

五ヶ所湾における密度流拡散装置の環境修復効果

正員 大塚 耕 司* 正員 中 谷 直 樹*
正員 大 内 一 之** 正員 粟 島 裕 治***
正員 山 磨 敏 夫****

Environmental Restoration Efficiency of a Density Current Generator at Gokasho Bay

by Koji Otsuka, *Member* Naoki Nakatani, *Member*
Kazuyuki Ouchi, *Member* Yuji Awashima, *Member*
Toshio Yamatogi, *Member*

Summary

Gokasho Bay in Mie Prefecture is a typical enclosed sea area, and has some water pollution problems, such as red tide, blue tide and hypoxic water at bottom layer. The Marino-Forum 21 installed a density current generator in 1997, to restore the water quality by improvement of vertical water exchange. The purpose of this study is to clarify a long-term environmental restoration efficiency of the density current generator by surveying sea bottom quality and seaweed bed distribution. The results of the field surveys showed that the bottom quality and seaweed habitat condition in the test area are much better than those in the control area. This suggests that the long-term restoration efficiency of the density current generator is quite high.

1. 緒 言

夏季の閉鎖性海域のように密度成層が生じている水域では、鉛直方向の海水交換が起きにくく、表層と底層の間で水質の差が生じる。特に底層では、沈降した有機堆積物がバクテリアに分解され酸素が消費されるため、貧酸素あるいは無酸素状態となることが多い¹⁾。これらの環境悪化を防ぐための環境修復技術には、干潟や藻場などの浅場の造成、底質改良剤の散布、直接的なエアレーションなどがあるが^{2), 3)}、密度流拡散装置を用いた海水の鉛直混合促進も底層貧酸素化軽減の有効な技術の一つとして挙げられる⁴⁾。密度流拡散装置とは、表層の低密度海水と底層の高密度海水を混合し、中間密度の海水を密度躍層に貫入させることによって、広範囲に海水を拡散させる装置である。密度流として拡散した流れは多くの海水連行を伴い、効率よく上下混合を促進させることができる^{4), 5)}。

三重県南伊勢町の五ヶ所湾は、リアス式海岸に囲まれた典

型的な閉鎖性の内湾であり、マダイなどの養殖業が盛んなことから、近年、底質の悪化、貧酸素水塊や青潮の発生に悩まされていた。(社)マリノフォーラム21は、1994年度から1999年度にかけて「自然エネルギー利用型増殖等高度化システムの開発」研究を行い、その一環として、夏季の海水上下混合促進による海域環境改善を目的として、1997年6月に、五ヶ所湾内の迫間浦に密度流拡散装置を設置した⁶⁾。研究プロジェクト期間内に行われた水質、底質調査では、短期的に現れる現象である、混合放流水の密度躍層への貫入、下部取水口の深度以浅における溶存酸素の増加等は確認されたものの、比較的長期的に現れると思われる底質の改善効果は確認されなかった⁶⁾。

密度流拡散装置は、研究プロジェクト終了後も引き続きくまの灘漁業協同組合にて管理運用され、夏場に昼夜連続運転が行われることになったが、当該地域の漁業者より、装置設置後から年々アサリの漁獲量が増加していること、ミル等の海藻の生育状況が改善されていることなどが報告され、長期的にわたる運転により、底質、生物生息環境が大幅に改善されている可能性が指摘されるようになった。

そこで本研究では、密度流拡散装置の長期運転による海域環境修復効果について検証するため、一般的な水質調査に加えて、経年的な環境改善の影響が顕著に現れると思われる海底環境、藻場生育環境の面的な調査を行うこととした。

* 大阪府立大学大学院工学研究科

** (株)大内海洋コンサルタント

*** (株)アイ・イチ・アイ・マリノフォーラム エンジニアリング 事業部

**** ナカシマプロペラ(株)開発本部

2. 密度流拡散装置

Fig. 1 に、五ヶ所湾迫間浦の水深 17m 地点に設置された密度流拡散装置の概要を示す。本装置は成層した海水を密度流拡散により混合するために、表層水と底層水をそれぞれ深度 1m の上部、水底から 1.5m の下部のベルマウス及びパイプを通して吸い込み、深度 3m の中段のノズルより水平全周に吐き出すものである。

