

# 平成12年度環境保全型養殖普及推進対策事業

## 報 告 書

平成13年 3 月

和歌山県農林水産総合技術センター  
水産増殖試験場

# 目 次

I 調査の概要 .....	83
1 目 的 .....	83
2 全 体 計 画 .....	83
3 調査実施機関および担当者 .....	83
II 調査研究結果 .....	83
1 養殖状況の変遷と漁場環境の推移 .....	83
2 飼育状況調査 .....	86
3 漁場環境調査 .....	88
4 給餌に伴う残餌・糞の負荷と水、底質の関係 .....	92
5 底泥の酸素消費速度調査 .....	96
6 水槽実験による汚染負荷量 .....	98
7 漁場配置と有機物の拡散 .....	101
8 生簀の配置転換に伴う流況シミュレーション解析 .....	103
III 文 献 .....	114

# I 調査の概要

## 1 目的

田辺湾をモデル水域にして養殖状況や漁場環境を調査し、漁場の利用方法と漁場環境の関係を定量的に解析する。また、ここでの解析結果をもとに漁場改善計画における各項目の基準値を達成するための利用方法のガイドラインを策定し、環境保全型の養殖技術を確立するための資料を得る。

なお、田辺湾と比較するために一部の調査については串本浅海漁場と湯浅湾南部の小引浦でも行った。

## 2 全体計画

表1に示す。

表1 全体計画

調査項目	12	13	14	15
(1) 養殖状況と漁場環境の相互関係の検討				
① 既往資料の解析調査	0	0		
② 飼育状況調査	0	0	0	0
③ 環境調査	0	0	0	0
④ 残餌と糞の負荷量調査	0	0	0	
⑤ 底泥の酸素消費速度調査		0	0	0
⑥ 水槽実験	0	0	0	
⑦ 漁場配置と有機物の拡散調査	0	0	0	0
(2) 環境改善計画の策定と環境指標の関係		0	0	0

## 3 調査実施機関および担当者

和歌山県農林水産総合技術センター 水産増殖試験場

主任研究員 竹内 照文 (主担当)

研究員 田中 俊充

研究員 嶋本 有志

# II 調査研究結果

## 1 養殖状況の変遷と漁場環境の推移

調査対象とした3つの養殖場について、統計資料や過去に行われた各種環境関連事業の調査結果を用いて養殖規模の変遷と漁場環境の関連性について検討した。

### 方 法

養殖状況は和歌山県漁業地区別統計表(昭和51年～平成10年)<sup>1)</sup>を用いて、養殖生産量と投餌量について整理した。また、漁場環境については地元漁協が行っている定置観測結果や当県が実施している県単事業(昭和63年～平成5年)<sup>2-7)</sup>と補助事業(平成8年～平成11年)<sup>8-11)</sup>の結果を用いて解析した。

## 結果および考察

### 1) 田 辺 湾

田辺湾は紀伊半島西岸のほぼ中央部に位置し、湾口幅4km、奥行き4kmの北西に開口した小湾である。湾の形状が開放的であるため、海水交換は良好であるが、湾南部域は小島や島嶼が点在し、閉鎖的となっている。ここでは波浪等を避ける形で古くからブリやマダイ等の魚類養殖が大規模に行われている(図1)。1976年以降のブリとマダイの養殖状況と投餌量の推移を図2に示す。ここでは、1960年代中頃からブリ養殖が始まり、その後急速に養殖規模を拡大した。1984~'88年頃には、3,500トンを超える生産量があり、ピークを示したが、'90年代に入ると急速に減少し、近年は1,000トン前後の生産量で推移している。マダイは1977年頃から養殖されるようになり、1980年代中頃からは500~1,000トンの範囲で推移している。投餌量はブリ養殖の拡大に伴って増加し、1986、'87年頃には4万トンの生餌と2,500トンの配合飼料が与えられていた。その後、ブリ養殖が縮小するに伴って投餌量が急速に減少するとともに配合飼料の割合が増えてきた。近年、投餌量はピーク時の1/4~1/3程度に減少し、その大部分が配合飼料になっている。

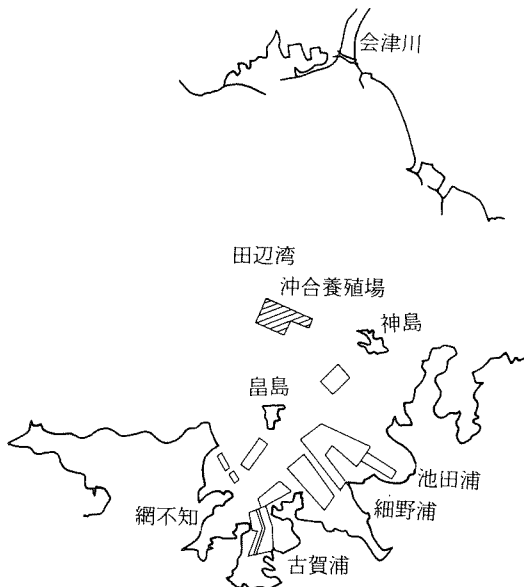


図1 田辺湾における養殖漁場の位置

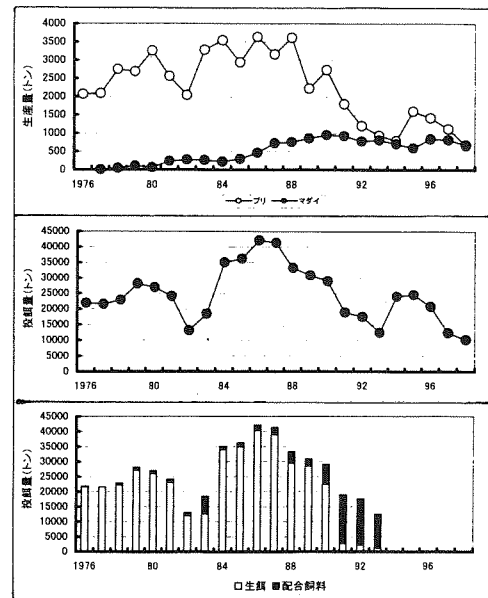


図2 田辺湾における養殖状況と投餌量の変遷

ここで、投餌量がピークを示した1985年頃からの漁場環境の推移を検討するため、地元漁協が行っている定置観測結果を用いて、漁場環境が最も悪化する8月の溶存酸素量の推移を図3に、また、湾南部と沖合養殖場を含めた水域のCODとAVS(酸揮発性硫化物量)の推移を図4に示す。1980年代後半には底層水の溶存酸素量が南部域で3.0mg/l台、また、沖合養殖場では4.0mg/l台で推移し、貧酸素水塊が頻繁に形成されていた。この頃にはCODが40mg/g・dry以上で、AVSが2.0mg/g以上を示すことが多く、漁場環境がきわめて悪化していたことが窺える。地元漁協ではこのような状況に危機意識を持ち、漁場環境の改善を目的に海底耕耘、ばっ気、さくれい、浚渫を行うとともに餌料の改善(生餌→配合飼料)を行ってきた。また、養殖規模の縮小したことも大きな原因と考えられるが、その後、底層水の溶存酸素量は南部域、沖合養殖場ともに緩やかに上昇し続け、近年は南部域の漁場で4.0~5.0mg/l台、また、沖合養殖場では5.0mg/l台に回復している。一方、底質も緩やかに回復し、1990年代後半からはCODが20~30mg/g・dry、AVSが0.5~1.0mg/gで、1980年代後半にみられたような極端に悪化した状況は認められなくなった。

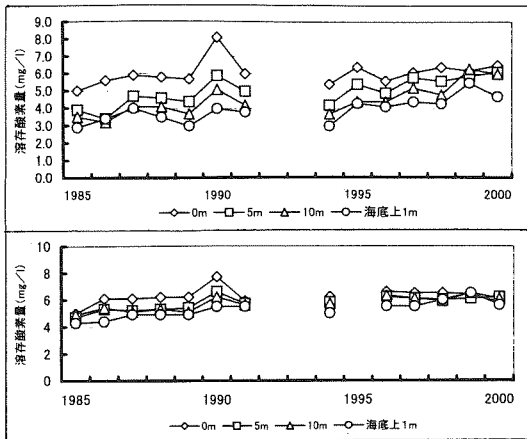


図3 田辺湾における8月の溶存酸素量の推移  
上段：南部の養殖場，下段：沖合養殖場

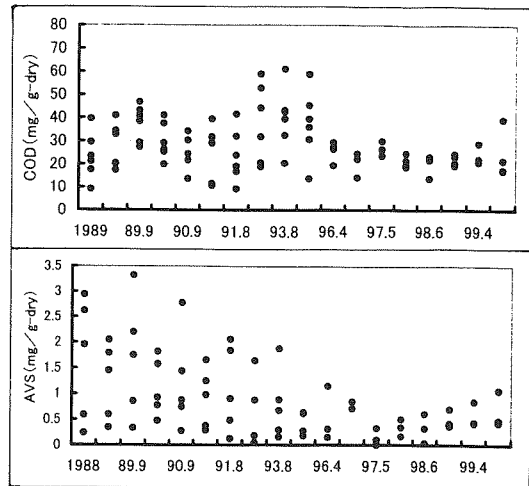


図4 田辺湾南部の養殖場におけるCODとAVSの変動

以上の結果から、田辺湾南部の養殖場周辺では漁場環境が改善されてきていることが明らかになった。ところが、魚病の発生は増加し、毎年多くの被害を出し、ここでは両者に必ずしも平行な関係が見られない。これは、漁場環境は改善されつつあるが、現在でも夏季に貧酸素水塊が発生するし、また、底泥のCODやAVSは基準値<sup>12)</sup>以上を示す範囲が漁場全体を覆っている。このように漁場環境が改善されつつあるが、環境項目で基準値を超えているものが多く、このことが魚病の発生と関連しないのではないかと考えられる。

## 2) 串本浅海漁場

1970年代前半沿整事業により、苗我島と串本間に防波堤が作られ、第1漁場（魚類養殖）49万㎡、第2漁場（魚類養殖）18万㎡と第3漁場（貝類養殖）34万㎡が造成された（図10）。ここでは1977年から養殖が開始され、当初ブリ類の養殖が盛んに行われ、1978年には1,400トン生産されたが、'80年代中頃にはマダイ養殖に切り替わり、近年1,800トン近い生産を上げている。投餌量はブリ養殖の最盛期には、生餌を約11,000トン投餌していたが、マダイ養殖に切り替ってからは7,000～10,000トンで、近年、配合飼料の割合が増加している（図5）。なお、当才魚ではDP（ドライペレット）が与えられているが、1、2才魚ではMP（モイストペレット）が主力となっている。

## 3) 湯浅湾南部の小引浦

湯浅湾南部に位置し、湾口幅 0.5km、奥行き 0.8kmで北向きに開口した小さな入り江で、養殖場の平均水深は約15mである（図11）。ここでは、1970年前半から1経営体が魚類養殖を行っている。当初、ブリ養殖から始まり、最盛期には約150トンの生産を上げていた。1988年にブリ類からマダイ養殖に切り替り、120トンの生産を上げていたが、近年は30～80トンまで減少している（図6）。また、ここでは1998年10月上旬に白点病の発生により大きな被害を出したが、生き残った当才魚約2万尾をもとに翌年から養殖規模を縮小しながら継続している。投餌量は、ブリ養殖の最盛期には生餌を700トン程度投餌していたが、マダイ養殖に切り替ってからは減少し始め、近年は100トン前後でその大半が配合飼料になっている。

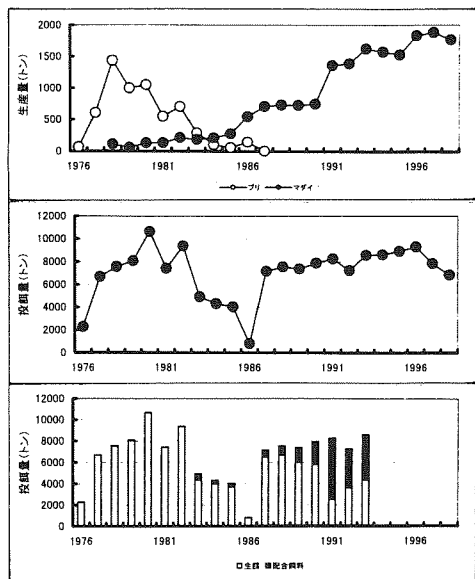


図5 串本浅海漁場における養殖状況と投餌量の変遷

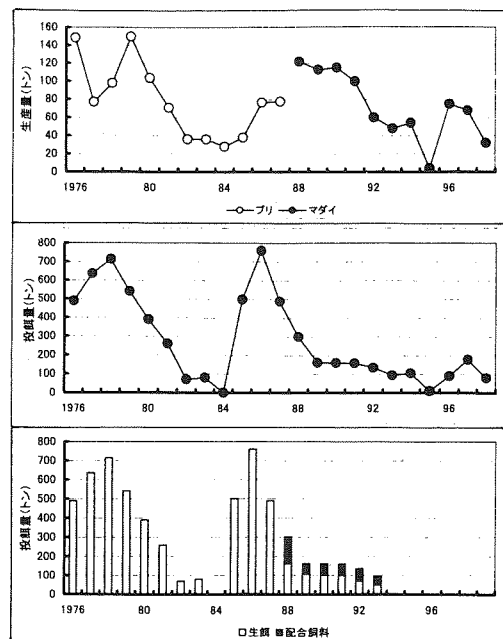


図6 小引浦における養殖状況と投餌量の変遷

## 2. 飼育状況調査

養殖漁業では給餌に伴う残餌や糞等の有機物負荷により漁場環境が悪化し、このことが、魚病の多発化等による生産性の低下を招いている。そこで、残餌や糞の負荷量を抑制することが重要な課題であるが、そのためには飼育密度を下げるとともに給餌量を減少させることが必要である。

