

大船渡湾における自然エネルギー活用型 海水交換装置の実証実験

THE FIELD EXPERIMENT OF SEAWATER EXCHANGE SYSTEM USING
NATURAL ENERGY IN OFUNATO BAY, JAPAN

古川恵太¹・江良公樹²・安井章雄³

Keita FURUKAWA, Kouki ERA and Akio YASUI

¹正会員 博(工) 国土交通省 国土技術政策総合研究所 沿岸海洋研究部 海洋環境研究室長
(〒239-0826 神奈川県横須賀市長瀬3-1-1)

²国土交通省 東北地方整備局 港湾空港部 海洋環境・技術課 海洋環境係長
(〒983-0013 宮城県仙台市青葉区花京院1-1-20)

³正会員 博(工) 日本海洋コンサルタント株式会社 技術本部 (〒136-0074 東京都江東区東砂7-19-31)

Ofunato Bay has tsunami protection breakwaters at the mouth of the bay, which decrease a bay-water exchange rate to outside and degrade the water quality. The strong density stratification has been formed in summer. These environments have been said causes of hypoxia and eutrophication in the bay. In order to manage the bay environment, an enhancement system for bay-water exchange rate using natural energy has been implemented on the tsunami protection breakwaters since September, 2004. Enhancing mixing of surface and bottom water by flux control was a target of this system. After the implementation, continual monitoring has been done. It showed pumping discharge upward and downward by wave, tide, and oceanic water intrusion. The intensity of the discharge could be formulated as a function of approaching velocity and stratification of the bay.

Key Words : Field experiment, seawater exchange system, enclosed bay, water quality management, natural energy, OFUNATO BAY

1. はじめに

わが国では津波や高潮等の自然災害を防ぐため、防波堤や防潮堤等の構造物が数多く構築されている。一方、これら構造物のある海域や湾口部では閉鎖性が高くなるため、湾内の水質が悪化しやすい¹⁾。閉鎖性水域における水質改善工法には、鉛直混合の促進・曝気・導水・ろ過等の原理を用いたものが実用化されてきている²⁾。しかし、電力を動力とするものが主であり、自然エネルギーを活用した海水交換装置は潮汐や波力を用いた海水交換型防波堤を除くとほとんど見あたらない。本研究では、小沢ら³⁾の水理模型実験を基に開発した海水交換装置を用いた。この海水交換装置は、装置の上部を通過する流れや波により生じる局所的な渦や、装置内外の圧力差等を利用して装置内に流れを発生させることを期待している。このような自然エネルギーを活用する海水交換装置を大船渡湾湾口防波堤開口部に設置し⁴⁾、海水交換装置の海水交換量の観測および水質観測を行い、その効果と適用性について、現地実験を通して実証的に検討した結果を述べる。

2. 実証実験サイトおよび海水交換装置

海水交換装置は、図-1に示す大船渡湾湾口防波堤開口部において2004年9月に設置された。



図-1 実証実験位置図

実証実験は、2004年10月から約2ヵ年行った。大船渡湾は湾奥部に市街地があり、カキ養殖等湾内の利用性が高くしかも閉鎖性が高く、夏季には成層化して湾内の水質が悪化するため、水質改善が望まれている⁵⁾。

海水交換装置は図-2に示すように、湾口防波堤の基礎マウンドに沿って設置される直径2mのポリエチレン製円筒管を主な構成としている。設置水深は

装置下端で30m、装置上端部では16.3mであり、上端部の装置形状はラッパ状で直径4m、全長は約36mである。同じく図-2に示すように、海水交換装置の管外(上端部近傍2箇所、マウンド中腹、底部、湾外)および管内(上端、下端)において、流速、水温、塩分、溶存酸素等を連続計測するとともに、湾口防波堤開口部近傍において水質(COD, N, P, シスト)の鉛直分布および底泥・生物調査を行った。