本体は浮力体を伴う方形のプラットフォームにチェーンで吊り下げられており、下部はシンカーにチェーンで固定されている。取水量は、表層低密度海水が 96,000m³/d、底層高密度海水が 24,000m³/d であり、合計 120,000m³/d の混合水が 1 日に放流される。インペラ駆動用モータの電源は、プラットフォーム上部に取り付けられたソーラーパネルと、陸上から海底ケーブルで送電される電源の 2 系統となっており、夜間や曇天時におけるソーラー電源の不足分を陸電で補うように設計されている。1997 年より 4 月～10 月の夏季に昼夜連続運転を行っており、調査時で 10 年目を向かえる。

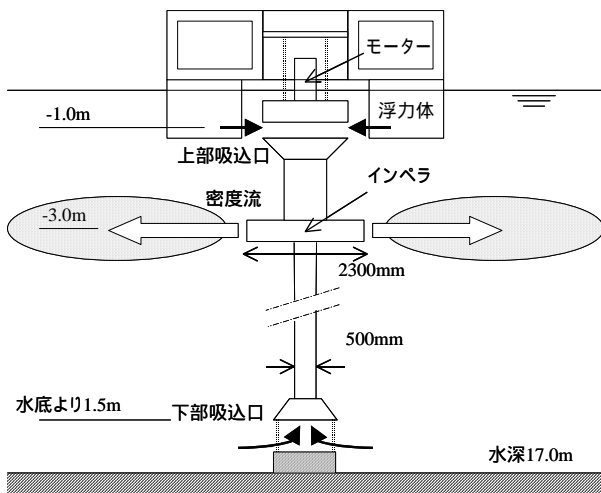


Fig. 1 密度流拡散装置の概要

3. 調査の概要

3.1 調査対象海域

本研究の調査対象海域は Fig. 2 に示すように三重県志摩半島の南部に位置する五ヶ所湾である。装置設置当時に行われた研究では、今回目的としている底質や海藻生育環境の面的な調査は行われていなかったため、対象海域での設置の有無による比較を直接行うことができない。そこで今回は、密度流拡散装置が設置されている迫間浦を実験区、五ヶ所湾内で比較的規模や水深に近い下津浦を対照区として、両地区の比較を行うこととした。



Fig. 2 調査対象海域の場所

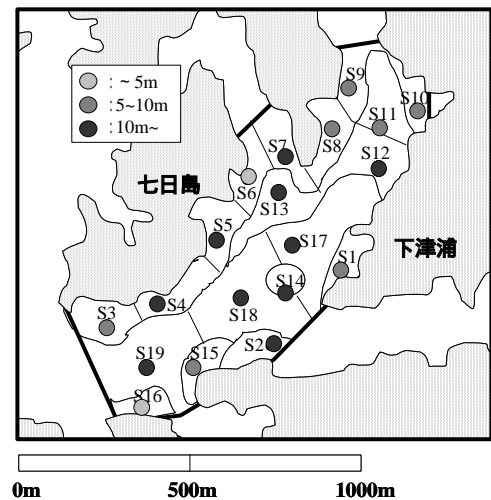
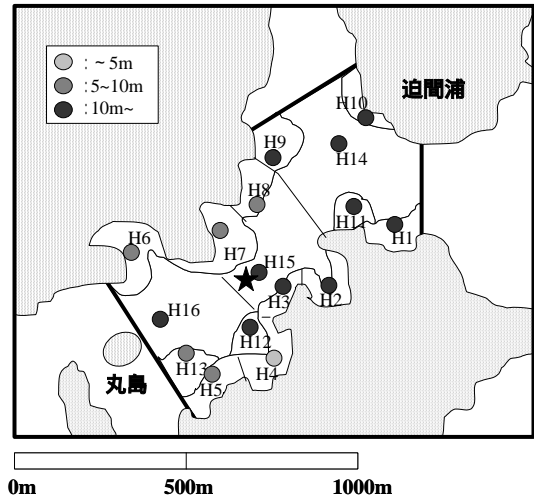


Fig. 3 調査対象海域のエリア区分および水深(上:迫間浦、下:下津浦、●:密度流拡散装置設置地点)

Fig. 3 に示すように、海図の水深データを基に、迫間浦を 16 エリア (H1 ~ H16)、下津浦を 19 エリア (S1 ~ S19) に区分した。図中には各エリアの代表点での水深を示した。なお、密度流拡散装置は H15 のエリアに設置されている。

