

## 流動制御構造物による底質改善技術に関する研究

宮川 昌志

### Research on the Sediment Improvement Technique by Current Control Structure

Masashi MIYAGAWA

Issue of sediment deterioration in semi-enclosed sea for maintaining biological production process has not been solved for many years and must be one of the most challenging themes.

Various methods have been examined to clear this problem, sediment degradation, though, none of the effective methods improving sediment condition in the seabed without any help of external energy such as fossil energy source has not developed yet.

Thus I propose new method, the distinctive structure and new technology, that improves sediment condition by current control at the bottom layer by means of ocean energy, tidal current, for increase of the dissolved oxygen concentration in the bottom layer water.

This structure was designed as an effective generator of upwelling and downward current accelerating vertical mixture of the bottom water mass.

In this study I examined the highly detailed current condition around the structure by both numerical calculation and hydraulic experiment. Result of this survey apparently demonstrates that installation of the structure generates vertical mixture of the bottom seawater.

I hope that this vertical mixture improves sediment condition in the longer term by promoting increase of dissolved oxygen concentration of the bottom seawater.

Furthermore, I propose the newly developed shelter for fragile artificial released juveniles that functions as an efficient hiding space from the predators.

キーワード：魚礁，流動制御，底質改善，水産増殖，底生魚

## 第1章 序論

### 1-1 本研究の背景

我が国の水産物の自給率は 1964 年に 113% であったものが，輸入水産物の増加と国内生産量の減少によって減少を続け，Ministry of Agriculture, Forestry and Fisheries of Japan (2005)<sup>1)</sup>によれば，2005 年には 57% となった．一方，世界の人口は 1970～1972 年の平均で 37 億人だったものが，2000～2002 年の平均では約 61 億人と約 1.65 倍に増加したとされているが (United Nations, 2004<sup>2)</sup>)，Food and Agriculture Organization<sup>3)</sup>によれば，水産物供給量は同時期に 4,237 万トンから 1 億トンへと約 2.36 倍に急増した．United Nations (2004)<sup>2)</sup>によれば，世界人口は 2030 年には約 82 億人に増加するものの，水産物供給量は頭打ちとなると予測されており，世界規模での水産物の供給不足が懸念されている．また，日本の食料自給率は，カロリーベースで 40% と先進国の中で最も低い水準となっており，今後，世界の食料需給がひっ迫する可能性もある中で，食料の安定供給などの観点から，食料自給率の向上を図っていくことが必要となっている．Ministry of Agriculture, Forestry and Fisheries of Japan<sup>1)</sup>によれば，政府は，将来的にはカロリーベースの食料自給率を 5 割以上とすることを目指しており水産物についても，自国 200 海里水域内の沿岸域，特に，一般に外洋よりも高い生産性

をもつ内湾域での漁業生産性をより一層高めることが求められている (Fisheries Agency, 2007<sup>4)</sup>)．

一方，内湾域では，高度成長期における過度な栄養塩負荷により汚染が進み，使用不能となった漁場もある．このような海域では，漁場の底質改善を行う必要があると同時に，基礎生産力を上げるため，人工湧昇流発生構造物の設置による漁場開発が有効である (Takeoka, 1996<sup>5)</sup>)．

例えば，瀬戸内海における生物生産については，富栄養化に強い魚類や種苗放流と資源管理 (漁獲規制) が継続的に行われている魚介類を除いて，近年，減少傾向にある．一例として，香川県における漁獲の状況については，香川水産統計年報<sup>6)</sup>における漁船漁業の生産量を図 1.1 に示す．

カタクチイワシ，アジ類，サバ類，イカナゴなどの多獲性魚類の漁獲量は，昭和 50 年代にピークを迎えたが，その後減少を続け，近年では，横ばいの傾向にある．

永井<sup>7)</sup>によれば，第二次大戦後高度成長期以前の瀬戸内海はマダイやサワラなどの高価格な魚類が豊富な時期であり「マダイの海」と称され，高度成長期にはマダイに代わって，カタクチイワシなどの多獲性魚類が多くなった「イワシの海」となった．その後，カタクチイワシも減ってクラゲが大量発生するようになる「クラゲの海」になり，魚介類の漁獲量は減少したとされ，上記のような香川県における漁獲の状況は，瀬戸内海にお

ける漁獲状況の変遷とよく一致していると考えられる。

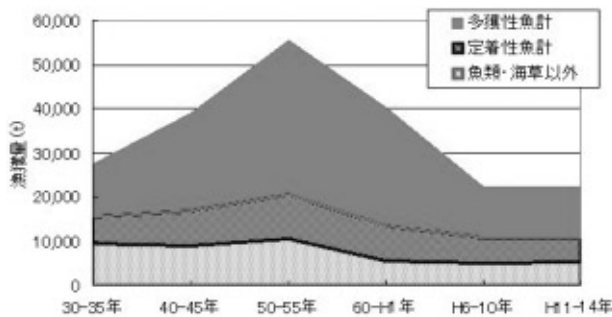


図 1.1 香川県における漁獲量の動向（香川水産統計年報 1））

小川<sup>9)</sup>も瀬戸内海の漁獲量は同様の変動傾向を示していることを指摘している。さらに、瀬戸内海における漁獲量の変動傾向は、それによる一次生産利用量が同傾向で推移しており、これら漁獲量の変動は、主として栄養段階が低い多獲性種（カタクチイワシ、イカナゴ、アサリなど）によってもたらされたものと推論している。

このように、瀬戸内海における富栄養化や海洋汚染の進行により、食物連鎖を含む生態系の変化が起こっていることが主な原因で海域の生物生産（漁獲量）が減少しているという指摘は、多くの研究者から提起されている。

例えば、上<sup>10)</sup>はクラゲの大量発生が海洋生態系の変化によるものと指摘しているほか、高橋<sup>11)</sup>も海洋汚染が進んだために、栄養塩の生物による利用の流れ（栄養塩循環の流れ、または食物網の種間関連の変化）に変化が生じ、クラゲの大量発生や、漁獲量の減少が起こっているという見解を示しており、大森<sup>12)</sup>も同様の指摘をしている。

瀬戸内海における生物生産力を回復させ、持続

的な水産物の利用を図るためには、漁獲量減少の原因を究明することがまず必要であり、その原因を解決するために必要な対策が講じられなければならない。

まず、瀬戸内海において、生物生産力を阻害している大きな要因について考えてみる。その要因として、次の2つの要素が考えられる。

(1) 昭和30年以降の埋め立てによって、急激な干潟域が減少し、貝類資源やアマモを中心とする海藻資源を含む干潟域が生態系と共に消失した。このため、貝類の生息場や魚介類の幼稚魚生息場としての機能と多様な過食性生物による浄化能力も失われ、瀬戸内海の富栄養化の進行と生物生産力の低下に拍車をかけたこと。

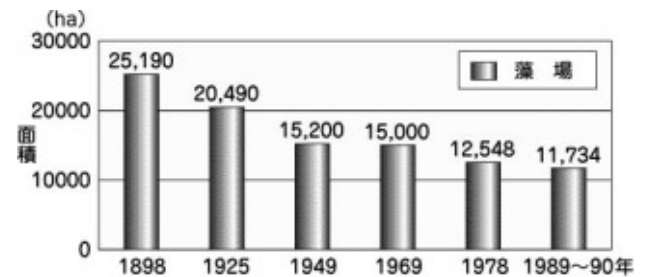


図 1.2 瀬戸内海における干潟面積の推移

(注)：建設省中国地方建設局「瀬戸内海要覧」(1898,1925,1949,1969年)<sup>13)</sup>、

環境庁「第4回自然環境保全基礎調査」(1978,1989~1990年)<sup>14)</sup>による。

(2) また、瀬戸内海の富栄養化と並行して、海水交換の少ない湾奥部や潮流の弱い灘部の底層においては、海域の浄化機能によって浄化しきれなかった栄養塩が沈降、堆積して富栄養化が特に進行しており、夏季の成層の発達によって海底面付

近の酸素飽和度が生物の生息限界以下に減少する貧酸素状態となる現象が発生している。この貧酸素状態の海底面が広域に存在した場合には、そこに生息している底生生物のみならず、海底に物理的に着底せざるを得ない浮遊性の幼生などが壊滅的影響を受けるなど、瀬戸内海の生息環境の悪化を招いていること。

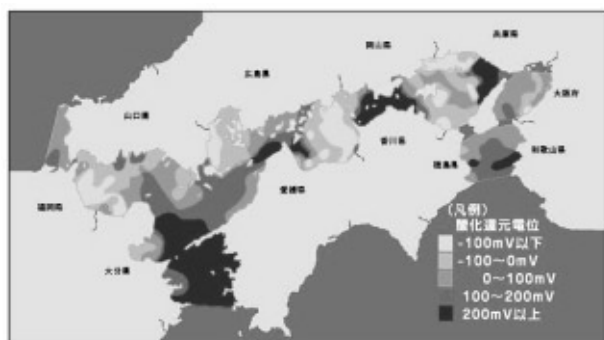


図 1.3 瀬戸内海の底質分布図 (酸化還元電位)

(注)：環境庁「瀬戸内海環境管理基本調査」(平成3年～8年)<sup>15)</sup>による。

以上の2点のうち1点目については、干潟域の浄化機能や生物生産過程における重要性を科学的に評価して、その保全と復元を図る必要があるが、そのためには、より詳細な調査を行いつつ瀬戸内海全体での環境行政の見直しが必要となると考えられ、今回の研究では、除外することとしたい。

次に、2点目の要因に関しては、有機浮泥の堆積と成層の発達による貧酸素水塊の発生を抑制、解消するには、様々な方法が実用化されており、そのような技術を使った対策を講じることで、貧酸素水塊の発生を抑制し、海域での底質を改善することで、生物生産を高めることが急務になって

いる。

海域での底質を改善するための技術として、現在、次のようなものが考えられる。

① 浚渫、② 覆砂、③ 生物や化学物質による底泥中有機物の分解促進、④ 水中に強制的に湧昇流を発生させ海底の海水交換率を高め、有機物の分解を促進させる方法。

このうち、①と②の浚渫と覆砂については、広範囲に実施することで即時的効果が期待できるものの工費が莫大となり経済性に問題があり、なおかつ、長期的には、流況に変化がない限り、再び元のような底質に戻ってしまう恐れが強いうえ、浚渫土砂の処分や覆砂のための土砂の確保などの問題も考えられる。

また、③の生物による有機物の分解の促進については、実験系あるいは一部のごく限られた範囲内では効果があるものの、開放系の広大な海域で安定した効果を得るには至っていない。底生生物を大量投入するような場合には、生態系に対する影響が懸念されるし、最適生物の選択と培養方法、海域への投入方法など、未開発の部分も多い。

一方、④の水中に強制的に湧昇流を発生させ海底の海水交換率を高める方法については、ジェット噴流発生装置やマイクロバブル発生装置、通気装置によるエアレーションなど、外力を注入して強制的に湧昇流を発生させる仕組みは、すでに実用化されているが、これらのシステムは、外部からエネルギーを供給するため、そのランニングコストが永続的に必要となり、経済性に問題が残っているほか、自然エネルギーによる駆動システム



としない限り、地球温暖化に拍車をかけることにもなりかねない。

しかし、潮流などの海洋の内部エネルギーを利用して湧昇流を発生させれば、外部エネルギーを利用しないので、ランニングコストを必要としないだけでなく、化石燃料由来のエネルギーを使用しないため、地球温暖化防止の観点からも問題がないシステムであると考えられる。

このように、海底で上昇流を発生させる流動制御装置として働く構造物を設置し、海水の上下混合促進による底泥への溶存酸素の供給により、底質改善を可能とする技術の開発が急務となっている。

また、このような構造物を実際の海域に適用する場合には、その底質改善機能だけではなく、水産資源増殖機能についても、詳しく調査して評価しておく必要がある。それは、底質改善の目的が環境の改善だけでなく、それに伴う生物資源の増産を狙っているためであり、そのために本構造物を活用した水産資源増殖に資する機能を、できるだけ多く用意することが求められる。

筆者は、本構造物が海底に設置されること、その設置場所が、底生魚類にとっての生息場ともなっていることに着目した。これまで、底生魚類であるキジハタ、タケノコメバルなどの稚魚が香川県海域で放流されてきているが、その放流にあっては、放流時の天敵による食害などによる急激な減耗がマイナス要因となって、放流効果にうまく結びついていないのが現状である (Miyagawa et al<sup>16</sup>)。

そこで、本構造物が有している詰石ユニットを、これら底生魚類の放流時の一時的な隠れ場所として利用できないかの検討も必要な調査と考えられた。

一方、多孔質体ブロックの有する餌料生物の驚異的な培養機能に注目し、それを隠れ場の素材として利用すれば、稚魚にとって隠れ場所と餌場という重要な要素を同時に確保できるため、その点についても調査検討が必要だと考えられた。

## 1-2 本研究の目的

本研究の目的は、次の2点に大別される。

1点目は、潮流という海洋の内部エネルギーを利用して湧昇流を発生させ、底質を改善しうるシステムを開発することである。そのために、海底の流れを制御して湧昇流を発生させる構造物について、数値計算と水理実験によって詳しく構造物周りの流況を調査し、本構造物による流動制御状況を把握するとともに、底層での湧昇が起こっていることを確認することである。

さらに、実際の海底に実験構造物を設置して、流動制御による溶存酸素量の変化や底質の経時変化を調査し、底層での溶存酸素量の増加や構造物の影響範囲内における底質の改善が、実際に起こるのかどうかを確認することである。

2点目は、現地調査によって、プランクトンの増殖機能、詰石ユニットと多孔質体ブロックの餌料生物増殖機能、詰石ユニットによる魚類の蟄集状況等を確認し、本構造物がもつ水産資源増殖機能を評価することである。

また、底生魚類の幼稚魚の放流効果を高めるため、詰石ユニットの代わりに多孔質体ブロックを使用したユニットを提案して、その効果について検討することである。

このとき、基礎的な調査として、水槽実験での様々な多孔質体ブロックの配置における稚魚と天敵生物の行動について検討し、最適な配置計画を考案することも求められる。

### 1-3 既往の研究と本研究の位置づけ

#### (1) 富栄養化について

門谷<sup>17)</sup>によれば、富栄養化による被害の例として、赤潮による漁業被害、貝毒プランクトンの赤潮による二枚貝の毒化、1980年代からの播磨灘における底層の貧酸素化と底泥の還元化、大型珪藻の秋季から春季にかけての大発生による貧栄養化と養殖ノリの品質低下、枯死した大型珪藻を核として沈降した懸濁物がヌタとして底びき網に付着することによる漁業への悪影響などが指摘されている。

#### (2) 生物生産と瀬戸内海における鉛直混合の意義

武岡<sup>18)</sup>は海域における基礎生産と鉛直混合の役割について次のように解説している。

海域での基礎生産の大きさを決める主な条件として、栄養塩濃度があるが、この決定に対しては、海水流動という物理過程が大きな役割を果たしている。海の基礎生産は、有光層で行われるが、生産された粒子態の有機物の一部はプランクトンの死骸や糞として、光の届かない底層へと沈降し、そこで分解して栄養塩に戻る。このため、海には

栄養塩を下層に運ぶ働きがあり、有光層への十分な栄養塩の供給がなければ、基礎生産は低下する。有光層への栄養塩の供給機構としては、河川からの流入と海水の鉛直混合による下層からの回帰がある。河川の影響外の海域では鉛直混合が基礎生産の大きさを決める重要な要因となる。

ここで、海水の鉛直混合を起こす要因として、潮流と風と海面の冷却がある。反対に、鉛直混合を妨げる作用として働く要因として、海面の加熱と淡水の供給（河川水の流入と海面への降雨）がある。このため冬季は海域全体で鉛直混合が発達するが、夏季には多くの海域で鉛直混合が弱まり、加熱されて軽くなった上層水が重い下層水の上に乗った成層状態ができる。しかし、潮流の強い海峡部周辺では夏季においても鉛直に混合した状態が持続する。

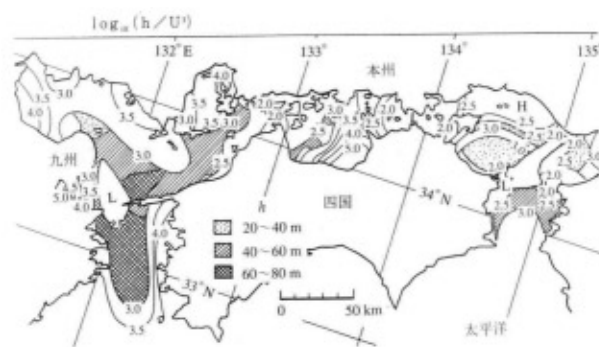


図 1.4 瀬戸内海における  $\log_{10}(h/U^3)$  の分布 (柳<sup>19)</sup>)

$h$  は水深 (m),  $U$  は M2 潮流振幅 (m/s).

