m付近に2段階の躍層が観測された. 装置再稼働時(120414)は, 装置から5mの地点において顕著な躍層は観測されなかった. また, 装置再稼働時は, 装置から5m地点と510mにおいては吐出口水深(1.5m)の塩



分は20で一定であるが、910 m地点では塩分は水深ともに増加した。装置再稼働4日後の表層において、910 m地点は塩分が他の2地点と比較して低い傾向を示した。吐出水深付近(1.5 m)においては、それぞれの測定地点において、塩分増加率が似ている傾向を示した(5 m地点:10/50 cm, 510 m地点:10/50 cm, 910 m地点:12/50 cm)。

長期稼働時、停止時及び再稼働時の装置周辺部(西側430 mから東側250 m)の塩分分布を図7に示す。長期稼働時及び再稼働時は装置直近(0 m付近)の吐出口水深において装置直近(0 m付近)で塩分変化が観測されたが、50 m以上離れた地点では塩分分布の乱れは観測されなかった。装置停止時においては、西側430 mから200 m地点までの水深1.2 mは塩分9であるが、その地点より東側は、1 m以浅に塩分9が観測された。また、装置停止時では、装置吐出口水深1.5 m ±0.1 mにおいて水深に対する塩分の変化が観測された(3~4/20 cm)。塩分30の分布は4月12日では0 m地点、4月13日では西側100 m地点、4月14日では西側300 m地点まで入り込んでおり、測定日によって異なった分布傾向を示した。

上層部(1 m以浅)の水温は、装置稼働の有無にかかわらず、どの地点でも上昇傾向(約12°C→約15°C)を示した(図6)。特に装置周辺(5 m地点)は5日間で4°C上昇した。装置長期稼働時(120413)は、顕著な水温躍層(水温変化)は装置吐出口水深で、5, 510, 910 m地点においても観測されなかった。しかし、装置停止時(120414)は装置吐出口水深1.5 mで、5, 510, 910 m地点において水温変化(約2°C)が観測された。装置再稼働後(4月14日以降)は、水深1~2 mで水温変化が5, 510, 910 m地点において観測された。

#### 4月調査満潮時

図8に満潮時の主要な測定地点における、水温・塩分鉛直分布を示す。満潮時における装置長期稼働時の5 mと910 m地点の塩分鉛直分布は3段階の躍層(0.5, 1.5, 2 m)を形成していた。

装置停止後の塩分鉛直分布図は各地点で異なった挙動を示した。910 m地点は水深0.5 mと2 mに塩分変化が観測されたが、5 m地点では水深1.5 mから2.5 mに塩分変化があり、510 m地点では水深1.5 mから3.2 mに変化が観測された。

再稼働1日後の鉛直分布図は装置近辺(5 m)と510 mの塩分は、水深1.5 mから2 mまで徐々に増加しており、明確な段差は観測されていないが、

910 m地点は水深1.1 m付近で大きな変化が観測された。また910 m地点は水深3 m付近まで塩分が徐々に増加した。

干潮時と満潮時の同日測定において、水深1 mから2 mの範囲で比較すると、多くの場合、満潮時は、装置稼働の有無にかかわらず塩分の段差(躍層)が観測されやすかった。

水温に関しては、塩分分布と同様に、満潮時は装置稼働の有無にかかわらず、水深1 mから2 mの範囲で水温の段差が確認された。4月14日装置再稼働時の装置近辺(5 m)においても、吐出口水深付近で水温の段差が確認された。干潮及び満潮時の装置稼働時(4月12日及び4月14日)の装置近辺(5 m)、510 m及び910 m地点は、表層部において高水温を観測したが、装置停止時は、3地点において水深1 mから2 m付近に高水温が観測された。また、4月12日の満潮時の910 m地点において、水深0.8 m付近に低水温が観測された。装置近辺の吐出口水深付近(1.2 m)では、水温変化が生じていたが、装置から離れた場所(910 m)では、そのような変化は観測されなかった。

#### 7月調査干潮時

図9に、7月25日干潮時調査の塩分鉛直分布を示した。装置停止時の状態から稼働24分後及び稼働60分後の状態から停止時までの塩分鉛直分布の経時変化を示した。

装置停止→装置稼働(7月25日)

装置直近地点において、装置稼働直後に吐出口水深1.5 m地点で塩分変化が観測された。東8 m地点の水深0.25 mから2.5 m付近において装置稼働前後で塩分勾配の変化が観測された(稼働前:14/1.5 m, 稼働後:14/2.3 m)。装置稼働直後では、東8 m地点において鉛直塩分変化は稼働前と同様であったが、稼働6分後から水深0.5 m付近の塩分が稼働直後と比較して約4増加した。

装置稼働→装置停止(7月25日)

装置直近地点において、装置稼働60分後、66分後、72分後は、水深1.5 m付近に低塩分の鉛直塩分分布が観測された。装置停止後は、水深1.5 m付近の塩分が上昇した。東8 m地点において、稼働66分後、72分後及び停止直後に水深1~1.5 mで塩分の低下が観測された。