3.2 調査方法

3.2.2 調査日

調査は 2006 年 2 月 22 日 ~ 23 日、2006 年 8 月 2 日 ~ 3 日、2006 年 9 月 20 日 ~ 21 日、2006 年 11 月 21 日 ~ 22 日の 4 回行った。2 月 22 日、8 月 2 日、9 月 20 日、11 月 21 日は対照区である下津浦、2 月 23 日、8 月 3 日、9 月 21 日、11 月 22 日は実験区である迫間浦において、水質、底質、海藻生育環境の調査を行った。

3.2.2 水質

迫間浦 16 エリア、下津浦 19 エリアにおいて、透明度板により透明度を、アレック電子(株)製メモリーCTD 計 (ASTD687) により深度・塩分・水温を、アレック電子(株)製メモリーDO 計 (AOP-CMP) により溶存酸素 (DO) を計測した。

3.2.3 底質

広和(株)製水中カラーTV カメラ (COLOR MARINE EYE) を調査船から吊り下げ、迫間浦 16 エリア、下津浦 19 エリアにおいて海底面の映像を記録し、海底基質を調査した。この映像記録を基に、迫間浦 3 ヶ所、下津浦 3 ヶ所の代表点を選定し、コアサンプラーにより底泥のサンプリングを行い、化学的酸素要求量 (COD)、全硫化物 (T-S)、強熱減料 (IL) の分析を行った。

3.2.4 海藻生育環境

広和(株)製水中カラーTV カメラ (COLOR MARINE EYE) を調査船から吊り下げ、迫間浦 16 エリア、下津浦 19 エリアにおいて海底面の映像を記録し (底質調査と兼ねる)、海藻植生被度分布を調査した。この映像記録を基に、迫間浦 3 ヶ所、下津浦 3 ヶ所の代表点を選定し (底質調査と兼ねる)、潜水により海藻生育環境の目視観測および写真撮影を行った。さらに上記代表点 6 ヶ所において、一辺 1m の方形枠を用いた坪狩りによる海藻サンプリングを行い、海藻の出現種の同定および現存量の測定を行った。

