

流動攪拌システムの流力性能

工藤 君明*¹

流動攪拌システムは夏季の成層化によって分離された表層と底層の海水を効果的に攪拌混合し、密度躍層付近で水平拡散させることにより海域の基礎生産を広範囲に促進させることを目的とするものである。流動攪拌システムの設計は長崎県が推奨した水域浄化装置「ジェットストリーマー」を基本とし、表層水を海底で噴出させて底層水と混合させることにより、中間的な密度の海水を生成して中層まで上昇させる方式とした。水槽試験により各種パラメータを決定し、プロトタイプを設計製作した。平成11年夏季に本システムを大村湾に設置し、海域性能評価試験を実施した。表層水をポンプ送水した量の約8倍の底層水が流動し、中層に上昇していくことが確かめられた。しかし、その上昇中に各深度の流れによって水平に移流拡散していくこと、および測点が限られているために、物理的な環境条件の変化を計測することは困難であった。いずれにしろ生物過程への影響が直接現れることはないが、人工的な湧昇流が継続することにより、生態系の活性化に寄与することが期待できるものである。

キーワード：流動攪拌システム、貧酸素水塊、密度成層、生態系の活性化

Hydrodynamic performance of the surface-bottom-water mixing diffuser

Kimiaki KUDO*³

The Mixing Diffuser is generally used to effectively mix the surface water and bottom water, separated from each other by the stratification of the seawater in the summer season, and diffuse the mixture horizontally around the pycnocline to promote the primary production in wide areas. The Mixing Diffuser used here was based upon the waters purifying system "Jet Streamer" recommended by the Nagasaki prefecture government. It was designed so that it could produce the seawater on a middle level of density by mixing the surface water jetted on the sea bottom with the bottom water, and make it float up to the intermediate layer. Various parameters were determined by conducting tests in a water tank, and a prototype mixing diffuser was designed and manufactured. In the 1999 summer, this prototype system was installed in the Bay of Omura to conduct hydrodynamic performance tests on the system. From the tests, it was confirmed that the amount of bottom water about 8 times amount of surface water pumped flowed up to the intermediate layer. However, it was difficult to measure the physical variations of environmental conditions, for the reasons that the upwelling water was horizontally advected and diffused by the current on each depth level and that the measuring points were limited. In spite of difficulty of having any direct effect on the ecosystem may be expected that the Mixing Diffuser contributes to the activation of the ecosystem as long as it continues to produce the artificial upwelling current.

Key Words : Mixing diffuser, DO deficient waters, Stratified waters, Activation of ecosystem

* 1 海洋科学技術センター海洋生態・環境研究部

* 2 Marine Ecosystems Research Department, Japan Marine Science and Technology Center

1. はじめに

大村湾は長崎県の中央に位置し、佐世保湾と狭小な水路でつながっているだけであるため、外海からは二重に閉鎖された内湾であり、湾中央部の海底はシルトや粘土が厚く堆積して平坦である。近年、大村湾奥部の都市化が進んだことにより、水質汚濁が環境基準を超える状況が継続しており、貧酸素水塊や赤潮の発生が恒常化している。大規模無酸素水塊が10年に1度くらいの頻度で発生すると、海底地形がたらいのようであるために、広域の底生生物群集が壊滅的な被害を受けてしまうことになる。底生生物群集の回復は通常の魚類に比べて遅いために、この湾の生産性は低いままになっている¹⁾。大村湾において栄養塩を湾外に取り上げることができるのは水産漁獲が唯一の経路といってよく、貧酸素水塊の悪影響を未然に防止することが長期的には大村湾の浄化につながることを期待されている。

長崎県は大村湾水質管理計画によりCOD負荷量の総量抑制を進めており、また大村湾の貧酸素水塊や赤潮の被害を軽減するための技術開発を進めてきたが、湾全体の総合的な浄化戦略を構築することが緊急の課題とされた²⁾。このため長崎県と海洋科学技術センターは地域共同研究「大村湾の貧酸素水塊発生抑制技術の研究開発」(平成9～11年度)により流動攪拌システムを共同で研究開発することになった。当センターは「生態系の活性化による環境修復」を生態系研究長期計画の一部として掲げており、大村湾の海水浄化研究をこのような視点から実施することにより、生態系と環境の総合的な研究開発を推進することが期待された。

大村湾の浄化戦略の構築に役立つことを目標とするな

らば、海水浄化技術の研究開発だけではなく、流入負荷の評価手法の精密化と抑制、貧酸素水塊や赤潮の発生メカニズムの解明、水質保全対策を目的とする予測手法の確立、またそのための流域モデル・拡散モデル・生物系モデル・物質循環モデルの研究開発、水質改善手法の評価など広範囲の研究を統合して進める必要がある。このプロジェクトにおいては、大村湾の海域特性を理解するための調査研究と流動攪拌システムの研究開発をあわせて実施した(図1)。

本論文は表層水と底層水を攪拌混合し恒常的かつ広範囲に基礎生産を促進させる流動攪拌システムの設計および流力性能評価試験について報告する。

2. 流動攪拌システムの基本計画

2.1. 大村湾の概要

大村湾は、面積が約320 km²、平均水深14.8m、東西約10km、南北約30kmの袋状内湾である(図2)。南北に矩形の湾中央部と、これを北西から南東に細く貫く開口部～湾奥部から成っている。佐世保湾につながる針尾瀬戸は最小幅200m、平均水深30mと狭隘であり、この瀬戸の大村湾側は日本三大急潮の一つとして知られているが、一回の潮汐における海水の流出量は大潮時で2.5%程度である。しかも海水交換は湾口部に限定されているため、海水交換率は0.3～0.4%と見積もられている³⁾。

大村湾における水温成層は5～8月に形成され、この時期の成層水深は6～8mである。密度成層の影響により、夏季における底層の潮流楕円は表層に比べて左傾する傾向にある。中間層から底層にかけての残差流は、北部海域では反時計廻りの強い循環流を形成しているが、湾中央