図10に停止時、稼働直後、稼働12分後、24分後、

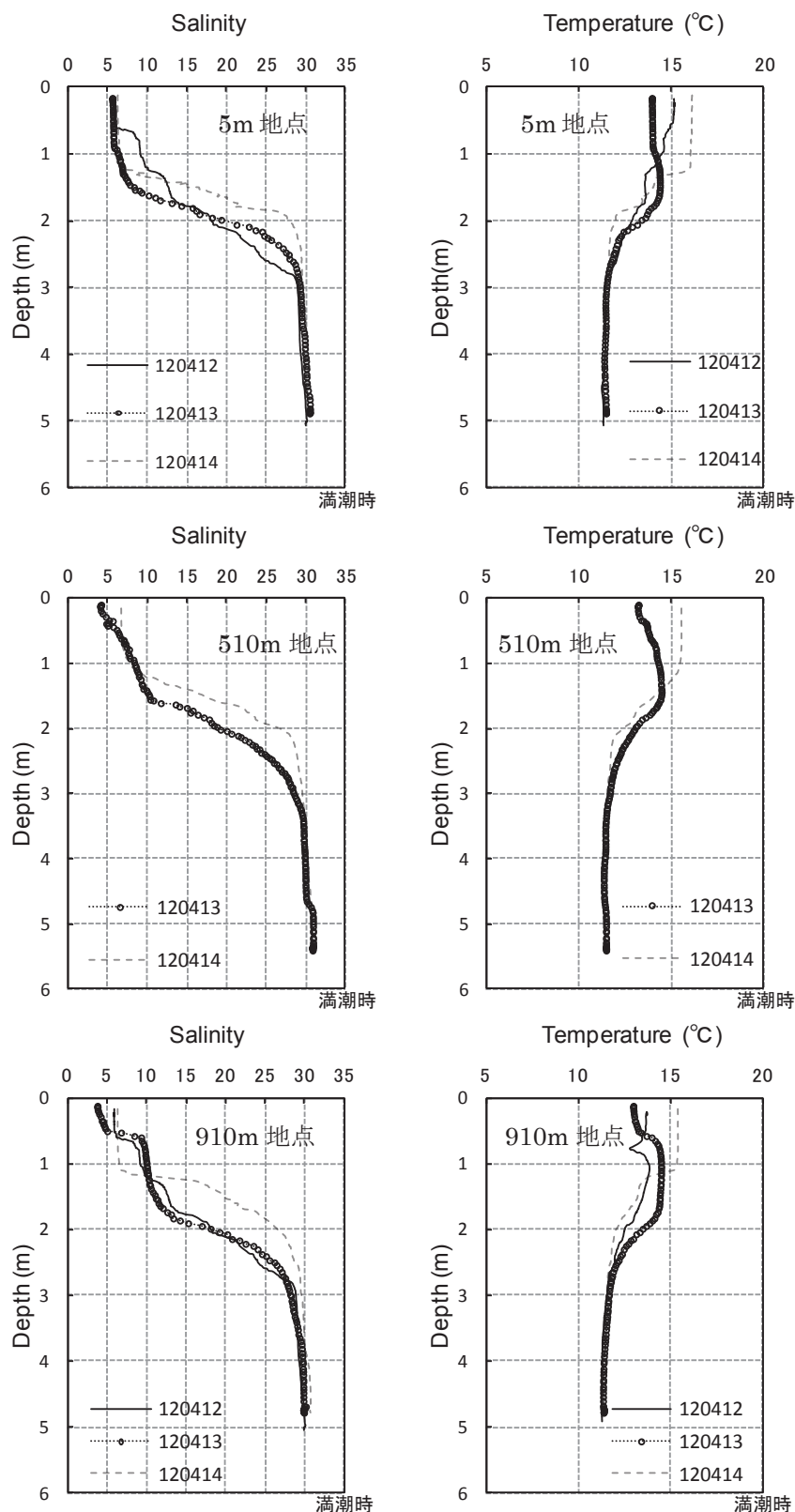


図8 装置から5 m, 510 m, 910 mの塩分・水温測定結果-満潮時の4月調査. 120412: 4月12日調査, 120413: 4月13日調査, 120414: 4月14日調査, 120415: 4月15日調査 120417: 4月17日調査.

**Fig. 8** Salinity and temperature profiles at 5 m, 510 m and 910 m from device -high tide sampling in April. 120412: April 12 sampling, 120413: April 13 sampling, 120414: April 14 sampling, 120415: April 15 sampling, 120417: April 17 sampling.

