

人工魚礁設置海域における  
環境改善機能評価に関する研究

2021年2月

香川大学大学院工学研究科 安全システム建設工学専攻

博士後期課程

18D403 中村 明日人

# Evaluation Technology of Environmental Improvement in the Marine Area Where Artificial Reefs Are Submerged

Akito Nakamura

## Abstract

Osaka Bay has long been called the "*Naniwa no Umi*," and has a series of environments that are favorable for the growth of seafood, and is rich in marine resources, and various fisheries have been actively carried out. However, due to various developments in the coastal areas during the period of high economic growth, landfill and water pollution progressed mainly in the inner part of the bay, red tides occurred, and shallow areas and seaweed beds that served as spawning grounds and breeding grounds for fish and shellfish disappeared. The seawater flow is stagnant due to the pockmarks formed by dredging, etc., and oxygen-deficient water masses are generated in the summer. In addition, due to the sophistication of water treatment technology, the inflow pollution load has decreased, and as a result, the shortage of nutrients such as nitrogen and phosphorus in the southern waters of Osaka Bay has become remarkable, and the catch of Osaka Bay was in 1982. In recent years, there have been about 230 species, which have peaked at 114,000 tons, and have been around 20,000 tons per year, and the decline in resource productivity is becoming more serious.

Therefore, as a new fishery promotion measure, Osaka Prefecture will use the constant current flow that exists in Osaka Bay to install artificial fish reefs with a stirring function in the waters from the northern part to the central part of the bay to promote vertical mixing of seawater. By reducing the generation of oxygen-deficient water masses and allowing abundant nutrients from rivers to flow down to the southern part of the bay, fishery resources and catches are increased, and the marine environment is being improved.

In the past research, the artificial reef used in this project has been verified for its flow control function by hydraulic experiments and quantitatively evaluated for the range of influence of the flow control effect. Demonstration has been attempted, and its usefulness has been confirmed in the biological collection effect survey, but the research results linking the flow control function after installation with changes in the surrounding environment are scarce, and a fishing ground using artificial reefs is created. Quantitative evaluation of both parties in the project is required.

Therefore, the purpose of this study was to quantitatively evaluate the environmental improvement function of artificial reefs constructed in the actual sea area by various field survey methods.

*Keywords: Artificial Reefs, field survey, Current Control Function, Quantitative Evaluation*

## 学位論文の要旨

### 【背景と目的】

大阪湾は、古くから「魚庭（なにわ）の海」と呼ばれ、魚介類の生育に好ましい一連の環境が揃い、水産資源が豊富で様々な漁業が盛んに行われてきた。しかしながら、高度経済成長期の沿岸域の各種開発等により、湾奥部を中心に埋立や水質汚濁が進行し、赤潮の発生、魚介類の産卵場や育成の場となる浅場や藻場の消失、浚渫等に伴い形成された海底窪地により海水の流れに停滞が生じ、夏季には貧酸素水塊の発生している。また、水処理技術の高度化により流入汚濁負荷量の減少し、これにより大阪湾南部海域での窒素、リン等の栄養塩類の不足が顕著となっており、大阪湾の漁獲量は、1982年の114,000tをピークに近年では概ね230種、年間20,000t前後で推移しており、資源生産力の低下が深刻化している。

そこで、大阪府は、新たな漁業振興策として、大阪湾に存在する恒流の流れを利用して、湾北部から中部の海域に攪拌機能を有する人工魚礁を設置し、海水の鉛直混合を促進させ、貧酸素水塊の発生軽減、河川からの豊富な栄養塩を湾南部に流下させることで、水産資源、漁獲量の増大を図るとともに、海域環境の改善を図っている。

この事業に用いられている人工魚礁は、既往の研究の中で、水理実験による流動制御機能の検証、流動制御効果の影響範囲の定量的評価がなされており、実海域でも流動制御機能の実証が試みられており、生物増集効果調査においても、その有用性が確認されているが、設置後の流動制御機能と周辺環境の変化を関連付けた研究成果は乏しく、人工魚礁を用いた漁場造成事業における両者の定量的評価が求められている。

そこで、本研究では、実海域に施工されている人工魚礁による環境改善機能について、各種現地調査手法により定量的に評価することを目的とした。

### 【方法及び結果概要】

①流動制御効果について、人工魚礁設置実海域及び未設海域（対照区）において、超音波ドップラー流向流速計を用いて曳航観測を行い、併せて実施した水質調査の結果も用いて濁度解析を実施した。その結果、人工魚礁設置区域では海底面上で濁度の巻き上がりが生じていることが確認され、その効果範囲を定量的に評価した。

②底質改善効果について、人工魚礁設置海域において、魚礁近傍とその周辺で採泥調査を行い、採取試料を室内分析に供し、その結果から底質の環境基準の評価項目であるCODについて着目し、その値を比較することで底質改善効果の検討を行った。その結果、魚礁区近傍では環境基準を下回っているのに対し、魚礁区から離れるほど、環境基準値を上回っている状況が確認された。また、これらのCOD濃度差を下水処理費用に換算し、費用対効果を試算した結果、高い費用対効果が得られた。

③生物増集効果について、潜水土による目視調査、水中撮影および付着物生物調査を行い、人工魚礁設置後の生物増集状況の確認を行った。その結果、人工魚礁周辺において、カタクチイワシの群れ、大阪府の有用魚種であるキジハタの生息、多くの岩礁性魚類の生息等が確認された。

④人工魚礁の消波機能について、実際に人工魚礁が設置されている海域を想定した水理模型実験により検証を行った。実験では、人工魚礁の配列数を変更させ、与えた不規則波による波高を

人工魚礁前面と背面で計測し，得られた結果を元にエネルギーを算出し，施設前面と背面での比較を行った．その結果，波長に対する施設幅との関係性，施設前面と背面でのエネルギースペクトルの差が確認され，人工魚礁の防災施設としての有効性を検証した．

⑤総合評価として，①～④の結果を元に，人工魚礁の持つ環境改善機能を定量化するために必要な調査手法の検討，その定量化について整理した．さらに，現在飛躍的に進化している調査技術について，より効果的，かつ安価な調査手法とその評価方法，今後の課題についてとりまとめた．

# 目次

第1章. 序論.....	1
1.1 研究背景.....	1
1.2 研究目的.....	5
1.3 研究概要および本論構成.....	6
第2章. 人工魚礁の流動制御機能に関する検討.....	8
2.1 実海域に用いる構造物.....	8
2.2 水理実験による構造物の流動制御機能.....	15
2.3 実海域における流動制御機能の検証.....	18
2.3.1 設置海域位置及び区域内の人工魚礁配置.....	18
2.3.2 調査方法.....	20
2.3.3 調査地点.....	20
2.4 調査結果.....	21
2.4.1 水質機器計測結果.....	21
2.4.2 水質採水分析結果.....	25
2.5 流動制御効果の検証.....	27
2.5.1 ADCP 観測結果からの濁度算出.....	27
2.5.2 成層安定度 $R_i$ ・混合効果 $ME$ ・湧昇効果 $UE$ を用いた検証.....	40
第3章. 人工魚礁による底質改善機能に関する検討.....	45
3.1 底質調査実施位置.....	46
3.2 底質調査結果.....	47
3.3 構造物による底質改善効果の検討.....	50
第4章. 人工魚礁の生物蝟集機能に関する検討.....	52
4.1 プランクトン調査結果.....	52
4.1.1 動物プランクトン.....	52
4.1.2 植物プランクトン.....	54
4.2 餌料生物調査.....	56
4.3 生物蝟集状況調査.....	58
4.4 流動制御と生物蝟集機能の関係.....	60
4.4.1 構造物による漁場造成.....	60
4.4.2 構造物設置の有無による流速の変化.....	61
4.5 漁獲量の変化.....	62
4.6 生物蝟集状況の定量的評価.....	63
4.7 生物蝟集状況調査手法の一提案.....	63
第5章. 人工魚礁の消波性能に関する検討.....	66
5.1 人工魚礁の高機能化.....	66
5.2 人工魚礁の消波機能実験.....	66
5.3 解析方法.....	68

5.4	実験結果	70
5.4.1	実験結果(人工魚礁1列)	70
5.4.2	実験結果(人工魚礁2列)	72
5.4.3	実験結果(人工魚礁3列)	75
5.5	考察	78
第6章	結論	90
6.1	本研究の成果	90
6.2	今後の課題	90
6.3	今後の展望	91
	謝辞	95
	付録	96
1.	ADCP 観測結果からの濁度算出方法	A-1
2.	数値計算による流動解析	A-2
	基礎方程式	A-2
	粒子追跡モデル	A-17

# 第1章. 序論

## 1.1 研究背景

大阪湾は、瀬戸内海の東端に位置しており、周囲を陸地に囲まれた閉鎖性水域である。周囲には姫路市、神戸市、大阪市、和歌山市等が存在し、人口、経済、産業、文化が集中している。大阪湾の海岸線は、これらの後背地の社会経済活動の発展に伴い、高度経済成長期を中心に、埋立等がなされ、かつて存在した浅海域や自然海岸は大幅に減少し、現在では、そのほとんどが埋立地の人工海岸となっている（図-1.1.1 参照<sup>1)</sup>）。大阪湾沿岸の埋立の変遷を図-1.1.2<sup>2)</sup>に示す。大阪湾の埋立は、江戸時代以前から始まっており、戦後復興期、高度経済成長期に急激に増加している。埋立地の面積の推移<sup>3)</sup>によると、昭和40年以降の埋立面積は、神戸港ポートアイランドや関西国際空港島等の大規模な埋立があり、甲子園球場 2,271 個分の海面が大阪湾において消失しているとされている。

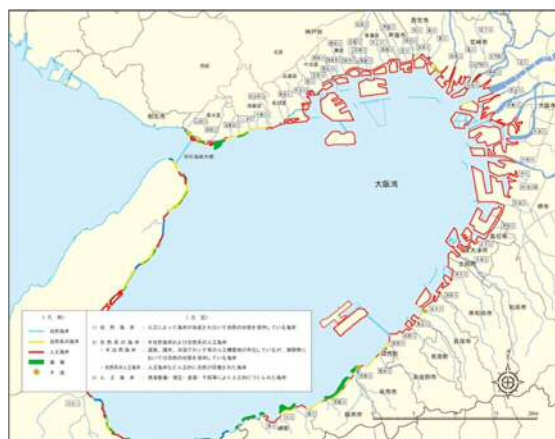


図-1.1.1 大阪湾沿岸の人工海岸線

(出典：国土交通省近畿地方整備局「大阪湾環境図説」(平成14年度))

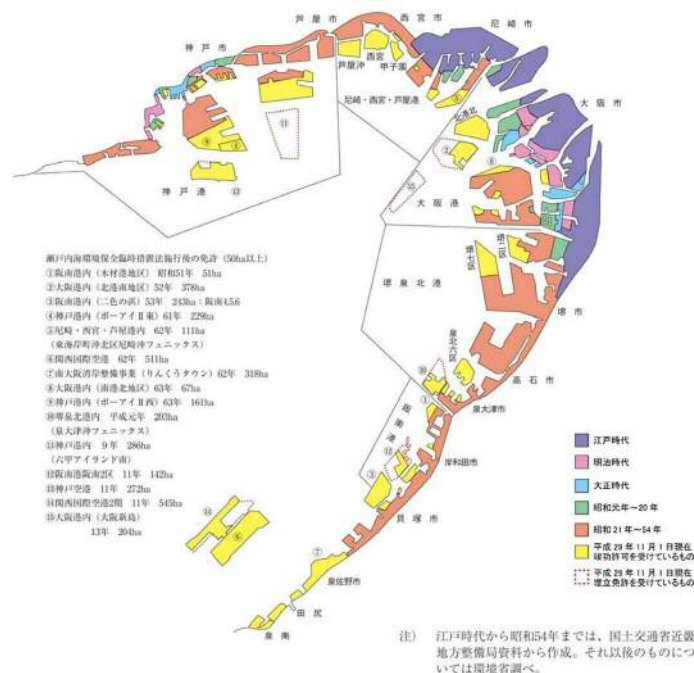


図-1.1.2 大阪湾の埋立の変遷

(出典：瀬戸内海の環境保全 資料集 (平成29年度版) 公益社団法人瀬戸内海環境保全協会)

これらが大阪湾に及ぼした影響を漁獲量に着目してみる<sup>3)</sup>と、沿岸域を主な分布域とする二枚貝類や不明貝類、海藻類の減少が顕著である。これらは、沿岸域の懸濁物食者、堆積物食者であることから、これらの減少は、沿岸域での生物生産機能、幼稚仔保育機能、水質浄化機能の低下に繋がる。また、沿岸域には湾内には海底窪地が存在し、ここでの水質悪化も懸念されていることも合わさって、これらの減少は、貧酸素水塊の発生等の沿岸環境の環境悪化を助長、拡大の要因となったと考えられる。

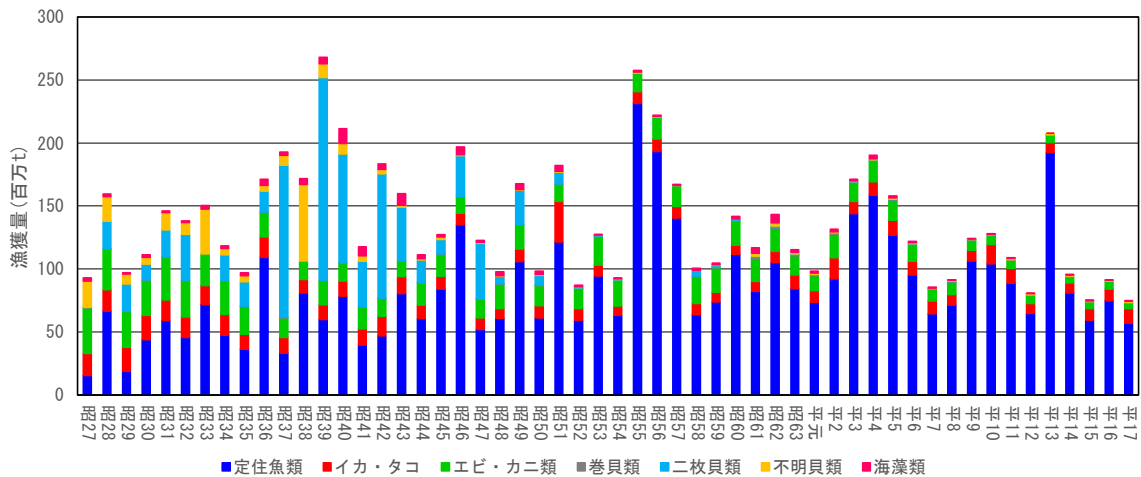


図-1.1.3 大阪湾における漁獲量の推移<sup>3)</sup> (データ元：大阪湾環境データベース)

貧酸素水塊は、一般的に流れが滞りやすい海底に存在する急峻な窪地や内湾のような閉鎖性水域で発生する傾向がある。これは、夏季に鉛直方向の水温差で成層（水温躍層）が発達すると、表層の海水と底層の海水の密度差が大きくなり、鉛直混合が起こりにくくなり、そのような環境下で底層ではプランクトンの死骸等の有機物が堆積し、その分解に大量の酸素が消費され、底層での溶存酸素量が低下し、貧酸素水塊が発生する。

大阪湾では、例年夏季に貧酸素水塊が発生していることが報告されており、水質の悪化が懸念されている。なお、有山らは、1993年11月～1996年2月で四季ごとに大阪湾奥域で調査を行い、5月～8月に魚類、甲殻類が激減することを明らかにしており、玉井は大阪湾での観測結果と室内実験等から、底生生物の生息環境として溶存酸素は3.0mLO<sub>2</sub>/L以上が望ましく、2.0mLO<sub>2</sub>/L以下では汚染指標種でも生息できないと述べている<sup>4)</sup>。

さらに、沿岸生態系の機能不全には、浅海域の消失とともに汚濁物質や栄養塩類の流入負荷も大きく関係している。大阪湾奥には、淀川水系、大和川水系が流入しており、これらからの流入負荷量は大きい。中嶋ら<sup>5)</sup>は、大阪府内河川における水質調査結果（大阪府公共水域水質測定）を整理、解析することにより河川から大阪湾内に流入する栄養塩の変動を調査している。これによると窒素発生負荷量は、1979年から1994年まで横ばいで推移したが、1996年の窒素削減指導、2002年の総量規制の開始により、1999年より減少し、2009年には1999年の約6割に減少したとされている。また、DIN濃度については、湾奥部で1990年代には0.9mg/Lを超える年もあったが、1990年代後半には減少に転じ、2000年代にはさらに低下した。湾奥部沖合、湾中南部海域では、2000年頃まで横ばいしないし、緩やかな低下を続けていたが、湾奥部沿岸域と同様に2000年代に入り、さらに低下した。湾中南部海域では2012年は年間平均値で0.03mg/Lを下回っており、か



つての 1/5 以下の濃度となっているとしている。このことから、各種規制や水処理技術の高度化により、湾奥部への河川からの流入負荷量は減少したが、湾中南部海域では貧栄養となっていることが示唆され、この貧栄養化は、中南部で行われているノリ、ワカメの養殖業にも影響し、色落ち等の現象を引き起こし、これらの品質低下に繋がっている。

これらの湾内の環境変化は、漁獲量にも大きな影響を与えている。大阪湾での漁獲量の推移を図-1.1.4 に示す<sup>3)</sup>。これをみると、1982 年（昭和 57 年）の 114,000t をピークに、現在では、概ね 20,000t 前後で推移していることがわかる。

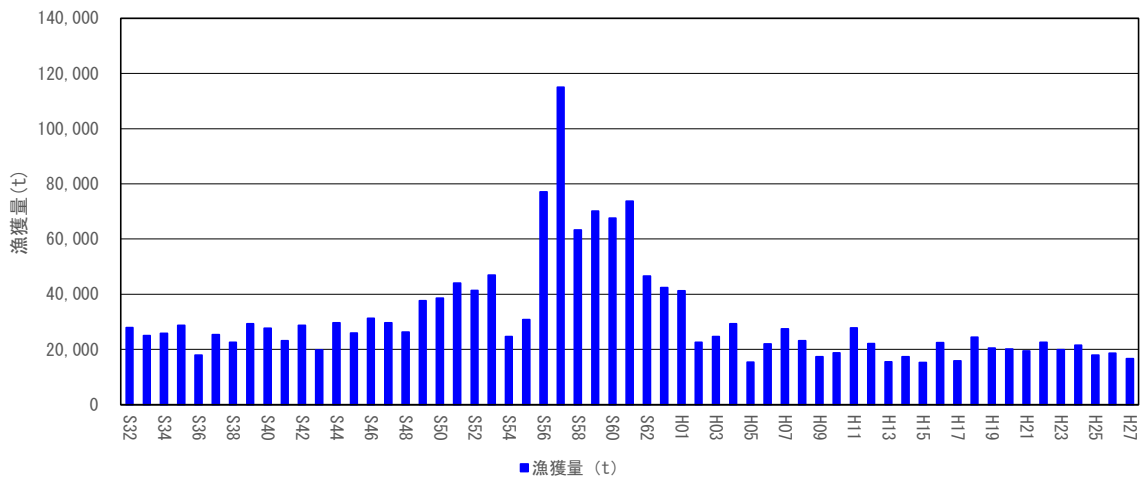


図-1.1.4 大阪湾内漁獲量の推移<sup>3)</sup> (データ元：大阪湾環境データベース)

これらのことから、高度経済成長期の沿岸域開発、各種規制や水処理技術の高度化による流入負荷量の減少は、漁業を中心とする水産業に大きな影響を与えており、これらの影響は深刻な問題となっており、懸念されている。これらの対策として、貧酸素水塊の発生の軽減、栄養塩類の供給が不可欠である。そこで、大阪府は新たな漁業振興策として、人工魚礁を用いた増殖場の整備を平成 26 年度から行っている。

この施策は、大阪湾の中部から北部の貧酸素水塊発生海域(大阪府岸和田市沖から泉佐野市沖)において、湧昇、攪拌流を発生させる人工魚礁(図-1.1.5 参照)を潮流に沿うように設置し。これにより、表層から底層の海水の混合が促進され、貧酸素水塊の発生が軽減し、カレイ類等の稚魚の生存率の向上を図るものである。潮流攪拌のイメージ図を図-1.1.6 に示す。さらに、河川からの豊富な栄養塩を湾南部に緩やかに流下させることで、水産資源及び漁獲量の増大を図るとともに海域環境改善を図るというものである<sup>6)</sup>。なお、本施策に係るこの人工魚礁を用いた増殖場の整備は、1 区域 1ha の増殖場を 8 区域整備する(図-1.1.7 参照)もので、令和 2 年度を以て、予定の 8 区域の設置が終了する。

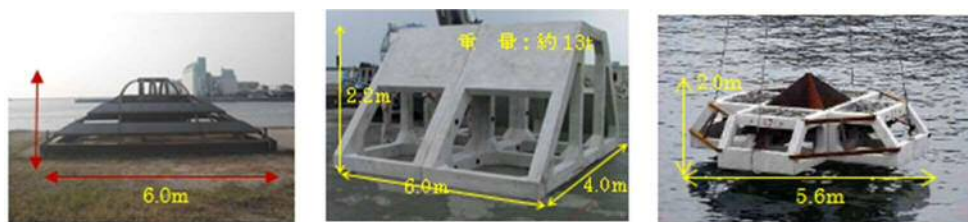


図-1.1.5 事業に用いられている人工魚礁<sup>6)</sup> (出典：大阪府水産課 HP)

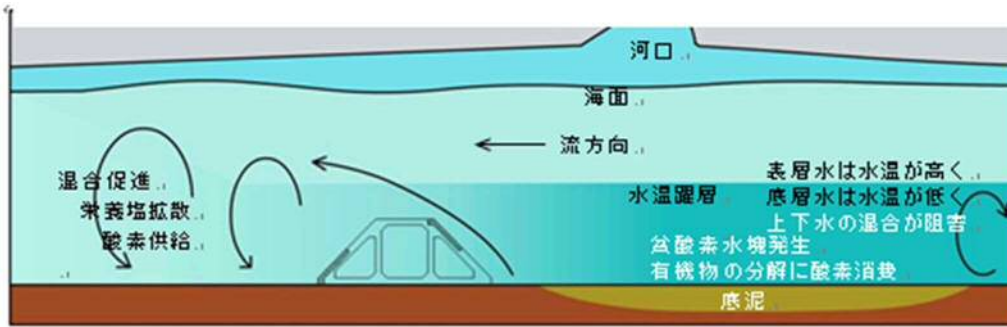


図-1.1.6 潮流攪拌のイメージ<sup>6)</sup> (出典：大阪府水産課 HP)

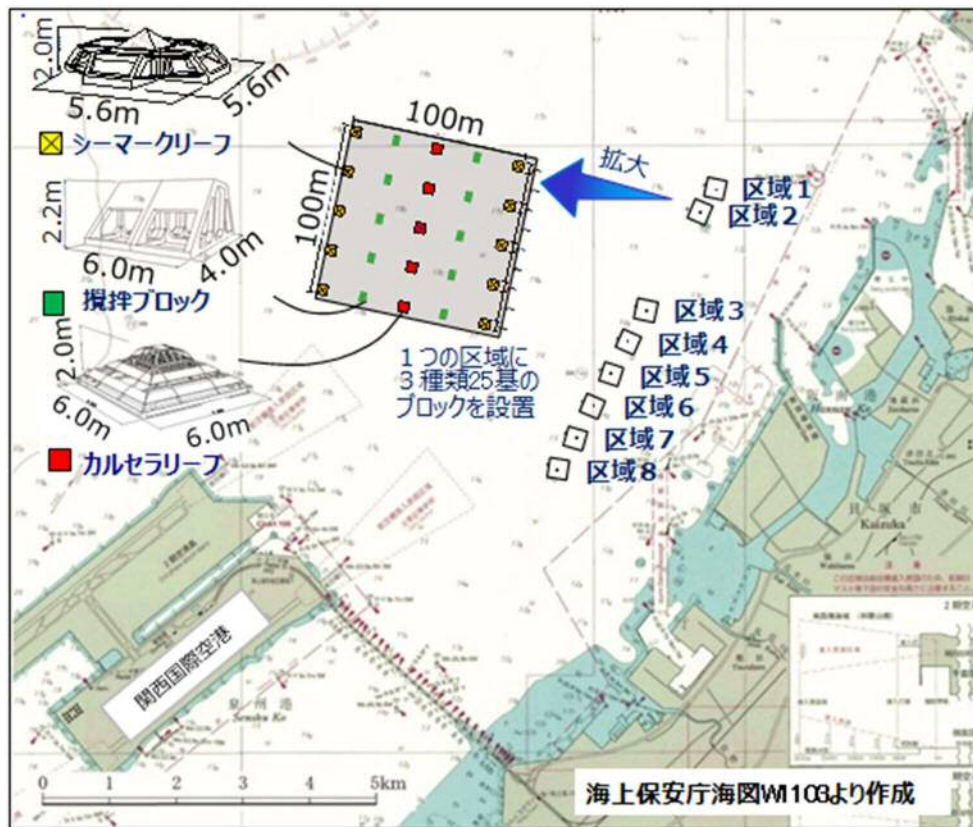


図-1.1.7 大阪湾内における増殖場整備箇所位置図<sup>6)</sup> (出典：大阪府水産課 HP)

## 1.2 研究目的

大阪湾は、古くから「魚庭（なにわ）の海」と呼ばれ、魚介類の生育に好ましい一連の環境が揃い、水産資源が豊富で様々な漁業が盛んに行われてきた。しかしながら、高度経済成長期の沿岸域の各種開発等により、湾奥部を中心に埋立や水質汚濁が進行し、赤潮の発生、魚介類の産卵場や育成の場となる浅場や藻場の消失、浚渫等に伴い形成された海底窪地により海水の流れに停滞が生じ、夏季には貧酸素水塊の発生している。また、水処理技術の高度化により流入汚濁負荷量の減少し、これにより大阪湾南部海域での窒素、リン等の栄養塩類の不足が顕著となっており、大阪湾の漁獲量は、1982年の114,000tをピークに近年では概ね230種、年間20,000t前後で推移しており、資源生産力の低下が深刻化している。

そこで、大阪府は、新たな漁業振興策として、大阪湾に存在する恒流の流れを利用して、湾北部から中部の海域に攪拌機能を有する人工魚礁を設置し、海水の鉛直混合を促進させ、貧酸素水塊の発生軽減、河川からの豊富な栄養塩を湾南部に流下させることで、水産資源、漁獲量の増大を図るとともに、海域環境の改善を図っている。

この事業に用いられている人工魚礁は、既往の研究の中で、水理実験による流動制御機能の検証、流動制御効果の影響範囲の定量的評価がなされており、実海域でも流動制御機能の実証が試みられており、生物増集効果調査においても、その有用性が確認されているが、設置後の流動制御機能と周辺環境の変化を関連付けた研究成果は乏しく、人工魚礁を用いた漁場造成事業における両者の定量的評価が求められている。

そこで、本研究では、実海域に施工されている人工魚礁による環境改善機能について、各種現地調査手法により定量的に評価することを目的とした。

### 1.3 研究概要および本論構成

大阪府は、大阪湾内において、新たな漁業振興策として、大阪湾に存在する恒流の流れを利用して、湾北部から中部の海域に攪拌機能を有する人工魚礁を設置し、海水の鉛直混合を促進させ、貧酸素水塊の発生軽減、河川からの豊富な栄養塩を湾南部に流下させることで、水産資源、漁獲量の増大を図るとともに、海域環境の改善を図っている。

この事業に用いられている人工魚礁は、流動制御機能、攪拌機能、餌料培養機能を併せ持っており、その効果については、既往の研究<sup>7)8)</sup>の中で、水理実験による流動制御機能の検証、流動制御効果の影響範囲の定量的評価がなされており、実海域でも流動制御機能の実証が試みられており、生物蛸集効果調査においても、その有用性が確認されている<sup>9)</sup>が、設置後の流動制御機能と周辺環境の変化を関連付けた研究成果は乏しく、人工魚礁を用いた漁場造成事業における両者の定量的評価が求められている。

そこで、本研究では、実海域に施工されている人工魚礁による環境改善機能について、各種現地調査手法により定量的に評価することを目的とした。

本論は、6章構成である。

第1章では、研究の背景、目的および概要を述べている。

第2章では、人工魚礁による流動制御効果に関して、実海域での調査実施場所、方法について示し、効果の可視化のために、超音波ドップラー流向流速計 ADCP と多項目水質計の取得データを用いた可視化手法を検討している。

第3章では、人工魚礁の底質改善効果に関して、実海域での調査実施場所、分析結果について示し、その結果について考察、検討を行うとともに、濃度差を下水処理費用に換算し、費用便益を算定している。

第4章では、人工魚礁の生物蛸集効果に関して、調査結果を整理し、その結果について考察、検討を行うとともに新たな調査手法の提案を行っている。新たな調査手法は、宇多らが行ったドローンを用いた離岸流観測<sup>11)12)</sup> や市村らが行った空撮と蛍光 X 線分析を用いた現地調査手法<sup>13)</sup> を参考に、IoT 技術に即した安価な観測機器を用いた蛸集状況調査装置の提案を行っている。

第5章では、人工魚礁を消波構造物と考えた際の消波機能について、水理実験を行ったので、その実験方法、実験結果について整理し、その機能について検討している。

第6章は、結論として、本研究の成果のまとめと今後の課題、展望について整理している。

## 【第1章参考文献】

- 1) 「大阪湾環境図説」(平成14年度版), 国土交通省近畿地方整備局, 平成15年2月
- 2) 平成29年度瀬戸内海の環境保全資料集, 公益社団法人瀬戸内海環境保全協会
- 3) 大阪湾環境データベース, 国土交通省近畿地方整備局, <http://kouwan.pa.kkr.mlit.go.jp/kankyo-db/>
- 4) 城久・星加章・中辻啓二・辻野耕寛・矢持進・長田凱夫, 大阪湾の海域環境と生物生産, 水産研究叢書, pp97-104, pp127-128, 2003
- 5) 中嶋昌紀・山本圭吾・佐野雅基・相子伸之・矢吹芳教, 大阪湾栄養塩動態について, 平成26年6月
- 6) 攪拌ブロック礁とは, 大阪府水産課, <http://www.pref.osaka.lg.jp/suisan/kakuhan/index.html>
- 7) 宮川昌志, 流動制御構造物による底質改善技術に関する研究, 平成19年度香川大学大学院博士論文, pp.38-46, pp.36-37, pp.51-56, 2007
- 8) 高田祥暉, 大阪湾における攪拌機能を有する人工魚礁を用いた海域環境改善技術に関する研究, 平成26年度卒業論文, pp.6-12, 2015
- 9) 中村明日人・市村康・城越徹矢・山地功二・末永慶寛, 実海域における人工魚礁の攪拌機能に関する定量的評価, 土木学会論文集 B3 (海洋開発), Vol.71, No.2, pp.1197-1202
- 10) 中村明日人・市村康・城越徹矢・山地功二・末永慶寛, 実海域における人工魚礁の環境改善機能に関する定量的評価, 土木学会論文集 B3 (海洋開発), Vol.72, No.2, pp.1075-1080
- 11) 宇多高明・大谷靖郎・永沼慎吾・大崎康弘・大木康弘・中村明日人, 鹿島灘に面した銚田海岸での離岸流観測, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol.74, No.2, I\_97- I\_102, 2018
- 12) 宇多高明・川又雅史・菊地正悟・大谷靖郎・中村明日人, 鹿島灘に面した柏熊海岸の自然海浜部での離岸流観測, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol.76, No.2, I\_73- I\_78, 2020
- 13) 市村康・藤田孝康・米花正三・中村明日人・鮎本健治・佐野雄一, 空撮と蛍光 X 線分析によるアサリ稚貝の生息適地推定方法の開発, 土木学会論文集 B3 (海洋開発), Vol.74, No.2, pp.97-102

## 第2章. 人工魚礁の流動制御機能に関する検討

### 2.1 実海域に用いる構造物

#### (1) 攪拌ブロックの概要（付録参照）

##### a) 構造物の形状<sup>1)</sup>

- ・台形ブロックを4個組み合わせた八角形の平面形状
- ・流動制御用クロス鋼製パネルを構造物中央に装着
- ・台形ブロック天井部に炭酸化多孔質体パネルおよび自然石を積載  
→生物付着基質かつ陰影を形成する素材
- ・形状寸法：縦 5,613 mm×横 5,613 mm×高さ 2,000 mm
- ・重量：16.509 t

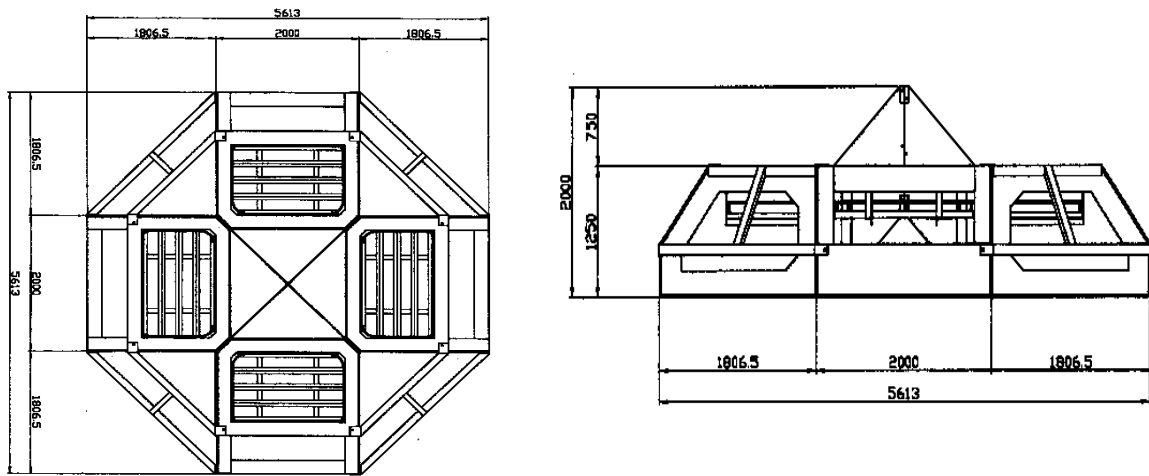


図-2.1.1 構造物の平面図及び立面図



写真-2.1.1 攪拌機能を有する構造物

## b) 構造物の特徴

- ・コンクリート、鋼材、石材（または多孔質プレート）を効果的に配置し、産卵親魚の保護および幼稚仔魚、若魚の保護育成等が目的である。
- ・湧昇流および渦流を形成させ、餌料となるアミ類やカイアシ類等のプランクトンの増殖、滞留を図り、魚類の蝟集効果を向上させる。
- ・流れを制御することにより、石材部への餌料生物や海藻孢子等の付着および酸素等の供給が促進され、餌料培養や藻類着生の基質としても効果を発揮する。
- ・多方向からの流動変化に対応可能な構造であり、育成礁として重要である平面的な拡がりのある形状である。
- ・石材部を上段に設けることにより、魚類に好適な陰影空間を形成し、投石に比べて石材の長期的な機能継続を図ることができる。
- ・組み立てヤードおよび運搬船上での段積みが可能である。
- ・構造物底面部分にも炭酸化多孔質体を装着し生物蝟集効果を高めると同時に、底面積が増し、構造物の底泥への沈み込みを軽減できる。

## (2) 攪拌ブロックの流動制御機能

### a) 可変型開水路を用いた実験方法

水槽内に実験構造物模型（実機スケール 1/25）を設置し、一定流速の条件下で構造物周りの流れの様子について染料を流し込む方法とタフトグリッド法を用いて確認した。

流れの可視化には、次のような方法がある。

壁面トレース法・・・油膜法，電解腐食法，感温皮膜法等  
タフト法・・・・・・表面タフト法，タフトグリッド法等  
トレーサ法・・・・・・その1：（直接注入法）注入流脈法，表面浮遊法，感温液晶法  
その2：（化学反応法）非電解法，電解発色法  
その3：（電気制御法）水素気泡法，スモークワイヤ法等  
光学的方法・・・・・・シャドウグラフ法，シュリーレン法，サーモグラフ法等

このうち、トレーサ法の直接注入法のひとつである染料を使った可視化法（以下「染料法」という。）を、まず採用した。これは、過去に同様の水理実験で使用された実績のある方法であり、流れの影響範囲を確認するのが容易である。しかし、本法では、影響範囲内の詳細な流れの状況は、目視観察ではある程度確認できるものの、写真等に撮影すると細かな動きを確認することが困難であった。

そこで、タフトグリッド法（一般に、流れの方向に対して垂直に設置し、主流方向に対して、上下左右の動きを可視化する方法）を転用し、流れに対してグリッドを平行に設置して、主流方向に対して上下の動きを可視化することとした（以下「タフト法」という）。しかし、この方法も、流れの大まかな方向や、流れが乱れていることは確認できても、渦流等の3次元的な流れの状況を確認するのは困難であった。

さらに撮影方法についても変更を加え、水槽中に小型水中ビデオカメラを設置し、流れの中に



カメラを置き、染料法を用いることで、より細かな流れの状況を把握した。それぞれの方法において撮影した画像は、観察しやすくするために、必要に応じて色調を修正した。

実験概要図を図-2.1.2、2.1.3 と写真-2.1.2 に示す。

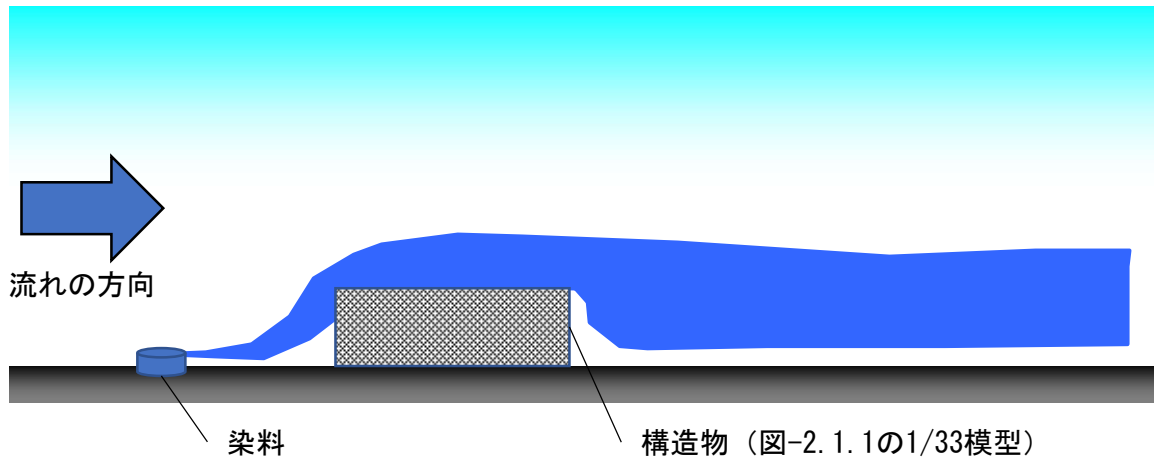


図-2.1.2 染料法実験概要図

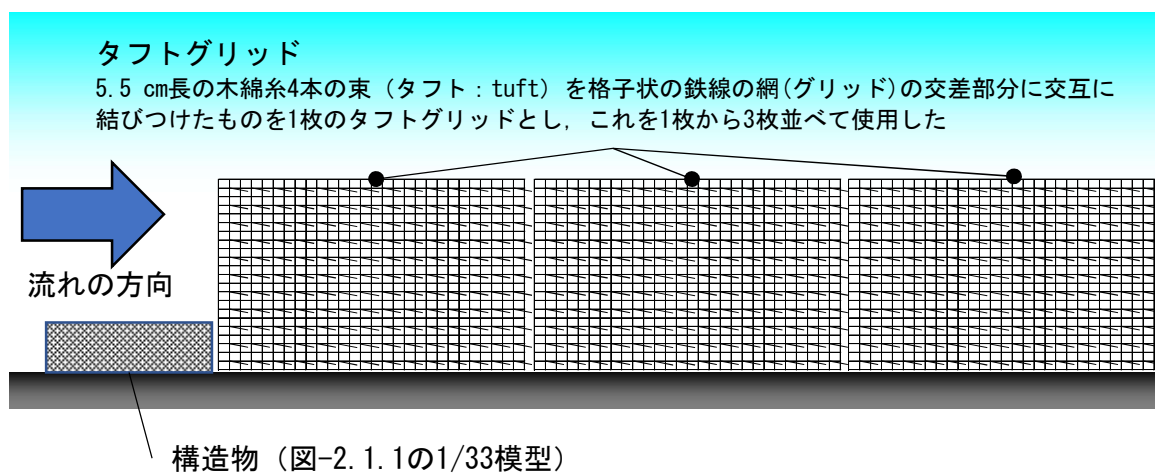


図-2.1.3 タフトグリッド法実験概要図

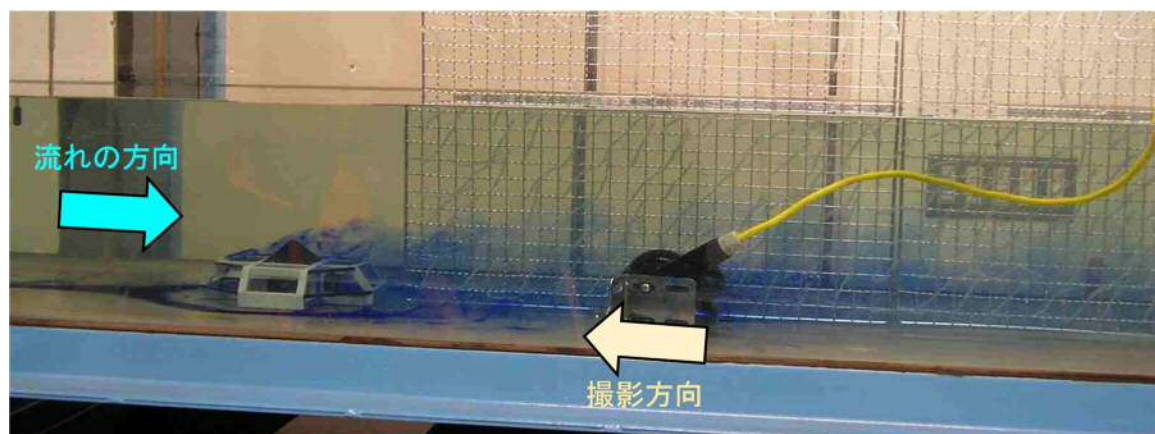


写真-2.1.2 小型水中ビデオカメラを用いた撮影方法



b) 実験結果

高田ら<sup>2)</sup>が行った水理実験結果を以下に示す。

①何も置かない場合と方形ブロックを置いた場合の比較（側面）

写真-2.1.3 に何も置かない場合の染料法とタフト法での流れの状況を示す。また、図-2.1.4 に構造物を何も置かない場合の数値計算結果を示す。

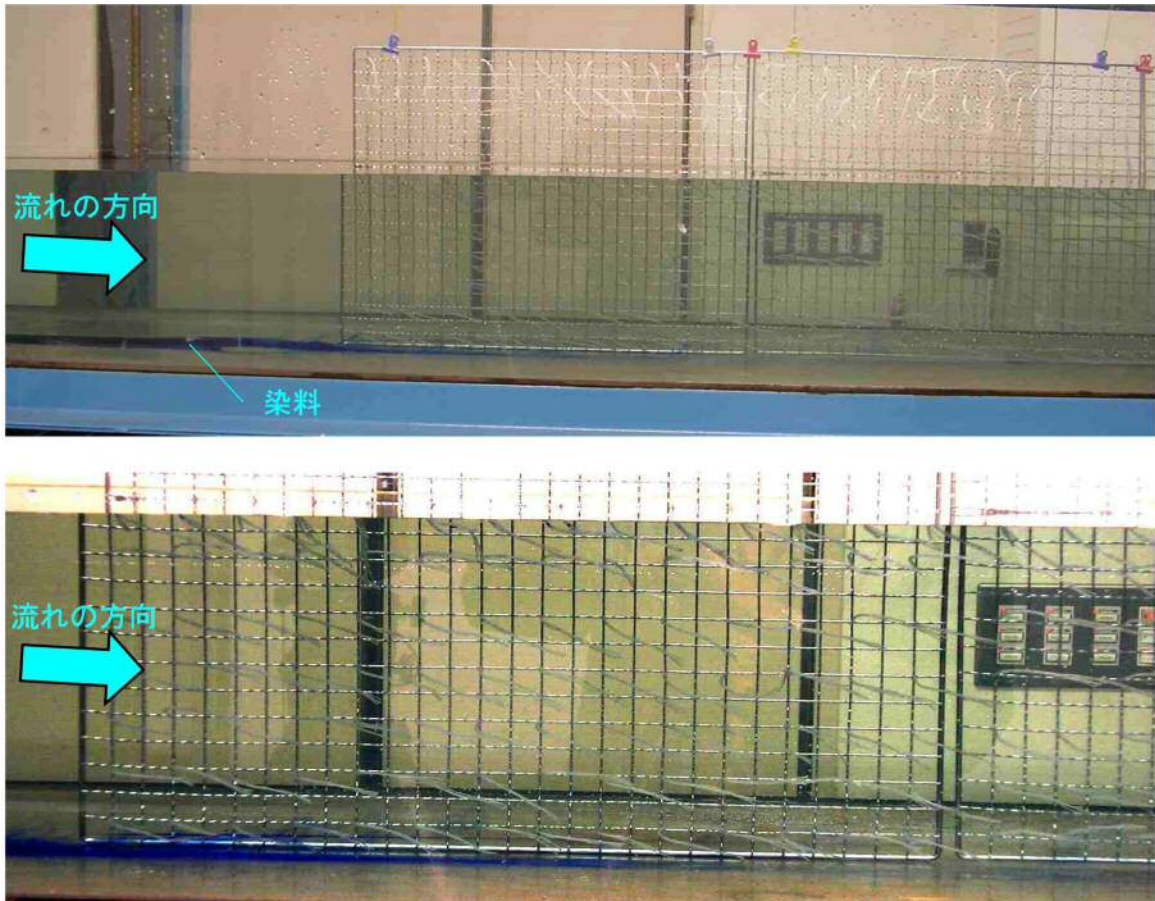


写真-2.1.3 構造物を置かない場合の染料法とタフト法での流れの状況

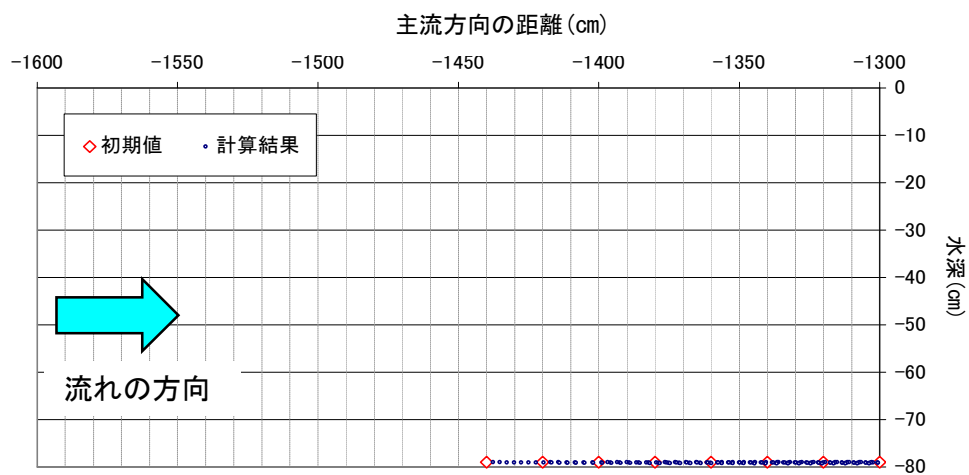


図-2.1.4 構造物を何も置かない場合の数値計算結果（底層に置いた粒子の追跡結果）

数値計算結果では、何も置かない場合は、粒子は水平方向に流れており、水槽でも底層に置いた染料は、ほぼ水平に流れた。タフト法では、全体的に水平方向に揃った動きを示していたが、若干、タフトは下向きの偏りがあった。このことから、数値計算結果と水槽での流れの状況はよく一致しており、計算方法の妥当性が検証された。