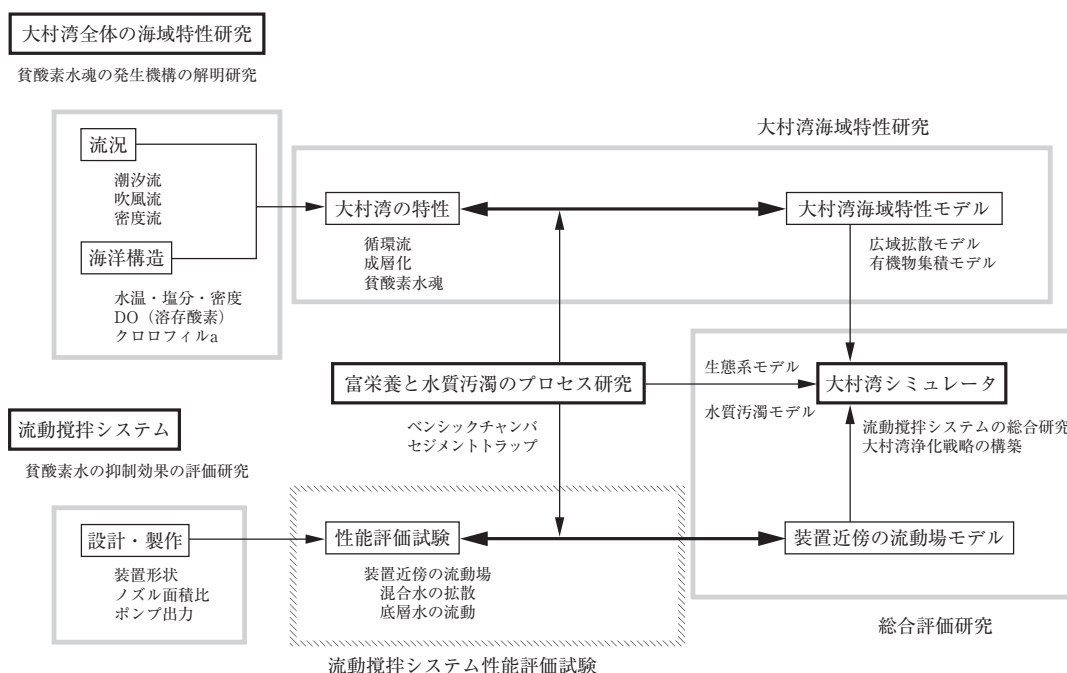


図1 流動攪拌システムの性能評価／総合評価研究

Fig. 1 Block diagram of development of the mixing-diffuser system

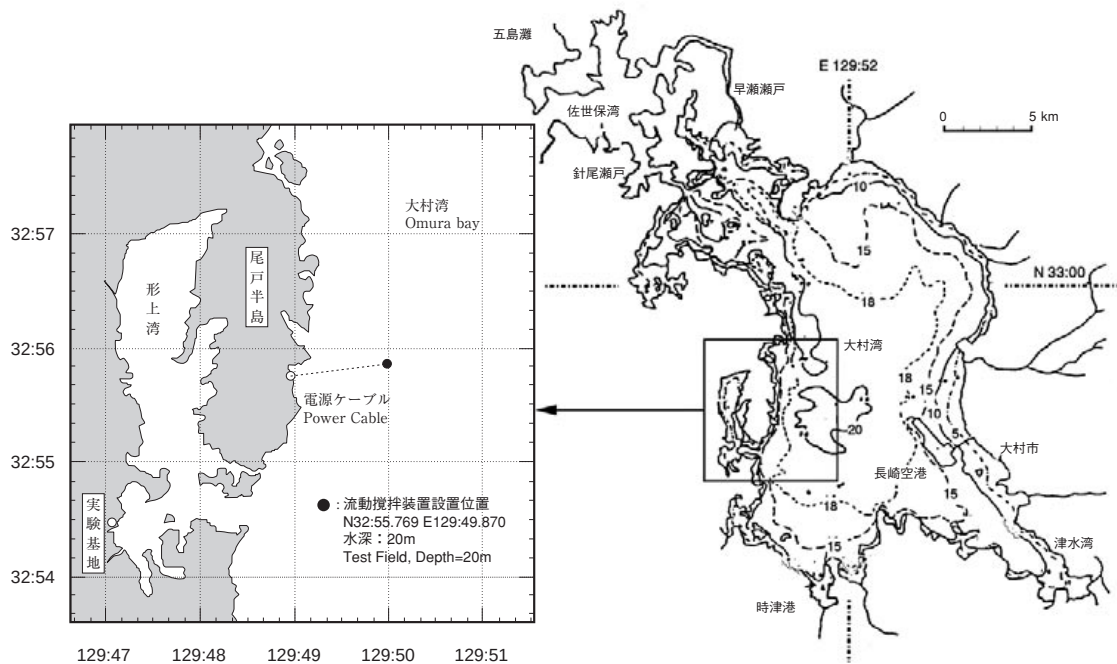


図2 大村湾の地形と試験海域
Fig.2 Omura bay and test field

部ではあまり顕著な循環流は見られない。密度成層は台風などの激しい気象攪乱によって容易に破壊されるが、攪乱がなくなれば速やかに成層に分離されてしまう。すなわち、このような攪乱のスケールでは海水の混合は必ずしも十分に起こっているわけではないということを示唆している。これに対して貧酸素水塊は底層で徐々に形成され、成層が弱まる8月後半から急激に成長していくことが観測されている⁴⁾。この原因として、底層水中の濁度と溶存酸素の解析から、セジメントの巻き上げにより酸素消費が助長されるというモデルが提案されている⁵⁾。

2.2. 従来の環境浄化装置

閉鎖性湾域の富栄養化およびこれに伴う種々の病的な現象(貧酸素水塊や赤潮の発生など)は大村湾に限らず日本全域で問題となっているが、栄養負荷の流入抑制と堆積した汚濁物質の除去が唯一かつ根本的な解決方法である。これまで提案され研究開発が進められてきた手法は、例えば貧酸素が発生したならば空気を注入するなどに代表されるように対症療法的なものである。しかし、病的な症状を軽減するという観点からすれば、それなりに成果をあげており、また貧酸素水塊の発生機構の理解や環境改善のコスト評価に一定の貢献をしてきたといえる。主な環境浄化装置について整理する。

- (1) エダクタ方式：表面の海水と圧縮空気を底層に導き、エダクタにより噴射させ、海底から海面まで溶存酸素量の著しい改善を図ろうとするものである。流動水量は大きく、また本体にメカ的な部分がなくメンテナンスが容易であるという特長がある。このプロジェクトにおいて長崎県が提案した水質浄化装置「ジェットストリーマ」の方式である⁶⁾。

- (2) 曝気方式：海底に散気管を敷き、ブローもしくはコンプレッサーで空気を送り込む方式である。直接的な酸欠防止用として使用されるが、流動水量は小さく、効果範囲も散気管の上部に限定される。空気の出口部分が生物付着により塞がってしまうという問題がある。
- (3) エアリフト方式：海底に設置した揚水筒に圧縮空気を充填し、空気弾を間欠的に放出することにより、海水の湧昇流を発生させ、上下攪拌を促進させようとするものである。閉鎖的な湾域では効果があるといわれている。
- (4) 密度流拡散方式：底層から重い貧酸素水を吸い上げ、同時に表層の軽い飽和酸素水を吸引して混合し、中層の密度躍層の中を水平に拡散させ、滞留水域の広い範囲に亘って表層水を混合攪拌するものである⁷⁾。五ヶ所湾において総合的な調査研究が実施された装置は、インペラーで上下海水を吸引混合させ、中層のリングノズルから吐出させる方式である。機械的な回転部分があり、故障の原因となることが懸念される。この方式は、小さな内湾のようにほとんど海水流動がないことを前提にしているが、実際の海域は多少の海水流動が常にあり、拡散を密度流に依存する必要はないように思われる。

2.3. 流動攪拌システムによる海水浄化シナリオ

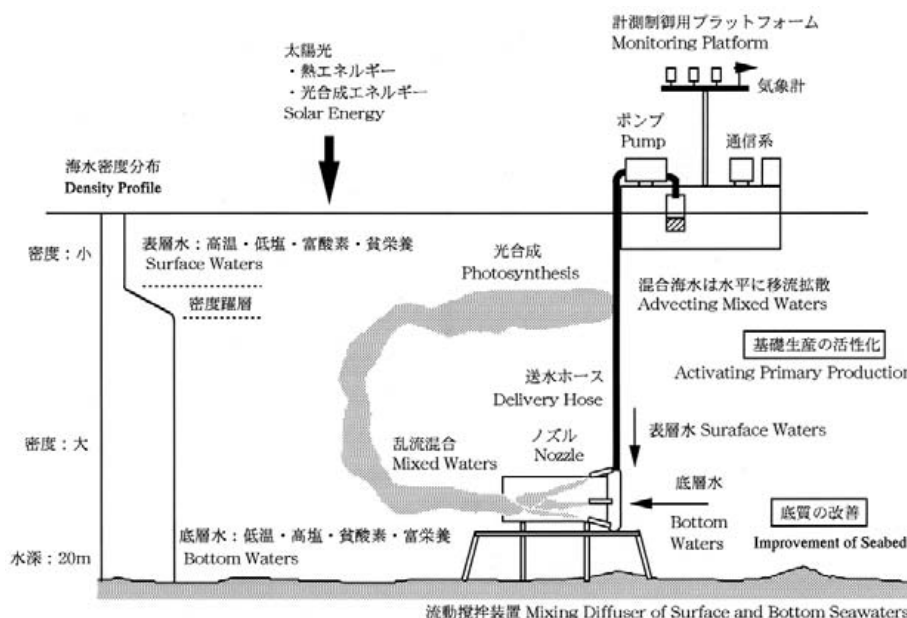
沿岸海域の水質汚濁は汚濁物質が広大な陸域から大量に、また長期に亘って流入して蓄積し、極めて安定な平衡状態に達している状態である。このプロジェクトの規模と目標からみて、直接的な水質改善効果を実証するというこ

とではなく、水質改善の基本的なコンセプトをさまざまな角度から検討していくことを目的とした。また、環境問題を扱うことは非常に複雑な生態系をも相手にするという事に留意する必要がある。単純な系であればシステムの効果は規模に比例することが期待できる。すなわち、装置が1台で一定の効果がえられたなら、2台では2倍の効果が期待できることになる。しかし生態系が関与する複雑系の場合には必ずしもそのような関係が成り立つわけではない。効果がまったくないこともあるかもしれないし、逆に小さな努力により大きな効果が期待できることもある。小さな湾域では効果を蓄積して目に見える形で表すことは比較的容易である。湾域が広大になれば効果が全く顕在化しないこともありうるが、状況によっては大きな効果を期待することも可能である。

一般に物質が拡散する距離は拡散係数と時間の積の平方根に比例する。このためスケールの小さい現象はごく短時間のうちに広がることができる。しかしスケールが大きくなるにつれて、その自乗に比例する時間が掛かることになる。湾域における汚濁物質の拡散はゆっくりとした過程である。大村湾のように比較的大きな湾域においては、潮汐や風による水平あるいは垂直の流れが常に誘起されており、空間的なシアがあるために、通常の乱流拡散よりも速く広がっていくことができる。これはシア拡散=分散と呼ばれる現象である⁸⁾。また、時間的に平均をとった残差流動場は地形あるいは季節にともなって一定のパターンをもっている。物質はこの残差流動場の中を水平に移流し、広がっていく。大村湾の奥部で濁りが強く、湾口に向かうにつれて低下する濁度勾配を

もっているのは、このようないくつもの過程が平衡状態に達していることを意味している。従って、比較的に大きな湾域における海水浄化はこのような残差流動の制御あるいは利用ということがキーワードとなる。

図3に、流動攪拌システムによる大村湾水質浄化のシナリオを示す。湾中央部では、夏季の成層化によって表層と底層に分離された海水はほとんど混じり合うことがなくなる。この理由は、低塩分・貧栄養で酸素豊富な表層水は温かくて軽く、逆に高塩分・富栄養で貧酸素の底層海水は冷たくて重いために、上下方向には極めて安定しているからである。相互の交流がなくなるために、底層では有機物が分解されて酸素が消費され、また底層に到達する光の量が減少して光合成が低下するために酸素の供給が断たれることになる。貧酸素化が進行すれば底層では嫌気性の細菌が繁殖し、硫化水素が生成されるようになると、ますます生物の生息できない環境になっていく。このような水質および環境条件が長期に亘って蓄積した後に、台風などによる攪乱を受けると、貧酸素水が単純に消滅するというにはならず、むしろ硫化水素が酸化されて単体イオウとなるときに酸素を消費してますます貧酸素水塊を成長させたり、あるいは赤潮を発生させたりする。このような病的な現象を緩和するために、流動攪拌システムにより表層水と底層水を常時攪拌混合して、混合海水を密度躍層近くで水平に拡散させ、恒常的かつ広範囲に基礎生産を促進させる。また底層の海水を流動させることにより底質を改善するとともに貧酸素水化を抑制することも期待できる。植物プランクトンの多様性と活性を維持することにより、成層が破