4. 調査結果

4.1 水質

Fig. 4 に、2 月、8 月、9 月、11 月調査時における迫間浦 H16 地点の水温、塩分、密度 (t) の鉛直分布を示す。

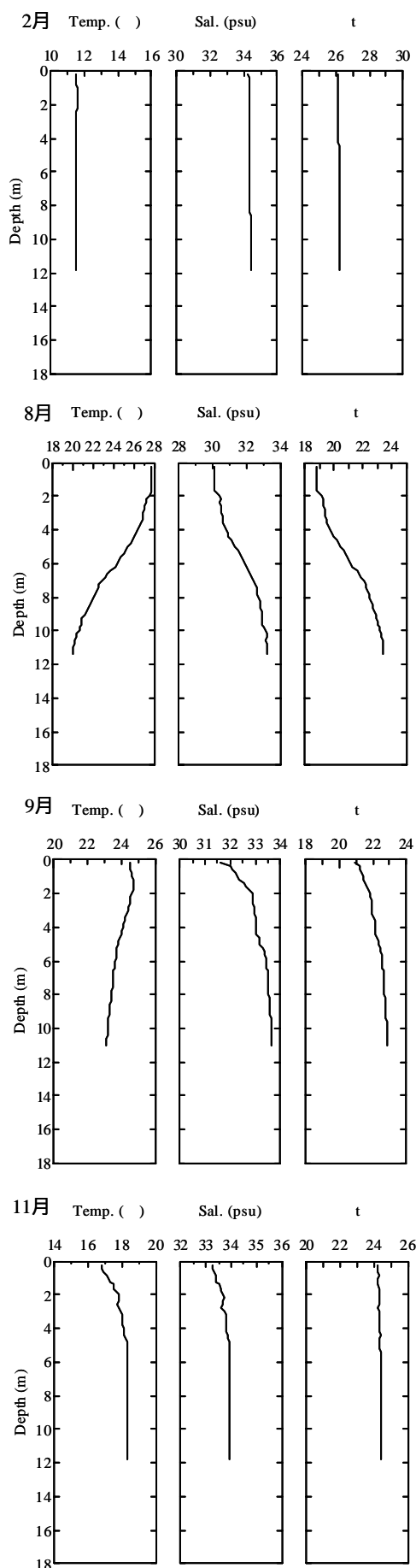


Fig. 4 H16 における水温、塩分、密度の鉛直分布

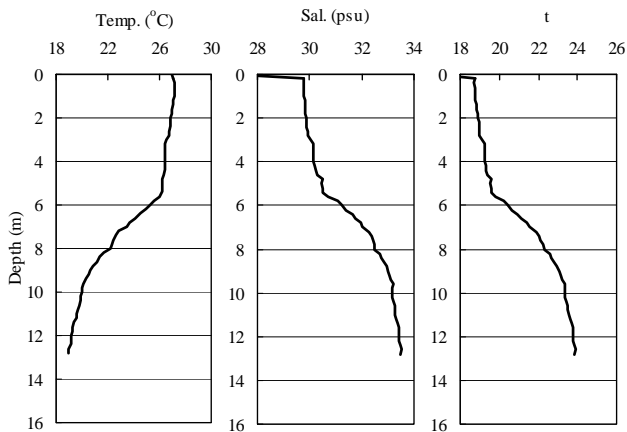


Fig. 5 8月調査時の下津浦 S17 における水温、塩分、密度の鉛直分布

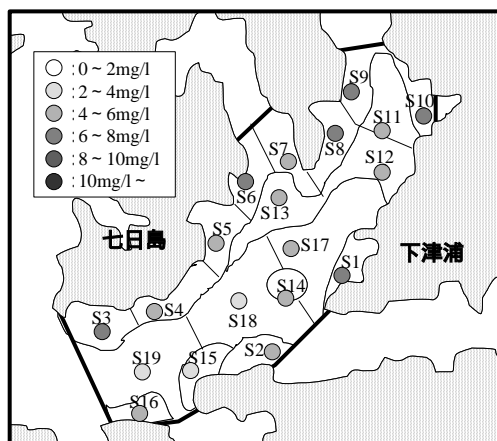
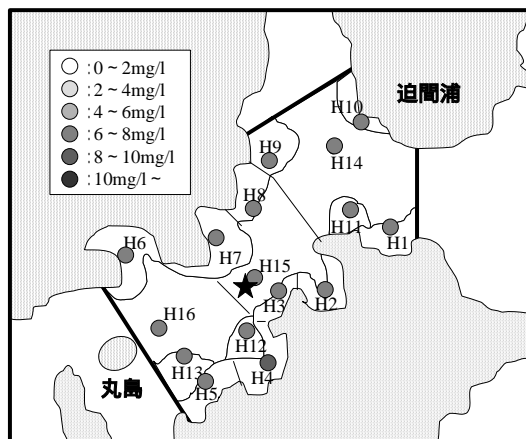


Fig. 6 8月調査時における底層溶存酸素分布(上: 迫間浦、下: 下津浦、●: 密度流拡散装置設置地点)

2月には水温、塩分ともに上下でほとんど差がなく、一樣な分布となっているが、8月になると、水温が表層で高く底層で低く、逆に塩分が表層で低く底層で高い典型的な密度成層構造が形成される。その後9月になると底層の水温も上がっ

てくることから密度成層構造が弱くなり、11月には、表層水温のほうが逆に低くなって、密度成層が完全に消滅する。

Fig. 5に、夏季調査時(8月2日、3日)における下津浦 S17 地点での水温、塩分、密度(t)の鉛直分布を示す。8月の表層水温は、Fig. 4に示す迫間浦で28程度、下津浦で27程度であり、表層塩分はいずれも30psu程度であった。一方底層水温は迫間浦で20、下津浦で19程度であり、底層塩分はいずれも33程度であった。したがって、いずれの地点においても密度は表層で小さく底層で大きい典型的な密度成層構造を成している。ところが、密度の鉛直方向の変化には違いが見られ、対照区である下津浦では深度6m付近に極端な密度不連続面(密度躍層)が見られるものの、実験区である迫間浦では深度2m付近からなだらかな連続成層構造となっている。このことは、密度流拡散装置によって躍層に中間密度の放流水が貫入していることを示している。

Fig. 6に、夏季調査時(8月2日、3日)における迫間浦および下津浦の底層(水底上0.5m)溶存酸素分布を示す。迫間浦ではほぼ全域で6mg/l以上となっているが、下津浦では特に水深の深いエリアで4mg/l以下となっている。ただし、装置設置当時の溶存酸素の調査結果では、密度流拡散装置の下部取水口の深度以浅で溶存酸素の増加傾向が確認されていることから、今回のように装置の下部取水口より深い水深のH14においてもある程度の溶存酸素が確保されている原因については、密度流拡散装置の影響以外の要因も考えられるので、注意する必要がある。