物理的指標による密度流拡散装置からの吐出水の観測

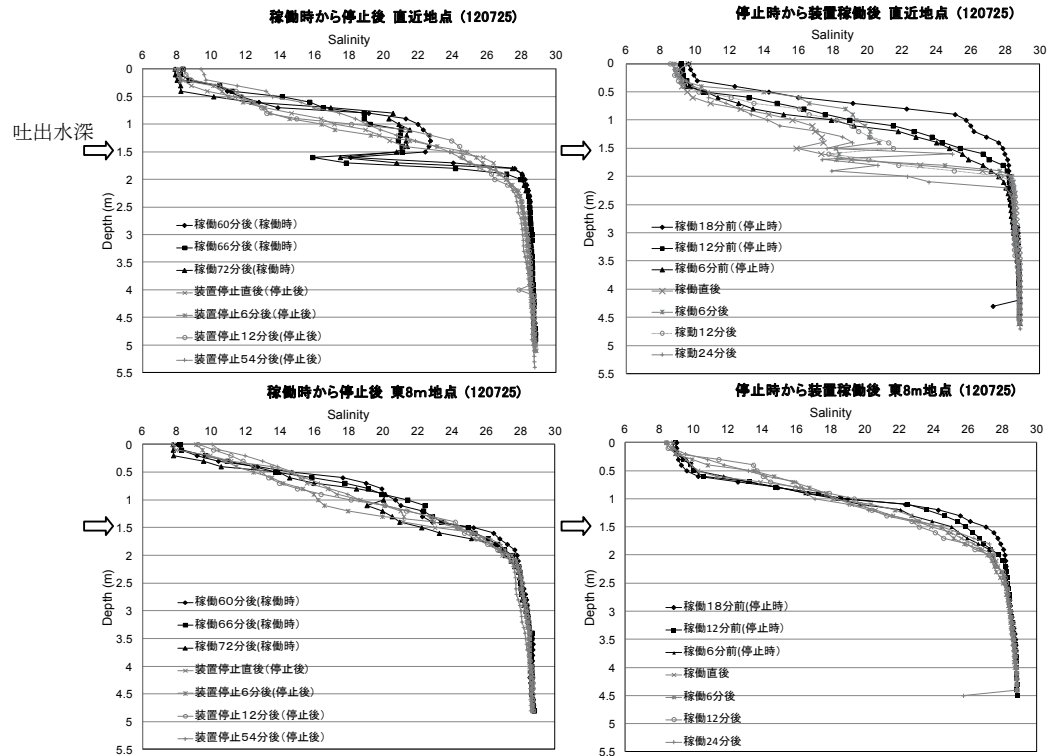


図9 各稼働条件時の装置直近及び東8mの7月25日塩分鉛直分布.

Fig. 9 Salinity profile at near-device and 8 m away from device under different operational conditions on July 25.

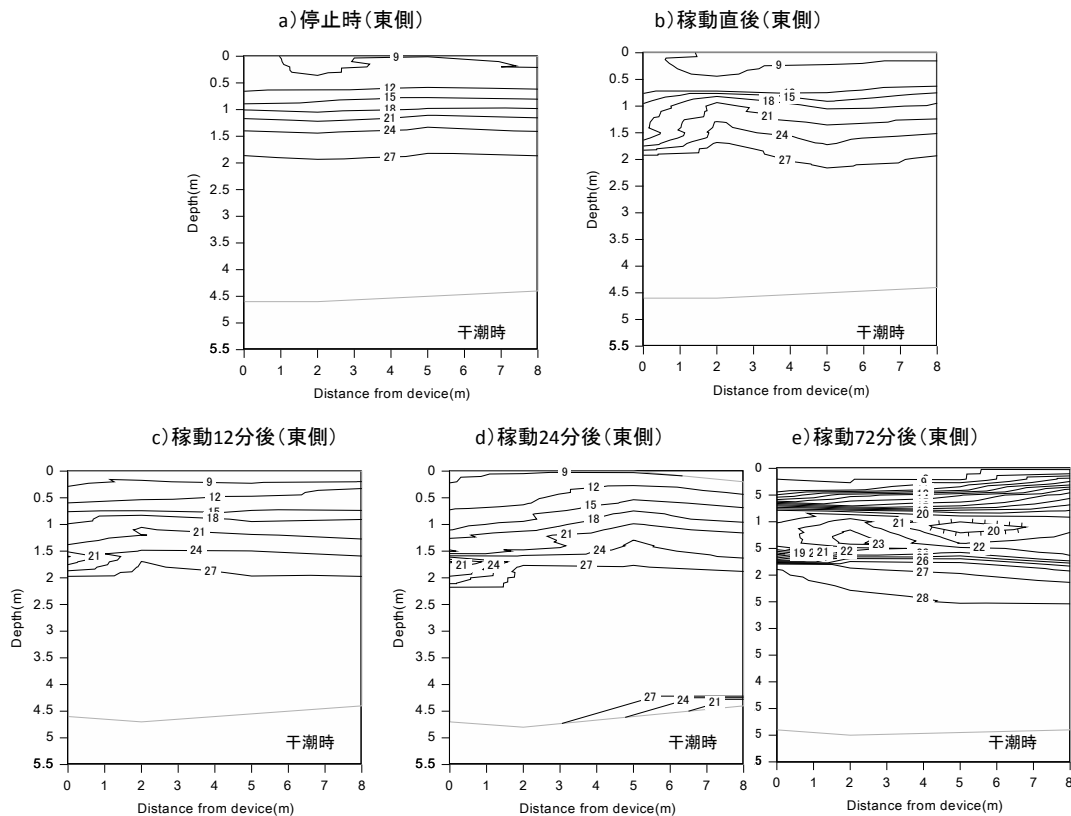


図10 装置稼働後の塩分分布の経時変化 (7月25日).