流動攪拌システムは表層水と底層水とを攪拌混合させ、混合海水は密度躍層で拡散することにより恒常的かつ広範囲に基礎生産を促進させる。また底層の海水を流動させることにより底質を改善するとともに貧酸素水化を抑制する。植物プランクトンの多様性と活性化を維持することにより、成層化後の赤潮発生を防止し、さらに動物プランクトンの再生産と魚介類生産により負荷栄養を最終的に水産物として取り上げ、大村湾を活きた海にする。

図3 流動攪拌システムによる水質浄化のシナリオ
Fig. 3 Scenario of improving seawaters by mixing difuser

壊された後の赤潮発生を防止し、さらに動物プランクトンの増加と魚介類生産により負荷栄養を最終的に水産物として取り上げることができれば、大村湾を活きた海に蘇らすことも夢ではなくなる。

2.4. 流動攪拌システムの基本設計

本システムに要求される基本機能は、これを用いて夏季の成層化によって分離された上下層の海水を制御された状態で効果的に攪拌混合させ得るとともに、その攪拌混合された海水を中層で水平方向に拡散させ広い範囲で基礎生産が進行して貧酸素化を抑制する機能を果たすことができるかどうかを実海域において検証し得ることである。本システムの目標機能を以下のように設定した。

- (1) 乱流混合：表層水を底層で噴流させることにより乱流を発生させ、表層と底層の海水を十分に混合させることができること。「十分に」とは、混合海水が再び分離してしまわないことと、植物プランクトンが栄養塩を利用できるほど均質にという意味である。
- (2) 攪拌制御：上層駆動水系の噴流の強さと流量を調節することができ、これによって上下2層の海水の混合割合を任意に制御できること。
- (3) 水平拡散：上下2層の混合海水を密度躍層深さ付近に滞留させて、さらに水平方向に広く拡散させることにより、光合成を促進させることができること。
- (4) 底質改善：海底付近に静かな流れを誘起することができ、表層水に含まれる酸素を供給し底質改善に貢献できること。ただし、底泥の巻き上げりによる濁りを極力抑えることができること。
- (5) 保守管理：海中のシステム本体部に可動機構を無くし故障の原因を少なくするとともに、機器類の保守管理を容易にすること。
- (6) 性能評価：混合海水を中層に広く拡散させ広範囲にわたる基礎生産の進行を中層における植物プランクトンの動態から、本システムの性能として直接評価し得るものとする。

以上のような機能を備えた流動攪拌システムは、基本的に次のような要素によって構成するものとした。

流動攪拌システムは上掲の目標機能のうち、乱流発生機能、密度躍層における拡散、底質改善を実現するとともに、流量調整の達成に必要な要素機構を内蔵するもので、上下2層を混合した海水を広く中層域に放流拡散させることができるものである。

このような目標機能を実現するための流動攪拌システム本体は円筒状ダクトと、能動的に流動を発生させ、かつ流量を必要な範囲内で制御できる海水ポンプ装置ならびに同制御装置および駆動水配管等から構成される。このうちポンプの主要な機能の一つは、表層水を取水して円筒状ダクト内にて底層水との乱流混合を図りつつ、あわせて流動促進を図ることである。そのため制御装置は、表層水取水系の吸引流量と底層水吸引流量とを同程

度に保持するよう駆動水ポンプを制御する。こうすることによって底層放流水は流動促進を進めて底層の停滞を無くするとともに、貧酸素水塊を解消させる方向に作動させる。底層へ放流した後の攪拌混合水は、密度が表層水と底層水の間であるため底層の停滞性(貧酸素)水塊に流動を与える機能を発揮しながら、次第に中層深度域に拡散して行くことが期待される。

2.4.1. 駆動ポンプ

流動攪拌装置に使用する駆動ポンプとして、ジェットストリーマで実績のある片吸込みボリユート型で出力75 kw、吐出量2000 L/min 程度を採用した。ポンプ吐出口径は100 mmである。なお、駆動ポンプは必要な範囲内で流量調整ができるものとする。

2.4.2. 流動攪拌システム本体部

流動攪拌システム本体部は、表層水を噴出させる環状マニフォールドと、吸入された底層水と混合して吐出させる混合ダクトおよびこれを支える架台からなる。

(1) 混合ダクト

- ・海域での流動促進効果および設置工事や点検保守作業の面から、ダクトの直径(内径)を1.0 mとする。
- ・流入部は流れが剥がれないよう丸みを持たせる。
- ・混合水が吐出されたとき、底泥を巻き上げないようにするためには、噴流発生による圧力の低下を回復させる必要がある。このため混合ダクトの長さは水槽試験により決定することにした。

(2) 環状マニフォールド

- ・表層水と底層水とを乱流混合させるため、表層水を側壁ノズルから噴流させる方式とする。
- ・側壁ノズルの本数および断面積、さらに取り付け角度は水槽試験により決定することにした。
- ・側壁ノズル群への流量配分を均一化するため、管径150 mmの環状マニフォールドを配置する。ポンプ吐出口径からの拡大率を150%とし、減速ヘッダーとして機能させることにより、環状管内の均一化を図り、この均一流を各ノズル管で均等に絞ることができる。

(3) 流動攪拌システム本体部の海底設置用架台

- ・従来の調査により、底層境界層は2~3mに形成されることから、流動攪拌システム本体部のダクトの主軸を海底面上約1.5mに水平に置くものとする。
- ・転倒防止・姿勢安定化の観点から、架台は海底面に直角方向にも十分な幅を採り、想定される底層流下において十分な耐転倒安定性を保ち得る形式構造を有するものとする。
- ・脚部接地構造は軟泥質の海底面での埋没を考慮して設計するものとする。
- ・流動攪拌システムの陸上におけるブロック組立に際し、あらかじめ陸上ないし海上でダクトを固定の上、設置するものとする。

3. 流動攪拌装置の流力特性評価

流動攪拌システムの要目を決定するため、装置模型を製作して水槽試験を行った。試験は長崎総合科学大学の船舶実験水槽(長さ:60m, 幅:4m, 深さ:2.3m)において、平成9~10年度に実施した。

3.1. 水槽試験用装置模型

- (1) 模型の構成: 装置模型は送水ポンプ、送水ホース、底層水吸入ダクト、混合ダクト、環状マニフォールド、噴出ノズル、延長ダクトおよび架台から構成される(図4)。吸入ダクトは底層水が滑らかに流入できるためのフェアリングである。ポンプからの送水は環状マニフォールドから噴出ノズルに分岐される。ノズルの噴出口は混合ダクトの中央にあり、取付角度および中心軸からの捻りを調整可能とした。
- (2) 模型の仕様: 模型は実機の縮尺1/4を想定した。
ダクト内径: 250mm
ダクト長 吸入部: 87.5mm, 混合部: 1000mm, 延長部: 750mm
ノズル内径: 14mm, ノズル本数: 12
送水ポンプ 電動機出力: 7.5kw, 60Hz, 200V, 6.5A, 吐出量: 4L/s
ポンプ吐出口内径: 50mm, 送水ホース内径: 50mm
- (3) ノズル: ノズルはダクト周囲に12個を配置し、個数と傾斜角の組合わせを調整できるものとした。噴出ノズルはそれぞれを開閉できる弁を持っている。ポンプ吐出口に対するノズル1本の面積費は1/128であり、ノズル12本を全開すると流路の面積はほぼ等しくなる。
- (4) ノズルからの噴流水が周辺の底層水を吸引して乱流混合させることができ、また、ダクトからの放流水が底泥を巻き上げない程度まで圧力を回復させるため、適当な長さの混合ダクトが必要である。乱流混合状態を可視化により判断するため、

混合ダクトを透明アクリルで製作するとともに、ダクト長さはノズル開口部より下流吐出側方向にダクト内径の5倍とした。

- (5) 流動性能模型実験に使用するポンプは、厳密には実機におけるポンプと内部の流動特性に至るまで相似であることが望ましいが、実機ポンプに完全に相似なポンプを見出すことは困難である。一方、供試ポンプの特性としては代表的作動点での吐出量、全揚程とともにポンプ型式が類似(特性曲線の形状が類似)であれば、吐出流発生機として模型実験の目的には十分沿うことができる。水槽実験においては、実機で使用予定のポンプ(片吸い込みボリュート型)と同一型式の渦巻ポンプを使用した。

3.2. 水槽試験方法

- (1) 混合ダクト内への噴流の強さは噴出ノズルの数を変えることにより調節できる。噴出ノズルの縦傾斜角(θ)は、混合ダクト中心軸に対する角度であり、これが小さいと中心軸にほぼ平行に噴出することになる。一方、噴出ノズルの捻り角(ϕ)は混合ダクト内での旋回流を発生させるために、中心軸から捻っている角度である。これら噴出ノズルの縦傾斜角と捻り角の調節により、噴流による乱流を混合ダクト内全体に拡げ、混合ダクトからの吐出流速を制御できることを期待した。
- (2) 送水ポンプは一定のパワーで作動するようにした。噴出ノズルの本数によって変化するポンプ吐出量 Q_p は圧力計と流量計の目盛りを直読して計測した。
- (3) 送水ポンプ装置が水槽表面の水を吸い込み、送水ホース、流動攪拌装置の環状ヘッダーおよび噴出ノズルを通して円筒状混合ダクト内に噴出させる。流動攪拌装置の吸引口から底層水が吸い込まれ、混合ダクト内でノズルから噴出する表層水と乱流混合する。そしてダクトの吐出口から混合水