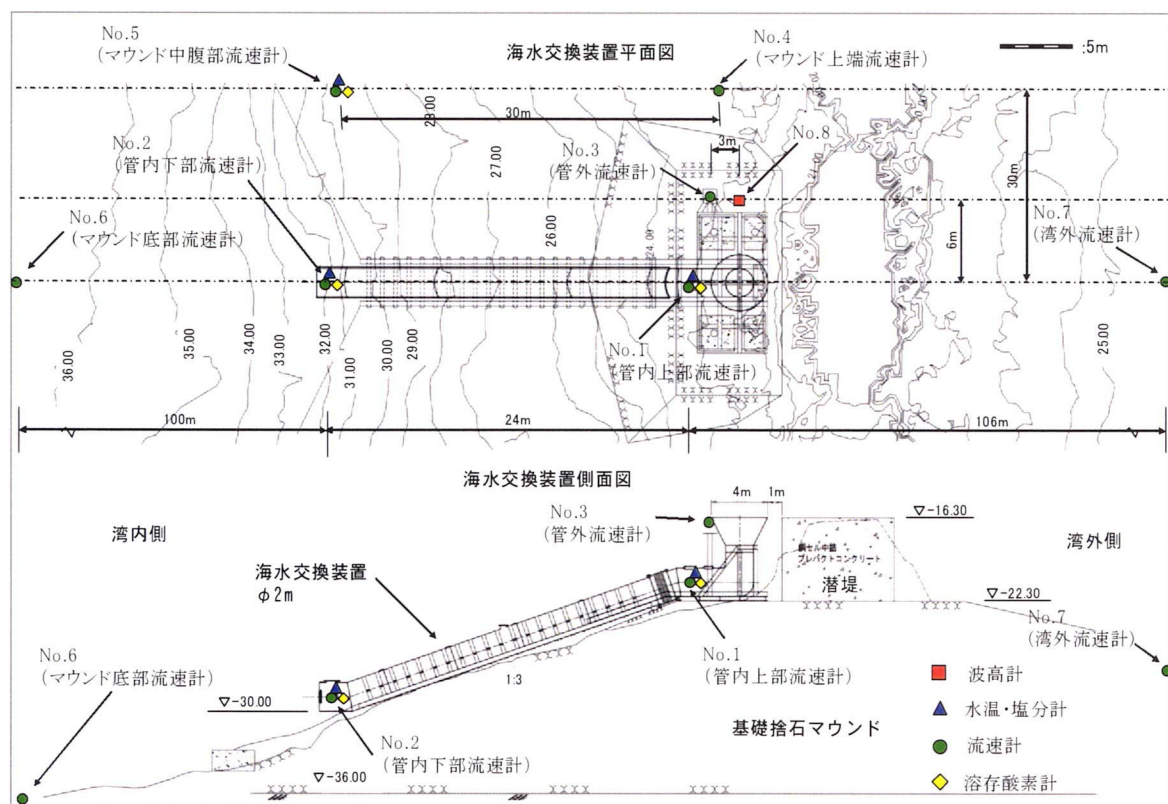


図-2 海水交換装置概形および設置位置近傍の地形と観測機器の配置

3. 現地観測結果

(1) 発生する流れの概要

海水交換装置の上を流れる流れを管外流速、装置内の流れを管内流速として整理した。0.5秒毎に測定された流速を解析した結果、おおよそ、10秒、15分、30-40分、12時間の周期的な成分が卓越しているように見え、それぞれ、波浪、長短の湾内の副振動(セイシュ)⁶⁾および、潮汐に起因する流れと考えられた。

次に、管内の流れは底層から上層へ向かう流れを「揚水」、上層から底層へ向かう流れを「押込」として整理することとした。図-3のように管外流速(No. 3)と管内上部流速(No. 1)の関係をプロットすると、湾内から湾外への流出時には揚水、湾外から湾内への流入時には押込が発生すること、かつ、管内上部流速は管外流速と良い相関があることが示されている。なお、図示していないが、管内流速は上部と下部で傾きがほぼ1のよい相関