図 1.4 に示す  $\log_{10}(h/U^3)$  は、鉛直混合の強さの尺度で、この値が大きいほど成層が発達しやすいことを表しており、瀬戸内海では 2.5 程度より小さい場所が鉛直混合域、それより大きい場所が成

層域になるといわれており，2.5 程度の境界部分は，潮汐フロントとなる．ここで，鉛直混合域は，夏季においては栄養塩を上層に回帰させる重要な役割を持っており，瀬戸内海の高い生物生産は，このような鉛直混合域の存在によって実現されていると考えられる．

さらに，海峡部と成層域の境界では潮汐フロントが形成され，そこでは水平方向の熱輸送と鉛直混合域とが関連しあって成層域上層から下層への熱輸送経路（ヒートバイパス）が形成されると考えられる．また，これとは逆方向の流れとして，成層域下層の豊富な栄養塩が上層に輸送される経路も考えられ，栄養塩バイパスと呼ばれている（図 1.5 参照）．

また，ヒートバイパスは成層域の成層の発達を抑制する効果も持っており，もし，このようなバイパスがなければ，成層がより強くなると考えられる．このように，瀬戸内海における海峡部のような鉛直混合域は，生物生産という面において，極めて重要な役割を果たしていると考えられる．

本研究では，人為的に鉛直混合を促進することで底質の環境の改善を行おうとしているが，将来的には，このような鉛直混合の促進をより大規模に行うことで鉛直混合域を増やし，海域における栄養塩の供給を促進することで生物生産を高めることも検討する価値があると考えられる．

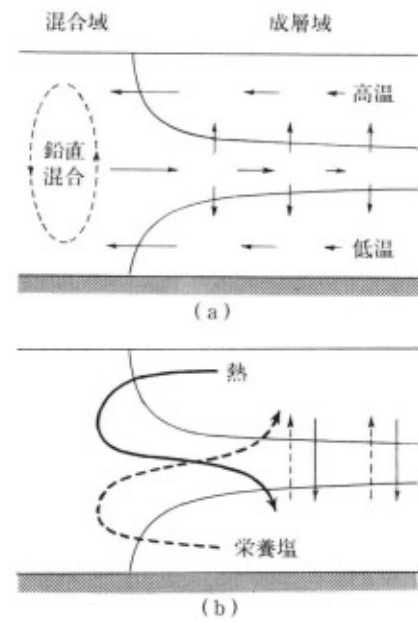


図 1.5 鉛直混合域と成層域を含む鉛直断面での流れ (a) と熱，栄養塩の輸送構造 (b) の模式図 (柳<sup>19)</sup>)

### (3) 栄養塩の循環

松田<sup>20)</sup> は，瀬戸内海における海域ごとの水質，底質と生物生産の特徴を評価したうえで，環境管理の方針について次のように提言している．

図 1.6 に示すように海域ごとに低次生産を支える環境のレベルと低次生産様式に大きな開きがある．今後，環境管理を行う中で，海域間の傾斜を緩和する方向に方針を定める必要がある．内湾性が強く底質の悪化が明らかな海域では，富栄養化の程度を少なくとも底層水の貧酸素化や底質の劣化が起きない程度までに改善する．これによりベントス生態系が回復し，エビ，カニ，貝類，底魚などの資源がよみがえるだろう．このことは，これら回復した生物資源の生育過程で有機物の分解に寄与するだけでなく，漁獲されることで海から

窒素・リンを除去することになり、広い意味での浄化機能を果たすことになる。

果を図 1.7 に示す。昭和 60 年 1 月から平成 15 年 6 月までの 18 年 6 ヶ月の情報を整理した結果、底層の溶存酸素濃度が、底生生物の種類数や密度が著しく減少するとされる 3mg/L を下回った回数は、播磨灘で 16 回、燧灘で 15 回であった。このように灘部においては、夏場、主に 8 月から 9 月、年によっては、7 月や 10 月にも 3mg/L を下回ることがあり、年によっては、2mg/L を下回ることもあった。

海域	流入負荷	底質貯留	栄養塩		Chl.a	濁り	一次生産	動物プランクトン	二次生産	多様性魚類
			TN	TP						
紀伊水道	L	L	M	M	L	L	L	L	L	H
大阪湾	H	H	H	H	H	H	H	H	H	L
播磨灘	H	H	H	H	H	M	H	H	H	M
備前瀬戸	H	L	H	H	L	H	L	M	M	M
燧灘	M	M	M	M	M	H	M	H	H	M
安芸灘	L	L	L	L	L	M	L	L	L	L
広島湾	M	H	M	M	H	M	H	M	M	L
伊予灘	L	L	L	L	M	L	M	L	L	L
周防灘	M	H	M	L	L	M	L	M	M	L

H 相対的に高い   
 M 中程度   
 L 相対的に低い

図 1.6 瀬戸内海各海域における水質、底質と生物生産の特徴。松田<sup>20)</sup>

(4) 貧酸素水塊・香川県海域の溶存酸素濃度の推移（浅海定線調査の灘別データ）

瀬戸内海の灘部における貧酸素水塊の発生現象については、大阪湾、播磨灘、燧灘、広島湾、周防灘などで確認されており、上述した  $\log_{10}(h/U3)$  が 2.5 を超える海域（成層域）とよく一致している。生物に対する悪影響については、その水塊の持つ酸素濃度と広がり、さらには水塊の分布した期間が問題となるが、成層状態でいったん低酸素濃度の水塊が発生すると、台風や秋季の鉛直混合などによって海水の上下混合が起こらない限り、長時間滞留すると考えられる。このような貧酸素水塊の滞留は、底生生物の存在を脅かしていることは十分考えられ、浜野<sup>21)</sup> は燧灘でのシヤコの浮遊幼生の着底が阻害されていることを報告している。

ここで、香川県における浅海定線調査データ<sup>22)</sup> について、溶存酸素濃度の値を灘別に整理した結

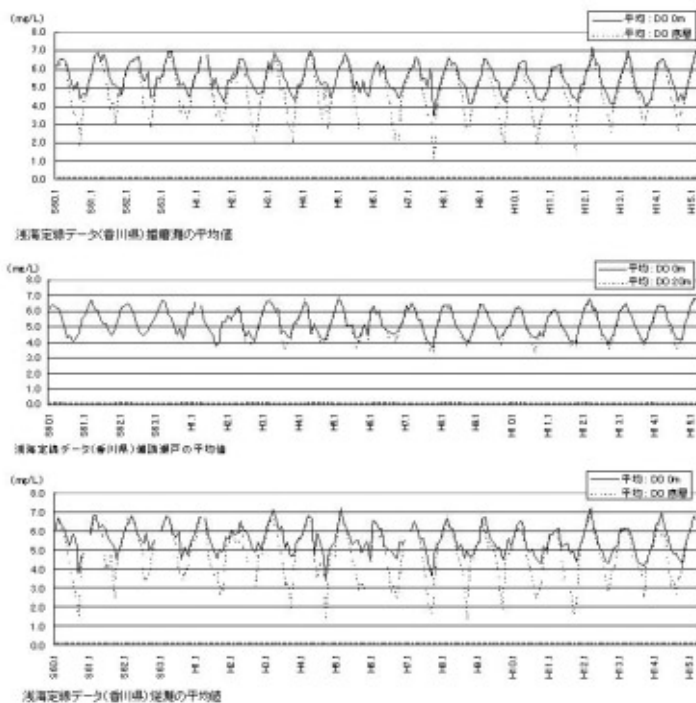


図 1.7 香川県浅海定線調査における灘別の平均溶存酸素濃度の推移（香川県水産試験場<sup>22)</sup>）



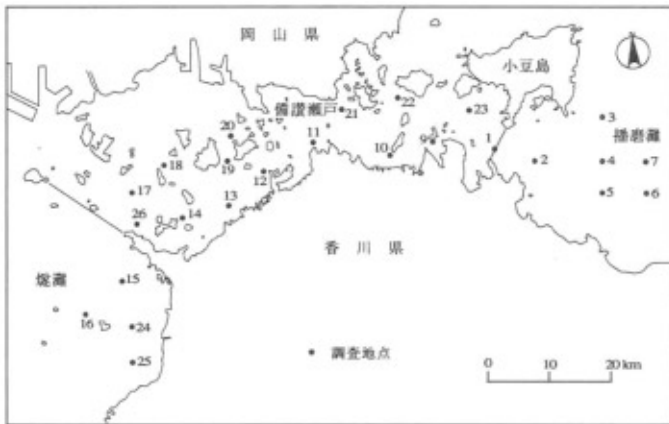


図 1.8 香川県浅海定線調査定点位置図（香川県水産試験場<sup>22)</sup>）

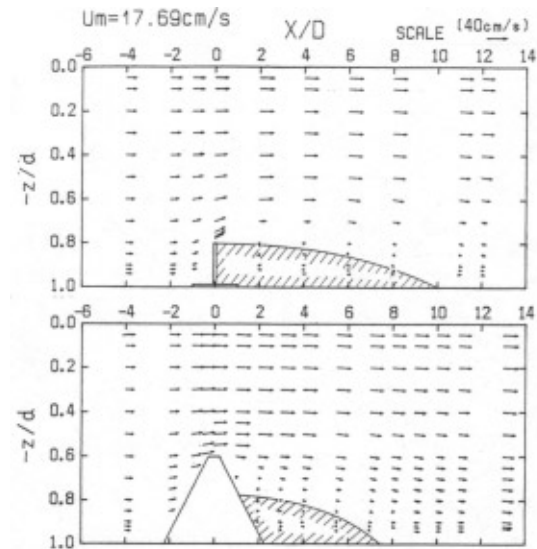


図 1.9 流速ベクトル図（鶴谷ら<sup>23)</sup>  $U_m = 17.69\text{cm/s}$ ）

(5) 流動制御機能を有する構造物

まず、流況制御技術に関しては、上昇流を発生させるタイプの構造物として、様々な種類のもものが考案されている。そのうち代表的なものを表 1.1 に示す。

表 1.1 上昇流を発生させる構造物

Type	Characteristics
L shape	Upwelling current in front of the structure was observed, though, wake area behind the structure was rather small (Tsuruya et al, 1987) .
Cylindrical	Stronger upwelling current and wider wake area behind the structure were observed. The area of the wake stretches several times longer than the height of the structure (Ono et al, 1999) .
V shape (X shape)	Complicated upwelling and downward flow that provides acceleration of vertical mixture were observed. Wake area behind the structure was very long up to 20 <sup>th</sup> longer than the height of the structure (Suenaga et al, 2004) .

まず、鶴谷ら<sup>23)</sup>によると、従来の魚礁構造物では流動制御が困難で、また、捨石マウンドや直立壁（L型タイプ構造物）では、影響範囲が再付着点で構造物高さの約7~10倍程度後方とされている。いずれの実験においても2次元的な検証がなされているが、3次元的な検証は今後の課題とされている。

また、円柱型構造物については、上昇流を発生させている状況についての、水理実験や数値計算の事例はあるものの、その後流域がどの程度後方まで到達しているかについての検討はなされていない（小野<sup>24)</sup>、稲葉<sup>25)</sup>）。

V字型構造物については、浅枝ら<sup>26)</sup>が、水理実験によって、構造物後方への渦流の形成状況について、詳しい検討を行っている。

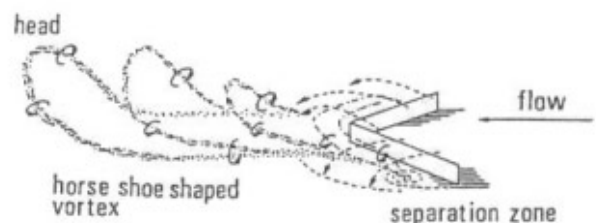


図 1.10 V字型構造物の流況パターン（改変）  
浅枝ら：V字型構造物による鉛直循環流と成層中での効率，海洋開発論文集，1991<sup>26)</sup>



また、末永ら<sup>27)</sup>が、V字型構造物を中央部に有している構造物について、水槽での水理実験における流況変化とレイノルズ応力の分布について検証しており、その結果、構造物高さの20倍後方まで影響範囲が及んでいるとされている。

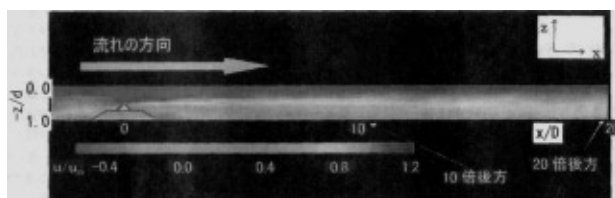


図 1.11 実験構造物周りの流況変化（末永ら<sup>27)</sup>）

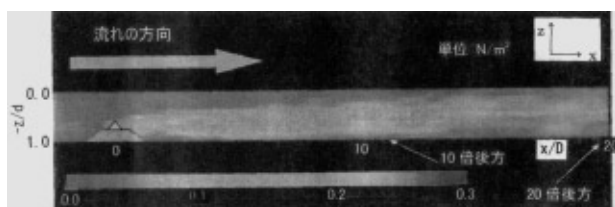


図 1.12 実験構造物周りのレイノルズ応力の分布（末永ら<sup>27)</sup>）

#### 1-4 本研究の構成と概要

本研究では、これら3タイプの構造物の中で、最も湧昇流発生機能が強く後方での鉛直混合が強く起こっていると考えられるV字型構造物について、その流動制御機能を、数値計算と水理実験によって検証したほか、フィールド実験として、極めて高い生産性を誇る瀬戸内海（Takeoka, 1996<sup>18)</sup>）の中で、水産養殖業が盛んであり、なおかつ、水質、底質の悪化による赤潮や貧酸素水塊が頻繁に発生している香川県を実験海域に選定し、実験構造物を設置した場合の底質環境の推移を調査した。

また、上記の背景を踏まえ、沿岸域における水産資源の増殖を推進するため、本研究の対象構造物が有する流動制御機能によって派生する様々な有用な機能について研究することとした。

まず、本構造物の流動制御機能による構造物周辺の流況変化によって餌料性のプランクトンの増殖機能について明らかにした。

また、既に、過去の研究によって、詰石ボックスにおける餌料生物培養機能<sup>28,29)</sup>が明らかとなっている。

一方、キジハタやタケノコメバルなどの瀬戸内海では有用性の高い底生魚類などの放流事業においては、稚魚を放流した際に、天敵生物の食害による急激な減耗が主な要因となって、放流効果が発現しにくいという問題点が指摘されている（宮川<sup>16)</sup>）。

しかし、本構造物に搭載している詰石ユニットにこれらの底生魚類の稚魚を放流した場合には、数ヶ月近く高い頻度で多数の放流魚が潜水調査で確認されており、同ユニットには放流魚の保護機能があるのではないかと考えられている。

本研究では、この点についても調査するとともに、詰石ユニットに使用されている自然石よりも、より餌料生物増産機能の高い多孔質体パネルを使用した、新たな保護ユニットを提案しようとした。

#### <参考文献（第1章）>

- 1) 農林水産省,2005: 食料需給表.
- 2) United Nations, 2004: World Population Prospects, The 2004 Revision, pp.8.

- 3) Food and Agriculture Organization, 2004: FISHSTAT Plus (Version 2.3), Universal software for fishery statistical time series.
- 4) 水産庁,2007: 水産基本計画.39pp.
- 5) 武岡英隆,1996: 瀬戸内海と世界の閉鎖性水域との比較,瀬戸内海の生物資源と環境(岡市友利・小森聖児・中西弘編),恒星社厚生閣,東京,pp.218-231.
- 6) 中四国農政局香川統計情報事務所,1952-2002.: 香川水産統計年報.
- 7) 四国新聞社,2000: 連鎖の崩壊(四国新聞社編), 四国新聞社,高松, pp. 241-243.
- 8) T. Nagai, 2003: Recovery of fish stocks in the Seto Inland Sea. Mar. Pollut. Bull. **47**(1-6),126-131.
- 9) 小川春樹,1996: 瀬戸内海の漁業による一次生産利用量,瀬戸内海の生物資源と環境(岡市友利・小森聖児・中西弘編),恒星社厚生閣,東京,pp.97-100.
- 10) 上真一・上田有香,2004: 瀬戸内海におけるクラゲ類の出現動向と漁業被害の実態,水産海洋研究 **68**(1),9-19.
- 11) 高橋正征,2004: イワシの海とクラゲの海,アクアネット,有限会社湊文社,5,50-51.
- 12) 大森 信,2003: 限りある海の生物資源,みどりいし, **14**,1-5.
- 13) 建設省中国地方建設局,1898,1925,1949,1969: 瀬戸内海要覧.
- 14) 環境庁,1990: 第4回自然環境保全基礎調査.
- 15) 環境庁,1996: 瀬戸内海環境管理基本調査.
- 16) Miyagawa, M., Yamaoka, K., Kurokawa, K., Isshiki, T., Yamada, T. and Suenaga, Y., 2004: Research on the functions of the structure enhancing marine resources, The Sunport Japan Korea International Maritime Seminar, 12pp.
- 17) 門谷 茂,1996: 富栄養化による漁業被害,瀬戸内海の生物資源と環境(岡市友利・小森聖児・中西弘編),恒星社厚生閣,東京,pp.30-32.
- 18) 武岡英隆,1996: 基礎生産と物理過程,瀬戸内海の生物資源と環境(岡市友利・小森聖児・中西弘編),恒星社厚生閣,東京,pp. 41-47.
- 19) 柳 哲雄,1994: 人工湧昇流発生構造物,土木学会誌, **79**(14): 14-16.
- 20) 松田 治,1996: 基礎生産から魚類生産への変換,瀬戸内海の生物資源と環境(岡市友利・小森聖児・中西弘編),恒星社厚生閣,東京,pp. 63-71.
- 21) 浜野龍夫,2000: 瀬戸内のシャコ,住民が見た瀬戸内海(環瀬戸内海会議著),(株)技術と人間, pp. 114-120.
- 22) 香川県水産試験場,1985-2003: 浅海定線調査結果.
- 23) 鶴谷広一・松延嘉國・惟住智昭・柳嶋慎一,1987: 湧昇流を発生させるための水中設置構造物背後の流れと乱れ特性,港湾技術研究所報告, **26**(2), 137-138.
- 24) 小野正順・中谷誠志・鷺沢栄二郎・出口一郎,1999: 人工魚礁周辺の流れ場の解析と魚の蝸集に関する基礎的研究,海岸工学論文集,土木学会, **46**, 941-945.
- 25) 稲葉浩治・中村 順平・細野 成一・高木 儀昌・佐久田 昌昭,1990: 無方向性人工湧昇流発生構造物に関する研究(その2 円筒型構造物),日本建築学会大会学術梗概集, pp.1157-1158
- 26) 浅枝隆・其阿弥喜嗣・吉田一男,1991: V字型構造物による鉛直循環流と成層中での効率,海洋開発論文集,土木学会, **7**, 387-392.

- 27) 末永慶寛・河原能久・山本直樹・田中陽二, 2004 :  
 海域生物環境改善技術の開発, 土木学会論文集, 土木学会, **755**(VII-30), 29-36.
- 28) Suenaga, Y., Miyagawa, M., Hoshino, T., Yamanaka, M., Yasuoka, K., Suenaga, A. and Kimigawa, K., 2005 : Techniques of creating fishery ground using the marine resources enhancement structure in and around the Seto-Inland Sea, 水圏環境工学論文集, **1**, 15-24.
- 29) Yasuoka, K., Suenaga, Y., Yamanaka, M., Hoshino, T., Kakegawa, H. and Ahn, H., 2006 : 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.

第2章 流動制御構造物による流れの制御状況の検討

2-1 数値計算による流動解析

2-1-1 数値計算の方法

数値計算は、上流側の流入部と下流側流出部の2面を開境界とする海域に近似させた流れ場において、上流側から一定の流速を与えて流れの計算を行った(図 2.1). 実験構造物、直線状構造物としての長方体と何も置かない場合の3通りのケースにおける流れの状況を比較した(図 2.2).

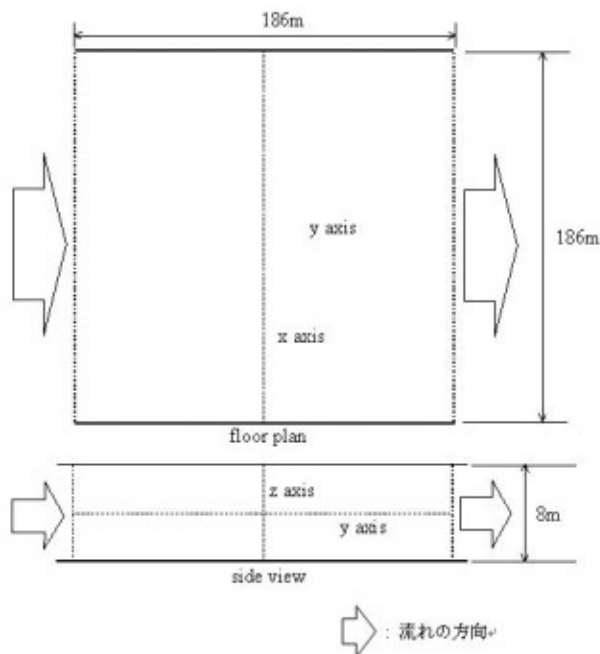


図 2.1 数値計算の流れ場の概要

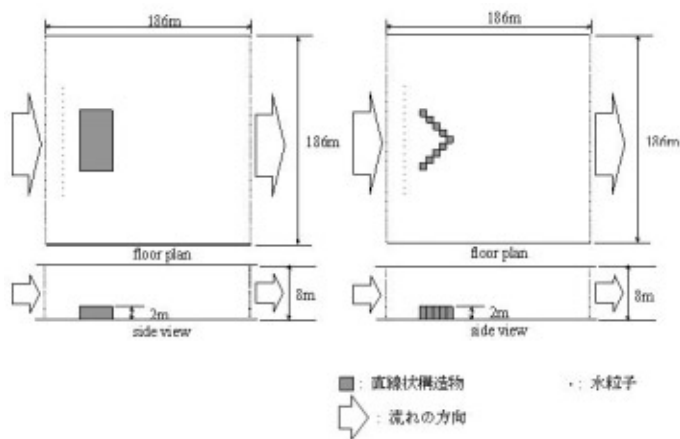


図 2.2 数値計算の流れ場に設置した実験構造物の概要

a) 支配方程式

流動解析については、連続の方程式、運動方程式、自由表面の式、熱エネルギーの輸送方程式、塩分の輸送方程式、海水の状態方程式を基本とした静水圧近似を仮定したマルチレベルモデル（末

永ら, 2004<sup>1)</sup>; Fujiwara et al, 1997<sup>2)</sup>) を採用した (式(1)~(7)).