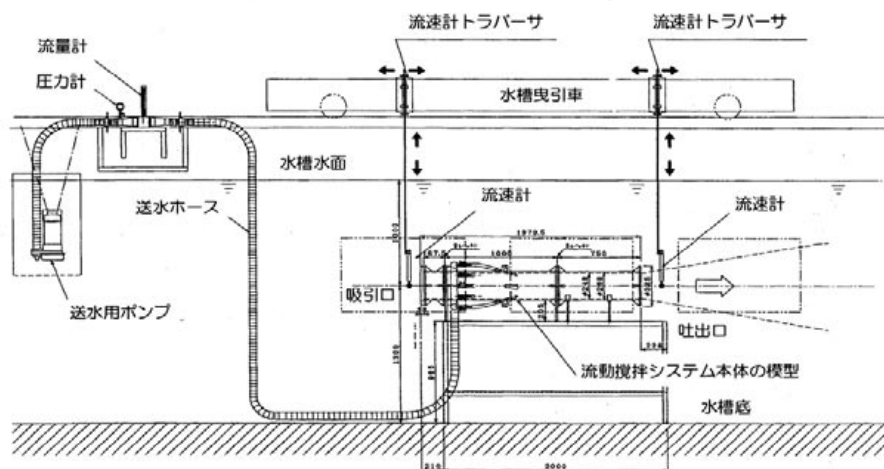


図4 流動攪拌装置の水槽試験

Fig. 4 Tank test of the mixing diffuser model

が流出する。吸引口から流入する底層水の流速と吐出口から流出する混合水の流速を、流速計トラバーサーのロッド先端に取り付けた小型電磁流速計で計測した。計測位置は、吐出口ではダクト中心点と、鉛直方向・水平方向ともダクト内径の最も外側の上下左右の4点および中心から内径の1/4の4点の計9点とし、吸込口ではこの9点の他にベルマウス上の上下左右の4点を加え13点とした。吸引口からの流入量 Q_s と吐出口からの流出量 Q_d は流速分布を積分することにより推定した。

(4) 墨汁を薄めた液により流れの可視化を行い、乱流による混合攪拌状況を確認した。

3.3. 水槽試験の結果と考察

3.3.1. 流動攪拌装置の性能

水槽試験の結果をポンプ流量およびダクトの吸入・吐出量としてまとめたものを表1に示す。ノズルの傾斜角を 17° 、 27° の2種類、捻り角を 0° 、 5° 、 10° の3種類とした。ノズル本数は3, 4, 6, 12の4通りとした。送水ポンプのパワー1.5kw、また噴出ノズルの径14 mmを一定としているので、ノズルの本数により送水の流量が変化する。水槽試験時の送水ポンプの吐出流量 Q_p は流量計により計測され、ほぼ妥当な値が得られている。ダクトの吸入口と

吐出口で流速を計測しているの、この流速を用いて吸入量 Q_s と吐出量 Q_d を推計できる。

吸入口の流量は、鉛直方向・水平方向のそれぞれ7点の流速を用いて、シンプソンの法則と台形の法則を併用し方向毎の平均流速を求め、その平均流速から流量を計算した。吐出量は、吐出口で計測した鉛直方向・水平方向のそれぞれ5点の流速を用いて、シンプソンの法則を利用して方向毎の平均流速を求め、その平均流速から流量を計算した。

表1の最後の欄、 $Q_d/(Q_p+Q_s)$ は流速計測からの流量推計の精度を表わしている。ポンプの流量とダクト吸入量の和はダクトの流出量に等しく、この比は1になるべきものである。ノズルの捻り角度が小さいと比は1よりかなり大きい、捻りが大きくなるにつれて比は1に近づいている。吸入量はほぼ安定していることから、吸入量の推計はほぼ妥当なものである。ノズルの捻り角が大きいと吐出口の流速分布が均質化され、流量の推計精度が高くなったと考えられる。捻り角が小さいときには、流れが不均質になり、精度が低下したことを示唆している。

(1) ノズル本数が少ない程、表層水流量 Q_p は小さく底層水吸入量 Q_s は大きい。逆に、ノズル本数が多くなると、表層水流量 Q_p は大きく底層水吸入量 Q_s は小さくなる。

表1 流動攪拌装置の流力特性：ポンプ流量、ダクトの吸入・吐出量
Table 1 Hydrodynamic characteristics : Pump discharge Q_p , inlet suction Q_s and outlet discharge Q_d of Duct

ノズル 捻り角	ノズル 傾斜角	ノズル 本数	ポンプ $Q_p[m^3/h]$	吸入量 $Q_s[m^3/h]$	吐出量 $Q_d[m^3/h]$	$Q_d/(Q_p+Q_s)$
0°	17°	3	13.8	132.2	184.7	1.27
		4	16.2	126.7	183.5	1.28
		6	19.5	112.3	181.4	1.34
		12	18.9	68.8	135.7	1.55
0°	27°	3	13.7	126.0	155.4	1.11
		4	16.2	126.7	183.5	1.28
		6	18.9	94.7	155.7	1.37
		12	22.0	54.7	125.0	1.63
5°	17°	3	13.8	129.8	172.1	1.20
		4	16.2	119.7	170.1	1.25
		6	19.1	131.1	168.0	1.12
		12	22.2	98.0	128.2	1.07
5°	27°	3	13.8	97.0	148.1	1.33
		4	16.1	107.6	157.5	1.27
		6	19.0	128.3	153.2	1.04
		12	21.9	68.2	116.5	1.29
10°	17°	3	13.7	130.5	158.2	1.10
		4	16.1	130.3	169.5	1.16
		6	19.1	124.4	160.4	1.12
		12	21.9	98.2	126.6	1.05
10°	27°	3	13.8	133.8	147.0	1.00
		4	16.1	124.6	149.6	1.06
		6	19.1	108.7	147.9	1.16
		12	21.9	88.7	119.1	1.08

(2) 吸入量に対するノズルの捻りの効果は小さいので、傾斜角をパラメータとして平均した。ノズル本数に対する Q_s および Q_s/Q_p との相関を図5に示す。ノズルの傾斜角が大きくなると、流量比は小さくなる傾向がある。

水槽試験に使用したポンプの性能表から推定したポンプの揚程と効率、また試験から得られたポンプの流量 Q_p とダクト吸入量 Q_s の平均値をまとめて表2に示した。ノズルの本数が少ないと、揚程が大きくなりポンプ効率は高くなる。より少ない流量で底層水をより多く動かすことができることを示している。逆に、ノズルの本数を多くすれば、ポンプ効率は低くなるが、より多くの表層水を送水でき、底層水の吸引は少なくなる。この表の最後の列に装置

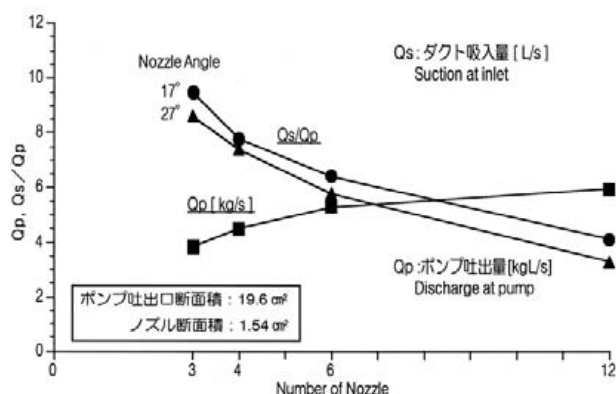


図5 流動攪拌装置の流力特性(水槽試験)

Fig. 5 Hydrodynamic characteristics of the mixing diffuser (Test model)

表2 流動攪拌装置の性能評価

Table 2 Performance of the mixing diffuser

ノズル 本数	揚程 [m]	ポンプ 効率 η	ポンプ Q_p [m³/h]	ダクト Q_s [m³/h]	性能 $\eta Q_p/Q_s$
3	11.7	0.43	13.8	130.4	0.0455
4	9.7	0.37	16.2	125.7	0.0477
6	7.4	0.30	19.1	116.6	0.0491
12	4.5	0.20	22.0	84.3	0.0522

全体としての性能の目安となる $\eta Q_p/Q_s$ を示した。ポンプ効率が低いほど、ポンプ送水量が多いほど全体性能は高くなるが、底層水の無駄な流動には反比例することを意味している。試験の範囲では、ポンプ効率が少し悪くてもノズルの本数を大きくして、底層海水を無駄に流動させない方が全体性能が高いことを示唆している。

3.3.2. 流れの可視化

流動攪拌装置の混合ダクト内の流れを可視化した例を図6に示す。この写真はノズル：3本、捻り角：5°、傾斜角：17°のものであるが、他のものもほぼ同じような結果が得られている。ノズルは左側にあり、黒く着色された表層水が3本噴出している。ダクト吸入口からの流れの影響を受けて、噴流は次第にダクトと平行になる傾向を示すが、会合点付近から下流側では乱流となってダクト内全体に拡がっている。このことから、噴流の会合点から下流で圧力は十分に回復しており、従ってノズルの傾斜角度を大きくした方が装置を小型化できる。