ここでは、県内で行われているマダイ養殖の実態を調査し、この中から飼育成績が良く、かつ、漁場環境に配慮した飼育技術の抽出を試みる。

### 方 法

田辺湾では地元漁協、串本浅海漁場では地元の3業者、また、湯浅湾南部の小引浦では1業者に飼育日誌を依頼し、水温、溶存酸素量、投餌量と斃死尾数（ここでは生簀の底を持ち上げていないので浮上した死魚に限る。）について調査した。また、串本浅海漁場と小引浦では定期的に魚を購入し、魚体測定を行った。これ以外の養殖状況については聞き取り調査によった。

飼育成績については、増重比（成長）、斃死率、飼料効率と増肉係数によって比較した。なお、飼育日誌の対象魚は全てマダイである。

飼料効率と増肉係数は以下の式によって求めた。

$$\text{増肉係数} = F/G$$

ただし、Fは期間中の給餌量、Gは同じ期間中の補正増重量で示した。補正増重量は次式によって求めた。

$$\text{補正増重量} = W_2 N_2 - W_1 N_1 + W_3 N_3$$

$W_1$  : 養殖開始時の平均魚体重

$N_1$  : 開始時の尾数

$W_2$  : 終了時の平均魚体重

$N_2$  : 終了時の尾数

$W_3$  : 斃死魚の平均魚体重

$N_3$  : 斃死魚の尾数

また、飼料効率は、増肉係数の逆数で100分率（%）で示した。

## 結果および考察

地元漁協では1980年頃からマダイを自家生産しているが、1991年にイリドウイルス病が発生してからは秋に種苗生産の大半が行われている（秋仔）。沖出しは10～12月頃で、当初1辺が5～6mの小さな生簀に入れるが、10～30gになると計数して（奇形魚のチェックを含む）直径30m、深さ10～15mの円形生簀に約10万尾程度収容し、本養殖を開始している。その後、毎月1回生簀ごとに10～20尾すくい取り、魚体測定を行なっている。また、魚体測定結果と給餌量から飼料効率や増肉係数が求められている。ここではその値を用いて図7に平成11年産マダイの成長状況を示す。

マダイの成長は生簀別に差が大きく、当才魚では夏季8月に50～200g、年末には100～350gになった。また、翌年の年末には大きいもので800gを超え、一部出荷されているが、小さいものでは550g程度であった。この間、当才魚では10～12月、また、1才魚では7、8月に成長が停滞しているが、イリドウイルス病が発生したことにより給餌回数を減らしたためと考えられる。

飼料効率と増肉係数の推移を図8に示す。飼料効率は当才魚で高く、成長に伴って低下していたが、変動が著しく、200%以上を示すことや10%以下のこともあった。これは1ヶ月という短期間を処理していることとサンプル抽出時の偏りによるものと考えられ、数値を再検討することが必要である。一方、

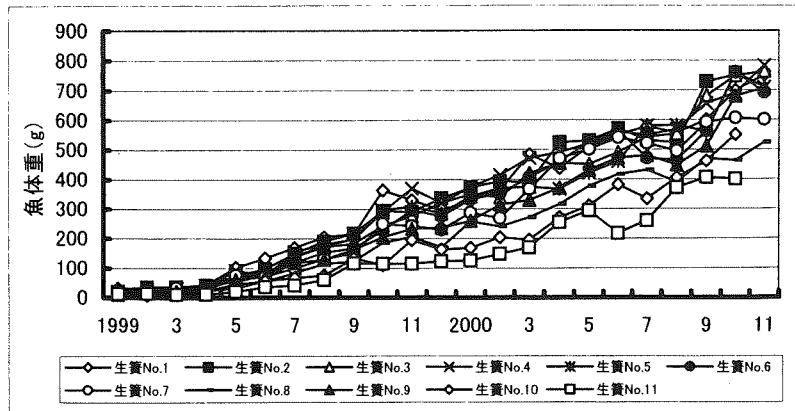


図7 田辺湾地元漁協における平成11年産マダイの成長

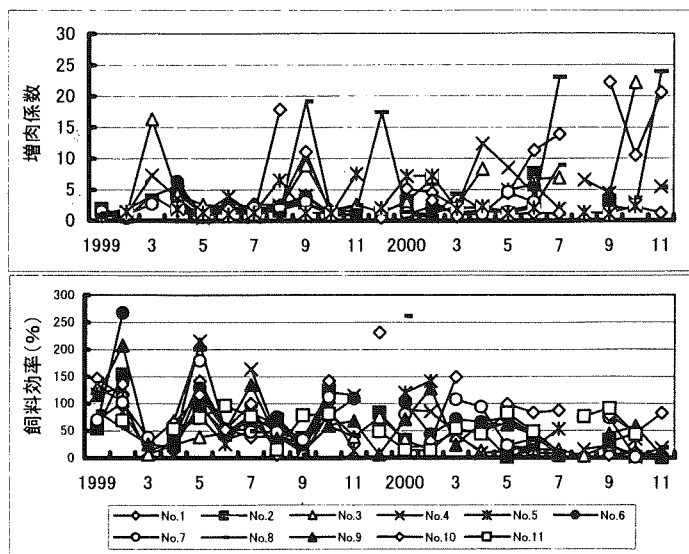


図8 田辺湾地元漁協における平成11年産マダイの増肉係数と飼料効率の推移

増肉係数は5以上を示すことが多く、飼料効率と同様に数値の再検討が必要であるが、いずれにしても飼料効率と増肉係数が著しく悪かった。ここでは1人が大型生簀数台分を担当しているが、給餌等の飼育管理が粗くなり、飼育成績を悪くしているものと考えられる。

次に、湯浅湾南部の小引浦と串本浅海漁場で行われているマダイ当才魚の飼育状況を表2に示す。

小引浦では、6月13日に約3万尾の種苗を地元大学より購入した。当初、7×7×5mの生簀2面に収容したが、9月4日に15×15×9mの生簀2面に収容し、本養殖が始まっている。ここで8月4日から10月3日までを第1期、また、10月4日から12月18日までを第2期として飼育日誌を解析した。開始当初、45.9gであった魚が第1期終了時には95.8g、第2期終了時には179.7gになり、4ヶ月半の間に約4倍に成長した。また、この間の斃死尾数は63尾（累積死亡率0.45%）で魚病の発生は全く認められなかった。飼料効率は、第1期と第2期が各々76.6%と70.9%、また、増肉係数は1.3と1.1できわめて良好な飼育状況であった。ここでは、大きな生簀に低密度（第1期終了時0.66kg/m<sup>3</sup>、第2期終了時1.24kg/m<sup>3</sup>）収容し、配合飼料を手まき給餌していることが、飼育成績の好結果につながっているものと考えられる。

串本浅海漁場のY業者とH業者は7月21日に地元大学から各々、2万尾と3.3万尾を購入した。Y業者は当初、6×6×4m小割2面に収容し、12月18日に12×12×7mの生簀2面に入れ替えている。この間、8月23日から10月6日までを第1期、また、10月7日から12月4日までを第2期として飼育日誌を解析した。魚の成長は開始時の31.4gから第1期終了時には85.8g、第2期終了時には145.3gで、約100日間で4.6倍に成長した。斃死尾数は第1期が87尾（累積死亡率0.88%）であったが、第2期にはイリドウイルス病の発生により352尾（累積死亡率3.6%）斃死した。イリドウイルス病の発生期には、給餌量はそれまでの約80%に抑えていたが、通常の給餌回数で対応していた。第1期と第2期の飼料効率は各々70.3%と65.5%、増肉係数は1.42と1.53であった。

H業者は当初6×6×4mの生簀に入れていたが、本養殖では13.5×13.5×9mの生簀に移している。この間、9月7日から11月6日までを試験期間として飼育日誌を解析した。魚の成長は開始時の38.3gが終了時には62.7gで、約2ヶ月間で1.6倍になった。この間の斃死尾数は599尾（累積死亡率4.3%）で、浮上して確認されなかった魚を含めると10%以上に及んでいたものと考えられる。これはイリドウイルス病の発生によるもので、この業者は病気発生時の摂餌の低下を補うため、アミエビや生餌を多量に投餌しているが、このことが病気を拡大させたものと考えられる。また、飼料効率は13.5%（乾物換算32.7%）、増肉係数は7.39（乾物換算3.06）で著しく悪かった。

### 3 漁場環境調査

田辺湾、串本浅海漁場と湯浅湾南部の小引浦において1年のうちで漁場環境が最も悪化する夏季の高水温期に環境調査を実施し、漁場環境の現況について検討した。

表2 マダイ当才魚の飼育成績

		小引浦 M業者	串本浅海漁場 Y業者	串本浅海漁場 H業者
尾数	開始時	14000	9900	14000
	1期終了時	13960	9813	13401
	2期終了時	13937	9461	
総魚体重	開始時	642.6	311.3	536.2
	1期終了時	1337.4	842	840.2
	2期終了時	2504.5	1374.7	
平均体重	開始時	45.9	31.44	38.3
	1期終了時	95.8	85.8	62.7
	2期終了時	179.7	145.3	
斃死尾数	1期	40	87	599
	2期	23	352	
総給餌量	1期	910	762.3	2469(1022.5)
	2期	1288	878	
飼料効率	1期	76.6	70.3	13.5(32.7)
	2期	70.9	65.5	
成長倍率	1期	2.09	2.73	1.64
	2期	1.88	1.69	
増肉係数	1期	1.3	1.42	7.39(3.06)
	2期	1.1	1.53	

( )内は乾物換算値で示す。



## 方 法

調査は田辺湾（図9の10定点）が8月9日、串本浅海漁場（図10の9定点）が8月2日、湯浅湾南部の小引浦（図11の6定点）が8月1日に行った。調査項目は水温、塩分、溶存酸素量、AVS、CODとマクロベントスである。採水は北原式採水器を用い表面と海底上1m層（底層）で行った。採泥はエクマンバージ型採泥器を用いて表面泥（0～1cm層）を採取し、CODとAVSの分析に供した。また、マクロベントスについてはエクマンバージ型採泥器で2回採泥し、1mm目合いのフルイに残ったものをマクロベントスとし、実体顕微鏡を用いて多毛類、棘皮類、節足類、軟体類とその他に区分して計数した。

分析方法は以下のとおりである。

水温：棒状水銀温度計

塩分：ヨーカル社製サリノメーターModel 601MK-III

DO：アジ化ナトリウム変法による

COD：漁場保全対策推進事業調査指針<sup>13)</sup>による。

AVS：漁場保全対策推進事業調査指針<sup>13)</sup>による。

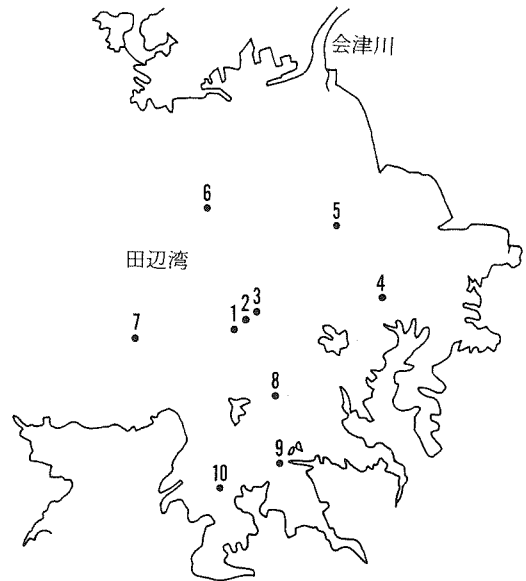


図9 田辺湾における調査定点

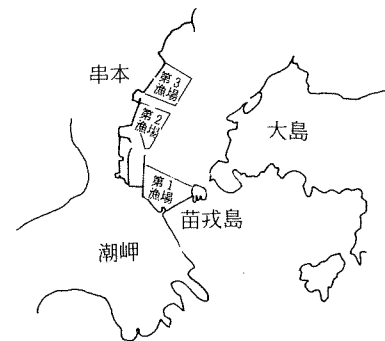
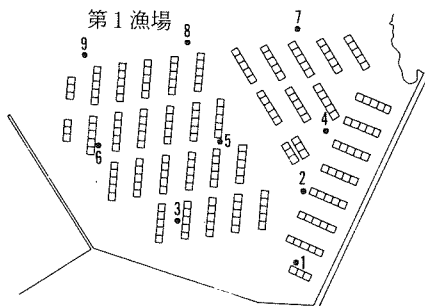