Fig. 10 Time series of cross-section of salinity on July 25.

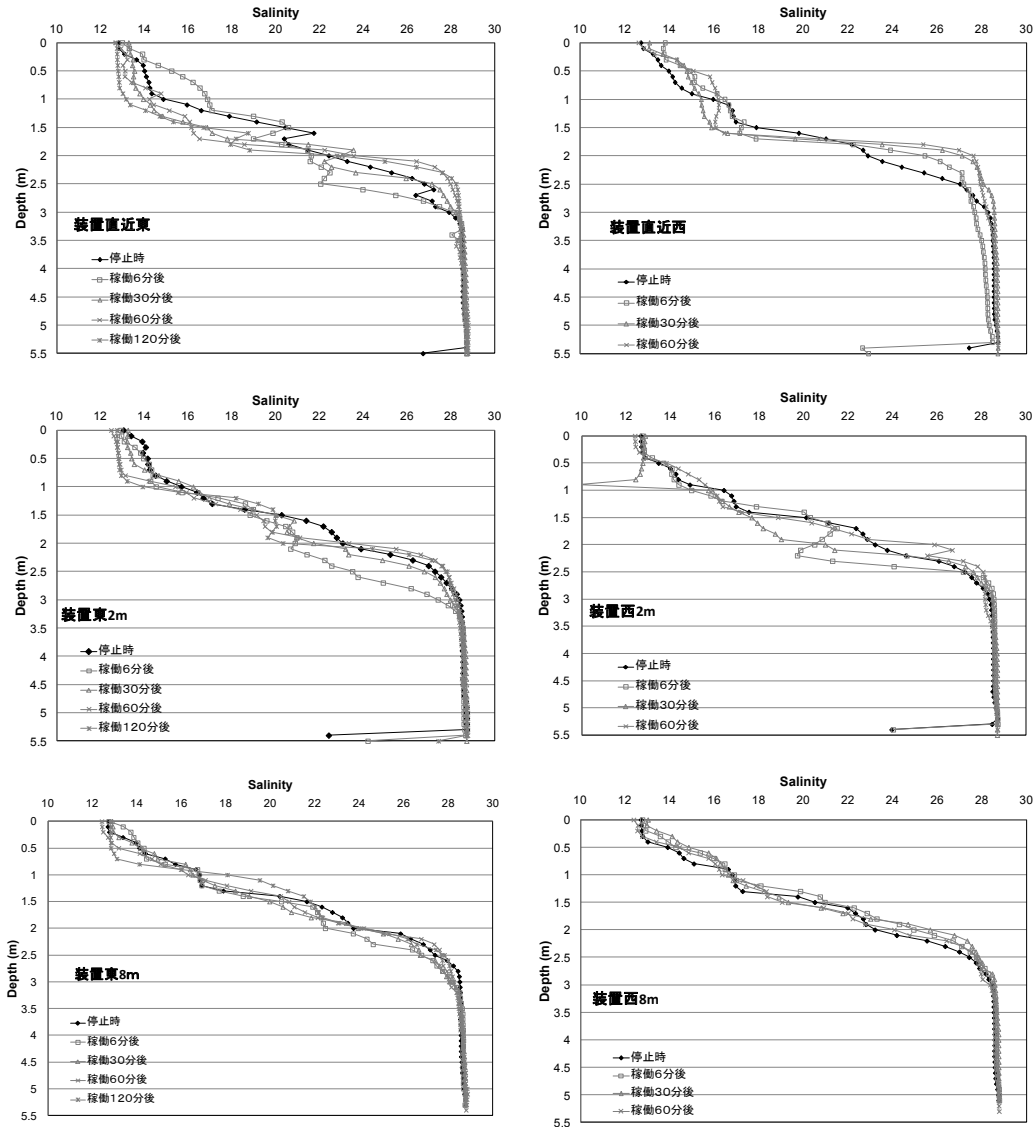


図 11 各稼働条件時の装置直近東西，東西 2m，東西 8m の 7月 26 日塩分鉛直分布。  
 Fig. 11 Salinity profile at east-west near-device, east-west 2 m and 8 m away from device under different operational conditions on July 26.

72 分後の装置周辺 8 m の塩分分布を示した。装置稼働後に装置周辺 (3 m 以内) で塩分変化が生じた。24 分後では装置から 8 m 付近には変化が見られないが、72 分後には水深 1.5 m 付近において低塩分(20 前後) を観測した。

7月調査満潮時

図 11 に、7月 26 日調査の停止時から稼働後の塩分鉛直分布を示した。

装置停止→装置稼働 (7月 26 日)