3.4. 数値モデルによる評価

流動攪拌装置の流力特性は水槽試験から理解できるようになった。結論として、ポンプ効率と装置の全体性能は矛盾した設計要素であり、またポンプ送水量の数倍の底層水を流動させることも明らかになった。実機的设计では設計要素間のある程度の妥協は強いられるが、今後の設計や評価に資するために、数値モデルを作成して、流動攪拌装置の流力特性を評価検討した。

解析ソフトは設計者用のパーソナル3次元熱流体解析ツールであるSTAR-4Tを使用した。水槽試験用模型に合わせて、ダクト長：100cm、ダクト径：25cm、ノズルの取付位置：吸入側より30cmとした。ノズルは等価断面積の矩形とし、メッシュ分割では噴流の効果を考慮して、ノズル近傍のメッシュを他の半分のサイズとした。流体は水とし、物性値として、密度：1000kg/m³、粘性係数：1.002e-3Pa·s、 $k-\epsilon$ 乱流モデルを用いた。境界条件として、ノズル流速は水槽試験のポンプ流量に合うよう調節



図6 流れの可視化(ノズル：3本、捻り角：5°、傾斜角：17°)

Fig. 6 Flow visualization in the mixing duct

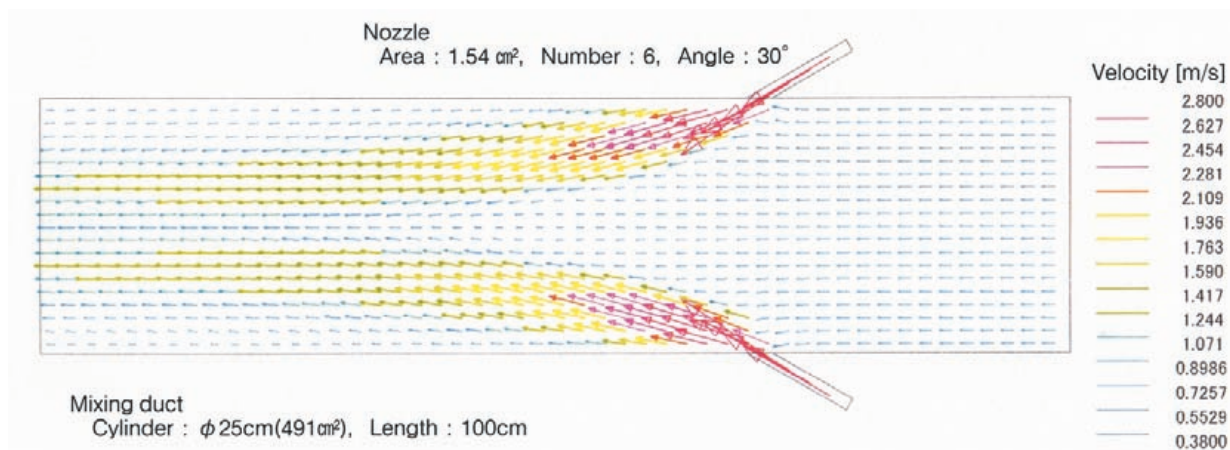


図7 混合ダクト内の流速分布(数値モデル)

Fig. 7 Velocity vectors in the mixing duct (Numerical model)

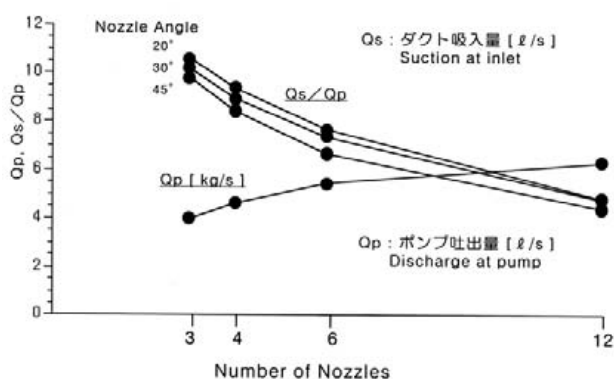


図8 水槽試験用流動攪拌装置の流力特性(数値モデル)

Fig. 8 Hydrodynamic characteristics of the mixing diffuser (Numerical model)

した。また、ダクトの吸入口・吐出口は圧力境界とし、乱流強度：0.05、渦スケール：0.025を用いた。

数値解析はノズル本数($n=3,4,6,12$)およびノズル傾斜角($\theta=20^\circ, 30^\circ, 45^\circ$)について行った。図7にノズル：6本、傾斜角： 30° のダクト縦中心断面流速分布を示す。流れの基本的なパターンは流れの可視化で示された結果とほぼ一致している。また、ポンプ流量とダクト吸入量比 Q_s/Q_p を図8に示す。水槽試験の結果より少し大きな流量比となっているが、ノズル本数が増えると吸入量が少なくなり、流量比が低下していくこと、またノズルの傾斜角が大きくなると吸入量は少なくなることなどが得られている。

4. プロトタイプ的设计製作

このプロジェクトは大村湾の流動攪拌システムの性能評価を目的とした。本システムは夏季の成層化によって分離された表層と底層の海水を効果的に攪拌混合させ、密度躍層付近における滞留と水平拡散により基礎生産を促させるシステムの研究開発を目標とした。このため流動攪拌装置の小型模型により流力性能試験を行ない、設計パラメータを検討した。流動攪拌装置は表層水の5~10倍の底層水を流動させることができることが分かった。

この結果、混合ダクトが水平のままでは、底層の海水が単に水平移動しただけになり、エネルギーの無駄が大

きすぎることが判明した。これを解決するため、混合ダクトの吐出口を上に向けることを基本として流動攪拌装置プロトタイプの詳細を設計した。表層水の運動量が底層水に変換されるので底層水を中層ないし表層まで上昇させることができ、また乱流エネルギーにより攪拌混合させることを期待した。

流動攪拌装置プロトタイプの外観を図9に示す。本装置は、本体、支持架台、送水ホースから成る。さらに本体は、環状マニフォールド、ノズル管、混合ダクト、吐出ダクト、吐出ダクト回転機構などから成る。環状マニフォールドは計測制御用浮体に搭載されている送水ポンプ装置と送水ホースで連結される。

本体は全長約3.6m、内径1mの水平設置・吐出方向可変型のダクトである。吐出ダクトは、吐出流の方向を、水平、斜め上方、あるいは鉛直上方向きに、計測用浮体上からリモコン操作により変更可能である。このため、エルボー型の吐出口が、ダクト本体中心軸まわりに回転し得るようにした。

環状マニフォールドは、送水ポンプから送られる表層水をノズル管から噴出させるための環状集合・分岐管である。流路断面積は内径150mmφの円筒横断面積に等価なものとし、内部保守が可能な分割組み立て式構造とした。ノズル管の本数は円周方向に等間隔に6本とし、これらの総断面積は送水ポンプ吐出口断面積(内径100mm)を等しくするものとした。このためノズル管は内径40mmφのものを使用した。ノズル管中心軸は、混合ダクト中心軸を含むダクトの長手断面内にあり、この断面内でノズル管がダクトを貫通する点でダクト円筒面母線(ダクト中心軸と平行)となす傾斜角を30度とした。

大村湾では、夏季に底層水が約3m高さまで発達するので、混合ダクトの高さがほぼ中間に入るよう、ダクトの支持架台を設計した。流動攪拌装置本体のダクト中心を海底面上約1.7mの高さでほぼ水平に設置し得るものとし、転倒せず不当沈下がないように、接地端全長3.3m、同幅2.8mとした。

吐出ダクト回転機構は、計測制御用浮体上からの遠隔

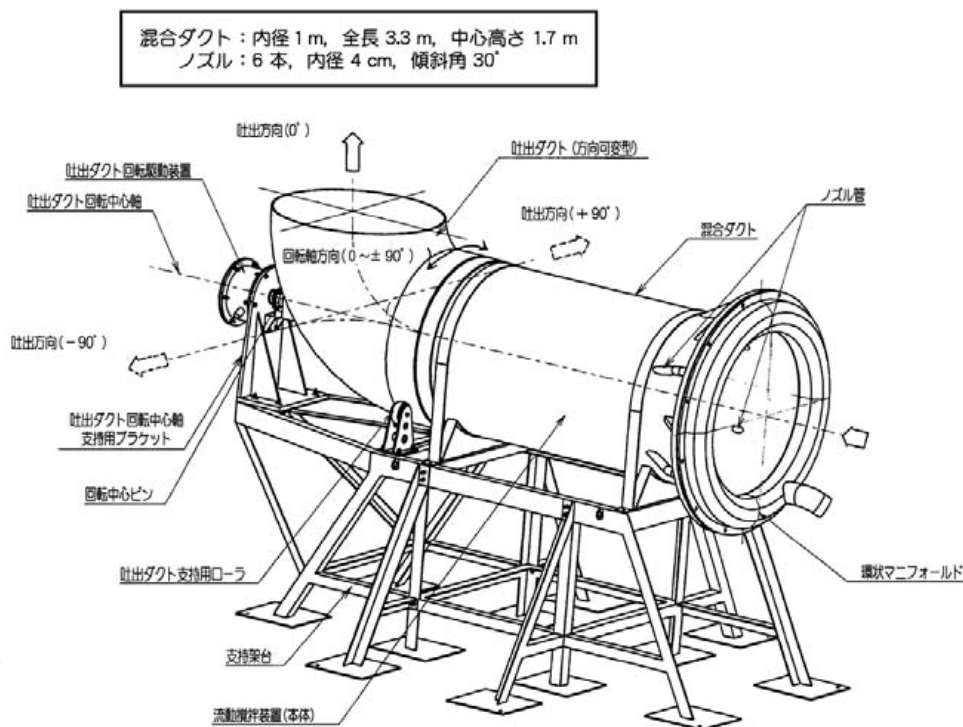


図9 流動攪拌装置(実機プロトタイプ)