図10 串本浅海漁場における生簀配置と調査定点

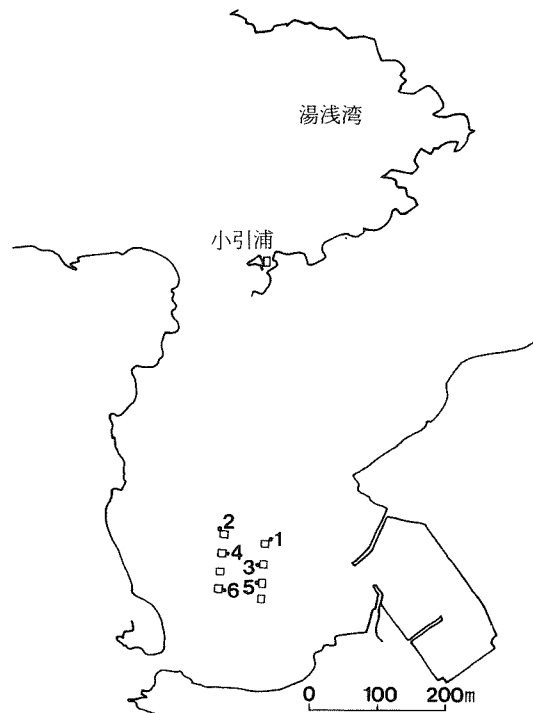


図11 湯浅湾南部小引浦の生簀位置と調査定点

## 結果 および 考察

### 1) 田 辺 湾

田辺湾では黒潮系外海水が湾口南側から進入し、反時計回りに流れ北部域から流出することが知られ

ている<sup>14)</sup>。この時も湾口南側から沖合養殖場にかけて低水温、高塩分水が分布し、外海水の進入していることが窺える。一方、湾奥部では表、底層の水温差が小さく、日射により底層水の暖められている状況が窺えた。溶存酸素量は表面が6.46~7.55mg/lであるのに対し、底層では5.36~6.8mg/lでいくぶん低かったが、従来から知られている<sup>15)</sup>ような貧酸素水塊の発生はみられなかった(図12)。

CODとAVSは概ね良く似た分布を示し、南部域から沖合養殖場ではCODが20mg/g・dry以上、AVSが0.2mg/g以上の範囲が広範囲にわたっていたが、湾口部や北部域では低く、従来から知られている分布<sup>8-11)</sup>と一致していた。しかし、CODとAVSの最大値は各々28.9mg/g・dryと0.46mg/gで、田辺湾では図4でもみられたように底泥の改善傾向が認められた。また、マクロベントスは、底泥の悪化した南部の養殖場周辺では $10^3$ 個体/m<sup>2</sup>以下で無生物に近い状態のところも広範囲にわたっていたが、湾口部や北部域では $10^3$ 個体/m<sup>2</sup>以上(最大 $4.4 \times 10^3$ 個体/m<sup>2</sup>)の密度で分布していた(図13)。

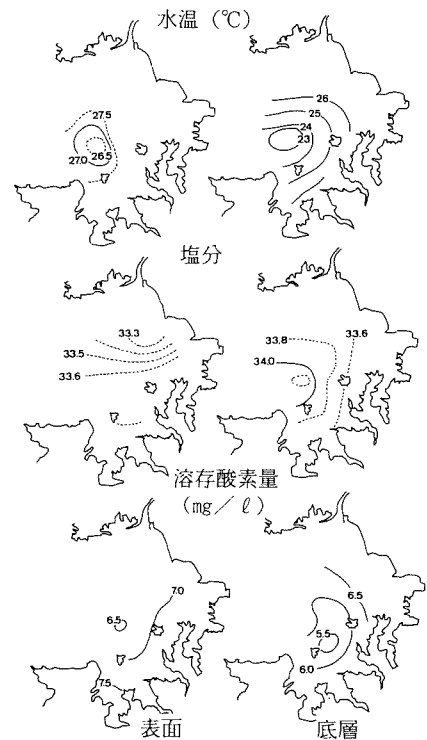


図12 田辺湾における水温、塩分と溶存酸素量の分布(8月9日)

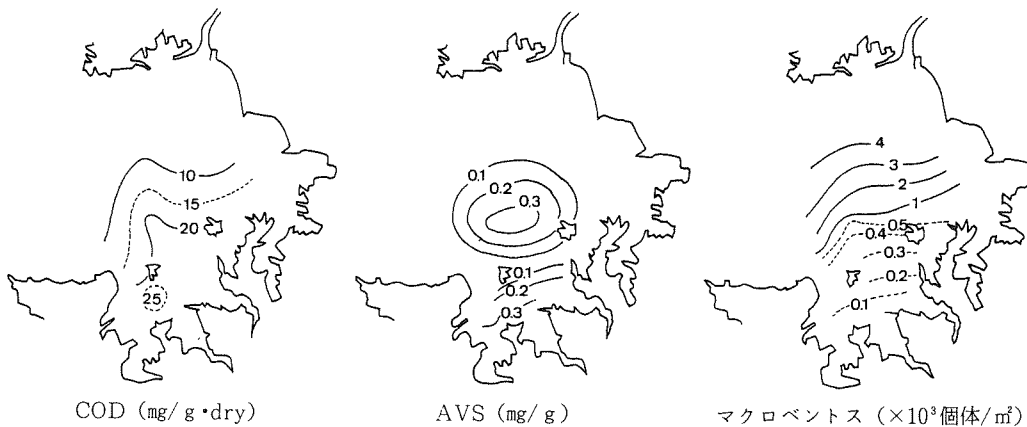


図13 田辺湾におけるCOD, AVSとマクロベントスの分布(8月9日)

## 2) 串本浅海漁場

水温は表面では22.0, 23.0℃台でこの時期としてはきわめて低かったが、ここでは沿岸湧昇により夏季でもこのような低温現象がしばしば観測されている<sup>16)</sup>。底層では漁場の奥から防波堤周辺で高かったが、水深の深い漁場周辺部では18, 19℃台で定点間の差が2.7℃あった。塩分は表面では27.0, 28.0台に低下していたが、底層では34.0台できわめて均一な分布を示した。溶存酸素量は表面では6.0mg/l台であったが、底層では5.0mg/l台で漁場周辺部の水深の深い所でいくぶん低下していた(図14)。

CODとAVSは漁場中央部から水深の深い所でいくぶん高く、2項目とも良く似た分布を示した。ここでは苗我島や古座川方面から入ってきた外海水が1文字防波堤にあたり、漁場奥を通過して中央部から漁場外に流出することが知られている<sup>17)</sup>。そこで、養殖に伴って負荷された残餌や糞等がこの流れに乗って、漁場中央部から水深の深い周辺部に堆積し、このような分布になっているものと考えられる。また、

マクロベントスは  $(5\sim 15) \times 10^3$  個体/m<sup>2</sup> で漁場中央部では極めて高密度に分布していた (図15)。

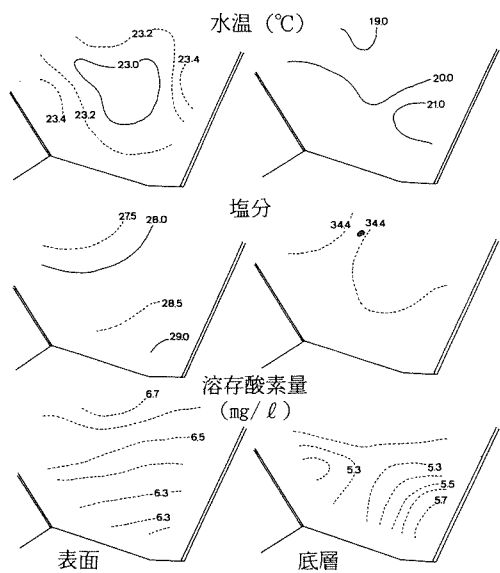


図14 串本浅海漁場第1漁場における水温、塩分と溶存酸素量の分布 (8月2日)

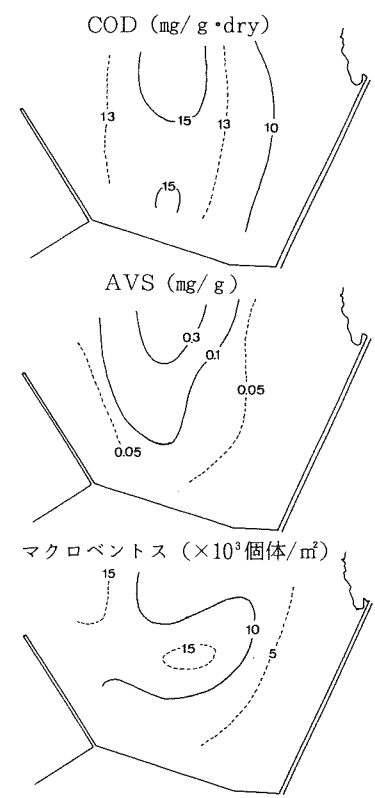


図15 串本浅海漁場第1漁場におけるCOD、AVSとマクロベントスの分布 (8月2日)

### 3) 湯浅湾南部 (小引浦)

小さな水域であることと定点の設定が隣接していたため、水温は24.8~25.8℃、塩分は32.78~33.08、溶存酸素量は5.94~6.42mg/lで、水平的にも、垂直的にもほとんど差がなく、きわめて均一な分布を示した (表3)。一方、CODは0.38~10.83mg/g·dry、AVSは0.006~0.144mg/gで長年にわたって行われた養殖漁業に伴う有機物負荷の影響は全く認められなかった。マクロベントスは  $(1.8\sim 4.9) \times 10^3$  個体/m<sup>2</sup> であった (表3)。

表3 湯浅湾南部の小引浦における環境調査結果

観測項目	観測層	St. 1	St. 2	St. 3	St. 4	St. 5	St. 6
水深		19	19	17	19	15	17
透明度		5.5	8	6	7	7	7
水温 (°C)	表面	25.2	25.8	25.2	25.5	25.4	25.4
	海底上1m	24.8	25.1	25	25.2	25.2	25.1
塩分	表面	32.8	33	32.89	32.99	32.78	33.01
	海底上1m	33.03	33.07	33.03	33.07	33.08	33.06
溶存酸素 (mg/l)	表面	6.42	6.08	5.99	6.05	6.31	6.08
	海底上1m	5.98	6.02	6.14	6.08	6.27	5.94
酸素飽和度 (%)	表面	90.4	86.6	84.4	85.5	88.9	86
	海底上1m	83.5	84.6	86.2	85.7	88.3	83.5
AVS (mg/g)		0.006	0.022	0.144	0.015	0.02	0.009
COD (mg/g·dry)		6.6	10.83	8.95	8.13	6.56	0.32
ベントス (個体/m <sup>2</sup> )	多毛類	4484	3330	2708	3286	2220	1354
	棘皮類	22	67	44	22	89	22
	節足類	111	111	377	89	200	244
	軟体類	311	244	488	333	266	155
	その他		0	67	0	22	0
	合計		4928	3752	3684	3730	2797

## 考 察

漁場環境が1年のうちで最も悪化する8月に3水域で環境調査を実施した。その結果、いずれの漁場においても底層水の溶存酸素量は5.0mg/l台で、あまり低下することがなかった。しかし、底質の環境指標として用いたCODとAVSでは3水域の状況が全く異っていた。田辺湾南部の養殖場周辺ではCODが20mg/g・dry以上、AVSが0.3mg/g以上で底質はきわめて悪化し、マクロベントスも $10^3$ 個体/m<sup>2</sup>以下で無生物に近い状態のところもあった(図