東側と西側において、特に装置直近で塩分鉛直分布が異なった挙動を示した。装置東側直近におい

て、稼働後 6 分及び 30 分後まで水深 1.5 m から 2.5 m で低塩分が観測されたが、時間が経つにつれて低塩分は観測されず、水深とともに緩やかに塩分は増加した。装置から 8 m 離れた地点の装置停止時は、東側と西側において、塩分変化の段差が観測された。装置稼働後は西側で上層部の塩分が増加した。装置直近東側は、装置停止時の水深 1.7 m 付近と 2.6 m 付近にスポット的に低塩分の値が観測された。装置稼働後は東側及び西側 (2 m 以内) とともに吐出口水深付近 (1.5 m ~ 2.5 m) で低塩分の値が観測された。装置停止時は東側の装置直近を除いてスポット的な低塩分の値の鉛直分布は観測されなかった。

東側 50 m 地点においては、稼働 75 分後と 120 分

物理的指標による密度流拡散装置からの吐出水の観測

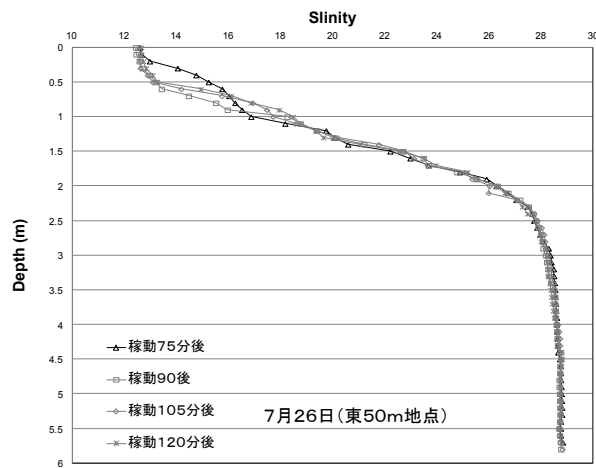


図 12 各稼働条件時の東 50 m の 7 月 26 日塩分鉛直分布.

Fig. 12 Salinity profile at east 50 m away from device under different operational conditions on July 26.

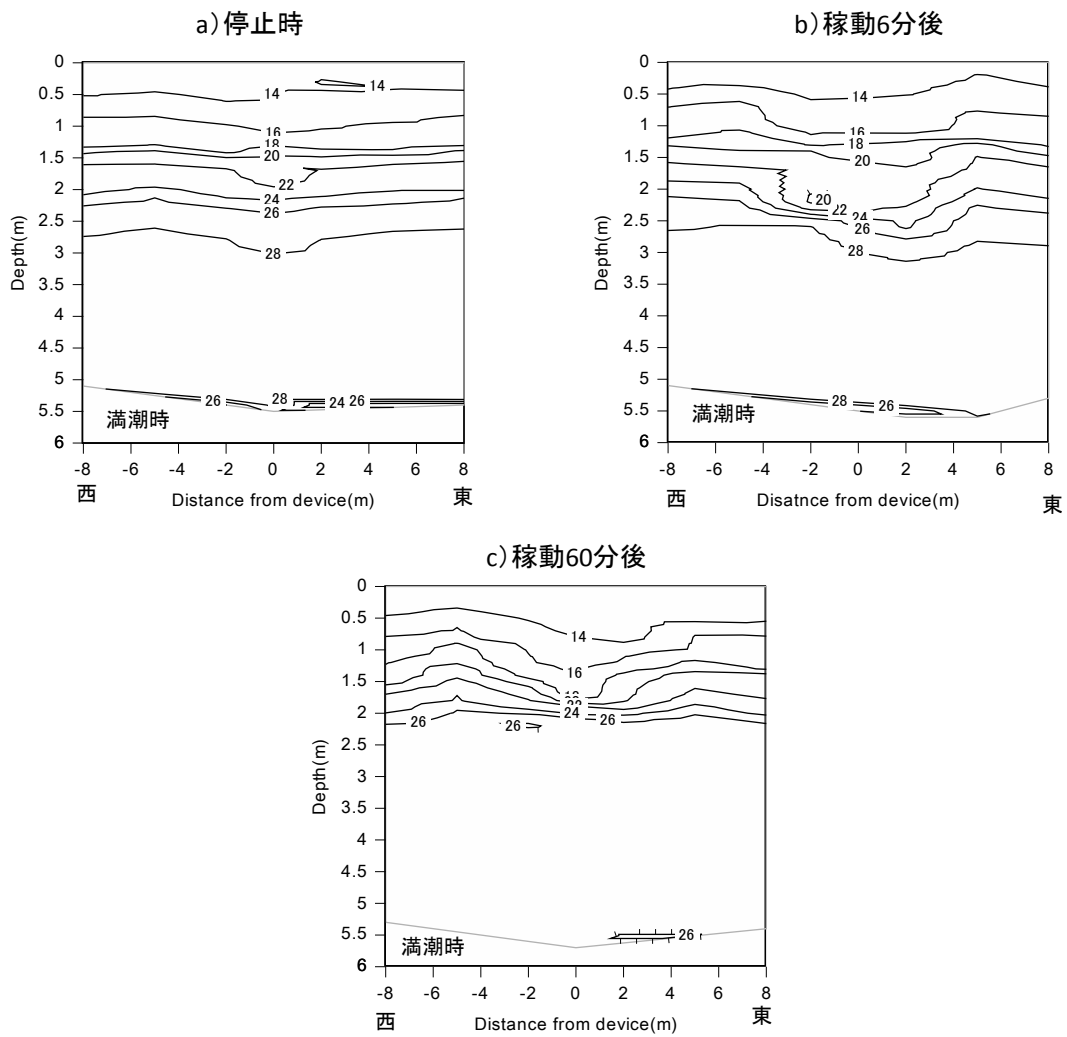


図 13 装置稼働後の塩分分布の経時変化 (7 月 26 日).