ここで,  $\mathbf{u}$  は水平 2 次元流速ベクトル,  $\nabla_h$  は水平微分演算子,  $(\mathbf{u} \nabla_h) \mathbf{u}$  は水平方向の移流,  $\mathbf{w}$  は鉛直流速,  $f$  はコリオリパラメータ,  $T$  は水温,  $Cl$  は塩素量,  $\rho$  は海水の密度,  $g$  は重力加速度,  $\eta$  は平均水面を基準とした自由表面位置 (鉛直方向を正),  $H$  は水深,  $\nu_h$ ,  $\nu_v$  はそれぞれ水平・鉛直渦動粘性係数,  $K_{Th}$ ,  $K_{Tv}$  はそれぞれ水温に関する水平・鉛直拡散係数,  $K_{Ch}$ ,  $K_{Cv}$  はそれぞれ塩分に関する水平・鉛直拡散係数,  $k$  は鉛直単位ベクトル (上向きを正) である.

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} + (\mathbf{u} \nabla_h) u + \frac{\partial(uw)}{\partial z} + fk \times u \\ = -\frac{1}{\rho} \nabla p + \nabla_h \cdot (\nu_h \nabla_h u) + \frac{\partial}{\partial z} (\nu_v \frac{\partial u}{\partial z}) \end{aligned} \quad (1)$$

$$\nabla_h \cdot \mathbf{u} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (2)$$

$$p = \int_z^\eta \rho g dz \quad (3)$$

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \nabla_h \cdot \int_H^\eta \mathbf{u} dz = 0 \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial T}{\partial t} + \nabla_h \cdot (\mathbf{u} T) + \frac{\partial(wT)}{\partial z} \\ = \nabla_h \cdot (K_{Th} \nabla_h T) + \frac{\partial}{\partial z} (K_{Tv} \frac{\partial T}{\partial z}) \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial Cl}{\partial t} + \nabla_h \cdot (\mathbf{u} Cl) + \frac{\partial(wCl)}{\partial z} \\ = \nabla_h \cdot (K_{Ch} \nabla_h Cl) + \frac{\partial}{\partial z} (K_{Cv} \frac{\partial Cl}{\partial z}) \end{aligned} \quad (6)$$

$$\rho = \rho(T, Cl) \quad (7)$$

b) 構造物による流れの制御状況

・計算条件

本モデルでは, 基本的には時間・空間共に中央差分法 (リーブ・フロッグ法) を用いているが, 移流項の差分スキームは空間的に上流差分もしくは中央差分のいずれかを選択できる. 一般的には, 移流項では上流側の物理量を用いる上流差分スキームを用いるので, 本計算でも上流差分スキームを用いた. 表 2.1 に基礎方程式の数値計算手法について示す.

表 2.1 離散化手法

離散化手法	FDM
移流スキーム	2次精度風上差分
その他の空間微分	2次精度中心差分
時間微分	2次精度中心差分

初期値として, 現地観測結果に基づき, 一方の開境界に底層から表層に向かって流速が大きくなるように流速を与えた.

また, 水温・塩分については, 実際の実験構造物を設置した屋島湾の湾口部での観測結果を参考にし, 表層から底層まで一様とし, それぞれ 12.5°C, 31.5 を与えた. 表 2.2 に数値計算で与えた値を示す.

表 2.2 計算条件

パラメータ		開境界流速 (m/sec)	
コリオリ係数	$8.218 \times 10^{-5} (\text{rad/sec})$	0-1m	0.64
海面摩擦係数	0.0013	1-2m	0.58
境界面摩擦係数	0.0001	2-3m	0.54
海底面摩擦係数	0.0026	3-4m	0.51
水平渦動粘性係数	$1.0 (\text{m}^2/\text{s})$	4-5m	0.48
卓越風	なし	5-6m	0.45
水温初期値	12.5(°C)	6-7m	0.42
塩素量初期値	31.5	7-8m	0.38
水平拡散係数	$10 (\text{m}^2/\text{s})$		
鉛直拡散係数	$0.0001 (\text{m}^2/\text{s})$		

## c) オイラーラグランジュ法

流れの制御状態を把握するため、計算領域における粒子の動きをオイラーラグランジュ法によって追跡した。

数値計算によって、実験構造物の流動制御状況を推定した。推定方法としては、2方向の開境界を持つ流動場において、1方向から一定流速を与えて流動場における流れを計算し、その中央部に構造物を設置した場合とそうでない場合の粒子の移動状況を粒子追跡プログラムによって把握する方法を用いた。このとき、構造物として方形ブロックと実験構造物の流動制御パネルに近似した構造物を配置して計算を行い、流れの制御状況を比較した。

## 2-1-2 数値計算結果

本研究では、海底に流動制御構造物を設置した場合に湧昇流による上下混合が発生して、底層の溶存酸素条件が改善し、底質の改善につながるかどうかを検討しようとしている。そのため、流れの制御機能のうち、構造物後方における上下混合が起こるかどうかを検証していく。

数値計算においては、構造物の存在によって、構造物後方の流れの変化を定量的に評価し、かつ、可視化手法についても検討した。

これまでの研究で、本実験構造物により高さの20倍程度後方まで後流域や渦の影響があるとされている(末永ら, 2004<sup>1)</sup>)。

また、V字型構造物の後流域の形成に関しては、図2.3に示すとおり、水理実験によってその状況が把握されている(浅枝ら, 1991<sup>3)</sup>)

本実験構造物は、中央部に、流れを遮るように垂直に配置した流動制御パネルによって、どの方向からの流れに対しても流動制御機能を発揮するよう設計されている。

しかし、構造物に当たる流れは、一時点においては、一方向からの流れに限定される。流動制御パネルは上から見るとX字型をしているが、一方向の流れに対して有効に機能するのは、そのうちの1個のV字型の部分である。

そこで、本研究では、V字型構造物の流動制御機能が本構造物の流動制御機能を代表すると考えて、評価することとした。

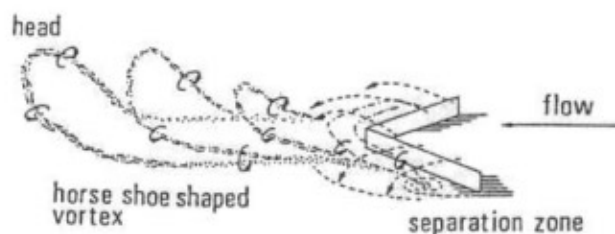


図 2.3 V字型構造物の流況パターン (改変)  
浅枝ら, 1991<sup>3)</sup>



V字型構造物の後流域の発生状況は、図 2.3 に示すように、上向きの上昇力を持つ馬蹄形の細長い渦流が周期的に下流に向かって形成され、渦の脚の周りに内側で上向き、外側で下向きの循環が生じるため全体として流れ方向に伸びる鉛直の強い循環流が形成されることが、水理実験で明らかにされている（浅枝ら、1991<sup>3)</sup>）。

本研究では、同様な条件での、流水中のV字型構造物周囲の流れの数値計算結果から、このような流れの状況を検証した。

なお、ここでは特に、「流動制御」を「流れに対し構造物後方において流れの方向を変化させること。」と定義して論を進めたい。

我々は単位格子幅 6m、流れの幅 186m のモデルを使用し、9個の直方体をV字型に並べ（本研究ではこれを「擬似V字型構造物」と呼ぶ。）、実際のV字型構造物の形状に近似させ、流動制御状況を把握することとした（図 2.4）。

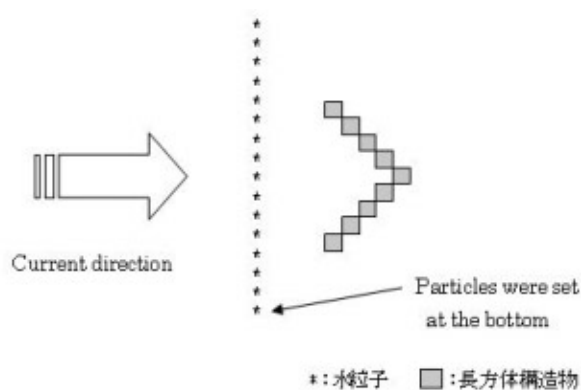


図 2.4 数値計算における粒子の設置位置図

擬似V字型構造物に使用した直方体1個の大きさは $6 \times 6 \times 2\text{m}$ とし、全体のスケールは、幅 54m、

長さ 30m、高さ 2m とした。実際の海域では、本構造物を 9~10 基を近接させて横並びに設置されることが多いことから、横方向の長さを実機サイズに合わせた。このようなスケールでの計算例は、現実の漁場造成規模に即しており、重要であると考えた。

また、流れに対して垂直に設置された直線状構造物が流れに与える影響を把握して、V字型構造物の流動制御状況と比較するため、流れ場の底部に直方体を設置した場合の数値計算を行った。このときの直方体の大きさは、擬似V字型構造物と同規模の幅 60m、長さ 30m、高さ 2m とし、同時に、何も設置しなかった場合の計算も行った。

数値計算の結果、直線状構造物を設置した場合、その後方には、構造物の後流域にあたるような下流に伸びる上昇流や鉛直循環流は認められなかった（図 2.5）。また、何も設置しなかった場合は、水粒子は、ほぼ平行に移動し、上昇流や鉛直循環は全く認められなかった。（図 2.5~2.8 は、y 軸方向中央断面を示している。）

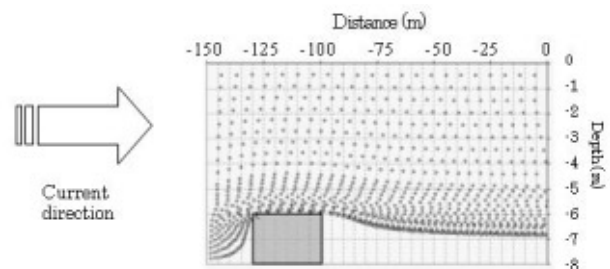


図 2.5 直線状構造物周囲の粒子の軌跡

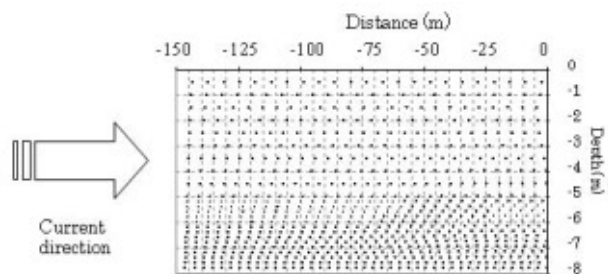


図 2.6 物体を置かない場合の粒子の軌跡

一方、擬似V字型構造物においては、構造物の後方へのやや流速の速い上昇流（図 2.7 の図中、構造物の後端頂上部から右斜め上に向かう流れ）や継続した緩やかな上昇・下降流（同図中、擬似V字型構造物後方において右斜め下や右斜め上に向かっている流れ）といった複雑な流れが構造物後方に形成された。

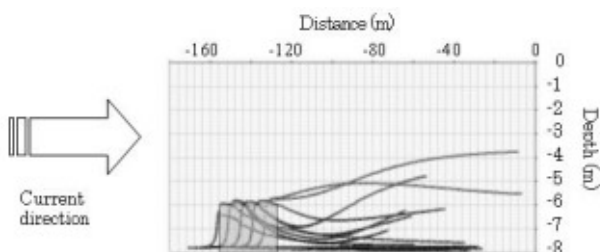


図 2.7 擬似V字型構造物周囲の粒子の軌跡

また、水と同じ比重の粒子を、構造物中央部後方の底上、流れと同方向の直線上に 11 個置いた場合、下流側上方に引き上げられる挙動を示した（図 2.8）ことから、構造物の後方に置かれた水粒子が流動制御によって上方に引き上げられることが示唆された。

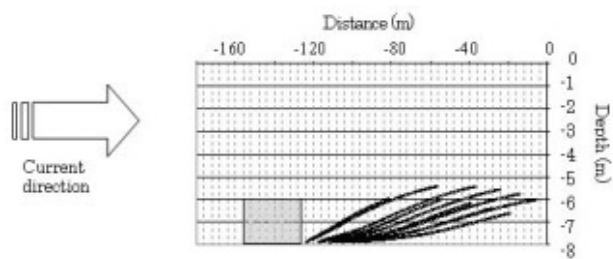
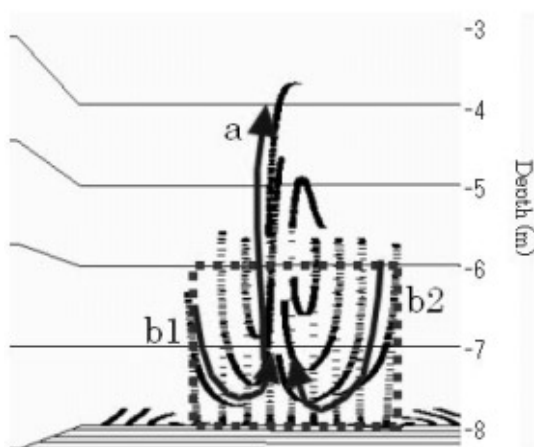


図 2.8 擬似V字型構造物後方の底層に置かれた粒子の軌跡



(流れの方向は、奥側から手前側へ。)  
 [Dotted box] : 擬似V字型構造物。  
 a : 上層での早い後方への流れ。  
 b1, b2 : y軸に向かって下降して上昇する流れ。

図 2.9 擬似V字型構造物後方の流れの状況

図 2.9 は3D図で、視点は擬似V字型構造物後方のy軸上の水深7mの地点で、下流側から構造物を見ている。構造物は灰色破線の長方形で示した。黒破線は、擬似V字型構造物前方（視点から見ると構造物の向こう側）の底上、流れに対し水平方向90°の直線上に置いた17個の水粒子の軌跡を表している。灰色矢印線は、代表的な粒子の流れを表した。流れは奥から手前に向かって流れている。水粒子の一部は、擬似V字型構造物の壁

の中央部を乗り越え、上層を流れて行く（矢印 図 2.9 a）。一方、V字型構造物の壁の外縁部を乗り越えた粒子は、一旦下方に向かった後、y 軸側に収束しつつ再び上昇した（矢印 図 2.9 b1,b2）。

この計算結果は、（末永ら，2004<sup>1)</sup>）が、水理実験におけるレイノルズ応力の分布状況から把握した構造物による後流域の形成状況として、下流側へ形成される渦の軸方向と流れの主流方向が平行な位置関係にあるという指摘とよい一致を示しているほか、（浅枝ら，1991<sup>3)</sup>）によって示された、上向きの上昇力を持つ細長い渦流が下流に向かって形成され、渦の脚の周りに内側で上向き、外側で下向きの循環が生じるため全体として流れ方向に伸びる鉛直の強い循環流が形成される（図 2.3）という現象とよい一致を示している。

以上の結果から、構造物の後方で鉛直循環が起こっていることが推察されたが、よりはっきりとその現象を確認するため、底層に置かれた水粒子がどのように上昇するかを計算した。

このときの計算結果を図 2.10 に示す。

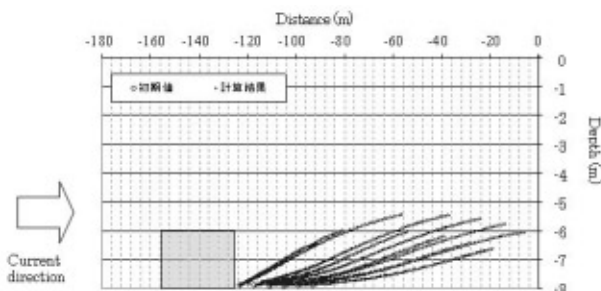


図 2.10 V字型配列構造物後方の流れの状況（側面）

このように、数値計算結果では、構造物後方の

底層に設置された水粒子は、上層に向かって上昇することが確認された。

以上の結果から、数値計算では、流動制御機能を持つ構造物によって、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

### 2-2-1 可変型開水路の実験方法

実験は、可変型開水路において流速 10cm/秒を与え、流れを視覚化するために、染料を流し込む方法を用いた。1/25 スケールの実験構造物模型、それと同じ高さの直方体のブロックを使用し、構造物周辺の流れの状況を把握した（図 2-11）。

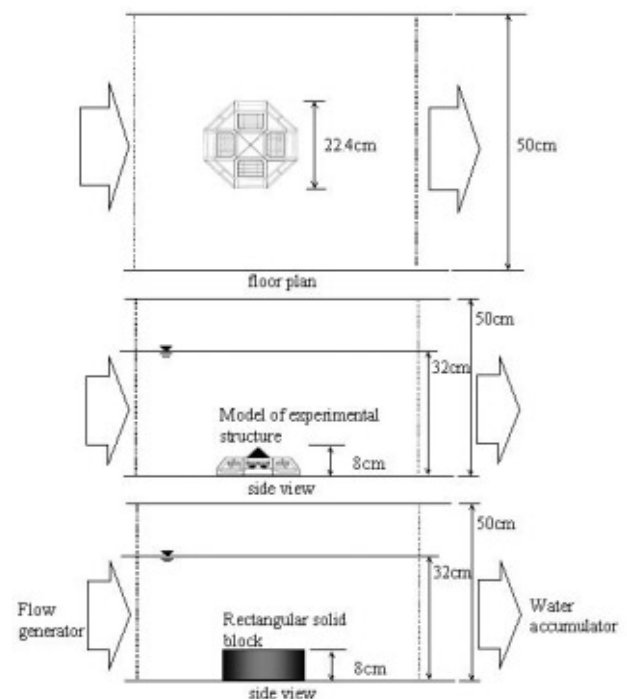


図 2-11 可変型開水路における実験施設と実験構造物

なお、実物大構造物は、第 3 章の図 3.3, 3.4 に示すとおり、縦横約 5.6m、高さ 2m で、4 個のコンクリートブロックで中央部の流動制御用垂直パネル（本研究では「流動制御パネル」と呼ぶ。）を囲むように組み合わせた構造となっている。各コンクリートブロックの天井部には自然石や餌料生物培養用の多孔質体ブロックを収容できるバスケットを備えており、蛸集生物のための隠れ場と餌料培養の機能を併せ持つよう設計されている。

本構造物の流動制御パネルは、上下左右の各方向からの流れに対してその機能を発揮できるように、上から見ると上下左右に対称となっている。例えば、 $0^\circ$  方向からの流れに対しては右半分の V 字型の部分で流動制御を行い、 $180^\circ$  方向からの流れに対しては左半分の部分で流動制御を行う。また、 $90^\circ$ 、 $270^\circ$  方向からの流れに対しても同様である。

#### 2-2-2 水理実験結果

水理実験結果について、構造物の周囲の流れの状況を図 2.12, 2.13 に示す。

図 2.12 では、直線状構造物（直方体）の構造物周囲の流れの状況を示した。

実験の結果、構造物を乗り越えた流れは、構造物背後の限られた部分で渦流が認められるものの、下流に伸びるような後流域は認められず、流れは上昇することなく構造物後方を緩やかに下降しつつほぼ平行に流れた。この結果は、使用した構造物の水平方向のスケールが異なるものの、図 2-5 に示した数値計算結果とよい一致を示した。

この結果から、直線状構造物（直方体）は流動制御機能をほとんど持たないことが示唆された。



図 2.12 水槽での水理実験での直線状構造物周囲の流れの状況

図 2.13 では、実験構造物の模型を置いた場合の流れの状況を示した。

実験構造物では、中央部に配置されたパネル（流動制御パネル）の前方に、強い上昇流が存在している。また、構造物の後方においては、上層と下層の流速が異なっていた。上層の流速は下層より速く、そのうえ、上層の速い流れに引きずられるようにして、下層から上向きの流れが形成され、継続した複雑な上昇・下降流が形成された。

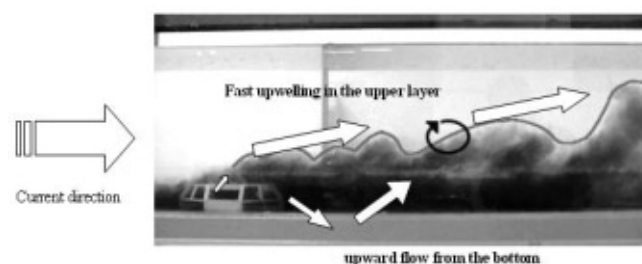


図 2.13 水槽での水理実験における実験構造物の周囲の流れの状況

この実験結果は、数値計算結果（図 2-7）と比較しても、強い上層流や後方での下降流と上昇流

を伴った渦の形成が認められるなど、よい一致を示している。

次に、写真 2.1 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。



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

写真 2.1 染料法による構造物後方の流れの状況

構造物の側面底層を通過した染料が、構造物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、写真 2.1 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 (図 2.9) と同様の動きを示している。

以上の結果から、本実験構造物が、その流動制御機能によって構造物後方における鉛直混合を促進する機能を持つことが示唆された。

#### <参考文献 (第 2 章)>

1) 末永慶寛・畔柳昭雄・高木儀昌, 1997: 海域制御構造物による海域環境変化の定量的研究,

香川大学農学部学術報告, 49(1), 55-62.