であり、管内流速は上下でほぼ同様の流れとなっていることも確認している。

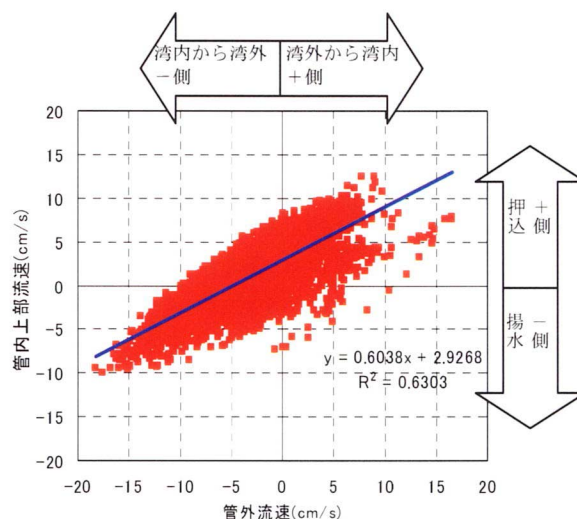
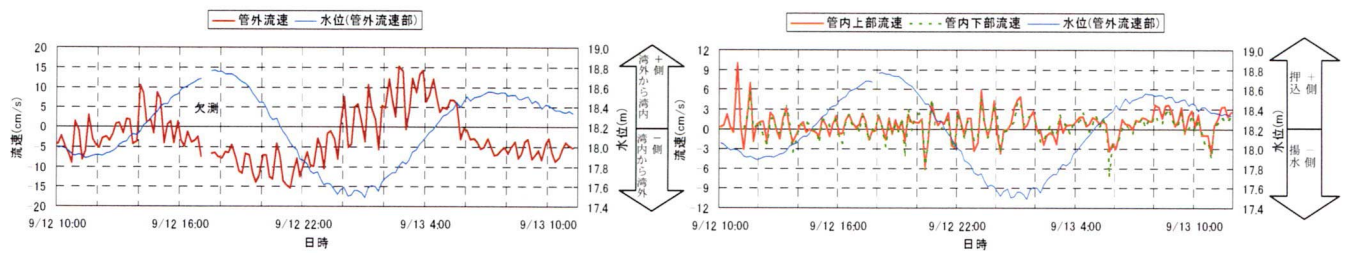
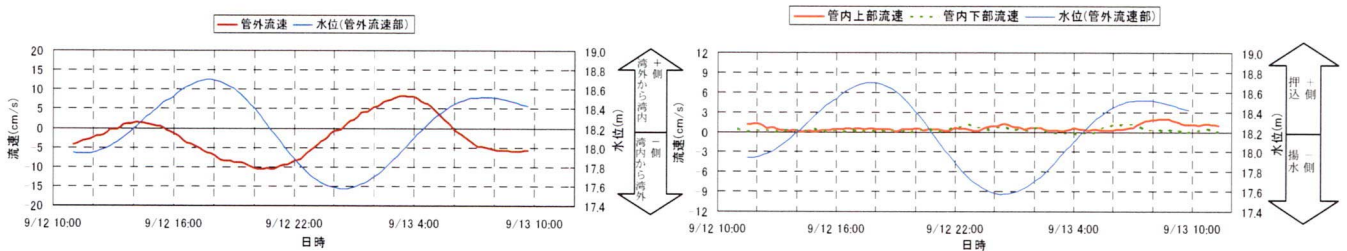


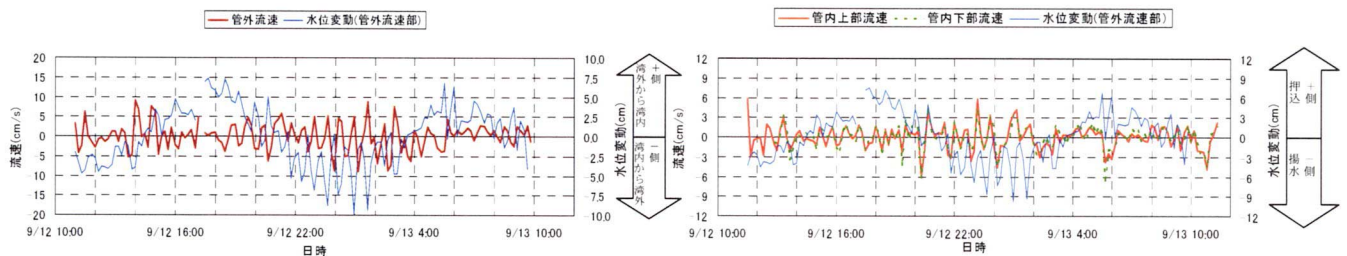
図-3 管外流速(No. 3)と管内上部流速(No. 1)の関係
(2006年9月12日16:00~16:45)