Fig. 13 Time series of cross-section of salinity on July 26.

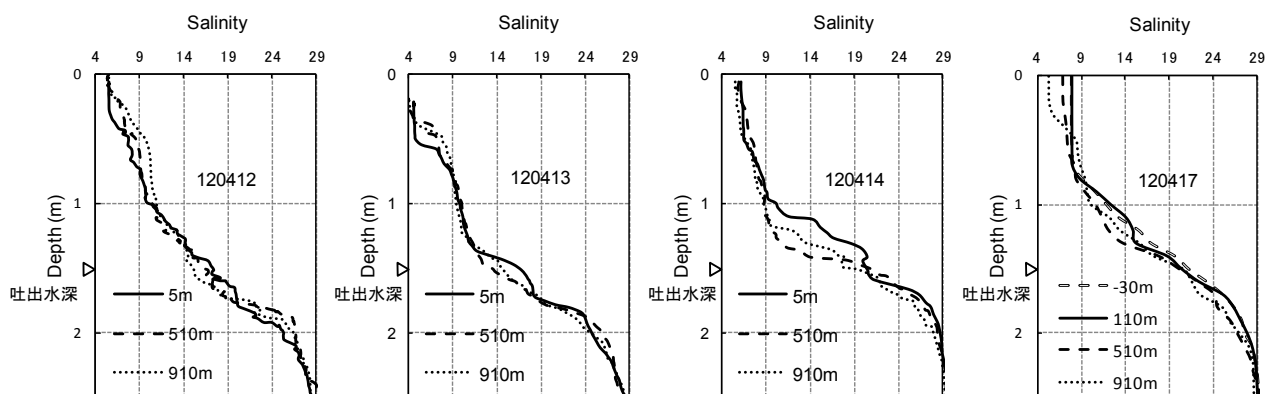


図 14 吐出口水深の各地点の塩分鉛直分布の比較. 120412：長期稼働, 120413：停止時, 120414：再稼働 (1 日後), 120417：再稼働 (4 日後).

Fig. 14 Comparison of salinity profile at each station at around discharged mouth depth. 120412: long-term operation, 120413: non-operation, 120414: one day on, 120417: four days on.

後の水深 1.5 m 付近で塩分変化は 2 以下で大きな違いは観測されなかった (図 12).

上層部 (水深 1.2 m 以浅) においては, 時間経過に伴い塩分変化が水深 0.5 m から増加することが観測された. また, 稼働 105 分後の水深 2 m 付近において塩分の低い値が観測された.

図 13 に停止時, 稼働 6 分後及び 60 分後の塩分分布を示した. 装置稼働直後に, 吐出口水深で塩分の低い値が観測された. 装置稼働直後と稼働 60 分後の塩分分布は装置周辺のみ塩分の乱れがあり, 装置から 4 m 離れたところでは乱れは観測されなかった. また装置稼働直後と稼働 60 分後の上層部 (水深 1 m 以浅) では大きな乱れ (塩分変化) は観測されなかった.

## 考 察

人工混合水を物理的な指標から判断するため, 4 月と 7 月の実験結果を評価する. 潮汐等の影響を取り除くことができ, 装置の効果のみをみることができるのは干潮時の潮止まりであると考えられる. 4 月干潮時の鉛直塩分分布図から判断すると, 長期稼働時 (4 月 12 日) は装置 5m 付近から 910 m まで離れた地点の水深 1 m~2 m において塩分が滑らかに増加しており, 大きな段差 (躍層) は見られない (図 14). 特に装置から 5 m と 510 m 地点は鉛直塩分分布が重なる部分が多く, かつ類似していた. ところが, 装置停止中 (4 月 13 日) の装置 5 m は水深 0.5 m, 1.5 m, 1.8 m において, 塩分躍層が見られたが, そ

他の地点では異なった鉛直分布を示していた. 再稼働 1 日後 (4 月 14 日) の装置 5 m は水深 1 m から 2 m において躍層の破壊が見られるが, 510 m と 910 m 地点の水深 1.5 m に塩分躍層が見られる. これについては, 人工混合水は非常にゆっくりとした流れであることを考慮すると, 1 日後では装置より離れた地点には大きく影響していないと考えるのが妥当である (渡辺・山磨, 2004). また, 外因的な要因の方も考慮する必要がある. 例えば, 旭川の影響は今後, 装置を評価する上で重要と考える. 当初, 910 m 地点は影響が少ないと考え, 対象区として選定したが, 本プロジェクトの観測調査から旭川河口により近い地点の上層部 (910 m 地点) では低塩分水が観測される傾向にある. よって, 基本的には 910 m 離れた地点の水塊は装置周辺の水塊より旭川の影響を受けやすいので, 910 m 地点の水塊は他の地点と異なると考えても問題ないように思える. その場合, 装置停止時には地点ごとに少なからずの外因的な要因が生じて, 躍層の水深位置又は強弱は異なると思われる.