2) 藤原正幸・末永慶寛・中田英昭・永澤亨・山田東也, 1997: オイラー・ラグランジュ法によるマガレイ卵・仔魚輸送の数値実験, 水産工学, 34(2), 147-154.

3) 浅枝隆・其阿弥喜嗣・吉田一男, 1991: V 字型構造物による鉛直循環流と成層中での効率, 海洋開発論文集, 土木学会, 7, 387-392.

### 第 3 章 流動制御構造物による底質改善効果の検討

#### 3-1 後流域における鉛直混合の促進と底層での溶存酸素量の増加

##### 3-1-1 対象海域

香川県東部に位置する半閉鎖的な内湾である屋島湾の湾口部を実験海域に選定した。屋島湾では瀬戸内海における他の内湾同様、富栄養化が進行しており、しかも、湾口部や湾内では水産養殖業が盛んに営まれていて、夏季には頻繁に赤潮が発生している。我々は養殖漁場に隣接していて栄養塩の負荷の影響を受けやすく、同時に、地形的に窪んだ海底であるためにやや底質が悪化しており、なおかつ、湾口部に近いことから潮流によって一定の流速が得られる場所として、図 3.1, 図 3.2 に示す位置を選択した。設置場所の水深は約 12m であった。



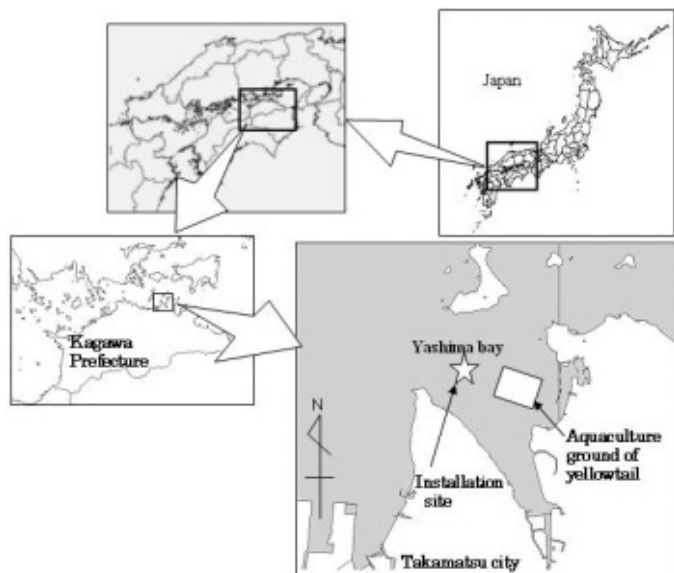


図 3.1 実験構造物の設置場所

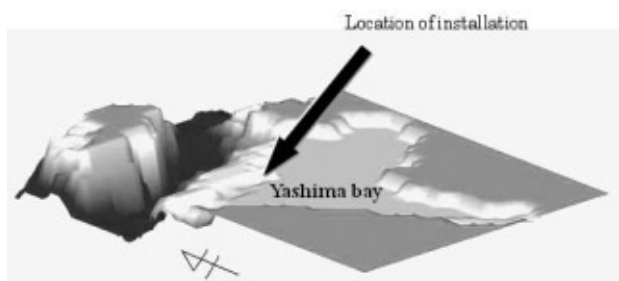
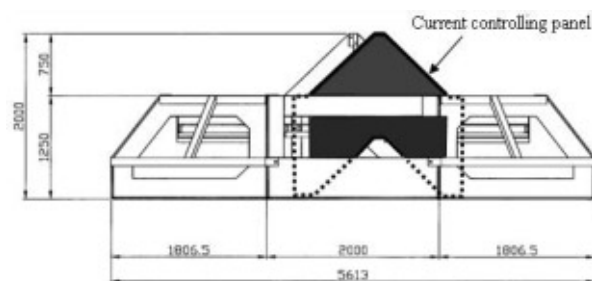
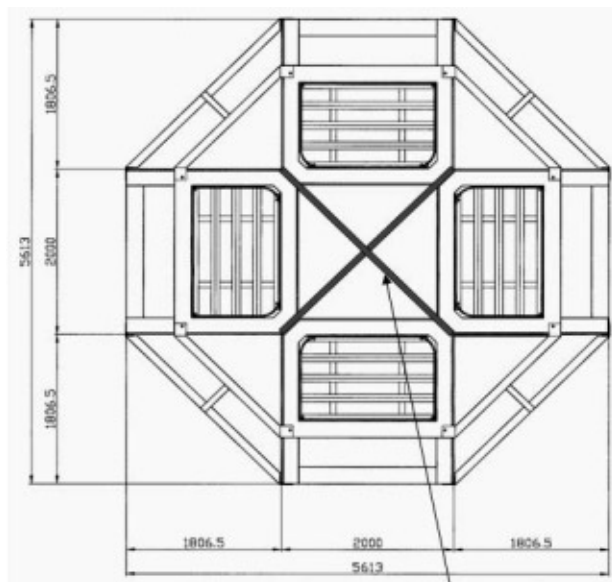


図 3.2 屋島湾の海底地形と設置場所



(単位: mm)

図 3.4 実験構造物の平面図, 側面図

### 3-1-2 構造物の設置

図 3-3, 図 3.4 に示す構造物を 2004 年 8 月 26 日に設置した。

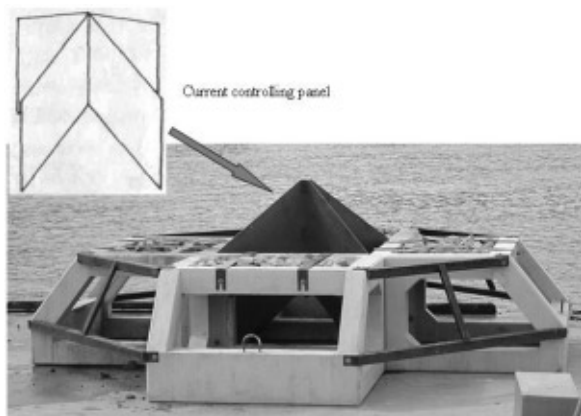


図 3.3 実験構造物

### 3-1-3 構造物設置後の調査

実験構造物の流動制御による底層水の上下混合によって、底層への酸素の供給が行われていることを確認するため、実験構造物の影響範囲（構造物から半径 40m の範囲）内：実験区と範囲外：対照区において、底層から表層までの溶存酸素量の鉛直分布を、2006 年 8 月と 2007 年 8 月の 2 回、クロロテック（ALEC 電子社製 ACL 1183-PDK）により測定した。

### 3-1-4 結果の検討

実験区と対照区における溶存酸素量の鉛直分布を図 3.5 に示す。底層（8～12m）における溶

存酸素量は、2006年8月と2007年8月のいずれの調査においても、実験区の平均値：3.4mg/l(2006)、3.2mg/l(2007)が対照区の平均値：2.5mg/l(2006)、2.4mg/l(2007)より統計的に有意に高かった (P < 0.02).

このことから、実験構造物の流動制御によって促進された底層水の鉛直混合によって、底層水の溶存酸素量が増加したことが示唆された。

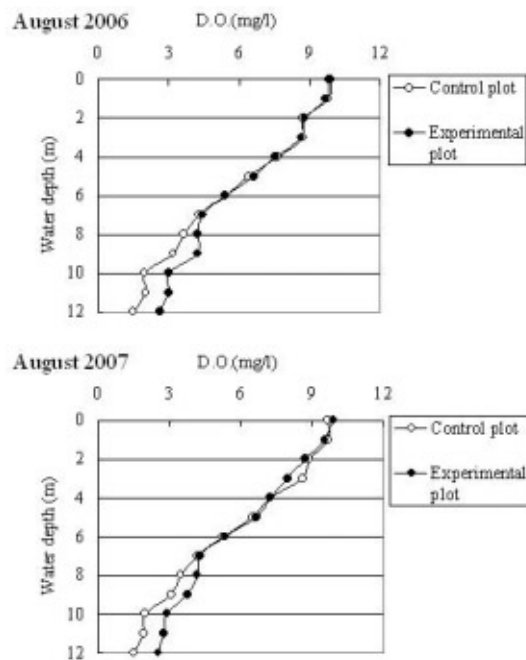


図 3.5 底泥上の溶存酸素量の鉛直分布

### 3-2 影響範囲内における底質環境の変化

#### 3-2-1 調査方法

構造物周辺の底泥における構造物の影響を把握するため、底泥サンプルを構造物の影響範囲内(実験区)と影響範囲外(対照区)の2地点で、潜水して、又はエクマン採泥器によって採取し、COD、硫化物、酸化還元電位を分析した(図 3.6)。本構造物の影響範囲は、構造物高さの20倍後方

までであることが示されていることから(末永ら、2004<sup>1)</sup>)、構造物から40m以内の影響範囲内の地点と、構造物から60m離れた十分に影響範囲から外れた地点を採取地点に選んだ。

調査地点では、潮流が下げ潮最強時には図 3.6における流れの方向(東向き)に卓越することから(村上、2005<sup>2)</sup>)、調査点を実験構造物から東方向に設定した。

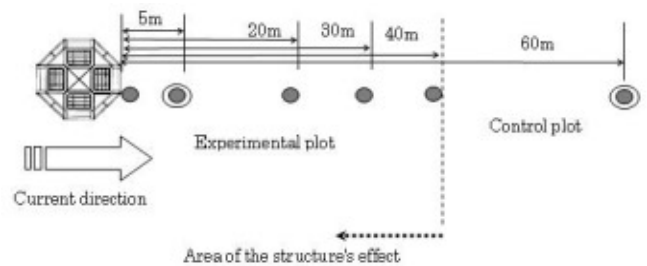


図 3.6 フィールド実験での実験構造物設置位置と採泥地点の概要

- : 底泥と底層水の採取地点
- ◎ : 最も多く計測した地点

サンプルの分析方法は、表 3.1のとおりとした。

表 3.1 分析方法

Analysis	Method
COD (chemical oxygen demand)	Oxygen consumption by permanganic acid potassium salt
Sulfide	By the method of steam distillation and iodimetry
Oxidation-reduction potential	Measured using HM-21P manufactured by DKK-TOA Corporation
Dissolved oxygen	JISK0101-32.1

## 3-2-2 結果の検討

設置された構造物周辺の底泥の調査結果を、図 3.7～図 3.9 に示す。

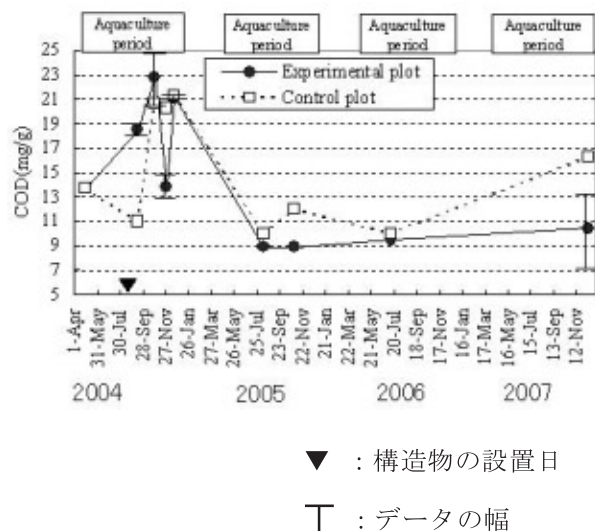


図 3.7 底泥中のCODの変化

底質のCODについては図 3.7 に示すとおり、2004 年 8 月の実験構造物を設置した直後に実験区での値が 18.5mg/g と対照区より高くなったが、その後同年 11 月には 13.9mg/g と急減し、逆に対照区の値が 20.3mg/g と高くなった。2005 年以降は、実験区の方が対照区よりやや低い傾向が続いたが、2007 年 12 月の調査では、実験区において(平均値, 9.8mg/g)対照区(16.7mg/g)よりも有意に低い値となり( $P < 0.01$ )、構造物の設置効果が確認された。

調査地点は、海底における小規模な盆地状の地形となっており、実験構造物はその地形の底の部分に設置されている(実験区と対照区の間は、1/60 の海底勾配となっている.)。このため、実験構造物周辺は浮泥が堆積しやすい環境条件となってい

る。

また、調査地点周辺には、魚類養殖場があり、養殖期間中は養殖魚の食べ残しや糞などによる負荷がかかっている。

図 3.7 に示した各養殖期間の後半では、養殖による負荷の影響で測定値が高くなる傾向が窺え、2005 年以降、対照区では測定値が 10～16 と大きく変動しているが、実験区では 9～11 程度で安定していた。

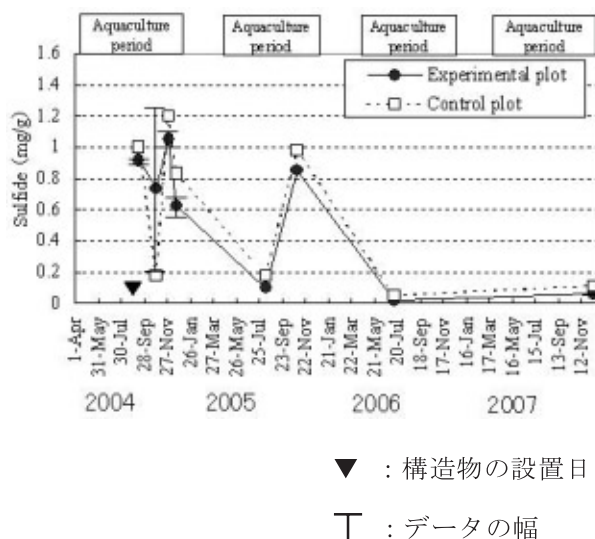


図 3.8 底泥中の硫化物の変化

硫化物では、2004 年秋季以降、実験区の方が対照区よりやや低い値を示したものの、その差はわずかであった(図 3.8)。2007 年 12 月の実験区では(平均値, 0.06mg/g)、対照区(0.12mg/g)に比べ有意に低い値となった( $P < 0.01$ )。

また、酸化還元電位については、図 3.9 に示すとおり 2006 年までは、実験区と対照区の間で明瞭な差は認められなかったが、2007 年 12 月の測定結果において、実験区では(平均値,

-100.76mV), 対照区(-209.8mV)に比べ有意に高い値となった( $P < 0.01$ )。

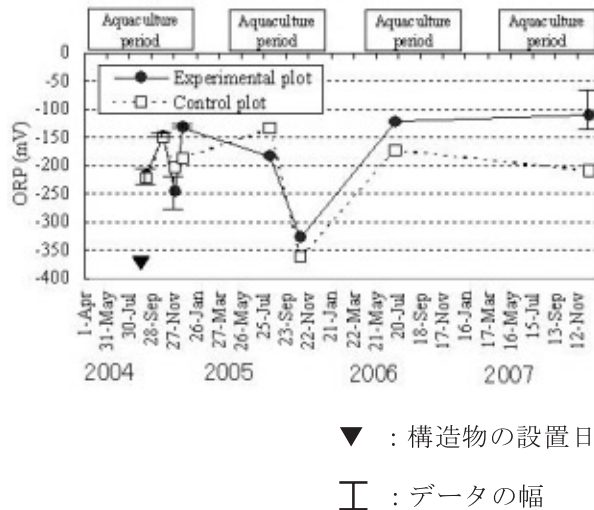


図 3.9 底泥中の酸化還元電位の変化

柳, 2001<sup>3)</sup>によれば, 硫酸還元は-200mV程度で起こり始めるとされており, 対照区の平均値が-205.4mVであったことから, 実験区域周辺の底泥は嫌氣的な状態であったと考えられるが, 本実験構造物を設置したことで, 94mV程度の改善が見られた. 2007年12月に底泥を採取した際に, 対照区の底泥からは強い硫黄臭がしたが, 実験区のものからはほとんど硫黄臭がしなかったことはこの結果を裏付けていると考えられた.

本研究では構造物設置後3年以上に渡って底質に対する影響を調査した. 設置後1年間では何れの測定項目についても, 実験区, 対照区を問わず, 短い期間で値が変動した. 一方, 夏から秋に測定を行った2005~2006年では, 測定項目によってパターンは異なったものの, 実験区, 対照区間で明確な違いは得られなかった. しかしながら,

冬季のデータである2007年では, 特にCODとORPでは, 実験区で良好な結果が得られ, 構造物の設置が底質を改善する可能性が示唆された.

今回の研究では, サンプル数の問題から2006年までに得られた結果を評価することが出来ないが, 図3.7~3.9から判断する限り, 構造物設置の明確な効果は見られない. 即ち, 効果が顕在化するまでに3カ年を要したことになる. 底質に対しては, 近傍に位置する養殖場からの負荷(給餌に伴う残餌や糞の供給など)が影響していると考えられ, それが効果の顕在化までの期間に影響を与えたことは想像に難くないものの, そのことを示すだけの調査は今回行っていない.

今後, 季節的な変動を含めて, 更に調査を継続し, 底質改善効果の推移を把握していきたい.

#### <参考文献(第3章)>

- 1) 末永慶寛・畔柳昭雄・高木儀昌, 1997: 海域制御構造物による海域環境変化の定量的研究, 香川大学農学部学術報告, 49(1), 55-62.
- 2) 村上卓也, 2003: 屋島湾の海水流動に関する研究, 平成15年度卒業論文, 香川大学工学部.
- 3) 柳哲雄, 2001: 沿岸海洋学〔第2版〕, 恒星社厚生閣, 東京, pp.135-136.