次に、方形ブロックを置いた場合の染料法とタフト法での流れの状況を写真-2.1.4 に示す。また、図-2.1.5 に方形ブロックを置いた場合の数値計算結果を示す。

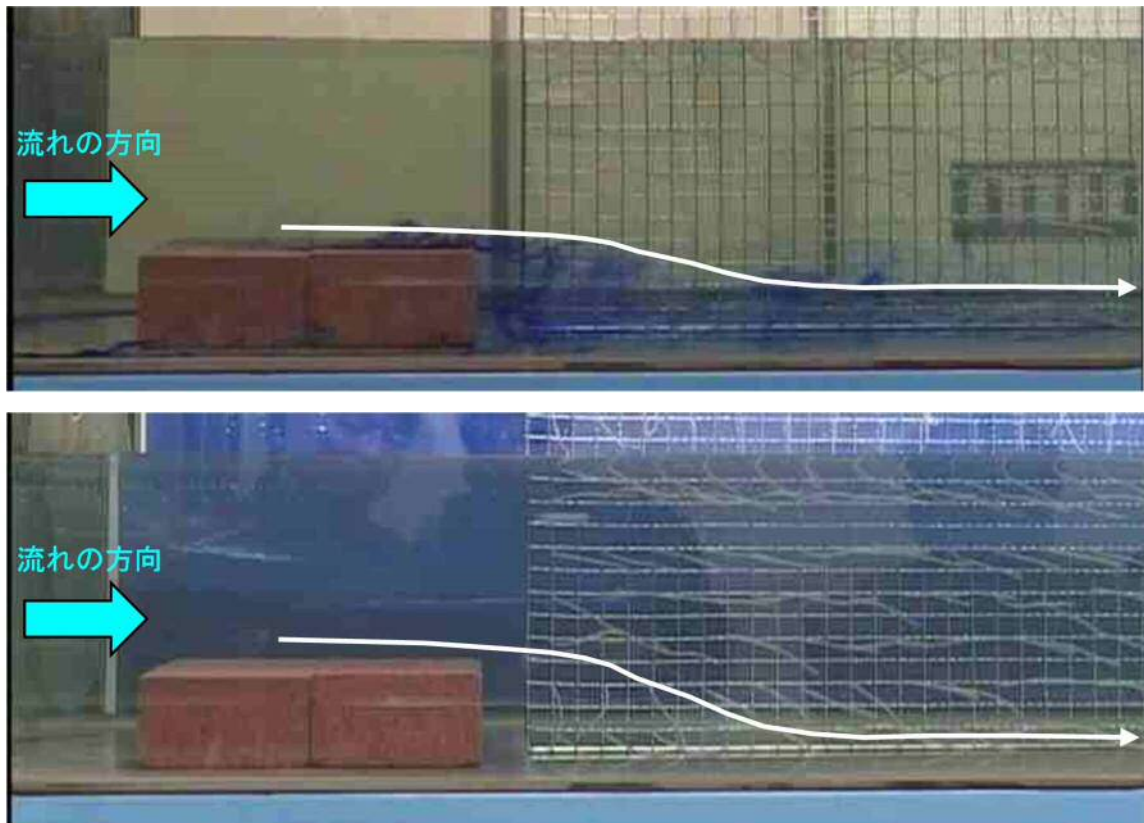


写真-2.1.4 方形ブロックを置いた場合の染料法とタフト法での流れの状況

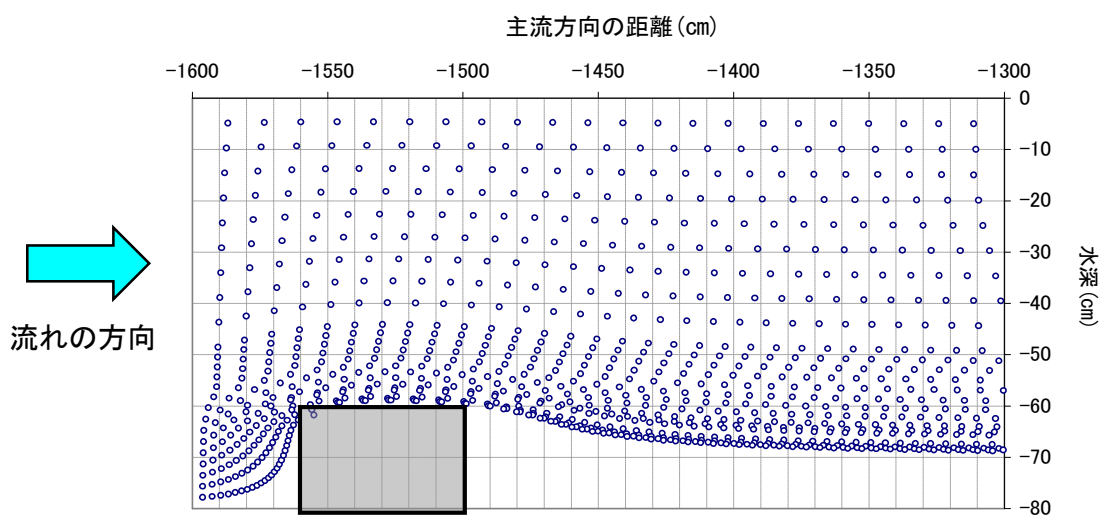


図-2.1.5 方形ブロックを置いた場合の数値計算結果



この結果、方形ブロックを置いた場合の数値計算による粒子の追跡結果と染料法、タフト法を用いた水槽での流れの状況は、よい一致を示しており、この結果からも計算方法の妥当性が検証された。

②実験構造物模型を置いた場合（側面）

写真-2.1.5 に実験構造物模型を置いた場合の染料法とタフト法での流れの状況を、図-2.1.6 に実験構造物に近似させた V 字型配列構造物を設置した場合の数値計算結果を示す。

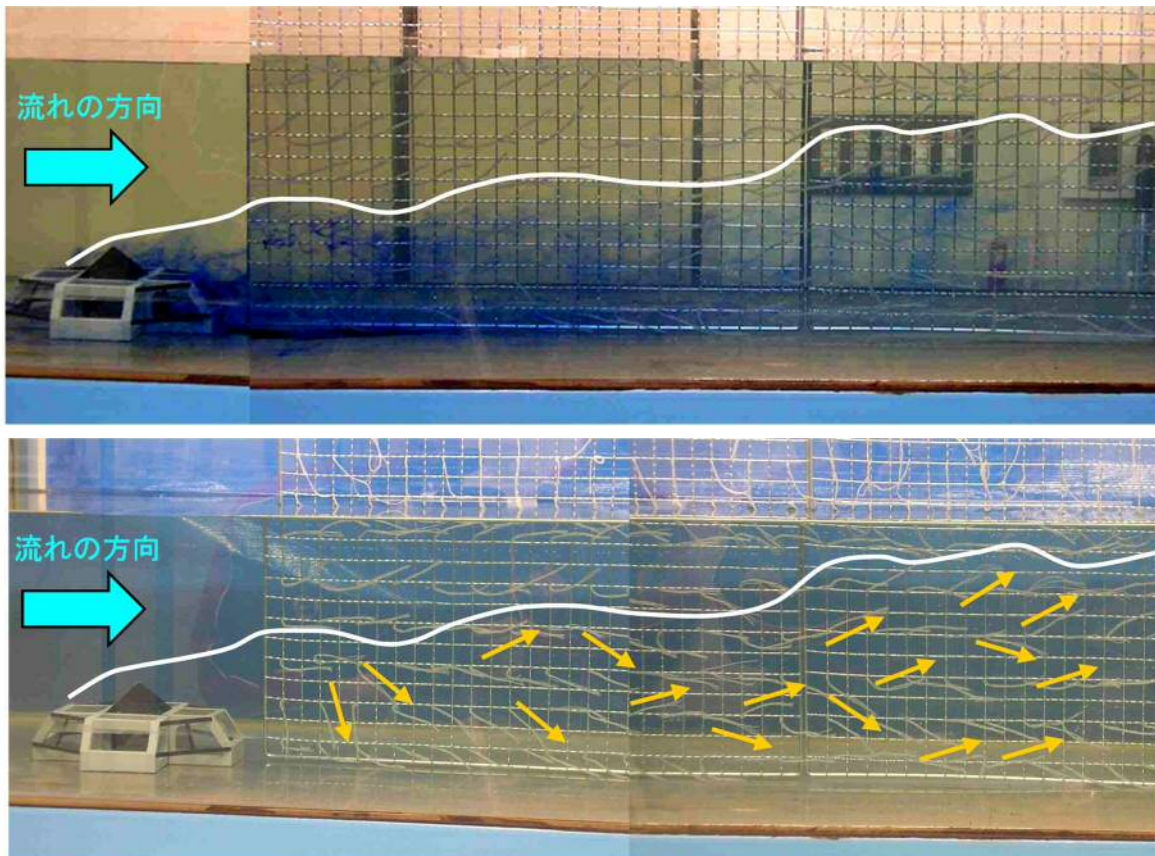


写真-2.1.5 実験構造物模型を置いた場合の染料法とタフト法での流れの状況

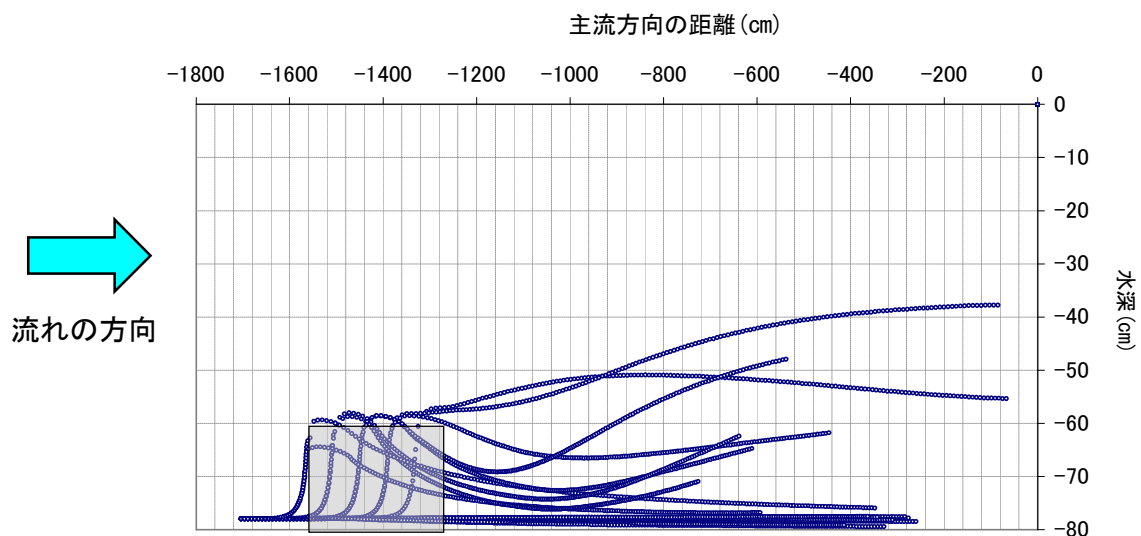


図-2.1.6 V 字型配列構造物を設置した場合の数値計算結果

染料法では、これまでの結果と同様、実験構造物模型の後流域内の詳細な流れの状況を把握することはできなかったが、タフト法を用いることで、後流域内の複雑な流れの状況を把握することができた。写真-2.1.5 で示すように、後流域内では、下方、上方に向けた流れが複雑に形成されていることが確認された。この結果は、実験構造物に近似させた V 字型配列構造物を設置した場合の数値計算結果とよく一致しており、この点からも数値計算の妥当性が確認された。

### ③実験構造物模型後方の 3 次元的流れの状況

写真-2.1.6 に実験構造物模型を置いた場合の染料法における流れの状況を 3 次元的に把握するため、流れの後方から水中カメラで撮影したビデオ映像の静止画を示す。

また、図-2.1.7 に実験構造物に近似させた V 字型配列構造物を設置した場合の数値計算結果を 3 次元的に表現した図を示す。



写真-2.1.6 染料法による実験構造物模型を置いた場合の模型後方の流れの状況  
(流れの後方から水中カメラで撮影したビデオ映像の静止画)

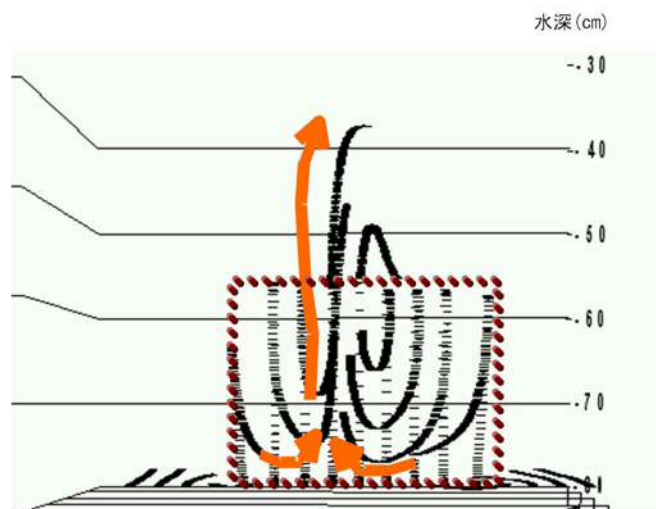


図-2.1.7 V 字型配列構造物後方の流れの数値計算結果

写真-2.1.6 では、染料法における実験構造物模型後方の流れの状況を、流れの後方から撮影したビデオ映像の静止画で可視化しようと試みたところ、模型の側面底層を通過した染料が、模型後方の中心方向に巻き込まれている状況が観察できた。また、底層から、染料が上昇する動きも確認することができた。この状況は、図-2.1.7 に示すとおり、実験構造物に近似させた V 字型配列構造物を設置した場合の数値計算結果とよく似た動きを示している。



以上の結果から、本研究で用いた 3 次元マルチレベルモデルと粒子追跡手法は、計算結果が水槽を用いた水理実験結果とよい一致を示したことから、妥当な計算方法であったと考えられる。

また、数値計算結果と同様に、水槽を用いた水理実験結果においても、流動制御機能を持つ構造物を設置することで、底層水を上昇させることが可能であり、構造物後方で海水の上下混合が促進されることが示唆された。

## 2.2 水理実験による構造物の流動制御機能

宮川ら<sup>1)</sup>は流動制御機能を持つ構造物においても同様の実験を行い、構造物が流れにもたらす働きを検証した。

### (1) 攪拌ブロック礁による流動制御効果の検証

水槽内に実験構造物模型を設置し、一定流速の条件下で染料、油膜法による影響範囲の定量的評価を行った。

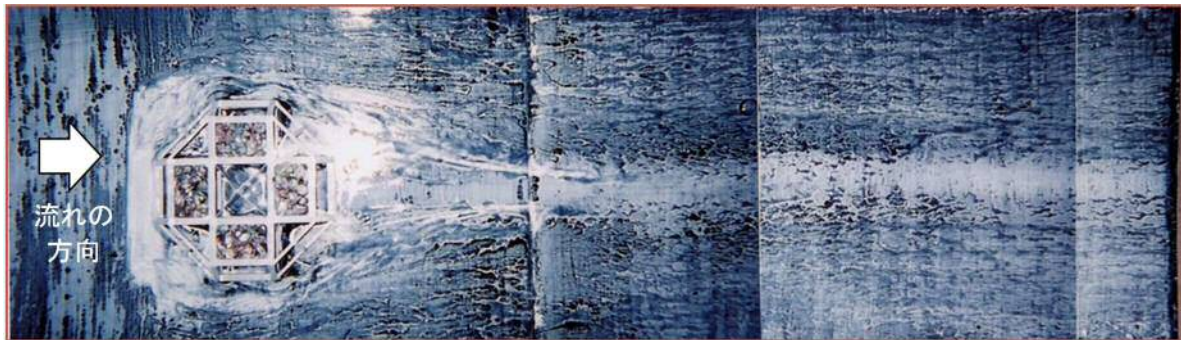


写真-2.2.1 油膜法を用いた流動制御機能の検証写真

写真-2.2.1 に示すように、構造物の後方は流れが攪拌されており染料が巻き上げられていることがわかる。また、構造物後方の流れは徐々に収束していくことが確認できる。

さらに、図-2.2.1、写真-2.2.2 に示すように、礁高が 6 cm であるのに対し、22 cm 程度の巻き上がりが確認できる。このことから、構造物後方の流れの影響範囲は、礁高の 10~20 倍であることが確認できた。

また、図-2.2.2、2.2.3 に示すように構造物の影響範囲における模式図から見ても、構造物による流動制御機能は十分に効果を発揮していると考えられる。

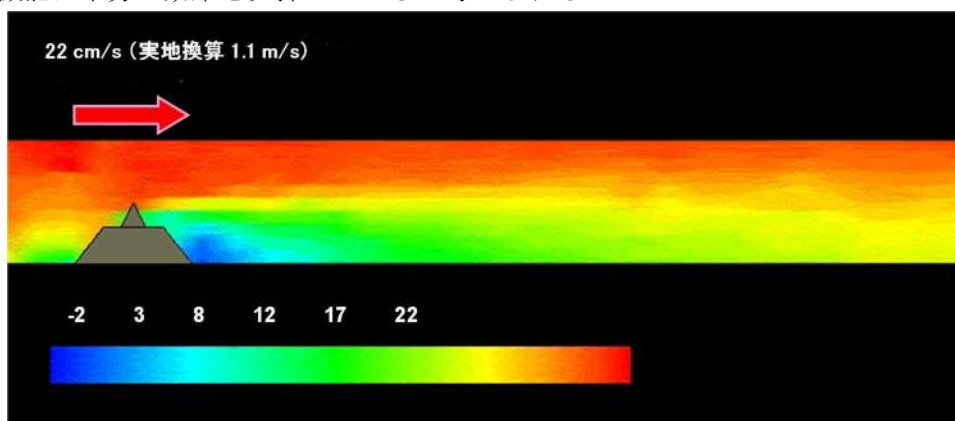


図-2.2.1 模型水理実験図

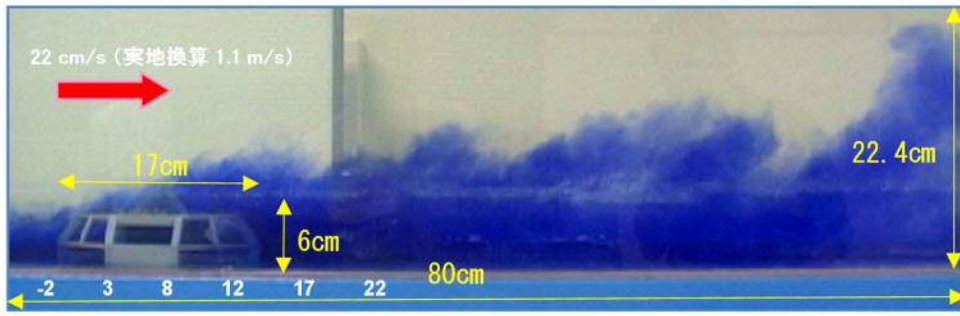


写真-2.2.2 塗料を用いた流れの可視化実験（1/33 模型）

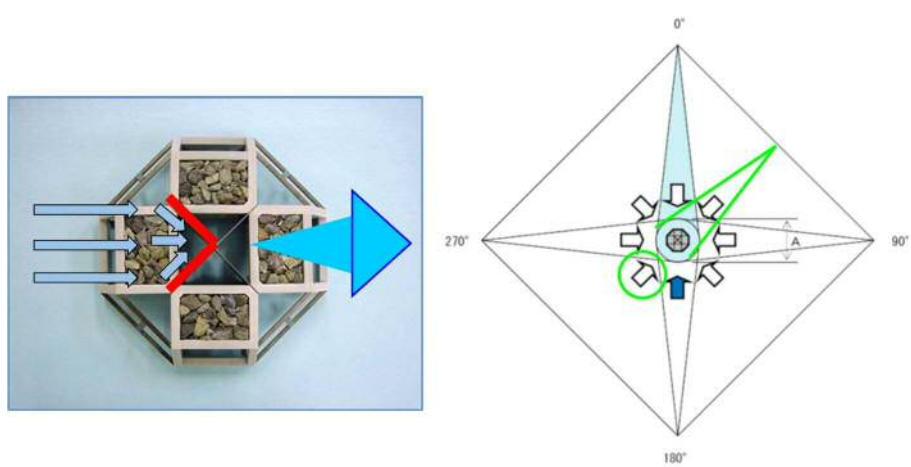


図-2.2.2 構造物の影響範囲模式図（平面図）

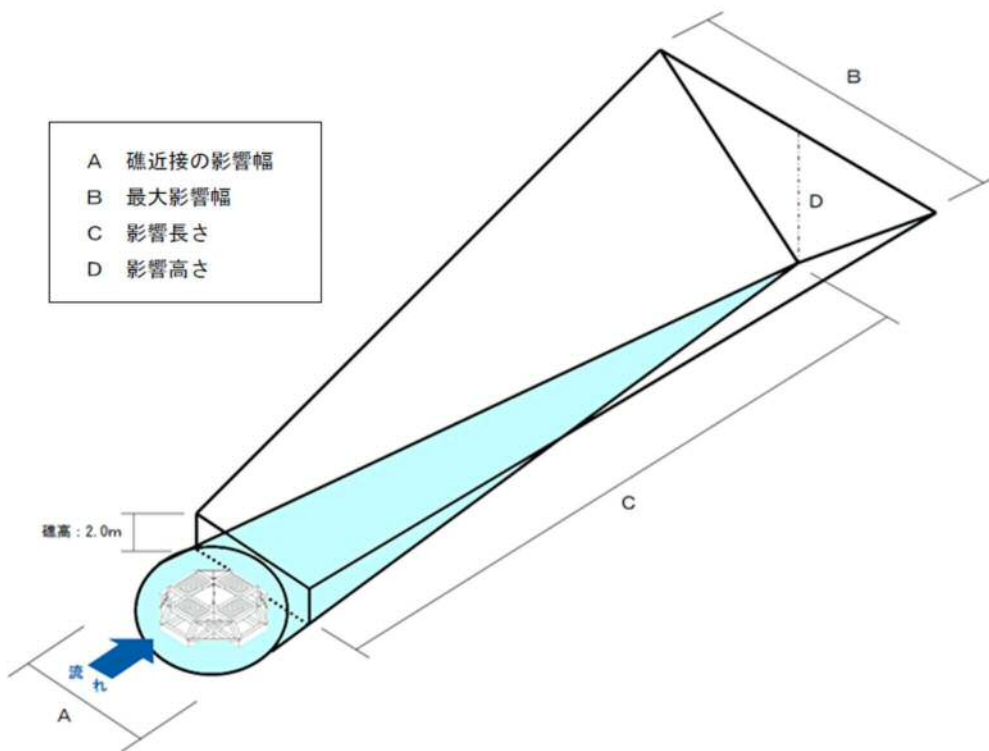


図-2.2.3 構造物の影響範囲模式図（立体図）

## (2) 構造物の有無による流れの可視化

染料を利用した流れの可視化を利用し、実験スケール 1 : 100 で、水槽に構造物を設置しなかった場合と設置した場合の影響を検証した。

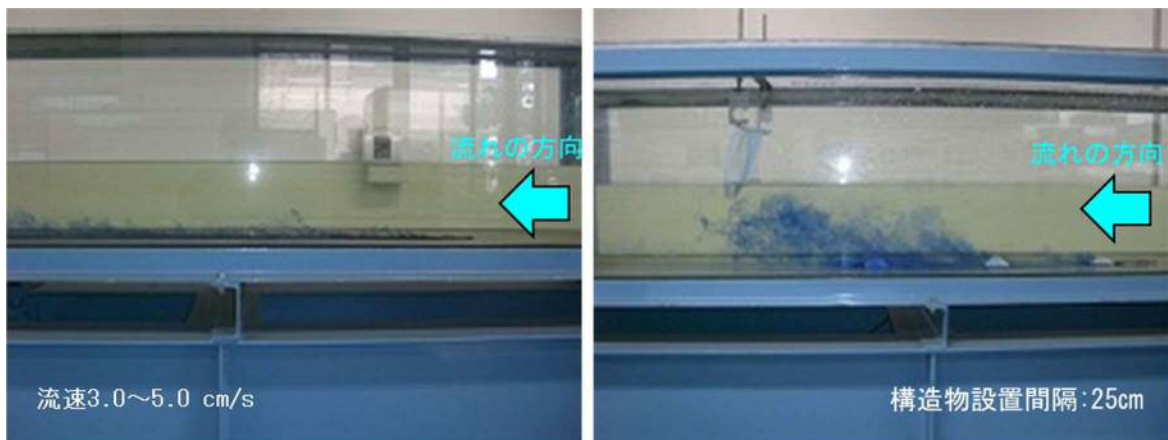


写真-2.2.3 構造物を設置しなかった場合と設置した場合の実験状況

(左：構造物非設置 右：構造物設置)

写真-2.2.3 に示すように、構造物を設置しなかった場合、流れは一定で、上昇する流れは確認されなかった。

一方で、構造物を設置した場合、写真-2.2.3 の右図に示すように構造物に流入した流れは、後方に進むにつれ、徐々に上昇し、最後尾では界面近傍まで上昇している流れが確認された。

以上の結果から、流動制御機能を持つ構造物を設置することで、底層水を上昇させることが可能であり、構造物後方で海水の上下混合が促進されることが示唆された。

## 2.3 実海域における流動制御機能の検証

### 2.3.1 設置海域位置及び区域内の人工魚礁配置

実海域における流動制御機能の検証を行った人工魚礁設置区域の位置を図-2.3.1に示す。設置海域の概略は以下のとおりである。

- ・設置海域：大阪府岸和田地先海域
- ・設置基数：1区域当たり25基（3種類の構造物を配列）  
試験礁区は3種類が各1基沈設
- ・設置水深：約15m

図-2.3.1に示す区域1、2は、上述のとおり、図-2.3.2に示す3種類の構造物が1区域当たり25基が図-2.3.1（下段の図）の配列で、試験礁区には3種類の構造物の各1基が沈設されている。

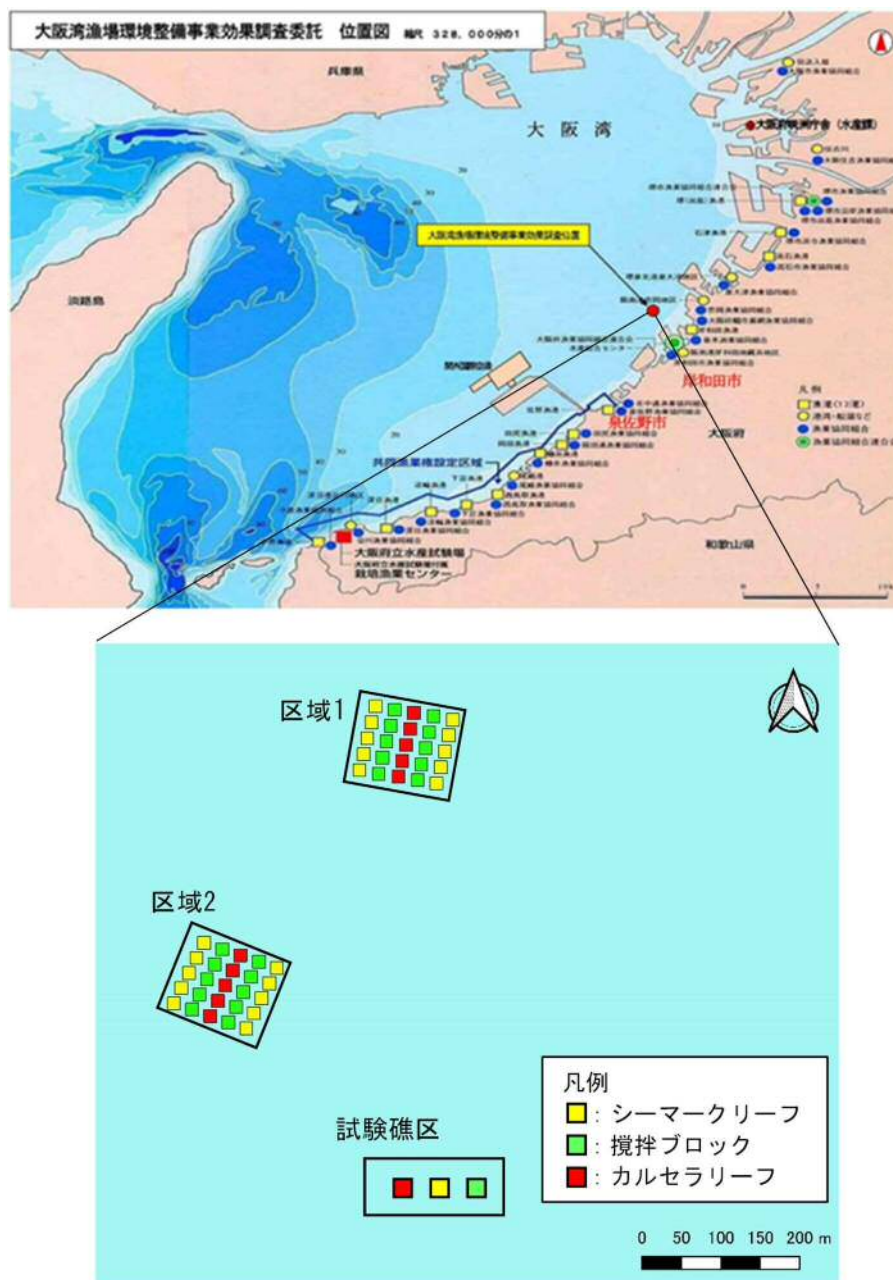


図-2.3.1 構造物設置場所






工種	カルセラリーフ	攪拌ブロック	シーマークリーフ
外観			
寸法 (m) B × W × H	6.0m × 6.0m × 2.0m	6.0m × 4.0m × 2.2m	5.6m × 5.6m × 2.0m
機能	餌料培養・流動制御	流動制御	餌料培養・流動制御

図-2.3.2 3種類の実験構造物

## 2.3.2 調査方法

### (1) ADCP 曳航観測

本研究における ADCP 曳航観測は、調査船の船舷に専用架台を用いて ADCP を固定し曳航することで行った。なお、この時の観測時の船位については、ディファレンシャル GPS を同期させ取得した。曳航観測時の観測設定は層厚 0.5 m、層数 34 層、観測間隔 5 sec とした。

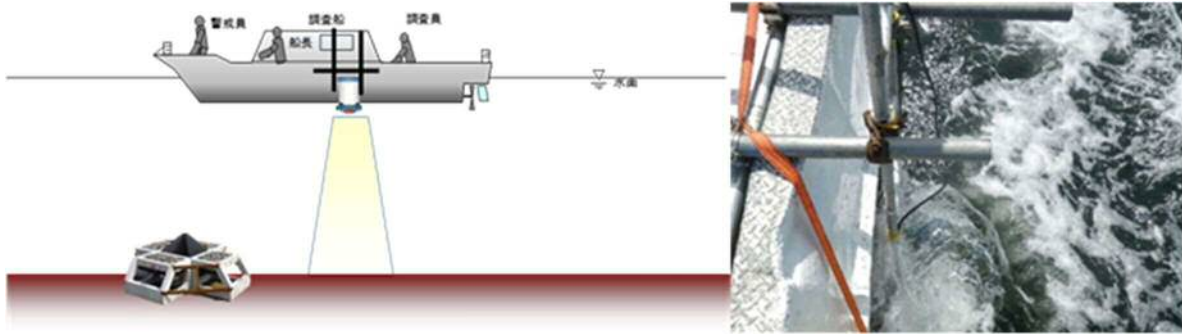


図-2.3.3 ADCP 曳航観測調査概要図

### (2) 水質調査

水質調査は、機器による水質鉛直観測と各地点での採水分析を行った。水質鉛直計測は、多項目水質計を調査船船上より垂下させることで水温、塩分、濁度の鉛直計測を行った。また、採水分析調査は、各地点で 1/2 水深、底上 1m の 2 層で採水を行い、採取した試料を室内分析に供することで行った。なお、分析項目は、DIN、DIP とした。

## 2.3.3 調査地点

区域 1、2 および試験礁区における調査地点を図-2.3.4 に示す。

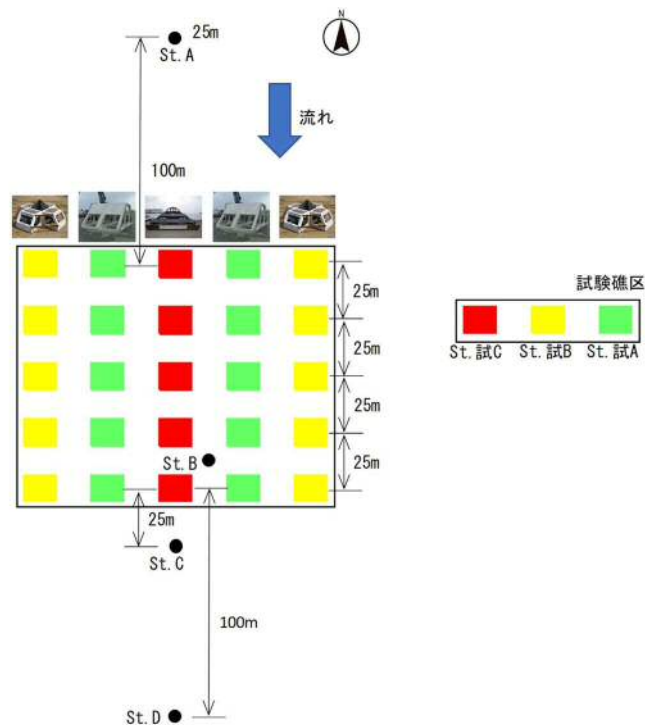


図-2.3.4 区域 1・2 および試験礁区における調査地点位置と地点名

## 2.4 調査結果

### 2.4.1 水質機器計測結果

平成 27 年度における構造物を対照区 (St.A, St.D) の水質調査結果を図-2.4.1, 2.4.2 に示す。なお、平成 27 年度調査については、区域 1 のみであり、水質調査地点は、図-2.3.4 に示す地点 St.A, St.B, St.C とした。

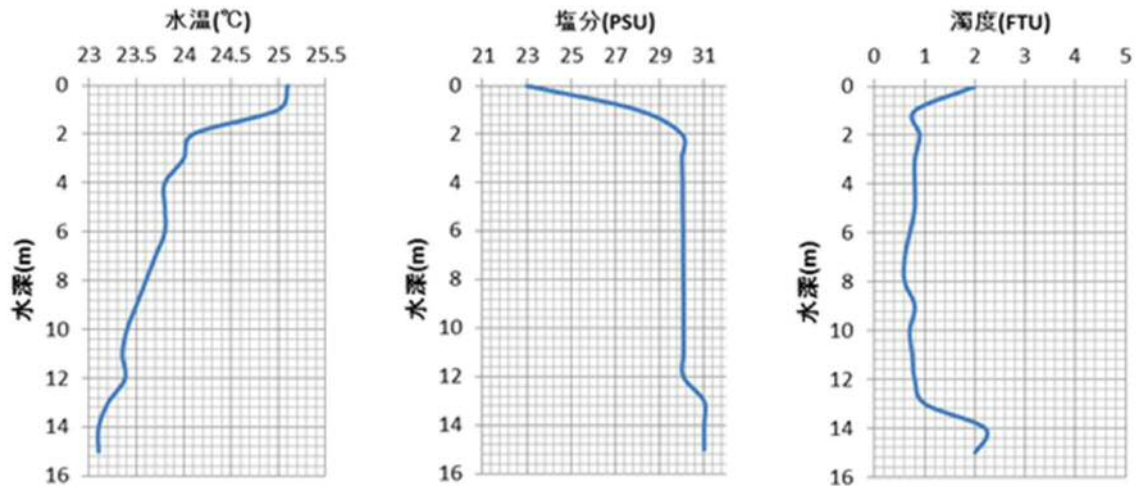


図-2.4.1 区域 1St.A における水質機器計測結果 (H27.8)

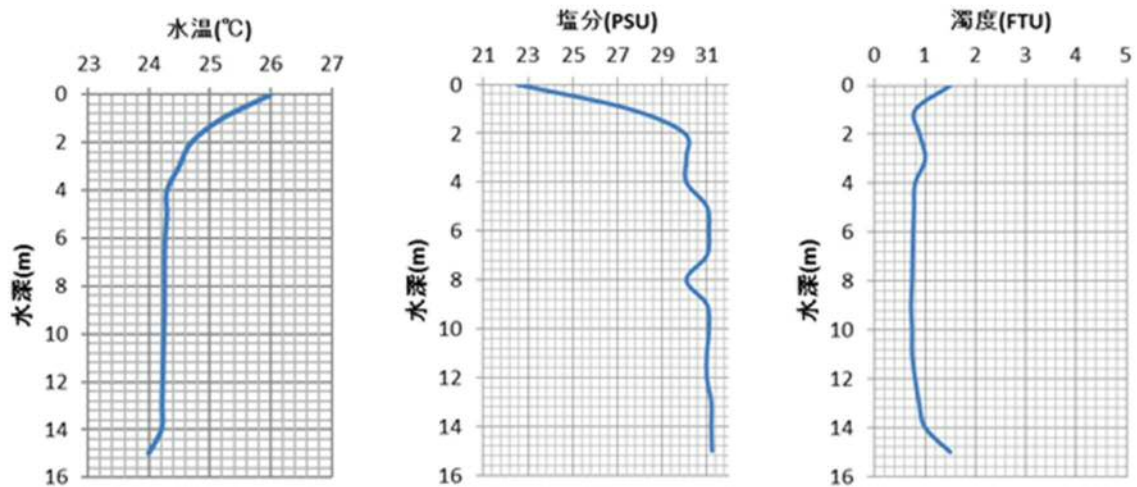


図-2.4.2 区域 1St.D における水質機器計測結果 (H27.8)

これより、図-2.4.1, 2.4.2 に示すように構造物を設置していない対照区における各水質項目をみると、表層で降雨の影響と思われる水温が高く、塩分濃度の低い状況がみられ、水温、塩分については鉛直方向に概ね一様でなく、海水の鉛直混合がなされていないことがわかる。また、濁度について大きな変動がみられないことから、海水の巻き上げも確認されなかった。

次に、構造物を設置している魚礁区 (St.B) における調査結果を図-2.4.3 に示す。ここについても、表層に降雨の影響と思われる水温が高く、塩分濃度の低い層がある。しかしながら、対照区 St.A, St.D に比較すると水温、塩分は延長方向に概ね一様であり、濁度についても変動が大きいことが確認された。

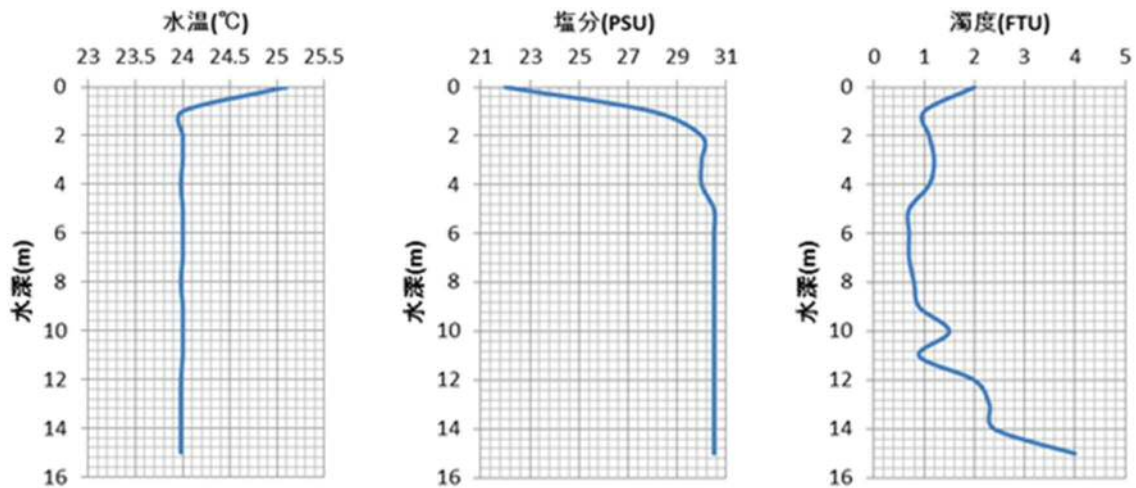


図-2.4.3 区域 1St.B における水質機器計測結果 (H27.8)

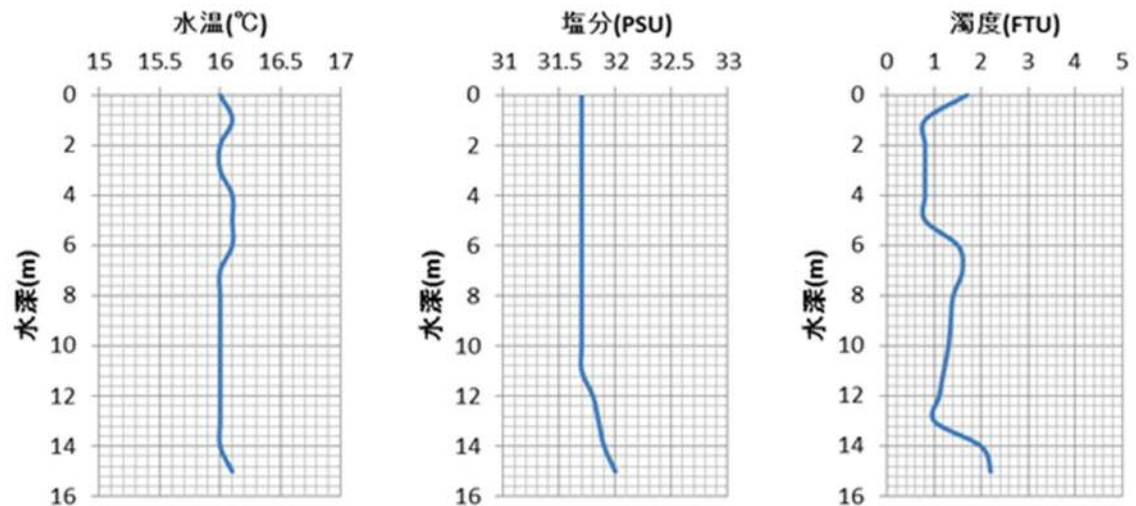


図-2.4.4 区域 1St.B における水質機器計測結果 (H26.12)

また、平成 26 年度の冬季において同地点での観測結果を図-2.4.4 に示す。これより、水温、塩分が鉛直方向に一様であり、海水の鉛直方向の攪拌効果が確認された。また、濁度が水深 5m 以深において変動している状況が確認された。

これらの平成 26 年度冬季、平成 27 年度夏季の水質計測結果から、構造物による海水の攪拌効果が検証できた。

次に、平成 28 年度の水質機器計測結果を図-2.4.5、2.4.6 に示す。平成 28 年度の調査については、区域 1、区域 2 の St.A、St.B、St.C および St.D とした。なお、地点表記は、区域 1 の地点を St.1-A、St.1-B、St.1-C および St.1-D とし、区域 2 の地点を St.2-A、St.2-B、St.2-C および St.2-D とした。

この結果、図-2.4.5、2.4.6 に示すように、両区域ともに魚礁区内の内外で水質に大きな変動がない状況が確認された。濁度については、両区域の St.C、St.D の 5m 以深で他の地点と比較すると高い値を示していることが確認された。この St.C、St.D はいずれも構造物の潮下側であることから鉛直混合が促進されていると考えられる。DO については、貧酸素化が生じているが両区域ともに、他の地点と比較して、St.B での値が構造物天端位置で高くなっていることから、構造物による攪拌効果が生じているものと考えられる。



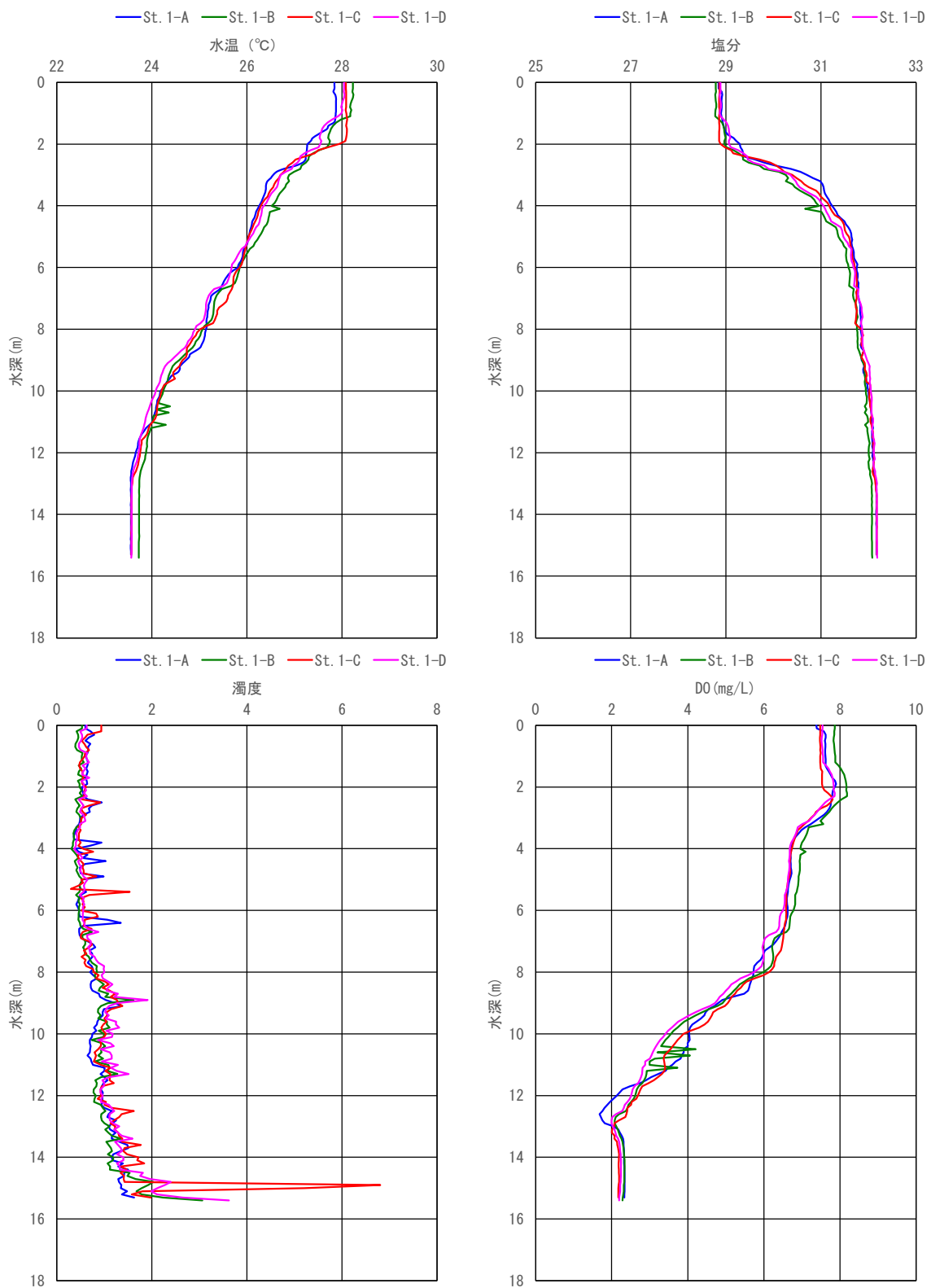


図-2.4.5 区域1における水質機器計測結果 (H28.8)

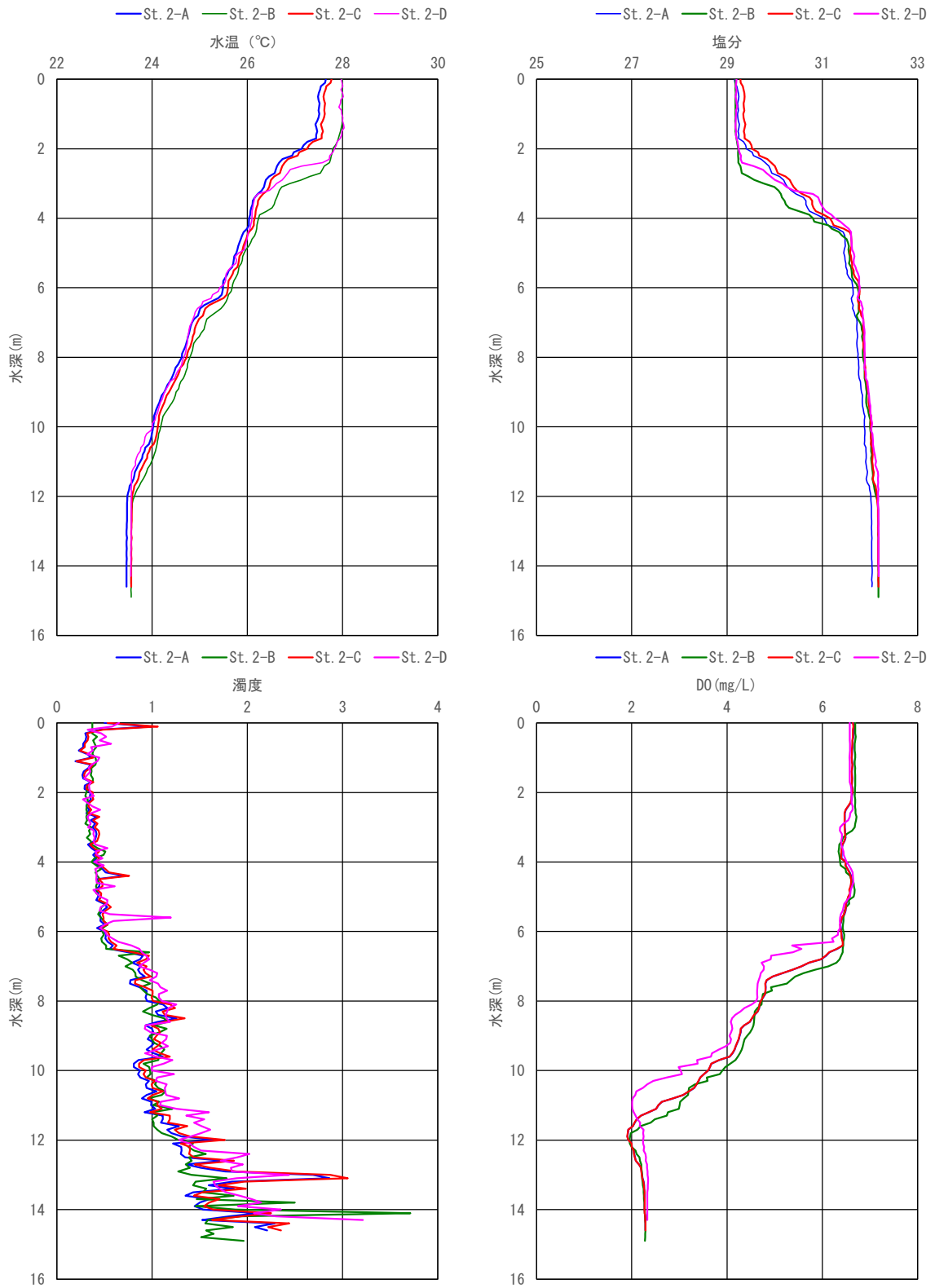


図-2.4.6 区域2における水質機器計測結果 (H28.8)