2 底質

Fig. 7に、各調査海域における海底基質の分布を示す。この図では全期間を通じて1度でも泥質であったエリアに泥質と表示している。対照区である下津浦では、湾口に近水深の浅いS3のみ砂礫質であり、その他のエリアでは全泥質であった。これに対し、実験区である迫間浦では湾口近く水深の深いエリア、および装置直下のH15では泥質であったが、それ以外のエリアは全て砂礫質であった。このような海底基質の大きな違いは、長期間の密度流拡散装置の運転により、海底への酸素供給と有機物の分解が進んだことの原因であると考えられる。

海底の有機堆積物による汚濁指標であるCOD、T-S、ILについては、装置設置時に、周辺の数地点において調べられているので、今回分析した結果について当時のデータと比較することにした。Table 1にその結果を示す。装置設置前はCOD、T-S、ILともに夏季の大坂湾奥部に匹敵するほどの非常に高い値であるのに対し、今回は全ての項目で値が大幅に減少している。このことから、長期間の密度流拡散装置の運転が底質の改善をもたらしたことが確認できる。

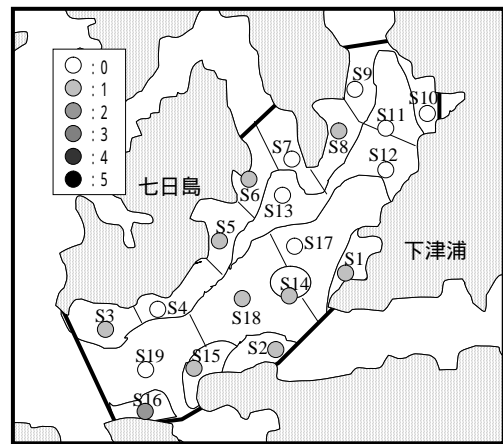
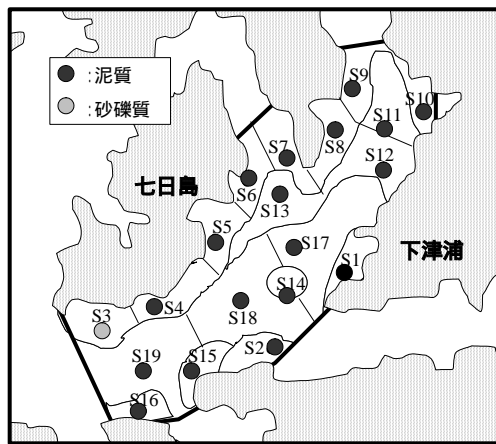
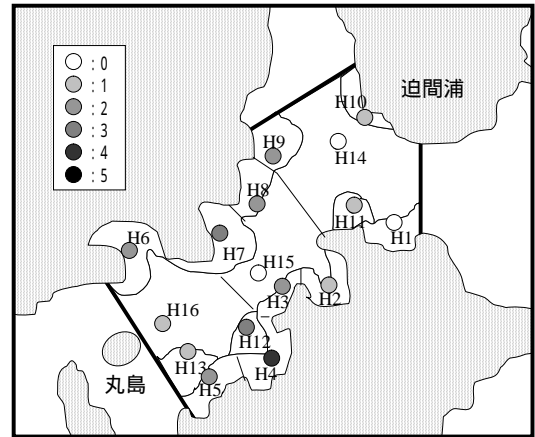
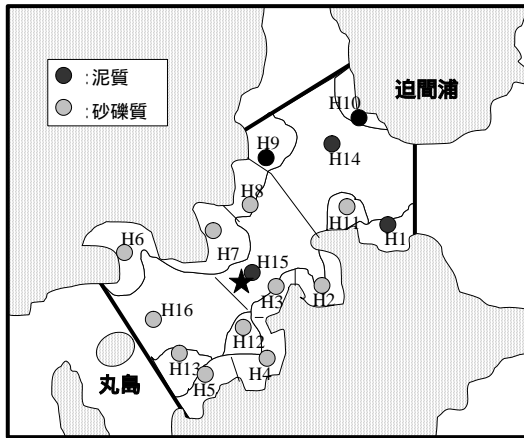


Fig.7 調査対象海域の海底基質分布(上：迫間浦、下：下津浦、●：密度流拡散装置設置地点)