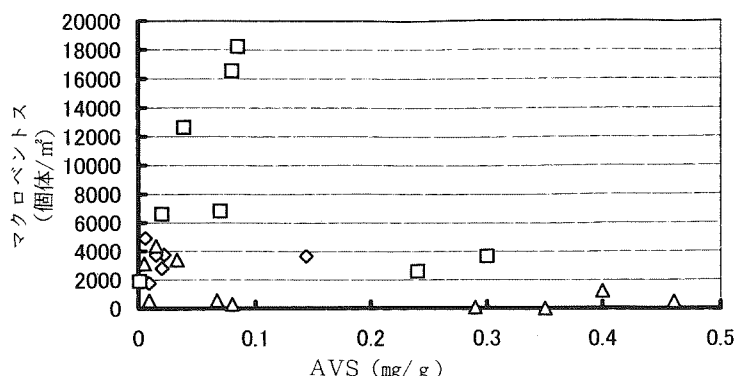


図16 3水域における底泥のAVSとマクロベントスの関係  
△：田辺湾，□串本浅海漁場，◇小引浦

13)。ここでは、夏季に外海水の進入が弱まって、海水が停滞した時にしばしば貧酸素水塊の形成される<sup>15)</sup>ことが知られているので、ここでの溶存酸素量は、1局面を捉えたものでたえず溶存酸素量が低下する危険性を備えている。串本浅海漁場ではCODが最大17.7mg/g・dryであったが、AVSは0.3mg/gで長年にわたる養殖漁場としての行使が底質の悪化を招いているものと考えられる(図15)。しかし、ここは水深が25~40mで比較的深いため魚の飼育水深である表~中層の水質に及ぼす影響は底泥よりも黒潮系水の進入度合が支配しているものと考えられる。一方、小引浦ではCODやAVSが低く(表3)、良好な漁場環境を備えていると考えられる。

更に、3水域の漁場環境の現況について比較するため、図16にAVSとマクロベントスの関係を示した。田辺湾は湾口部や北部域ではAVSが低く、マクロベントスも少なかったが、養殖場を中心にAVSが0.3mg/g以上で、マクロベントスがほとんどなく、漁場環境の悪化している状況が窺えた。串本浅海漁場ではAVSが0.05~0.1mg/gのところでは、マクロベントスが $10^4$ 個体/m<sup>2</sup>のオーダーできわめて多く、養殖漁業に伴う有機物負荷の影響で生物生産の高まっていることが窺えた。一方、図15にみられるように漁場最深部のAVSが0.2~0.3mg/gのところではマクロベントスが1/6程度に減少し、悪化の兆しが窺える。湯浅湾南部の小引浦では、AVSが低く、マクロベントスも少ないことから、長年にわたって続けられてきた養殖漁業の影響が全く認められなかった。

以上の結果から、田辺湾の養殖場は漁場環境が悪化している漁場。串本浅海漁場は負荷量と浄化力が微妙にバランスを保っているが、すでにピークに達している漁場。一方、湯浅湾南部の小引浦は養殖規模を縮小したことにより負荷量よりも浄化力が上回り、漁場環境が良好に保たれている漁場として位置づけられる。

### 4 給餌に伴う残餌・糞の負荷と水、底質の関係

養殖場の環境は投餌に伴う残餌や糞等の有機物負荷と水域の備えた浄化力のバランスにより形づくられている。ここでは、給餌状況、残餌・糞等の堆積量と水、底質の漁場環境調査を実施し、給餌に伴う有機物負荷と漁場環境の関係について検討した。

## 方 法

調査は、田辺湾沖合養殖場(図9の3定点: St. 1, 2, 3)、串本浅海漁場(図10の3定点: St. 1, 3, 6)と湯浅湾南部の小引浦(図11のSt. 3)で8月から毎月1回の割合で行った。調査項目は水温、

塩分、溶存酸素量、透明度、COD、AVS、トラップ堆積量と投餌量である。小引浦では1つの生簀をはさんで2定点でトラップを設置したが、水質と底質については2定点の中央の1点で行った。また、田辺湾では、これらの項目とともにマクロベントスについても調査した。トラップは図17に示すように2ℓの広口ポリビン（口径75mm）を生簀底面から5m下（上層）と海底上1m（下層）に設置し、ブイでポリビンの口がたえず上を向くように調整した。堆積物はガラス・フィルター（GFC）でろ過した後、110℃で1時間乾燥し、重量を測定した後、1日・1㎡当りの堆積量に換算した。また、調査期間中のトラップ設置点への投餌量については、飼育状況調査の飼育日誌から抽出した。これ以外の観測項目の分析は前項の漁場環境調査に準じて行った。

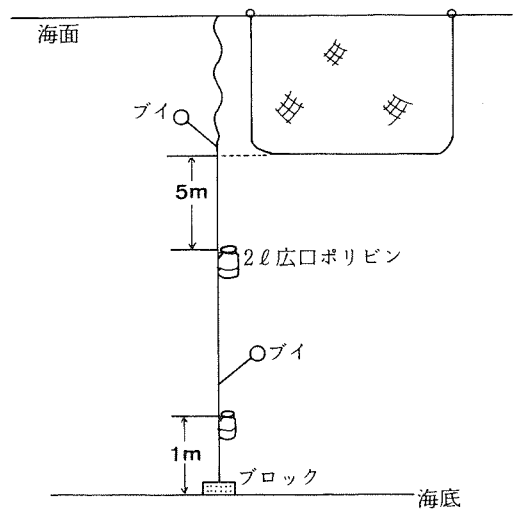


図17 トラップの設置状況

### 結果および考察

#### 1) 田辺湾沖合養殖場

調査を開始した8月から12月までは透明度が4～8mで推移していたが、1月19日には生簀が漁場から撤去されたことと、冬季のプランクトン量の低下により、透明度が16mになった。水温は8月が最も高く、この頃には水温成層が形成されていたが、9月頃からの水温の下降に伴って水温差がなくなり、11月中旬には上下層が混合していた。また、1月中旬には表面が15℃台、底層では13℃台になった。塩分は表面では降雨後に低下することがあったが、底層では34.0付近ではほぼ一定していた。溶存酸素量は9月と10月に最も低下していたが、5.0mg/ℓ以下になることがなかった（図18）。投餌量と堆積量はマダイとブリに区分して示した。マダイの投餌量は35～343kg/生簀・日でイリドウィスル病の発生がおさまった11月が最も多かった。トラップへの堆積量は、上層では18.8～80g/㎡・日で概ね投餌量を反映していたが、底層では121.5～1030g/㎡・日で対応はみられなかった。一方、ブリの投餌量は251～635kg/生簀・日で9月が最も多かった。トラップへの堆積量は、上層では18.3～120.1g/㎡・日、底層では、369.4～934.3g/㎡・日で投餌量と全く対応していなかった。一方、CODとAVSは8月以降緩やかに上昇し、12月上旬にはCODが28mg/g・dry、AVSが0.9mg/gになったが、生簀群を撤去して約40日経過後の1月19日にはCODが15.9mg/g・dry、AVSが0.19mg/gに低下し、底質が急激に回復していた。また、

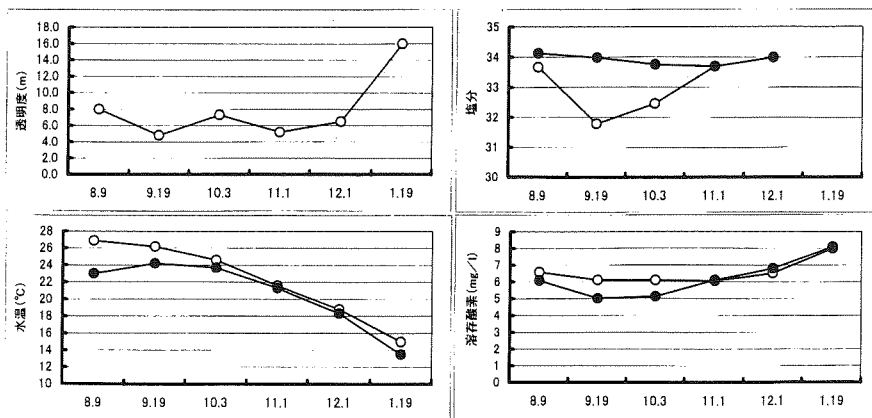


図18 田辺湾沖合養殖場における環境項目の推移  
 ○—○—：表層，—●—：底層

マクロベントスはCODやAVSと相反して推移し、12月には100個体/m<sup>2</sup>でほぼ無生物状態になったが、1月中旬には10<sup>3</sup>個体/m<sup>2</sup>を超え、急速に回復していた(図19)。

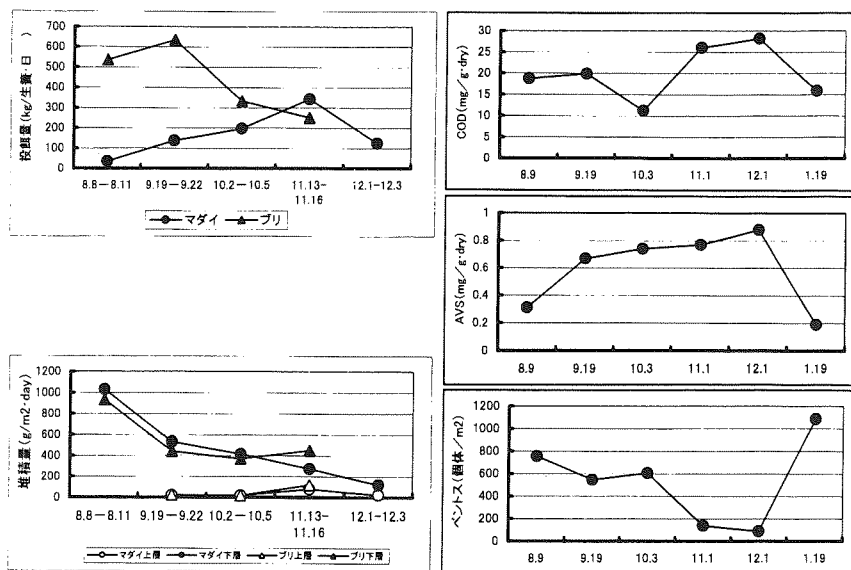


図19 田辺湾沖合養殖場における投餌量、堆積量と底質の推移

## 2) 串本浅海漁場

透明度は夏季に5, 6 m台まで低下していたが、秋、冬季には10m以上を示すことが多かった。水温は表面では9月上旬~10月上旬, また底層では10月上旬に最も高くなったが、26°Cを超えることがなかった。表面では降雨による塩分低下が認められたが、底層では34.00以上の高塩分状態で推移していた。溶存酸素量は夏~秋季にはいくぶん低下していたが、5.0mg/l以下に低下することがなかった(図20)。投餌量と堆積量は、マダイの当才魚(St.1)と1才魚(St.6)に区分して示した。当才魚では投餌量が4.7~24kg/生簀・日で、魚の成長に伴って緩やかに増加していた。トラップへの堆積量は上層では16.7~56.5 g/m<sup>2</sup>・日で12月を除くと概ね対応していた。また、下層では22.1~117.1 g/m<sup>2</sup>・日で投餌量を良く反映していた。一方、1才魚はMPを投餌していたので生餌を乾物換算して示した。その結果、投餌量は53.5~107kg/生簀・日で10月を除くとほぼ一定していた。トラップへの堆積量は、上層では18~67.9 g/m<sup>2</sup>・日、底層では、26.3~148.5 g/m<sup>2</sup>・日であった。CODとAVSは調査を開始した8月には各々、9.28mg/g·dryと0.037mg/gできわめて低かったが、その後緩やかに上昇し続け、1月にはCODが13.2mg/g·dry, また、AVSは0.16mg/gになった(図21)。