Fig. 9 Prototype of the mixing diffuser for sea testing

操作により、エルボー型の吐出ダクトの方向を鉛直上方と水平方向との間の任意の角度(0度～±90度)に設定、変更させることができる。吐出ダクト端に、ダクト本体中心軸(直線)の周りに180度の回転角変位の自由度を持つ回転可動部を設け、これを水中サーボ・アクチュエータにより希望の仰角に設定することができる。なお回転角変位は、吐出ダクト回転中心ピンの先端に回転型ポテンシオメータを連結して角度変位信号を検出し、計測制御用浮体上で設定角度が確認出来るようにするものとした。

吐出ダクト回転機構に用いる水中アクチュエータとして、パルス列制御型ACサーボ・アクチュエータ(ハーモニック・ドライブ方式：入力電源AC100V)を用いた。これを制御するサーボ・コントロール・ユニットは計測制御用浮体上に置き、海底のアクチュエータとをつなぎ制御用水密ケーブルは、送水ホースに沿わせるものとした。

送水ホース(長さ40m)は繊維補強入り塩化ビニール製ホース(公称内径125mm)を採用、内部に生物付着防止のため、有色非透過光性ホースを選定した。また計測制御用浮体の波浪中の運動に基づくホースの疲労損傷を防止するため、海面から10m程度までチェーンに沿わせ、ホースの自重及び浮体の動揺に伴うに基づく過大な相対運動や力がホースに極力及ばないようにした。

5. 海域性能評価試験

5.1. 流動攪拌システム流力性能評価

流動攪拌システムのうち計測制御用浮体を平成11年3月末に大村湾の定点に設置した。本浮体の形状は4m×4m×1m(排水量：6t)であり、アンカー／チェーンにより4点係

留した。浮体には送水ポンプ、水質計測センサ、気象センサ及びデータ送信部を装備している。流動攪拌装置の製作設置を平成11年6月末に完了した(図10)。なお、装置は東西方向、吸入口を東に向けて設置した。

流動攪拌システムが装置近傍の海水をどの程度流動させるかを把握するために、流動攪拌装置を設置後、表層海水のポンプ送水量、底層海水の吸引量、海水の吐出量を計測した。混合海水の移流拡散状況は流向流速計および多項目水質計により計測した。

流動攪拌装置の吸入口と吐出口で計測したの流速分布を図11に示す。各口とも直交する2測線で計測した。吸入口では、30cm/s程度のほぼ様な流れである。これに対し、吐出口では、中心で小さく、周辺で大きくなる傾向が見られた。稼働中の送水ポンプの電圧：192V、電流：22Aおよびポンプの性能曲線から推定した表層水のポンプ吐出量は36.7L/sであった。これから、ノズルの噴出流速は4.56 m/sと推定された。

流動攪拌装置プロトタイプの流力特性に関しても、数値モデルによりシミュレーション計算した。流入口と吐出口の流速分布は計測されたものとほぼ同様の傾向がみられた。数値シミュレーション解析から推定したノズル流速と混合ダクトの吸入量の関係およびプロトタイプの作動点を図12に示した。これから底層水の吸入量は280L/sと見積られ、表層水の8倍程度の底層水を吸引しているものと推定された。なお、吸入口の平均流速は36.7cm/sとなり、計測値とはほぼ一致している。

吐出口から流出した混合海水が上向きに上昇していることはビデオの映像から確認されている。躍層下端(7m)

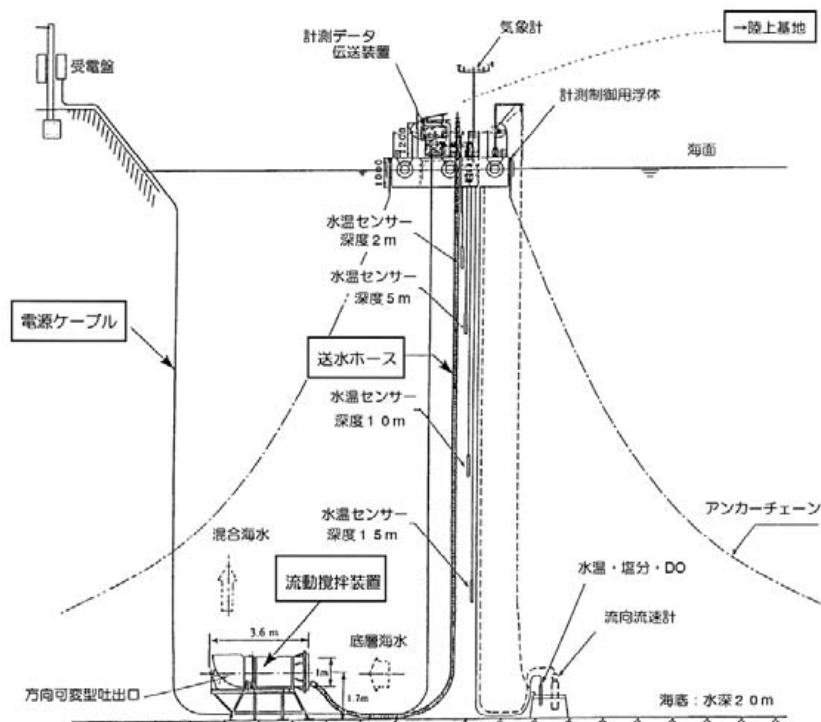


図10 流動攪拌システムの海域性能評価試験
Fig.10 Sea test of the mixing diffuser

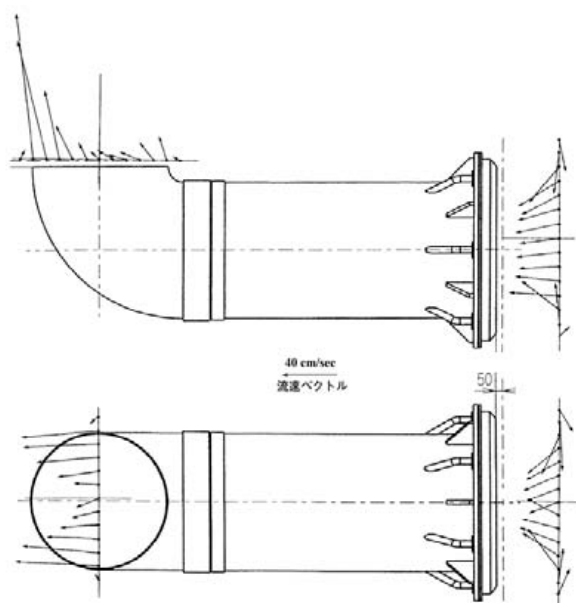


図11 流動攪拌装置の吸入口・吐出口の流速分布
Fig.11 Velocity vectors at the inlet and outlet of the mixing diffuser

あたりまで上昇し、その深度の流れによって水平に拡散しているものと推定されたが、直接的な検出は困難であった。流動攪拌装置を作動させた直後に、装置周辺で計測した水温、塩分、密度、溶存酸素、クロロフィルa、透過度の南北・東西断面分布を図13に示す。環境プロファイラーSBE25を用いて、装置の南北方向6点(北100m, 50m, 20m, 南10m, 50m, 100m)、また東西方向5点(西100m, 30m, 0m, 東30m, 100mの測点)において鉛直分布を計測

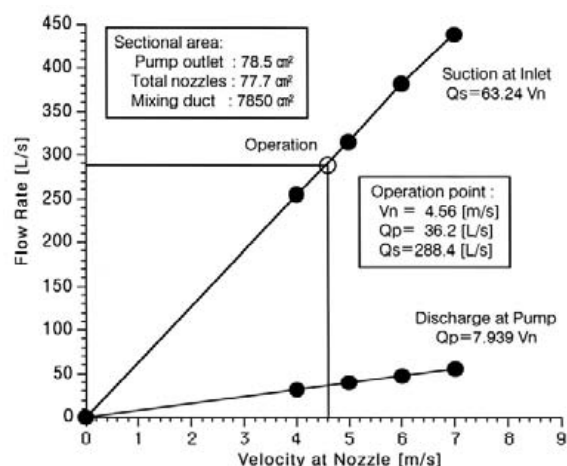


図12 流動攪拌装置(プロトタイプ)の流力特性(数値モデルと実機の作動点)
Fig.12 Hydrodynamic characteristics of the prototype mixing diffuser (Simulation model and operational point of the prototype)

した。計測時間は約40分であった。なお、この時点での深度3mにおける表層流速はほぼ東向き約9cm/s(東方:8.8cm/s, 北方:2.7cm/s)であった。この図から流動攪拌装置の効果を読み取ることは難しいが、装置の南方では深度8~9mで溶存酸素とクロロフィルaが低下しており、底層水がこのあたりに分散していることを示唆している。また装置の東側では装置に引き込まれたようなパターンを示している。この計測結果が本当に装置の効果であるかどうかは不確かであるが、表層・底層の混合水が中層付近に上昇していることは確かである。