## 第4章 流動制御構造物の水産資源増殖機能の検討

### 4-1 プランクトンの増殖機能の確認

本実験構造物周辺における恒常的な流れの状況変化(上昇流の発生など)に伴ってプランクトン

の分布状況が変化し、魚類の餌料生物として重要な動物プランクトンが増加する可能性があると考え、実際の海域に設置した構造物周辺の餌料生物の分布状況についても調査した。調査時期は8月で、餌料生物はプランクトンネット（北原式定量ネット）を用い、構造物の直上部から水面まで、調査点について1回ずつ鉛直曳きで採集し、個体数と沈殿量を測定し、同時に種の同定を行った。図 4.1 に採集した動物プランクトンの個体数を示す（実験区の値は構造物の影響範囲内の4地点の測定結果の平均値。対照区は、1地点の測定値とした。）。

この採集方法の場合、構造物の上方のプランクトンを採集しており、構造物の遮蔽効果によって増集したものは除外できていると考えられる。

結果として、構造物の影響範囲内での平均採集個体数は、影響範囲外の対照区の約2倍であった。

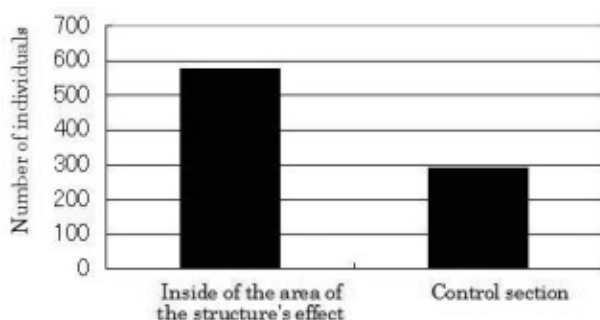


図 4.1 動物プランクトンの個体数の比較

図 4.2 に構造物周辺で採集した動物プランクトン沈殿量（動物プランクトンの量）を示す。

動物プランクトン沈殿量も個体数の場合と同様に、対照区の2倍程度であった。

採集されたプランクトンは、節足動物の蔓脚類（フジツボなど）のノープリウス期幼生など本邦沿岸域の普通種が優先していた。

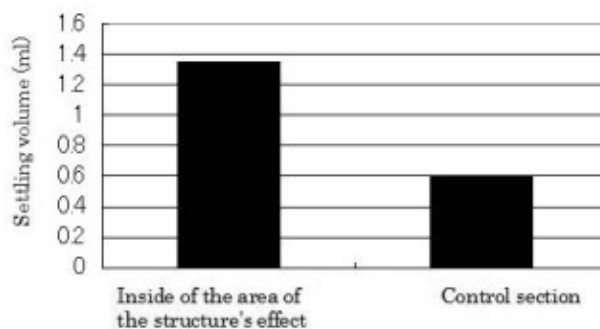


図 4.2 動物プランクトンの沈殿量の比較

#### 4-2 詰石ユニット・多孔質体ブロックの餌料生物増産機能の確認

末永ら、2005<sup>1)</sup>は、詰石ユニットにおける選好性餌料生物（付着した生物の中で、魚類の餌料となりうる小型生物）の増産機能について検討した結果、次のような結果を得ている。

自然石を実海域に設置し、4年経過した時点での選好性餌料生物の着生量は、約 1,000 g/m<sup>3</sup>であった。

一方、Yasuoka et al, 2006<sup>2)</sup>は、多孔質体パネル（空隙サイズ：φ30～40mm）について同様の実験を行い、僅か4ヵ月後の時点で、選好性餌料生物の着生量が約 5,700 g/m<sup>3</sup>であったことを報告している（図 4.3）。



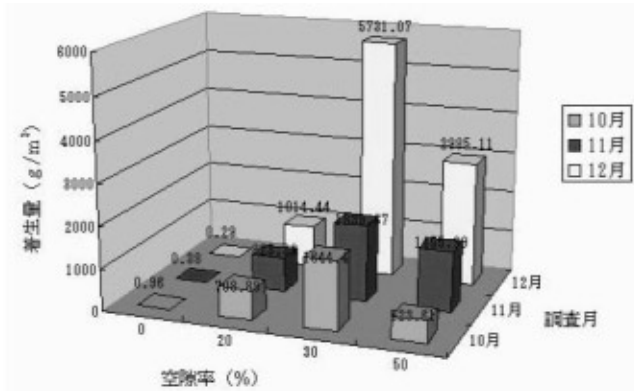


図 4.3 選好性餌料生物着生量 (g/m<sup>3</sup>)

Yasuoka et al, 2006<sup>2)</sup>

このときの生物個体数は、143 千個体ほどであり、餌料生物 1 個体の平均重量は、約 40mg 程度であった (図 4.4)。

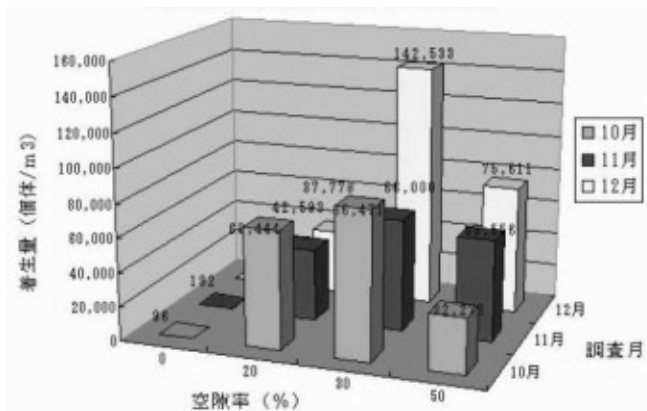


図 4.4 選好性餌料生物着生量 (個体/m<sup>3</sup>)

Yasuoka et al, 2006<sup>2)</sup>

例えば、底生魚類の稚魚で、0 歳魚で放流される時点での体重は 10g 程度であり、このときの 1 日当りの摂食量は、体重の 1% 程度であるから、0.1g となる。

放流魚は、水槽実験で確認したところ、1 パネル当たり 20 尾程度が潜伏できると考えられたので、

それらが 1 日に要求する餌料生物量は 2g 程度となる。

一方、多孔質体パネルの標準的なサイズが  $0.3 \times 0.3 \times 0.06\text{m} = 0.0054\text{m}^3$  であることから、パネル 1 枚当りの餌料生物着生量は、設置後 4 ヶ月で、概ね 30 g ( $5,700\text{g} \times 0.0054$ ) となる。

従って、放流魚にとっては当面の餌料環境としては十分なものと考えられる。

また、餌料生物は、経時的に増加していく傾向にあること、天然海域では、天然魚によって餌料生物は利用されながら、なおかつ増加してきていることなどから、放流魚が天然魚に替わって、発生した餌料生物を利用していくことは、長期間にわたって可能であると考えられる。

このように、多孔質体パネルは、短期間で驚くべき餌料生物の発生が確認されており、その餌料増産機能の高さが確認され、発生した餌料が放流稚魚にとって好適な餌料環境を創造することは、十分可能であると考えられた。

#### 4-3 詰石ユニットによる隠れ場の提供と蜻集魚類

構造物における魚類の蜻集状況を潜水目視により観察した。

本構造物には、中央部の流動制御パネルの周囲 4 方向にコンクリートの梁で構成された単位ブロックが 4 基ずつ配置されている。それぞれのブロックには、長径 20cm 程度の自然石を詰めた詰石ユニットを天井部に設置しており、その詰石ユニットを隠れ場として底生魚類が利用していること

が、末永ら<sup>3)</sup>により明らかにされている。

詰石ユニットには、底生魚類の0歳から1歳程度の個体が隠れられる隙間が無数に存在しており、これらを隠れ場として好む生態の魚類として、メバル、タケノコメバル、カサゴ、キジハタなどがあり、実際にフィールド調査地点では、主にメバルが多数確認された。

メバルは、日本近海において有用な魚種の一つである。しかしながら、瀬戸内海における漁獲量については、近年、統計が取られていない。1972年から1977年にメバル・カサゴとして、統計が存在し、その平均は、瀬戸内海で約2,300トンであったが（National Research Institute of Fisheries and Environment of Inland Sea, 2001<sup>4)</sup>）、その後、香川県のメバル・カサゴの漁獲量は漸減しており（Kagawa Statistical Information Office of Regional Agricultural Administration Office of Chugoku and Shikoku District, 1952-20025)), それと同程度に瀬戸内海全体でも減少したと仮定すると、およそ、1,000トン程度が、瀬戸内海のメバル・カサゴの漁獲量となる。このうち、メバルの割合について資料がないため、半数をメバルと仮定すると、約500トンが現在のメバルの漁獲量と考えられる。このように、メバルは水産資源として重要性が高いことから、その蛸集状況は、魚礁や幼稚魚育成礁などの設計の際、増殖効果を把握する一つの指標として、頻繁に調査項目に加えられている。また、本実験構造物を設置すると、流動制御によって構造物周辺におけるプランクトンの分布状況が変化し

て動物プランクトンが増加したと考えられることから、それらを餌として利用するためにメバルが蛸集し、なおかつ、そこに詰石ユニットなどの隠れ場があるため、濃密な蛸集状況となるのではないかと考えた。以上の理由から、メバルを調査対象種として選定した。

図4.5に実験構造物に蛸集していたメバル稚魚の個体数の推移を示す。対照として、同じ瀬戸内海の岡山県笠岡市白石島に設置された4基の人工構造物（Tamano center for stock enhancement, 2004<sup>6)</sup>）に蛸集したメバル稚魚の個体数を示した。5月に実験構造物では、最大蛸集尾数700尾となり、対照構造物で250尾であった。その後、メバル稚魚が藻場から分散移動するとされている夏場（岡山県水産試験場, 1964<sup>7)</sup>）において、実験構造物で100尾、対象構造物で約60尾の蛸集が観察され、翌年の5月には再び増加し、実験構造物で300尾の蛸集が確認された。翌年5月には対照構造物のデータはなかった。このように、実験構造物におけるメバルの蛸集状況は、対照構造物よりも1年を通じて高い傾向にあり、実験構造物においてメバルがより多く蛸集したことが示唆された。

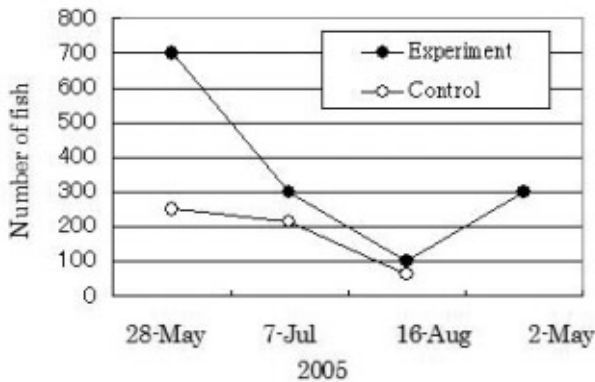


図 4.5 メバル幼稚魚の蝸集状況の変動

メバル稚仔魚は、その成長過程において、浮遊期から、アマモ・ガラモなどの藻場や流れ藻へと生息域を変えることが知られている（鈴木ら、1999<sup>8)</sup>）。

このような生活史の中で、生息場所を流れ藻から藻場や岩礁帯へ移行する時期には、物陰のような隠れられる場所があることと、餌料生物として、メバル稚魚が主に利用するとされているコペポーダ（かいあし類など）のような小型の動物プランクトンの豊富な場所が、彼らの生息域として重要であると考えられている（鈴木ら、1999<sup>8)</sup>）。

従って、このような生態を持つ底生魚類の増殖を図るには、岩礁帯など隠れるための陰を有する基質と豊富な餌料生物という2種類の生息条件を提供することが必要である。

本実験構造物は、中央部に配置した流動制御パネルと、その周囲の上部パネルの下に、広い影を有していること、また、図 4.1～4.4 に示すように、流動制御によって生じた上昇流によって、動物プランクトンを豊富に発生させ、多孔質体パネルには、豊富な餌料生物を発生させる機能を有し

ていることの2点によって、上記2種類の生息条件をよく満たしていると考えられ、図 4.5 のようなメバル稚魚の濃密な蝸集につながったものと考えられた。

#### 4-4 底生魚類幼稚魚放流用ユニットの検討

##### 4-4-1 多孔質体ユニットの最適間隔の検討

キジハタやタケノコメバルは、香川県が水産資源の維持増大を目的として、毎年、5cm程度の稚魚（種苗）を人工的に生産し、漁業者に配付して、県内各地に放流されている。

しかし、これらの底生魚類を放流する際には、天敵生物による食害という大きな問題が立ちほだかっている。特に、人口種苗は、その飼育されてきた環境が、天敵生物が1尾もない人工的で安全なものであり、さらに多数の同種の稚魚と過密な状態で飼育されてきたため、いきなり天然海域に放流されると、そこが天敵生物の捕食圧にさらされる弱肉強食の世界であることを認識するまでに、相当の時間を要するだけでなく、現実に天敵に捕食される危険に頻繁に遭遇することとなる。

そのため、天然海域に人口種苗を、数千尾から数万尾単位で一度に放流すると、天然では有り得ないような高い密度で、動きの鈍い稚魚が分布することになり、そこに隠れる場所が少ないと、天敵生物に見つかったとたんに、苛烈な捕食にさらされ、一気に減耗してしまうこととなる（Miyagawa et al, 2004<sup>9)</sup>）。

このような問題点を克服するために、底生魚類幼稚魚が隠れられる場所を提供することは、放流

魚の生残率を高めるために、極めて有用なものと考えられる。

しかし、放流稚魚の保護用に、どのような基質をどのような間隔で、どのように配置すればよいかという点について、これまで調べられたことがないため、本研究では、まず、この点を解明することとした。

#### a) 最適間隔確認試験

稚魚を天敵生物から保護するためには、どの程度の間隔が適しているかを確認するため、タケノコメバル稚魚と天敵生物（マダイ、タケノコメバル成魚、イシダイ、キジハタ、カサゴ、ヒゲソリダイ）を用いた試験を行った。

使用した水槽はFRP製で2×1×0.8mのものを2台使用した。供試魚は、捕食される側（放流稚魚）として、平均全長 5cm のタケノコメバルを100尾ずつ、捕食する側（天敵生物）として、上記の6魚種を8尾ずつ（全長範囲：21~27cm，平均全長：24cm，平均体幅：3.9cm）のものを使用した。

実験区には、多孔質体パネル（30×30×6cm）を3枚1組としたユニット（多孔質体パネルユニット：以後シェルターと呼ぶ）を3組用意し、パネルの間隔を、3，5，8cmの3段階に設定した。これら3種類のシェルター（それぞれ、3cmシェルター、5cmシェルター、8cmシェルターと呼ぶ）を一方の水槽底に等間隔に設置したものを実験区、何も隠れ場所になるものを入れない水槽を対照区とした。

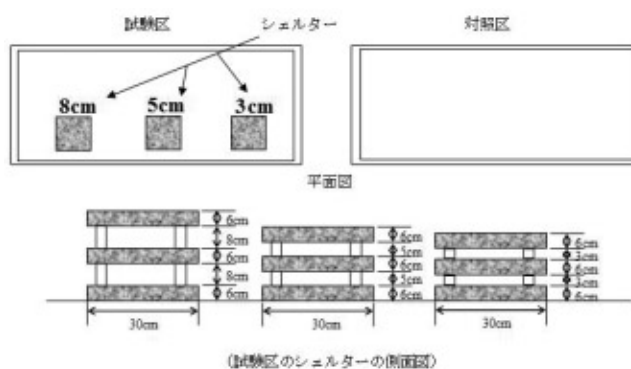


図 4.6 タケノコメバル稚魚の水槽内放流実験の設定

表 4.1 天敵生物の概要とシェルターの間隔に入れたかどうか

区分	魚種名	全長(mm)	体幅(mm)	平均全長(mm)	間隔に入れた個体(O)		
					3cm	5cm	8cm
実験区	マダイ	235	35	243.5	×	×	×
	マダイ	252	35		×	×	×
	イシダイ	232	32		×	○	○
	キジハタ	270	42		×	○	○
	カサゴ	224	38		×	○	○
	タケノコメバル	246	41	230.0	×	○	○
	タケノコメバル	214	35		×	○	○
対照区	マダイ	268	40	261.0	×	×	×
	マダイ	254	38		×	×	×
	イシダイ	204	30		×	○	○
	キジハタ	236	40		×	○	○
	カサゴ	237	39		×	○	○
	タケノコメバル	232	38	242.0	×	○	○
	タケノコメバル	252	44		×	○	○
ヒゲソリダイ	274	46		×	×	×	

実験に使用した天敵生物の全長，体幅等の概要とその個体が，それぞれのシェルターの間隔に入れたかどうかを，表 4.1 に示した。

実験は，実験区，対照区ともに 2006 年 8 月 3 日に開始し，まず，被食魚であるタケノコメバル稚魚を先に水槽に入れて水槽または多孔質体パネルユニットに慣らした後，天敵生物を水槽に入れた。

人の影響を排除するために，水槽上部を遮光幕で覆って暗くして，無給餌とし，水質悪化を防ぐ

ため換水，通気を行った。

実験は，実験区，対照区ともに5日目に終了し，天敵生物を取り上げた後，シェルターに潜伏しているタケノコメバルの個体数を計数した。

生残個体数は，図 4.7 のとおりであり，実験区で28個体，対照区で0個体であった。

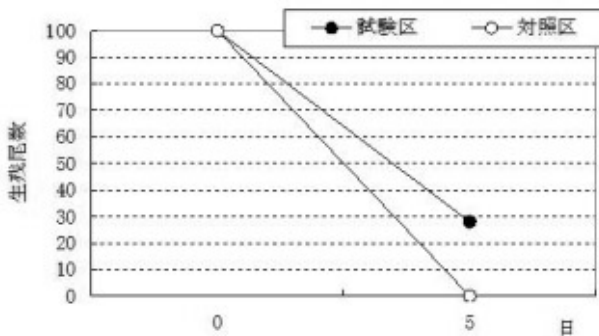


図 4.7 被食魚に対するシェルターの保護効果

このように，シェルターがない場合には，全ての稚魚が食べ尽くされてしまったが，シェルターがあることで28個体が生き残った。このことから，シェルターが稚魚の隠れ場として機能したことが考えられた。

実験終了時に，3種類のシェルターに潜伏していた稚魚の数を計数したところ，図 4.8 に示すとおり，3cm シェルターに25尾，5cm シェルターに3尾，8cm シェルターには0尾が確認された。

本実験では，5cm と 8cm のシェルターに対して，体幅が5cm 以下で，シェルターに侵入しうる大きさの天敵生物が5尾ずつ存在した。そのため，この2種類のシェルターは隠れ場としては隙間の大きさが不適切であったと考えられた。一方，3cm シェルターでは，天敵生物がどのような体勢をと