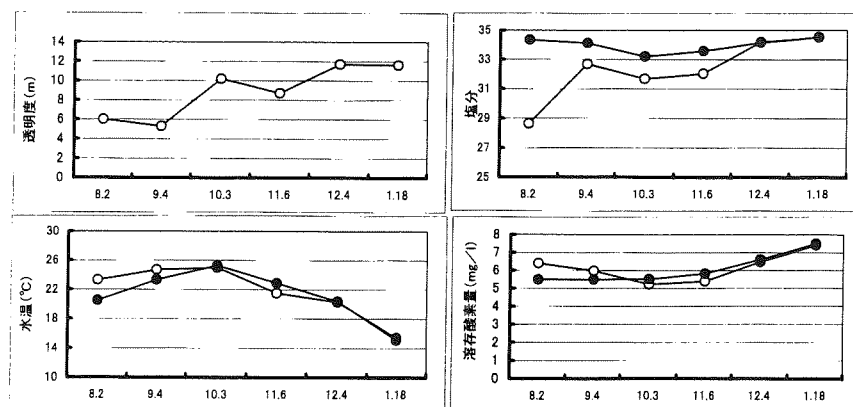


図20 串本浅海漁場における環境項目の推移  
—○—: 表層, —●—: 底層

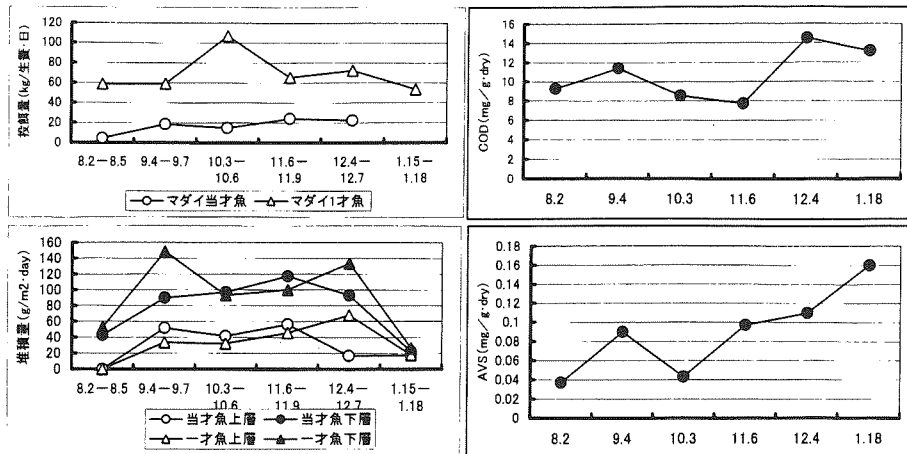


図21 串本浅海漁場における投餌量, 堆積量と底質の推移

### 3) 湯浅湾南部 (小引浦)

透明度は6~14mで推移し, 夏季にも10mを超えることがあった。水温は表, 底層間の差がほとんどなく, 9月中旬に26°Cで最も高く, 10月から下降し, 1月には13°C台になった。塩分は降雨後に表面で30.00台に低下し, 底層でも33.00付近まで低下していたが33.50以上で推移することが多かった。溶存酸素量は表, 底層ともにほとんど差がなく5 mg/l以上で推移していた (図22)。

投餌量は11月にいくぶん多かったが, それ以外は10~20kg/生簀・日でほぼ一定していた。トラップへの堆積量は, 上層では6.5~33.7 g/m²・日, 下層では20.9~75.1 g/m²・日で, 下層の9月の値を除くと概ね投餌量を反映していた。CODとAVSは一時的な増減が認められるものの調査を開始した8月から1月にかけて両項目とも緩やかに低下していた (図23)。

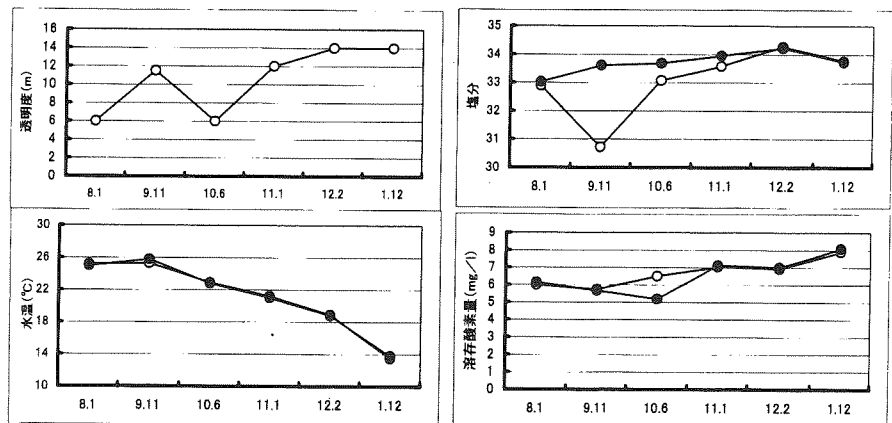


図22 湯浅湾南部小引浦における環境項目の推移  
—○—: 表層, —●—: 底層

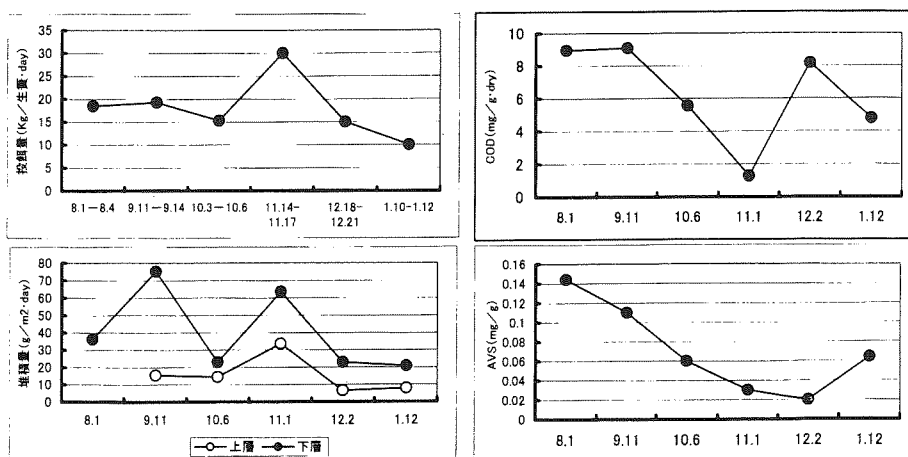


図23 湯浅湾南部小引浦における投餌量, 堆積量と底質の推移

## 考 察

田辺湾沖合養殖場、串本浅海漁場と湯浅湾南部の小引浦で給餌に伴う有機物負荷と漁場環境の関係について検討した。

給餌量と堆積量の関係をみると、小引浦ではマダイ当才魚に対する給餌量と上、下層のトラップ堆積量の間には正の相関関係が認められ、生簀直下では1 kgの投餌量に対して、1日・1 m<sup>2</sup>当り1.37～2.56 gの残餌や糞の堆積することが明らかになった。ただ堆積量には臨接する生簀からの影響や土粒子等の自然沈降物が混入しているため、これらの値を除くとこの値はより小さく、傾きがゆるやかになるものと考えられる。また、串本浅海漁場ではマダイの当才魚と1才魚の投餌量と堆積量の間には一部の値を除くと概ね正の相関が認められ、投餌量の増加に伴って堆積量が増加していた。しかし、田辺湾沖合養殖場ではマダイに対する投餌量と上層トラップの関係を除くと両者間に対応はみられなかった。ここではブリとマダイが大規模に養殖されているため、臨接する生簀からの影響が大きく、投餌量と堆積量の間に対応が認められなかったものと考えられる。ただ、調査は8月から行っているため、プロットする個数が少ない。今後、周年を通して調査を行い、両者の関係を検討する必要がある(図24)。

また、田辺湾沖合養殖場では底泥の環境指標として用いたCODとAVSが8月以降緩やかに上昇し、マクロベントスが減少していたが、生簀の撤去により両項目とも急激に回復していた。このことは、漁場の行使に伴って、底質の悪化していく状況を捉えたもので、養殖漁場としての行使が漁場環境に大きく影響していることを示唆するものである。串本浅海漁場ではCODとAVSが8月から翌年1月まで上昇し続けていたが、今後、周年を通して結果を検討する必要がある。また、湯浅湾南部の小引浦では、夏～冬季にかけて、CODやAVSが緩やかに低下し続けていたことから、ここは前述したように浄化力が負荷を上回っているものと考えられる。

### 5 底泥の酸素消費速度調査

養殖漁場の環境評価については種々の項目が提案されているが、ここではその1つとして提案されている大森・武岡理論<sup>18)</sup>の現場における検証を行った。

## 方 法

調査は2001年1月4～5日に上芳養湾目良港の当該試験筏の周辺で行った(図25)。定点は生簀直下(St. 1)を基点にして、ここから50mずつ離してSt. 2, St. 3, St. 4を設定した。なお、調査方法等は全て横山氏のマニュアル<sup>19)</sup>に準じて行った。

調査開始時、各定点に図17に示したトラップ(ここでは海底上2 m層に設置)を垂下し、24時間後の堆積量を調査した。底泥の採取はエクマンバージュ型採泥器にセットした2本のアクリルパイプ(内径43 mm)で行い<sup>20)</sup>、コアサンプルを2本採取した。この時、北原式採水器を用いて現場底層水を採取し、

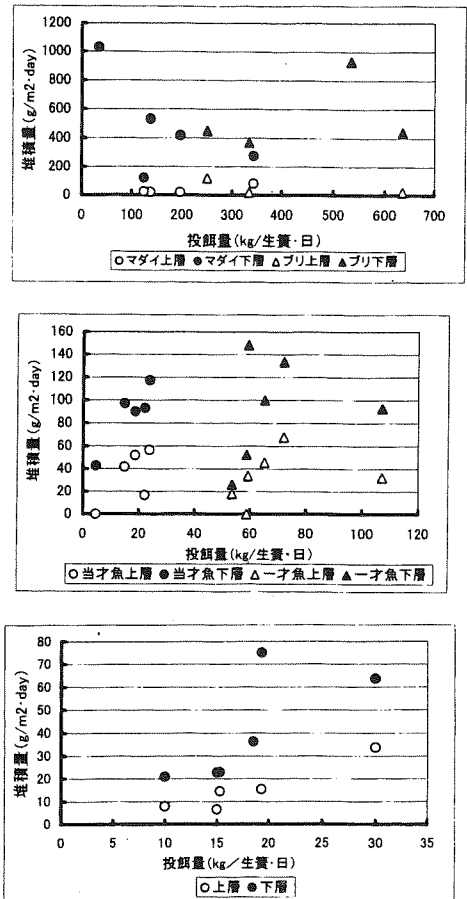


図24 投餌量とトラップ堆積量の関係  
上段：田辺湾、中段：串本浅海漁場  
下段：小引浦



持ち帰ってからブローアを用いて酸素飽和水を作成した。また、コアサンプルの底泥直上水をぬき取り、酸素飽和水と入れかえた後1本のコアサンプルにはフェノールを3%の割合で添加した。その後、2本のコアサンプルにBODセンサー（ポータブルデジタル溶存酸素計Model ND-10）をセットし、図26に示したようにして、約2時間程度コアサンプル内の溶存酸素量の減少する割合を記録し、酸素消費速度を求めた。

また、水質分析計（YSI社 Model 610-DM）を用いて水温、塩分、溶存酸素量の測定、採泥試料については前項に準じてAVSの分析を行った。

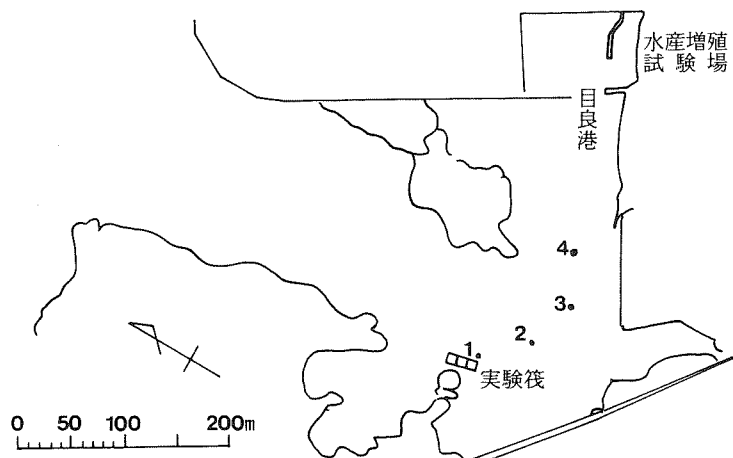


図25 上芳養湾目良港における調査定点

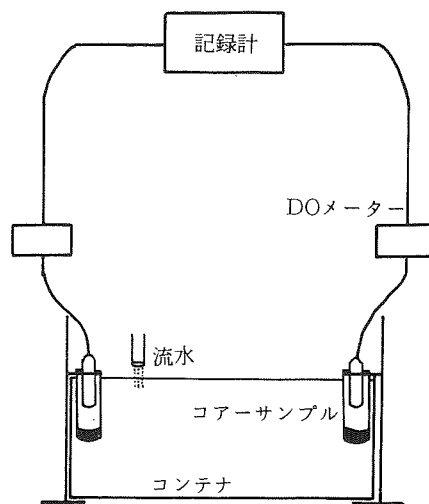


図26 酸素消費速度測定模式図

### 結果および考察

調査結果を表4、また、各観測項目の定点別の値を図27に示した。この時には4定点分の酸素消費速度を1日で調査したが、水温、塩分は4定点ともほぼ近似していたことから、同じ水塊内で調査が行われたものと考えられる。

トラップによる堆積量は生簀直下 (St.1) の23.6 g / m<sup>2</sup>・日が最も多く、ここから離れるに従って直線的に減少し、St.4では約1/2になった。AVSはSt.1では0.39mg / gであったが、St.2では0.65mg / gで最も高く、ここから離れると急激に減少していた。St.2の周辺では昨年まで養殖が行われていたり、現在では観光釣堀が行われている。