## 2.4.2 水質採水分析結果

平成 28 年度の水質採水分析結果を図-2.4.7, 2.4.8 に示す。なお、本調査における採水地点は、平成 28 年度の水質機器計測の調査地点を同じである。

図-2.4.7 に示すように、区域 1 では 1/2 水深において DIP, DIN とともに概ね同程度であり、底層では DIP は、上流から下流にかけて徐々に高くなっており、DIN では魚礁区上流の St.A で最も高い値を示し、魚礁区内から魚礁区下流にかけては概ね同程度の値を示した。

図 2.4.8 に示すように、区域 2 では、DIP, DIN とともにそれぞれの採水層で明確な差は認められなかった。

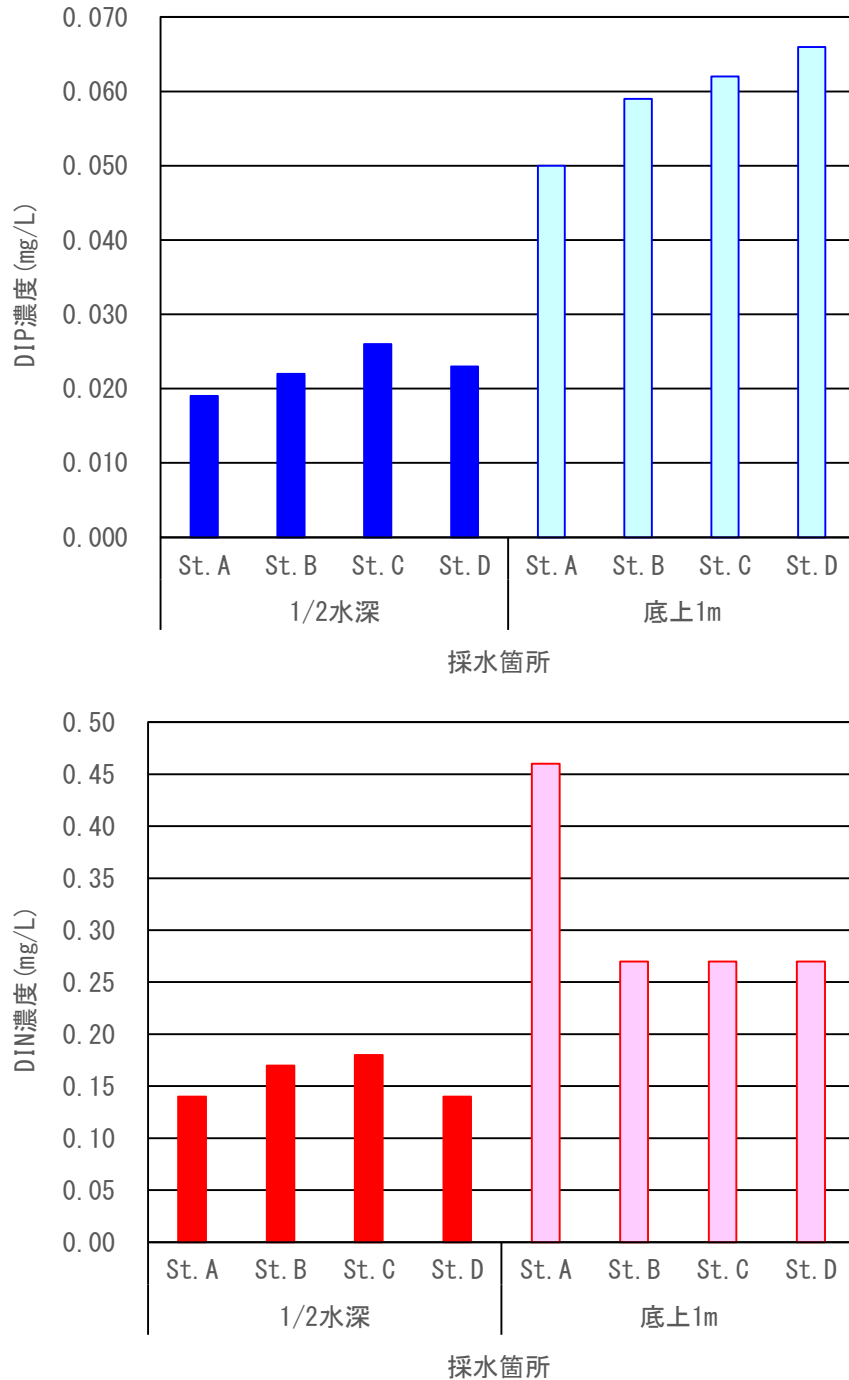


図-2.4.7 区域 1 における水質採水分析 (H28.8)

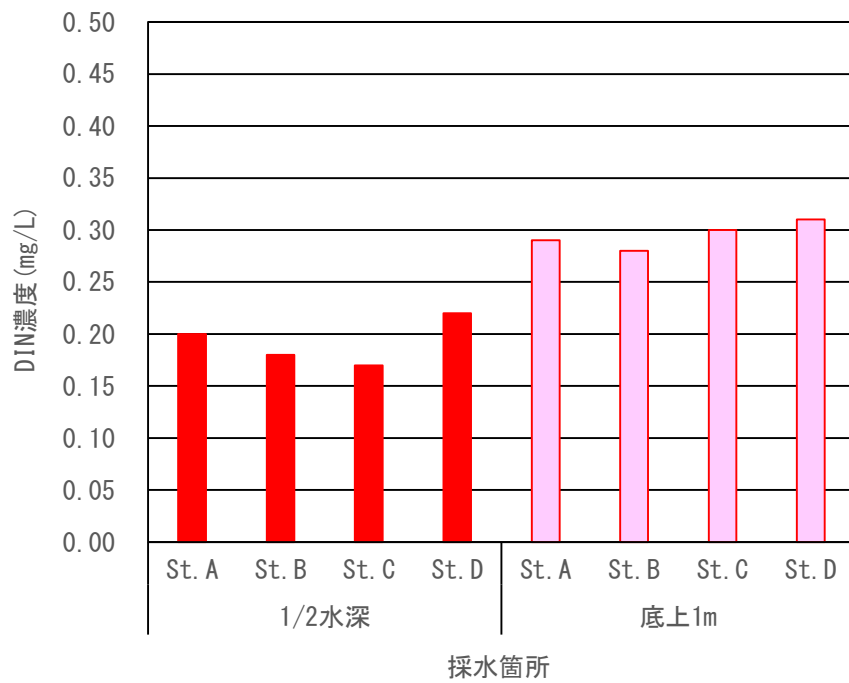
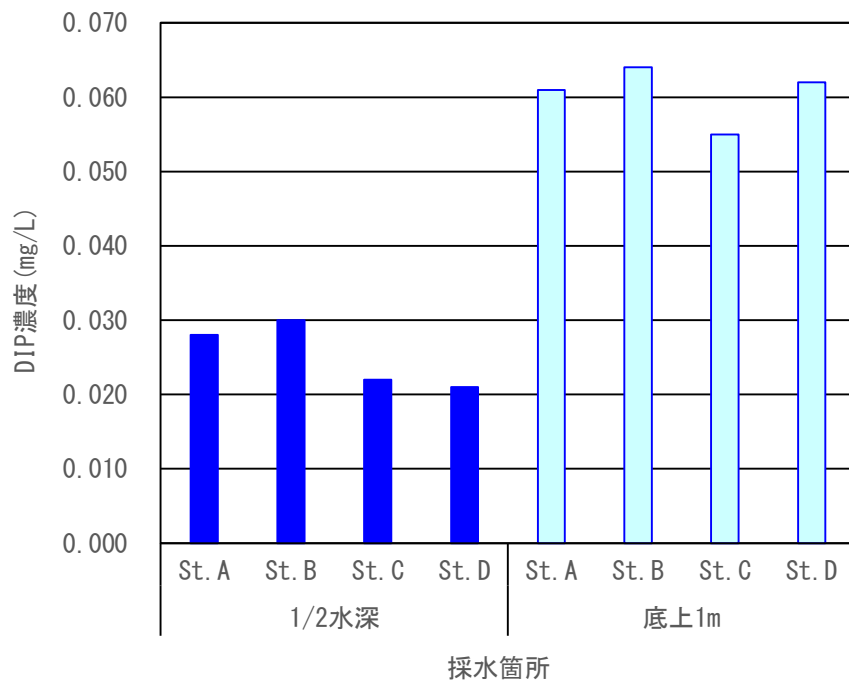


図-2.4.8 区域2における水質採水分析 (H28.8)



## 2.5 流動制御効果の検証

### 2.5.1 ADCP 観測結果からの濁度算出

ADCP は、超音波が懸濁物質に当たって反射する際に生じる位相を解析して流向流速を求めている。その際に、懸濁物質濃度の違いにより後方散乱が生じる。反射強度は、水中の懸濁物質濃度と位相があり、この性質を利用して水中の懸濁態濃度を計測する手法が提案されてきた。

橘田らは水中懸濁物質の吸収や散乱の影響を考慮した伝搬モデルを用いて鉛直分布計測を行っている<sup>3)</sup>。

そこで、中村らは、この手法で流動制御効果による底泥の巻き上がりに伴う濁度の巻き上がりの可視化を試みた<sup>4)</sup>。可視化のための超音波後方散乱濁度の算出フローを図-2.5.1に示す。

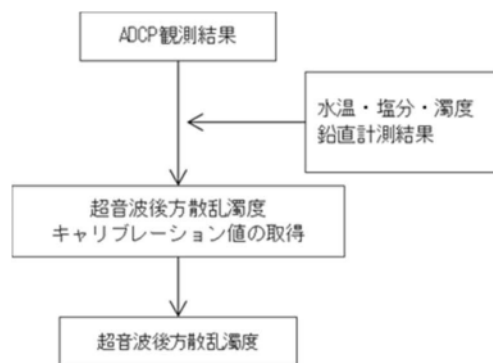


図-2.5.1 超音波後方散乱濁度の算出フロー

#### (1) 現地調査 (ADCP 曳航観測・水質機器計測)

ADCPによる流向流速の曳航観測と水質機器計測を図-2.3.1に示す試験礁区において平成26年度に、区域1で平成28年度に行った。曳航観測は、図-2.5.2に示す測線で実施した。なお、水質機器計測は、各地点で多項目水質計を用いて鉛直観測を実施した。

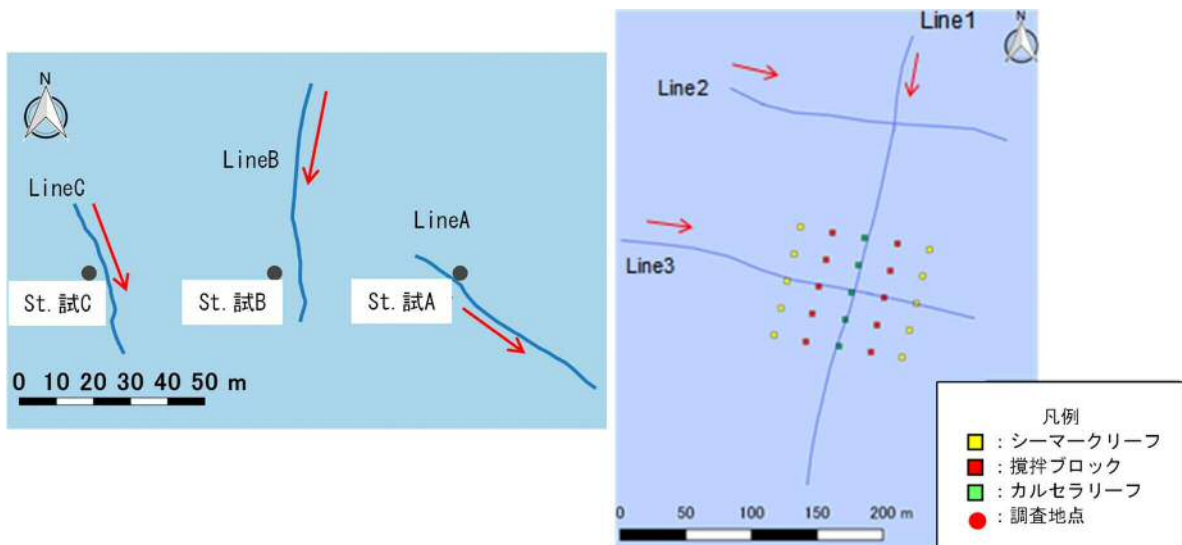


図-2.5.2 試験礁区における ADCP 曳航測線  
(左：試験礁区曳航測線 右：区域1曳航測線)

## (2) 現地調査結果 (ADCP 曳航観測・水質機器計測)

試験礁区における曳航観測結果を図-2.5.3(1)(2)に示す。

図-2.5.3(1)では、それぞれの断面流速分布をコンタ図に、(2)では南向き流れを正とする全層の水平流速をベクトル図に示す。この図より、調査時の海域の流況は、流速は4m以浅の表層で20cm/s以上、中層の4~12mで10~20cm/s、12m以上の下層では10cm/s未満である。ADCPの性質上、海底面近傍はデータを取得できないが、下層での流速が10cm/s未満であり、海底面近傍ではさらに小さく5cm/s程度の微流速となっていると推察される。一方で、ベクトル図より、全測線において全層の流速で、南西向きの流れとなっている。

さらに、各地点での水質機器計測結果を図-2.5.4示す。この図より、水温はほぼ均一である。しかし、塩分および密度は、上昇開始位置がSt.試Aでは水深11m付近から、St.試BおよびSt.試Cでは水深13m付近からと、St.試Aで2m程度浅くなっていることが確認された。濁度については、St.試Aでのみ水深5mから7mまで上昇し、その後13mまで降下し、その後海底まで上昇する変動が確認された。St.試Bにおいても7mから海底まで上昇する傾向が見られたが、上昇幅はSt.試Aに比べ小さかった。

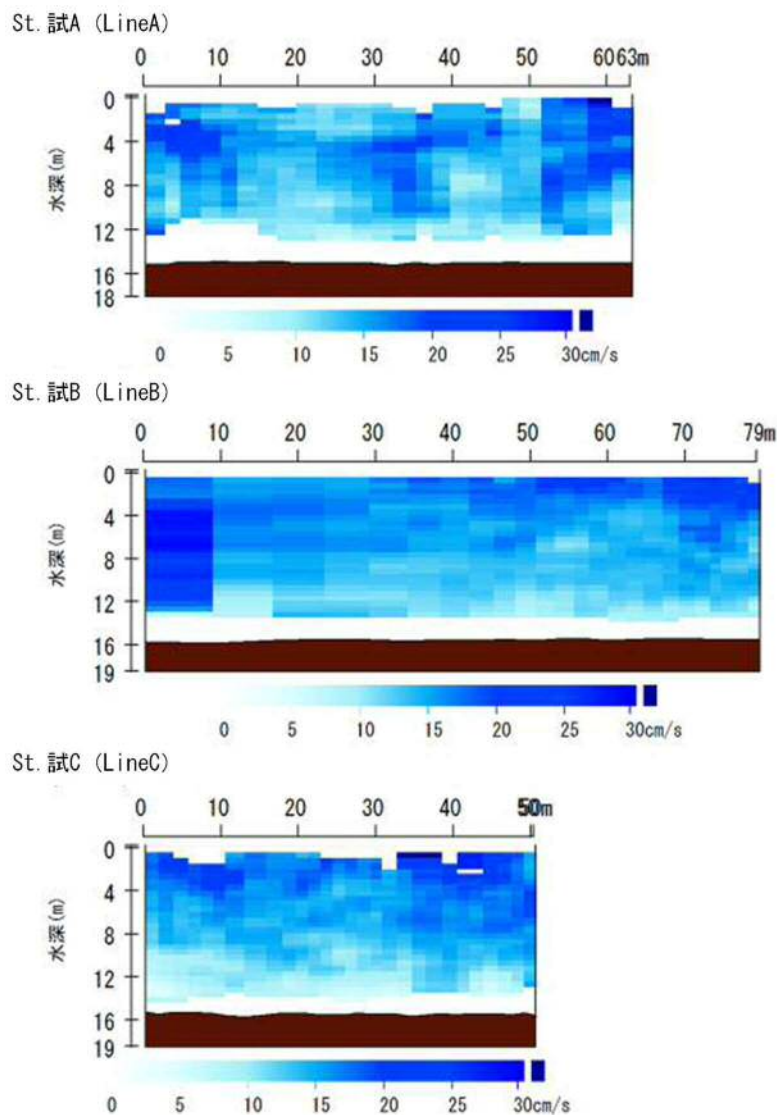


図-2.5.3(1) 試験礁区における ADCP 曳航観測結果

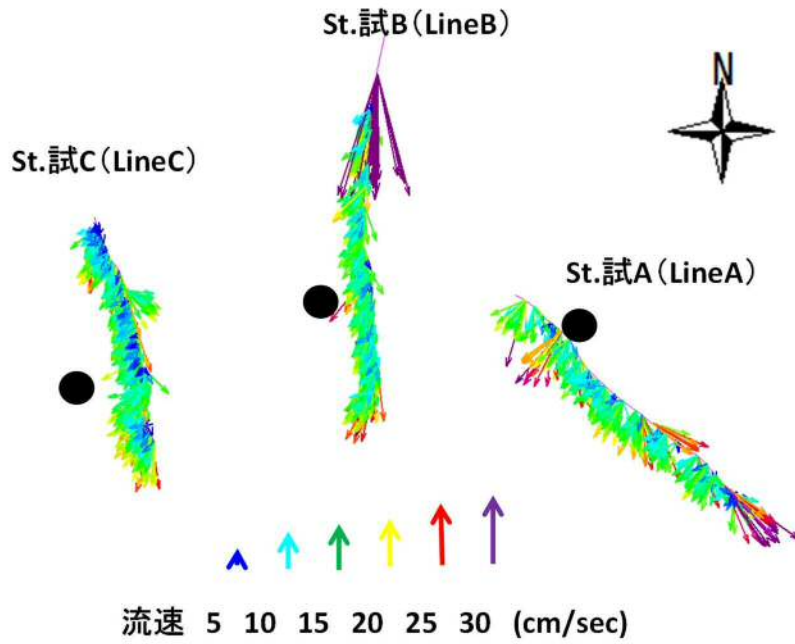


図-2.5.3(2) 試験礁区における ADCP 曳航観測結果

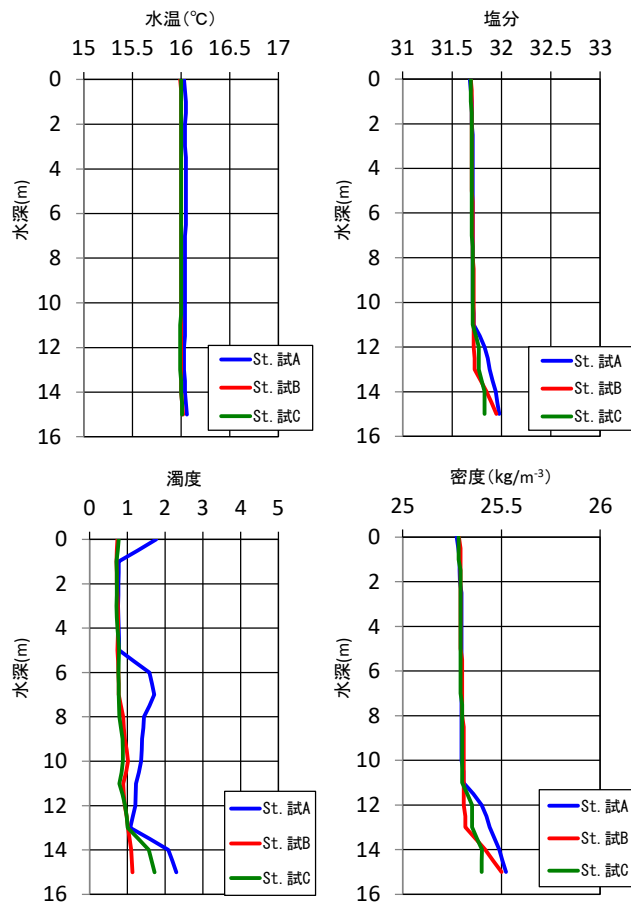


図-2.5.4 試験礁区における水質計測結果

### (3) 濁度換算方法

ADCPは、超音波のドップラー効果を応用した流向流速計で、多層鉛直観測が可能であり、曳航断面の流速空間分布を計測可能であるという特徴を持ち、海洋や沿岸域、河川・陸水域における流況観測ツールとして広く普及している。ADCPで得られる超音波の反射強度（後方散乱強度）は、濁度と相関があり、この超音波反射強度から濁度を算出する方法の有効性は既に示されている。

これは、超音波が懸濁物質に当たって反射する際に、懸濁物質濃度の違いによって生じる後方散乱は、超音波が水中を通過する際に生じる水塊による発散損失と吸収損失、懸濁物質による吸収、超音波の拡散・距離減衰等の影響を往復の伝搬経路上で受ける。また、濁質による発散損失は超音波伝搬経路上の積分値として影響を受けるというものである。

ADCP はこれらの影響を受けた結果として反射強度を得て、この反射強度から散乱強度に変換している。このことから、ADCPの反射強度から濁度を算出する際には、式(1)で示す散乱強度の伝搬損失を考慮し、この結果を踏まえ、懸濁濃度を算出する必要があるが、懸濁濃度の算出には、水塊による音波の減衰吸収、粒子による音波の減衰、散乱領域である近距離音場における散乱も考慮する必要がある。これらのことから、懸濁濃度の算出は、音響強度と懸濁濃度の関係について、伝搬損失を考慮した式(2)となる。

#### ①散乱強度の伝搬損失

散乱強度はソナー方程式から式(1)で示される。

$$EI = SL + SV + Const - 20 \log(R) - 2\alpha_w R \quad (1)$$

EI:散乱強度(dB), SL:発射強度(dB), SV:粒子の後方散乱,  $\alpha_w$ :水の吸収係数(dB/m), R:トランスデューサーからの距離(m)

#### ②懸濁濃度の算出

ここでは、懸濁物質の影響とADCP トランスデューサーの感度調整パラメータも含む。

$$M(r) = (K \langle P_{rms} \rangle r)^2 \frac{(\alpha_s) \rho_s}{\langle f \rangle^2} e^{4r(\alpha_w + \alpha_s)} \quad (2)$$

M(r):トランスデューサーからの距離rにおける濃度, K:トランスデューサーに関する定数, Prms:後方散乱強度,  $\alpha_s$ :粒径,  $\rho_s$ :粒子密度,  $\langle f \rangle$ :粒子の関数,  $\alpha_w$ :水の吸収係,  $\alpha_s$ :粒子の吸収係数

以上のようにして、濁度換算を行い、コンタ図に整理した。この結果を図-2.5.5に示す。

図中に表記している単位 (ABT) は、超音波後方散乱方式で計測した濁度を示しており、横軸は観測開始地点からの曳航距離を、図中の水深15m以深の塗り潰し部分は海底を示している。

図-2.5.5より、St.試Aの測線 (LineA) について、図中に示す赤枠内にて濃度変化が生じていることが確認された。St.試Bの測線 (LineB), St.試Cの測線 (LineC) についても、水深15m付近で周辺よりも濁度が高い層が観測されているが、LineA のように海底面上4m 程度までのような巻上がりは確認されなかった。

図-2.5.6に濁度変化が確認されたLineAの部分を拡大した図を示す。図中の■は、人工魚礁を模式的に示したものである。この図より、人工魚礁近傍で、その約10m前面から徐々に濁度が高くなり、魚礁近傍では魚礁高2mに対して、海底面上4m程度まで濁度が高くなっており、その後、魚礁背面の約5m まで徐々に低くなる状況が面的な結果として確認された。図-2.5.7 に岸和田の

潮汐図を示すように、観測時間帯の潮位差は約20cmと、当日の最大潮位差約120cmに比べ小さく、潮汐流が小さかったと考えられるにも関わらず、魚礁により湧昇流が発生し、それに伴い濁度が高くなったものと考えられる。

人工魚礁背後の流れは、山本らの行った水理模型実験<sup>5)</sup>により、湧昇域では構造物高さの2～3倍、後流域においては構造物高さの15～20倍の影響範囲があることが確認されている。また、断面平均流速が8cm/sec以上であれば、湧昇域、後流域の影響範囲は変わらないことも併せて確認されている。

設置されている人工魚礁は、海水を攪拌することにより海水の混合促進、栄養塩拡散、酸素供給が期待されているものである。本研究における調査では、St.試Aに設置されている人工魚礁においてのみ攪拌流の発生とそれに伴う濁度の巻き上がりが確認された。湧昇域は、水理実験と同程度の構造物の2倍程度であったが、後流域の影響範囲は、水理模型実験結果よりも小さく、魚礁から20m域までであり、2mの魚礁の5倍程度であった。

しかしながら、流動制御機能の効果が発揮されていることが確認された。

LineB、LineCについては、St.試B、St.試CにおいてSt.試Aのような巻き上がりは確認されなかった。ここで、藤原らは、大阪湾北東部では図-2.5.8に示すように東岸恒流帯と呼ばれる密度流が存在するとしている<sup>6)</sup>。また、調査時の風況は、風速10m/sec未満の北北西、北西の風況であった。したがって、観測で得られた各測線の流向流速は当該海域の流況に該当すると判断できる。

以上のことから、構造物の西側を曳航したLineAでは湧昇域、後流域の濁度の巻き上がりを観測することが出来たが、LineB、LineCでは、恒流の影響等により南西に流れていると推察される湧昇域、後流域に発生している濁度の巻き上がりも曳航測線が構造物の東側を曳航したことにより、捉えることが出来なかったと考えられる。

これらの考察を今後の調査研究に活かし、St.試B、St.試Cでも各工種における効果を把握する必要があると考えられた。

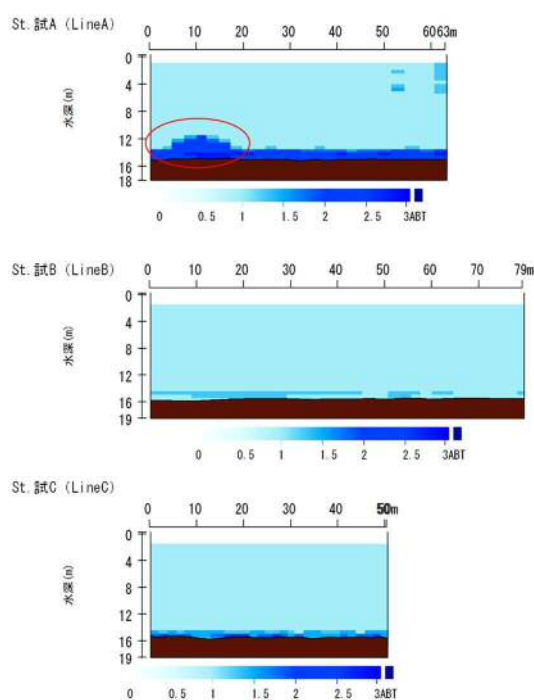


図-2.5.5 各測線における濁度換算結果コンタ図

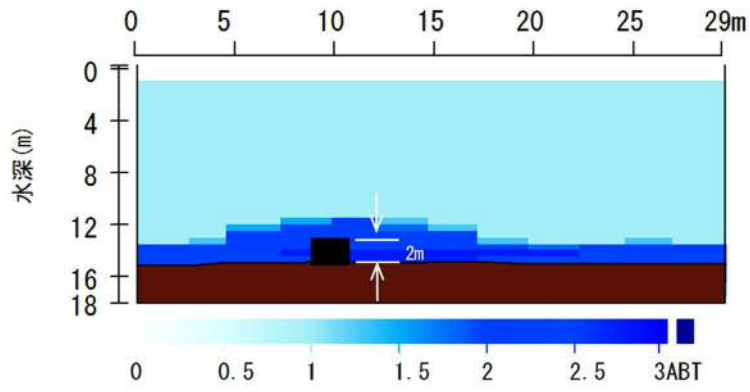


図-2.5.6 LineAにおける濁度巻き上がり箇所の拡大図

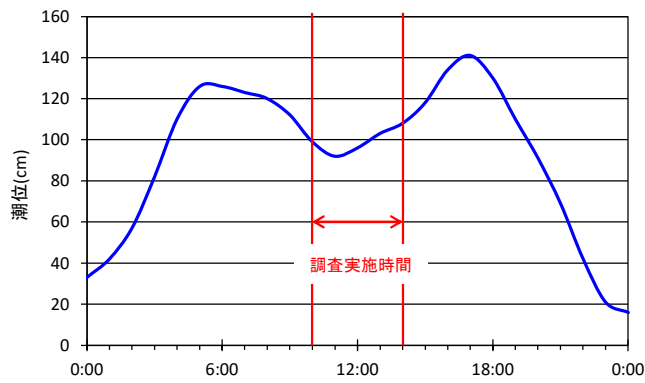


図-2.5.7 現地調査時の岸和田の潮汐



図-2.5.8 大阪湾の恒流系



次に平成 28 年度における調査結果を図-2.5.9(1)～(3)に示す。

ADCP 観測結果を用い、超音波後方散乱濁度 (ABT) に換算した。ADCP による曳航観測は図-2.5.23 に示す測線で実施した。Line1 は、魚礁区内での流下 (南向き) 方向への濁度の拡散状況を、Line2 (魚礁区上流側横断測線)、Line3 (魚礁区中央横断測線) は、魚礁区の影響の有無を比較するための測線として設定した。

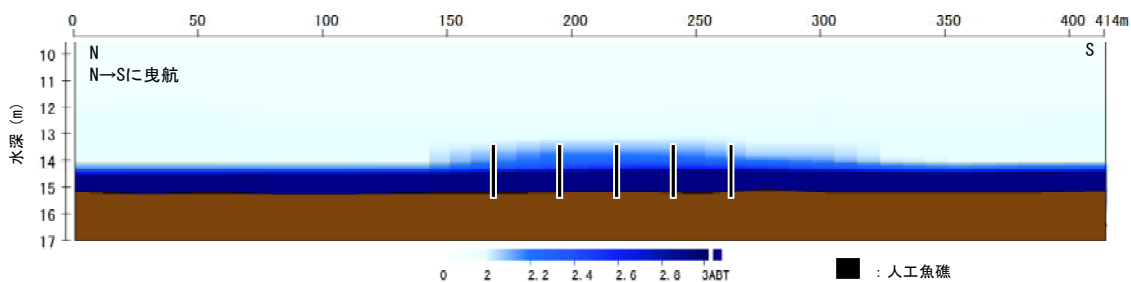


図-2.5.9(1) Line1 の濁度コンタ図

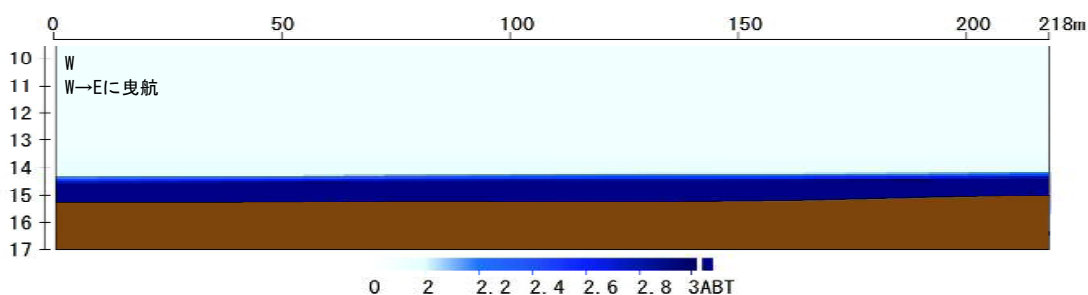


図-2.5.9(2) Line2 の濁度コンタ図

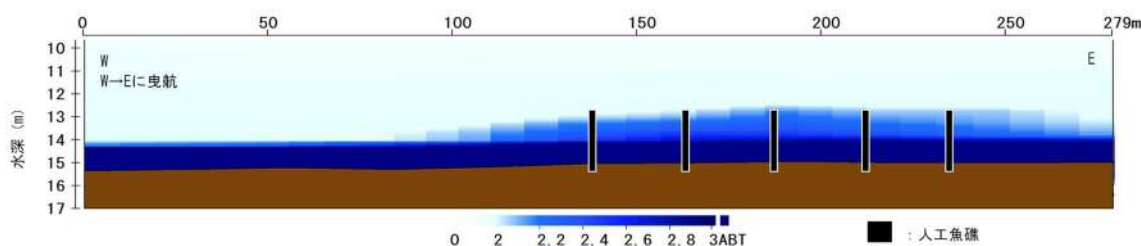


図-2.5.9(3) Line3 の濁度コンタ図

調査当日の潮汐状況は、潮位差最大 112 cm であり、調査時間帯は、潮周りは下げ潮で、調査時の潮位差は約 20 cm 程度であった (図-2.5.10 参照)。ここで、調査当日の流況ベクトル図を図-2.5.11 に示す。ベクトル図は、ADCP の特性上、底面近傍は不感領域となることから、当該水域の水深は概ね 15 m 程度であることから、水深 14 m を示すものとした。これより、調査時の流向は SW であったことが確認される。また、大阪湾における一般的な流況 (2018 年 2 月 2 日) を図-2.5.12 に示す。調査時の流況ベクトルと比較すると流れが穏やかであることが確認できる。

Line1 での濁度コンタ図 (図-2.5.9(1)参照)は、模式的に人工魚礁位置を示している。同図より、曳航観測開始より距離約 150 m 地点から約 330 m の間で濁度が巻き上がっている状況が確認される。この巻き上がりは、最大で、海底より 2 m 程度の高さまで巻き上がっている状況が確認され、魚礁

区通過後、約 80 m 程度まで影響範囲が及んでいることが確認された。

ここで、Line2、Line3 の濁度コンタ図（図-2.5.9(2)(3)参照）について、Line2 は魚礁区北側に位置しており、曳航測線上に人工魚礁は存在しない。Line3 は、魚礁区の中央を横断方向に曳航しており、測線上に人工魚礁が存在する。この Line2、Line3 を比較すると、Line3 で濁度の巻上りが生じていることが確認される。この濁度の巻上りは、図-2.5.9(1)に示す Line1 での巻上りの高さと同程度である。このことから、Line3 でも魚礁区内での人工魚礁による濁度の巻上りを捉えることができたものと考えられる。

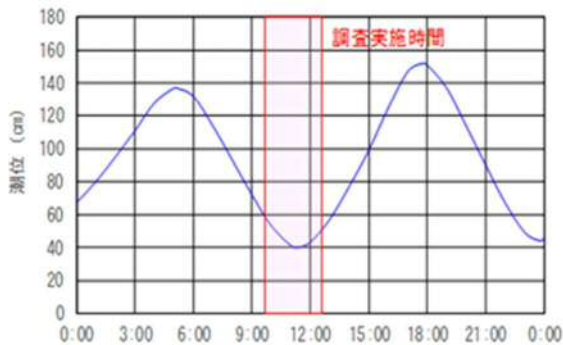


図-2.5.10 調査時の岸和田の潮汐

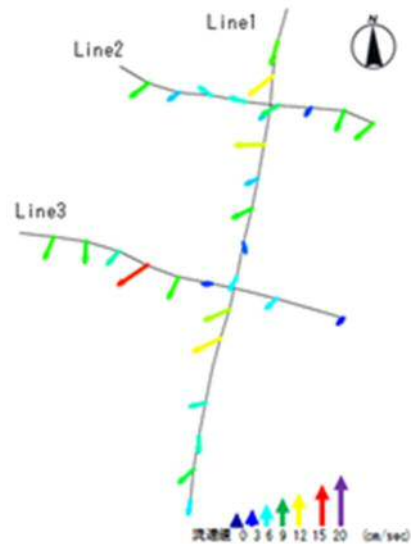


図-2.5.11 調査時の流況ベクトル（水深 14m）

ただし、横山ら<sup>7)</sup>によると、移動観測では、懸濁物の状況が一様でないことが推察されることから、再現性が低下されるとされている。しかしながら、超音波後方散乱濁度の有効性は示されていることから状況捉えることができているものと考えられる。ここで、鉛直分布では St.C、St.1 の間には顕著な差は生じていなかったが、濁度解析では巻き上がりが認められる。このことは、機器の測定精度が影響していると考えられる。

ここで、図-2.5.12 に大阪湾流況モデルのシミュレーション結果を示す。

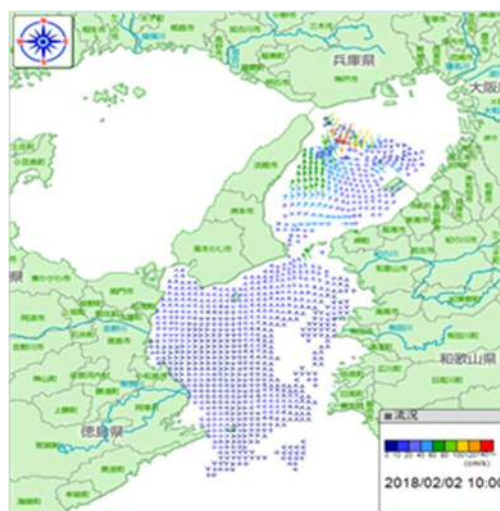


図-2.5.12 大阪湾流況ベクトル



本研究で用いた数値シミュレーションモデルで使用した基礎方程式を(1)～(6)式に示す。また、図-2.5.13 に大阪湾の入り口である明石海峡付近でオイラー・ラグランジュ法を用いて物質の動きを検討するために粒子を配置した図を、図-2.5.14 に海底地形図を、図-2.5.15～2.5.18 に物質の動きに強い影響を及ぼす海上風の影響を考慮するために計算に使用した風のデータを示す。

運動方程式

$$\begin{aligned} \frac{D\bar{u}}{Dt} &= f\bar{v} - \frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x} + \nu_h \left( \frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial y^2} \right) + \nu_v \frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial z^2} \\ \frac{D\bar{v}}{Dt} &= f\bar{u} - \frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial y} + \nu_h \left( \frac{\partial^2 \bar{v}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \bar{v}}{\partial y^2} \right) + \nu_v \frac{\partial^2 \bar{v}}{\partial z^2} \\ 0 &= -g - \frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial z} \end{aligned} \quad \dots \dots (1)$$

連続の式

$$\frac{\partial \bar{u}}{\partial x} + \frac{\partial \bar{v}}{\partial y} + \frac{\partial \bar{w}}{\partial z} = 0 \quad \dots \dots (2)$$

熱収支の式

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \frac{\partial (uT)}{\partial x} + \frac{\partial (vT)}{\partial y} + \frac{\partial (wT)}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left( K_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( K_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( K_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) + R \quad \dots \dots (3)$$

塩素量収支の式

$$\frac{\partial Cl}{\partial t} + \frac{\partial (u \cdot Cl)}{\partial x} + \frac{\partial (v \cdot Cl)}{\partial y} + \frac{\partial (w \cdot Cl)}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left( K_x \frac{\partial Cl}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( K_y \frac{\partial Cl}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( K_z \frac{\partial Cl}{\partial z} \right) \quad \dots \dots (4)$$

海面および海底の条件

$$\begin{aligned} -\frac{\partial \zeta}{\partial t} - u \Big|_{\zeta} \frac{\partial \zeta}{\partial x} - v \Big|_{\zeta} \frac{\partial \zeta}{\partial y} + w \Big|_{-h} &= 0 \\ u \Big|_{-h} \frac{\partial h}{\partial x} + v \Big|_{-h} \frac{\partial h}{\partial y} + w \Big|_{-h} &= 0 \end{aligned} \quad \dots \dots (5)$$

密度の式

$$\rho_s = \rho(Cl, T) \quad \dots \dots (6)$$

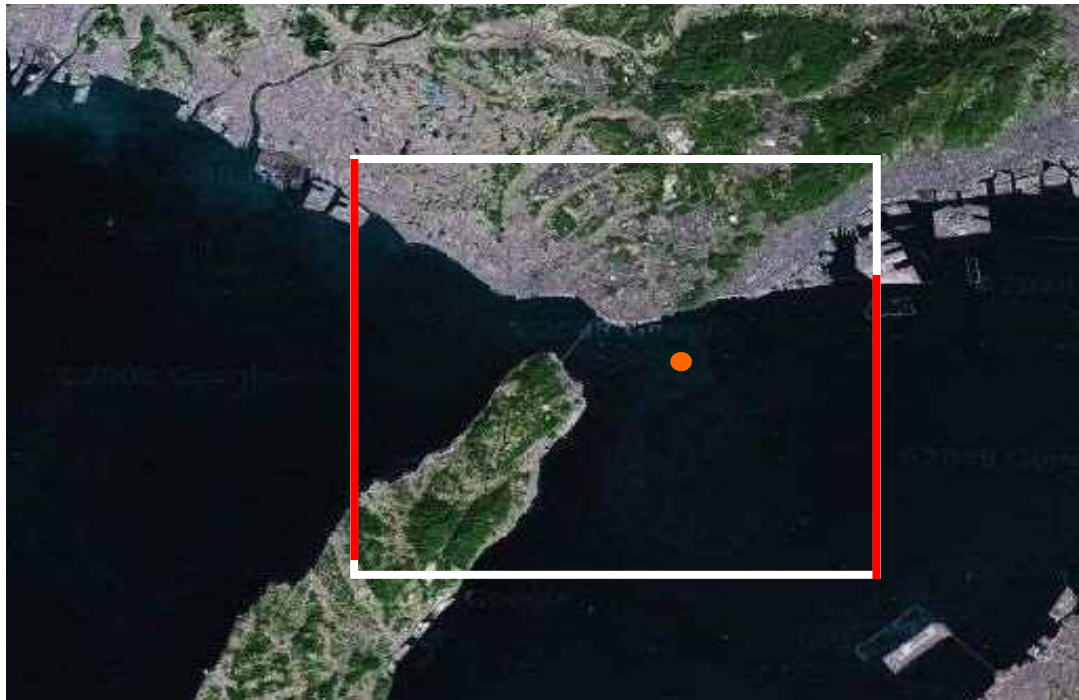


図-2.5.13 数値モデルで明石海峡付近に配置した粒子設置位置

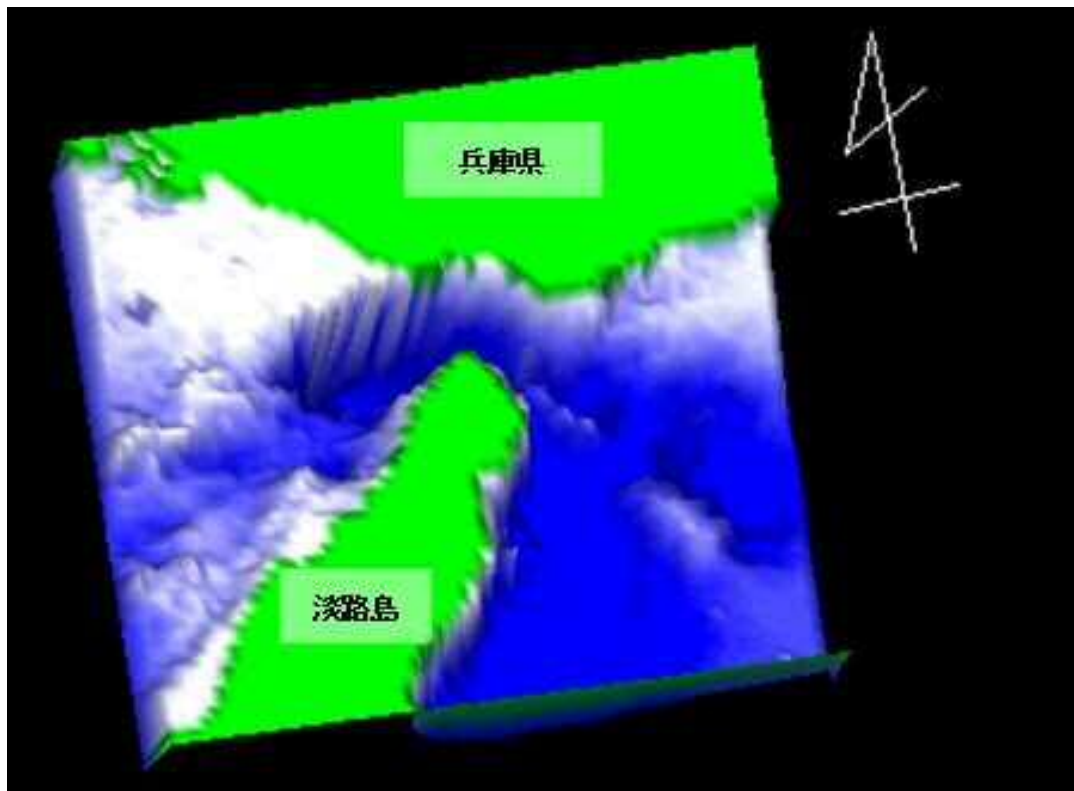


図-2.5.14 数値モデルで使した明石海峡付近の海底地形図

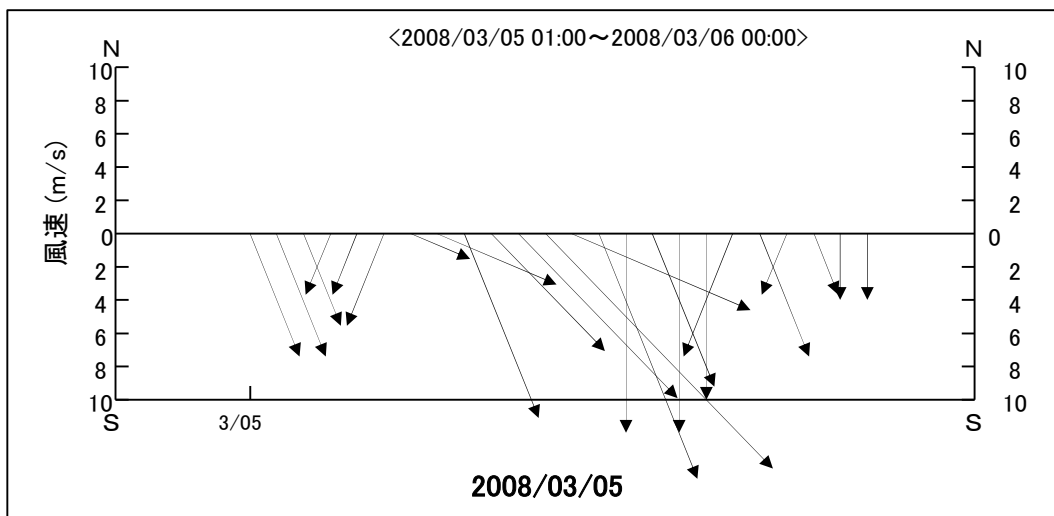


図-2.5.15 数値モデルで使した明石海峡付近の風向風速データ

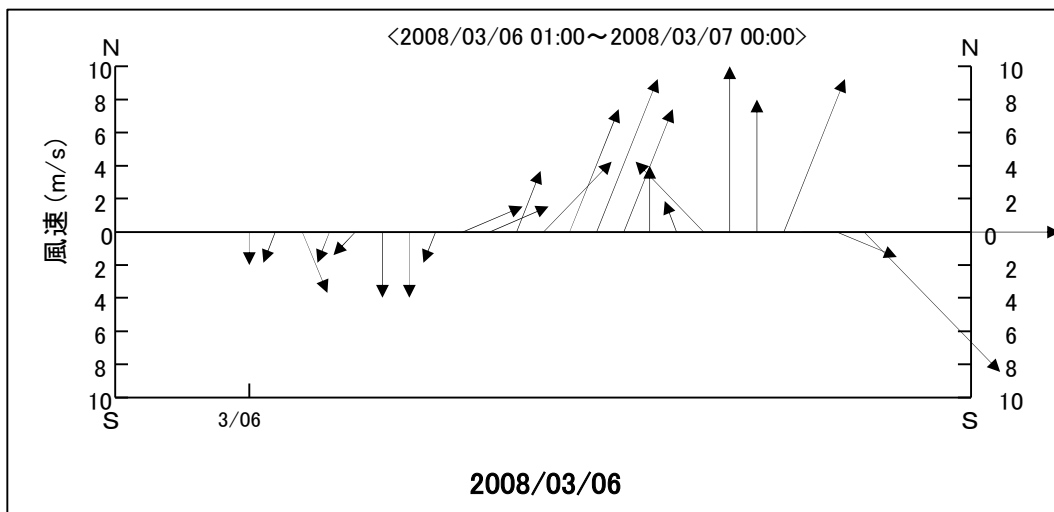


図-2.5.16 数値モデルで使した明石海峡付近の風向風速データ

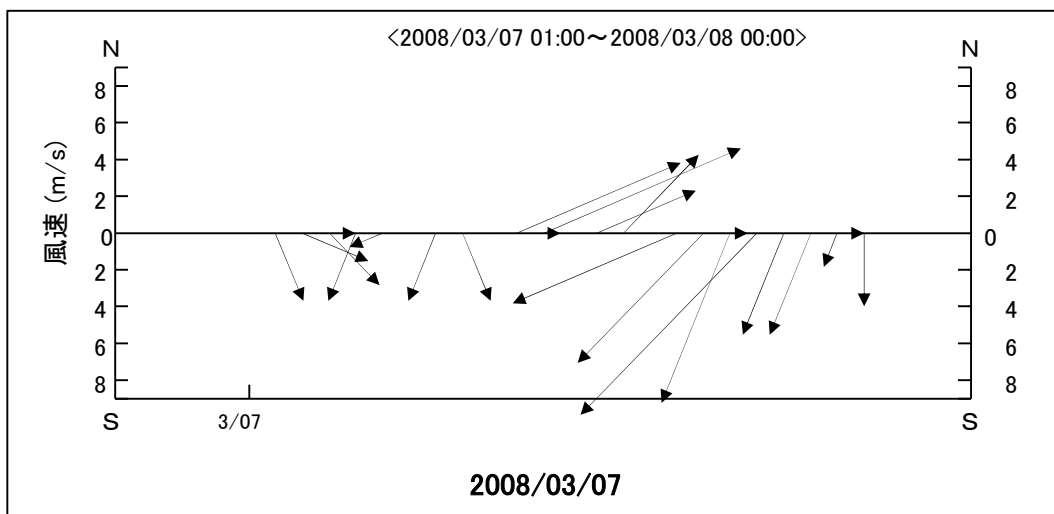


図-2.5.17 数値モデルで使した明石海峡付近の風向風速データ

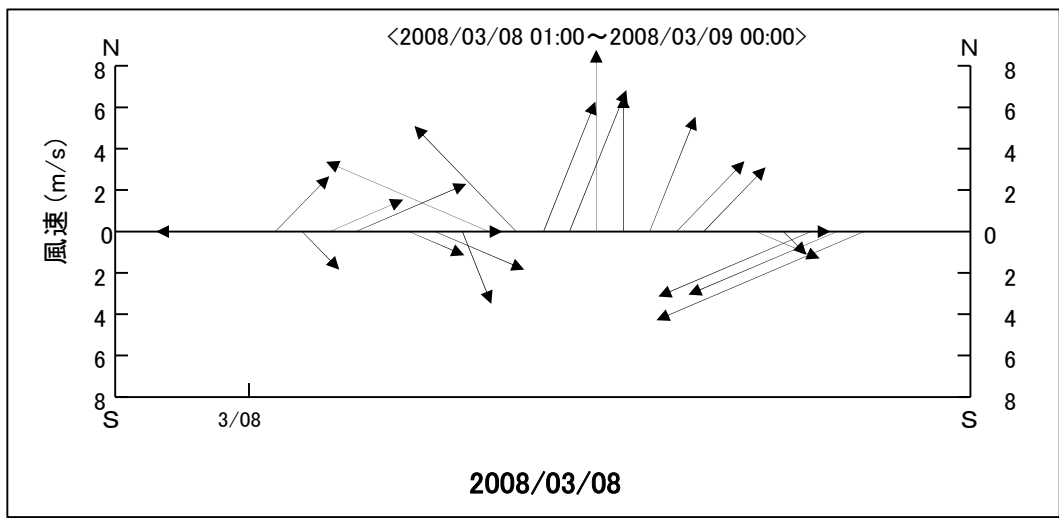


図-2.5.18 数値モデルで使用した明石海峡付近の風向風速データ

図-2.5.19 に明石海峡付近でオイラー・ラグランジュ法を用いて風の影響を考慮した場合の粒子追跡計算結果を示す。計算の結果、粒子投入直後は、粒子は南東方向へ移動して行き、時間の経過と共に粒子は東側へ移動する傾向にあることが分かる。この結果は、2008年3月に発生した当該海域での重油流出事故時の海面を漂う重油の軌跡と良い一致を示していることから、計算の精度を確認できた。