ったとしても，物理的に侵入することができなかった。その結果，稚魚25尾が潜伏して生存できたことから，稚魚の隠れ場として有効に機能したと考えられた。

以上の結果から，これら3種類の隙間間隔のうち，稚魚の隠れ場としては3cm がより適切であると考えられた。

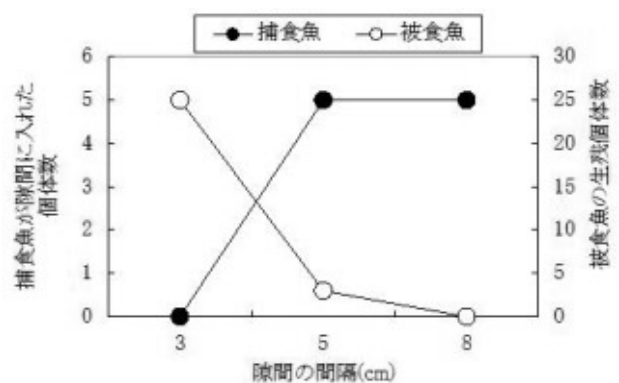


図 4.8 捕食魚と被食魚（放流稚魚）の関係

#### b) 最適配置実験

最適間隔確認試験結果から，5cm，8cm の間隔は，シェルター内に天敵生物の進入を許してしまうため不適切であり，3cm 間隔が適切であることが確認された。

しかし，実際に多数の放流魚を保護するためには，複数のシェルターを配置する必要がある。多孔質体パネルで構成されたユニットを，どのように配置すればよいかを検討し，試作したユニットの組み合わせ（実験シェルター）を水槽に設置して，その隠れ場としての機能を水槽実験によって検証した。

##### b-1) 予備実験



最初に、予備実験としてシェルターの機能を評価することとした。

実験施設は、2×1×0.8mのFRP製水槽2台を使用し、供試魚は、被食魚（放流稚魚）として、平均全長7cmのキジハタを100尾ずつ、捕食魚（天敵生物）として、マダイ、タケノコメバル、ヒゲソリダイ、ムラソイの4魚種を8尾ずつ（全長範囲：18～38cm，平均全長：26cm，平均体幅：3.7cm）を用意した（表4.2）。

実験区には、パネルの間隔3cmの多孔質体パネルユニット（シェルター）を12組用意し、水槽底面にシェルター同士の間隔が3cmになるよう配置した。これを実験区とし、何も隠れ場所にならないものを入れない水槽を対照区とした（図4.9）。

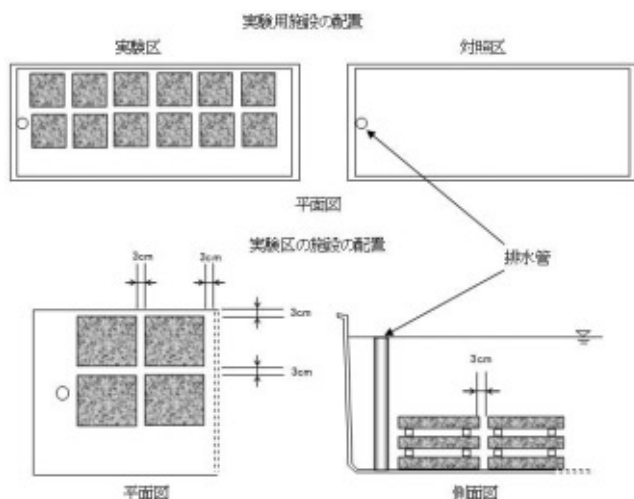


図 4.9 実験施設（水槽，シェルター）の配置

天敵生物のうちタケノコメバルに体幅が3cmのものが存在したが、シェルターの際間に侵入しようとするとき体側を傷付けるために、侵入したものはいなかった。

実験は、実験区、対照区ともに2006年10月3日に開始し、まず、被食魚であるキジハタ稚魚を先に水槽に入れて水槽または多孔質体パネルユニットに馴致した後、天敵生物を水槽に入れた。

人の影響を排除するために、水槽上部を遮光幕で覆って暗くして、無給餌とし、水質悪化を防ぐため換水、通気を行った。

実験は、実験区、対照区ともに3日目に終了し、天敵生物を取り上げた後、シェルターに潜伏しているタケノコメバルの個体数を計数した。

生残個体数は、図4.10のとおりであり、実験区で98個体、対照区で28個体であった。

実験区では、ほとんどの稚魚がシェルターの内部に潜伏したため、天敵生物は捕食することがほとんどできなかつたと考えられ、シェルターの隠れ場所としての機能の有効性が確認された。

対照区では、稚魚が天敵生物に追われて、水槽の隅に密集して分布しており、その多くが捕食された。

区分	魚種名	全長(mm)	体幅(mm)	平均全長(mm)
試験区	マダイ	300	41	43.5
	マダイ	378	46	
	タケノコメバル	226	34	
	タケノコメバル	246	38	
	タケノコメバル	201	34	
	タケノコメバル	190	30	
	タケノコメバル	216	34	
ヒゲソリダイ	377	48	30.5	
対照区	マダイ	320		46
	マダイ	335		48
	タケノコメバル	223		32
	タケノコメバル	180		30
	タケノコメバル	188		30
	タケノコメバル	216		30
	ムラソイ	193	32	
ヒゲソリダイ	285	46		

表 4.2 天敵魚の概要

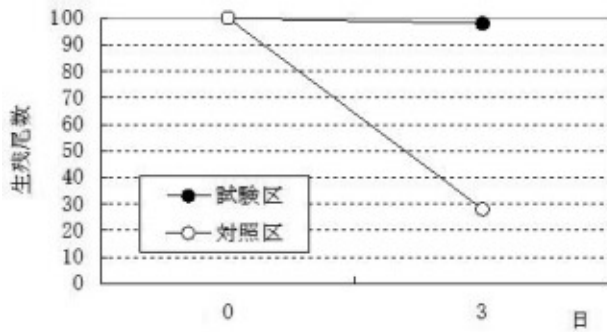


図 4.10 キジハタ稚魚に対するシェルターの保護効果

しかし、この実験に供した水槽は、天敵生物にとっては狭かったため行動に制限があった可能性も考えられた。そこで、より大型の水槽を設置し、天敵生物が自由に行動できる環境で、同様の実験を行うこととした。

#### b-2) 大型水槽実験

より天然に近い環境として、予備実験の約5倍容積の水槽を用い、天敵生物がシェルターの周囲を自由に行動できる状態にして、稚魚の捕食実験を行った。

この実験では、水槽が1台しか用意できなかったため、実験区の試験の次に、対照区の試験を連続して行った。

今回、天然海域でのシェルターを設置した実験を予定しており、そのときと同じシェルターが使用できるよう、可搬性に着目して、シェルターを改良し、2段式のものを作製した(図4.11)。このシェルター単体を8個積み重ねて、1つのシェルターを構成するように設置した(写真4.1)。

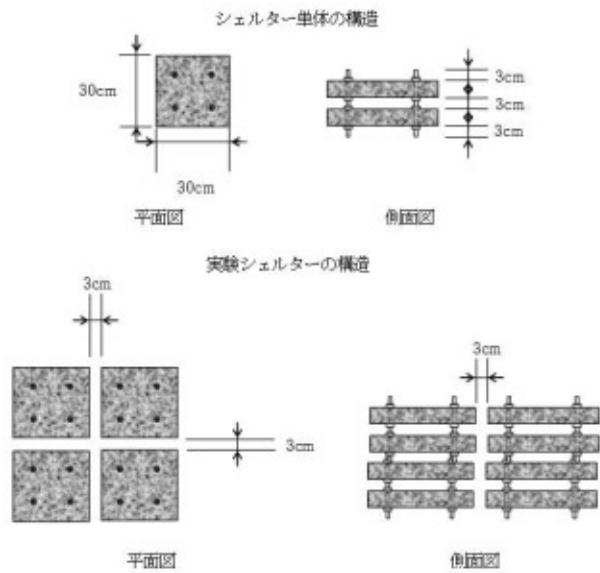


図 4.11 シェルター単体と実験シェルターの構造



写真 4.1 実験シェルターの設置状況と天敵生物の遊泳状況

使用した水槽はFRP製で $5 \times 2.5 \times 1$ mの大きさであった。供試魚は、捕食される小型魚(放流稚魚)として、平均全長7.7cmのタケノコメバルを500尾ずつ、捕食者(天敵生物)として、ヒゲソリダイを10尾ずつ(全長範囲:29~40cm, 平均

全長：33cm，平均体幅：5.9cm）用意した。

実験区の中央部には，多孔質体パネル（30×30×6cm）2枚で構成されるシェルター単体を8個，2段に積み重ねたものを水槽底に設置した．対照区には，何も設置しなかった（図 4.12）．

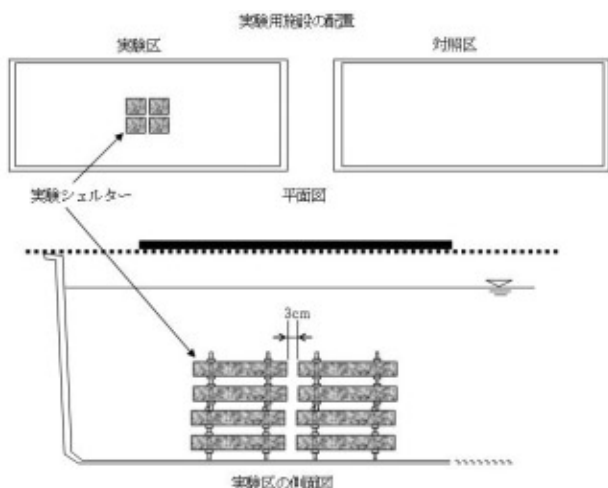


図 4.12 実験施設（水槽，実験シェルター）の配置

実験区は，2006年8月29日に開始し，5日間継続した．対照区は引き続き2007年9月3日に開始し，5日間継続した．

まず，被食魚であるタケノコメバル稚魚を先に水槽に入れて，環境（水槽及びシェルター：多孔質体パネルユニット）に馴致した後，天敵生物を水槽に入れた．

このとき，被食魚は，実験シェルター以外の空間にも分布したため，できるだけ実験シェルターに集まるよう，水槽中央部の上部に遮光幕を設置した．その結果，シェルターに大多数の被食魚が潜伏したが，一部のものはシェルター外部に分布

した．

実験は，無給餌とし，水質悪化を防ぐため換水，通気を行った．

実験終了時には，天敵生物を取り上げた後，シェルターに潜伏しているタケノコメバルの個体数を計数した．

生残個体数は，図 4.13 のとおりであり，実験区で426個体，対照区で170個体であった．

実験区では，大多数の稚魚がシェルターの内部に潜伏しているため，天敵生物は捕食することができなかった．一方，シェルター外部に出てしまった被食魚は，捕食されたものと考えられた．実験区の生残率は85%と非常に高く，シェルターの隠れ場所としての機能の有効性が確認された．

対照区では，稚魚が天敵生物に追われて，水槽の隅に密集して分布し，その多くが追われ続けたために疲弊してへい死したか，捕食された．

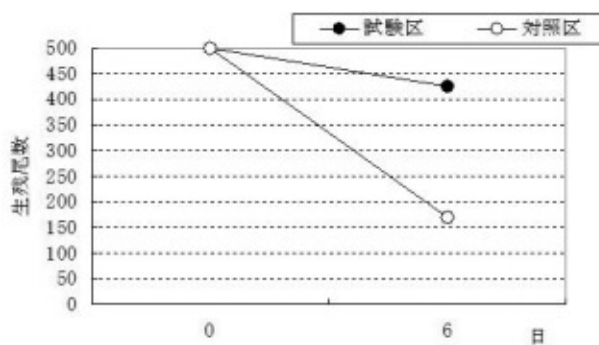


図 4.13 タケノコメバル稚魚に対するシェルターの保護効果

この実験結果から，本実験シェルターは稚魚の隠れ場としての機能を十分に有していると考えられた．

なお、これら3回の実験結果について、生残尾数について整理した(表4.3)。

表4.3 シェルターの存在による生残率の差

実験区(%)	対照区(%)
28	0
98	28
85	34

この結果について、対応のあるt-検定を行ったところ、3%の危険率で有意に差がある結果となった。

このことから、これらのシェルターの設置は、明らかに稚魚の隠れ場として有効に機能すると考えられた。

#### 4-4-2 実海域における放流実験の結果

これまでの実験結果から、シェルターは放流された底性魚類の稚魚にとって、天敵生物からの食外から身を守る有効な隠れ家となることが明らかとなった。

本研究では、このシェルターを天然の海域に設置し、実際に底性魚類の稚魚を放流して、その効果を把握しようとした。

放流実験に用いた施設は、本研究対象である実験構造物の実機と同じタイプの構造物で、香川県高松市庵治町太鼓の鼻地先に設置されたもの2基とし、うち1基を実験区、もう1基を対照区とした。実験海域の水深は、5~6mで実験区と試験区の間には、投石マウンドが設置されている(図4.14)。

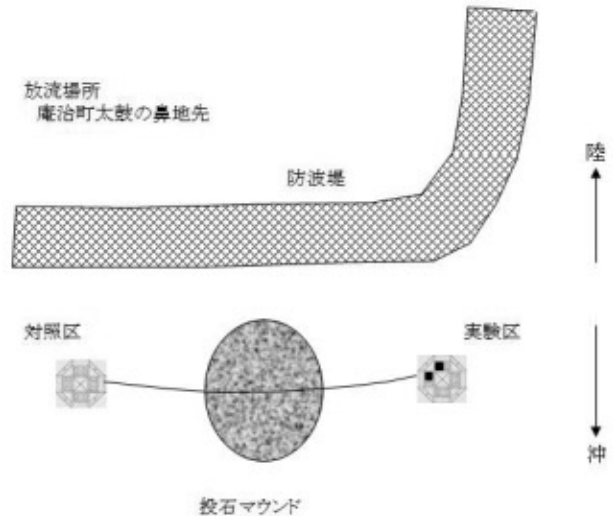


図4.14 実験施設(実験構造物と投石マウンド)の配置

実験区には、大型水槽実験に使用したのと同じ実験シェルターを2組、実験構造物の詰石ボックス4個のうちの2個にそれぞれ設置した(図4.15)。詰石のサイズは、長径が20~30cm程度の自然石が使用されている。

放流魚のボックス内での生残状況を把握するには、内部を観察することができないので、これまで不可能であったが、本研究では、詰石ボックスの上部に実験シェルターを設置し、その内部の生残尾数を把握することで、詰石ボックス内部の生残状況を推定することとした。

そのためには、それぞれの基質の空立米に対する隙間の空間容積(以後、「隙間容積」という)の割合を事前に調査しておき、実際の詰石ボックスと実験シェルターのもつ隙間容積を推定しておくことが必要である。

それぞれの基質の空立米と隙間容積の調査結果を、表4.4に示す。

表 4.4 実験施設の隙間容積の割合

	空立米 (ℓ)	隙間容積 (ℓ)	隙間の割合 (%)
	(A)	(B)	(A) / (B)
詰石	80	34	43
実験シェルター	143	56	39

詰石ボックスは、ハンチの部分を除いた容積なので、次のとおりとなる（単位：m，空m<sup>3</sup>）。

$$1.6 \times 1.0 \times 0.25 - (0.1 \times 0.1 \times 0.5 \times 0.25 \times 2) = 0.3975$$

従って、詰石ボックスの隙間容積は、397.5ℓとなる。

一方、実験シェルターの隙間容積は、56ℓであることから、実験シェルター：詰石ボックスの比は、 $56/397.5 = 0.14$ となる。

また、天然海域に設置した実験区と対照区にタケノコメバル稚魚（全長 7.7cm）を 1,500 尾ずつそれぞれ放流し、その後の分布状況を潜水観察により調査して、生残状況を把握した。

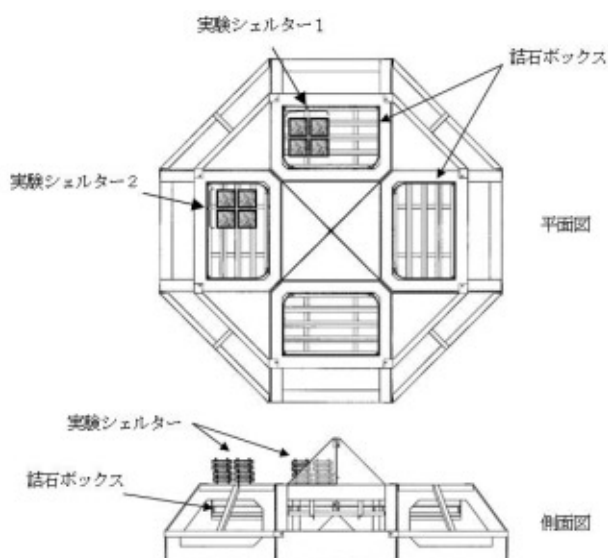


図 4.15 実験施設（実験構造物と実験シェルタ

一) の概要

図 4.15 に、実験区における施設の概要を示す。また、潜水観察調査の結果を、表 4.5 に示す。

表 4.5 実験シェルターにおける生残状況

	9月12日	10月5日
放流魚の生残尾数	74	21

ここで、実験シェルター：詰石ボックスの比が、0.14であったことから、詰石ボックスの推定生残尾数は、表 4.6 のとおりとなる。

表 4.6 詰石ボックスにおける生残状況

	9月3日	9月12日	10月5日
放流魚の推定生残尾数	1,500	529	150
放流魚の推定生残率(%)	100	35	10

また、10月5日における、実験区と対照区における詰石ボックス全体の観察尾数は、それぞれ、141尾、101尾であったことから、10月5日における対照区の推定生残尾数は、107尾（生残率は7%）となる。

以上の結果を、図 4.16 に示す。



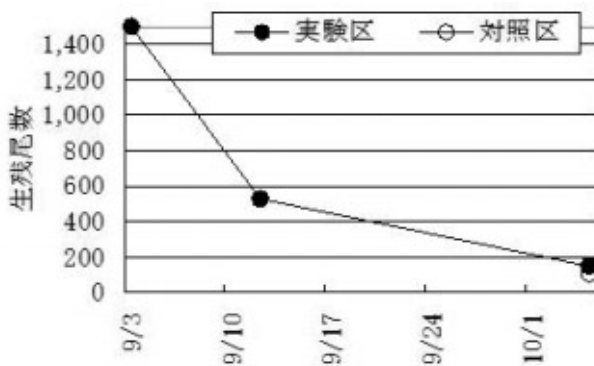


図 4.16 放流魚の生残状況

この図から、放流されたタケノコメバルの稚魚は、当初の10日間ほどで約3分の1程度に減少した。その後、1月程経過した時点では、実験区で放流時の10%、対照区では7%に減少したと推定された。

この違いが実験シェルターによるものかどうかは、統計的には評価できなかったため明らかにはできなかった。

しかし、調査手法としては有用な知見が得られたものと考えられる。

これまで、内部が見通せない構造物内部における放流魚の生残状況を、目視調査によって定量的に推定するという調査は、行われたことがなかった。今回の調査では、観察用にも活用可能な施設（実験シェルター）を利用して内部状況の推定を行ったが、この手法は、見えない構造物内部における放流魚の潜伏状況の推定を可能にする一つの方法として重要であると考えられた。

また、これまでの一般的な放流事業では、放流後1週間程度で、放流魚がほとんど観察されなくなることがほとんどであった。これは、天敵生物

による食害と放流後の逸散が主な要因と考えられているが、今回の調査では、9日後においても35%という高い生残率が得られており、詰石ボックスが放流魚の隠れ場として有効に機能したことが考えられた。

現在の詰石ボックスには自然石が設置されているが、将来的に、これを餌料生物の増殖効果の高い多孔質体パネルを用いたものに置き換えることで、さらに、餌場としての機能を向上させることが期待でき、より高い生残率を目指すことが可能になると考えられる。

<参考文献（第4章）>

- 1) Suenaga, Y., Miyagawa, M., Hoshino, T., Yamanaka, M., Yasuoka, K., Suenaga, A. and Kimigawa, K., 2005 : Techniques of creating fishery ground using the marine resources enhancement structure in and around the Seto-Inland Sea, 水圏環境工学論文集, 1, 15-24.
- 2) Yasuoka, K., Suenaga, Y., Yamanaka, M., Hoshino, T., Kakegawa, H. and Ahn, H., 2006 : 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.
- 3) 末永ら, 2005 : 水産資源増殖構造物の流動制御と生物蝟集機能, 生態工学会, 17(2),115-120.
- 4) 水産庁瀬戸内区水産研究所, 2001 : 瀬戸内海の漁獲量, pp134-135.
- 5) 中四国農政局香川統計情報事務所,

1952-2002 : 香川水産統計年報.