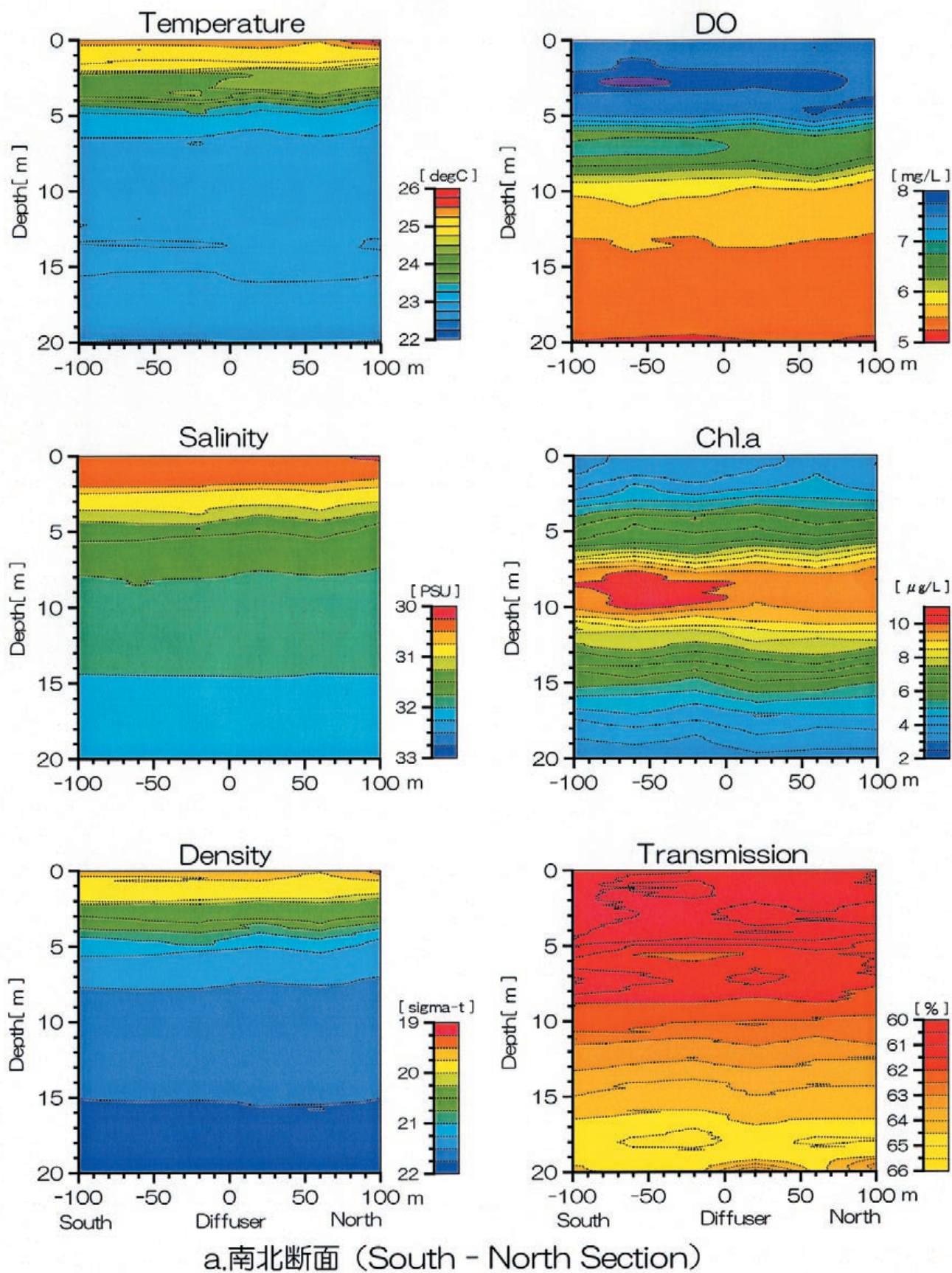


図13 流動攪拌装置周辺の海水環境(平成12年7/9/10 a.m.)
Fig.13 Environments around the mixing diffuser (9 July 1999)

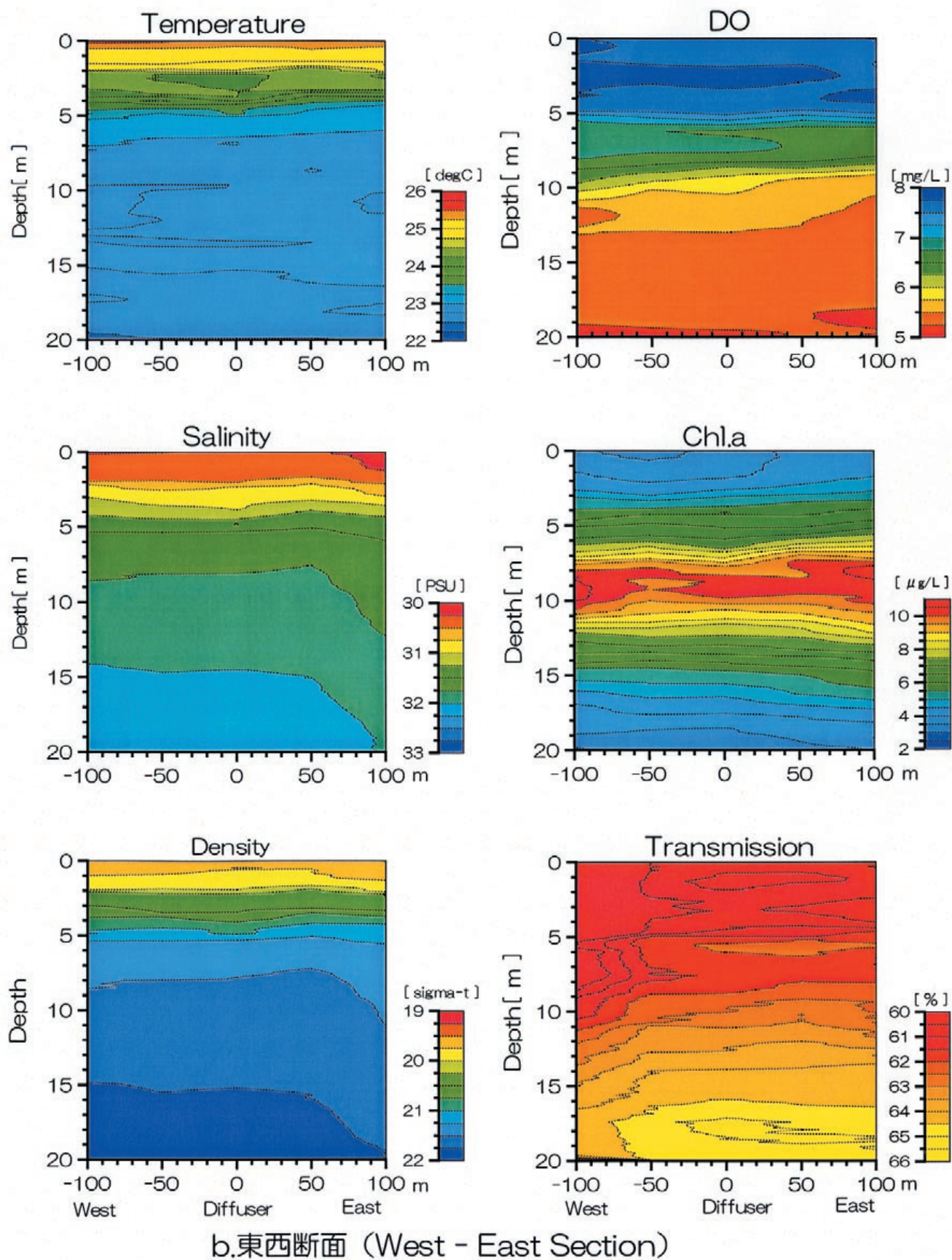


図13 流動攪拌装置周辺の海水環境(平成12年7/9/10 a.m.)
Fig.13 Environments around the mixing diffuser (9 July 1999)

5.2. 流動攪拌システムの環境影響調査

流動攪拌装置設置後の7月から9月まで4回の環境調査を実施した。

大村湾の広域環境調査，流動攪拌装置の流力性能調査，装置周辺の詳細環境調査，採水・採泥による栄養塩・植物プランクトン・動物プランクトン調査，セジメントトラップによる有機物沈降量調査，ベンシックチャンバーによる底質の酸素消費速度などを調査したが，ここでは流動攪拌装置近傍の水質調査結果を図14に示す。

平成11年の夏季は降水量が平年を大きく上回り，また平均気温も1℃程度低めに推移した。台風接近等による強風も数回観測された。このため成層化は全般的に弱く，貧酸素水の形成も底層近くに限られる傾向にあった。

栄養塩は深度15mまでほとんど変化がなく，底層では還元状態に伴う底質からの溶出によって， $\text{NH}_4\text{-N}$ ， $\text{PO}_4\text{-P}$ は著しく高い濃度になっている。

8月～9月に5m層で植物プランクトンの顕著な増殖がみられた。これは渦鞭毛藻類に赤潮によるものである。動物プランクトンについては例年と同様のレベルで推移した。湾中央部に比べて装置設置海域の底生生物は個体数・種数とも高い傾向にあるが，貧酸素の増大に伴い減少し，9月下旬にはほとんど同じ低レベルになった。

セジメントトラップによる沈降物の調査によると，7月から9月にかけて沈降物量は次第に減少していった。これは主として植物プランクトンなど有機物の減少による。なお，湾中央部と装置設置点で有意な差は認められなかった。

大村湾は中心軸が北西～南東であり，平成11年夏季の

風は南／北が交換する傾向がみられた。風による吹送流が持続すると，底層には表層と逆向きの流れが誘起される。したがって小さな湖沼などとは違って，底層は完全に停滞することはない。したがってこのような海域では底層水の流動による底質への効果はあまり期待できず，この流動攪拌システムのように，底層水を中層に上昇させる方式にすべきであることを確認することができた。