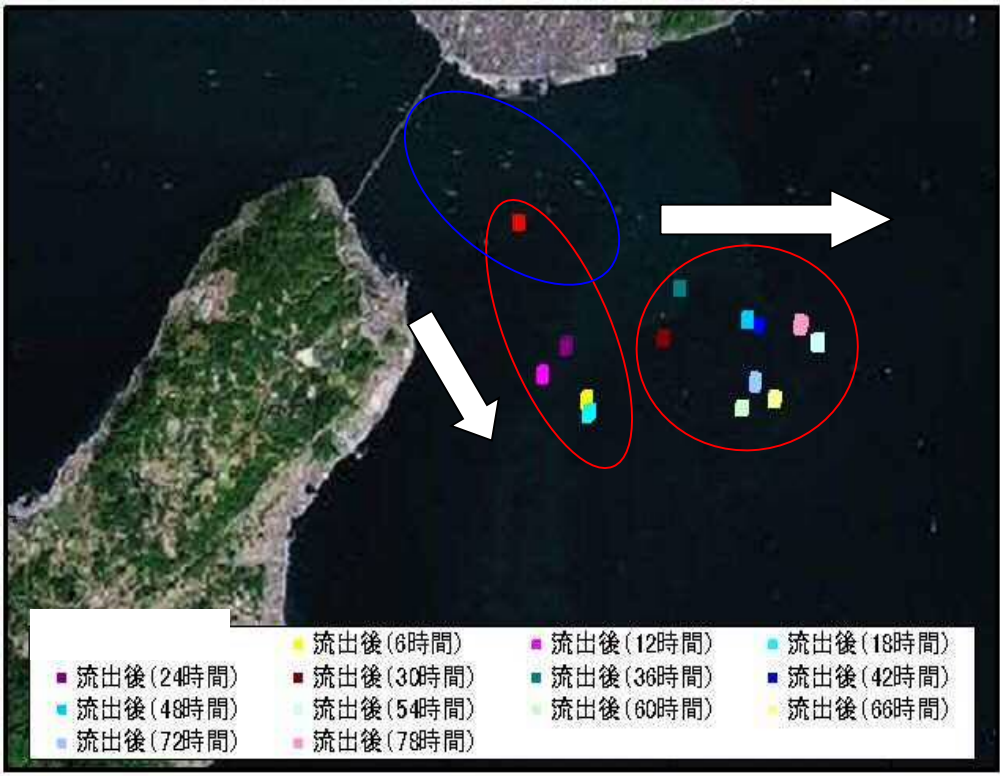


図-2.5.19 明石海峡付近の粒子追跡計算結果

図-2.5.20 に大阪湾を含む瀬戸内海東部海域の流況シミュレーション結果を示す。本数値モデルによる計算結果は、前述の明石海峡付近の流動場を含めて、既存の研究による結果<sup>6)</sup>を精度良く再現していることを確認した。

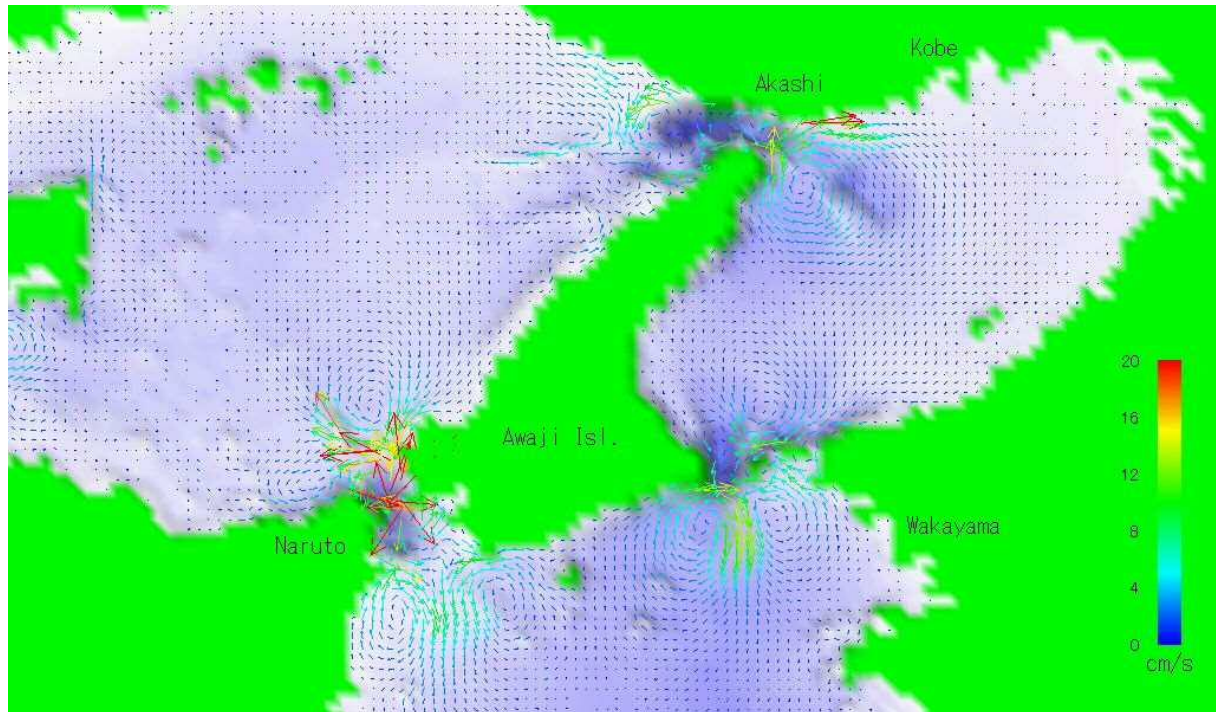


図-2.5.20 大阪湾を含む瀬戸内海東部海域の流況シミュレーション結果



## 2.5.2 成層安定度 Ri・混合効果 ME・湧昇効果 UE を用いた検証

大竹らは、Ri (リチャードソン数)、ME (混合効果)、UE (湧昇効果) を用いて、天然礁の流れ場の評価を行っている<sup>8)</sup>。

そこで、本研究においても実海域に施工されている人工魚礁による増殖場 (以下、「魚礁区」と表記) での流動制御機能について、成層の安定度を指標として、定量的に表すことを試みた<sup>9)</sup>。

### (1) 現地調査 (ADCP 曳航観測・水質機器計測)

本研究における現地調査は、貧酸素水塊が発生しやすい夏季に行うものとし、現場海域が流れの停滞する海域であることから、平成 28 年 8 月、平成 29 年 8 月の最も潮の動く大潮期を選定し、実施した。調査は、図-2.5.15 に示す St.A~St.D で多項目水質計を船上から垂下させて鉛直方向の水質機器計測を行った。さらに、同図に示す航跡で ADCP による曳航観測を行った。なお、図-2.5.15 で示す魚礁区は、図-2.3.1 で示す区域 1 である。

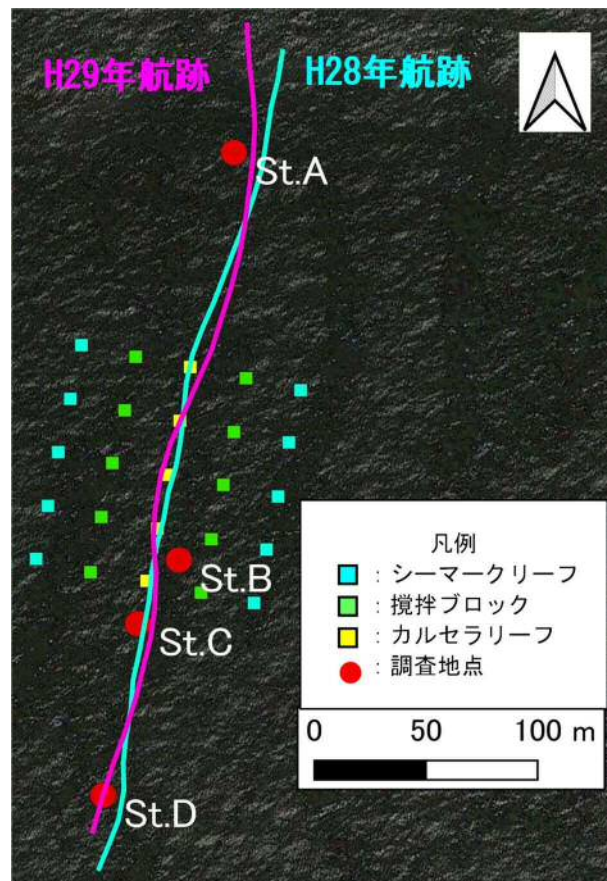


図-2.5.15 現地調査実施地点および曳航軌跡

## (2) 現地調査結果（水質機器計測）

多項目水質計による水質機器計測結果を用いて、各地点の鉛直方向の密度を算出した。水質機器計測結果から、水温、塩分、DO(mg/L)、密度の鉛直分布を図-2.5.16に示す。

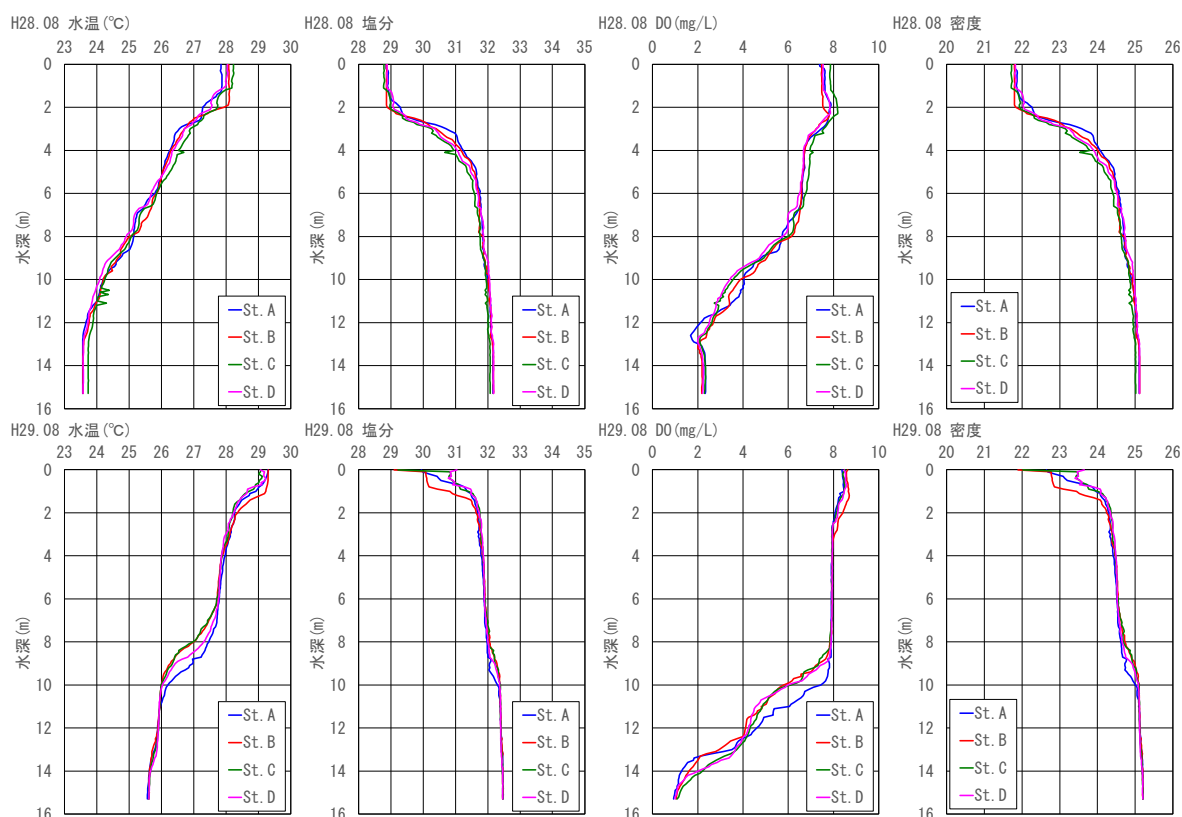


図-2.5.16 各地点の水質機器計測結果（上段：H28年8月 下段：H29年8月）

図-2.5.16より、水温は、平成29年の水深8～10mで、地点間の値に差が生じていることが確認された。塩分は、平成28年、平成29年いずれも地点間の明瞭な差は認められなかった。DOは、平成28年は地点間の明瞭な差が認められなかった。しかし、平成29年ではSt.Aで底層が貧酸素になっているのに対し、St.B～St.Dでは貧酸素状態が緩和されている状況が確認された。また、水深8～10m付近で水温躍層が形成されていることが確認された。これにより、魚礁区での攪拌効果があることが示唆されている。

## (3) 成層安定度 $Ri$ ・混合効果 $ME$ ・湧昇効果 $UE$ の算出

上述の調査により得られたデータを用いて、成層安定度の指標となる  $Ri$ （リチャードソン数）、 $ME$ （混合効果）、 $UE$ （湧昇効果）の検討を行った。

これらの検討は、多項目水質計による水質鉛直観測の結果から、水温、塩分を用いて、海水密度を算出し、算出した密度からバイサラ振動数  $N$  を求め、流況曳航観測より得られた流速値を用いて  $Ri$ 、 $ME$ 、 $UE$  を算出し、魚礁区上流（St.A）と魚礁区内（St.B）、魚礁区直下流（St.C）を比較することで行った。魚礁区下流（St.D）についても、魚礁区より100m下流と距離が離れているが、同様にこれらの値について算出を行った。

なお、算出の際に用いた観測層は、既往の研究（山本らによる水理実験<sup>5)</sup>）によると、湧昇域で

は構造物高さの2~3倍と報告されていることから、本業務の魚礁区に設置されている人工魚礁の高さ(2.0m)に鑑み、水深10m~15m(海底)とした。

また、各指標は、以下の式を用いて算出した。

バイサラ振動数Nは、以下の(1)式で示される。

$$N = \left\{ -\frac{g}{\rho_0} \frac{\partial \rho}{\partial z} \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (1)$$

ここで、gは重力加速度、 $\rho_0$ は最下層の密度、 $\partial \rho / \partial z$ は鉛直密度勾配を示す。

成層の安定度の指標であるRiは、以下の(2)式で示される。

$$Ri = \frac{N^2}{(\partial u / \partial z)^2} \quad (2)$$

ここで、 $\partial u / \partial z$ は鉛直方向の速度勾配を示し、uは本研究では流況曳航観測より得られた北向き流れを正とする水平流速の北方流速の水深10~15mの平均値を用いた。混合効果ME、湧昇効果UEは、それぞれ以下の(3)(4)式で示される。

$$ME = \frac{\partial \rho_2 / \partial z_2}{\partial \rho_1 / \partial z_1} \quad (3)$$

$$UE = \frac{\partial \rho_H / \partial x}{\partial \rho_V / \partial z} \quad (4)$$

ここで、 $\partial \rho_2 / \partial z_2$ は下流(St.B~St.D)での、 $\partial \rho_1 / \partial z_1$ は上流(St.A)でのそれぞれの鉛直方向の密度勾配を、 $\partial \rho_H / \partial x$ は同一水深における下流に対する上流の密度差を考慮した水平方向の密度勾配、 $\partial \rho_V / \partial z$ は下流側での鉛直方向の密度勾配を示す。

#### (4) 成層安定度 Ri・混合効果 ME・湧昇効果 UE の算出結果

算出したこれらの指標であるRi, ME, UEの一覧に整理した。これを表-2.5.1に示す。なお、本研究では、最下層は水深15mとし、 $\partial x$ はSt.Aからの距離とした。

表-2.5.1 成層安定度 Ri・混合効果 ME・湧昇効果 UE 算出結果

	平成28年8月			平成29年8月		
	St. B	St. C	St. D	St. B	St. C	St. D
$\rho_0$	25.115	25.014	25.119	25.204	25.202	25.199
$\partial \rho / \partial z$	-0.0382	-0.0306	-0.0304	-0.019	-0.0188	-0.0238
N	0.122	0.110	0.109	0.086	0.086	0.096
$\partial u / \partial z$	0.015	0.0248	0.005	0.029	0.015	0.004
<b>Ri</b>	66.260	19.495	474.368	9.126	32.061	714.077
<b>ME</b>	0.872	0.699	0.694	0.438	0.429	0.543
$\partial \rho_H$	-0.092	-0.193	-0.088	-0.003	-0.005	-0.008
$\partial x$ (m)	187.5	220	300	187.5	220	300
<b>UE</b>	0.0128	0.0287	0.0096	0.0008	0.0012	0.0011



この結果、2016年では  $Ri$  は、 $St.D > St.B > St.C$  であり、2017年では  $St.D > St.C > St.B$  となっている。また、 $ME$  は、2016年は  $St.B > St.C > St.D$ 、2017年は  $St.D > St.B > St.C$  となっている。 $UE$  は、2016年は  $St.C > St.B > St.D$ 、2017年は  $St.C > St.D > St.B$  となっており、いずれも  $UE$  の値は、 $>0$  となっており、正の値となっている。

ここで、リチャードソン数  $Ri$  は、流れ場において、自然対流と強制対流のどちらが卓越するかを示すものである。この値が大きい場合には自然対流が、小さい場合には強制対流が卓越することを示す。したがって、本研究における強制対流は、人工魚礁設置に伴う流動制御機能による流れと置き換える事ができると考えた。

このことから、算出結果をみると、 $Ri$  は、2016年では  $St.D > St.B > St.C$ 、2017年では  $St.D > St.C > St.B$  となっている。2016年では水温躍層が形成されていないことから、 $St.B$  と  $St.C$  が逆転しているが、いずれの結果も  $St.D$  の値に比較すると、 $St.B$ 、 $St.C$  の値は非常に小さい値を示している。したがって、 $St.B$ 、 $St.C$  では強制対流すなわち人工魚礁の流動制御機能による流れが卓越していると考えられる。また、魚礁区から100m下流の  $St.D$  は、人工魚礁の影響がなく、自然対流が卓越していると考えられる。

$ME$  については、 $Ri$  の増大とともに  $ME$  は小さくなる。これを踏まえて算出結果をみると、2016年では  $Ri$  は  $St.B > St.C$  で  $ME$  も  $St.B > St.C$  となっている。また、2017年では、 $Ri$  は  $St.C > St.B$  で  $ME$  は  $St.B > St.C$  となっている。これは、2016年の調査時に水温躍層が形成されていないため、各地点での密度差が顕著ではなかったことに起因するものと考えられる。

$UE$  については、 $UE > 0$  の場合、下層水が湧昇し上層水と混合、 $UE < 0$  の場合、上層水が下降し下層水と混合したことを示す。これを踏まえて、算出結果をみると、2016年、2017年のいずれも全地点で  $UE$  は  $UE > 0$  となっている。このことから、下層水が湧昇し上層水と混合していることが示唆された。

## 【第2章参考文献】

- 1) 宮川昌志, 流動制御構造物による底質改善技術の関する研究, 平成 19 年度香川大学大学院博士論文, pp.38-46, pp.36-37, pp.51-56, 2007
- 2) 高田祥暉, 大阪湾における攪拌機能を有する人工魚礁を用いた海域環境改善技術に関する研究,  
平成 26 年度卒業論文, pp.6-12, 2015
- 3) 橋田隆史, 横山洋, 橋場正弘, 新井励, ADCP の超音波反射強度を利用した濁度計測技術について, 河川流量観測の新時代, 第2 巻, 2011 年8 月
- 4) 中村明日人, 市村康, 城越徹矢, 山地功二, 末永慶寛, 実海域における人工魚礁の攪拌機能に関する定量的評価, 土木学会論文集 B3 (海洋開発), Vol.71, No.2, pp.1197-1202
- 5) 山本直樹, 末永慶寛, 佐々木孝, 黒木繁徳: 流動制御機能を有する水産資源増殖構造物の開発, 土木学会四国支部第7 回技術研究発表会講演概要集, pp.482-483, 2001.
- 6) 藤原建紀, 肥後竹彦, 高杉由夫, 大阪湾の恒流と潮流・渦, 海岸工学論文集, 第36巻, pp.209-213, 1989
- 7) 横山洋, 渡邊尚宏, 矢部浩規, 汽水湖における濁度動態モニタリングに関する考察, 寒地土木研究所平成24年度技術発表会, 2012
- 8) 大竹臣哉, 山本康介, 小池志門, 大西謙吾, 大門伸之, 天然礁の鉛直混合効果に関する研究, 平成26 年度日本水産工学会学術講演会学術講演論文集, pp.75-78
- 9) 中村明日人, 末永慶寛, 実海域における人工魚礁による流動制御機能の定量化, 土木学会論文集 B3 (海洋開発), Vol.74, No.2, pp.528-533

### 第3章. 人工魚礁による底質改善機能に関する検討

近年、大阪湾東部における底質のCODの値は環境基準値である20 mg/gを上回り、底質環境の悪化状態が続いている。国土交通省による大阪湾環境データベースでは、平成24年の大阪湾におけるCOD値が図-3.1に示すような傾向にあると示している<sup>1)</sup>。

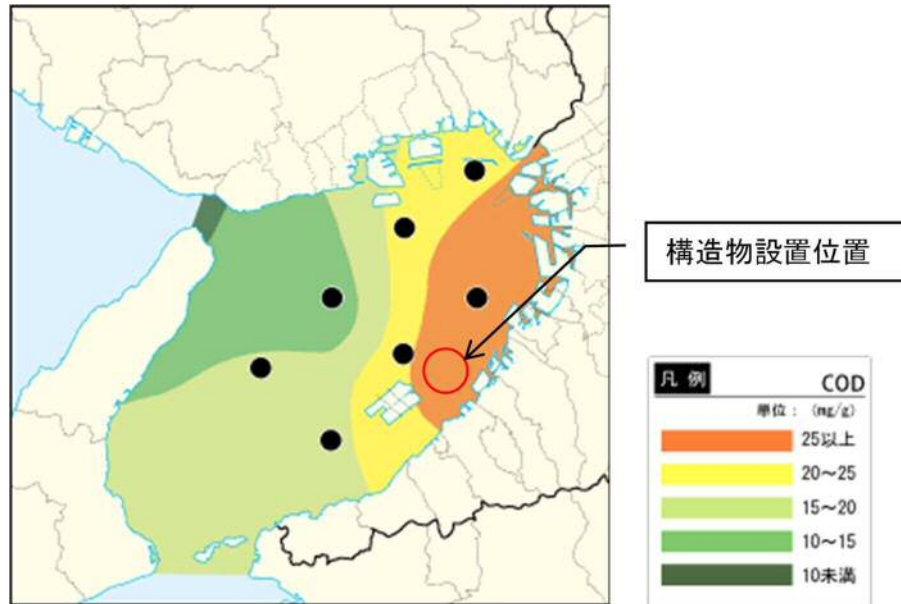


図-3.1 底質のCOD分布<sup>1)</sup>

本章では、実海域における人工魚礁設置後の環境改善機能を定量的に評価するために、底質のCOD濃度を指標として、人工魚礁設置費用に対する便益を検討した。

### 3.1 底質調査実施位置

図-2.3.1 に示す試験礁区から距離別に対照区を設け、各地点で採取した底質試料を室内分析に供し、COD 濃度の比較を行った。魚礁区区域 1 と試験礁区、各対照区地点の位置関係を図-3.1.1 に示す。なお、対照区 A は試験礁区から 150m、対照区 B は 100m、対照区 C は 50m、対照区 D は 20m とした。

また、これらの地点を対象とする底質調査は、平成 26 年 1 月、平成 27 年 7 月、9 月、平成 28 年 8 月の計 4 回実施した。

さらに、魚礁区の区域 1、区域 2 についても底質調査を平成 28 年度に行っている。その際の調査地点は、各区域とも図-2.3.1 に示す St.A～St.D で実施した。なお、平成 28 年度の調査時には各地点で採取した底泥試料について、室内試験による粒度分析も併せて実施した。



図-3.1.1 底質調査実施位置)

### 3.2 底質調査結果

#### (1) 底質分析結果 (COD 濃度・硫化物濃度)

前述のとおり，試験礁区とその周辺対照区での調査は，平成 26 年 1 月，平成 27 年 7 月，9 月，平成 28 年 8 月の 4 回実施した。この結果を図-3.2.1 に示す。

当該海域の CDO に係る環境基準値は，20 mg/g とされている。平成 26 年度 1 月の調査では，魚礁区内の COD の値は 10 mg/g であり，最寄りの対照区 A における COD の値も 15 mg/g であり，環境基準値を下回っていた。

また，以降の調査時についても試験礁区の値は環境基準値を下回っているが，対照区では最寄りの対照区 A で環境基準値を下回るときは確認されているが，対照区 C，D では環境基準値を超えている状況が確認された。

以上のことから，試験礁区（構造物周辺）においては底質の環境改善が促進されていることが確認された。

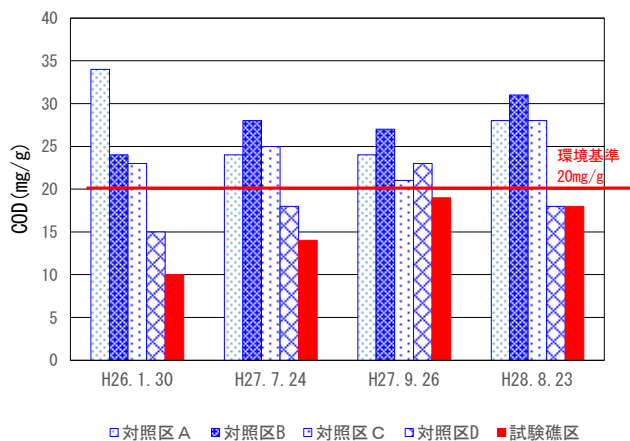


図-3.2.1 底質の COD(mg/g) H26

また，写真-3.2.1 に調査時に採取した試料を撮影した写真を示す。なお，示している写真は，平成 27 年 7 月調査時に撮影した写真である。これより，試験礁区では構造物の流動制御機能により底泥が混合されているのに対して，対照区では底泥が混合されず，層が形成されていることがわかる。

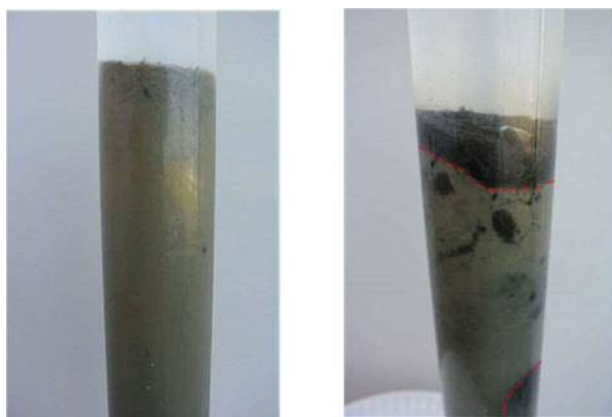


写真-3.2.1 採取した底泥の様子（左：試験礁区 右：対照区）

次に、平成 28 年度に実施した区域 1, 2 における底質の COD 濃度および硫化物濃度の分析結果を図-3.2.2 に示す。

図-3.2.2 に示すように、区域 1 では COD は概ね同程度であるが、最下流の St.D が最も値が高く、硫化物は下流に行くにつれ値が高くなっている状況が確認された。また、区域 2 では COD 濃度、硫化物濃度ともに上流端である St.A が最大となっており、魚礁区から下流では概ね同程度の値を示している状況が確認された。

これらの結果を環境基準と照らし合わせると、区域 1, 2 の各地点において、COD 濃度は環境基準値 20mg/g を下回っていた。これは、漁場造成による実海域における面的な影響が考えられる。これまで、区域 1, 2 では点的な実験であったが、現在では大阪府事業の進捗に伴い整備済みとなっている区域数も増加しているため、構造物の相乗効果により底質環境は改善傾向にあることが推察される。

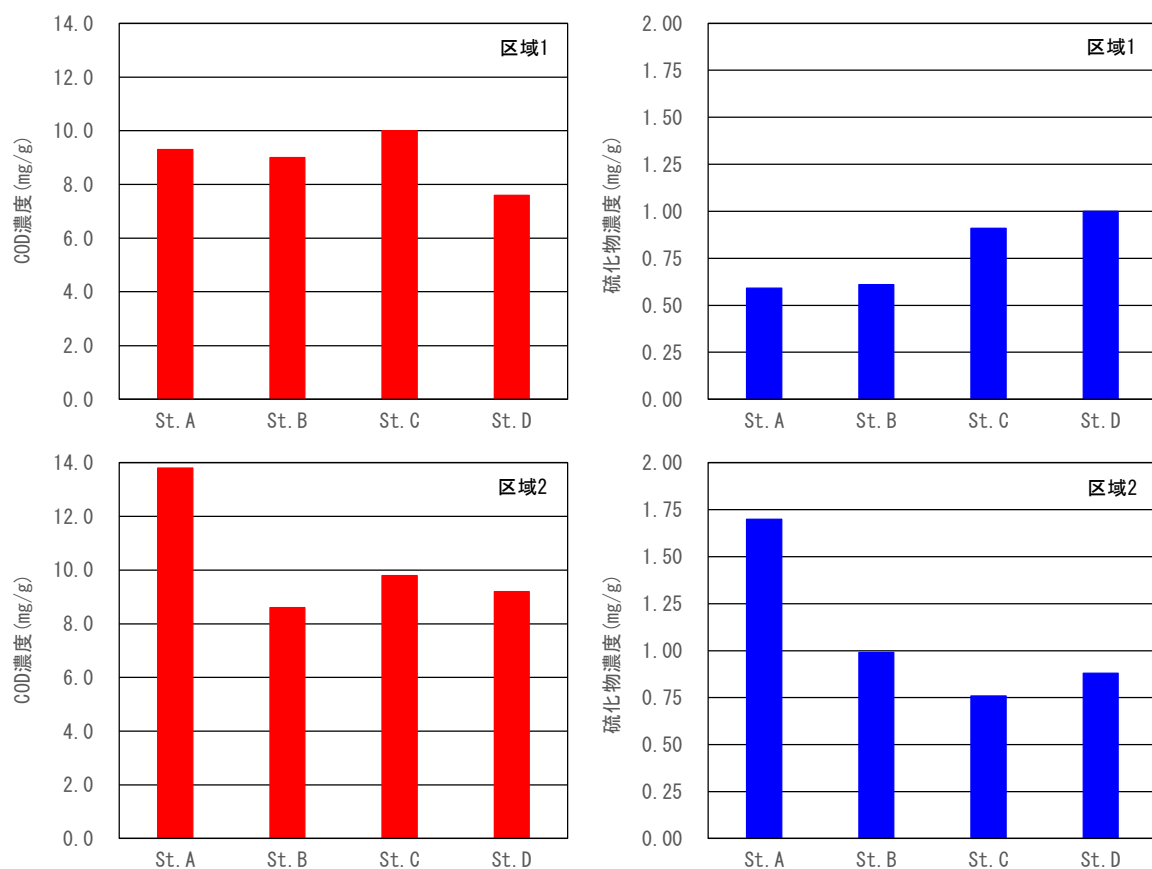


図-3.2.2 底質の COD(mg/g)および硫化物 H28  
(上段：区域 1 下段：区域 2)

## (2) 底質分析結果（粒度分布）

図-3.2.3, 3.2.4 に平成 28 年度調査時に区域 1, 2 で採取した底質の粒度分析結果を示す。

これらの図より、区域 1, 2 における各調査地点の底質は主にシルトであり、外観上に大きな差は認められなかった。粒度分布については、シルト、粘土分が多かったことから、ふるい沈降分析を行い、その結果を粒径加積曲線に整理した。その結果、各地点における明確な差は認められなかった。

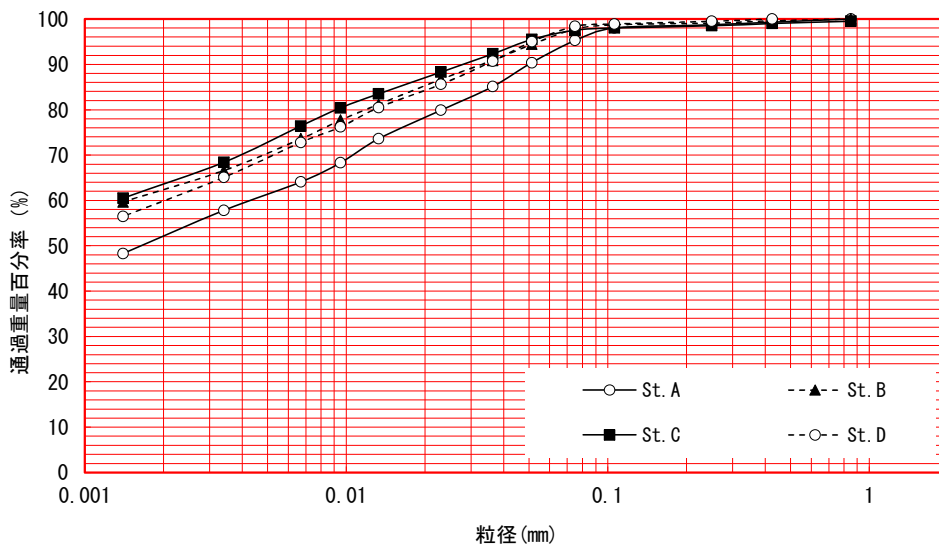


図-3.2.3 区域 1 における各地点の底質の粒度分析結果 H28

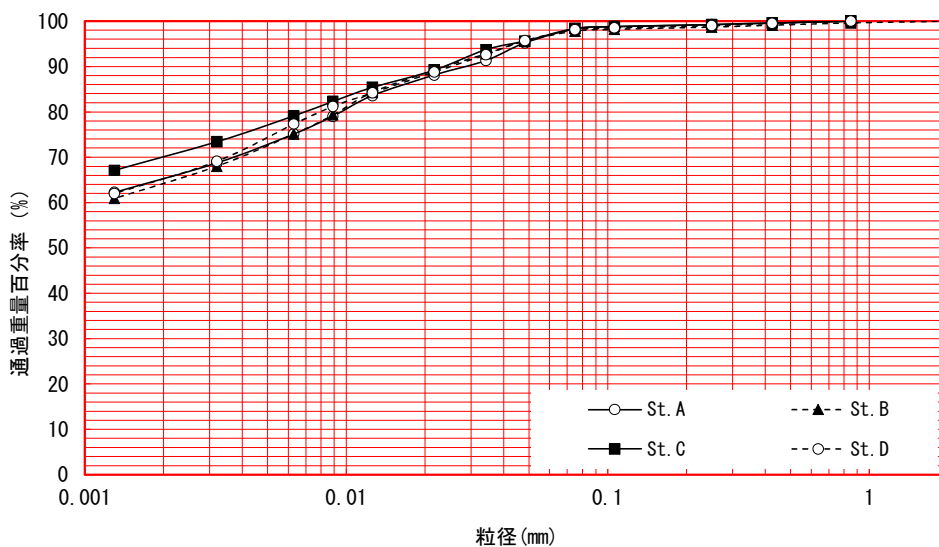


図-3.2.4 区域 2 における各地点の底質の粒度分析結果 H28



### 3.3 構造物による底質改善効果の検討

攪拌機能を有する構造物の底質改善効果の評価を B/C（費用対効果）の考え方をを用いて検証を行った<sup>2)</sup>。

本検討では、COD を指標として、B/C を以下のとおり検討した。なお、検討する際に用いた計算手法を表-3.3.1<sup>3)</sup>に示す。

表-3.3.1 計算手法<sup>3)</sup>

年間便益額	=	新たに創出される場(構造物, 砂場)による有機物処理量 (kg-COD/年)	×	有機物処理量に相当する下水道処理費用 (円/kg-COD)
有機物 (COD) 処理量当たりの年間下水道費用	=	処理人口当たり年間経費	÷	下水道処理による処理人口当たりの年間COD除去量
処理人口当たり年間経費	=	年当たり建設費 (建設費/耐用年数)	+	年間維持管理費
下水道処理による処理人口当たりの年間COD除去量	=	COD発生原単位	×	下水道施設によるCOD除去率
有機物処理量に相当する下水道費用	=	処理人口当たり年間経費	÷	下水道処理による処理人口当たりの年間COD除去量

社団法人日本下水道協会（平成 13 年版）から、上記の金額を求めると有機物処理量に相当する下水道費用は表-3.3.1 より、

$$49,913 \text{ (円/年・人)} \div 8.939 \text{ (kg - COD/人・年)} = 5.584 \text{ (円/kg - COD)}$$

この数値を使って、底層流 10cm/sec とした場合、構造物 1 基による底質改善可能範囲は、影響範囲が二方向のみとした場合、112.0 m<sup>2</sup>になる。

次に、現地調査結果から、構造物の COD 除去機能は、底泥 1kg（湿重量）あたり 5～10g（平均 7.5g とする）の COD 除去の実績があるので、底泥の採取深さは 15～20cm（平均 17.5cm）であるとすると、

$$7.5\text{g/kg} \times 112 \text{ m}^2 \times 0.175\text{m} \times 2.0(\text{底泥比重}) = 294.0 \text{ (kg-COD)}$$

これに、5,584（円/kg-COD）を乗じると、5,584（円/kg-COD）×294.0（kg-COD）=1,641,696 円。構造物の制作費、沈設費で 1 基当たり、130 万円とすると、B/C=1.26 となる。

ただし、今回は、二方向のみの評価であり、これを四方向として考えると、処理量は 2 倍となり、B/C も 2 を超える。

以上のこれらのことから、攪拌機能を有する構造物を用いることに対する有用性が検証できた。

### 【第3章参考文献】

- 1) 大阪湾環境データベース, 国土交通省近畿地方整備局, <http://kouwan.pa.kkr.mlit.go.jp/kankyo-db/>
- 2) 中村明日人, 末永慶寛, 実海域における人工魚礁による流動制御機能の定量化, 土木学会論文集 B3 (海洋開発), Vol.74, No.2, pp.528-533, 2018
- 3) 武田真甲子, 影山智将, 細見寛, 須野原豊, 海岸事業の費用便益分析指針 (改訂版), pp.67-70, 2004

## 第4章. 人工魚礁の生物蛸集機能に関する検討

実海域における流動制御機能を有する人工魚礁設置後の生物蛸集機能について、小型魚類の有用な餌料となる植物プランクトン、動物プランクトン、付着生物および魚類の蛸集を指標として潜水目視調査により検討した。

### 4.1 プランクトン調査結果

動物プランクトン、植物プランクトン、餌料生物における調査結果を表および図を用いて示す。なお、調査地点については、図-2.3.1, 2.3.4を参照するものとする。本節の図に示すそれぞれの地点については、例えば区域1のSt.Aを「区域1A」、区域2のSt.Dを「区域2D」と示すこととする。

#### 4.1.1 動物プランクトン

動物プランクトンの調査結果を表-4.1.1, 図-4.1.1に示す。

この結果、両区域において種類数、個体数合計ともに図-4.1.1に示すように魚礁区内のSt.Bが最も多いことが確認できた。さらに、魚礁区上流よりも魚礁区内の方が種類数、個体数とも多くなっていることが確認できた。

このことから、構造物による攪拌効果によって、底質が巻き上げられている、つまり、底質の巻き上げにより有機物等も巻き上げられ、それらを捕食する動物プランクトンが増加していると考えられる。

表-4.1.1 動物プランクトン分析結果

番号	門	綱	目	種名	区域1				区域2							
					区域1A	区域1B	区域1C	区域1D	区域2A	区域2B	区域2C	区域2D				
1	原生動物	繊毛	有鐘	<i>Leptotintinnus nordqvisti</i>		1					1	2	2			
2				<i>Tintinnopsis nortenseni</i>	2	2		3	2	2	3	3				
3				<i>Tintinnopsis</i> sp.	4	1					2	1				
4				<i>Favella ehrenbergii</i>	1	59	38	19	22	36	18	17				
5				<i>Favella</i> sp.	23	8	9	5	5	6	5	4				
6				<i>Parafavella</i> sp.	4	1	7			1	2					
7	肉質鞭毛虫	葉状根足虫	酸性真正葉状根足虫	<i>Diffugia</i> sp.			1					1				
8			有孔虫	<i>Globigerina</i> sp.		1			1	1						
9	軟体動物	腹足		Larva of Gastropoda	10	4	5	3	2	2	7	2				
10		二枚貝類		Larva of Bivalvia	6	10	5	2	4	5	4	9				
11	環形動物	多毛	遊在	Larva of Nereidae	2	4	2	4	3	6	5	8				
12				Larva of Nephtyidae	4	4	4	4	17	16	16	18				
13	毛顎動物	矢虫	矢虫	<i>Sagitta</i> sp.			1			1	1					
14	節足動物	鰓脚	枝角	<i>Penilia schmackeri</i>	18	10	9	24	22	13	20	20				
15				<i>Podon leuckarti</i>	8	8		4								
16				<i>Evadne nordmanni</i>	1		6	9	8	10	6	9				
17				<i>Evadne spinifera</i>	5	4		2		1						
18		鰓脚	カラマス		<i>Paracalanus</i> sp.	3	1	5	8	5	5	5	3			
19					<i>Acartia</i> sp.	5	5	1	7	2	3	4	2			
20					Calanoida	5	4	6	14	3	3	6				
21					Copepodid of Calanoida	10	4	7	10	17	9	8	10			
22					キクロプス			<i>Oithona davisae</i>	40	37	35	28	26	27	32	16
23								<i>Oithona</i> sp.	9	9	6	13	7	11	8	10
24								<i>Corycaeus</i> sp.	4	10	10	6	7	10	8	6
25								<i>Microsetella rosea</i>	45	55	52	40	45	52	38	35
26								<i>Microsetella</i> sp.	8	19	13	4	8	30	10	13
27	<i>Macrosetella</i> sp.	3	5	3				3		8		2				
28	Cyclopoida	13	15	10				12	15	23	7	7				
29	Copepodid of Cyclopoida	17	27	14	22	25	8	16	23							
30	ハルバクティコイダ			Harpacticoida	3	4	3	3		2	2	5				
31				Nauplius of Copepoda	48	283	265	119	140	251	84	166				
32	鰓脚			フジツボ	44	14	25	82	97	30	32	89				
33				エボシガイ	187	369	270	277	260	292	155	188				
34	原素動物	尾索	尾虫	<i>Oikopleura</i> sp.			1			1	2	2				
				種類数	29	30	28	27	24	31	31	26				
				個体数合計 (個体/L)	532	978	813	727	743	867	510	668				
				沈澱量 (mg/10L)	0.24	0.37	0.39	0.13	0.31	0.31	0.23	0.14				