6) 玉野栽培漁業センター, 2004 : 漁港における幼稚魚育成施設の開発調査, トピックス, 独立行政法人水産総合研究センター栽培漁業センターホームページ, 047.

7) 岡山県水産試験場, 1964 : 瀬戸内海中央部における魚卵・稚魚の出現とその生態-幼稚魚生態調査報告書, pp,72-73.

8) 鈴木伸洋・相田聡, 1999 : 人工メバル仔稚魚期の器官形成と行動の変化, 瀬戸内水研報, 1, 1-13.

9) Miyagawa, M., Yamaoka, K., Kurokawa, K., Isshiki, T., Yamada, T. and Suenaga, Y., 2004 : Research on the functions of the structure enhancing marine resources, The Sunport Japan Korea International Maritime Seminar, 12pp.

第5章 底生魚類幼稚魚放流用ユニットを装備した構造物の提案

5-1 効率的な有用魚種の種苗放流事業との連携した増殖場の整備の提案

5-1-1 底生有用魚種の放流用保護ユニットの提案と試作

日本においては、現在、水産資源増殖の取り組みとして、種苗放流事業と漁場基盤整備事業による水産資源増殖用の魚礁や増殖場の造成という2種類の事業が推進されている。

しかし、これまでは、それらが別々の行政部門で相互の連携があまりない状況で行われてきたた

め、基盤整備事業で整備された増殖場を放流場所として積極的に有効活用することが不十分であったし、そのため、そのような研究も十分には行われてこなかった。

近年は、これら2部門間の連携が図られ始めているが、元々増殖場を構成する構造物は、放流用種苗の保護を目的としていないため、それらの構造物に無造作に放流したのでは、放流種苗の資源への効率的な添加が難しいのではないかと考えられる。

そのため、今後は、水産資源増殖を目的とする構造物にも、放流用種苗を保護することができる機能を付加させることが求められているし、そのような調査研究が必要となっている。

幸い、本研究の対象としている構造物は、詰石ボックスという放流魚にとっての隠れ場を有しているほか、流動制御機能によって、餌料生物であるプランクトンの増殖に優れているなど、放流魚にとって好ましい環境を提供できるものとなっている。

ここで、本構造物の現在有している機能について整理してみる。

- 1 潮流・海流をエネルギー源とした流動制御パネルによる流れの制御機能と鉛直混合機能
- 2 流動制御による構造物周辺の流れの変化による餌料性プランクトンの増殖機能
- 3 構造物の構成ブロックに配置した詰石ボックス上面におけるガラモの着生機能
- 4 構造物周囲に魚類にとって好適な環境（十分な隠れ場、豊富な餌料）が形成されることによ

## る魚類の蝟集機能

今後は、さらに餌料生物増殖機能に優れ、天敵からの安全な隠れ場としての隙間を確保することで、放流魚の保護機能も有している多孔質体パネルを基質とする保護シェルターを追加することで、本構造物の一層の放流魚に対する保護機能を高めることが期待できる。

具体的には、現在の詰石ボックスに、上記の多孔質体パネルで構成される保護ユニットを適当な配置で設置することで、放流魚をより高密度に潜伏させることが可能になると考えられる(図 5.1)。

この保護ユニットを従来の詰石ボックスに置き換えることで、放流魚の適切な隠れ場と良好な餌料環境という新たな2つの機能を付加できると考えられる。

施工に当たって、特に注意する点は、多孔質体パネル同士の間隔を 3cm にすることである。間隔が広がると天敵生物が侵入しやすくなり、隠れ場としての機能が低下するので、正確な施工に努める必要がある。

図 5.2 と写真 5.1-7 に、実際に多孔質体パネルを、詰石用のボックスに装着した事例を紹介する。これは、ボックス内に、パネルを可能な限り多く装着することを目的に行われた試験であり、パネル同士の隙間の幅については、検討していない。

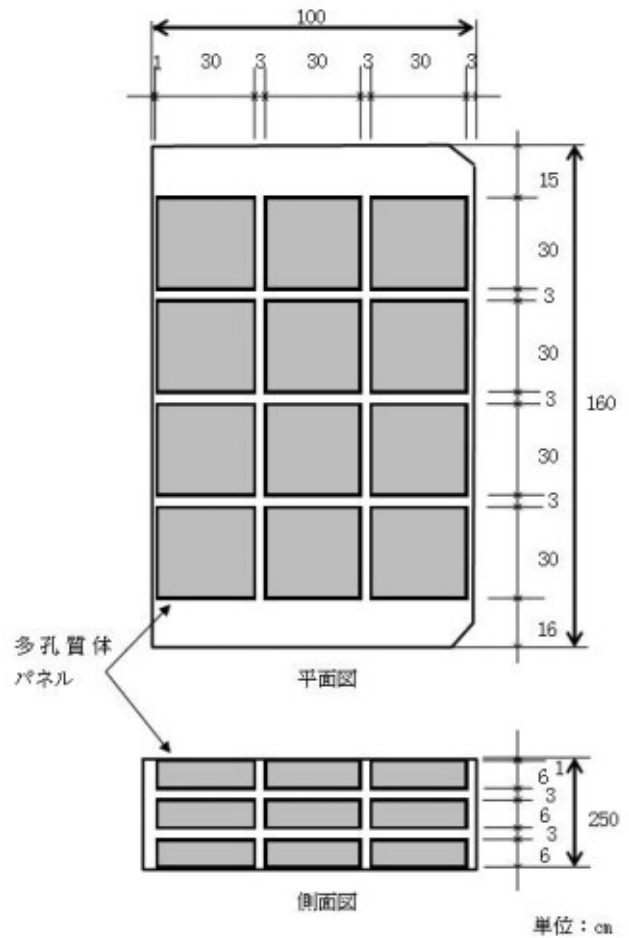


図 5.1 保護用ユニット（多孔質体パネルを用いたシェルター）

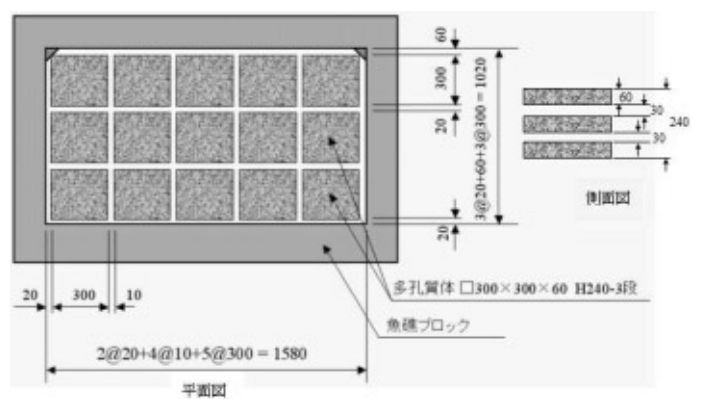


図 5.2 多孔質体パネル装着試験



写真 5.1 装着用多孔質体パネル



写真 5.2 多孔質体装着前のボックス

写真 5.2, 4, 6 に示すとおり，多孔質体パネルは，ボックス下面に敷いたLアングルの上に装着される．このとき，Lアングルの高さ分，多孔質体パネルはボックス上面から上にはみ出るように設置される（写真 5.7）．しかし，はみ出たとしても隙間の部分はボックス内部に隠れているため，放流稚魚の隠れ場の容積には影響を与えない．従って，このような設置方法は，現在の詰石ボックスの施工方法にほとんど変更を加えずに済むため，経済的であると考えられる．

このことから，新しい多孔質体パネルを用いた底生魚類幼稚魚の放流用ユニットを，現行の詰石ユニット用ボックスに設置することは十分可能であると考えられた．



写真 5.3 多孔質体パネル装着状況(1)

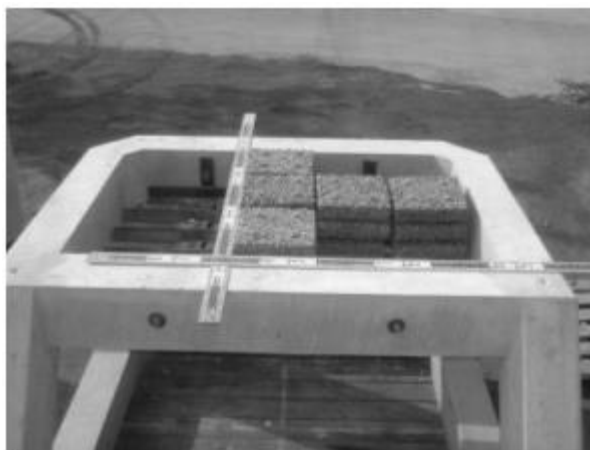


写真 5.4 多孔質体パネル装着状況(2)



写真 5.5 多孔質体パネル装着状況(3)



写真 5.6 多孔質体パネル装着状況(4)

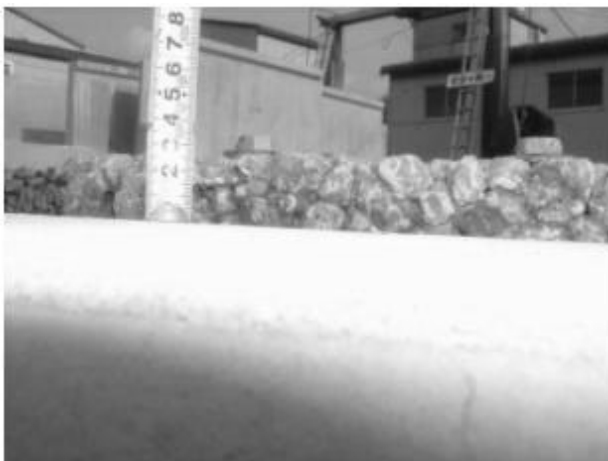


写真 5.7 多孔質体パネル装着状況(5)

#### 5-1-2 放流用保護ユニットの機能の評価

次に、この保護用ユニットの機能の評価する

ため、潜伏する稚魚が要求する餌料に対して、隠れ場としての隙間の容積における発生可能な餌料生物量について検討する。

まず、潜伏する稚魚にとって必要となる餌料生物量を推定する。

隠れ場としての隙間の容積は、3段あるパネルの隙間とパネル同士の隙間の容積が有効な隠れ場と考えられるが、パネル同士の隙間は保護用ユニットからの出入りに使用する通路部分と考え、除外して検討する。

これまでの調査結果から、収容可能な尾数は、概ね  $0.09\text{m}^2$  当たり 20 尾程度 ( $222\text{尾}/\text{m}^2$ ) と考えられた。有効な隙間の面積は、 $3 \times 4 \times 2 \times 0.09 = 2.16\text{ m}^2$ 、これに 222 尾を乗じて、この保護用ユニット 1 個あたりの適正収容尾数、約 500 尾 ( $2.16 \times 222 = 480$ ) が得られる。

このときの放流魚 1 尾、1 日当りの必要餌料生物の量は、飼育時の給餌基準から推定すると、多くて体重の 2% 程度と考えられる。放流時の体重が約 20g とすると、稚魚が 1 日に要求する餌料生物量は、0.4g となり、このユニットに潜伏する 500 尾の稚魚が要求する量は、約 200g/日 (1 ユニットにおいて) となる。

次に、多孔質体パネルに発生する餌料生物量について検討する。

多孔質体パネルに発生した甲殻類の種類数は種、または科レベルまで同定されているが、魚類の餌料と利用される選好性餌料生物の種類数としては、10 月に 21 科、11 月に 27 科、12 月に 43 科が確認されており、経時的に種類数が増加する傾向が



認められた<sup>1)</sup>。

一方、1 m<sup>3</sup>当りの餌料生物量は、10月に1.6kg、11月に1.8kg、12月に5.7kgと増加し続けていた。このことから、多孔質体パネルの空隙内部では、多種類の餌料生物が次々と発生し成長していると考えられる。

このように、多孔質体パネルにおいては、連続して多種類の餌料生物の再生産が起こっていると考えられ、空隙が目詰まりを起こさない限り、1 m<sup>3</sup>当り数kg程度の餌料生物は十分発生すると考えられる。

この調査は天然海域において測定されたものであり、天然魚によって捕食された餌料生物もあると考えられるので、さらに多くの発生があったと推定できる。

一例として、このユニットに設置した多孔質体パネルで発生する餌料生物量を、設置後約4ヶ月の時点の約5,700g/m<sup>3</sup>を用いて検討する。1ユニットに設置した多孔質体パネルの体積は、 $3 \times 4 \times 3 \times (0.3 \times 0.3 \times 0.06) = 1.944 \text{ m}^3$ なので、ここで発生する餌料生物量は、11,080gとなる。

これは、1日当りの放流された幼稚魚が成長するために必要な量の約55倍の量と考えられる。

ここで、放流稚魚の放流後の摂餌生態について検討する。

放流された幼稚魚は、放流されてから天然環境に馴致されていくまでの期間は、この多孔質体パネルの餌料を主に利用すると考えられる。しかし、天然環境に馴致された以降は、浮遊しているプランクトンやアミ類など、本構造物の周囲に発生又

は蛸集する豊富な動物プランクトンも利用し始めるため、多孔質体パネルで発生する餌料生物への依存度は低下していくと考えられる。

さらに、放流された稚魚のその後の行動について検討する。

この底生魚類幼稚魚放流用ユニットでは、放流後1ヶ月程度の期間は、天然環境へ馴致されつつ、多孔質体パネルで発生した餌料を利用しながら成長する。その後は、保護用ユニットから頻繁に出入りするようになり、本構造物の流動制御機能で発生した構造物周囲の餌料生物も利用するようになり、成長を続ける。その後、さらに成長するに従って、天然の岩礁帯へと移動、分散していくと考えられる。

このように、本ユニットには、放流稚魚が、放流された時点から1ヶ月程度の期間、天敵生物から保護されつつ、十分な餌料を摂食し、活力を保ったまま天然環境に馴致される環境を提供することが可能であると考えられる。

以上の結果から、1ユニット当りの多孔質体パネルに発生する餌料生物量約11kg(設置後4ヶ月の時点で)は、放流稚魚を数十日成長させるのに十分であり、本ユニットの目的とする機能、すなわち、放流された稚魚が要求する餌料量を十分に供給しつつ、天敵生物から保護することが、この多孔質体パネルの組み合わせによって十分に可能になると考えられる。

本構造物は、4個のユニットを搭載できることから、構造物1基当りの適正放流尾数は、約2千尾と考えられる。

香川県における一般的な造成規模は、約 24 基であることから、造成された増殖場 1 箇所あたりで考えると、概ね 48 千尾を放流することが可能となる。実際には、1 箇所当り数千尾程度の放流が行われていることから、このような保護用ユニット搭載型構造物であれば、放流魚の収容力としては、十分なものがあると考えられる。

今回は、このような保護用ユニットを搭載した構造物での実験はできなかったが、今後、その効果について検証をしていきたい。

<参考文献（第 5 章）>

1) Yasuoka, K., Suenaga, Y., Yamanaka, M., Hoshino, T., Kakegawa, H. and Ahn, H., 2006 : 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.

## 第 6 章 結 論

### 6-1 研究結果の取りまとめと評価

#### a) 本研究の目的と得られた成果

本研究では、主に 2 つの大きな目的をもって、実験と調査を進めてきた。

第 1 の目的は、本構造物の有する流動制御機能によって、海水の上下混合促進による底泥への溶存酸素の供給により、底質改善を可能とする技術を開発することである。

数値計算の結果と水槽での水理実験の結果から、構造物後方における鉛直混合が起こっていること

が確認され、現場海域での測定でも、構造物の影響範囲内では、底層水の溶存酸素量が対照区より有意に増加していることが確認された。

さらに、底質環境については、底質 COD、硫化物、酸化還元電位の 3 項目について、長期的な調査を行った。その結果、構造物設置から 3 年を経過した時点で、構造物周辺の底質データが対照区のものに比べて、有意に改善された結果が得られた。

本研究における底質改善手法は、底泥に直接的に酸素を送るのではなく、流動制御によって底層水の上下混合を促進し、僅かではあっても、底泥表面に接する水の溶存酸素濃度を継続して高めることで、間接的に底質を改善しようとするものである。そのため、底質改善効果が発現するには、相当の期間が必要となると考えられたが、今回の結果から、底質改善効果が現れるには、概ね 3 年を要することが明らかとなった。

第 2 の目的は、本実験構造物による水産資源増殖機能を確認するとともに、新たに放流稚魚の保護機能を本構造物に付加することである。

本構造物の有する流動制御機能によって、餌料生物である動物プランクトンが、構造物の影響範囲内で増加していることが確認されたほか、多孔質体ブロックが驚異的な餌料生物の増産機能を有していることが確認された。

さらに、底生魚類の稚魚を放流する際に、天敵生物からの隠れ場を提供するための多孔質体ブロックを基質とした保護ユニットの適切な配置について、実験を重ね、保護ユニットの設置が、稚魚

の隠れ場として有効に機能することが確認されたほか、最適なブロックの配置間隔を得ることができた。

また、実海域での実験用の保護シェルターを使った放流実験では、シェルターの保護機能は確認できなかったものの、そのシェルターを観察用に利用することで、内部を観察することができない詰石ボックスにおける放流魚の生残状況について、推定する手法を提案することができた。

これらの実験結果から、多孔質体ブロックを用いた放流魚の保護ユニットを、本構造物に搭載することを提案し、現在の本構造物の機能のほかに、放流稚魚の放流直後の適切な隠れ場と十分な餌料環境の提供という新たな2つの機能を追加することを提案した。

#### b) 本研究で得られた成果に対する評価

第1の目的で得られた成果は、潮流などの海洋エネルギー（自然エネルギー）を動力源とする流動制御機能によって、海水の上下混合促進による底泥への溶存酸素の供給により、底質改善を可能とする技術が開発できたことである。

このように施設を設置するだけで、その周辺の底質環境を改善できる手法は、技術的な提案はあっても、それが実証されたケースはほとんどないと言っていい。

特に、本構造物は、水産資源の増殖機能にも非常に優位性を持っており、環境改善と同時に水産資源の増殖にも資するという多面的に優れた機能を有している。

現在は、本構造物は農林水産省(水産庁)の所管

する基盤整備事業でのみ使用実績があるが、今後、環境省や国土交通省所管の環境再生事業などでの適用や、海外における環境改善事業などへの適用も視野に入れることが現実味を帯びてきたと言える。

そのためには、本構造物の有する様々な機能について、より明確に優位性を確認するための調査研究を継続し、その結果を国内外に広く発信していくことが重要であると考えられる。

第2の目的で得られた成果は、底生魚類の稚魚を放流する際の、適切な保護場所（隠れ場）と餌料環境を提供できる保護ユニットを開発し、それを本構造物に搭載できるよう提案できたことである。