(i) 10分平均流速



(ii) 180分移動平均(長周期成分) 流速



(iii) 短周期成分 (i)-(ii) 流速

図-4 管外流速 (左) と管内流速 (右) の10分平均流速 (i) と長周期成分 (ii), 短周期成分 (iii)
(2006年9月12日10:00-9月13日10:00)

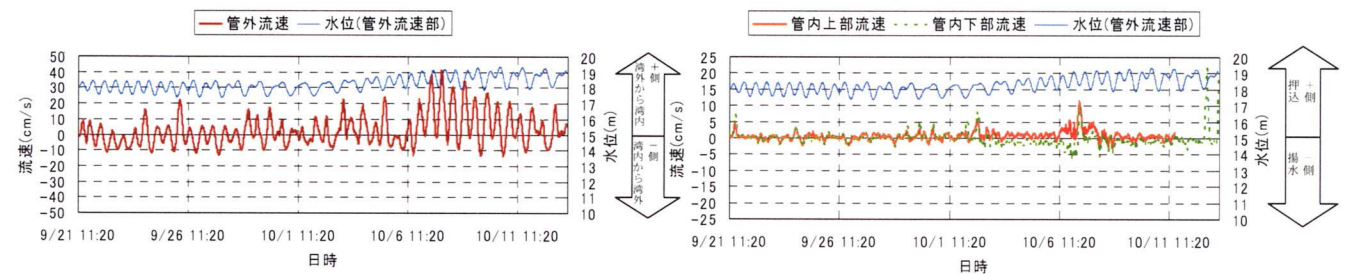


図-5 管外流速 (左) と管内流速 (右) の長周期成分の長期変化 (2006年9月21日11:20-10月11日17:40)

(2) 発生する流れの卓越周期毎の特性

図-4(i), (ii)には, 2006年9月12日10:00-9月13日10:00の1日間のデータについて, 波浪成分による流れを排除し, 副振動成分と, 潮汐成分を分離できるようにするために, まず, 10分平均と180分移動平均した流速として整理した結果を示している。

さらに図-4(iii)には, 波浪成分をカットした10分平均データから, 180分移動平均した長周期成分データを差し引くことで抽出した短周期成分が示されている。

管外流速の長周期成分は潮位と連動しており, 明らかに潮流が支配外力であることがわかる。なお, 下げ潮時 (12日21:00) と上げ潮時 (13日

3:00) を比べると下げ潮時の流出流速の方が若干大きな流速を持っている。

同様の処理を長期データ (2006年9月21日~10月11日) に適用し, 長周期的な変化を管内流速で見たのが, 図-5である。

なお, 短周期成分については, ほぼ一定の副振動が記録されているように見えるが, よく見ると, 水位記録が滑らかでない期間 (例えば: 9月12日22:00-9月13日2:00) には, 管外流速, 管内流速ともに大きくなっていることが図-4(iii)に表れている。

(3) 海水交換装置近傍の水質観測

図-6は管内下部流速と管内下部の溶存酸素の成

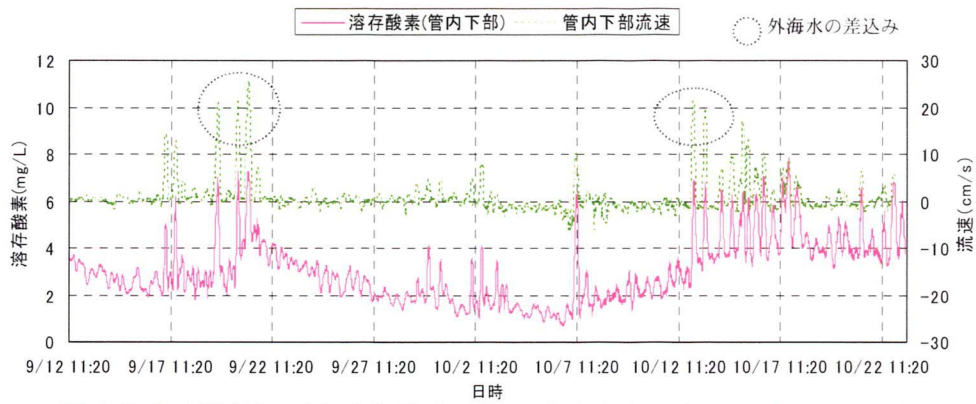


図-6 管内下部流速と溶存酸素(管内下部)の時系列 (2005年9月12日-10月22日)