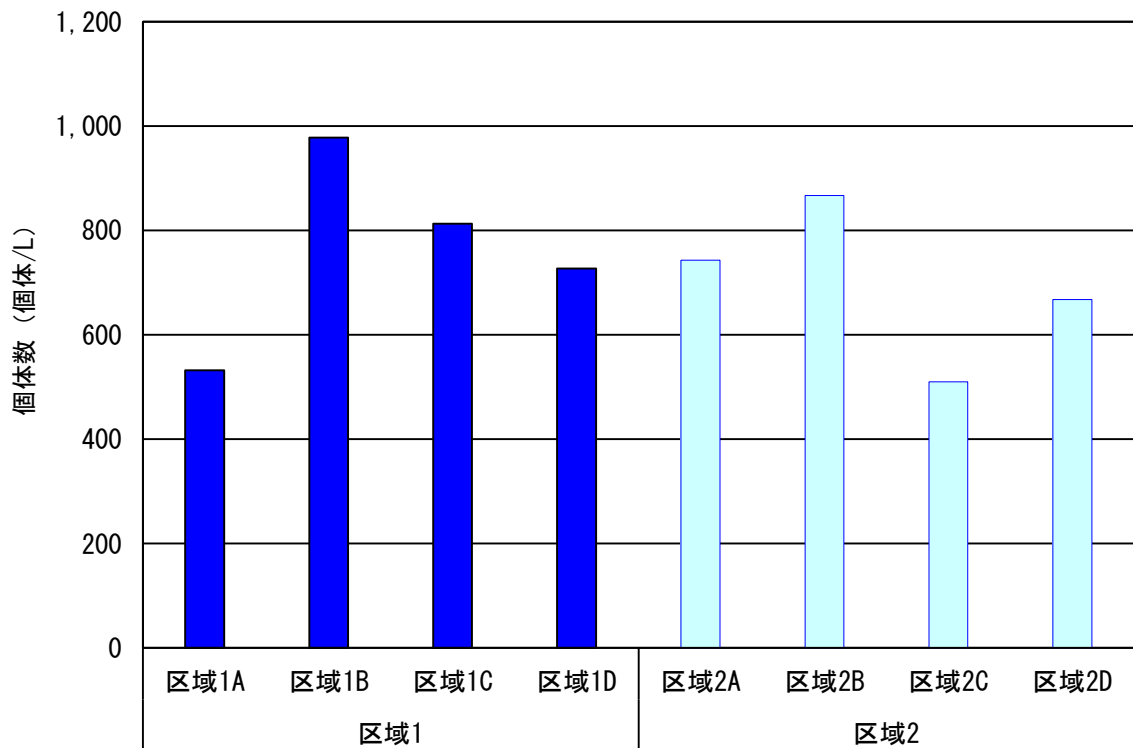
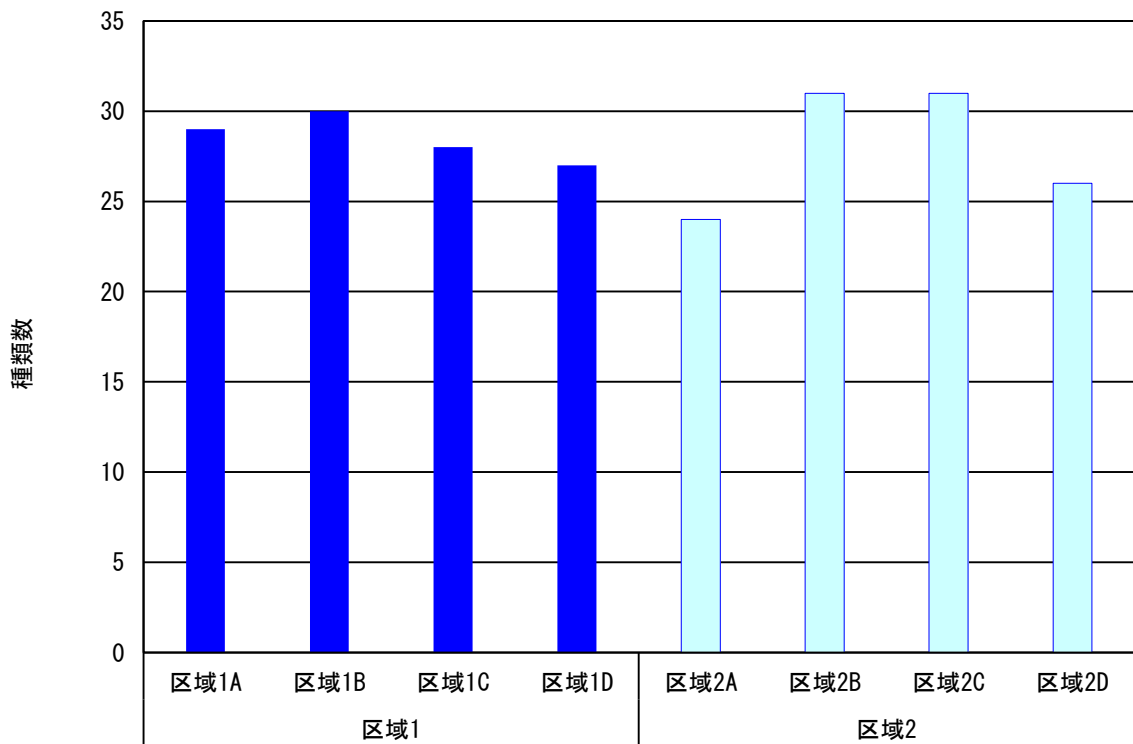


図-4.1.1 動物プランクトン分析結果図

#### 4.1.2 植物プランクトン

植物プランクトンの調査結果を表-4.1.2、図-4.1.2 に示す。

この結果、種類数では区域ごとに変動があり、各区域内での明確な差は確認できなかった。しかし、個体数合計では、両区域ともに魚礁区上流よりも魚礁区内の方が高い値を示している状況が確認された。

以上のことと前節を踏まえると、構造物による鉛直方向への攪拌機能が発揮されていると示唆される結果となった。

表-4.1.2 植物プランクトン分析結果

番号	門	綱	目	種名	区域1				区域2					
					区域1A	区域1B	区域1C	区域1D	区域2A	区域2B	区域2C	区域2D		
1	渦鞭毛植物	渦鞭毛藻	プロロセントラム	<i>Prorocentrum gracile</i>			1	1	1	1	1	1		
2				<i>Prorocentrum micans</i>			2	2	2	1	1	1	1	
3				<i>Prorocentrum emarginatum</i>	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
4					ディノフィジス	<i>Dinophysis</i> sp.	1	1		1	1	1	1	
5					ペリディニウム	<i>Protoperdinium</i> sp.	1	1			1	1	1	1
6					ケラテウム	<i>Ceratium fusus</i>	1		3	2	1	1	1	1
7						<i>Ceratium</i> sp. 1	1		1	1	1	1	1	1
8						<i>Ceratium</i> sp. 2	1				1		1	1
9						<i>Ceratium</i> sp. 3					1		1	1
10	不等毛植物	黄色鞭毛藻	ディクテオカ	<i>Dicryocha fibula</i>	1	2	1		1	1	1	1		
11		珪藻	円心	<i>Thalassiosira</i> sp. 1	18	29	35	45	25	27	21	17		
12				<i>Thalassiosira</i> sp. 2	1			4		1	1	1		
13				<i>Melosira nummuloides</i>			1			1				
14				<i>Melosira moniliformis</i>	1	1					1	1		
15				<i>Melosira sulcata</i>	1						1	1		
16				<i>Hyalodiscus stelliger</i>				1					1	
17				<i>Skeletonema costatum</i>	1	1			1	3	1	1	1	
18				<i>Stephanopyxis palmeriana</i>	1					1			1	
19				<i>Actinopterychus senarius</i>	1	1					3		1	
20				<i>Eithmodiscus gazellae</i>	1	1	1				1		1	
21				<i>Coscinodiscus asteromphalus</i>	1		7			3	1	1	1	
22				<i>Coscinodiscus</i> sp.	1	8	5				1	1	1	
23				Coscinodiscaceae	1	1		1	1	1	1	1	1	
24				<i>Rhizosolenia alata</i>		1				1	1	6		
25				<i>Rhizosolenia</i> sp.	1	6		2	1	1	1			
26				<i>Chaetoceros</i> sp. 1	5	1	5	2	14	7	6	1		
27				<i>Chaetoceros</i> sp. 2	1	1	1		1	1	1	4		
28				<i>Bacteriastrium</i> sp.	1		1				1	1		
29				<i>Biddulphia sinensis</i>	1					1	1	1		
30				<i>Biddulphia granulata</i>	1						1	1		
31				<i>Ditylum brightwellii</i>	1				1			1		
32				<i>Eucampia zoodiacus</i>	1				1			1		
33				羽状		<i>Fragilaria</i> sp.	1				1	1	1	1
34						<i>Asterionella japonica</i>					1	1	1	
35						<i>Thalassionema nitzschioides</i>	7	11	2	5	11	10	7	8
36						<i>Thalassiothrix frauenfeldii</i>	7		1	1	4	1	1	
37						<i>Rhabdonema</i> sp.	1	1			1	1	1	1
38						<i>Achnanthes</i> sp.				1	1	1	1	1
39						<i>Cocconeis scutellum</i>	1			1	1	1	1	1
40						<i>Amphora</i> sp.	1		1		1	1	1	1
41						<i>Gyrosigma fasciola</i>	1				1	1	1	1
42						<i>Pleurosigma</i> sp.	1				1	1	1	1
43						<i>Nitzschia pungens</i>	53	87	59	55	93	52	38	30
44						<i>Nitzschia longissima</i>	17	17	15	9	5	15	18	17
45						<i>Nitzschia</i> sp.	3	6	5	4	10	1	2	1
46						<i>Cylindrotheca closterium</i>	1	1	4	6	1	3	4	6
47						<i>Amphipora</i> sp.	1				1	1	1	1
48				ミドリムシ植物	ミドリムシ藻	エウトレブティア	<i>Eutreptiella</i> sp.	1	1			2		1
種類数					33	19	15	16	28	33	33	26		
個体数合計 (細胞/mL)					136	176	143	139	188	143	127	102		
沈澱量 (mL/L)					0.17	0.14	0.31	0.16	0.16	0.27	0.14	0.27		

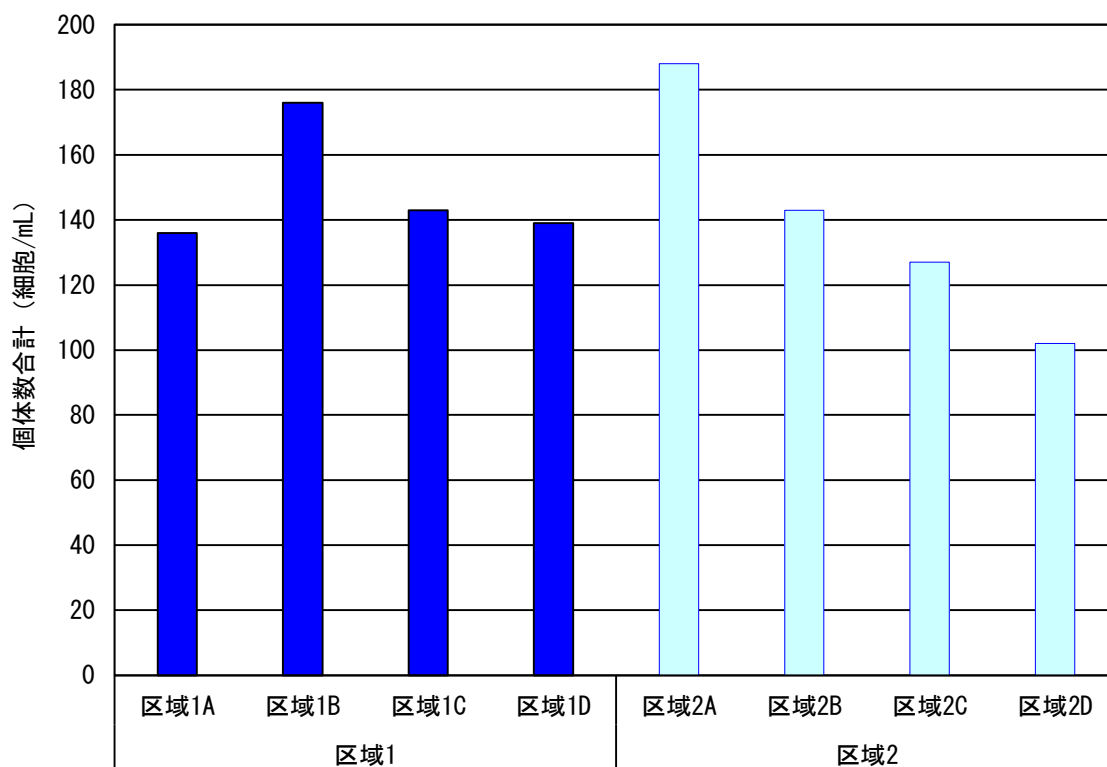
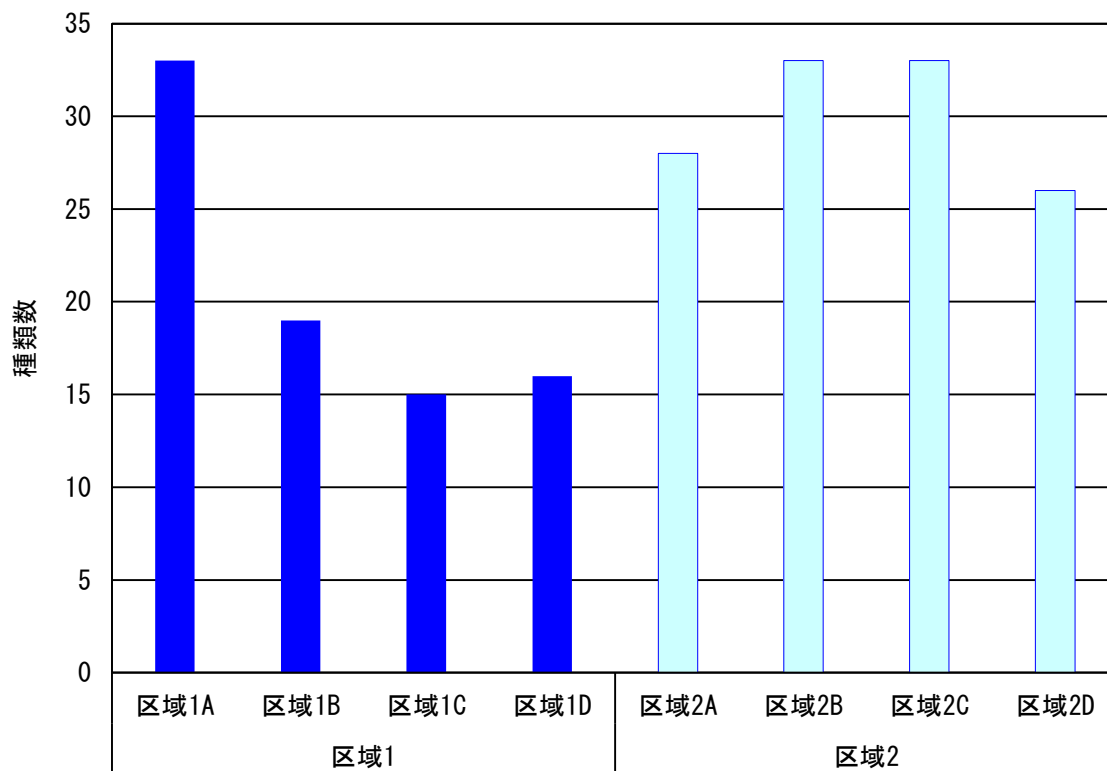


図-4.1.2 植物プランクトン分析結果図

## 4.2 餌料生物調査

餌料生物調査は、カルセラリーフでは餌料生物培養ユニットとして用いられている瓦 2 枚を、シーマークリーフでは同じく餌料生物培養ユニットとして用いられている石材 2 個を採取し、それらから付着餌料生物試料を採取し、分析した。

調査結果を表-4.2.1、図-4.2.1 に示す。

この結果、カルセラリーフ、シーマークリーフともに区域 1 の方が出現種数、個体数ともに区域 2 よりも多いことが確認できる。これは、区域 1 の方が先に施工されていることによる施工時期の相違から付着生物の付着状況が異なるものと考えられる。

表-4.2.1 餌料生物分析結果

No.	門	綱	目	科	種名	カルセラリーフ				シーマークリーフ			
						調査地点		調査地点		調査地点		調査地点	
						区域1	区域2	区域1	区域2	区域1	区域2		
						個体数	湿重量	個体数	湿重量	個体数	湿重量		
1	腔腸動物	ヒトロ虫	花カケ	イダウミドコ	Eudendridae	-	+	-	+				
2		花虫	イギンチャク	-	Actinaria			1	0.04				
3	環形動物	多毛	遊在	ウロムシ	Lepidonotus helotypos	1	0.03						
4					Lepidonotus sp.	1	+	3	0.06		1		
5					Harmothoe imbricata	20	0.07	4	0.03	8	0.06		
6					ゴカイ					1	0.01		
7					イヌ	6	0.02	2	0.01				
8			定在	スビオ	Polydora sp.					2	0.01		
9				カンザシヨカイ	Hydroides ezoensis	23	1.06	49	2.24	42	0.53		
10					Spirobranchus giganteus coronatus	98	4.27	84	3.43	35	0.70		
11	触手動物	苔虫	唇口	フサコムシ	Bugula neritina	-	0.03	-	0.02				
12		腕足	頂殻	盤殻	Discinisca sp.	133	5.32	35	0.84	2	0.05		
13	軟体動物	腹足	中腹足	カリハカサ	Crepidula onyx	23	26.01	23	34.21	21	9.45		
14			新腹足	アサギ	Bedevia birleffi						1		
15				トコロギ	Mirella bicincta	6	0.02	28	0.91	112	7.21		
16			腸紐	トウカクイ	Odosomia sp.	10	0.03				155		
17			側腕	ウミワカウ	Pleurobranchaidae					1	0.01		
18			二枚貝	フネガイ	Barbatia virescens	1	0.36	1	0.42				
19				イガイ	Mutilus galloprovincialis	10	0.64	6	1.36				
20					Modiolus agripetus	1	0.30	1	0.33				
21					Musculus cupreus	70	1.05	14	0.15	42	0.07		
22					Musculus senhousia					1	0.14		
23			ウガイイ	ミガイ	Limaria sp.	1	0.21	1	0.01				
24				イタヤ	Chlamys farreri nipponensis					1	0.19		
25				フミマカ	Anomia chinensis	3	8.26						
26				イホガキ	Crassostrea nippona	42	69.30	66	111.64	28	8.40		
27				コウワウ	Kellia sp.	13	180.23	34	423.89	2	2.21		
28						3	+			1	0.02		
29			オノガイ	キヌトガイ	Hiatella orientalis	112	6.09	36	2.94	91	3.71		
30	節足動物	甲殻	完胸	ツツ	Balanus trigonus	343	304.71	147	143.43	117	34.93		
31			十脚	クモカニ	Pugettia quadridens quadridens			2	0.06				
32				カケガニ	Pinnotheres sp.						1		
33	棘皮動物	蛇尾	海星	キトデ	Asterias amurensis					1	0.12		
34			閉蛇尾	チクモトデ	Ophiactis affinis	4	0.10	3	0.08	2	0.04		
35				トケモトデ	Ophiothrix exigua					1	0.21		
36	原索動物	尾索	鰓性	アサギ	Ascidia zara	1	0.61						
37				イサ	Ciona savignyi	14	11.97	2	1.78	3	4.38		
38			壁性	スチ	Styela canopus	1	0.21			1	0.14		
39					Styelidae					1	0.12		
40				ヒウ	Pyura sacciformis	4	0.94	1	0.31				
						種類数	28	22	25	16			
						合計	944	621.84	542	728.15	517	72.75	

注：個体数の - は計数不能を、湿重量の + は0.01g未満を示す。



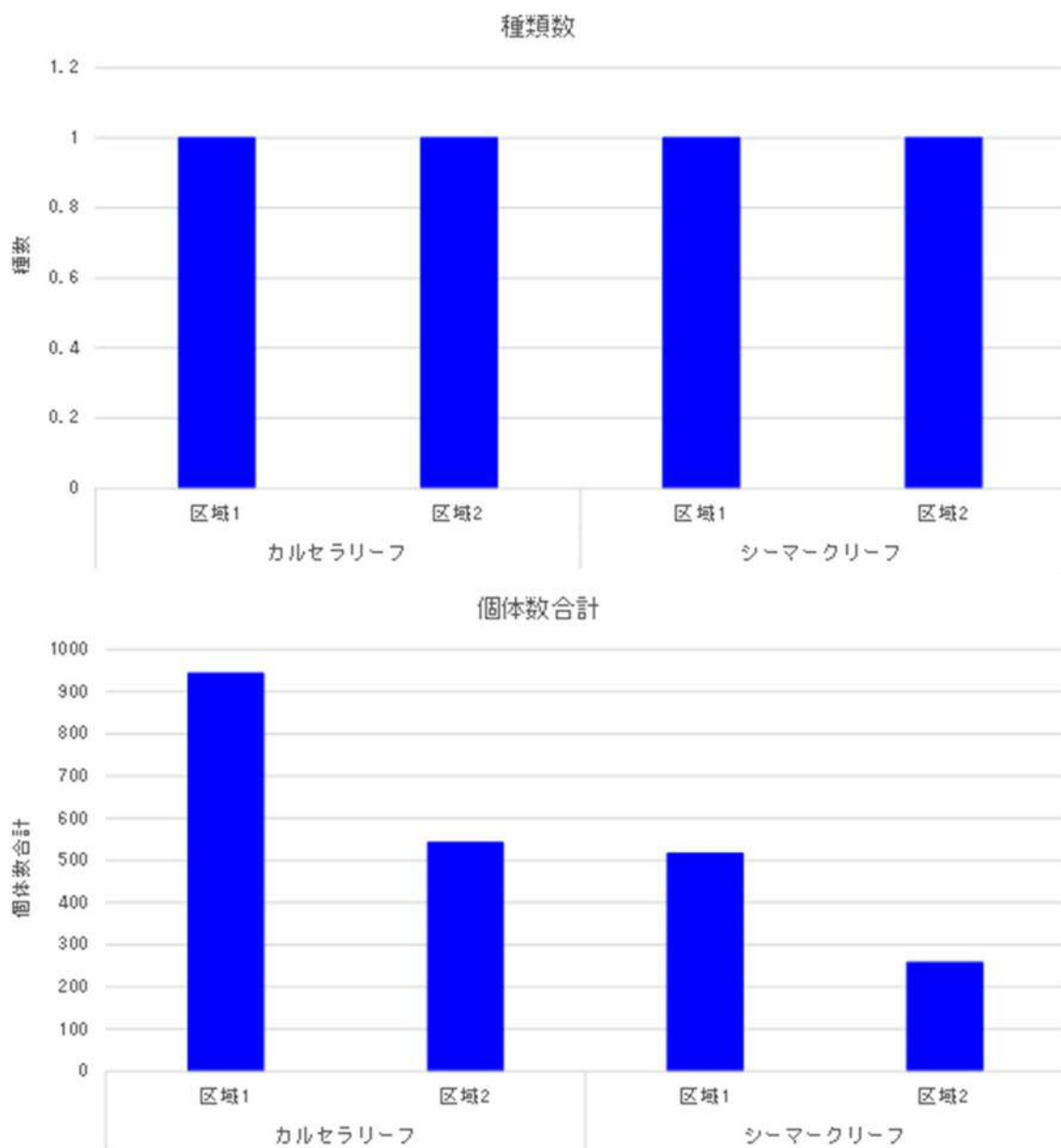


図-4.2.1 餌料生物分析結果図

### 4.3 生物蛸集状況調査

潜水士による生物蛸集状況調査結果を表-4.3.1 に示す。また、調査状況写真を写真-4.3.1 に示す。さらに、魚類蛸集場所と構造物の関係を模式的に示した図を図-4.3.1 に示す。

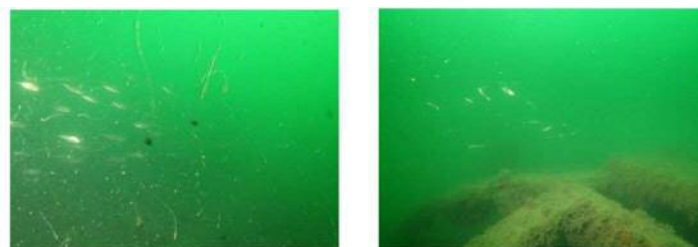
表-4.3.1 生物蛸集状況調査結果

区域1	カルセラリーフ		攪拌ブロック		シーマークリーフ	
	尾数	全長 (cm)	尾数	全長 (cm)	尾数	全長 (cm)
マアジ					100<	12
ハゼ科					3	10

区域2	カルセラリーフ		攪拌ブロック		シーマークリーフ	
	尾数	全長 (cm)	尾数	全長 (cm)	尾数	全長 (cm)
マアジ			100<	10~12	80	12
ハゼ科			2	10		

※-は魚類が確認されなかったことを示す。



確認された魚類蛸集状況（左：区域1シーマークリーフ・右：区域2シーマークリーフ）

写真-4.3.1 生物蛸集状況調査結果

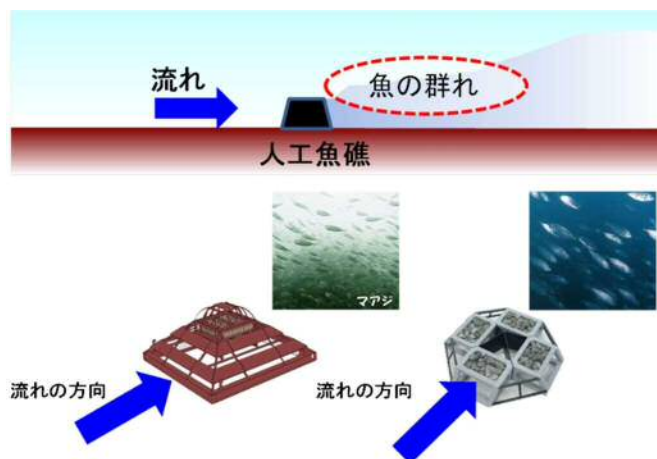


図-4.3.1 目視観察時生物蛸集場所模式図

この結果、調査時には、両区域におけるシーマークリーフ構造物および、区域 2 における攪拌ブロック構造物周辺でマアジの魚群が確認された。その他は、区域 1、区域 2 のそれぞれ同様の構造物周辺でハゼ科の魚類が確認された。

確認された魚種は少なかったものの、構造物周辺で魚類が蛸集している状況は確認された。

ここで、本研究とは異なるが、大阪府が同日に実施した魚類蛸集状況調査（効果調査）結果を表-4.3.2 に示す。その結果、この調査時にはマアジ等の魚群は確認されなかったものの、有

用魚類であるキジハタの他、ウシノシタ科、アナハゼ、カサゴ、マアナゴ、ハゼ科、マダコが確認されている。

これらのことから、本研究で対象としている構造物は十分に魚類溜集効果を発揮しているものと考えられる。

表-4.3.2 大阪府による生物溜集状況調査結果表

区域1	カルセラリーフ		攪拌ブロック		シーマークリーフ	
	尾数	全長 (cm)	尾数	全長 (cm)	尾数	全長 (cm)
キジハタ	1	15	-	-	1	10
ウシノシタ科	-	-	-	-	1	10
アナハゼ	-	-	-	-	15	7

区域2	カルセラリーフ		攪拌ブロック		シーマークリーフ	
	尾数	全長 (cm)	尾数	全長 (cm)	尾数	全長 (cm)
カサゴ	1	5	-	-	1	6
マアナゴ	-	-	-	-	2	45
ハゼ科	7	4	-	-	7	15
マダコ	-	-	-	-	1	25

※-は魚類が確認されなかったことを示す。

## 4.4 流動制御と生物蛸集機能の関係

### 4.4.1 構造物による漁場造成

大阪府の漁場環境整備事業は、21,791t（平成 18～22 年の平均漁獲量）の漁獲量を 22,881 トン（5%増）にすることを目指している<sup>1)</sup>。図-4.4.1 に示すように、漁獲量は、昭和 57 年の 114,000t をピークに減少し、近年は概ね 20,000t 前後で推移している。

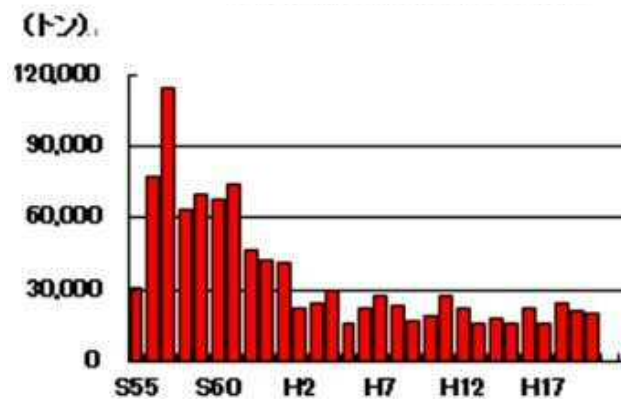
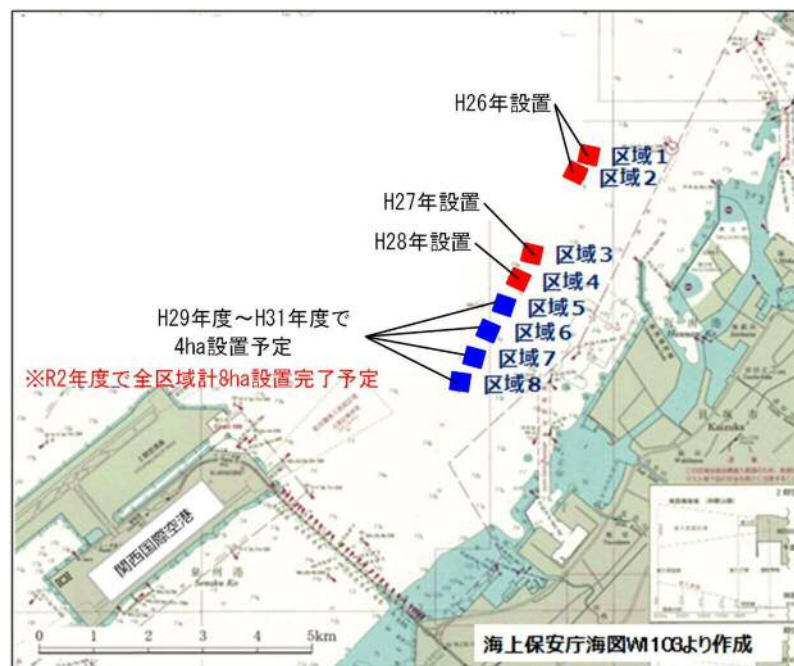


図-4.4.1 大阪湾における総漁獲量の推移

そこで、大阪府は構造物設置場所を造成することで、効果を増大させることに期待した。

平成 27 年に大阪府岸和田市沖に構造物を設置し、漁場を 1ha 造成した。さらに、令和 2 年度末までに残り 4ha の漁場造成を予定している。設置場所および設置予定場所を図-4.4.2 に示す。



#### 4.4.2 構造物設置の有無による流速の変化

平成 25 年度の調査で得られた区域 1 における流速鉛直分布を図-4.4.3 に示す。

対照区は、魚礁区に比べ流速が低く、海面近傍から海底近傍までの間で大きな差はみられなかった。一方で、試験区での流速分布は、海面近傍で 15 cm/s～20 cm/s 程度の流速を最低値とし、水深 2 m 付近から海底面方向に急激に増加したのち、水深 10 m 付近で流速が低くなっていくことがわかった。このことから、設置された構造物により後方で強い上昇流が発生していると考えられる。

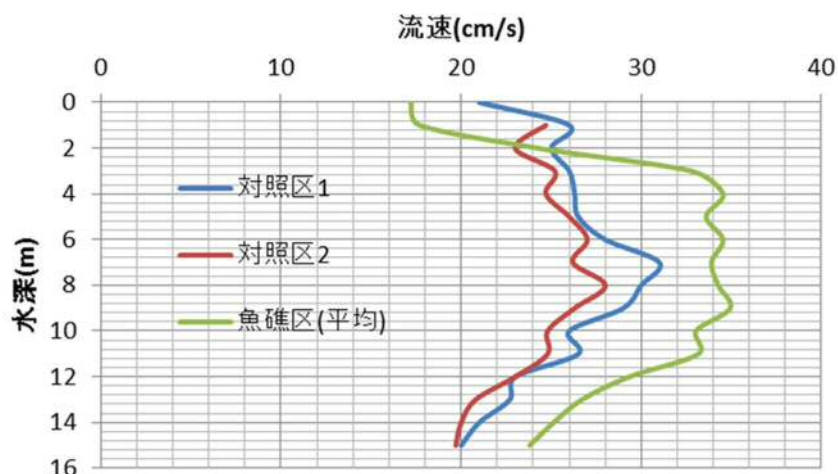


図-4.4.3 流速の鉛直分布 2013.6.3

平成 28 年の区域 1 における全窒素の鉛直分布調査結果を図-4.4.4 に示す。

対照区における栄養塩の鉛直分布は、海面近傍と海底近傍の間に大きく差が生じていることがわかる。これは、海水が鉛直混合されておらず、水深によって偏りが発生していると考えられる。一方で、試験区では海面近傍から海底近傍までに栄養塩の値は大きな差がないことから、構造物による海水の鉛直混合が促進されていると考えられる。

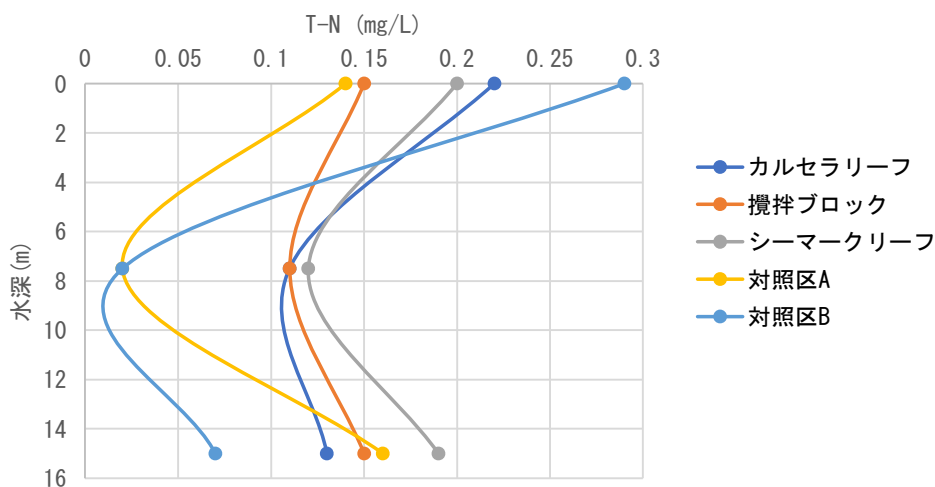


図-4.4.4 全窒素の鉛直分布 平成 28 年度

#### 4.5 漁獲量の変化

平成26年から構造物を設置し始め、平成28年時点では4haの漁場造成を竣工している。ここで、大阪湾の漁場造成海域近辺における漁況通報<sup>1)</sup>を図-4.5.1に示す。過去3年のデータを比較すると、ピークにずれが見られるものの、1年を通して漁獲量は増加傾向にあると言える。

サワラやマダイ等の漁獲量は、過去2年の漁獲量と比較すると減少しているが、平年値を大きく下回るものは確認されなかった。

第4章3節生物蛸集状況調査において、構造物後方に生物蛸集効果が確認されている。さらに、図-4.4.3からも確認できるように、構造物後方で強い上昇流が発生していること、図-4.4.4からわかるように、攪拌機能を有する構造物は栄養塩等を攪拌し、流動制御機能を発揮していることがわかっている。

以上のことから、漁場造成による生物蛸集効果が漁獲量の増加に影響したと考えられる。

また、より漁場環境を改善するためには、漁場造成は不可欠であり、今後も造成による成果が期待されると考えられる。

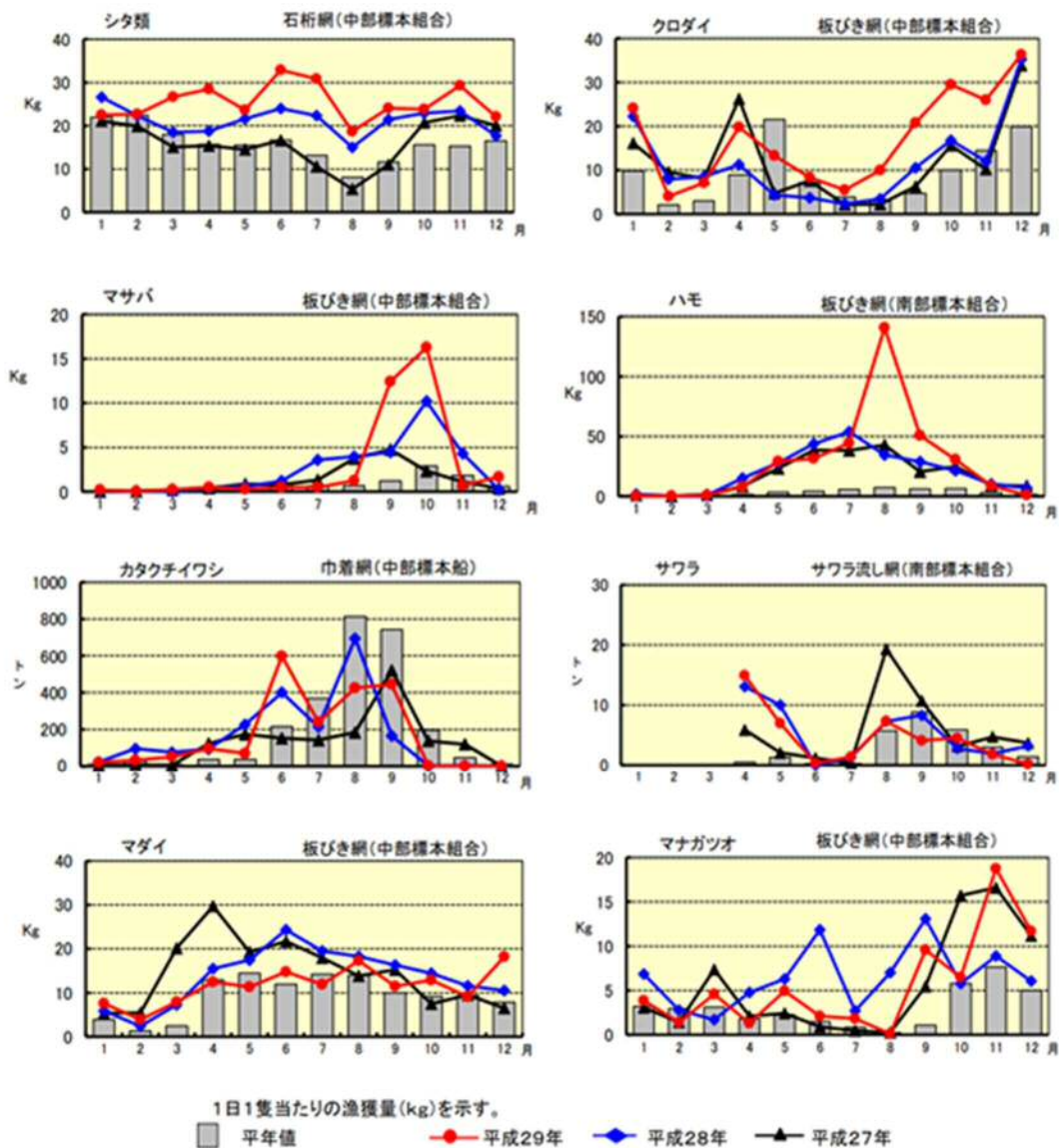


図-4.5.1 大阪湾漁況通報（平成29年12月）<sup>1)</sup>



#### 4.6 生物蛸集状況の定量的評価

本研究において、ADCP と濁度計を組み合わせ、構造物周辺における流れを可視化する手法を開発した。ここでは、前述の機器に加え、調査時において同時に観測された魚探映像を組み合わせ、構造物による流動制御と生物蛸集状況の具体的な図を作成した（図-4.6.1 参照）。なお、濁度コンタ図は、図-2.5.9(3)と同様のものである。

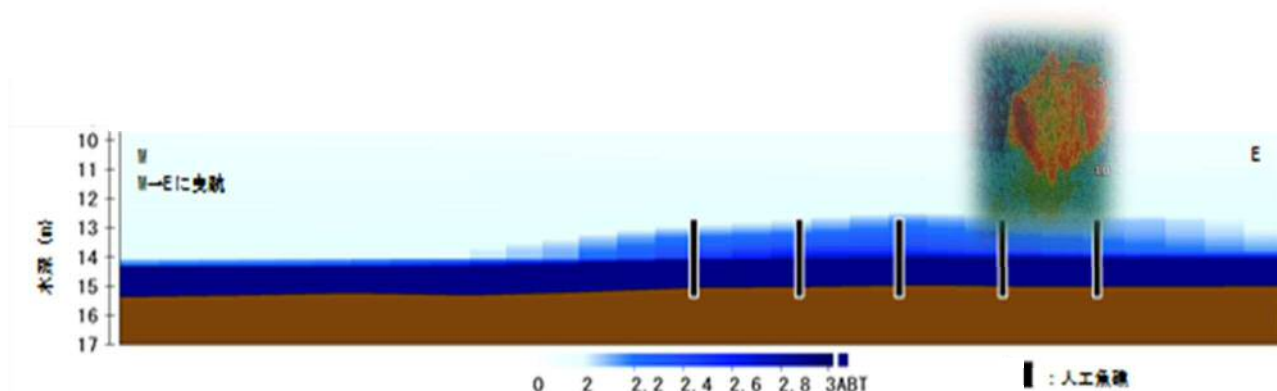


図-4.6.1 区域1における濁度コンタ図と魚探映像

図-4.6.1 に示すように構造物周辺で流れが鉛直方向に攪拌されており、その地点で魚探が魚群を確認している。さらにこのとき、潜水土による目視観測が行われ、マアジ2,000尾程度が確認された。

このことから、図-4.6.1 に示す魚探映像は、潜水調査結果から魚類(マアジの群れ)約2000尾であるという評価をすることができた。また、構造物による攪拌機能により、構造物天端から1m程度巻き上げ効果があれば、魚類が2000尾程度は蛸集可能であるということが示唆された。

#### 4.7 生物蛸集状況調査手法の一提案

人工魚礁を設置すると、設置魚礁の効果として、整備魚礁による生物蛸集効果が評価項目となることが多い。しかしながら、現在、この蛸集状況の調査は、潜水土による目視調査、水中定点カメラで1昼夜程度の調査で実施しているケースが多い。

この手法では、点のデータにしかならず、調査時にたまたま目視されたという偶発の可能性が否めない。生物の中には、夜行性のものも存在することから、現在の手法では十分に評価が行われているのかが懸念される。

したがって、筆者は、定点連続観測が必要であると考えます。

現在、蛸集効果を定量的に評価する方法として、「音響による魚礁蛸集効果評価ガイドライン」(社)マリノフォーラム21)が定められているが、記載されている手法は非常に困難であり、高価な機材等や高度な知識が必要である。

そこで、目視レベルの調査と同程度のデータを取得できる手法として、簡易魚探と水中ドローンによる調査を組み合わせた調査手法を提案する。調査手法の概念図を図-4.7.1に示す。

本手法は、前節で示した魚探画像と目視結果を照合させることで、魚探の反応を定量評価する手法と同様である。前節で示した手法は、船舶搭載魚探をベースとしているが、本手法は、¥40,000程度の釣り用簡易魚探を用いて、この取得データを活用する手法である。

前節の手法は、船舶搭載魚探であることから、魚探映像をデータとして取り込むには写真等で残すことになるが、本手法の魚探データは、Wifi を通じて Ipad 等の操作端末のアプリ内に保存されるので、データとして後々活用しやすい。

前節の手法と比較すると、デメリットは簡易魚探であることから精度的な面では船舶搭載魚探に比較すると低下することである。しかしながら、小型であり運搬が自由であり、操作が容易であることから、様々な場面での使用が可能である。

本手法は、現状、構想段階であり、現地試験等が不十分であるが、今後の様々な場面でテスト等を行い、参考データを収集し、今後活用できるようにしていくことを検討している。

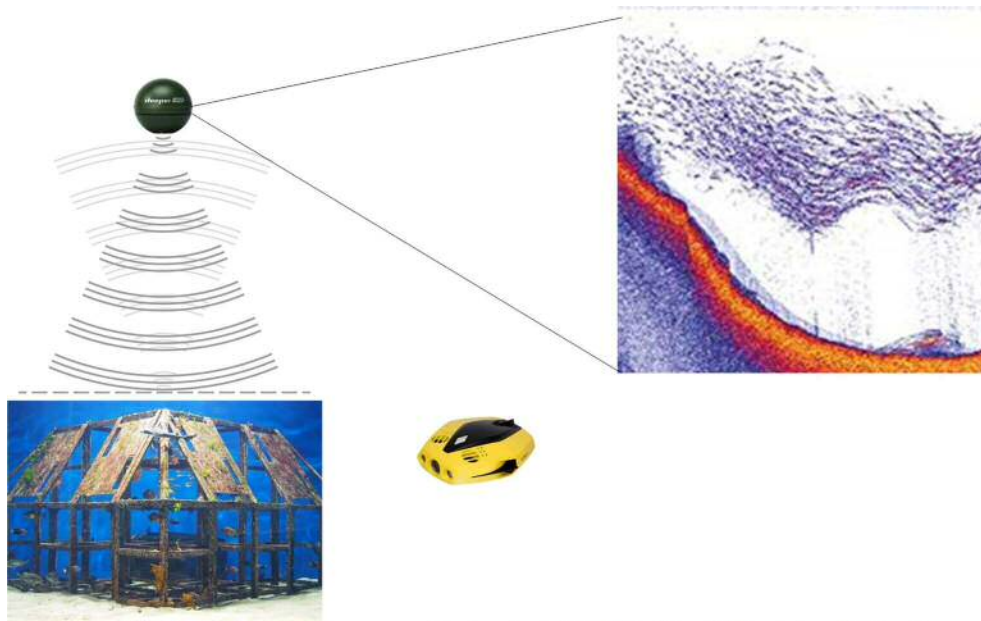


図-4.7.1 簡易魚探と水中ドローンを用いた魚類蝟集状況調査手法の調査イメージ

**【第 4 章参考文献】**

- 1) 大阪府立環境農林水産総合研究所：平成 29 年 12 月漁況通報，[https://www.kannousuiken-osaka.or.jp/\\_files/00077910/h2707.pdf](https://www.kannousuiken-osaka.or.jp/_files/00077910/h2707.pdf)
- 2) Yasuoka, K., Suenaga, Y., Yamanaka, M., Hoshino, T., Kakegawa, H. and Ahn, H : Study on the Porous Material for Improvement of Marine Biological Environment, Recent Advances in Marine Science and Technology 2006, 8, No.1, pp.53-62, 2006

## 第5章. 人工魚礁の消波性能に関する検討

人工魚礁には、湧昇流発生、流れ環境の改善、渦流発生等による物理的機能、この物理機能に伴う栄養塩の共有、海水の攪拌等の環境改善効果、生物蛸集、生物生息場の形成等の生態的機能が求められる。また、人工魚礁は、陸上で作成され、これを台船等で運搬し、海底に沈設することが一般的であり、配列等が容易である。

近年、漁港の防波堤等の沿岸構造物が、底生生物の生息場として機能しているという事例は、数多く報告されている。消波堤等を建設する際、設計外力を大きくすれば、施設規模も大きくなり建設費が高騰する。しかしながら、これらに人工魚礁を用いれば、積み上げ、配列等も容易であり、設置後には環境改善機能、生物環境の形成等がもたらされる。本章では、これらの点に着目し、人工魚礁の消波機能について検討を行った。

### 5.1 人工魚礁の高機能化

我が国の水産基盤整備事業のための施策の一つとして、人工魚礁設置による漁場造成が実施され、瀬戸内海でも資源回復の兆しを見せている。しかし、近年の水産基盤整備事業では、漁場造成のみならず漁港、沿岸域における防災対策事業が大規模になっており、特に人工魚礁の有する防災機能については、これまで定量的な評価が乏しいのが現状である。

このような背景から本章では、人工魚礁設置海域における「既施設としての高度利用」・「これまでにない人工魚礁の高機能化」を実現し、瀬戸内海の強靱化を目的とした技術開発を行うこととした。

人工魚礁の従来の目的は生物蛸集機能を高め、生産力を向上させることであったが、海底に設置されることによる波浪制御機能がありながら、それを利用した防災施設としての評価はほとんどされていない。

本研究では、水理実験により実海域を想定した不規則波中における魚礁構造物前後の反射波、透過波を測定し、波浪エネルギーを40%以上吸収させ、既設の潜堤、海底マウンド等と同等の波浪制御機能を有することを目標にして、人工魚礁の防災施設としての有効性を検討した。

### 5.2 人工魚礁の消波機能実験

既設の潜堤、海底マウンド等と同等の波浪制御機能を有する人工魚礁の最適配置を検討するために、実際の人工魚礁が設置されている水深4~6mの海域を想定して、図-5.1に示す1/33スケールの人工魚礁の模型を使用し、水理模型実験を以下の手順で行った。

- 1) 図-5.2のように開水路内に人工魚礁の模型を配置する。
- 2) 模型の前面に入射波、反射波用の波高計を設置し、背面には透過波用の波高計を設置する。また、入射波用と反射波用の波高計の間隔は入射波長の1/4の長さになるように配置する。実験の概要図を図-5.3に示す。
- 3) 造波装置を使用して有義波高が瀬戸内海で発生する波の高さに合うように波を発生させる。
- 4) 反射波高、透過波高を測定する。
- 5) 構造物の列数を2列、3列と増やしていく。
- 6) 取得したデータの解析、実験結果の考察を行う。
- 7) 対象海域の波浪条件に対する実機構造物の設計法を提案する。