装置連続稼働 4 日後 (4 月 17 日) においては, 長期稼働時と同様に装置 (西側 30 m) から 910 m 地点での吐出水深 (1.5 m) 付近は急激な塩分変化を生じておらず, 再び各地点において重なり合う鉛直分布を示している. これは, ある程度時間が経過すると人工混合水 (密度流) が進行することによる均一化が生じるのではないかと推定する. この場合は, 本プロジェクトで事前に行った簡易的なシミュレーション結果と過去の密度流拡散装置での実証実

験結果から推定した効果の範囲と一致する（大塚ほか, 2007）。この点に関しては、今後再現性を含めて、モニタリング調査から判断する必要がある。

装置から吐出した水が上層部又は下層部へ運ばれて、再び装置がその水を取水して近傍での循環が起これない限り、時間的な問題はあるにしても、人工混合水は重力等によって遠方へ運ばれる可能性はあると考えられる。その時に考慮しなければならないのが、どのくらいの厚さの層が最初の人工混合水（密度流）として流れているかである（輸送量）。基本的にクサビ形状で進行するので、進行するにつれて層は薄くなると考えられている。しかし、装置吐出口付近では、ある程度乱流が生じていると考えられるので、予想以上に最初の生成された人工混合水層は厚い可能性がある。染色物質を用いて、人工混合水の追跡調査を行った時も、吐出口幅 30 cm に対して 1 km 離れた地点でも、数 10 cm の厚さの層が観測された（Fukuda et al., 2011）。4 月の結果では、スナップショット的であるのと測定地点が少し粗い為、この点については、どれが人工混合水の層なのかを明確にすることはできなかった。さらに、1 日後の観測であること、潮汐の影響さらに旭川及び児島湖樋門からの流入水の影響等、様々な外因があり、厳密に 4 月の実験結果から装置の影響のみを評価することは非常に難しい。

そこで、4 月調査の外的要因をさらに取り除いた実験が 7 月の実験であった。装置稼働前後の装置周辺部の水塊の動きは明確に捉えられたと考えられる。結果から判断できるように、装置停止から稼働、さらに停止後の吐出口水深付近の塩分変化は整合性が取れている。つまり、装置を稼働させると吐出口付近では低塩分になり、停止させるとその低塩分は消えた。装置直近では、かなり塩分分布が乱されていることが結果から分かる（図 8）。

装置から少し離れた地点（8 m）においては時間的タイムラグを捉えられたと考えられる。稼働 66 分後及び 72 分後において、水深 1 m から 1.5 m 付近で人工混合水が進行した塩分低下の現象が見られた。これは装置直近に見られた塩分低下の現象と同じであることを考慮すると、7 月の実験時に生成された人工混合水は、かなりゆっくりとした流れである。

50 m の地点では、装置稼働 120 分後においても明確な変化は観測されなかったが、吐出された人工混合水が上層部又は下層部へ進行したという現象は捉えていないので、連続稼働により人工混合水は 50 m 地点には到達すると考えるのが妥当である。

上層部に水が上昇するときは目視で捉えることができる場合があるが、そのような現象は本実験中に確認することはできなかった。装置から吐出された人工混合水は、装置から数 m 離れると極端に速度が遅くなることと、実験時の潮汐の影響（上げ潮時）を考慮すると 2 時間後に 50 m 地点に到達できない可能性はあるが、数日経過すれば人工密度流は 50 m まで到達すると予測される。

人工密度流が時間をかけて長距離まで到達する場合、4 月に行ったスナップショットの実験へ発展させて、もう少し広い範囲で人工混合水が到達しているとも考えることもできる。前述したように、5 m, 510 m 及び 910 m 地点の塩分分布も装置稼働の有無により、差が生じていることは、人工混合水が 50 m 以上到達していることを示唆している。しかし、到達距離を正確に推定するには人工混合水に伴う連行流の評価も必要になり、現時点では困難である。

今回の物理的指標を用いた実験方法からは、どこまで到達したかは 910 m 地点が限界であろうと考えられる。さらに、科学的に判断するには、様々な自然条件（季節及び潮汐）で検証を行うことも必要と考える。910 m より離れた地点は旭川の影響があるので、本実験方法のみでは装置の影響と旭川の影響を分別するのは難しい。

また満潮時、干潮時、上げ潮時、下げ潮時と条件による人工混合水の影響の違いが今回の実験から推測される。今回の実験結果のみから言えば、干潮時の方が装置の効果を引き出せると考えられる。なぜなら満潮時は水が湾内に入ってくるのでデータのバラツキが生じて装置による明確な変化が捉えにくいからである。