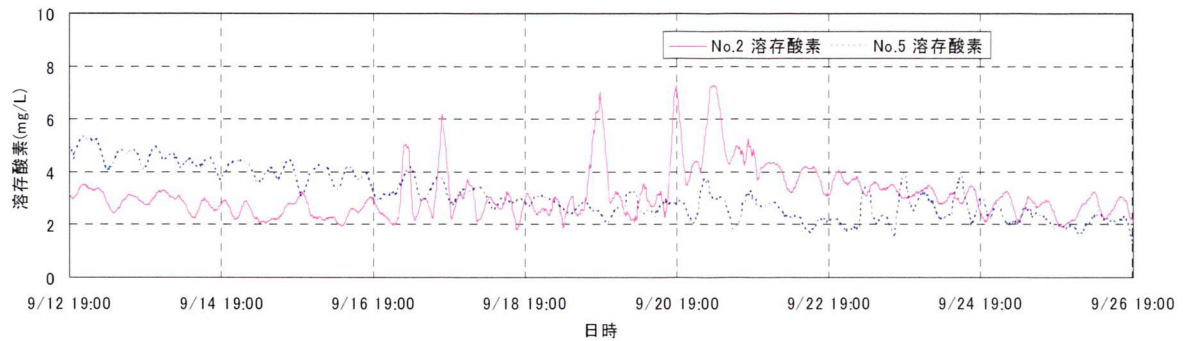


図-7 管内下部 (No. 2) と近傍マウンド部 (No. 5) の溶存酸素の時系列 (2005年9月12日-9月26日)