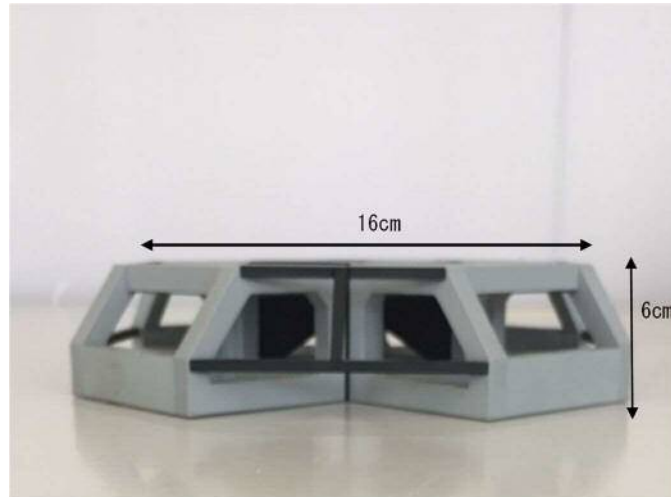


図-5.1 人工魚礁模型 (1/33 スケール)



図-5.2 実験の際の人工魚礁配置例

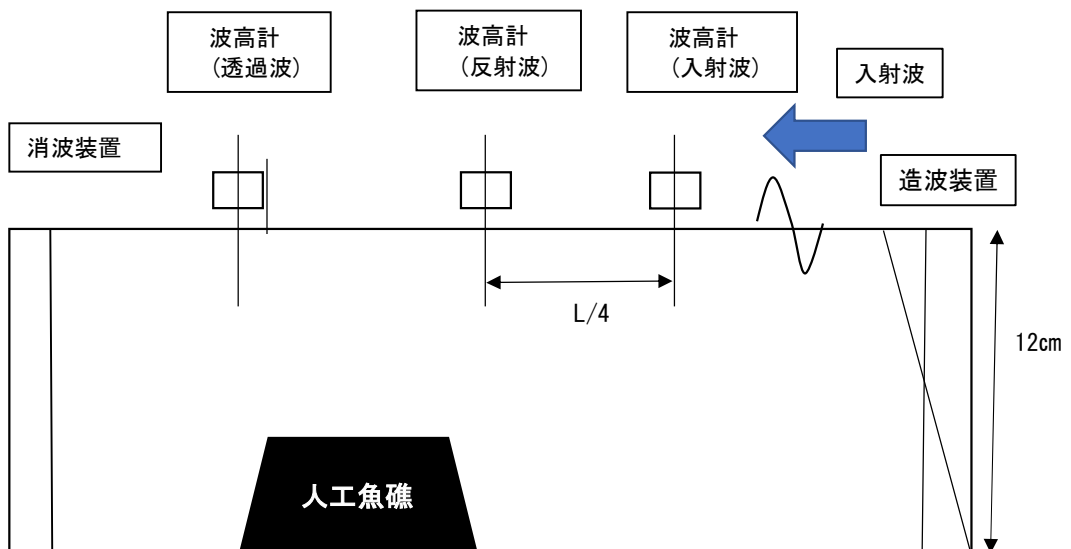


図-5.3 消波性能実験概要図

### 5.3 解析方法

実海域の波は不規則波であり、波高、周期が一定でないために解析方法は多数存在する。

本研究では、解析が比較的容易で一般的によく用いられているゼロアップクロス法を採用した。実際の解析方法としては、実測データを用意し、縦軸に水位、横軸に時間を取る。このとき、横軸は平均水位との差を取る。実測データを用意し、平均水位との差を取った後に、平均水位を切り上がる点（ゼロアップクロス点）を探し、次のゼロアップクロス点までを一つの波とする。個々の波ごとの周期、波高を求める。同様の作業を繰り返し、実測データの全てを個々の波に分解した後に、波高と周期を平均する。これをそれぞれ平均波高、平均水位と呼ぶが、一般的に波高は平均で表されることは少なく、有義波高で表される。

個別に分解した波のうち波高が大きい方から数えて全体の波数の 1/3 を選び出したものを有義波という。有義波の波高を平均したものを有義波高といい、周期を平均したものを有義周期という。実験より得られた有義波高、有義周期を用いて式(5.1)～(5.6)により波のエネルギースペクトルを求めた。波のスペクトルは、角周波数  $\omega$  の関数として  $S_j(\omega)$  と表記し、通常、 $\omega \geq 0$  で定義されるスペクトルが用いられる。本実験で用いた ISSC スペクトルは、有義波高  $H_{1/3}$  と有義周期  $T_{1/3}$  だけで表現される。

$$S_j(\omega) = H_{1/3}^2 \cdot (173/T_{1/3}^4) \cdot \omega^{-5} \cdot \text{EXP}[(-691/T_{1/3}^4) \cdot \omega^{-4}] \quad (5.1)$$

不規則波中におけるエネルギー吸収効率は(5.2)～(5.4)式によって求めることができる。

$$\eta = \frac{P}{E_{irr}} \quad (5.2)$$

$$E_{irr} = \int 1/2 \rho g \cdot [\sqrt{2S(\omega)} d\omega]^2 \cdot V_g(\omega) \quad (5.3)$$

$$P = \int 1/2 \rho g \eta(\omega) \cdot [\sqrt{2S(\omega)} d\omega]^2 \cdot V_g(\omega) \quad (5.4)$$

ここで、 $E_{irr}$ ：不規則波の持つ全エネルギー、 $P$ ：吸収エネルギー

$V_g(\omega)$ ：その周波数の波の群速度、

$\eta(\omega)$ ：その周波数における規則波中のエネルギー吸収効率

また、式(5.5)、式(5.6)中の群速度  $V_g$  次式によって求めることができる。

$$V_g = \frac{V}{2} \left( 1 + \frac{2kh}{\sinh 2kh} \right) \quad (5.5)$$

$$V = \frac{gT}{2\pi} \left\{ 2\pi \sqrt{\frac{h}{gT^2}} \left( 1 + \sqrt{\frac{h}{gT^2}} \right) \right\} \quad (5.6)$$

縦軸にエネルギースペクトル，横軸に角周波数を取り，グラフを作成し，消波性能について検討する。

エネルギー吸収効率は，1 から魚礁前面と背面のエネルギースペクトルの面積比を差し引いて求めた。



## 5.4 実験結果

香川大学創造工学部の水理実験装置で人工魚礁の模型を使用し、消波実験を行った。表-5.1 は各パターンの有義波高，有義周期をまとめたものである。本実験では 2000 個の波の水位変化から有義波高，有義周期を求めた。

求めた有義波高，有義周期を式(5.1)に代入してエネルギースペクトルを求め，図-5.4～図-5.7 を作成した。吸収効率はエネルギースペクトルの面積の比を 1 から引いて求めた。

### 5.4.1 実験結果(人工魚礁 1 列)

図-5.4～5.7 は人工魚礁 1 列で実験を行った際の消波実験の角周波数とエネルギースペクトルの関係である。

表-5.1 人工魚礁 1 列の時の有義周期，有義波高

	有義周期(sec)	有義波高(cm)
パターン1(上流側)	0.75	3.22
パターン1(下流側)	0.74	3.09
パターン2(上流側)	1.12	6.23
パターン2(下流側)	1.11	6.21
パターン3(上流側)	0.52	2.68
パターン3(下流側)	0.49	2.59
パターン4(上流側)	0.64	4.23
パターン4(下流側)	0.62	4.01

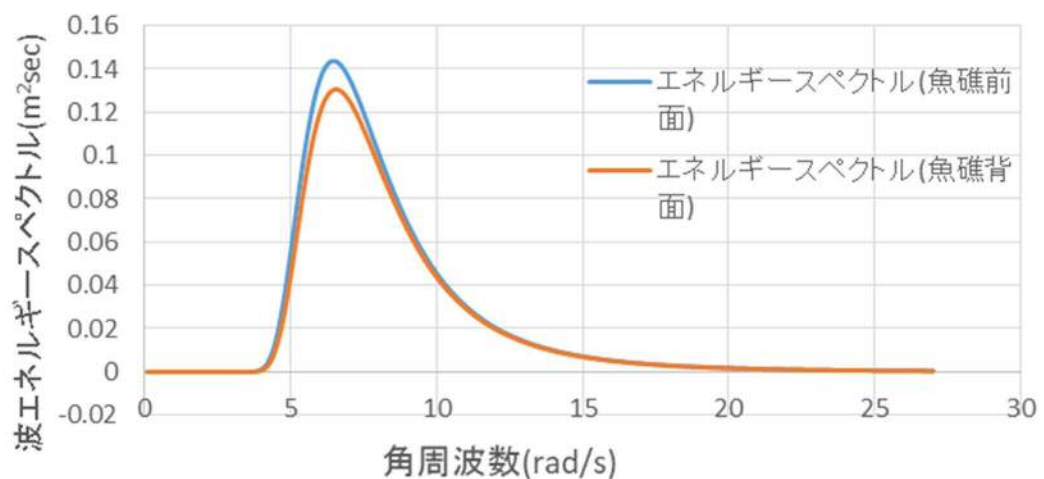


図-5.4 構造物 1 列の時の波エネルギースペクトル (パターン 1)

上流側の有義周期が 0.75sec，有義波高が 3.22cm，下流側の有義周期 0.74sec，3.09cm の時のエネルギー吸収効率は 7.93% となった。

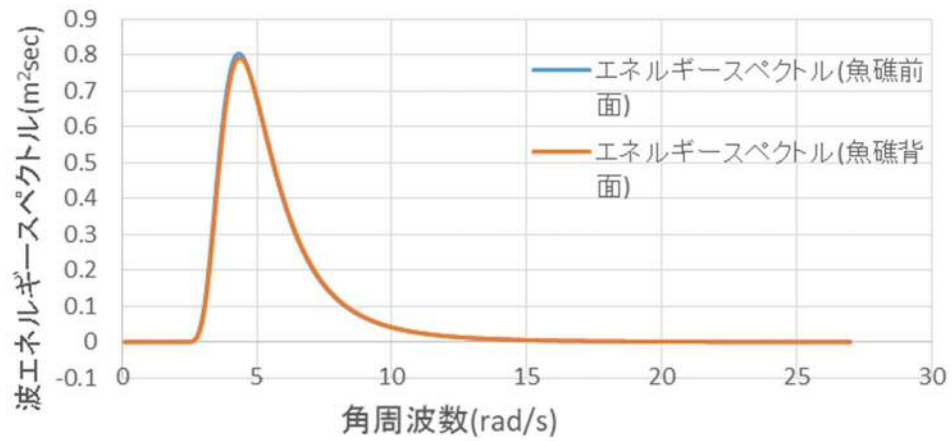


図-5.5 構造物 1 列の時の波エネルギースペクトル (パターン 2)

上流側の有義周期が 1.12sec, 有義波高が 6.23cm, 下流側の有義周期 1.11sec, 6.21cm の時のエネルギー吸収効率は 0.64% となった。

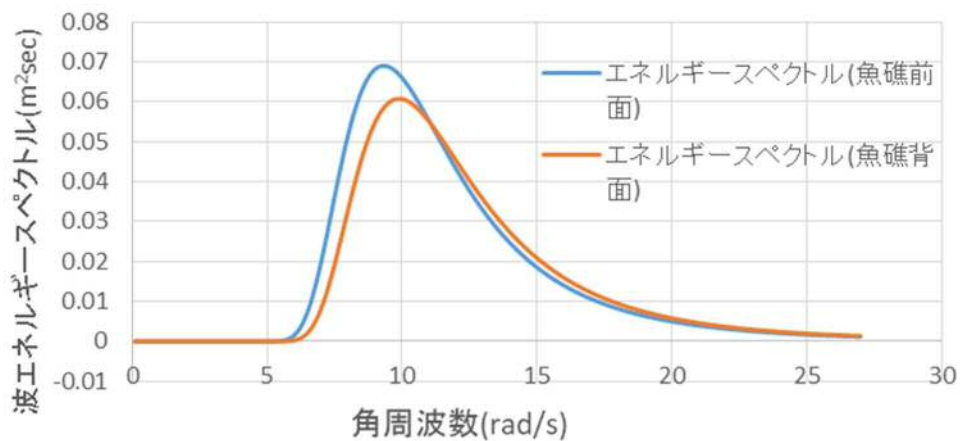


図-5.6 構造物 1 列のエネルギースペクトル (パターン 3)

上流側の有義周期が 0.52sec, 有義波高が 2.68cm, 下流側の有義周期 0.49sec, 2.59cm の時のエネルギー吸収効率は 7.04% となった。

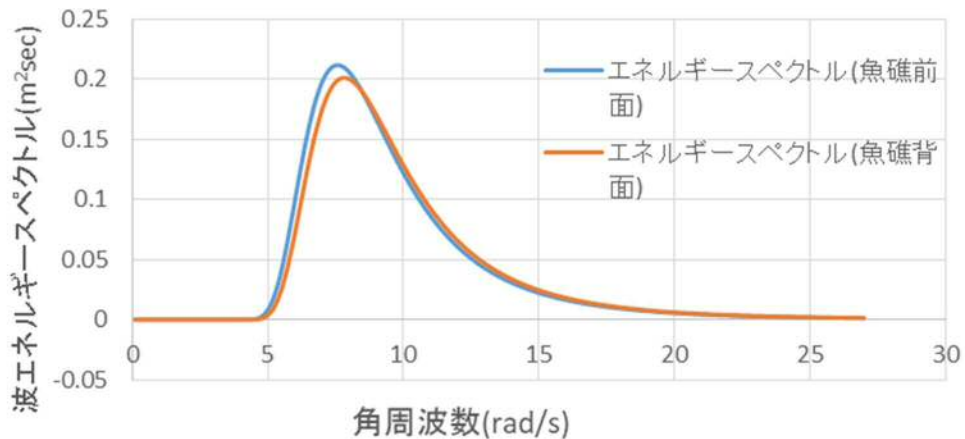


図-5.7 構造物 1 列のエネルギースペクトル (パターン 3)

上流側の有義周期が 0.64sec, 有義波高が 4.23cm, 下流側の有義周期 0.62sec, 4.19cm の時のエネルギー吸収効率は 1.98%となった。

1 列の時の人工魚礁前面と背面の波エネルギースペクトルの差は最大で 0.05m<sup>2</sup>sec ほどであり, 大幅な波エネルギースペクトルの減衰はできていない。構造物 1 列の時の最大の値は 7.93%, 最低の値は 0.64%と低い値であり, エネルギー吸収効率は低い。

#### 5.4.2 実験結果(人工魚礁 2 列)

人工魚礁 2 列の場合の実験結果を下に示す。図-5.8～図-5.11 は構造物 2 列で実験を行った際の消波実験の各周波数とエネルギースペクトルの関係である。

表-5.2 は各パターンの有義周期, 有義波高をまとめたものである。有義波高, 有義周期, エネルギー吸収効率は人工魚礁 1 列の時と同様の方法で求めた。

表-5.2 人工魚礁 2 列の時の有義周期, 有義波高

	有義周期(sec)	有義波高(cm)
パターン1(上流側)	0.75	3.22
パターン1(下流側)	0.72	2.46
パターン2(上流側)	1.12	6.23
パターン2(下流側)	0.98	5.97
パターン3(上流側)	0.52	2.68
パターン3(下流側)	0.47	2.51
パターン4(上流側)	0.64	4.23
パターン4(下流側)	0.61	4.01

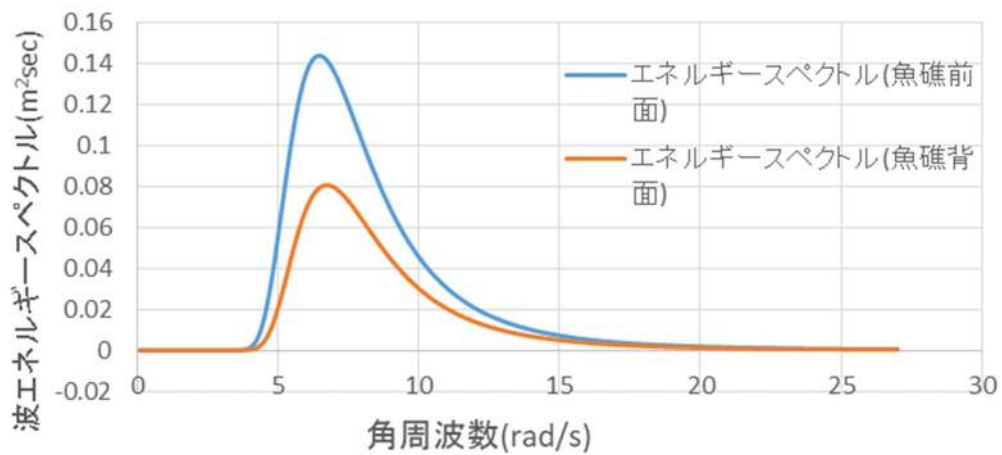


図-5.8 構造物 2 列の時の波エネルギースペクトル(パターン 1)

上流側の有義周期が 0.75sec, 有義波高が 3.22cm, 下流側の有義周期 0.72sec, 2.46cm の時のエネルギー吸収効率は 41.68%となった.

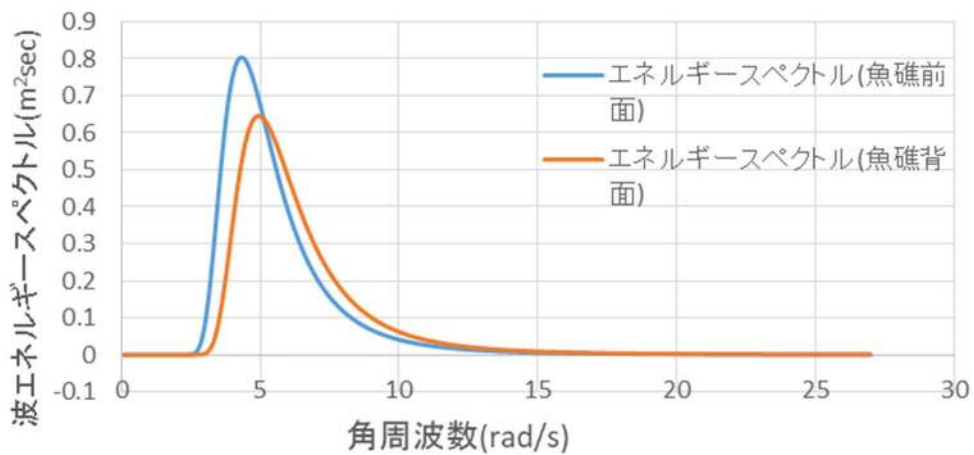


図-5.9 構造物 2 列の時の波エネルギースペクトル (パターン 2)

上流側の有義周期が 1.12sec, 有義波高が 6.23cm, 下流側の有義周期 0.98sec, 5.97cm の時のエネルギー吸収効率は 8.23%となった.

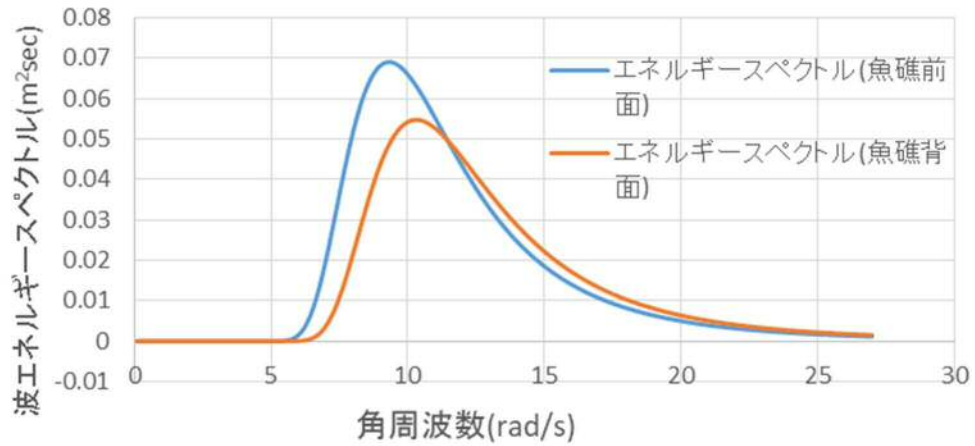


図-5.10 構造物 2 列の時の波エネルギースペクトル (パターン 3)

上流側の有義周期が 0.52sec, 有義波高が 2.68cm, 下流側の有義周期 0.47sec, 2.51cm の時のエネルギー吸収効率は 13.05%となった。

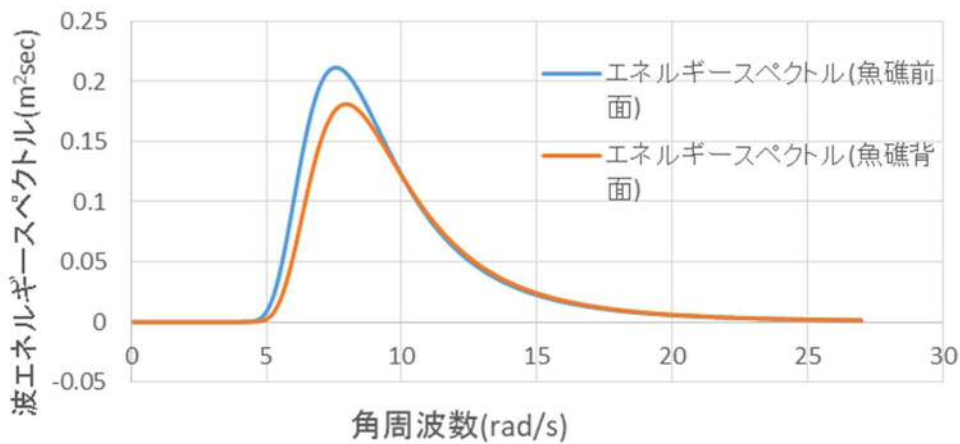


図-5.11 構造物 2 列の時の波エネルギースペクトル (パターン 4)

上流側の有義周期が 0.64sec, 有義波高が 4.23cm, 下流側の有義周期 0.61sec, 4.01cm の時のエネルギー吸収効率は 10.28%となった。

2 列の場合は, 人工魚礁前面と背面の波エネルギースペクトルの差は最大で 0.27m²sec ほどであり, 最低でも 0.06m²sec ほど波エネルギースペクトルを減衰できている。また, エネルギー吸収効率は最大で 41.68%, 最低で 8.23%となった。最大は 41.68%と高いが, パターン 1 以外ではエネルギー吸収効率が 10%程度であり, 実海域で活用するには十分な消波性能は期待できないと考えられる。

### 5.4.3 実験結果(人工魚礁3列)

人工魚礁を3列配置した場合の実験結果を下に示す。図-5.12～図-5.15は構造物3列で実験を行った際の消波実験の角周波数とエネルギースペクトルの関係である。

表5.3は各パターンの有義周期，有義波高をまとめたものである。有義波高，有義周期，エネルギー吸収効率人工魚礁1列，2列の時と同様の方法で求めた。

表-5.3 人工魚礁3列の時の有義周期，有義波高

	有義周期(sec)	有義波高(cm)
パターン1(上流側)	0.75	3.22
パターン1(下流側)	0.71	2.41
パターン2(上流側)	1.12	6.23
パターン2(下流側)	0.97	5.69
パターン3(上流側)	0.52	2.68
パターン3(下流側)	0.44	2.42
パターン4(上流側)	0.64	4.23
パターン4(下流側)	0.59	3.88

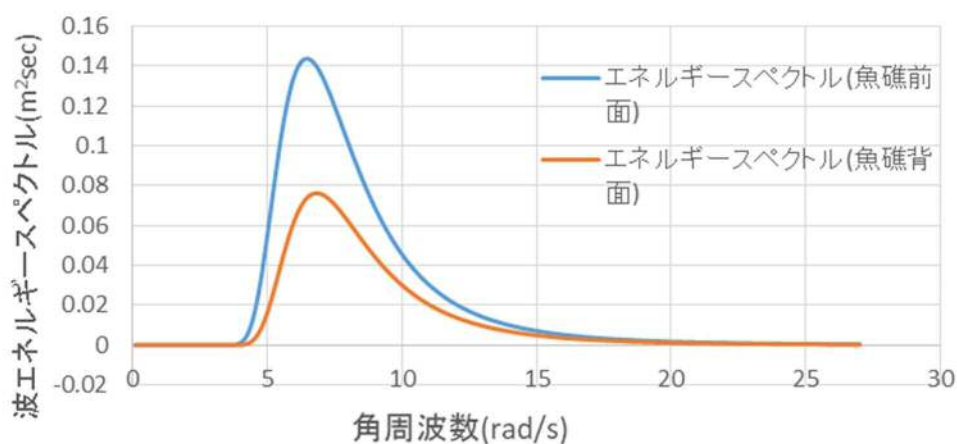


図-5.12 構造物3列の時の波エネルギースペクトル(パターン1)

上流側の有義周期が0.75sec，有義波高が3.22cm，下流側の有義周期0.71sec，2.41cmの時のエネルギー吸収効率は44.04%となった。

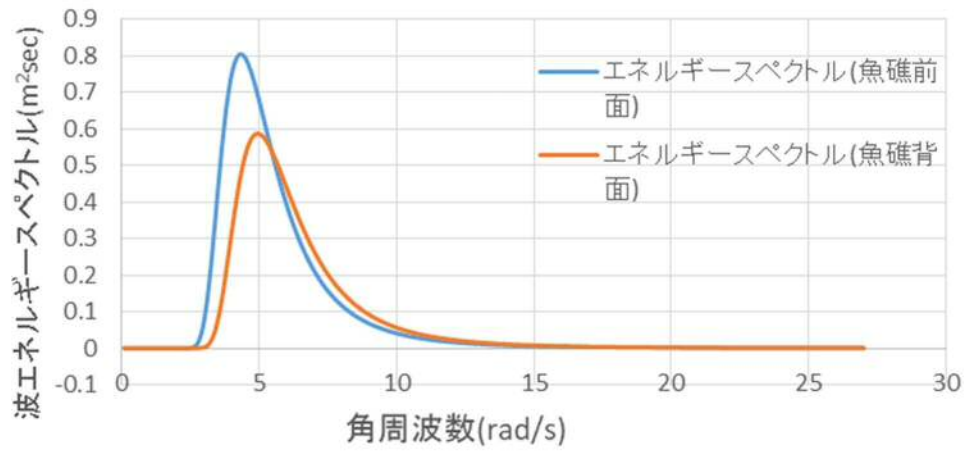


図-5.13 構造物 3 列の時の波エネルギースペクトル (パターン 2)

上流側の有義周期が 1.12sec, 有義波高が 6.23cm, 下流側の有義周期 0.97sec, 5.97cm の時のエネルギー吸収効率は 16.63%となった.

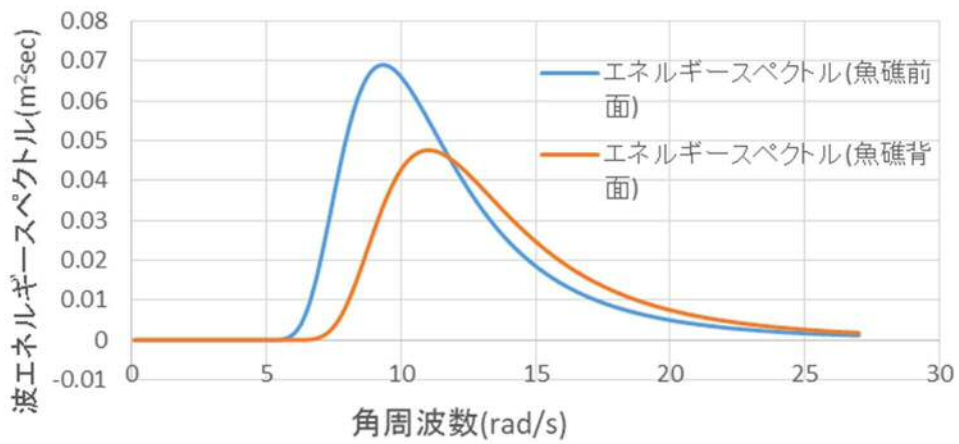


図-5.14 構造物 3 列の時の波エネルギースペクトル (パターン 3)

上流側の有義周期が 0.52sec, 有義波高が 2.68cm, 下流側の有義周期 0.44sec, 2.42cm の時のエネルギー吸収効率は 19.82%となった.



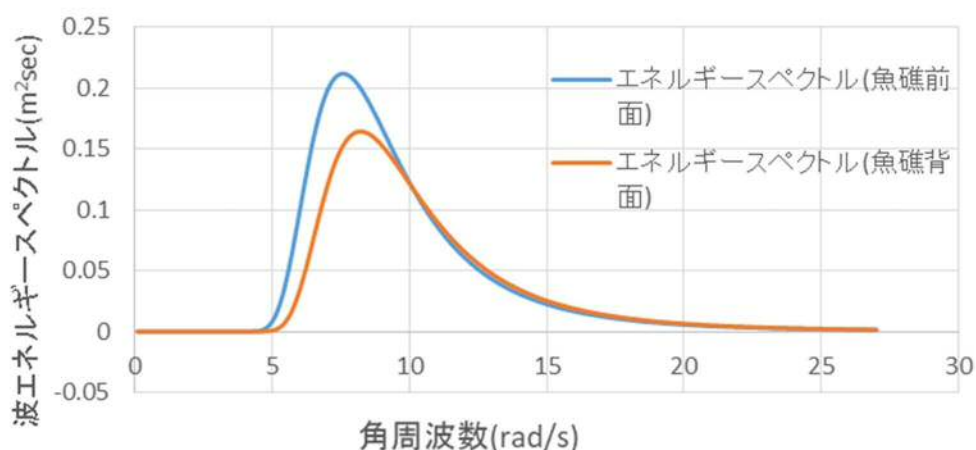


図-5.15 構造物 3 列の時の波エネルギースペクトル(パターン 4)

上流側の有義周期が 0.64sec, 有義波高が 4.23cm, 下流側の有義周期 0.59sec, 3.88cm の時のエネルギー吸収効率は 16.11%となった。

波エネルギーを最大で 0.40m<sup>2</sup>sec, 最低でも 0.09 m<sup>2</sup>sec ほどの波エネルギースペクトルを減衰している。また, 人工魚礁 3 列の時は最大で 40%以上, 最低でも 16%以上のエネルギーを吸収した。

表-5.4 は各パターンの上流側と下流側の波エネルギースペクトルの総量の差を示したものであり, 表-5.5 は各パターンのエネルギー吸収効率を表したものである。

表-5.4 波エネルギースペクトルの差

	1列	2列	3列
パターン1	0.05	0.27	0.28
パターン2	0.02	0.20	0.40
パターン3	0.03	0.06	0.09
パターン4	0.02	0.11	0.18

表-5.5 エネルギー吸収効率

	1列	2列	3列
パターン1	7.93	41.68	44.04
パターン2	0.64	8.23	16.63
パターン3	7.04	13.05	19.82
パターン4	1.98	10.28	16.11

## 5.5 考察

これまでの実験結果を基に人工魚礁の消波性能の特徴について考察し、実際の設計に必要な仕様を検討した。

- 1) 図-5.16～図-5.18 は横軸に上流側と下流側の有義波高の差、縦軸に吸収効率を取り、その関係を列ごとに示したものである。

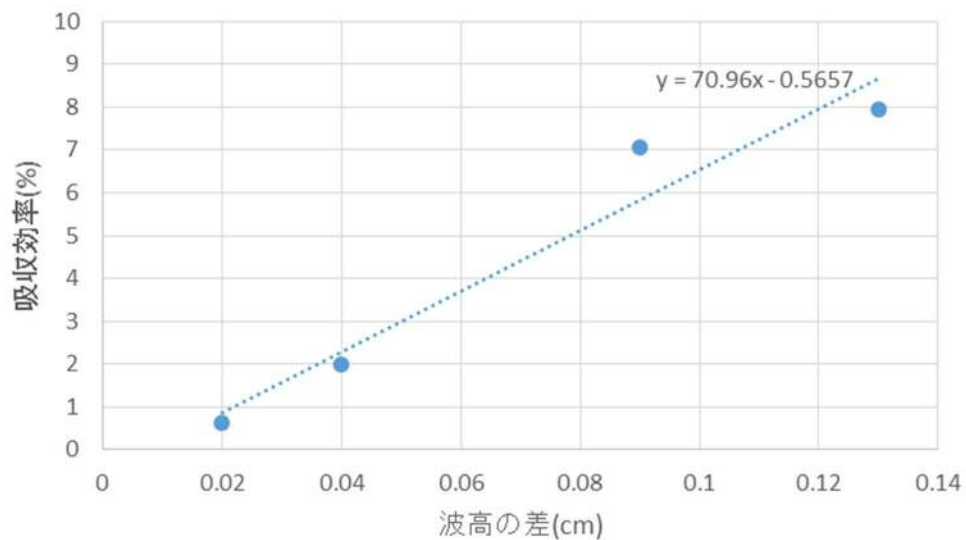


図-5.16 有義波高の差と吸収効率の関係(人工魚礁 1 列)

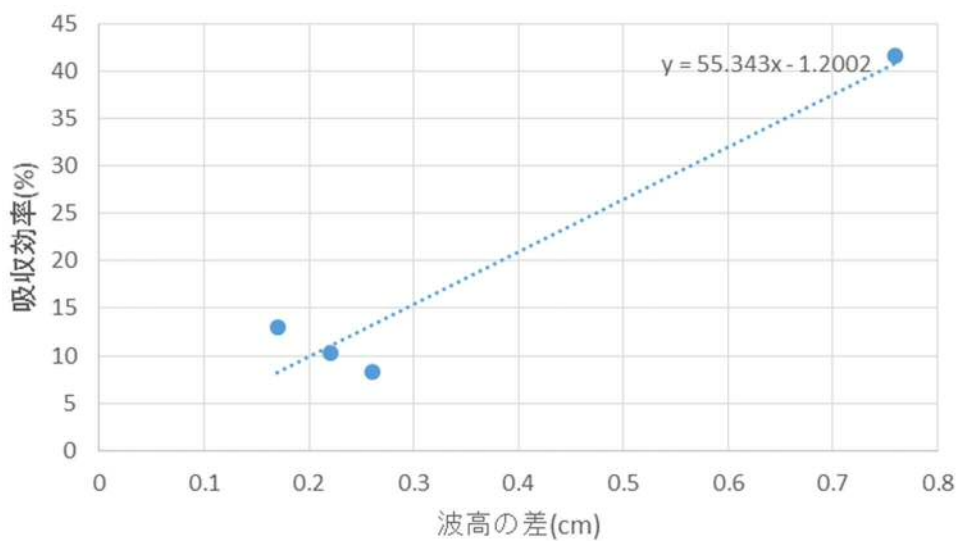


図-5.17 有義波高の差と吸収効率の関係 (人工魚礁 2 列)

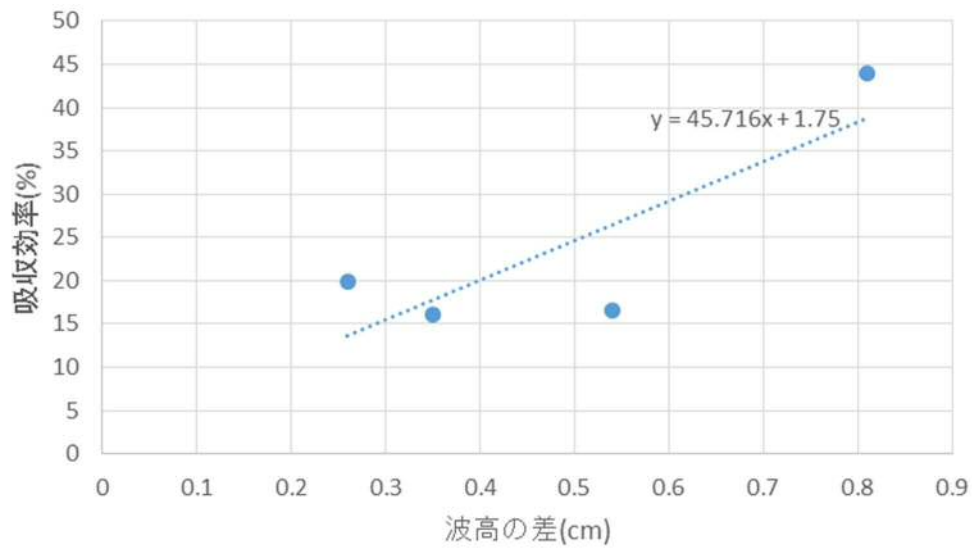


図-5.18 有義波高の差と吸収効率の関係(人工魚礁 3 列)

2) 図-5.19～図-5.21 は縦軸に吸収効率，横軸に上流側と下流側の有義周期の差を取り，その関係を示したものである。

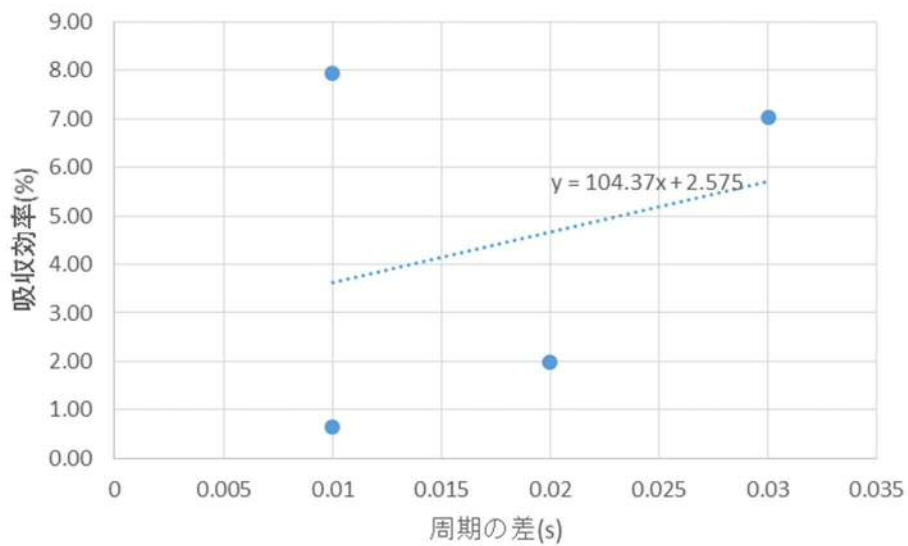


図-5.19 吸収効率と有義周期の差の関係(人工魚礁 1 列)

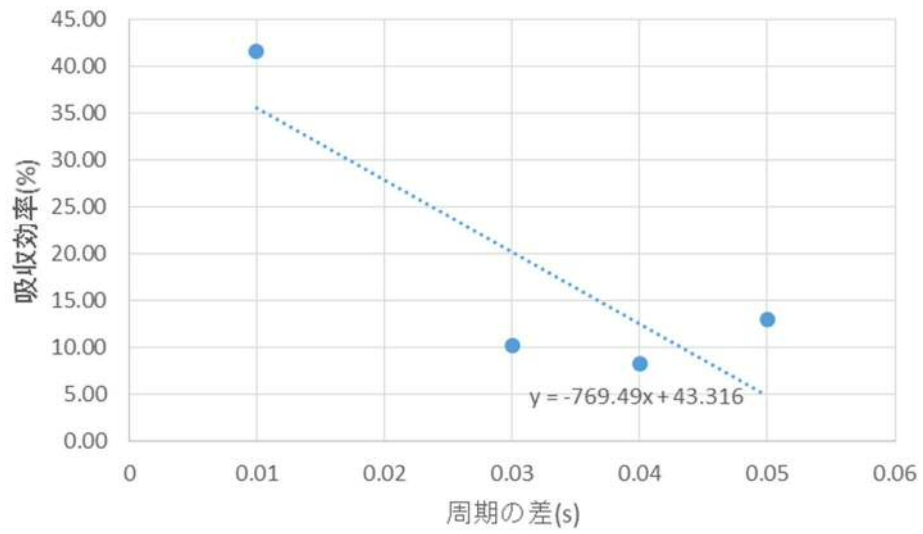


図-5.20 吸収効率と有義周期の差の関係（人工魚礁 2 列）

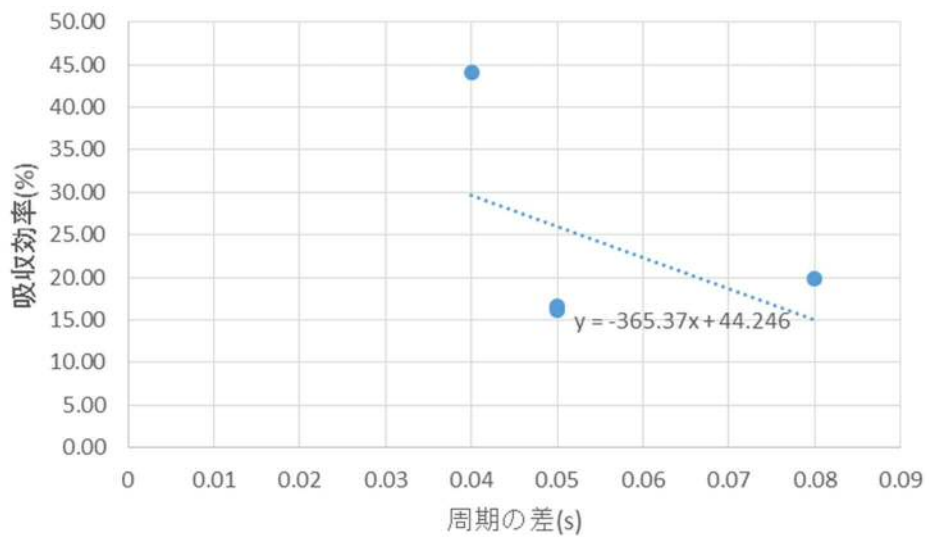


図-5.21 吸収効率と有義周期の差の関係（人工魚礁 3 列）

3) 図-5.22～図-5.24 は縦軸に吸収効率，横軸に有義波高を取り，その関係を示したものである。

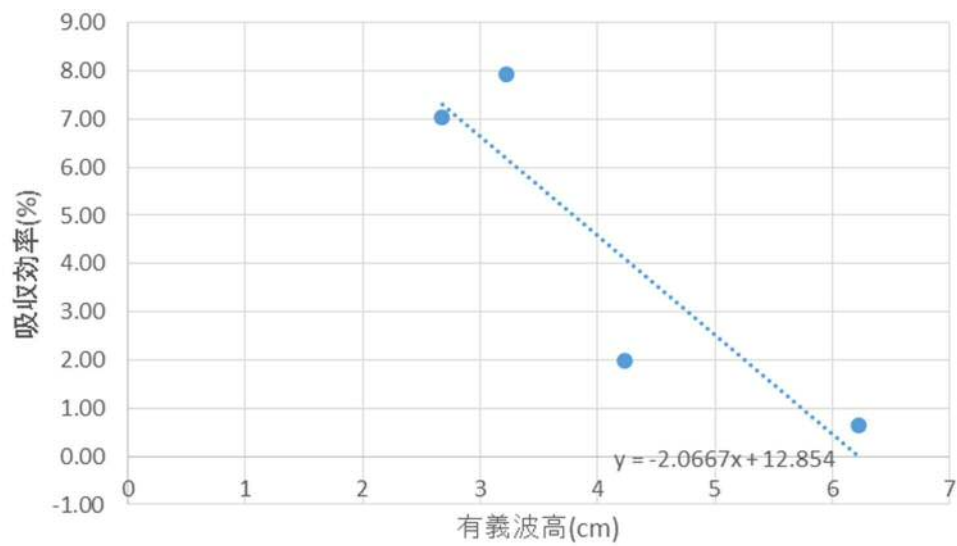


図-5.22 吸収効率と有義波高の関係（人工魚礁 1 列）

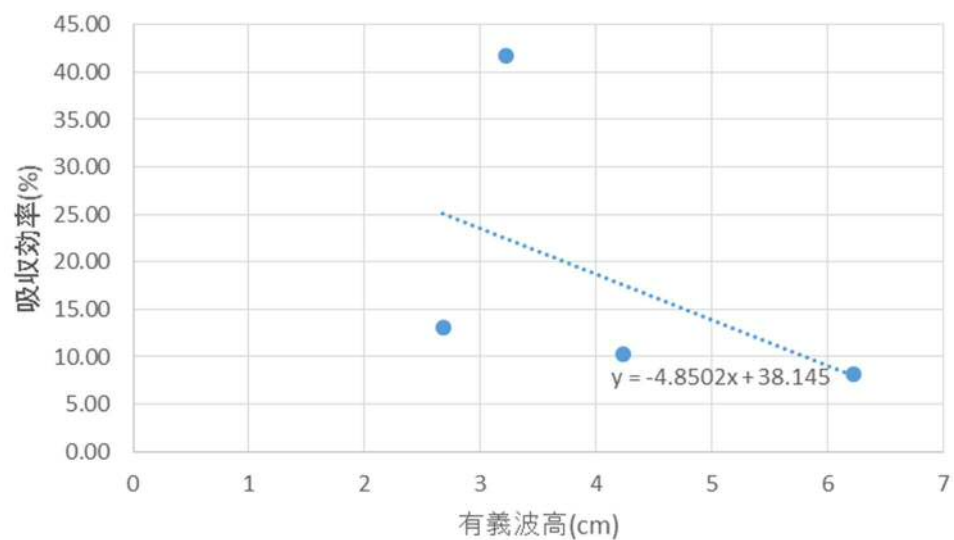


図-5.23 吸収効率と有義波高の関係（人工魚礁 2 列）

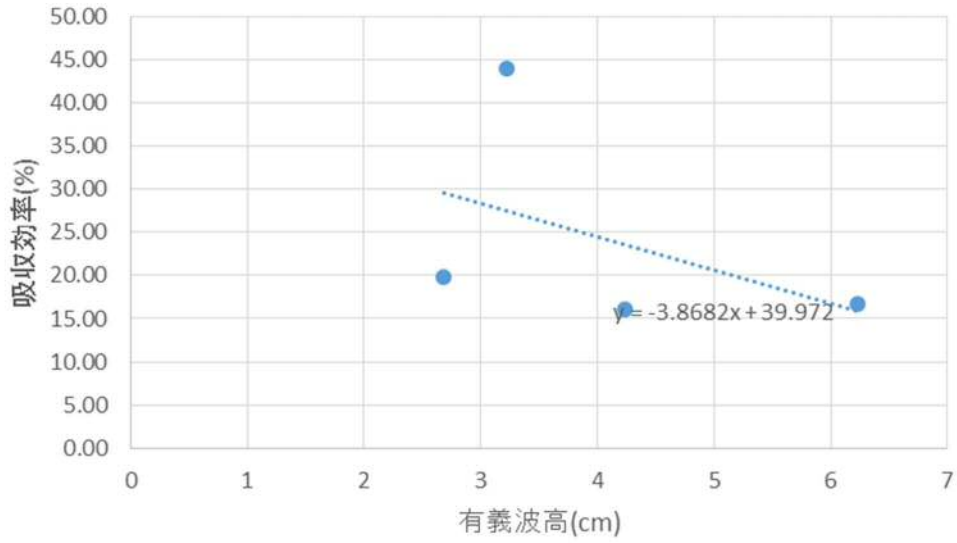


図-5.24 吸収効率と有義波高の関係（人工魚礁 3 列）

4) 図-5.25～図-5.27 は縦軸に吸収効率，横軸に有義波高を取り，その関係を示したものである．

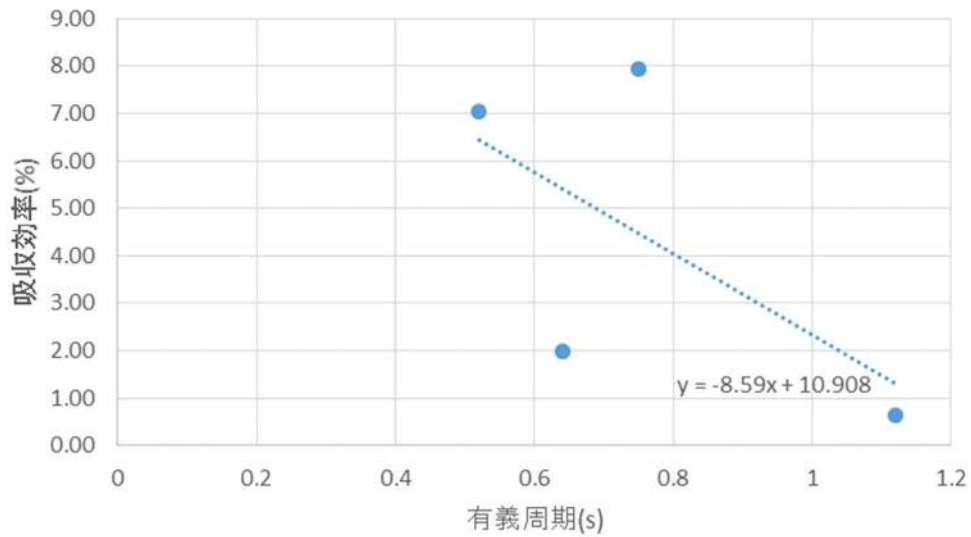


図-5.25 吸収効率と有義周期の関係(人工魚礁 1 列)