また、港口部からの海水流動が最も停滞することからAVSが高かったものと考えられる。マクロベントスは、St.1~3では300~600個体 / m<sup>2</sup>であったが、St.4では1.5×10<sup>3</sup> 個体 / m<sup>2</sup>で最も多く、AVSと相反する傾向で分布していた。生物学的なSODは135~225.3 mg O<sub>2</sub> / m<sup>2</sup>・hでSt.2が最も低く、St.1, 3, 4はほぼ近似し、マクロベントスと良く似た傾向を示した。一方、化学的なSODは31.7~63.4mg O<sub>2</sub> / m<sup>2</sup>・hで生物によるものの1/4程度で、St.4を除くと他の3定点はほぼ近似してい

表4 目良湾の酸素消費速度測定調査結果

	St.1	St.2	St.3	St.4
水深	9	8.5	6	5
生け簀からの距離	0	50	100	150
表面	水温(°C)	12.7	12.7	12.7
	塩分	34.9	34.9	34.9
	DO(mg/l)	9.25	9	9.43
海底上1m	水温(°C)	12	12.1	12.7
	塩分	34.99	34.98	34.9
	DO(mg/l)	8.05	8.52	9.23
トラップ堆積物 (g/m <sup>2</sup> ・日)	23.6	18.5	16.1	11.7
AVS (mg/g)	0.39	0.65	0.12	0.056
ベントス (個体/m <sup>2</sup> )	多毛類	511	266	444
	棘皮類	0	0	0
	節足類	44	0	22
	軟体類	22	0	22
	その他	22	22	0
合計	599	288	488	1488
酸素消費速度 (mgO <sub>2</sub> /m <sup>2</sup> ・h)	生物学的	222.5	135	190.9
	化学的	63.4	53.7	63.4

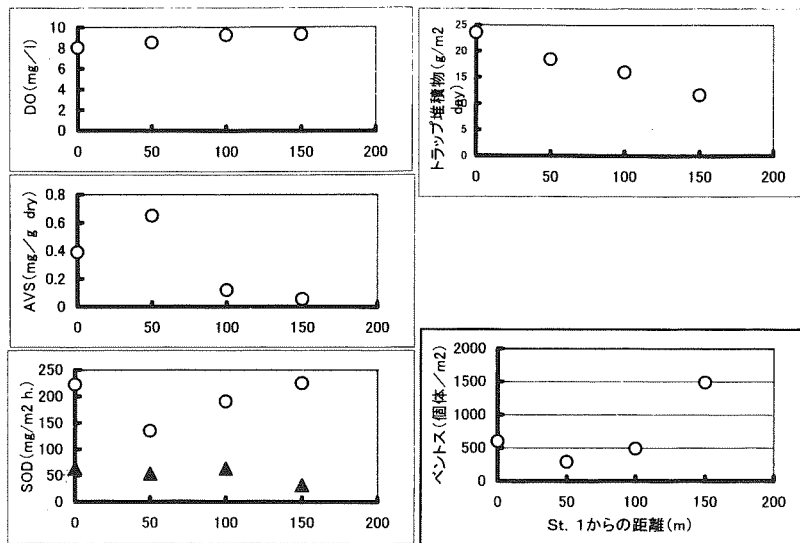


図27 酸素消費速度調査における観測項目の距離的關係

た。

図28にAVSとSODの關係を示した。生物によるSODはAVSが0.4mg/g・dryまでの範囲では近似していたが、それ以上では急激に減少していた。また、化学的なSODは、AVSが0.05mg/g・dryの定点で最も低かったが、AVSが0.1mg/g・dry以上ではほぼ一定の値を示した。

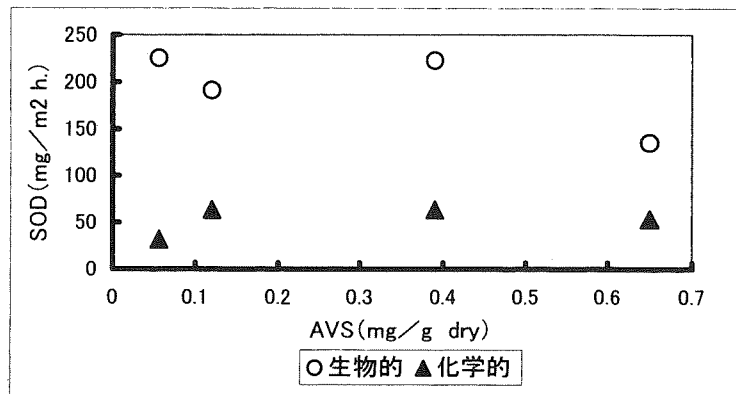


図28 AVSとSODの關係

## 6 水槽実験による汚染負荷量

養殖漁場の環境は投餌に伴う残餌や糞等の有機物負荷により形作られる。そこで、残餌や糞等の有機物負荷量を把握することは極めて重要である。しかし、野外調査では海面へ投入された飼料が残餌や糞として分離していく過程の時間変化やその量的關係を把握することは困難である。そこで、条件設定の比較的容易な水槽実験によりハマチを用いて残餌や糞等の有機物負荷量の量的変化を検討した。

### 方 法

供試魚は沖の生簀から1トンの円形FRP水槽(図29)に移して7~25日間予備飼育しその後、給餌状態が安定した時点で実験を開始し、給餌から最大96時間後まで水槽内の固形有機物を採取した。供試魚の大きさ・換水率等の実験状況は表5に示す。

給餌は摂餌状況を観察しながら喰い残しが出ないように飽食量を与

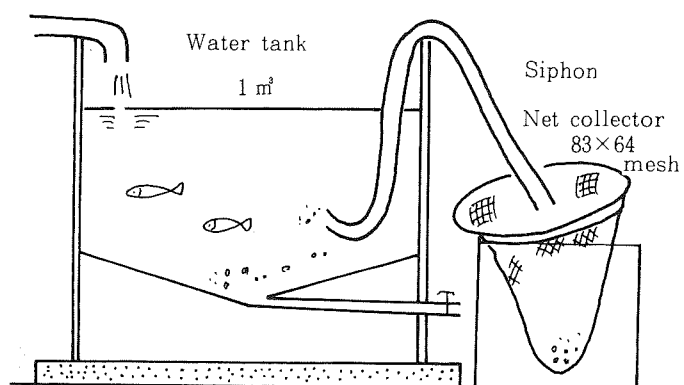


図29 水槽飼育実験装置の概要

表5 水槽実験時の諸条件

項 目	1回目	2回目	3回目
実 験 日	00.8/24~8/28	00.9/21~9/25	00.10/30~11/1
尾 又 長 (cm)	40.0~45.2	43.0~47.4	28.4~35.0
魚 体 重 (g)	950~1800	1000~2180	260~520
供 試 尾 数 (尾)	10	10	14
換 水 率 (回/h)	1.44	1.44	0.98
水 温 (°C)	27.1~29.3	25.1~27.0	21.3~22.8
D O (mg/l)	4.30~5.48	5.68~6.04	4.03~5.20
馴 致 日 数 (日)	7	14	25
餌 種 類	DP	MP	MP
投 餌 量 (g-dry)	215.97	326.23	157.07

えた。固形有機物は設定時間毎に排水バルブを開け、100 lの海水をネットコレクター（83×64メッシュ）を用いてろ過する方法で採取した。また、この時ネットコレクターを通過した海水については、1 lを採取し、ガラスフィルター（GFC）でろ過して回収した。排水サイホンから流出する分については常時ネットコレクターで受けて先の採取物と合わせた。また、注排水口で設定時間毎に採水し、水温、溶存酸素量とSSの分析を行い、水槽内の水質を求めた。なお、残餌・糞等の固形有機物は110°Cで乾燥後秤量したもので、すべて乾燥重量で示した。

### 結果および考察

水槽実験はツバス期（MP投与）とハマチ期（MP, DP投与）の魚を用いて3回行ったが、採取物量の時間変化を図30に示す。各実験とも給餌直後から固形有機物が採取され始め48時間又は96時間の実験終了時まで常に固形有機物が採取されたが、各実験とも給餌後24時間以降は緑や白の宿便のみに変わったためここでは給餌後24時間目までの固形有機物を実験給餌によるものとして扱う。

これらを24時間目までの総量を100とした百分率で見ると（図31）、各実験とも給餌後1時間と6~8時間後にピークを示した。今回の実験ではこれらが残餌か糞かは分からないが、前回C/N比より残餌と糞を区分した実験<sup>20)</sup>に従い給餌後2時間までを残餌、それ以降を糞と仮定すると給餌直後に多量の残餌が出ていることになる。今回の実験では喰い残しが出ないように給餌したのでこれらは吐き出しや餌の懸濁物と考えられ、喰い残しがでないように給餌してもかなりの汚染負荷物質がでるものと思われた。また糞は給餌後3時間から約24時間に渡って排出され、給餌後6~8時間に多く出ていることが明らかとなった。

更に、給餌量を100とした時の収支（図32）で見ると、MPでは給餌量の約15~20%、DPでは給餌量の約35%が汚染負荷物質として海水中に流出していることが明らかとなった。これらは前回の生餌を用いて行った実験結果のツバス期38%、ハマチ期42~52%に比べると低い値であり、DPやMPが生餌に比べて漁場環境への負荷が少ないという従来の考えと同様の結果となった。また今回の実験ではDPを用いた時の方がMPを用いた時よりも多くの汚染負荷量が出るという結果になったが、残餌についてはDPはMPに比べて嗜好性が低く吐き出し塊が多かったこと、また、糞はDPはMPに比べて消化吸収率が低く魚体に留まる前に排出されたことに由来するのではないかと推測された。

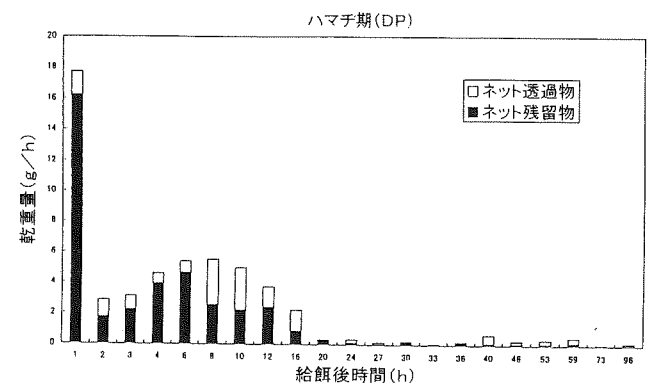
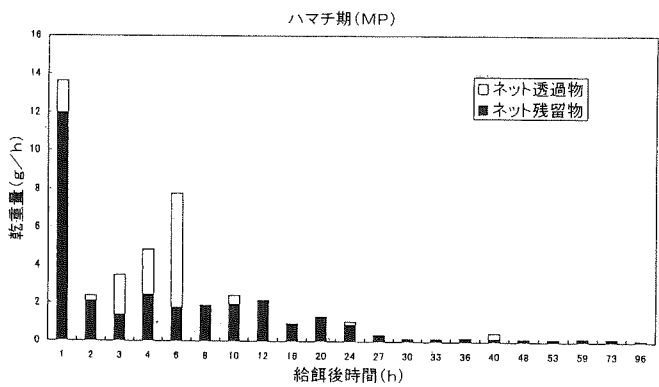
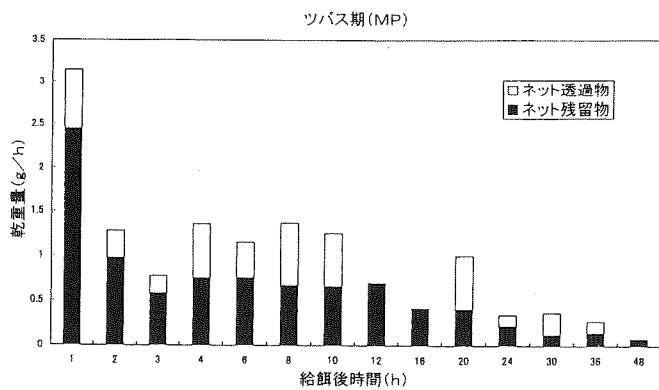