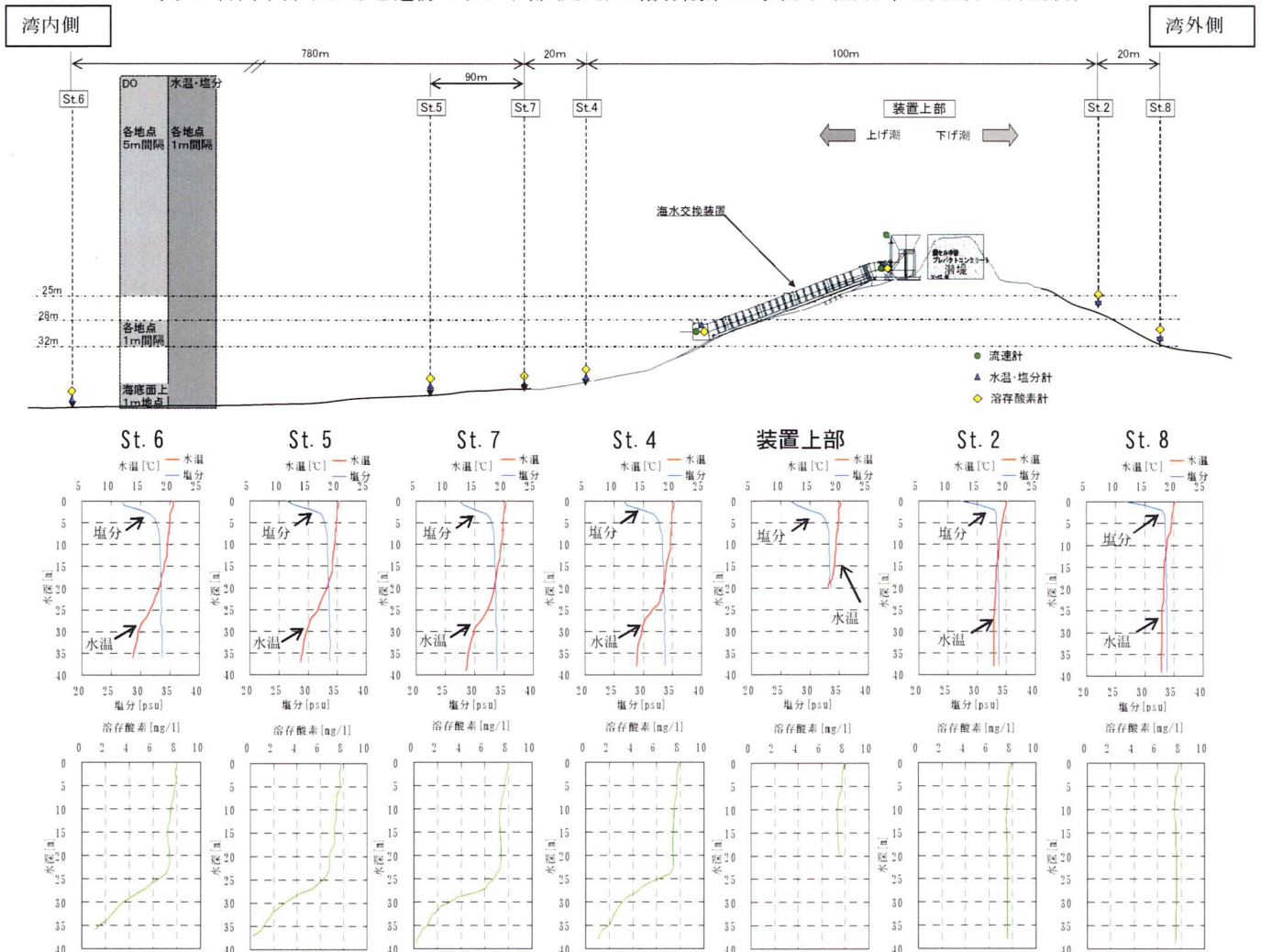


図-8 水温・塩分・溶存酸素の鉛直分布 (2006年10月3日)

層期の時系列を示している。図に示されるように溶存酸素は揚水時に低下、押込時に上昇した。また、速い押込流れが発生しているときには、溶存酸素が一時的に回復しており、貧酸素化した内湾水に、溶存酸素の豊富な外海水が差込んでいる状態と推察される。

図-7は管内下部とマウンド部の溶存酸素の成層期の時系列を示している。測定した水深が管内下部の方が低いため、溶存酸素は管内下部の方が平均的には低いが、外海水の差込みにより管内下部の溶存酸素はマウンド部よりも高くなる期間が現われており、海水交換装置の効果と見る事ができる。

図-8は2006年10月3日に行った水温・塩分・溶存酸素の鉛直分布観測結果である。観測は、潮止まり時に行われた。図-8を見ると、湾外側では成層していなかったが、湾内側では成層していた。豊田ら⁴⁾の水温鉛直分布観測結果を見ると、水深が深くなるにつれて水温が低下していたが、今回の観測結果では24m付近までは水温・溶存酸素ともに一様化しているように見える。

そうした一様層は上下海水混合の結果と見る事ができるが、層厚や、溶存酸素の回復の大きさなどを海水交換装置からの距離で比較しても、差が見られない。また、海水交換装置は-16.3mから-30mに設置されているが、その層での特異な分布も見られないことから、海水交換装置による海水交換効果が水質分布には表れていないと見るのが妥当と思われる。

その他の項目についても、取得データのばらつきが大きく、その範囲内での変化しか観測されず、観測点においては、海水交換装置の効果と言える顕著な違いは見られなかった。なお、底泥にはシストが存在していたが、海水交換装置の管内では観測されなかった。

4. 観測結果の考察

(1) 長期的な海水混合機構

図-4(ii)において下げ潮時の流出流速が上げ潮時の流入流速より若干大きな流速を持っていたこと、押込側の管内流速が出ていたことについては、日潮不等の影響も考えられるが、図-5に示されたような長期データを見ると、管外の流れが流入側(+)や、流出側(-)にシフトすることに連動して、押込が卓越するフェーズ(押込流速が小さいが10日間ぐらい継続するものや、10月7日前後のように1-2日非常に大きな押込を記録するものなど)と押込と揚水が交互に現れるフェーズが交代することによって生じていたと考えられる。