タケノコメバルやキジハタなどの底生魚類の放流事業においては、放流場所に天敵生物が蟻集することによる放流魚の急激な減耗が、その効果を大きく減少させているという問題点が指摘されている。

本研究で得られた成果は、現構造物の詰石ボックスにタケノコメバル稚魚を放流することで、その減少傾向を緩和させることが確認できたことと、その生残状況を推定する手法を保護用のシェルターを提案できたことである。

これらの成果は、今後、現場海域における放流実験において、放流効果を推定する際に有効となるだけでなく、放流魚の生残率を大きく高められる可能性を有していると考えられる。

今後、多孔質体ブロックを基質とした保護ユニットを搭載した構造物を用いた放流実験を重ねて、

これらの機能をさらに詳しく検証していきたい。

## 6-2 今後の課題と展望

本構造物は2つの大きな機能を有している（図6.1）。第1の機能は、環境改善機能である。特に、海底に設置するだけで、潮流などの海洋エネルギーを利用して、影響範囲内の底質を改善する機能を有することが明らかとなった意義は非常に大きいと考える。

第2の機能は、水産資源の増殖機能である。本構造物のもつ流動制御機能が餌料生物の増産をもたらし、ひいては魚類資源の増産につながるだけでなく、人工種苗の放流用の効果的な保護育成機能により、放流事業に適した構造に改良することが提案できたことは、今後の放流事業と基盤整備事業の連携を推進する上で大きな意義があったと考える。

今後は、環境改善機能については、その効果をさらに詳細に検証して、結果を広く内外に公表していくことが必要だと考える。この構造物が将来的に環境改善や環境の再生に貢献できることを期待したい。

また、水産資源増殖機能については、さらに改良を加えた構造物を用いた放流試験を重ねて、放流魚の保護育成機能を高め、沿岸域における水産資源の持続的な利用に貢献できるよう研究を続けていきたいと考える。

なお、本研究は、香川大学工学部産学官水産資源増殖構造物研究プロジェクトグループによる本構造物に関する一連の研究の一部として活用され

ており、同グループの研究が本県地元産業へ多大な貢献をしていると評価され、2008年3月に芦原科学賞大賞を受賞したことを付記しておく。

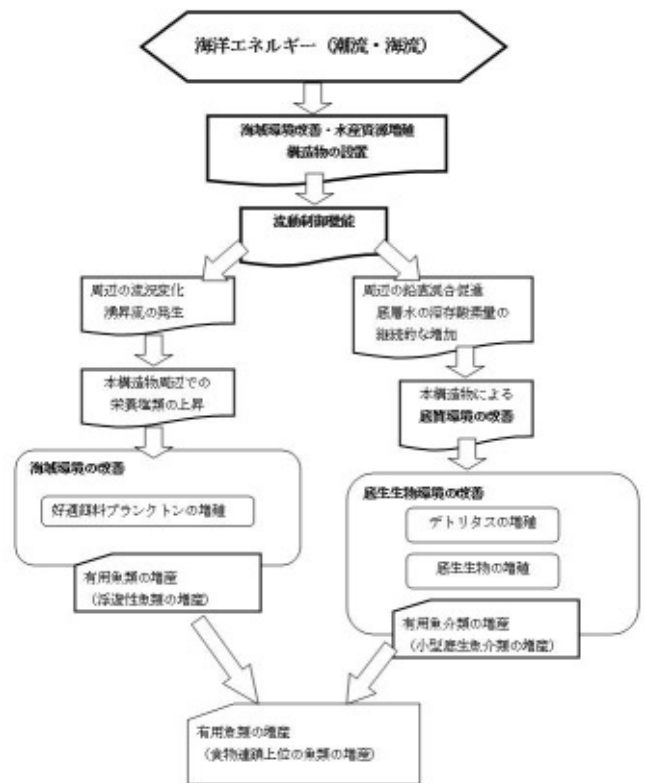


図 6.1 海域環境改善・水産資源増殖システム

## 謝 辞

本研究は、本学大学院博士前期課程での研究成果を継続、発展させたものであり、このような重要なテーマの研究のきっかけを与えてくださり、また、博士前期課程から後期課程に渡って、終始、情熱をもって、有益かつ貴重なご指導をいただいた指導教官の末永慶寛准教授に対し、深く感謝の意を表します。

また、副査として、貴重かつ適切なご助言をいただきました松島学教授、吉田秀典教授、高知大

学大学院黒潮圏海洋科学研究科 山岡耕作教授に心より感謝申し上げます。

同時に、共著者として、学会発表など様々な面においてご協力をいただいた日本大学理工学部海洋建築工学科堀田健治教授、本学工学部山中稔准教授、韓国海洋研究院責任研究員 安 熙道先生に心から感謝いたします。

さらに、社会人の筆者に対し、大学での研究の機会を与えて下さいました香川県農政水産部水産課の下川千代照前課長ほか職員の方々、また、屋島湾における現地調査や水槽実験にあたって快くご協力いただきました香川県水産試験場の浦山公治前場長、栩野元秀主席研究員、藤原宗弘主任研究員ほか職員の皆様には、貴重なご助言やご指導をいただきました。ここに改めて感謝の意を表します。

このほか、本研究の遂行にあたり、多くの方々からのご指導とご援助をいただきました。

実験構造物の製作・調査にあたりご協力いただいた庵治漁業協同組合、屋島漁業協同組合、高松市（当時庵治町）の皆様、(株)日本環境リサーチ、日本興業(株)、(株)クロシオの関係者の皆様並びに(株)環境形成研究所の星野高士氏、さらに、調査にあたり積極的にご尽力いただいた庵治漁業協同組合の高砂一義氏に謝意を表します。

特に、研究の有効性と調査結果の評価方法に関して、多大なご指導、ご助言をいただいた香川大学農学部の多田邦尚教授に深い感謝の意を表します。また、現地調査のうち、炭酸カルシウム化多孔質体の評価についてご協力いただいた香川大学

院工学研究科博士後期課程の安岡かおり氏に心より感謝いたします。

さらに、研究に必要な様々な実験に協力していただいた岡山大学大学院環境理工学研究科博士前期課程の米浦大輔君、岡山大学環境理工学部守田秀則准教授、香川大学大学院工学研究科博士前期課程の井口聡君、経澤康雄君に感謝の意を表します。



付録

## 1. 数値計算による流動解析

### (1) 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. 潮汐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。

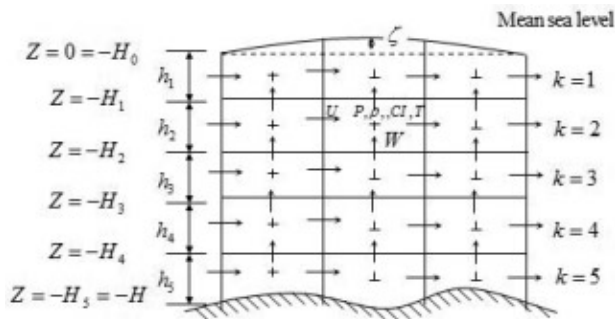


図 A.1.1 三次元鉛直多層モデル

#### 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における微小六面体の流体の質量収支を考える。まず、方向に垂直の面に  $\delta t$  時間後に出入りする。まず、方向に垂直の面に  $\delta t$  時間後に出入りする質量は

左面からの流入量：

$$\begin{aligned} & \rho u \left( x - \frac{\delta x}{2}, y, z, t \right) \delta y \delta z \delta t \\ &= \rho u(x, y, z, t) \delta y \delta z \delta t - \frac{1}{2} \frac{\partial \rho u}{\partial x} \delta x \delta y \delta z \delta t \end{aligned} \quad (\text{A.1})$$

右面からの流出量：

$$\begin{aligned} & \rho u \left( x + \frac{\delta x}{2}, y, z, t \right) \delta y \delta z \delta t \\ &= \rho u(x, y, z, t) \delta y \delta z \delta t + \frac{1}{2} \frac{\partial \rho u}{\partial x} \delta x \delta y \delta z \delta t \end{aligned} \quad (\text{A.2})$$

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

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

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

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

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

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。

$$\frac{\partial \bar{u}}{\partial x} + \frac{\partial \bar{v}}{\partial y} + \frac{\partial \bar{w}}{\partial z} = 0 \quad (\text{A. 9})$$

これが本研究で用いる連続の方程式となる。

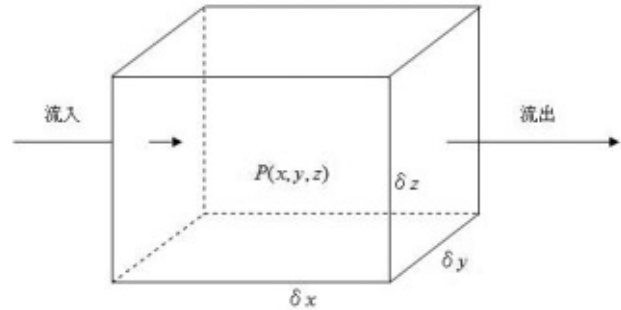


図 A.1.2 流体の流入出

#### ・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。

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

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 の項は赤道上以外のところでは 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 軸が下方を示していることから を原点の緯度として北緯を正とすれば

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

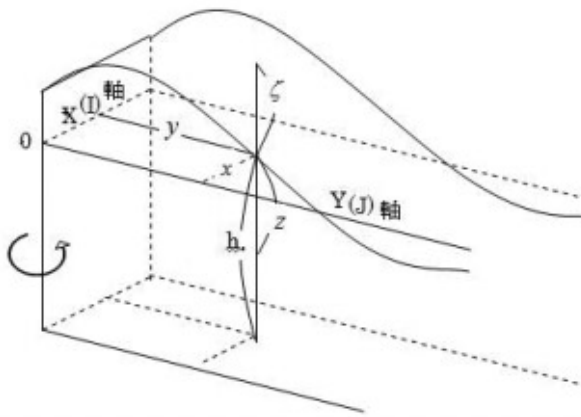


図 A.1.3 回転座標系

ここに

$$f = 2\omega_z = 2\omega \sin \phi \quad (\text{A. 12})$$

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。

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

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 がいたる所一定であるときのみ成立する。このとき 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

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

平均を平均しても平均であるので

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

統計的な平均値 (定数) に変動分をかけた和は 0 である。

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

平均の積の平均は平均の積のままである。

$$\overline{\overline{FG}} = \overline{FG} \quad (\text{A. 17})$$

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

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

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

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

コリオリ項

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

圧力項

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

粘性項

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

$$\nu \frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial y^2} = \nu \frac{\partial}{\partial y} \left\{ \frac{\partial}{\partial y} (\overline{\bar{u} + u'}) \right\} = \nu \frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial x^2} + \nu \frac{\partial^2 \bar{u}'}{\partial y^2} = \nu \frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial y^2} \quad (\text{A. 25})$$

$$\nu \frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial z^2} = \nu \frac{\partial}{\partial z} \left\{ \frac{\partial}{\partial z} (\overline{\bar{u} + u'}) \right\} = \nu \frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial z^2} + \nu \frac{\partial^2 \bar{u}'}{\partial z^2} = \nu \frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial z^2} \quad (\text{A. 26})$$

式(A. 18)~(A. 26)をまとめると、

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

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。

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

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。

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

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。ここでは  $\nu_\varepsilon$  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

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

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

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

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



### ・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

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

(A. 47)

式(A. 47)より海水の密度が塩素量と水温 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。自由表面には、進出する潮汐波の波動を与え、流速成分については、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。

$$\xi = \xi_0 + \sum_i A_i \cdot \cos(\omega_i t - k_i) \quad (\text{A. 48})$$

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

温度  $T_k$  と塩素量  $Sa_k$  に対しては、上流側境界の  $T$ ,  $S_{ak}$  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

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

流入境界では

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

壁面および陸岸の境界条件の扱いは、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。

$$\frac{1}{\rho} \tau_x^s = \frac{\rho_a}{\rho} \cdot \gamma_s^2 \cdot W_x \sqrt{W_x^2 + W_y^2}$$

$$\frac{1}{\rho} \tau_y^s = \frac{\rho_a}{\rho} \cdot \gamma_s^2 \cdot W_y \sqrt{W_x^2 + W_y^2}$$
(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。

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

$$\frac{1}{\rho} \tau^{k-1,k} = -\gamma_i^2 \cdot |v_{k-1} - v_k| (v_{k-1} - v_k)$$
(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、

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

$$z = -H_{LN-1} \quad z = -H_{LN}$$

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

$$\frac{\partial}{\partial x} \int_{h_1} u dz + \frac{\partial}{\partial y} \int_{h_1} v dz + \frac{\partial}{\partial z} \int_{h_1} \omega dz - u \Big|_{\zeta} \frac{\partial \zeta}{\partial x} - v \Big|_{\zeta} \frac{\partial \zeta}{\partial y} + \omega \Big|_{\zeta} - \omega \Big|_{-H_1} = 0$$

(A. 57)

ここで海面の式(A.36)を代入することにより

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

第  $k$  層

表層の場合と同様にして

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

第LN層（底層）

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

$\omega \Big|_{-H_{LN}} = 0$  より

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

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

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

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、

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

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

海底の条件式、式 (A.40) より

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

#### 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

方向の運動方程式は

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

$z = \zeta$  で  $P = P_a$  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  $P_k$  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

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

$1/\rho_k$  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

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

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,

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

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

と置くと

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

(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

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

(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

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

y 方向の運動方程式についても同様に

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

## 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。

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

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

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

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

$$x(0) = \begin{cases} x_1(0) \\ x_2(0) \\ x_3(0) \\ \dots \\ x_t(0) \end{cases} \quad (A. 2. 7)$$

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

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

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

a) 粒子追跡モデル

本研究で用いる式

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

初期条件

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

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

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

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  $u, v, \omega$  はスタッ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う. 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 のように,  $UC, UE$  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.

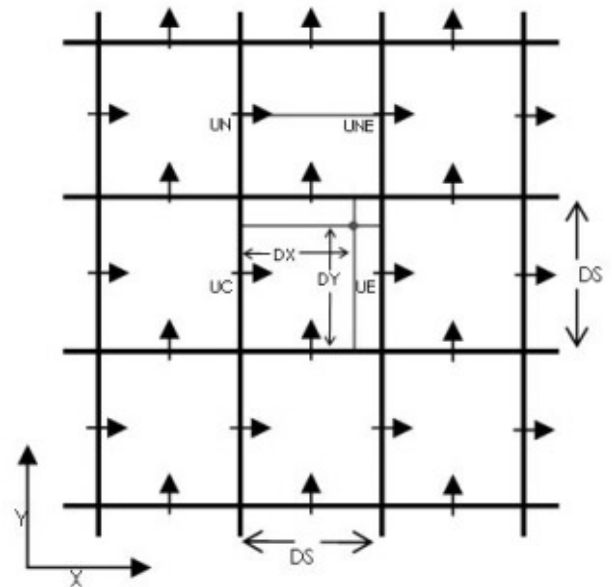


図 A. 1. 4 粒子位置での流速その 1

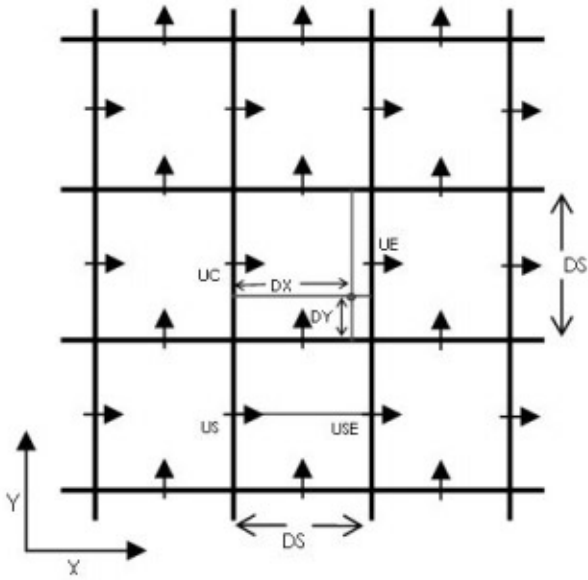


図 A. 1. 5 粒子位置での流速その 2

・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)。

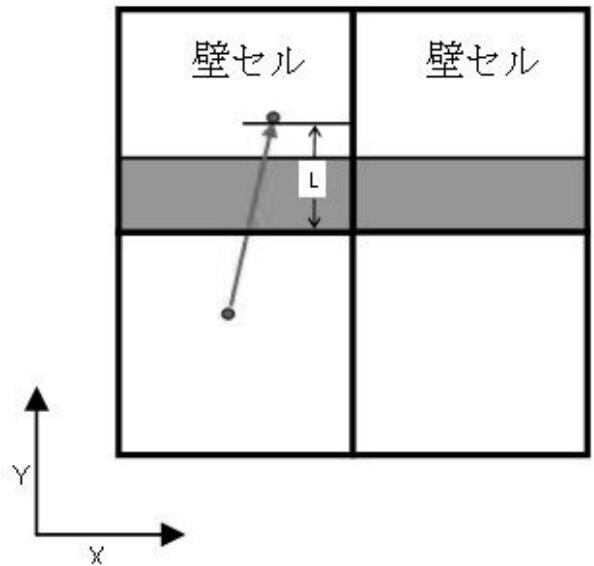


図 A. 1. 6 粒子の反射その 1

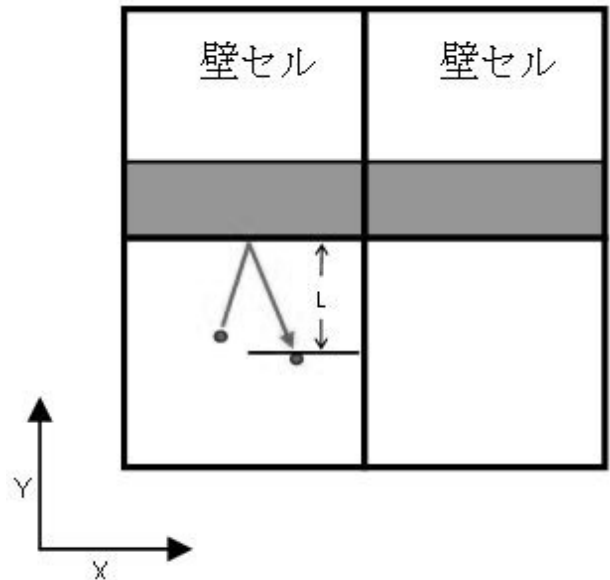


図 A. 1. 7 粒子の反射その 2

・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， $SPCLX(L)=PCLX(0)+SPCLXS(L)$  の式から粒子位置を推定する。

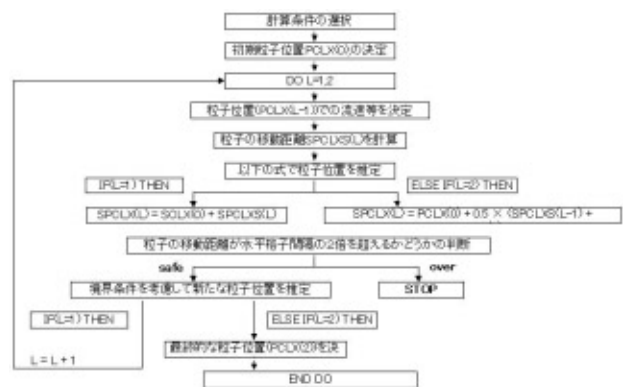
・2 段階目では， $SPCLX(L)=PCLX(0)+0.5 \times (SPCLXS(L-1)+SPCLXS(L))$  から粒子位置を推定する。

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