図30 水槽実験における固形採取量の時間変化

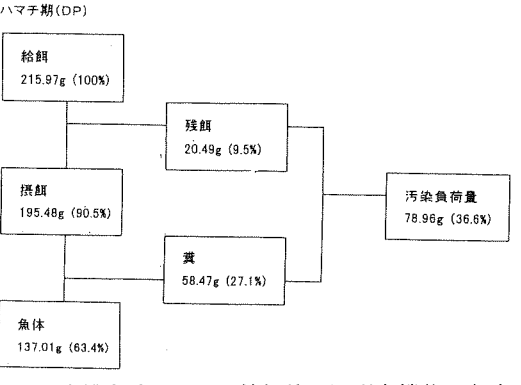
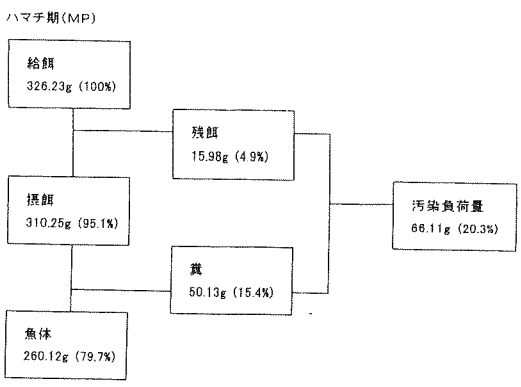
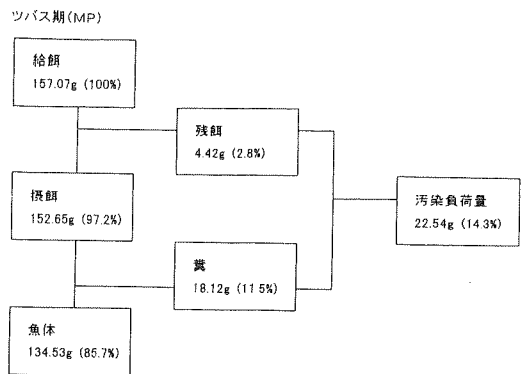


図32 水槽実験における給餌後の固形有機物の収支

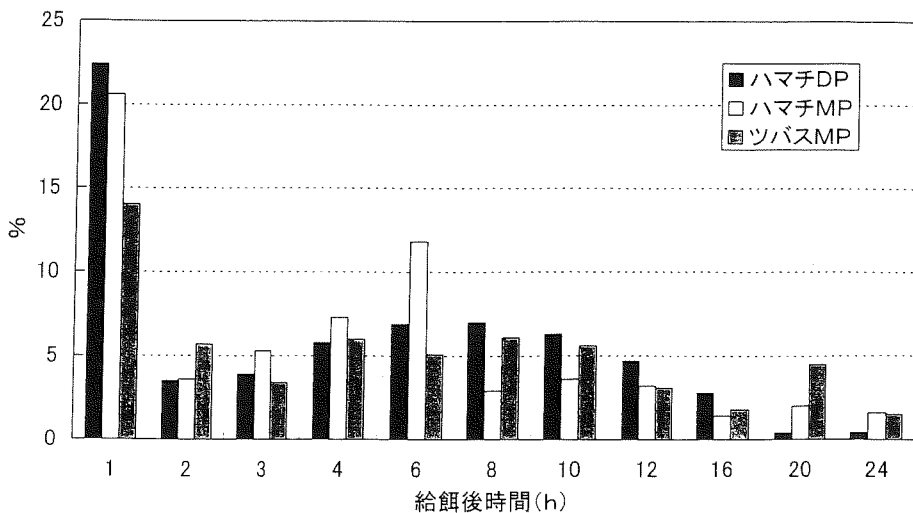


図31 給餌後24時間までの固形採取物の時間変化

## 7 漁場配置と有機物の拡散

養殖漁場の環境は、残餌や糞等による有機物負荷とその漁場が備えている自浄作用、すなわち、海水交換の程度により形成される。そこで、自浄作用を高めるために海水交換を阻害しない生簀配置をすることが重要である。

ここでは、田辺湾沖合養殖場の生簀群において流況調査と残餌や糞の拡散状況を調査し、流況を考慮した中での残餌や糞の拡散状況を検討した。

### 方 法

調査は、田辺湾沖合養殖場にある生簀群とその周辺に16定点を設定し（図33）、10月17～19日（1回目）と11月20～22日（2回目）に行った。この16定点に、図17に示すトラップを設置し、2～3日間の堆積物を集め、前項に準じて処理し、1日・1㎡当りの堆積量を求めた。また、この期間中に、St. 8, 9, 10, 11, 12, 16で電磁流向・流速計（アレック電子製Model ACM 210-D）を用いて海面下1 m, 5 m, 10 mと20 m層の流向、流速を調査した。なお、流速計は直読式であることと1周期の流れを捉えるため、1回目の調査時には10月18日8時45分から11時3分と19日12時40分から14時56分に合計4回、また、2回目には11月20日12時48分から15時6分と11月22日10時45分から12時29分にかけて合計5回6定点の流向、流速を調査した。

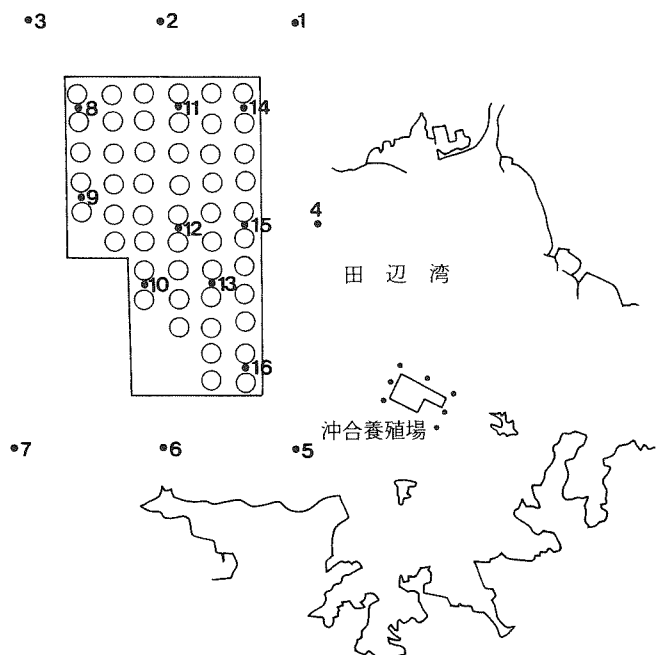


図33 田辺湾沖合養殖場における生簀配置と調査定点

### 結果および考察

沈降物の堆積量を表6に示す。1回目の調査時には、上層では4.2～48 g/㎡・日でSt.12が、また、下層では26.9～593.2 g/㎡・日でSt.15が最も多かった。また、上層と下層の堆積量の最大値と最小値では10～20倍の差があった。堆積量の最大値を100とした時の相対値と10 m層の流向・流速の分布を図34に示す。10 m層ではWとSE方向の3～5 cm/秒の流れが卓越していたが、生簀群内では流向が乱れ、St.12やSt.16では時間ごとに流向が異なっていた。また、ここでは示していないが、観測層ごとに流向・流速が乱れていた。このような状況の中、上層では堆積物が生簀群中央部で最も多く、ここを中心にW-E方向に扁平な分布を示したが、生簀群外では少なく、大半が生簀群内に沈降していた。ところが、下層では分布の中心がNE方向に移り、

表6 沈降物の拡散調査（田辺湾）

St.	10月17日～19日		11月20日～22日	
	上層	下層	上層	下層
1			13.7	120.7
2	4.2	26.9	24.7	132.6
3		84.7	56.1	93.2
4	6.3	172.4	1.8	96.3
5	7.2	270.6	4.1	316.5
6	5.6	309.7	3.3	181.5
7	4.9	142.2	2.5	150.8
8	14.4	272.2	66.5	203.3
9	23.1	279.6	12.4	286.8
10	17.1	276.3	28.4	456.6
11	12.5	142	64	355.2
12	48	304.5	69.6	273.2
13		204.6	16.4	329.9
14	8.3	213.8		173.4
15	28.6	593.2	49.4	191.9
16	24.2	366.9	24.6	259.5

単位：g/㎡・day

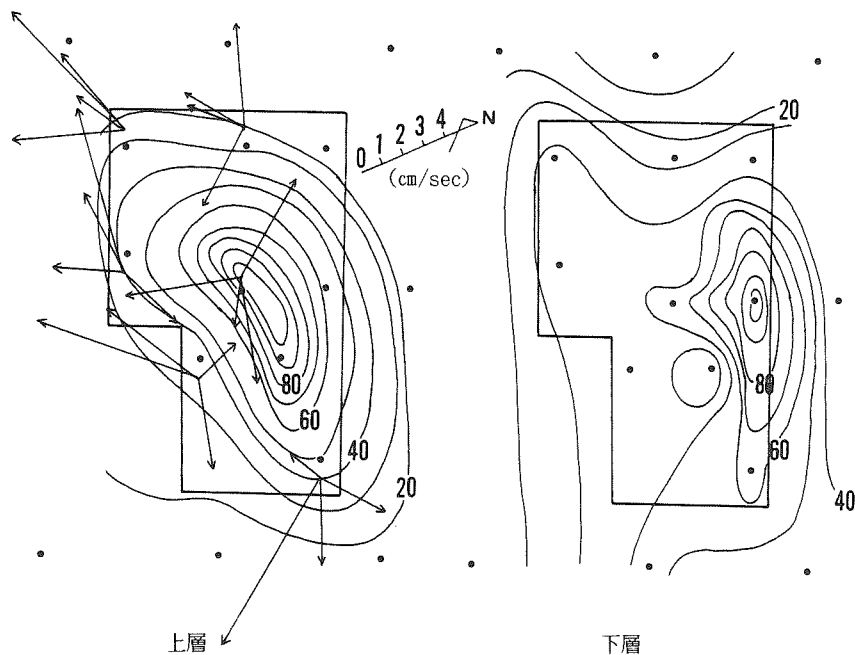


図34 10m層の流況と堆積物の拡散範囲（10月17日～19日）  
 図中の単位は%で示す。

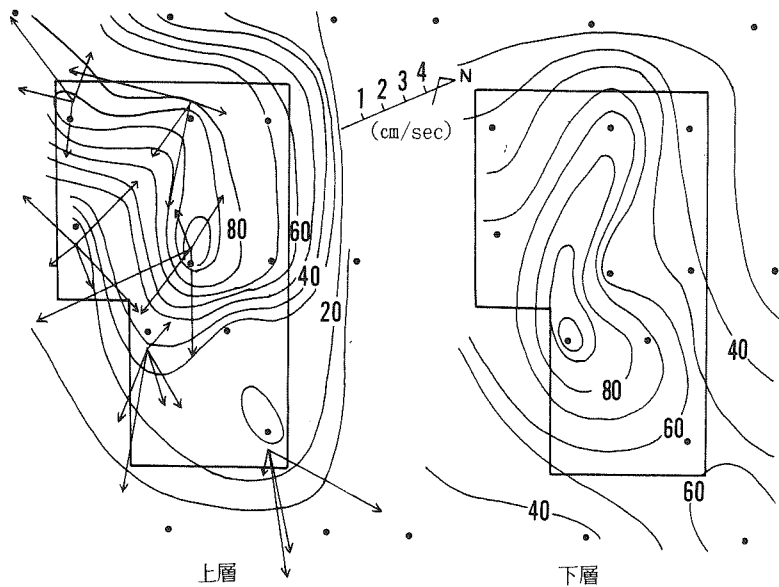


図35 10m層の流況と堆積物の拡散範囲（11月20日～22日）  
 図中の単位は%で示す。

ここを中心に生簀群外へも多く堆積していた。

11月20～22日には上層では $1.8\sim 69.6\text{ g/m}^2\cdot\text{日}$ でSt.12が、また、下層では $93.2\sim 456.6\text{ g/m}^2\cdot\text{日}$ でSt.10が最も多かった（表6）。堆積量の最大値を100とした時の相対値と10m層の流向・流速の分布を図35に示した。この時にはE～SE方向の3 cm/秒程度の流れが卓越していたが、10月の調査時と同様に定点別、また、同一定点でも観測時間ごとに流向が乱れていた。上層の堆積量は生簀群中央に分布の重心をもち、沖側に向かって多く、岸側の定点では少なかった。また、下層では分布の重心がSE方向に移り、生簀群外も含めて広範囲に分散していた。

## 8 生け簀の配置転換に伴う流況シミュレーション解析

養殖漁業は長年にわたる過密養殖により漁場環境が悪化し、その結果、赤潮や魚病の発生による歩留まりの低下、また、成長の低下などといった様々な弊害が生じている。持続的な養殖生産を維持するには残餌や糞などの有機物負荷が自然の浄化力を上回らないことが重要である。そこで、過去の観測データと前項に示した流況調査結果から生簀の配置転換による生簀周辺の流れの予測を行った。

なお、本年度は流況変化予測を下記の手順で行った。

- ① 生簀が流れから受ける力を理論検討で求める。
- ② この結果をもとに生簀単体の理論抵抗係数を定め、この値を用いて流れのシミュレーションを行い、流況観測結果と一致するかを検討する。
- ③ その結果から理論抵抗係数値の妥当性を確認をする。
- ④ 生簀単体と生簀群の抵抗係数を定める。