Fig. 8 8月調査時における海藻植生被度分布(上：迫間浦、下：下津浦、●：密度流拡散装置設置地点)

Table 1 迫間浦における装置設置前⁶⁾と今回の底質分析結果の比較

調査年月	COD(mg/g)	T-S(mg/g)	IL(%)
1995.3	8.12-11.8	0.47-1.26	12.3-14.8
1995.8	11.7-13.5	0.68-1.20	14.6-16.1
1996.8	10.9-18.1	0.08-1.07	14.6-16.1
2006.2	7.4	0.17-0.18	6.0-7.3
2006.8	7.0-7.8	0.18-0.26	7.2-9.2
2006.9	8.6-10.2	0.20-0.27	8.3-9.5
2006.11	5.9-14.9	0.12-0.29	6.2-8.9

Table 2 8月調査時における坪狩りの調査結果

地点	植生被度	主な海藻出現種	現存量 (g/m ²)	合計 (g/m ²)
H4(迫間浦)	4	アナアオサ	745	2041
		ミル	49	
		オゴノリ	1188	
		マクサ	45	
H8(迫間浦)	2	カバノリ	14	990
		アナアオサ	30	
		オゴノリ	695	
		マクサ	138	
		ムカデノリ	21	
S8(下津浦)	1	イギス科	14	14
		マクサ	101	
		イバラノリ	21	
S16(下津浦)	2	ウミウチワ	19	201
		カバノリ	74	
		カゴメノリ	13	

4.3 海藻生育環境

Fig. 8 に、夏季調査時(8月2日、3日)における海藻植生被度の調査結果を示す。対照区である下津浦では、半数近くのエリアで被度階級が0であり、残りのエリアも被度階級が1~2という状況であった。これに対し、実験区である迫間浦では、泥質であったH1、H14、H15を除き、多くが被度階級2以上を示し、浦奥部のH4では被度階級4という高い値であった。

Table 2 に坪狩りによる海藻出現種および現存量の調査結果を示す。実験区である迫間浦の H4 では紅藻類のオゴノリと緑藻類のアナアオサが目立っており、比較的多様性の高い生息環境となっていた。また、H8 でも紅藻類のオゴノリの量が多く、次いで紅藻類のマクサ、カバノリといったように、多様性の高い生息環境となっている。一方対照区である下津浦の S8 ではイギス科が、S16 ではマクサ、カバノリなどが混在していた。各地点における海底の写真を Fig. 9 に示す。



Fig. 9 海藻生育状況（上から H4、H8、S8、S16）

実験区である迫間浦と対象区である下津浦の全体的な海藻生育環境を比較するため、坪狩り調査結果から、植生被度と海藻現存量合計の関係を指数関数で最小二乗近似して求め、各エリアの植生被度にエリア面積を乗じて積算することによって、海藻の総湿重量を求めた。これを調査対象海域全体の面積で割ることによって、海藻平均現存量を求めた。その結果を Fig. 10 に示す。2月には下津浦でも迫間浦の半分程の海藻現存量が確認されたが、8月になると下津浦の海藻は激減した。9月になると迫間浦も2月の半分以下にまで減少したものの、11月には再び回復した。これに対して下津浦では11月まで非常に少ない状況が続いた。