したがって、揚水のフェーズより、押込のフェーズが生じることが多くなるので、長期的には、押込みという形で外洋水を湾内奥部に導水することによる海水交換が期待できる。

なお、このフェーズの支配要因については、押込の卓越するタイミングが大潮(9月18日、10月3日)、

小潮(9月25日、10月11日)などの朔望サイクルに必ずしも連動していないことから、他の原因(外洋水の差込みや陸水の出水)である可能性が支持される。

(2) 短期的な海水混合機構

上記の押込と揚水が交互に現れるフェーズにおいては、潮汐周期の海水混合(下げ潮時に流出する流れで揚水、上げ潮時に流入する流れで押込)が期待できる。密度を考慮しない水理模型実験³⁾では、上げ潮時にも揚水が発生することが予想されていたが、実海域では、外海水の密度が内湾より高いことが多いことも一因として、押込流れが発生するのだと考えられる。したがって、こうした背景を考慮して、海水交換装置の管内流速の計算式は、密度状態(成層状態)ならびに、潮の上げ下げで場合わけする必要があるそうだとことが確認された。実際の計算式については後述する。

図-4(iii)において、副振動と見られる15分周期程度の往復流が見られる。これが大きくなるのは、水位記録にも攪乱が記録されているように、高波浪時であると考えられる。管外流速の大きさに管内流速も対応しているので、結果として波浪が高くなると管内流速が上がり、混合が促進される方向になる。この場合には、押込や揚水といった一方向への影響ではなく、正味の移動を伴わない混合が生じると考えられる。

(3) 海水交換装置管内流速の提案と水質への影響

小沢ら³⁾は管内流速の計算式として

$$V_{in}=V_{out}\times0.3+1700v/D \quad \text{円筒管} \quad (1)$$

$$V_{in}=V_{out}\times0.6-908v/D \quad \text{角形} \quad (2)$$

を提案していた。ここで、 v :動粘性係数(m^2/s)、 D :代表長さ(m)である。

前節でこの計算式の場合分けの必要性が指摘された。得られたデータで、成層期・非成層期、上げ潮・下げ潮、押込・揚水で場合わけして整理した結果、海水交換装置で発生する流速は、表-1の式で与えられると整理された。このことから小沢ら³⁾の提案式は実証実験の非成層期の平均的な結果を表していたと考えることができる。

これらの式を使って流速測定結果から1潮汐当たりの揚水量、押込量を求めてみる。大船渡湾の潮汐から1潮汐当たりの海水交換量を推定する。大船渡湾の水面積は 7.89km^2 、干満差を 0.7m と想定すると、1潮汐当たりの海水交換量は $5,523,000\text{m}^3$ である。それに対し、海水交換装置では管の直径が $\phi 2\text{m}$ から算出すると、表-1に示すように成層期に約 $2,000\text{m}^3/1$ 潮汐である。したがって、潮汐による海水交換量の約 0.04% となる。すなわち、実証実験で用いた装置だけでは開口部で周辺環境を短期的に大きく変化させるだけの影響は起こらないことが予測され、3.(3)で示された水質の測定結果に影響が表れていないことと矛盾しない。

表-1 管外流速 V_{out} から管内流速 V_{in} の算出式

	潮向	V_{out} から V_{in} の算出式(cm/s)	流量(m^3 /潮汐)
非成層	上げ潮	$V_{in}=V_{out} \times 0.224 + 1.231$	平均揚水量： 500 (1~2,900) 平均押込量： 3,000 (100~13,900)
	下げ潮	$V_{in}=V_{out} \times 0.490 - 0.323$	平均揚水量： 1,800 (3~8,100) 平均押込量： 1,200 (10~4,900)
成層	上げ潮	$V_{in}=V_{out} \times 0.113 + 0.191$	平均揚水量： 700 (10~2,200) 平均押込量： 1,500 (100~5,300)
	下げ潮	$V_{in}=V_{out} \times 0.189 + 0.438$	平均揚水量： 900 (70~2,800) 平均押込量： 1,000 (30~4,000)

注)