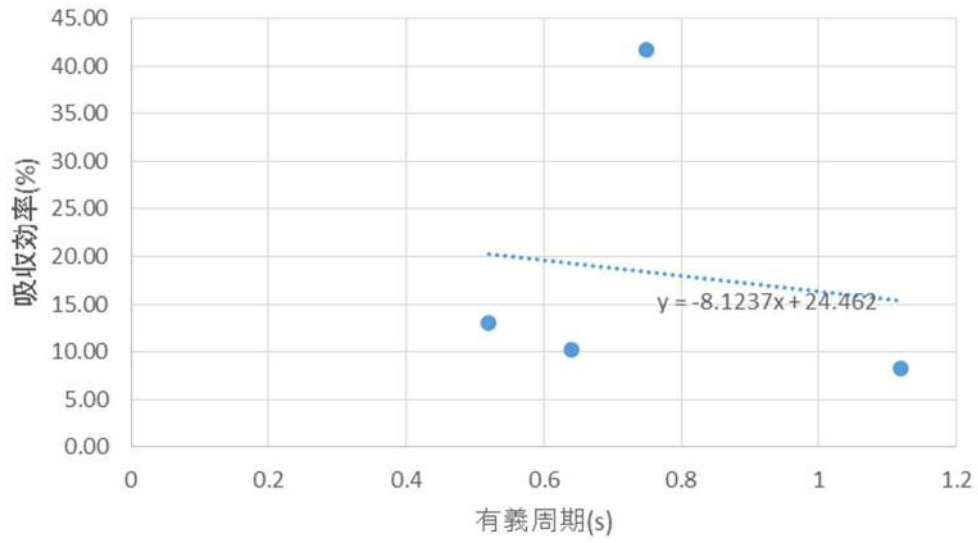


図-5.26 吸収効率と有義周期の関係（人工魚礁 2 列）

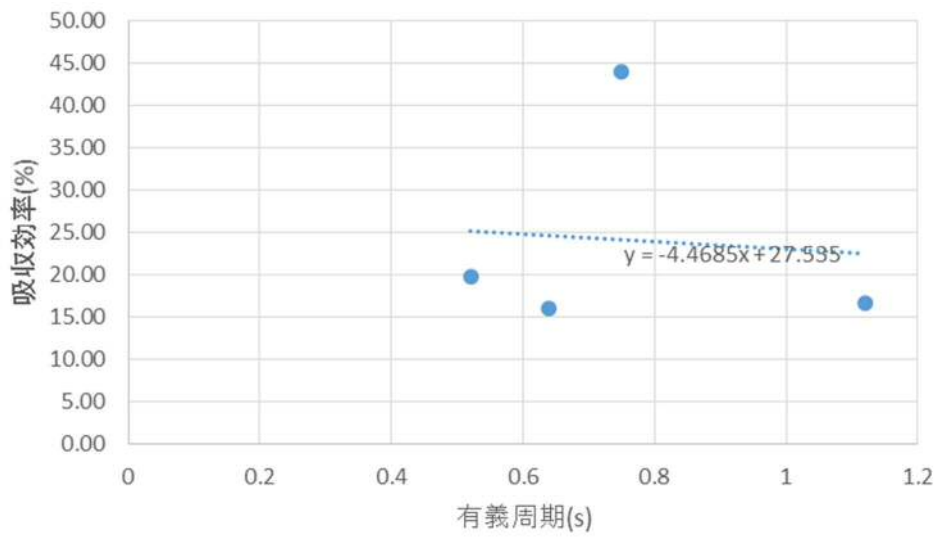


図-5.27 吸収効率と有義周期の関係（人工魚礁 3 列）

5) 図-5.28～図-5.30 は縦軸に吸収効率，横軸に模型の高さを有義波高で割ったものを取り，その関係を列ごとに示したものである． $H$  は模型の高さ， $H_{1/3}$  は有義波高である．

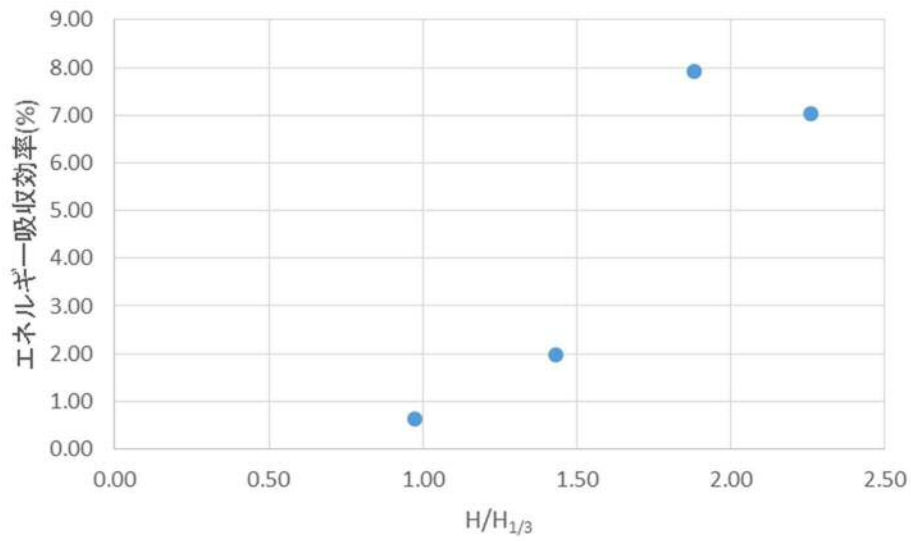


図-5.28 エネルギー吸収効率と模型の高さと有義波高の比の関係(人工魚礁 1 列)

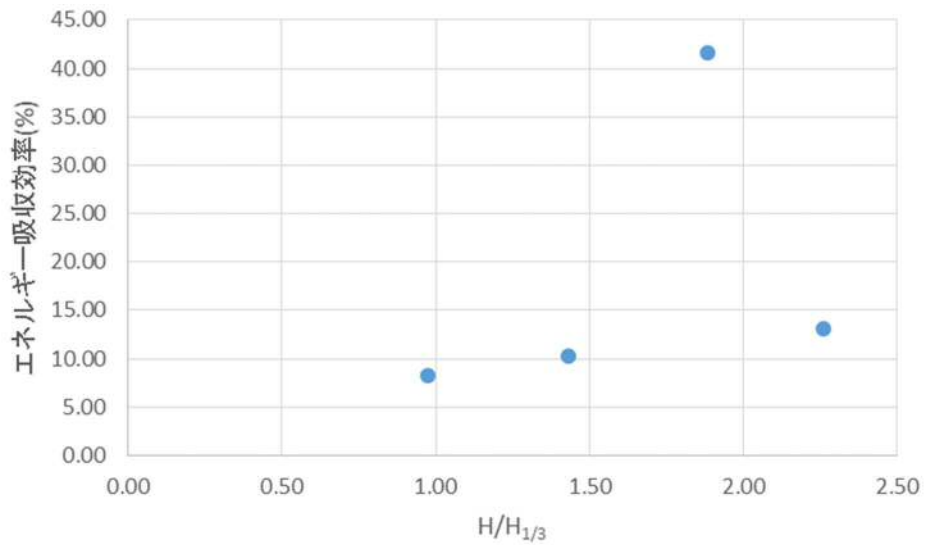


図-5.29 エネルギー吸収効率と模型の高さと有義波高の比の関係 (人工魚礁 2 列)

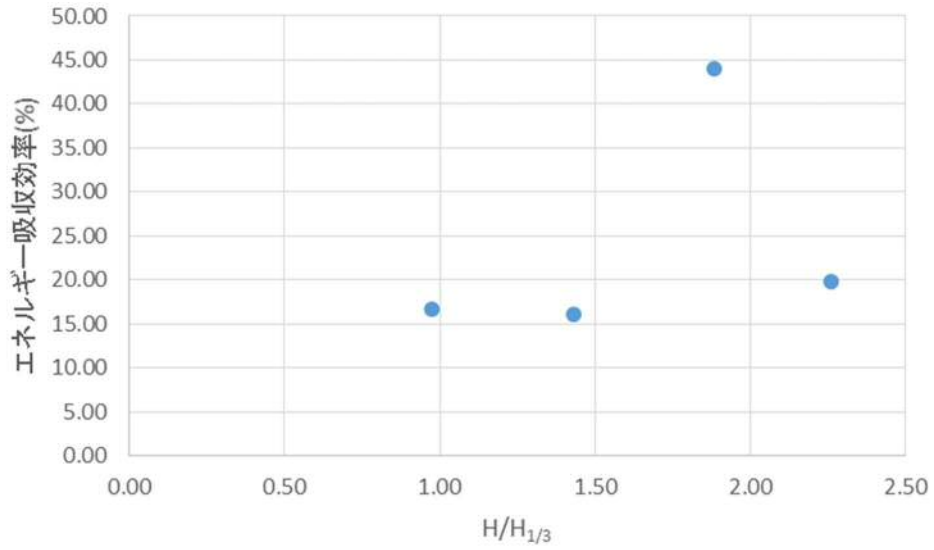


図-5.30 エネルギー吸収効率と模型の高さと有義波高の比の関係(人工魚礁 3 列)

6) 図-5.31～図-5.34 は縦軸にエネルギー吸収効率，横軸に模型幅を波長で割ったものを取り，グラフを作成した． $B$  は模型幅， $L$  は波長を表している．波長は  $1.56T_{1/3}^2$  で求めた．

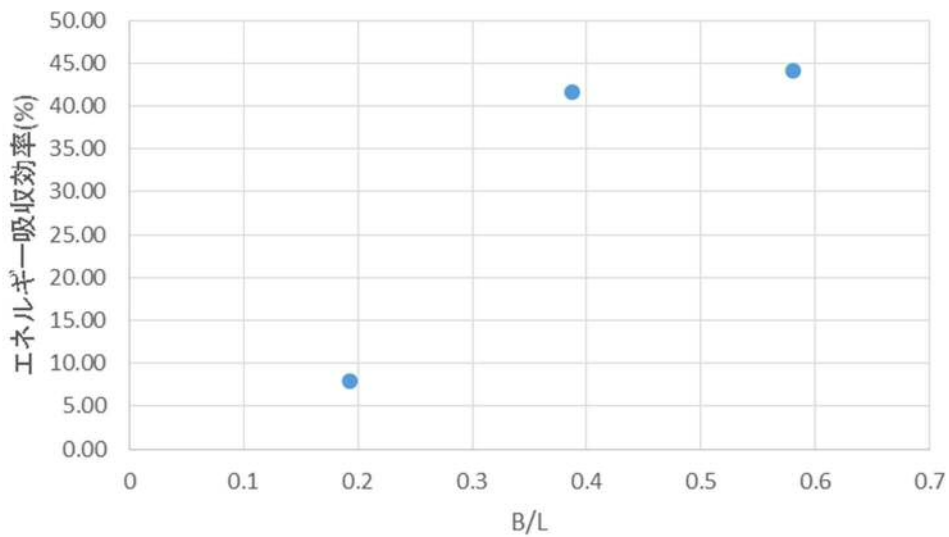


図-5.31 エネルギー吸収効率と模型幅と波長の比の関係(パターン 1)

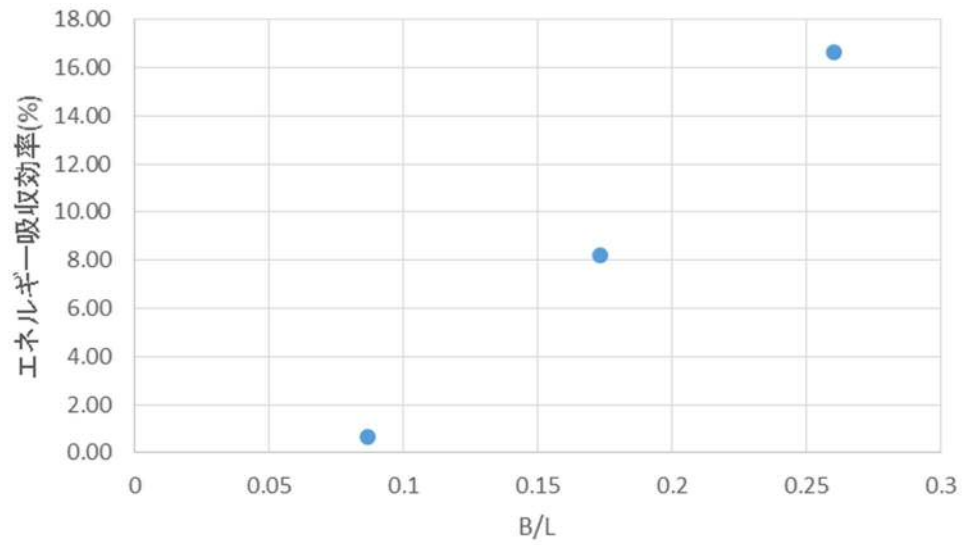


図-5.32 エネルギー吸収効率と模型幅と波長の比の関係 (パターン 2)

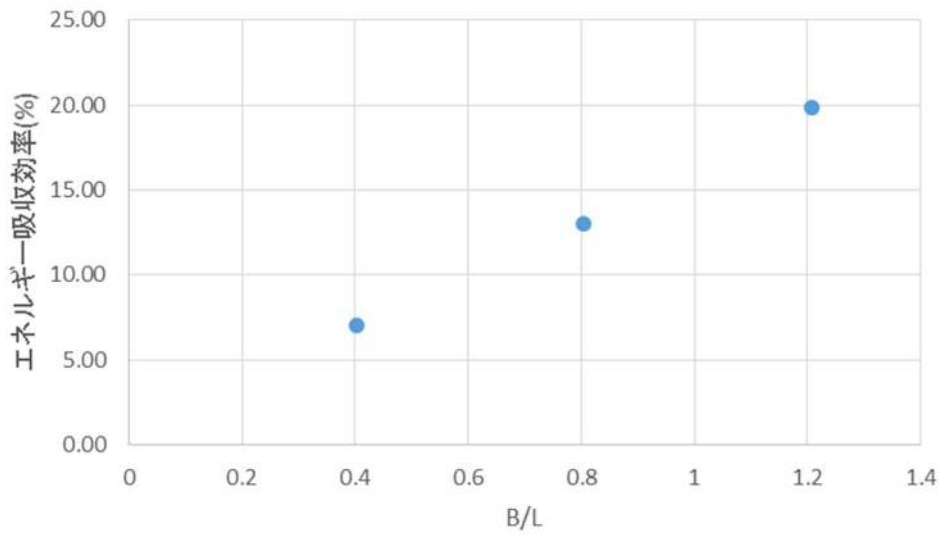


図-5.33 エネルギー吸収効率と模型幅と波長の比の関係 (パターン 3)

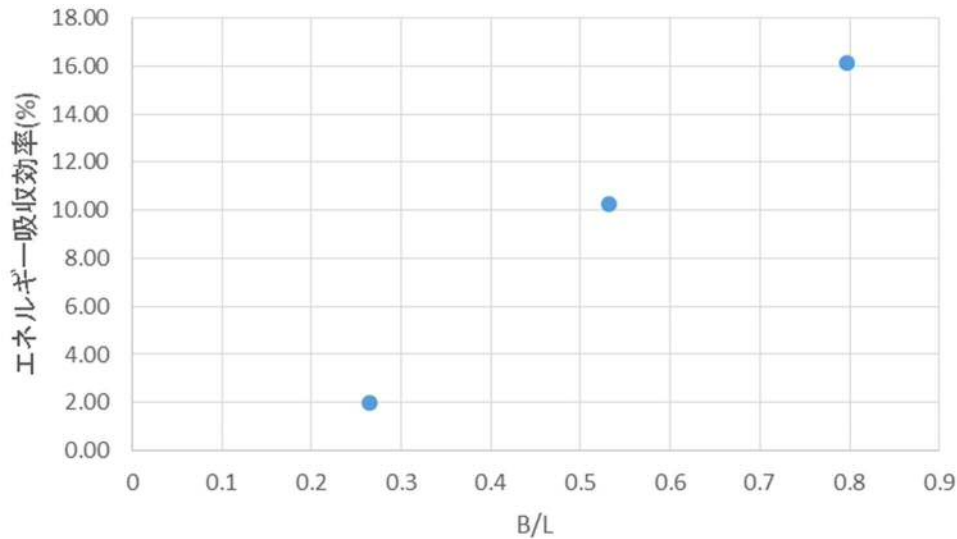


図-5.34 エネルギー吸収効率と模型幅と波長の比の関係（パターン4）

図-5.16～図-5.18より，上流側と下流側の有義波高の差が大きくなるほど吸収効率が高くなる傾向にあることがわかる．人工魚礁の列が少ないほど有義波高の差が1cmあたりの吸収効率の増加が大きくなっている．

図-5.19～図-5.21より，人工魚礁が2列，3列の時は有義周期の差が大きくなるほど吸収効率が低くなる傾向にあるが，1列の時は有義周期の差が大きくなるほど吸収効率が高くなる傾向にあることがわかる．

有義周期が1.12sの時に2列の時は $0.20\text{m}^2\text{sec}$ ，3列の時は $0.40\text{m}^2\text{sec}$ の波エネルギースペクトルを減衰している．しかし，すべての列数においてエネルギー吸収効率は低い値となっている．式(5.1)より有義周期，有義波高が大きくなるほどエネルギースペクトルが大きくなることがわかる．パターン2の有義波高，有義周期は今回行った実験の中で最も大きいため，エネルギースペクトルの総量が他のパターンよりも大きくなる．他のパターンと同じくらい消波しただけでは全体の割合としては低いため，エネルギー吸収効率は低くなった．

図-5.28～図-5.34より40%以上のエネルギー吸収効率を得ているのは構造物の幅が波長の3.8割以上の長さかつ波高の1.8倍以上の高さの時であることがわかる．図-5.31～図-5.34より模型幅と波長の比が大きいくほど吸収効率が高くなることがわかる．高さや波高の比が小さいとパターン2，4のように吸収効率が低くなると考えられる．3列の時は幅が波長の3.8割以上，高さが波高の2.2倍以上あるが，エネルギー吸収効率がパターン1より20%以上低い．このことより高さや波高の比が大きすぎるとエネルギー吸収効率が低くなると考えられる．

以上の結果から，有義波高，有義周期が大きくなるほど吸収効率が低くなる傾向にあることがわかる．これは高さや有義波高の比，模型幅と波長の比が小さくなるためだと考えられる．

人工魚礁が1列の時は10%以下のエネルギー吸収効率しか得られていない．このことより構造物の幅が5.6m（実機サイズ）以下では防災施設としての活用は困難であると考えられる．

人工魚礁の新たな設置方法について，本人工魚礁の特徴として，容易に重ね置きができるという点が挙げられる．そこで，図-5.35のように人工魚礁を重ねて使用することによって，より大きな波高の波の消波が期待できると考えられる．



図-5.35 人工魚礁の重ね置き

#### 【第5章参考文献】

- 1) 末永慶寛, 他, 人工魚礁による消波性能の検証と最適配置による防災技術の開発, 香川大学平成30年度シーズ開発・組織連携促進経費事業等報告書, pp.1-3, 2019.
- 2) 松内勇貴, 浮体構造物の動揺抑制技術と実用化に関する研究, 平成24年度香川大学大学院工学研究科修士論文, pp.14-36, 2013.
- 3) 榎木亨, 出口一郎, 新編海岸工学, pp37-41, 共立出版株式会社, 1996.
- 4) 谷野ら: 消波機能と魚礁機能を有する新型被覆ブロックの開発, 海洋開発論文集, 2002  
[https://www.jstage.jst.go.jp/article/prooe1986/18/0/18\\_0\\_389/\\_pdf](https://www.jstage.jst.go.jp/article/prooe1986/18/0/18_0_389/_pdf)
- 5) 酒井哲郎: 海洋工学入門, pp. 27-36, 森北出版, 第3章  
<https://slidesplayer.net/slide/11539426/>
- 6) Nakamura A., et al., STUDY ON THE WAVE ENERGY ABSORPTION FUNCTION OF ARTIFICIAL REEFS IN THE IRREGULAR WAVES, Journal of Recent Advances in Marine Science and Technology, Vol. 14, No.1, (in press), 2021.



## 第6章. 結論

### 6.1 本研究の成果

本研究では、大阪府が新たな漁業振興策として実施している人工魚礁を用いた増殖場（魚礁区）を人工魚礁の設置されている実海域として、人工魚礁の持つ流動制御機能、底質改善効果、生物蛸集効果について現地調査を行い、その場でのこれらの機能を定量的に評価することを目的として行った。また、新たな側面として、人工魚礁の持つ消波機能について検討を目的として、実験を行い、検証した。

上記実現のために、流動制御機能の定量評価のために水質の鉛直分布計測、ADCPによる曳航観測データと濁度データを用いた流れ、底泥の巻き上がりの可視化を試みた。この結果、水質計測により魚礁区内での攪拌を、底泥の巻き上がりの可視化を行うことができた。

底質改善効果については、同一地点で3ヶ年にわたり複数回調査を行うことで、構造物周辺の底質改善効果の把握を試みた。この結果、構造物周辺では、COD濃度は環境基準値を下回る値を維持している状況が確認された。また、対照区とのCOD濃度差を下水処理費用に換算し、費用対効果の算定を行った。その結果、 $B/C=1.26$ と高い効果があることが確認された。

生物蛸集効果については、潜水土による目視調査を行い、実際に魚類の蛸集状況を確認され、人工魚礁において餌料生物の増殖も確認され、生物蛸集効果、増殖場としての効果が確認された。

以上のことから、これまで不明であった実海域における構造物周りの流れについて、既存調査手法を組合せ、可視化技術へ適用するとともに、各種調査手法により人工魚礁の持つ環境改善機能の有用性を定量的に評価できた。また、人工魚礁を消波構造物とした際の消波機能について、実験を行った結果、人工魚礁の配列数、水理実験で与えた臭気や波高によって人工魚礁前面と背面に波エネルギースペクトルの差が出たこと、波長に対する施設幅との関係が解明された。この結果、人工魚礁の防災施設としての利用の有用性が確認された。

### 6.2 今後の課題

本研究では、区域1、区域2での調査とその結果からの検討を中心に行った。しかしながら、今回の調査では、海象条件、気象条件の兼ね合いから、十分に流れ場等を捉えきれなかったといえる。また、これらの区域における調査は、これまで年1~2回程度の調査であり、点データとなっている。貧酸素水塊が発生する夏季に魚礁区内外での水質変動を連続的にとらえ評価する必要があると考えられる。さらに、生物蛸集効果についても同様であり、点のデータしか取得できていないのが現状である。IoT化や5G等の高速通信時代の現在は、安価で連続的にデータを取得する技術を確立できる可能性がある。今後は、センサー等を用いて、連続的なデータを取得し、詩集状況等も評価していく必要があると考えられる。

これらのことから、今後も調査、研究を継続し、潮汐流の影響の大きい日にも調査を実施し、その規模について確認を行うとともに各区域での効果を把握する必要がある。

また、次節にて詳細を記載しているが、令和2年度の今年度を以て総計8haの漁場が完成する予定である。現段階で、攪拌機能を有する構造物の海域環境に対する影響は、当初計画通りの結果が出ており、十分に機能を発揮していると考えられる。そこで、8haもの大規模な漁場による海域環境改善機能の検討および、漁獲量の変化に着目し、継続した調査研究を行う必要があると考える。

### 6.3 今後の展望

#### (1) 大阪湾における漁場環境整備事業<sup>1)</sup>

平成29年までに、図-6.3.1に示す位置に4haの漁場造成を行った。さらに、今後継続的に施工工事を行い、今年の3月に1haの造成を予定し、最終的に総計8haの造成を行う計画となっている。

本年度はシタ類やサバなどの漁獲量に良い影響を与えたが、一方で漁獲量増大にまでは発展することができない魚種もいる。今後、造成を継続的に行うことで、その他の漁獲量増大が望まれている。

本研究では設置後2年および3年程度経過した魚礁区（区域1、区域2）での調査が主となったが、平成27年、平成28年に既に設置している区域3、区域4での調査結果やこれから造成予定の残り4ha（4区域）の環境改善効果が期待される。

このことから、継続的な漁場造成とそれにともなう継続的な調査研究を行い、漁場環境改善を図りたい。

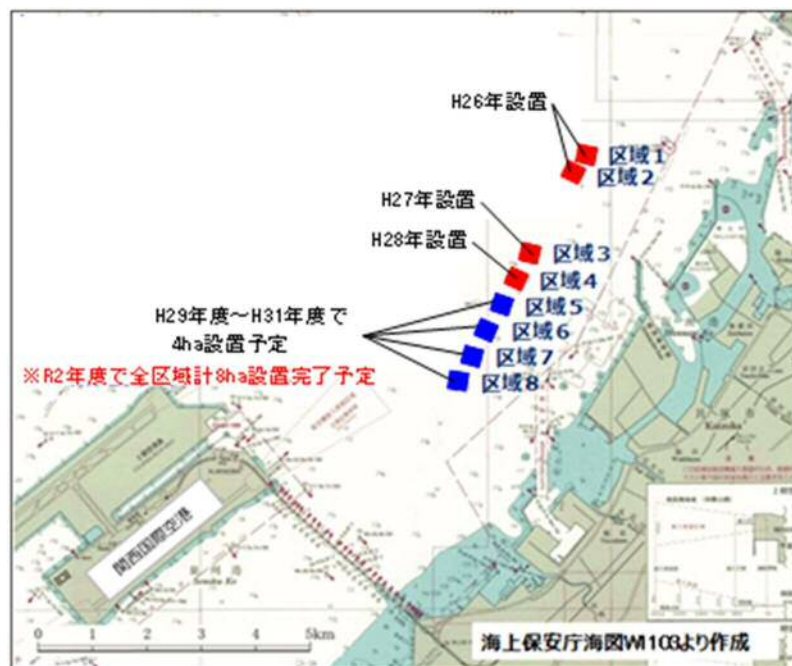


図-6.3.1 構造物設置場所

#### (2) ノリ養殖への活用

大阪湾のノリ養殖は、1993年以降17億枚に達し、全国生産量の約17%に相当していた。しかしながら、2003年に大規模な色落ち（写真-6.3.1, 6.3.2参照）が生じることで、総生産量は11億枚へと減少することになった。

この原因は、埋立てが進行し地形が大きく変化したことで、本来大阪湾西部まで影響を及ぼしていた流入負荷が湾奥部に留まり、大阪湾奥部以外の海域の生物生産を低下させていることが考えられている。こうした現状の中、本研究の技術を利用し、新たな施肥手法として図-6.3.2に示すような技術を検討している。

図-6.3.2のように、攪拌機能を有する構造物の近くの底層に栄養塩供給源を設置することにより

溶存態の栄養塩が溶出し拡散していく。上昇流がなければ、潮流によって底層付近で水平方向に拡散していくが、攪拌機能を有する構造物を設置することで上昇流が発生し、溶存態の栄養塩が鉛直方向にも拡散し、養殖ノリのある表層まで到達する。また、ノリ養殖セットに備え付けられた栄養塩滞留用カーテンによって、セット内に滞留域を形成し、栄養塩の効率的な吸収が期待できると考えられている。

ここで、本研究における成果である実海域における流れの可視化技術を用いることで、新たに養殖ノリのある表層付近での流れを可視化することができると考えた。それにより、ノリに対してどの程度の効果を与えることができているのかを検討することができると考えられる。またその検討結果から、例えば実海域における多方向からの流れによって上昇流がそれぞれぶつかり合うベクトルとなり、養殖ノリのある表層付近まで効率よく到達していないといった新たな課題や、それに伴う新たな解決策を見いだせる可能性があると考えられる。



写真-6.3.1 正常なノリ<sup>2)</sup>



写真-6.3.2 色落ちしたノリ<sup>2)</sup>

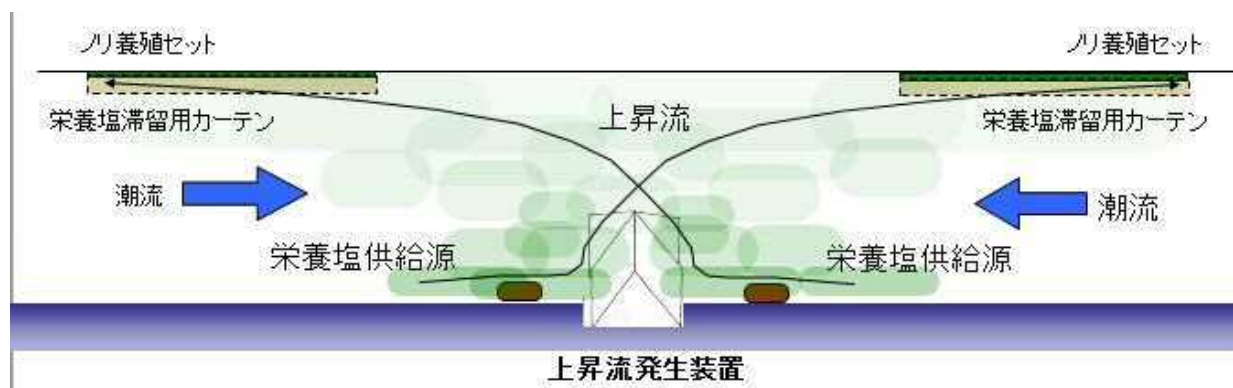


図-6.3.2 施肥手法の概要

### (3) 実海域における流れの可視化(実海域におけるタフトグリッド法)

本論第2章で、水理実験の手法としてタフトグリッド法を挙げた。タフトグリッド法は図-6.3.3に示すように、一般に流れの方向に対して垂直に設置し、主流方向に対して上下左右の動きを可視化する方法である(以下「タフト法」という)。実海域における流れの可視化技術として、本研究では濁度の変動に着目し、コンタ図に起こす事で可視化を可能とした。しかし、濁度コンタ図による流れの可視化技術では構造物周辺における細かな流れのベクトルがうまく表現できず課題が残った。そこで、実海域においてもタフト法に相当する新たな

手法を用いることができれば、濁度コンタ図と組み合わせることで可視化技術が向上するのではないかと考える。水理実験で用いたようなタフトグリッドを実海域のスケールで沈めることは現実的ではないものの、鉄筋等の棒状のもので、潜水士が水中で作業できる範囲の規模であればタフト法も可能であると考えられる。例えば、図-6.3.4に示すように一本の鉄筋に長い紐などを数箇所取り付け、等間隔で流況を確認し、写真に残すことでそれは実現可能となる。

以上のような新たな手法を今後取り入れ、実海域における流れの可視化技術を向上させることで、より詳細な流動制御構造物の海域環境改善効果の検討を行うことが可能となる。

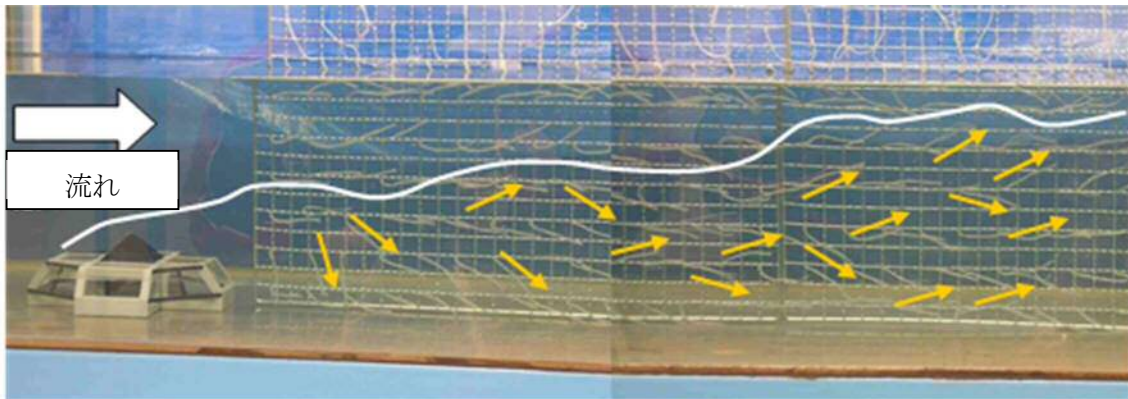


図-6.3.3 水理実験におけるタフト法の実施状況

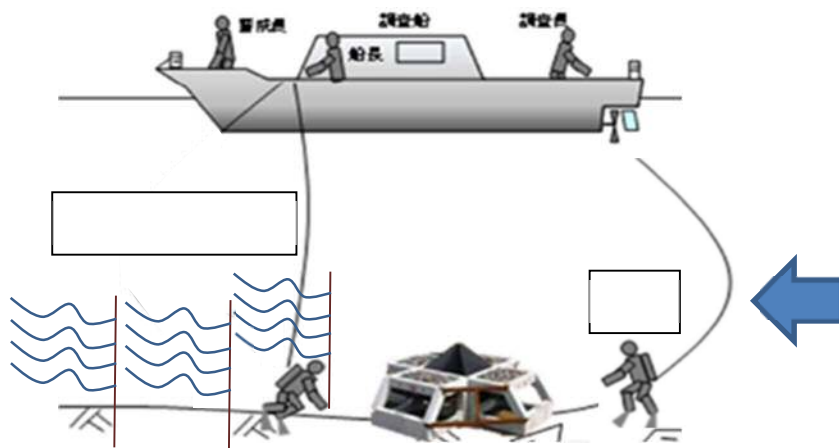


図-6.3.4 実海域におけるタフトグリッド法イメージ図

## 【第 6 章参考文献】

- 1) Osaka Prefectural Government : 平成 27 年度大阪湾漁場環境整備事業, <https://www.pref.osaka.lg.jp/yosan/cover/index.php?year=2015&acc=1&form=01&proc=1&ykst=2&bizcd=20150489&seq=1>
- 2) 西田修三 : 大阪湾の水環境再生策のあり方, p5, 2015, <http://www.cifer-core.jp/data/150529/1.pdf>
- 3) 国土交通省 : 大阪湾環境データベース(近畿地方整備局神戸港湾空港技術調査事務所), [http://kouwan.pa.kkr.mlit.go.jp/kankyo-db/data/kankyou/kaiiki/umetate/b2\\_04umetate.aspx](http://kouwan.pa.kkr.mlit.go.jp/kankyo-db/data/kankyou/kaiiki/umetate/b2_04umetate.aspx)
- 4) 城久・星加章・中辻啓二・辻野耕寛・矢持進・長田凱夫 : 大阪湾の海域環境と生物生産, 水産研究叢書, pp97-104, pp127-128, 2003
- 5) 宮川昌志 : 流動制御構造物による底質改善技術に関する研究 平成 19 年度香川大学大学院博士論文 pp.38-46, pp.36-37, pp.51-56, 2007
- 6) 高田祥暉 : 大阪湾における攪拌機能を有する人工魚礁を用いた海域環境改善技術に関する研究, 平成 26 年度卒業論文, pp.6-12, 2015
- 7) 国土交通省 : 平成 24 年度大阪湾環境データベース, [http://kouwan.pa.kkr.mlit.go.jp/kankyo-db/data/kankyou/kaiiki/teishitu/b3\\_12soko\\_2.aspx](http://kouwan.pa.kkr.mlit.go.jp/kankyo-db/data/kankyou/kaiiki/teishitu/b3_12soko_2.aspx)

## 謝辞

本論文は、著者が日本ミクニヤ株式会社大阪支店に着任時からの5年間の調査結果を整理したものです。

本研究の遂行にあたり、指導教員として終始、御指導と御支援を賜りました香川大学創造工学部教授・学部長 末永慶寛博士には心より謝意を申し上げます。また、副査として学位論文作成過程や審査等の多くの労をお執りくださいました香川大学創造工学部教授 寺林優博士、同教授 山中稔博士には、多くの助言を頂きました。ここに記して感謝申し上げます。

また、自身の技術者としてのスキルアップにおいて大きな転機となる香川大学での学位取得の機会を与えていただいた日本ミクニヤ株式会社 田中秀宜代表取締役、岸川英樹現東京支店支店長、渡邊竜之現大阪支店支店長をはじめとする職場の上位者の皆様に深謝申し上げます。

また、学位取得のため、入学当初から多くの御助言、サポートをして頂きました当社リスクコンサルティング事業本部市村康技術部長をはじめ、査読論文の作成等に御協力と多大なる御厚意を頂きました一般財団法人土木研究センター宇多高明先生、大谷靖郎氏、大木康弘氏、業務工程等に配慮いただきました所属部署の皆様に感謝申し上げます。

令和2年2月 中村明日人

## 付録



## 1.ADCP 観測結果からの濁度算出方法

水質調査で計測した水温、塩分、濁度の鉛直分布をもとに濁度に換算することで整理した。なお、ADCP 観測結果からの濁度算出は、専用ソフトウェアを用いて、曳航観測により得られた ADCP の反射強度から行った。

ADCP は、超音波が懸濁物質に当たって反射する際に生じる位相を解析して流向流速を求めている。その際に、懸濁物質濃度の違いにより後方散乱が生じる。反射強度は、水中の懸濁物質濃度と位相があり、この性質を利用して水中の懸濁態濃度を計測する手法が提案されてきた。

橋田ら\*は水中懸濁物質の吸収や散乱の影響を考慮した伝搬モデルを用いて鉛直分布計測を行っている。

超音波が懸濁物質に当たって反射する際に、懸濁物質濃度の違いによって生じる後方散乱は、超音波が水中を通過する際に生じる水塊による発散損失と吸収損失、懸濁物質による吸収、超音波の拡散・距離減衰等の影響を往復の伝搬経路上で受ける。また、濁質による発散損失は超音波伝搬経路上の積分値として影響を受ける。

ADCP はこれらの影響を受けた結果として反射強度を得て、この反射強度から散乱強度に変換している。このことから、ADCP の反射強度から濁度を算出する際には、式(3.1)で示す散乱強度の伝搬損失を考慮し、この結果を踏まえ、懸濁濃度を算出する必要があるが、懸濁濃度の算出には、水塊による音波の減衰吸収、粒子による音波の減衰、散乱領域である近距離音場における散乱も考慮する必要がある。これらのことから、懸濁濃度の算出は、音響強度と懸濁態濃度の関係について、伝搬損失を考慮した式(3.2)となる。

### ・散乱強度の伝搬損失

散乱強度はソナー方程式から式(1)で示される。

$$EI = SL + SV + Const - 20 \log(R) - 2\alpha_w R \quad (3.1)$$

$EI$ :散乱強度(dB),  $SL$ :発射強度(dB),  $SV$ :粒子の後方散乱,  $\alpha_w$ :水の吸収係数(dB/m),  $R$ :トランスデューサーからの距離(m)

### ・懸濁濃度の算出

ここでは、懸濁物質の影響と ADCP トランスデューサーの感度調整パラメータも含む。

$$M(r) = (K \langle P_{rms} \rangle r)^2 \frac{(\alpha_s \rho_s)}{(f)^2} e^{4r(\alpha_w + \alpha_s)} \quad (3.2)$$

$M(r)$ :トランスデューサーからの距離  $r$  における濃度,  $K$ :トランスデューサーに関する定数,  $P_{rms}$ :後方散乱強度,

$\alpha_s$ :粒径,  $\rho_s$ :粒子密度,  $f$ :粒子の関数,  $\alpha_w$ :水の吸収係,  $\alpha_s$ :粒子の吸収係

以上のようにして、濁度換算を行い、コンタ図に整理した。

### ※参考文献

橋田隆史, 横山洋, 橋場正弘, 新井励:ADCP の超音波反射強度を利用した濁度計測技術について, 河川流量観測の新時代, 第2巻, 2011年8月

## 2. 数値計算による流動解析

### 基礎方程式

#### a) 前提条件

海洋のように複雑かつダイナミックに変化する物理現象の把握には、その構造について仮定や近似を施す必要がある。以下に、本研究で用いる基礎方程式を導入するにあたって用いた、基礎的な前提条件を以下に示す。

1. 流れの駆動要因は潮汐,密度勾配,海上風である。
2. 本研究における流体は非圧縮性粘性流体として扱う。
3. f-平面近似として,計算領域におけるコリオリ係数を一定にする。
4. 潮流流のような長周期波の流れであり,鉛直流がほとんどないため鉛直方向には,静水圧近似を行う。つまり,Z方向の運動方程式の圧力項が常に釣り合っているものとして考える。
5. 密度は水温と塩素量の関係で表現されるとして,Knudsen の式を用いる。
6. 鉛直方向の層区分は図 A.1.1 に示されるように行い,各層で平均化された諸状態量 (ベクトル量,スカラー量) を予測計算していく。

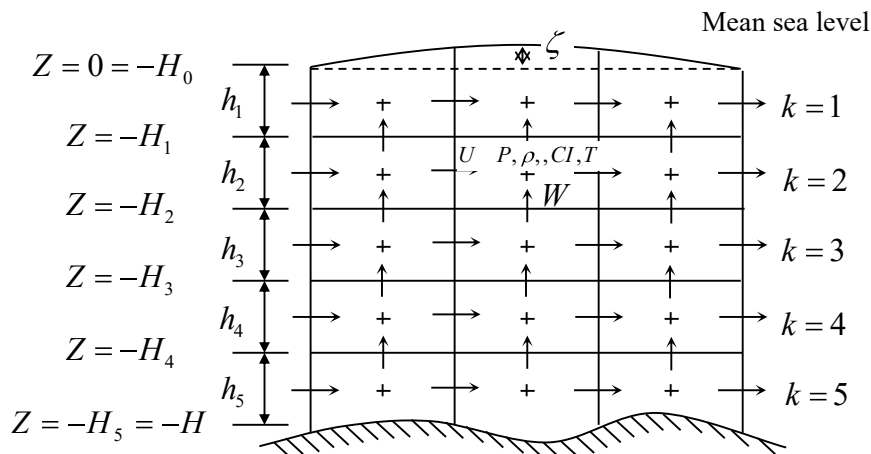


図 A.1.1 三次元鉛直多層モデル

## b) 使用する基礎方程式

### ・連続方程式

#### 非圧縮性

図 A. 1. 2 のように水中の任意の一点  $P(x, y, z)$  における微小六面体  $(\delta x, \delta y, \delta z)$  の流体の質量収支を考える。まず,  $x$  方向に垂直の面に  $\delta t$  時間後に出入りする。まず,  $x$  方向に垂直の面に  $\delta t$  時間後に出入りする質量は

$$\begin{aligned} \text{左面からの流入量} &: \rho u \left( x - \frac{\delta x}{2}, y, z, t \right) \delta y \delta z \delta t \\ &= \rho u(x, y, z, t) \delta y \delta z \delta t - \frac{1}{2} \frac{\partial \rho u}{\partial x} \delta x \delta y \delta z \delta t \end{aligned} \quad (\text{A. 1})$$

$$\begin{aligned} \text{右面からの流出量} &: \rho u \left( x + \frac{\delta x}{2}, y, z, t \right) \delta y \delta z \delta t \\ &= \rho u(x, y, z, t) \delta y \delta z \delta t + \frac{1}{2} \frac{\partial \rho u}{\partial x} \delta x \delta y \delta z \delta t \end{aligned} \quad (\text{A. 2})$$

である。したがって, 正味の流入量は

$$-\frac{\partial \rho u}{\partial x} \delta x \delta y \delta z \delta t \quad (\text{A. 3})$$

となる。同様に,  $y, z$  方向の正味の流入量は以下のようになる。

$$-\frac{\partial \rho v}{\partial y} \delta x \delta y \delta z \delta t \quad (\text{A. 4})$$

$$-\frac{\partial \rho w}{\partial z} \delta x \delta y \delta z \delta t \quad (\text{A. 5})$$

これらの和が微小直方体内における  $\delta t$  秒間の変化量

$$-\frac{\partial \rho}{\partial t} \delta x \delta y \delta z \delta t \quad (\text{A. 6})$$

となるので, 式 (A. 6) = 式 (A. 3) + 式 (A. 4) + 式 (A. 5) としてまとめると以下の関係式が導かれる。

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho u}{\partial x} + \frac{\partial \rho v}{\partial y} + \frac{\partial \rho w}{\partial z} = 0 \quad (\text{A. 7})$$

式 (A. 7) は質量の保存式である。特に流れが非圧縮であるときには  $\frac{D\rho}{Dt} = 0$  は一定であることから,

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (\text{A. 8})$$

となる。

#### 乱流場への適用

実際には式(A.8)を乱流場に適用するため、流速を統計的な平均 $\bar{u}, \bar{v}, \bar{w}$ と変動分 $u', v', w'$ とに分け、時間平均をとると

$$\frac{\partial}{\partial x}(\overline{u+u'}) + \frac{\partial}{\partial y}(\overline{v+v'}) + \frac{\partial}{\partial z}(\overline{w+w'}) = 0$$

$$\frac{\partial \bar{u}}{\partial x} + \frac{\partial u'}{\partial x} + \frac{\partial \bar{v}}{\partial y} + \frac{\partial v'}{\partial y} + \frac{\partial \bar{w}}{\partial z} + \frac{\partial w'}{\partial z} = 0$$

となり、変動分の平均が0になるので、以下の式に整理できる。

$$\frac{\partial \bar{u}}{\partial x} + \frac{\partial \bar{v}}{\partial y} + \frac{\partial \bar{w}}{\partial z} = 0 \tag{A.9}$$

これが本研究で用いる連続の方程式となる。

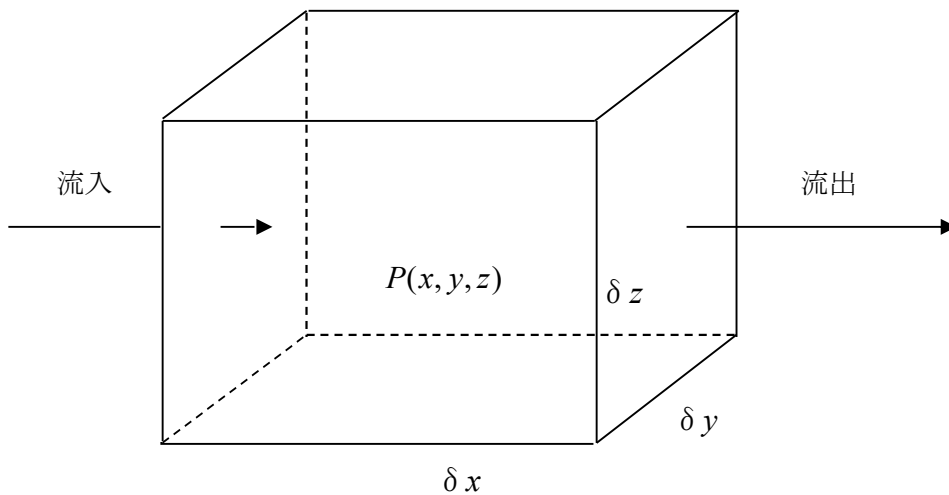


図 A.1.2 流体の流入出

・運動方程式

ナビエーストックス運動方程式

一般的に非圧縮性粘性流体に対するナビエーストックスの運動方程式は次のようになる。

$$\begin{cases} \frac{Du}{Dt} = F_x - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \nu \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) \\ \frac{Dv}{Dt} = F_y - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \nu \left( \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) \\ \frac{Dw}{Dt} = F_z - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + \nu \left( \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) \end{cases} \tag{A.10}$$

同式を自転している地球上の海水に適用していくことにする。

コリオリカについて

コリオリカは回転座標系，たとえば地球のように回転する場所から物体の運動を見た場合に働いているように見える，いわば見かけの力である．この力があるため，北半球では物体の運動が常に右に曲げられる．よって，回転座標系において運動方程式を立てる場合には見かけの力（慣性力）を考慮しなくてはならない．地球上で静止している物体に対しては遠心力のみで足りるが，動いている物体に対してはさらにコリオリカを考慮する必要があることがわかる．コリオリカの  $x$ 、 $y$  成分はそれぞれ次のような形である．

$$\begin{cases} -[2\omega \times V]_x = -2(\omega_y \omega - \omega_z v) \\ -[2\omega \times V]_y = -2(-\omega_x \omega + \omega_z u) \end{cases}$$

しかし潮汐波の場合  $\omega$  の項は赤道上以外のところでは  $\omega_z$  の項に比べて省略できることが証明される．また，われわれの座標は図 A.1.3 に示すように右回りで  $z$  軸が下方を示していることから  $\varphi$  を原点の緯度として北緯を正とすれば

$$\begin{cases} -[2\omega \times V]_x = fv \\ -[2\omega \times V]_y = -fu \end{cases} \quad (\text{A. 11})$$