## ま と め

密度流拡散装置は、省エネルギーで広範囲に水を拡散することをコンセプトに開発された水質改善装置である。様々な環境下で実証実験を行っているが、児島湾のように通年を通して躍層が存在する水域での実証実験は初めてである。今回、装置より生成された人工混合水の拡散効果を評価するために物理的な指標を用いて、4 月と 7 月の装置稼働前後の満潮及び干潮時に集中的に調査を行った。装置周辺の断続的及び連続的調査結果によって、人工混合水が吐出口付近から生成されていることが分かった。しかも、吐出口幅（14 cm）より 2～3 倍も広い範囲の層に吐出されていることが観測された塩分分布から示

唆された。また、装置稼働 60 分後には装置より半径 8 m まで達していることが確認され、非常に速度の遅い流れであることが分かり、流速計で捉えることは難しいことが分かった。潮の影響を考慮しない、吐出量からの理論計算によると 60 分後には約 30 m に達する。さらに 4 月及び 7 月の実験結果から吐出された混合水が装置周辺のみで循環している様子は観測されなかった。この場合、4 月調査の長期稼働時と停止時の状況から判断すると約 500 m まで中間層で人工混合水による躍層破壊の影響があったことが示唆される。ただ、潮汐の影響、旭川及び児島湖樋門の影響について加味する必要があるため、再現性を含め継続的に調査を行って最終評価をする必要がある。

また、装置の水質改善効果については今後、様々な角度から評価を行い総合的に判断する必要がある。

## 謝 辞

本研究を行うにあたって、岡山県農林総合センターの高木秀蔵氏、弘興正憲氏、ならびにナカシマプロペラ（株）の原田泰典氏に大変お世話になった。また小型船舶を快く貸して頂いた竹原雄一氏に大変お世話になった。この場を借りて以上の方々にお礼申し上げる。

## 引用文献

大内一之, 山磨敏夫 (2000) 密度流拡散における連行の研究. 第 15 回海洋工学シンポジウム, 333-338.

大内一之, 福宮健司, 山磨敏夫, 荻原誠功 (2002) 成層海域における密度流の挙動に関する実験的研究. 日本造船学会論文集, 191: 35-42.

大塚耕司, 中谷直樹, 大内一之, 栗島裕治, 山磨敏夫 (2007) 五ヶ所湾における密度流拡散装置の環境修復効果. 日本船舶海洋工学学会論文集, 6: 57-63.

岡井 隆, 笹田康子, 小蓑幸代, 田中さと子 (2007) 曝気法による湖沼の水質浄化及び藍藻類増殖の抑制. 香川県環境保健研究センター所報, 6: 29-36.

木村文宣, 牛島 健, 森川一郎 (2009) プロペラ式循環装置による水質改善効果予測 - 千屋ダムの事例 (ダム貯水池等の水質保全対策に関する調査研究). ダム水源地環境技術研究所所報, 3-10.

佐藤 徹, 吉川拓郎, 土屋好寛, 齊藤 周 (2003) 水理模型実験と数値計算による密度流拡散装置の水

質改善効果について. 第 4 回 MEC モデルワークショップ, 115-125.

高木秀蔵, 岩本俊樹, 飯野浩太郎 (2009) 児島湾における底質環境の現状と近年の変化. 岡山県水産試験場報告, 24: 1-5.

Nomura, N., Minami, A., Yamatogi, T., Ouchi, K., Oka, T., Tamaki, H., Matsumura, M. (2003) Application of Density Current Generator for Large Scale Improvement of Sediment Quality in Lake Kasumigaura. *Journal of Water Treatment Biology*, 39: 85-91.

板東晃功, 桜澤俊滋, 梅木雅之, 大内一之, 池上康之 (2005) 温度成層条件における海洋肥沃化装置 [ 拓海 ] の放流水貫入深度. 日本船舶海洋工学学会論文集, 1: 9-15.

Fukuda, K., Yamatogi, T., Okubo, K., Matsui, S. (2011) A new device of destroying a thermo-cline and its effect of controlling algal boom in a reservoir in Japan. Second IWA symposium on Lake & Reservoir Management.

藤原建紀, 駒井幸雄 (2009) 沿岸海域の栄養塩動態 (特集 海の貧栄養化とノリ養殖). *海洋と生物*, 31: 134-140.

宮野 仁, 柴木秀之 (1998) 湾奥の締切りが湾内の海底地形に及ぼす影響について. *海工学論文集*, 45: 466-470.

矢島 啓, 増木新吾 (2009) ダム湖における WEP システムから吐出された高濃度酸素水の動メカニズム. *水工学論文集*, 53: 1339-1344.

Lemckert, C. J., & Imberger, J. (1993) Axisymmetric intrusive gravity currents in linearly stratified fluids. *Journal of Hydraulic Engineering*, 119: 662-679.

渡辺雅二, 山磨敏夫. (2004) 実験と計測に基づく密度流拡散装置の効果に関する考察. 岡山大学環境理工学部研究報告, 9: 59-64.

渡邊康憲 (2009) ノリ養殖と珪藻赤潮・栄養塩 (特集 海の貧栄養化とノリ養殖). *海洋と生物*, 31: 112-117.