1. 非成層、成層は水温、塩分、溶存酸素の調査結果から区分した。
非成層:2004. 10. 15~2005. 05. 31, 成層:2004. 10. 05~2004. 10. 14, 2005. 06. 01~2005. 07. 11, 2006. 09. 22~2006. 10. 11
2. 管外流速 V_{out} は+が湾外から湾内の流れで上げ潮、-が湾内から湾外の流れで下げ潮、管内流速 V_{in} は+が押込、-が揚水である。
3. 流量は海水交換装置の管径を考慮した値で、括弧内は最小値と最大値である。

5. おわりに

本研究では、大船渡湾湾口部に自然エネルギー活用型海水交換装置を設置し、計測した流速から海水交換量を求め、周辺水域への影響について実測を行った。主要な結論は以下の通りである。

- 1) 管内下部で行った溶存酸素の観測から、貧酸素化した内湾水に、溶存酸素の豊富な外海水が差込むことにより湾内水質が一時的ではあるが回復している。それに対してマウンド下部では外海水の差込みがあっても溶存酸素は回復せず、海水交換装置の効果が確認された。
- 2) 押込と揚水が交互に現れるフェーズにおいては、管内流速の長周期成分による潮汐周期の海水混合が期待できる。この揚水あるいは押込の流れについては、管外流速を変数とする計算式が定義可能である。
- 3) 短期的な成分を見ると、高波浪をトリガーとする海水混合機構がある。しかし、この混合は、その規模や継続時間から正味の輸送量を持たない可能性が示唆されている。
- 4) 上記の結果を取りまとめ、管径2mの海水交換装置で発生する流速計算式を成層期・非成層期、上げ潮・下げ潮、押込・揚水で場合わけをして提案した。
- 5) その結果、成層期の揚水量・押込量は、非成層期のそれに比べて少なく60~75%程度の平均揚水量であった。成層期の海水交換量は上げ潮時に2,200 m^3 /1潮汐程度、下げ潮時に1,900 m^3 /1潮汐程度とほぼ同じ量であった。海水交換量は潮汐による海水交換量の0.04%程度であり、実証実験で用いた海水交換装置1台では、周辺環境を短期的に大きく変化させるだけの影響はないと推察された。
- 6) 長期的には、押込が卓越するフェーズと押込と揚水が交互に現れるフェーズが交互に発現する。その原因は、外海水の差込みや陸水の出水等の影響が考えられるが、詳細なメカニ

ズムは不明である。

本海水交換装置は、装置上部近傍の流れ・攪乱を装置下部近傍に伝える機能を持ち、それは、成層条件、上げ潮・下げ潮、外洋からの差込みの条件等に左右されるが、長期に渡って攪乱・混合を与え続ける効果が期待できることが示された。

したがって、適用性の高い海域としては閉鎖性が高く、湾口部の流速が速く、水面積が比較的小さい湾であり、長期的な環境改善を行う場合に適用性が高いと推察される。しかし、その定量的な検証・評価については、今後長期的なモニタリングによるデータ収集も含め、今後の課題として検討していかなければならない。

謝辞：本研究は、澤本正樹東北大学名誉教授（当時東北大学大学院教授）を委員長とする自然エネルギー活用型海水交換装置評価委員会において議論が行われた成果の一部を取りまとめたものである。関係各位の皆様にはこの場を借りて謝意を表します。

参考文献

- 1) 国際エモックスセンター：日本の閉鎖性海域（88海域）環境ガイドブック，177p.，2001.
- 2) 高松港湾空港技術調査事務所：自然エネルギーを利用した海水浄化工法の検討について，四国技報，第4巻，第7号，pp. 61-62，2004.
- 3) 小沢大造，平出友信，古川恵太，中村聡志，小林茂雄，国栖広志：負圧を利用した海水交換潜堤の揚水特性の基礎的検討，海岸工学論文集，第47巻，pp. 1161-1164，2000.
- 4) 豊田政史，日比野忠史，西守男雄：大船渡湾での海水交換機構と自然力を利用した水質管理手法の検討，水工学論文集第43巻，pp. 1079-1084，1999.
- 5) 高橋研也，佐藤博信，柏館信子，野村宗弘，沢本正樹：大船渡湾における水質特性と湾水制御効果の検討，海洋開発論文集，第21巻，pp. 373-378，2005.
- 6) 堀川清司，西村仁嗣：津波防波堤の効果について，第16回海岸工学講演会講演集，pp. 365-369，1969.