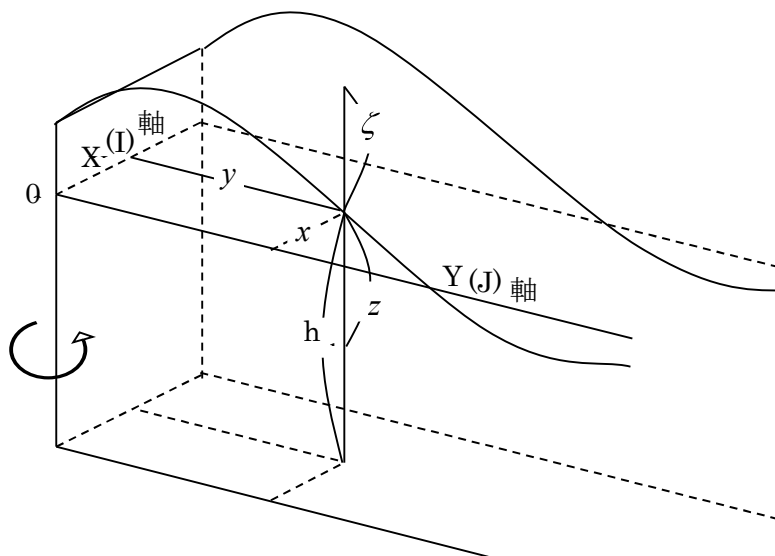


図 A.1.3 回転座標系

ここに

$$f = 2\omega_z = 2\omega \sin \varphi$$

(A. 12)

$f$  はコリオリ係数であり緯度の関数とされるが，本研究ではこれが一定であると仮定することにする．したがって，式(2.10)はつぎのようになる．

$$\begin{cases} \frac{Du}{Dt} = f\nu - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \nu \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) \\ \frac{Dv}{Dt} = -f'u - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \nu \left( \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) \\ \frac{D\omega}{Dt} = -g - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + \nu \left( \frac{\partial^2 \omega}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \omega}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \omega}{\partial z^2} \right) \end{cases} \quad (\text{A. 13})$$

ここに遠心力  $g$  は遠心力が含まれているものであることを追記しておく。

### 乱流場への適用

式(2.13)は粘性流体の変形と応用との関係が一次式で表され、しかもその係数  $\nu$  がいたる所一定であるときのみ成立する。このとき  $\nu$  の分子動粘性係数というが、これは海水が層流状態のときのみあてはまる。そこで乱流場に適用するため連続の式と同様、運動方程式においても流速や圧力を統計的平均値とその変動分との和で

$$u = \bar{u} + u', \quad v = \bar{v} + v', \quad \omega = \bar{\omega} + \omega', \quad p = \bar{p} + p'$$

のように表し、さらに時間的な平均をとり、式変形する。ここで、式整理に使う条件を以下に示す。

時々刻々の変動の平均であるので 0

$$\bar{F}' = 0 \quad (\text{A. 14})$$

平均を平均しても平均であるので

$$\overline{\bar{F}} = \bar{F} \quad (\text{A. 15})$$

統計的な平均値 (定数) に変動分をかけた和は 0 である。

$$\overline{\bar{F}G'} = 0 \quad (\text{A. 16})$$

平均の積の平均は平均の積のままである。

$$\overline{\overline{\bar{F}G}} = \overline{\bar{F}G} \quad (\text{A. 17})$$

以下の条件と連続式を援用し、各項ごとに整理すると以下ようになる。

$X$ 方向

非定常項

$$\frac{\partial \bar{u}}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial t} (\overline{\bar{u} + u'}) = \frac{\partial \bar{u}}{\partial t} + \frac{\partial \bar{u}'}{\partial t} = \frac{\partial \bar{u}}{\partial t} \quad (\text{A. 18})$$

移流項

$$\frac{\partial \bar{u}^2}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} (\overline{(\bar{u} + u')^2}) = \frac{\partial \bar{u}^2}{\partial x} + 2 \frac{\partial \overline{\bar{u}u'}}{\partial x} + \frac{\partial \overline{u'^2}}{\partial x} = \frac{\partial \bar{u}^2}{\partial x} + \frac{\partial \overline{u'^2}}{\partial x} \quad (\text{A. 19})$$

$$\frac{\partial \overline{u\overline{v}}}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial y} (\overline{u+u'}) (\overline{v+v'}) = \frac{\partial \overline{u\overline{v}}}{\partial y} + \frac{\partial \overline{u'\overline{v}'}}{\partial y} + \frac{\partial \overline{u'\overline{v}}}{\partial y} + \frac{\partial \overline{u'\overline{v}'}}{\partial y} = \frac{\partial \overline{u\overline{v}}}{\partial y} + \frac{\partial \overline{u'\overline{v}'}}{\partial y} \quad (\text{A. 20})$$

$$\frac{\partial \overline{u\overline{\omega}}}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial z} (\overline{u+u'}) (\overline{\omega+\omega'}) = \frac{\partial \overline{u\overline{\omega}}}{\partial z} + \frac{\partial \overline{u'\overline{\omega}'}}{\partial z} + \frac{\partial \overline{u'\overline{\omega}}}{\partial z} + \frac{\partial \overline{u'\overline{\omega}'}}{\partial z} = \frac{\partial \overline{u\overline{\omega}}}{\partial z} + \frac{\partial \overline{u'\overline{\omega}'}}{\partial z} \quad (\text{A. 21})$$

コリオリ項

$$f\overline{v} = f(\overline{v+v'}) = f\overline{v} + f\overline{v'} = f\overline{v} \quad (\text{A. 22})$$

圧力項

$$\frac{1}{\rho} \frac{\partial \overline{p}}{\partial x} = \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial x} (\overline{p+p'}) = \frac{1}{\rho} \frac{\partial \overline{p}}{\partial x} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial \overline{p'}}{\partial x} = \frac{1}{\rho} \frac{\partial \overline{p}}{\partial x} \quad (\text{A. 23})$$

粘性項

$$v \frac{\partial^2 \overline{u}}{\partial x^2} = v \frac{\partial}{\partial x} \left\{ \frac{\partial}{\partial x} (\overline{u+u'}) \right\} = v \frac{\partial^2 \overline{u}}{\partial x^2} + v \frac{\partial^2 \overline{u'}}{\partial x^2} = v \frac{\partial^2 \overline{u}}{\partial x^2} \quad (\text{A. 24})$$

$$v \frac{\partial^2 \overline{u}}{\partial y^2} = v \frac{\partial}{\partial y} \left\{ \frac{\partial}{\partial y} (\overline{u+u'}) \right\} = v \frac{\partial^2 \overline{u}}{\partial x^2} + v \frac{\partial^2 \overline{u'}}{\partial y^2} = v \frac{\partial^2 \overline{u}}{\partial y^2}$$

(A. 25)

$$v \frac{\partial^2 \overline{u}}{\partial z^2} = v \frac{\partial}{\partial z} \left\{ \frac{\partial}{\partial z} (\overline{u+u'}) \right\} = v \frac{\partial^2 \overline{u}}{\partial z^2} + v \frac{\partial^2 \overline{u'}}{\partial z^2} = v \frac{\partial^2 \overline{u}}{\partial z^2}$$

(A. 26)

式(2.18)～(2.26)をまとめると,

$$\begin{aligned} \frac{\partial \overline{u}}{\partial t} + \frac{\partial \overline{u}^2}{\partial x} + \frac{\partial \overline{u\overline{v}}}{\partial y} + \frac{\partial \overline{u\overline{\omega}}}{\partial z} &= f\overline{v} - \frac{1}{\rho} \frac{\partial \overline{p}}{\partial x} \\ &\quad - \frac{\partial \overline{u'^2}}{\partial x} - \frac{\partial \overline{u'\overline{v}'}}{\partial y} - \frac{\partial \overline{u'\overline{\omega}'}}{\partial z} + v \frac{\partial^2 \overline{u}}{\partial x^2} + v \frac{\partial^2 \overline{u}}{\partial y^2} + v \frac{\partial^2 \overline{u}}{\partial z^2} \end{aligned} \quad (\text{A. 27})$$

となる。Y, Z方向も同様に整理し表せば結局, 式(A.13)は次のように書き直される。

$$\begin{cases} \rho \frac{D\overline{u}}{Dt} = \rho f\overline{v} - \frac{\partial \overline{p}}{\partial x} + \mu \nabla^2 \overline{u} - \rho \left( \frac{\partial \overline{u'^2}}{\partial x} + \frac{\partial \overline{u'\overline{v}'}}{\partial y} + \frac{\partial \overline{u'\overline{\omega}'}}{\partial z} \right) \\ \rho \frac{D\overline{v}}{Dt} = -\rho f\overline{u} - \frac{\partial \overline{p}}{\partial y} + \mu \nabla^2 \overline{v} - \rho \left( \frac{\partial \overline{v'u'}}{\partial x} + \frac{\partial \overline{v'^2}}{\partial y} + \frac{\partial \overline{v'\overline{\omega}'}}{\partial z} \right) \\ \rho \frac{D\overline{\omega}}{Dt} = \rho g - \frac{\partial \overline{p}}{\partial z} + \mu \nabla^2 \overline{\omega} - \rho \left( \frac{\partial \overline{\omega'u'}}{\partial x} + \frac{\partial \overline{\omega'\overline{v}'}}{\partial y} + \frac{\partial \overline{\omega'^2}}{\partial z} \right) \end{cases} \quad (\text{A. 28})$$

ここで, 式(A.28)の右辺最終項は移流項から生じたものであり, 流れが層流場においてはこれらの項群は0となり, Navier-Stokesの運動方程式と一致する。式(A.28)を Reynolds 方程式という。



これらの移流項から生じた乱流拡散項は分子拡散項に比べ非常に大きいため、分子拡散項を省略することにより次のように簡略化される。

$$\begin{cases} \rho \frac{D\bar{u}}{Dt} = \rho f\bar{v} - \frac{\partial \bar{p}}{\partial x} - \rho \left( \frac{\partial \overline{u'^2}}{\partial x} + \frac{\partial \overline{u'v'}}{\partial y} + \frac{\partial \overline{u'\omega'}}{\partial z} \right) \\ \rho \frac{D\bar{v}}{Dt} = -\rho f\bar{u} - \frac{\partial \bar{p}}{\partial y} - \rho \left( \frac{\partial \overline{v'u'}}{\partial x} + \frac{\partial \overline{v'^2}}{\partial y} + \frac{\partial \overline{v'\omega'}}{\partial z} \right) \\ \rho \frac{D\bar{\omega}}{Dt} = \rho g - \frac{\partial \bar{p}}{\partial z} - \rho \left( \frac{\partial \overline{\omega'u'}}{\partial x} + \frac{\partial \overline{\omega'v'}}{\partial y} + \frac{\partial \overline{\omega'^2}}{\partial z} \right) \end{cases} \quad (\text{A. 29})$$

### レイノルズ応力のモデル化

式(A. 29)の中に現れるレイノルズ応力はテンソルの形で次のように表されるものである。

$$\begin{pmatrix} \sigma_{xx} & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & \sigma_{yy} & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \sigma_{zz} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -\rho \overline{u'u'} & -\rho \overline{u'v'} & -\rho \overline{u'\omega'} \\ -\rho \overline{v'u'} & -\rho \overline{v'v'} & -\rho \overline{v'\omega'} \\ -\rho \overline{\omega'u'} & -\rho \overline{\omega'v'} & -\rho \overline{\omega'\omega'} \end{pmatrix} \quad (\text{A. 30})$$

式(A. 29)を解くためには、レイノルズ応力(A. 30)を具体的に表す関係式が必要である。レイノルズ応力を分子粘性のように見立て、流れの平均流速分布と関連づけることが従来よりなされてきた方法であるが、本研究においても同様にレイノルズ応力を

$$-\rho \overline{u'v'} = \rho \nu_\varepsilon \frac{d\bar{u}}{dy} \quad (\text{A. 31})$$

のように表すこととする。ここで $\nu_\varepsilon$ は渦動粘性係数と呼ばれているが、本論ではこれが計算領域で一定と仮定する。さらに $\nu_\varepsilon$ を水平方向成分 $\nu_h$ と鉛直方向成分 $\nu_v$ に分けると式(A. 29)は次のように表される。

$$\begin{cases} \frac{D\bar{u}}{Dt} = f\bar{v} - \frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x} + \nu_h \left( \frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial y^2} \right) + \nu_v \frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial z^2} \\ \frac{D\bar{v}}{Dt} = f\bar{u} - \frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial y} + \nu_h \left( \frac{\partial^2 \bar{v}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \bar{v}}{\partial y^2} \right) + \nu_v \frac{\partial^2 \bar{v}}{\partial z^2} \\ \frac{D\bar{\omega}}{Dt} = -g - \frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial z} + \nu_h \left( \frac{\partial^2 \bar{\omega}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \bar{\omega}}{\partial y^2} \right) + \nu_v \frac{\partial^2 \bar{\omega}}{\partial z^2} \end{cases} \quad (\text{A. 32})$$

式(A. 32)のz方向の運動方程式において、潮汐流などの長周期波の流れを対象とする場合には、 $\bar{\omega}$ を含む項は、重力項や圧力項に対して無視し、鉛直方向に静水圧平衡を仮定する。したがって、

$$\begin{cases} \frac{D\bar{u}}{Dt} = f\bar{v} - \frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x} + \nu_h \left( \frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial y^2} \right) + \nu_v \frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial z^2} \\ \frac{D\bar{v}}{Dt} = f\bar{u} - \frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial y} + \nu_h \left( \frac{\partial^2 \bar{v}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \bar{v}}{\partial y^2} \right) + \nu_v \frac{\partial^2 \bar{v}}{\partial z^2} \\ 0 = -g - \frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial z} \end{cases} \quad (\text{A. 33})$$

式(A. 33)が、本研究で用いる運動方程式である。

#### ・海面および海底の条件

海面を表す式が空間座標  $(x, y, z)$  および時刻  $t$  において

$$F(x, y, z, t) = 0 \quad (\text{A. 34})$$

で表されるとすると、流体粒子が海面から飛び出さないための条件は、微小時間  $\Delta t$  後においても

$$F(x + \Delta t, y + \Delta t, z + \Delta t, t + \Delta t) = 0 \quad (\text{A. 35})$$

テイラー展開を行い整理すれば、次のように書き換えられる。

$$\frac{DF}{Dt} = \frac{\partial F}{\partial t} + u \frac{\partial F}{\partial x} + v \frac{\partial F}{\partial y} + \omega \frac{\partial F}{\partial z} \quad (\text{A. 36})$$

海面は  $z = \zeta(x, y, t)$ 。したがって

$$F = z - \zeta(x, y, t) \quad (\text{A. 37})$$

とおくと、式(A. 36)に代入して

$$-\frac{\partial \zeta}{\partial t} - u \Big|_{\zeta} \frac{\partial \zeta}{\partial x} - v \Big|_{\zeta} \frac{\partial \zeta}{\partial y} + \omega \Big|_{\zeta} = 0 \quad (\text{A. 38})$$

これが海面の条件式である。海底に対しても同様に、 $z = -h(x, y)$  より

$$F = z + h(x, y) \quad (\text{A. 39})$$

$$u \Big|_{-h} \frac{\partial h}{\partial x} + v \Big|_{-h} \frac{\partial h}{\partial y} + \omega \Big|_{-h} = 0 \quad (\text{A. 40})$$

#### ・熱収支の式

本論で用いる熱収支の式（温度の拡散方程式）は

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \frac{\partial(uT)}{\partial x} + \frac{\partial(vT)}{\partial y} + \frac{\partial(\omega T)}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left( K_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( K_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( K_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) + R \quad (\text{A. 41})$$

であり、 $R$  は生成項（日射など）である。

#### ・塩素量の式

塩素量収支の式も熱収支の式と同様に

$$\frac{\partial Cl}{\partial t} + \frac{\partial(u \cdot Cl)}{\partial x} + \frac{\partial(v \cdot Cl)}{\partial y} + \frac{\partial(\omega \cdot Cl)}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left( K_x \frac{\partial Cl}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( K_y \frac{\partial Cl}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( K_z \frac{\partial Cl}{\partial z} \right) \quad (\text{A. 42})$$

### ・密度の式

海水の密度  $\rho_s$  [g/cm<sup>3</sup>]は

$$\rho_s = \rho(S, T) \quad (\text{A. 43})$$

ところで  $Na^+$ ,  $Cl^-$  のような海水に含まれる塩類の主要成分イオンが一定の割合で存在するという仮定の下に, 塩素量  $Cl_s$  [%<sub>00</sub>] から塩分  $S$  [%<sub>00</sub>] を算定する式が提案されている.

$$S = 0.0305 + 1.805Cl_s \quad (\text{A. 44})$$

同式はクヌーセンの式と呼ばれているが, これを用いることにより

$$\rho_s = \rho(Cl, T) \quad (\text{A. 45})$$

具体的には下に示すような算定方法が提案されている.

$$\begin{cases} \rho_s = 1 + 10^{-3} \sigma_{sT} \\ \sigma_{s0} = -0.069 + 1.4708Cl_s - 0.001570Cl_s^2 + 0.0000389Cl_s^3 \\ \sigma_{st} = -\frac{(T-3.98)^2}{503.570} \cdot \frac{T+283.0}{T+67.26} + (\sigma_{s0} + 0.1344) \{1 - A_t + B_t(\sigma_{s0} - 0.1324)\} \end{cases} \quad (\text{A. 46})$$

ここに

$$\begin{cases} A_t = T(4.7869 - 0.098185T + 0.0010843T^2) \times 10^{-3} \\ B_t = T(18.030 - 0.8164T + 0.01667T^2) \times 10^{-6} \end{cases} \quad (\text{A. 47})$$

式(A. 47)より海水の密度  $\rho_s$  が塩素量  $Cl_s$  と水温  $T$  を与えることによって計算できる.

### ・境界条件

境界条件の取り扱い, 湾内に潮汐が入ってくる場合のみを考えている. 自由表面  $\zeta$  には, 進出する潮汐波の波動を与え, 流速成分  $u_k, v_k, \omega_k$  については, 外部との運動量交換が自由に行なわれるという, 自由流出条件 (free-stream condition) を与える.

$$\zeta = \zeta_0 + \sum_i A_i \cdot \cos(\omega_i t - k_i) \quad (\text{A. 48})$$

$$\frac{\partial u_k}{\partial n} = \frac{\partial v_k}{\partial n} = \frac{\partial \omega_k}{\partial n} = 0 \quad (k = 1, 2, 3, \dots, K) \quad (\text{A. 49})$$

温度  $T_k$  と塩素量  $Sa_k$  に対しては, 上流側境界の  $T, Sa_k$  を固定し, 下流側境界では自由流出の取り

扱いをすると流出境界で

$$k \frac{\partial T_k}{\partial n} = k \frac{\partial S a_k}{\partial n} = 0 \quad (\text{A. 50})$$

流入境界では

$$T_k = T_k^0, \quad S_{ak} = S a_p^0 \quad (k = 1, 2, 3, \dots, K) \quad (\text{A. 51})$$

壁面および陸岸の境界条件の取り扱い、海水の流入出はないものと考え、境界を横切る流量を 0 とした。

$$M = 0, \quad N = 0 \quad (\text{A. 52})$$

ここに、

M, N : それぞれ  $x, y$  方向の線流量成分

$n$  : 開境界法線方向

自由表面上の粘性応力は、Bulk 公式による風応力の定式化を行なった。

$$\begin{aligned} \frac{1}{\rho} \tau_x^s &= \frac{\rho_a}{\rho} \cdot \gamma_s^2 \cdot W_x \sqrt{W_x^2 + W_y^2} \\ \frac{1}{\rho} \tau_y^s &= \frac{\rho_a}{\rho} \cdot \gamma_s^2 \cdot W_y \sqrt{W_x^2 + W_y^2} \end{aligned} \quad (\text{A. 53})$$

ここに、

$W_x, W_y$  : 風速ベクトルの  $x, y$  方向成分

$\tau_x^s, \tau_y^s$  : 風応力の  $x, y$  方向成分

$\rho_a$  : 空気密度

$\gamma_s^2$  : 海面摩擦係数

海面上においては、Bulk 公式を使って海面摩擦応力を定式化した。

$$\frac{1}{\rho} \tau_b^{x,y} = \gamma_b^2 \cdot (u_k, v_k) \sqrt{u_x^2 + v_y^2} \quad (\text{A. 54})$$

内部境界面の挙動は、中立な成層を基本として検討されているが、中立での評価方法は、Richardson 数の関数として表現され、不安定な場合は、Mamayev 等の理論がある。本論では、内部応力は以下に示す式を用いて計算した。

$$\frac{1}{\rho} \tau^{k-1,k} = -\gamma_i^2 \cdot |v_{k-1} - v_k| (v_{k-1} - v_k) \quad (\text{A. 55})$$

以下のように、本論における基礎理論を示した。

### c) 基礎方程式の断面内積分

基礎方程式を各層において水深方向に平均化(断面内積分)することにより二次元化を行なう。その際、積分記号下の微分に関する公式として、

$$\frac{d}{dy} \int_{x_1}^{x_2} f(x, y) dx = \int_{x_1}^{x_2} \frac{\partial f(x, y)}{\partial y} dx + f(x_2, y) \frac{dx_2}{dy} - f(x_1, y) \frac{dx_1}{dy} \quad (\text{A. 56})$$

を用いる。また各層の区分については便宜上次のように区分する。

第一層(表層) : 海面  $z = \zeta$  から  $z = -H_1$  まで  
 第  $k$  層 :  $z = -H_{k-1}$  から  $z = -H_k$  まで  
 第  $LN$  層(底層) :  $z = -H_{LN-1}$  から 海底  $z = -H_{LN}$

また表記上簡略のため

$$\int_{-H_k}^{-H_{k-1}} \rightarrow \int_{h_k}, \quad \int_{h_k} u dz \rightarrow M_k, \quad \int_{h_k} v dz \rightarrow N_k$$

と記述することにする。

#### ・連続の方程式

第一層(表層)

$$\int_{h_1} \left( \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} + \frac{\partial \bar{v}}{\partial z} + \frac{\partial \bar{\omega}}{\partial z} \right) dz = 0$$

公式(A. 56)を用いて

$$\frac{\partial}{\partial x} \int_{h_1} u dz + \frac{\partial}{\partial y} \int_{h_1} v dz + \frac{\partial}{\partial z} \int_{h_1} \omega dz - u|_{\zeta} \frac{\partial \zeta}{\partial x} - v|_{\zeta} \frac{\partial \zeta}{\partial y} + \omega|_{\zeta} - \omega|_{-H_1} = 0 \quad (\text{A. 57})$$

ここで海面の式(A. 36)を代入することにより

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} = \omega|_{-H_1} - \frac{\partial M_1}{\partial x} - \frac{\partial N_1}{\partial y} \quad (\text{A. 58})$$

第  $k$  層

表層の場合と同様にして

$$\frac{\partial M_k}{\partial x} + \frac{\partial N_k}{\partial y} + \omega|_{-H_{k-1}} - \omega|_{-H_k} = 0 \quad (\text{A. 59})$$

第  $LN$  層(底層)

$$\frac{\partial M_{LN}}{\partial x} + \frac{\partial N_{LN}}{\partial y} + \omega|_{-H_{LN-1}} - \omega|_{-H_{LN}} = 0$$

$\omega|_{-H_{LN}} = 0$  より

$$\frac{\partial M_{LN}}{\partial x} + \frac{\partial N_{LN}}{\partial y} + \omega|_{-H_{LN-1}} = 0 \quad (\text{A. 60})$$

式(A. 58)(A. 59)(A. 60)より漸化的に

$$\left\{ \begin{array}{l} \omega_k = 0 \quad (k = LN) \\ \frac{\partial M_k}{\partial x} + \frac{\partial N_k}{\partial y} + \omega \Big|_{-H_{k-1}} - \omega \Big|_{-H_k} = 0 \quad (k = 2, 3, \dots, LN) \\ \frac{\partial \zeta}{\partial t} = \omega \Big|_{-H_1} - \frac{\partial M_1}{\partial x} - \frac{\partial N_1}{\partial y} \quad (k = 1) \end{array} \right. \quad (\text{A. 61})$$

• 運動方程式

$x$ 方向の運動方程式

$$\frac{D\bar{u}}{Dt} = f\bar{v} - \frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x} + v_h \left( \frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial y^2} \right) + v_v \frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial z^2} \quad (\text{A. 33})$$

について考えていく。積分操作を行なうに先立って、同式を少し変形しておく。  
連続の方程式、式(A. 9)を考慮することにより、

$$\frac{\partial \bar{u}}{\partial t} + \frac{\partial \bar{u}^2}{\partial x} + \frac{\partial \bar{u}\bar{v}}{\partial y} + \frac{\partial \bar{u}\bar{\omega}}{\partial z} = f\bar{v} - \frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x} + v_h \left( \frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial y^2} \right) + v_v \frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial z^2} \quad (\text{A. 62})$$

と変形できる。式(A. 62)を各層において積分することにする。

**非定常項，移流項**

非定常項，移流項に関しては，公式(A. 56)より

$$\begin{aligned} \int_{h_k} \left\{ \frac{\partial \bar{u}}{\partial t} + \frac{\partial \bar{u}^2}{\partial x} + \frac{\partial \bar{u}\bar{v}}{\partial y} + \frac{\partial \bar{u}\bar{\omega}}{\partial z} \right\} dz &= \frac{\partial}{\partial t} \int_{h_k} \bar{u} dz + \frac{\partial}{\partial x} \int_{h_k} \bar{u}^2 dz + \frac{\partial}{\partial y} \int_{h_k} (\bar{u}\bar{v}) dz \\ &\quad - \bar{u} \Big|_{-H_{k-1}} \frac{\partial(-H_{k-1})}{\partial t} + \bar{u} \Big|_{-H_k} \frac{\partial(-H_k)}{\partial t} \\ &\quad - \bar{u}^2 \Big|_{-H_{k-1}} \frac{\partial(-H_{k-1})}{\partial x} + \bar{u}^2 \Big|_{-H_k} \frac{\partial(-H_k)}{\partial x} \\ &\quad - \bar{u}\bar{v} \Big|_{-H_{k-1}} \frac{\partial(-H_{k-1})}{\partial y} + \bar{u}\bar{v} \Big|_{-H_k} \frac{\partial(-H_k)}{\partial y} \\ &\quad + (\bar{u}\bar{\omega}) \Big|_{-H_{k-1}} - (\bar{u}\bar{\omega}) \Big|_{-H_k} \end{aligned} \quad (\text{A. 63})$$

**第一層（表層）**

海面の条件式 (A. 38) を用いると，式 (A. 63) は

$$\int_{h_1} \left\{ \frac{\partial \bar{u}}{\partial t} + \frac{\partial \bar{u}^2}{\partial x} + \frac{\partial \bar{u}\bar{v}}{\partial y} + \frac{\partial \bar{u}\bar{\omega}}{\partial z} \right\} dz = \frac{\partial}{\partial t} \int_{h_1} \bar{u} dz + \frac{\partial}{\partial x} \int_{h_1} \bar{u}^2 dz + \frac{\partial}{\partial y} \int_{h_1} (\bar{u}\bar{v}) dz - (\bar{u}\bar{\omega}) \Big|_{-H_1} \quad (\text{A. 64})$$

### 第 k 層

$$\int_{h_k} \left\{ \frac{\partial \bar{u}}{\partial t} + \frac{\partial \bar{u}^2}{\partial x} + \frac{\partial \bar{u} \bar{v}}{\partial y} + \frac{\partial \bar{u} \bar{w}}{\partial z} \right\} dz = \frac{\partial}{\partial t} \int_{h_k} \bar{u} dz + \frac{\partial}{\partial x} \int_{h_k} \bar{u}^2 dz + \frac{\partial}{\partial y} \int_{h_k} (\bar{u} \bar{v}) dz + (\bar{u} \bar{w}) \Big|_{-H_{k-1}} - (\bar{u} \bar{w}) \Big|_{-H_k} \quad (k = 2, 3, \dots, LN - 1) \quad (\text{A. 65})$$

### 第 LN 層 (底層)

海底の条件式, 式 (A. 40) より

$$\int_{h_{LN}} \left\{ \frac{\partial \bar{u}}{\partial t} + \frac{\partial \bar{u}^2}{\partial x} + \frac{\partial \bar{u} \bar{v}}{\partial x} + \frac{\partial \bar{u} \bar{w}}{\partial z} \right\} dz = \frac{\partial}{\partial t} \int_{h_{LN}} \bar{u} dz + \frac{\partial}{\partial x} \int_{h_{LN}} \bar{u}^2 dz + \frac{\partial}{\partial y} \int_{h_{LN}} (\bar{u} \bar{v}) dz + (\bar{u} \bar{w}) \Big|_{-H_{LN-1}} \quad (\text{A. 66})$$

### コリオリ項

コリオリ項については

$$\int_{h_k} f_0 V dz = f_0 \left( \int_{h_k} V dz \right) \quad (\text{A. 67})$$

### 圧力項

z 方向の運動方程式は

$$-g - \frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial z} = 0 \quad (\text{A. 33})$$

z = ζ で P = P<sub>a</sub> とすれば,

$$P = P_a + g \int_z^\zeta \rho dz \quad (\text{A. 68})$$

各層内で密度が一定であると仮定すれば, 第 k 層における圧力 P<sub>k</sub> は

$$\begin{aligned} P_k &= P_a + g \int_{-H_1}^\zeta \rho_1 dz + \sum_{i=2}^{k-1} \left\{ g \int_{h_i} \rho_i dz \right\} + g \int_z^{-H_{k-1}} \rho_k dz \\ &= P_a + \rho_1 g (\zeta + H_1) + \sum_{i=2}^{k-1} \rho_i g (H_i - H_{i-1}) - \rho_k g (z + H_{k-1}) \\ &= P_a + \rho_1 g h_1 + g \sum_{i=2}^{k-1} \rho_i h_i - g (z + H_{k-1}) \rho_k \end{aligned} \quad (\text{A. 69})$$

したがって

$$\frac{\partial P}{\partial x} = \frac{\partial P_0}{\partial x} + \rho_1 g \frac{\partial \zeta}{\partial x} + g \sum_{i=2}^{k-1} h_i \frac{\partial \rho_i}{\partial x} - g (z + H_{k-1}) \frac{\partial \rho_k}{\partial x}$$

1/ρ<sub>k</sub> を掛け, 積分すると

$$\int_{h_k} \frac{1}{\rho_k} \frac{\partial P}{\partial x} = \frac{h_k}{\rho_k} \frac{\partial P_0}{\partial x} + \frac{\rho_1 g h_k}{\rho_k} \frac{\partial \zeta}{\partial x} + \frac{g}{\rho_k} \sum_{i=2}^{k-1} h_i h_k \frac{\partial \rho_i}{\partial x} - \frac{g}{\rho_k} \frac{\partial \rho_k}{\partial x} \int_{-H_k}^{-H_{k-1}} (z + H_{k-1}) dz \quad (\text{A. 70})$$



さらには

$$\int_{h_k} \frac{1}{\rho_k} \frac{\partial P}{\partial x} = \frac{h_k}{\rho_k} \frac{\partial P_0}{\partial x} + \frac{\rho_1 g h_k}{\rho_k} \frac{\partial \zeta}{\partial x} + \frac{g}{\rho_k} \sum_{i=2}^{k-1} h_i h_k \frac{\partial \rho_i}{\partial x} + \frac{1}{2} \frac{g}{\rho_k} h_k^2 \frac{\partial \rho_k}{\partial x}$$

同式の煩雑さゆえ

$$[P_x]_k = - \int_{h_k} \frac{1}{\rho_k} \frac{\partial P}{\partial x}$$

と置くと,

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\rho_1}{h_1} [P_x]_1 = - \frac{\partial P_0}{\partial x} - \rho_1 g \frac{\partial \zeta}{\partial x} - \frac{1}{2} g h_1 \frac{\partial \rho_1}{\partial x} \quad (k=1) \\ \frac{\rho_k}{h_k} [P_x]_k - \frac{\rho_{k-1}}{h_{k-1}} [P_x]_{k-1} \\ \quad = - g h_{k-1} \frac{\partial \rho_{k-1}}{\partial x} - \frac{1}{2} g h_{k-1} \frac{\partial \rho_k}{\partial x} + \frac{1}{2} g h_{k-1} \frac{\partial \rho_{k-1}}{\partial x} \quad (k \geq 2) \end{array} \right. \quad (\text{A. 71})$$

$$[\tilde{P}_x]_k = \frac{\rho_k}{h_k} [P_x]_k + \frac{1}{2} g h_k \frac{\partial \rho_k}{\partial x} \quad (\text{A. 72})$$

と置くと

$$\left\{ \begin{array}{l} [\tilde{P}_x]_1 = - \frac{\partial P_0}{\partial x} - \rho_1 g \frac{\partial \zeta}{\partial x} \quad (k=1) \\ [\tilde{P}_x]_k = [\tilde{P}_x]_{k-1} - g h_{k-1} \frac{\partial \rho_{k-1}}{\partial x} \quad (k \geq 2) \end{array} \right. \quad (\text{A. 73})$$

(A. 73)から $[\tilde{P}_x]_k$ が求まれば,

$$[P_x]_k = \frac{h_k}{\rho_k} \left\{ [\tilde{P}_x]_k - \frac{1}{2} g h_k \frac{\partial \rho_k}{\partial x} \right\} \quad (\text{A. 74})$$

同式より $[P_x]_k$ が求まることになる.

### 水平渦粘性項

次に水平渦動粘性係数項に関しては,

$$\int_{h_k} \left\{ \frac{\partial}{\partial x} \left( v_h \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( v_h \frac{\partial \bar{u}}{\partial y} \right) \right\} dz \sim \frac{\partial}{\partial x} \int_{h_k} v_h \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} dz - \frac{\partial}{\partial y} \int_{h_k} v_h \frac{\partial \bar{u}}{\partial y} dz \quad (\text{A. 75})$$

同式は表層・低層では近似式になっているが, それ以外では等号が成り立つ.

## 鉛直渦粘性項

鉛直渦動粘性係数項については

$$\int_{h_k} \frac{\partial}{\partial z} \left( N_2 \frac{\partial u}{\partial z} \right) dz = \begin{cases} \frac{1}{\rho} \tau_x^s - \frac{1}{\rho} \tau_x^{1,2} & (k=1) \\ \frac{1}{\rho} \tau_x^{k-1,k} - \frac{1}{\rho} \tau_x^{k,k+1} & (k=2,3,\dots,k-1) \\ \frac{1}{\rho} \tau_x^{K-1} - \frac{1}{\rho} \tau_x^b & (k=K) \end{cases} \quad (\text{A. 76})$$

ここに

$\tau^s$  : 風応力

$\tau^{k-1,k}$  : k-1 から k 層の間の摩擦内部応力

$\tau^b$  : 海底摩擦応力

したがって式 (A. 12) を k 層について積分した形は

$$\begin{aligned} \frac{\partial M_k}{\partial t} = & -\frac{\partial}{\partial x} (M_k \bar{u}_k) - \frac{\partial}{\partial y} (M_k \bar{v}_k) + (\bar{u} \bar{\omega}) \Big|_{-H_{k-1}} - (\bar{u} \bar{\omega}) \Big|_{-H_k} \\ & + f_0 N_k + \frac{h_k}{\rho_k} \left\{ [\tilde{P}_x]_k - \frac{1}{2} g h_k \frac{\partial \rho_k}{\partial x} \right\} \\ & + \frac{\partial}{\partial x} \left( v_h \frac{\partial M_k}{\partial x} \right) - \frac{\partial}{\partial y} \left( v_h \frac{\partial M_k}{\partial y} \right) + \frac{1}{\rho} \tau_x^{k-1,k} - \frac{1}{\rho} \tau_x^{k,k+1} \end{aligned} \quad (\text{A. 77})$$

y 方向の運動方程式についても同様に

$$\begin{aligned} \frac{\partial N_k}{\partial t} = & -\frac{\partial}{\partial x} (N_k \bar{u}_k) - \frac{\partial}{\partial y} (N_k \bar{v}_k) + (\bar{v} \bar{\omega}) \Big|_{-H_{k-1}} - (\bar{v} \bar{\omega}) \Big|_{-H_k} \\ & + f_0 M_k + \frac{h_k}{\rho_k} \left\{ [\tilde{P}_y]_k - \frac{1}{2} g h_k \frac{\partial \rho_k}{\partial y} \right\} \\ & + \frac{\partial}{\partial x} \left( v_h \frac{\partial N_k}{\partial x} \right) - \frac{\partial}{\partial y} \left( v_h \frac{\partial N_k}{\partial y} \right) + \frac{1}{\rho} \tau_y^{k-1,k} - \frac{1}{\rho} \tau_y^{k,k+1} \end{aligned} \quad (\text{A. 78})$$

## 粒子追跡モデル

水理実験における流れの状況を検討するため、粒子追跡モデルを適用して数値計算によって流れ場における粒子の動きを追跡した。

### a) 粒子追跡モデルの基礎理論

#### ・粒子追跡モデル

粒子輸送の基礎方程式は、以下の微分方程式の初期値問題を 2 段階の Runge-Kutta 法で解くモデルとなっている。

#### Runge-Kutta 法

一般に 2 段階の Runge-Kutta 法は

$$\left. \begin{aligned} k_1 &= \Delta t f(x_n, t_n) \\ k_2 &= \Delta t f(x_n + k_1, t_n + \Delta t) \end{aligned} \right\} \quad (\text{A. 2. 1})$$

$$\Delta x = \frac{1}{2}(k_1 + k_2) \quad (\text{A. 2. 2})$$

$$x_{n+1} = x_n + \Delta x \quad (\text{A. 2. 3})$$

の形で用いることができる<sup>20)</sup>。

#### 多変数の Runge-Kutta 法

上記の Runge-Kutta 法は、1 変数の Runge-Kutta 法であったが、本論では多変数で取り扱わなければならないので、多変数の Runge-Kutta 法を以下に示す。

$$\frac{dx}{dt} = f(x) \quad (\text{A. 2. 4})$$

$$x(t) = \begin{Bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \\ x_3(t) \\ \dots \\ x_i(t) \end{Bmatrix} \quad (\text{A. 2. 5})$$

$$f(x) = \begin{Bmatrix} f_1(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n) \\ f_2(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n) \\ f_3(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n) \\ \dots \\ f_n(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n) \end{Bmatrix} \quad (\text{A. 2. 6})$$

ここでは、 $x$  は 3 次元位置ベクトル、 $f(x)$  は粒子位置での流速ベクトル、 $\Delta t$  は計算時間間隔である。さらに、以下の初期条件を加えることで多変数における 2 段階 Runge-Kutta 法を得る。

初期条件

$$t(0) = t_0, \quad x(0) = \begin{Bmatrix} x_1(0) \\ x_2(0) \\ x_3(0) \\ \dots \\ x_i(0) \end{Bmatrix} \quad (\text{A. 2. 7})$$

$$\left. \begin{aligned} k_1 &= \Delta t f(x) \\ k_2 &= \Delta t f(x + k_1) \end{aligned} \right\} \quad (\text{A. 2. 8})$$

$$\Delta x = \frac{1}{2}(k_1 + k_2) \quad (\text{A. 2. 9})$$

$$x(t + \Delta t) = x_n(t) + \Delta x \quad (\text{A. 2. 10})$$

### 粒子追跡モデル

本研究で用いる式

$$\left. \begin{aligned} \frac{dx}{dt} &= u + \Delta t \left( u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + \omega \frac{\partial u}{\partial z} \right) \\ \frac{dy}{dt} &= v + \Delta t \left( u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + \omega \frac{\partial v}{\partial z} \right) \\ \frac{dz}{dt} &= \omega \end{aligned} \right\} \quad (\text{A. 2. 11})$$

初期条件

$$X(0) = X_0 \quad (\text{A. 2. 12})$$

$$Y(0) = Y_0 \quad (\text{A. 2. 13})$$

$$Z(0) = Z_0 \quad (\text{A. 2. 14})$$

以上を2段階の Runge-Kutta 法で粒子の位置を予測していく。ここにおける  $u, v, \omega$  はスタガードグリッドのベクトル量が定義される場所の値ではなく、粒子の存在する場所での補間された流速である。

#### ・流速の補間について

粒子位置での流速は粒子近くの流速を用いて内挿する。しかし、同じメッシュ内にある粒子でも位置によって補間に用いられる流速が違ふ。例えば、メッシュ内の Y 方向の位置  $DY$  が水平格子幅  $DS * 0.5$  より大きい場合、粒子位置での  $u$  流速は図 A. 1. 4 のように、粒子の存在するメッシュの流速である  $UC, UE$  とそれより北の流速  $UN, UNE$  で補間される。それに対して  $DY$  が水平格子幅  $DS * 0.5$  より小さい場合は図 A. 1. 5 ように、 $UC, UE$  とそれより南の流速  $US, USE$  で補間される。また、

粒子の  $Z$  方向の位置でも  $u$  の補間値が変わるため、粒子の位置で  $u, v, \omega$  それぞれ 4 種類の補間値がある。

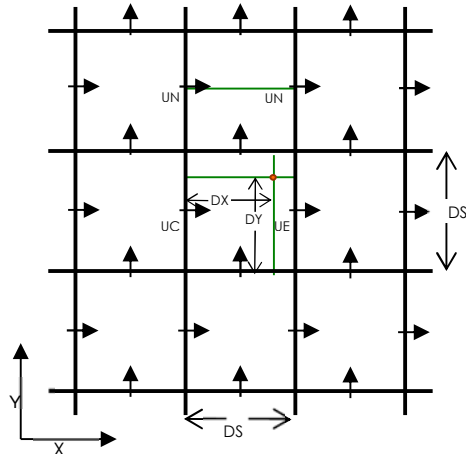


図 A.1.4 粒子位置での流速その 1

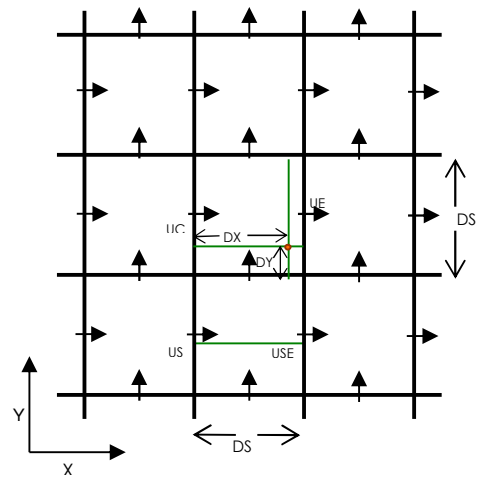


図 A.1.5 粒子位置での流速その 2

### ・境界における取り扱い

#### slip 条件

粒子の存在するメッシュに隣接するメッシュが壁であるとき、粒子位置での流速の補間に壁内部の値を使う。そのとき壁内部の値は、壁外部から外挿するのが適切であるが、壁の内部に埋め込まれる値は、壁上における境界条件を満たしておかなければならない。本研究では、壁上で slip 条件を与えているので、壁内部の流速は以下の式(A. 2. 15)から求められる。

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial y} = 0, \quad \frac{\partial u}{\partial z} = 0 \\ \frac{\partial v}{\partial x} = 0, \quad \frac{\partial v}{\partial z} = 0 \\ \frac{\partial \omega}{\partial x} = 0, \quad \frac{\partial \omega}{\partial y} = 0 \end{aligned} \right\} \quad (\text{A. 2. 15})$$

## 粒子の反射

図 A.1.6 のように壁付近の粒子が次ステップで壁の中にめり込んでしまう場合、めり込む距離  $L$  の分だけ壁と垂直方向に反射させる (図 A.1.7).

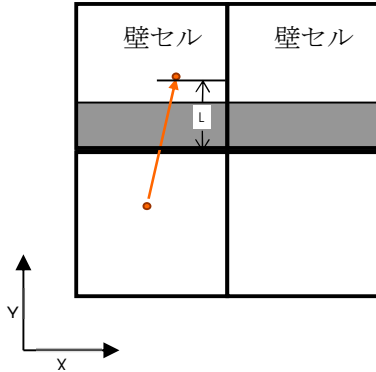


図 A.1.6 粒子の反射その 1

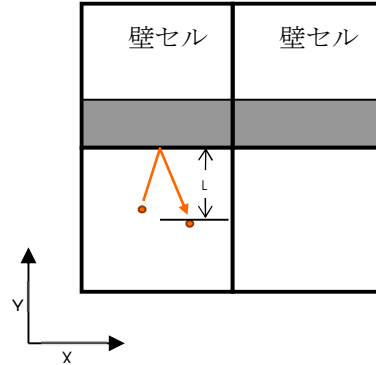


図 A.1.7 粒子の反射その 2

### ・粒子追跡モデル計算フロー

図 A.1.8 に粒子追跡モデルの計算フローを示した。また、以下に概略の計算手順を記述しておく。

#### 1. 計算条件の設定

- ・境界内部の流速を *SLIP* 条件で与えるか、*NO-SLIP* で与えるかを決定する。また、粒子が壁にぶつかったときの反射係数の設定等を行う。

#### 2. 初期粒子位置 $PCLX(0)$ の決定

- ・前の粒子計算ステップで求められた粒子位置を現計算ステップにおける初期粒子位置  $PCLX(0)$  とする。

#### 3. Runge-Kutta の段階ステップ (2 段階)

#### 4. 粒子位置 $PCLX(L-1)$ での流速等を決定

- ・1 段階目においては、初期粒子位置  $PCLX(0)$  での流速やせん断力等を求めることになる。
- ・2 段階目では、1 段階目に推定された粒子位置  $PCLX(1)$  での流速などを求める。

#### 5. 粒子の移動距離 $SPCLXS(L)$ を計算

- ・式 (A.2.11) に計算時間間隔を乗することで、粒子移動距離を計算する。

#### 6. 粒子位置の推定

- ・1 段階目では、 $SPCLXS(L)=PCLX(0)+SPCLXS(L)$  の式から粒子位置を推定する。
- ・2 段階目では、 $SPCLXS(L)=PCLX(0)+0.5 \times (SPCLXS(L-1)+SPCLXS(L))$  から粒子位置を推定する。

#### 7. 粒子の移動距離が水平格子間隔の 2 倍を超えるかどうかの判断

もし超えることがあると、粒子位置の推定が精度よくできないとして計算時間間隔の短縮を促す文章を出力し、計算を途中で打ち切る。

#### 8. 境界条件を考慮した新たな粒子位置の推定

- ・1 段階目では、推定された粒子位置を用いて 2 段階目の流速を求めていく。

・2段階目では、計算された粒子位置が次ステップの粒子位置となる。

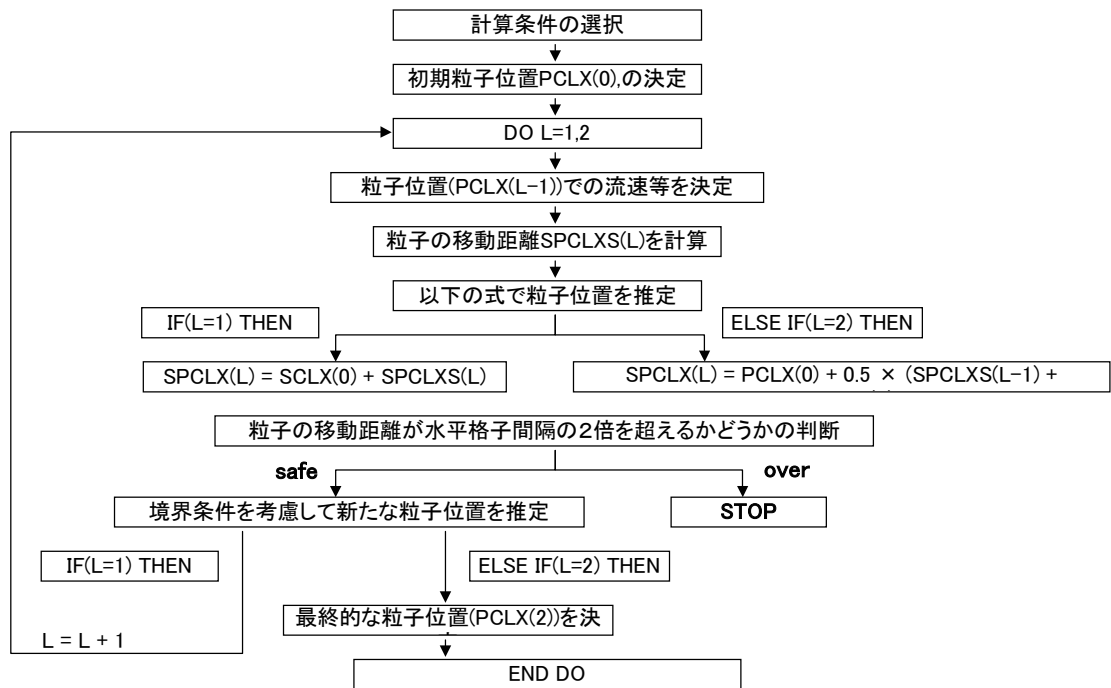


図 A.1.8 粒子追跡モデル計算フロー