6. 考 察

流動攪拌システムの性能評価試験では表層・底層海水の混合拡散と底層海水の流動による底質改善に関する調査研究を実施した。流動攪拌システムが表層・底層の海水をどの程度流動させるかを把握するために，流動攪拌装置近傍の流動場を調査した。表層水のポンプ送水量36kg/sに対して底層水の吸引量は280kg/sと推定され，約8倍の底層水が流動する。混合海水の移流拡散状況は流向流速計および多項目水質計により計測した。底層の低DO海水が躍層下端(7m)あたりまで上昇し，その深度の流れによって水平に拡散していることが実証された。この物理過程は時間スケールが短いので，生物過程への影響が直ちに現れることはないが，人工的な湧昇が継続することにより，生態系の活性化につながることを期待できる。なお，大村湾のように比較的に大きな湾域では表層の吹送流とバランスするような底層流が自然に発生するので，底層水の人工的な流動による底質改善への効果は小さい。

流動攪拌システムが環境に与える影響を評価するた

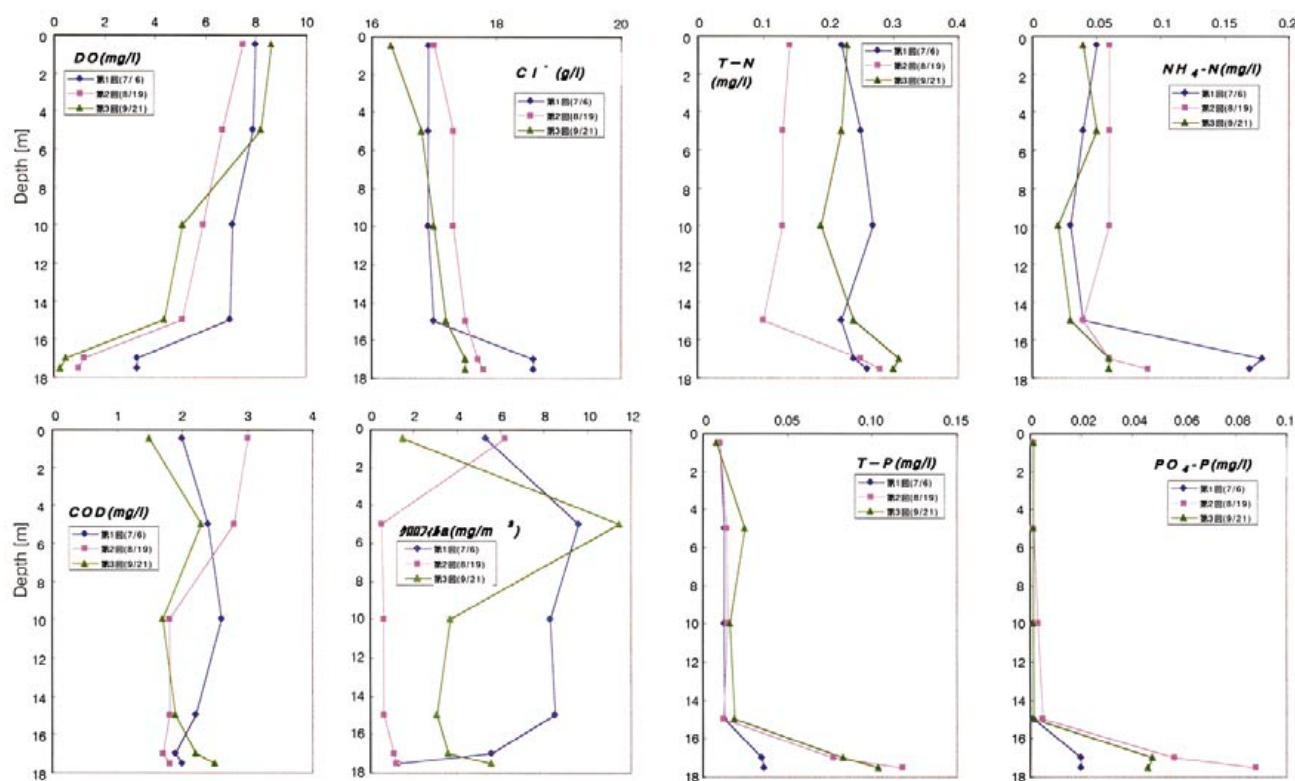


図14 流動攪拌装置近傍の水質鉛直分布の変動(平成12年7/8, 8/19, 9/21)

Fig.14 Variation of the profiles of water quality (1999)

め、装置稼動前後および湾央参照地点において、水質・底質、植物・動物プランクトン、底生生物等を計測調査した。9月には底層近くに強い貧酸素水が形成され、それに伴う栄養塩類の溶出も検出された。しかし、水質環境、底質環境ともマクロなレベルでの顕著な変化は認められなかった。

平成11年度は降水量が平年を大きく上回り、また平均気温も1℃程度低めに推移したこともあり、全般に成層化は弱く、貧酸素水の発生も底層近くに限られる傾向にあった。このプロジェクトで試作した流動攪拌システムは大村湾全域に比べれば極めて小さなものであり、物理的・局所的・短期的な性能評価は可能であるにしても、生物学的・長期的な環境影響評価は極めて困難である。大村湾の環境浄化戦略構築のためには、海域の調査研究のみならず総合的なモデルによる評価研究を進めることも必要となる。大村湾への流入負荷量の評価と規制、貧酸素水塊発生メカニズムを解明するための大村湾海域特性研究、流動攪拌システムなどによる海水流動促進技術の研究開発、富栄養と水質汚濁のプロセス研究、さらにこれらを統合した大村湾シミュレータの構築が望まれる。

7. おわりに

これまでの調査結果からは流動攪拌システムによるマクロなレベルでの環境影響は認められなかった。しかし流動攪拌の時間スケールは短く、また混合海水は薄く広く拡散するので、通常の計測器で測定できるほどの影響が直ちに現れるということはないが、人工的な湧昇が持続することによって、生態系の活性化につながる事が期待できる。

このプロジェクトで試作した流動攪拌システムは大村湾全域に比べれば微々たるものであり、物理的・局所的・短期的な性能評価は可能であるにしても、水質的・生物学的・長期的な環境影響評価は極めて困難である。したがって、流動攪拌システムの総合的な評価は統合的なモデルによって進めることも必須の条件となる。大村湾央部で貧酸素水塊が発生し、それが全域に拡大していくメカニズムを解明するための大村湾の海域特性研究、流動攪拌システムの性能試験研究、富栄養と水質汚濁のプロセス研究、さらにこれらの統合した大村湾シミュレータの構築が期待される。

今後とも大村湾の海域特性モデルと物質循環モデルを統合した大村湾の水質予測モデルの研究開発を継続し、流動攪拌システムによる生態系の活性化と海水浄化を総

合評価するとともに、流入負荷の抑制、海水交換の利用、栄養塩の取上げも含めた大村湾浄化を進めていくことが必要である。日本造船学会海洋環境研究委員会MECモデル専門委員会は大村湾における流動攪拌システムの評価研究をケーススタディとして取り上げており、その成果が期待される。

最後に、本プロジェクトを進めていくにあたりご協力いただいた長崎県商工労働部、長崎県工業技術センター、長崎県衛生公害研究所、長崎県総合水産試験場、大村湾南部漁業協同組合の関係各位に感謝いたします。また大村湾貧酸素水塊発生抑制技術開発研究会(平山次清座長)の委員から貴重なご助言をいただきました。本システムの設計には(株)マリン技研 代表取締役 吉永勝利氏、同常務 葛西宏直氏のご協力をいただきました。模型の水槽試験には長崎総合科学大学 慎燦益教授の協力を得ました。海域調査は海洋科学技術センターの中村仁研究員、古島靖夫研究員、(株)マリン・ワーク・ジャパン、(社)長崎県食品衛生協会食品環境検査センターの協力により実施できました。本論文のグラフ作成には(有)眞考房製作 代表取締役 佐藤節雄氏の協力を得ました。各位に心よりお礼申し上げます。

参考文献

- 1) 飯塚昭二, 日本全国海洋沿岸誌, (東海大学出版会, 1985), 大村湾(I 地理, II 物理, III 化学), 879-893
- 2) 須藤隆一, 内湾・内海の海水特性(ぎょうせい, 東京, 1996), 7.2 大村湾における取り組み, 209-218.
- 3) 兵頭竜二, 衛星リモートセンシングとシミュレーション・システムの複合による閉鎖性湾の流動解析(長崎大学海洋生産科学研究科博士論文, 1998), 142
- 4) 福本正, 大村湾における流動特性と水質予測に関する研究(長崎大学海洋生産科学研究科博士論文, 1997), 115
- 5) 野上真子, 大村湾の底層における貧酸素水の形成機構について(長崎大学海洋生産科学研究科修士論文, 1997), 46
- 6) 長崎マリン技術開発協同組合, 海域浄化装置ポセイドンの開発成果報告書, (1995)
- 7) 大内一之, 山磨敏夫, 小林勝弥, 中村允, “密度流拡散装置の研究開発”, 日本造船学会論文集, 183, 281-289(1998)
- 8) 柳哲雄, 沿岸海洋学—海の中でのものはどう動くか(恒星社更生閣, 東京, 1989), 154

(原稿受理: 2000年9月7日)