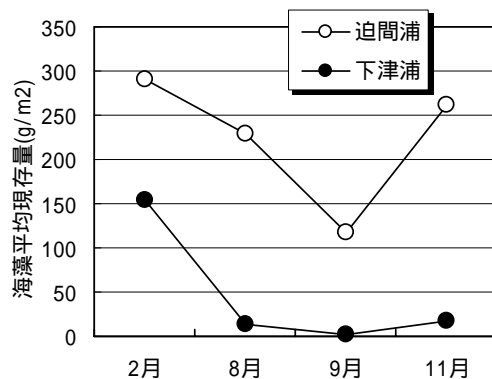


Fig. 10 調査対象海域の海藻平均現存量の季節変化

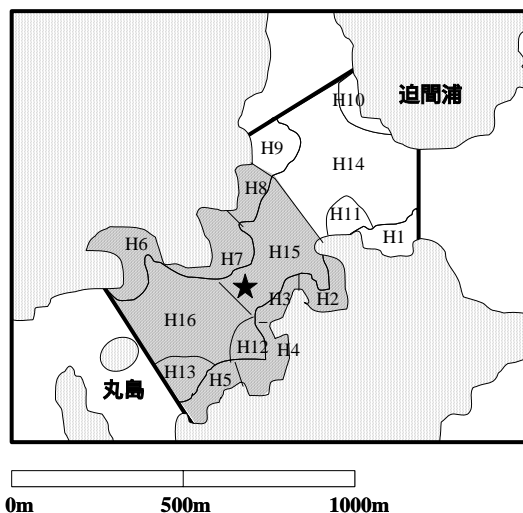


Fig. 11 密度流拡散装置による環境修復効果範囲（密度流拡散装置設置地点）

5. 環境修復効果範囲

海底基質分布、海藻生育環境分布を総合して判断すると、迫間浦の調査対象海域のうち、実際に密度流拡散装置の効果が現れているのは、Fig. 11 の網掛け部分で示す装置から約500m程度の範囲であると考えられる。この範囲における海

水容積は約 270 万 m^3 である。前述のように密度流拡散装置の1日の海水放流量が12万 m^3 なので、22.5日間で全海水が混合される勘定となる。ただし実際には、調査対象海域外の丸島周辺、さらにその奥のエリアにおいても、海藻の繁茂が確認できている。

5. 結 言

本研究では、五ヶ所湾迫間浦に設置されている密度流拡散装置の長期運転による海域環境修復効果について明らかにすることを目的として、水質、底質、海藻生育環境の調査を行った。得られた結果を以下に示す。

- ・ 夏季の海水密度鉛直分布は、対照区では明確な不連続点が存在したが、実験区では躍層に中間密度の放流水が貫入しているため、緩やかな連続成層構造となっていた。
- ・ 夏季底層の溶存酸素は、対照区では水深の深いエリアで4mg/l以下であったが、実験区ではほぼ全域で6mg/l以上であった。
- ・ 海底基質は、対照区ではほぼ全域で泥質であったが、実験区では湾口に近く水深の深いエリアと装置直下を除いて砂礫質であった。
- ・ 底質は、装置設置前はCOD、T-S、ILともに非常に高い値であったが、今回の調査では全ての項目で大幅に値が減少していた。
- ・ 海藻現存量は、対照区では冬季は実験区の半分程度あったが、夏季に激減し、秋季でも回復しなかった。これに対して実験区では夏季に冬季の半分以下まで減少したものの、秋季には回復した。

以上の結果を総合すると、実験区である迫間浦は対照区である下津浦に比べて、特に密度流拡散装置から500m程度の範囲において、底質環境ならびに海藻生育環境がかなり良好であり、密度流拡散装置による長期にわたる鉛直混合促進が環境修復に効果的であることが確認できた。

謝 辞

くまの灘漁業協同組合迫間浦支部の幸田三斉前支部長ならびに向井正和支部長には、現地調査に際して多大なご協力をいただいた。ここに厚く御礼申し上げます。また、卒業研究として本研究に取り組んだ日本NCR(株)の高橋佑典氏(研究当時大阪府立大学工学部学生)に感謝申し上げます。なお、本研究は(社)マリノフォーラム21との共同研究として行ったものであることを付記し、関係各位に謝意を表する。

参 考 文 献

- 1) 大塚耕司、塩谷淳、藤原峰生：閉鎖性海域における底泥酸素消費の現地計測、日本沿岸域学会論文集、Vol.14、2002、pp.137-144.
- 2) 中西敬、大塚耕司、上嶋英機：沿岸域におけるミチゲーションと環境修復技術、水環境学会誌、Vol.24、No.3、2001、pp.2-7.
- 3) 大塚耕司、中西敬、重松孝昌、上嶋英機、中辻啓二：環境修復の目標と対策技術、環境技術、Vol.30、No.7、2001、pp.537-543.
- 4) 大内一之、山磨敏夫、小林勝弥、中村充：密度流拡散装置の研究開発、日本造船学会論文集第183号、1998、pp.281-289.
- 5) 江原健太郎、佐藤徹、多部田茂、土屋好寛：回転水槽を用いた密度流拡散の内湾水理模型実験、日本造船学会論文集、第190号、pp.271-278.
- 6) 社団法人マリノフォーラム21 沿岸漁場造成技術開発研究会 自然エネルギー利用型増殖等高度化システムの開発グループ：平成8年度 自然エネルギー利用型増殖等高度化システムの開発に関する報告書、1997.