### 1) 理論検討

流れの中で生簀（網・養殖施設）が受ける力を理論的に検討した。

初めに生簀の網を構成するロープが受ける力を求め、次にロープの力を合成して網、すなわち生簀が受ける力を求めた。

#### (1) ロープに働く力

流れに対して直角に置かれたロープが受ける力は、同じ太さの円柱で例えることができる（図36）。直径  $d$ 、長さ  $L$  の円柱が流速  $u$  の定常流から受ける力は適当な係数  $C_0$  を用いて次の式で与えられる。

$$F = \frac{C_0 \cdot \rho \cdot d \cdot U^2 \cdot L}{2}$$

$F$ ：円柱に働く力

$C_0$ ：流れのレイノルズ数や物体の形状で定まる係数

$\rho$ ：水の密度

$d$ ：円柱の直径

$L$ ：円柱の長さ

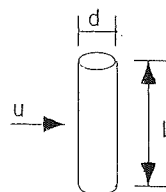


図36 流れにおかれた円柱

同じ太さのロープに働く力は上式で求めることができる。

#### (2) 生簀に働く力

生簀の網に働く力は、網を構成するロープに働く力を単純に加算して計算する。縦方向のロープは本数を数えて全体の長さ上に上記の式を適用する。横方向のロープは流れの方向に対するロープの角度を考慮して、流れを遮る長さについて上記の式を適用する。

この結果、半径  $R$ 、高さ  $D$  の生簀が流速  $U$  の一様な流れの中で受ける力は次式で与えられる。

$$F = \frac{C_0 \cdot \rho \cdot d \cdot R \cdot D}{2s} \alpha \cdot \left(1 + \left(\frac{u}{U}\right)^2\right) \cdot U^2$$

$$\alpha = \int_0^\pi (1 + \sin \theta) d\theta = \pi + 2 = 5.142$$

ここで記号の意味は以下の通りである。

$C_0$ ：抵抗係数

$d$ ：網を構成するロープの直径

$s$ ：網の隣り合うロープの間隔

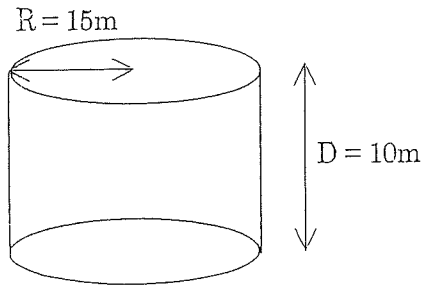
- R : 円形生簀の半径
- D : 円形生簀の水深方向の長さ
- U : 場の流速
- u : 流れの場で生簀背後の流速

(3) 計算例

前記の式を当該地域の生簀に適用して、生簀が流れから受ける力を計算した。対象とした生簀の諸元は図37のとおりである。流速は観測結果から平均的な流れとして5 cm/秒を採用した。結果は表7のとおりである。

表7 円形生け簀が流れから受ける力

生け簀の種類	受ける力 (トン)
ハマチ用	0.141
マダイ用	0.132



	ハマチ用	マダイ用
ロープの太さ	3mm	2mm
網目の間隔	3.03cm	2.16cm

図37 生簀の諸元

2) シミュレーションモデル

(1) 基本式

3次元のナビエ・ストークスを水深方向に積分して、水深方向に2層化した2次元2層モデルを用いた。計算式は以下のとおりである。

$$\frac{\partial U_1}{\partial t} = -U_1 \frac{\partial U_1}{\partial x} - V_1 \frac{\partial U_1}{\partial y} - g \frac{\partial \zeta}{\partial x} + fV_1 - \gamma_1^2 \frac{(V_1 - V_2) \sqrt{(U_1 - U_2)^2 + (V_1 - V_2)^2}}{(\zeta - h_b)} + \rho_a \gamma_a^2 W_x |W| + A_H \left( \frac{\partial^2 V_1}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V_1}{\partial y^2} \right) - \gamma_f \frac{U_1 \sqrt{U_1^2 + V_1^2}}{(\zeta - h_b)}$$

$$\frac{\partial V_1}{\partial t} = -U_1 \frac{\partial V_1}{\partial x} - V_1 \frac{\partial V_1}{\partial y} - g \frac{\partial \zeta}{\partial y} + fU_1 - \gamma_1^2 \frac{(V_1 - V_2) \sqrt{(U_1 - U_2)^2 + (V_1 - V_2)^2}}{(\zeta - h_b)} + \rho_a \gamma_a^2 W_y |W| + A_H \left( \frac{\partial^2 V_1}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V_1}{\partial y^2} \right) - \gamma_f \frac{V_1 \sqrt{U_1^2 + V_1^2}}{(\zeta - h_b)}$$

$$\frac{\partial U_2}{\partial t} = -U_1 \frac{\partial U_2}{\partial x} - V_1 \frac{\partial U_2}{\partial y} - \frac{\rho_1}{\rho_2} g \frac{\partial \zeta}{\partial y} + \gamma_1^2 \frac{(U_1 - U_2) \sqrt{(U_1 - U_2)^2 + (V_1 - V_2)^2}}{(h_b - H)} + \gamma_b^2 \frac{U_2 \sqrt{U_2^2 + V_2^2}}{(h_b - H)} + A_H \left( \frac{\partial^2 U_2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 U_2}{\partial y^2} \right)$$

$$\frac{\partial V_2}{\partial t} = -U_2 \frac{\partial V_2}{\partial x} - V_2 \frac{\partial U_2}{\partial y} - \frac{\rho_1}{\rho_2} g \frac{\partial \zeta}{\partial x} + \gamma_1^2 \frac{(V_1 - V_2) \sqrt{(U_1 - U_2)^2 + (V_1 - V_2)^2}}{(h_b - H)} + \gamma_b^2 \frac{U_2 \sqrt{U_2^2 + V_2^2}}{(h_b - H)} + A_H \left( \frac{\partial^2 U_2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 U_2}{\partial y^2} \right)$$



$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial [(\zeta - h_b - H)U_1 + (h_b - H)U_2]}{\partial x} + \frac{\partial [(\zeta - h_b - H)V_1 + (h_b - H)V_2]}{\partial y} - w = 0$$

$$w + \frac{\partial [(h_b - H)U_2]}{\partial x} + \frac{\partial [(h_b - H)V_2]}{\partial y} = 0$$

ここで記号の意味は次のとおりである。

$U_1, U_2$ : 流速の X 成分 (添字 1 は上層, 2 は下層を表す)

$V_1, V_2$ : 流速の Y 成分 (添字 1 は上層, 2 は下層を表す)

$w$ : 下層から上層へ鉛直方向への流速

$\zeta$ : 基準面からの水位

$H$ : 水深

$W$ : 風速

$f$ : コリオリ係数

$h_b$ : 下層の水深

$\rho_a$ : 空気の比重

$\rho_1, \rho_2$ : 上層および下層の水の比重

$\gamma_a^2$ : 海面の摩擦係数

$\gamma_f$ : 生簀の抵抗係数

$\gamma_b$ : 海底摩擦係数

なお, 図38に計算式で用いた座標系を示す。

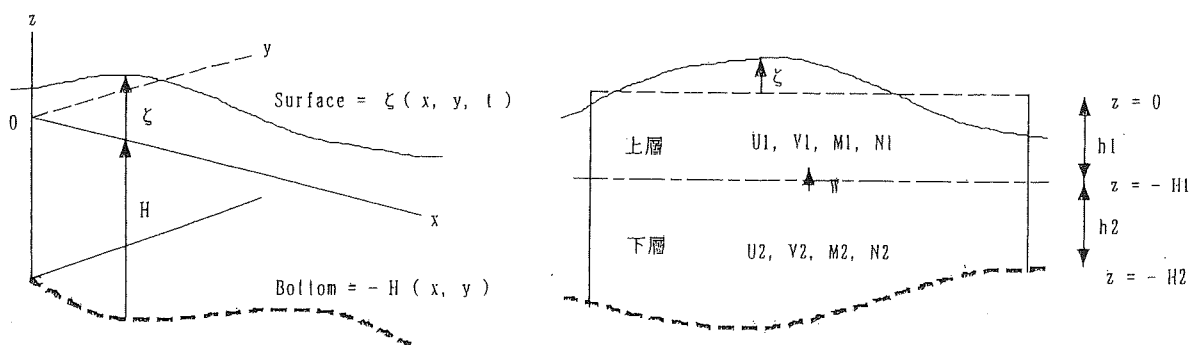


図38 計算式の座標系

## (2) 抵抗係数 K

基本式の中で K を含む項は生簀が流れに及ぼす抵抗を表したものである。流れが生簀に及ぼす力は前述の式で求めることができるが, その力は反作用として流体に働く力でもある。このことをもとに前述の生簀に働く力の式を, 以下の方法で基本式に組み込んだ。流れの計算式は単位体積に対する運動を記述したものである。このため生簀の抵抗式をそのまま計算式に組み込むことはできない。

生簀の抵抗方式の右辺を半径 R と水深方向の長さ D で割って, 単位面積当たりの抵抗力にし, 更に流れの計算式では水の密度  $\rho$  が消去されていることを配慮し, 計算式の中で次の形にして組み込んだ。なお, 生簀の抵抗は流れの中心線部分と端の部分では異なるが, ここではどの地点でも一律とし, 抵抗は平均値を用いた。

$$-KU_1\sqrt{U_1^2+V_1^2}$$

$$-KV_1\sqrt{U_1^2+V_1^2}$$

ここで抵抗係数Kは

$$K = \frac{C_0 \cdot d}{2s} \alpha \cdot \left(1 + \left(\frac{u}{U}\right)^2\right)$$

与えられるが、この時点で生簀背後の流速  $u$  は未知である。しかし取り合えず値を決める必要があるので、流速の観測結果から、背後で流速が3割減速すると考え、 $u = 0.8 U$  と仮定した。

その結果、係数Kは次のように簡略化される。

$$K = \frac{C_0 \cdot d}{2s} \cdot 5.142 \cdot \left(1 + (0.8)^2\right) = 4.22 \cdot \frac{C_0 \cdot d}{s}$$

### (3) 生簀単体のシミュレーション

前記で理論的に検討した抵抗係数を用いて、定常流に生簀が設置された場合、生簀単体が流れに与える影響をシミュレーションにより調査した。

#### ① 検討範囲

検討範囲は生簀を中心とした矩形の領域とした。その大きさは生簀周辺の流れに境界部分が影響しないように配慮し、流れの上流側、下流側に50m、平行方向に30mの距離をとり、全体として、130m×90mの矩形領域とした(図39)。なお、生簀の直径は30mとした。

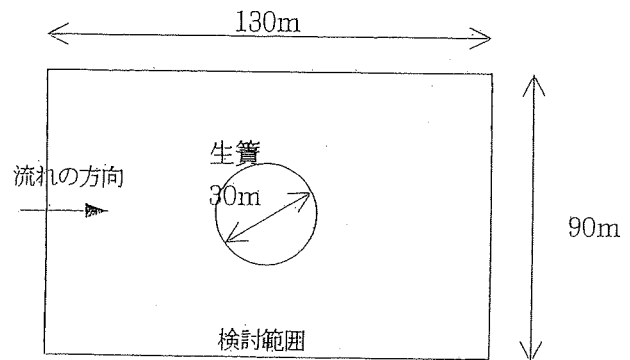


図39 シミュレーションによる検討範囲

#### ② 計算メッシュ

計算は有限要素法で行ったため、メッシュは三角形とした。計算で用いたメッシュ図を図40に示す。

#### ③ 層の分割と水深

漁場の平均水深は約30mであることと生簀の深さが約10mであることを配慮し、層の分割は上層を10m、下層を20mとした(図41)。

#### ④ 境界条件

前項の流況観測結果によれば、当該海域の平均的な流速は約5cm/秒である。今回はこの流速で評価を行うものとし、境界部の水位を設定した。試行錯誤の結果、上流側の水位を下流側より0.04cm高くした(図42)。

#### ⑤ 生簀の抵抗係数

生簀の抵抗係数は前述した次の式をハマチ用とマダイ用の生簀に用いた。

$$K = \frac{C_0 \cdot d}{2s} \cdot 5.142 \cdot \left(1 + (0.8)^2\right) = 4.22 \cdot \frac{C_0 \cdot d}{s}$$

その結果、表8が得られたが、この結果からシミュレーションではこれらの平均値である0.33を抵

抗係数として用いた。生簀の抵抗係数は、生簀内部メッシュで網に接するもののみ上記の値を用いた。その他のメッシュでは0とした

⑥ その他のパラメータ

海底摩擦係数、渦動粘性係数は表9の値を用いた。

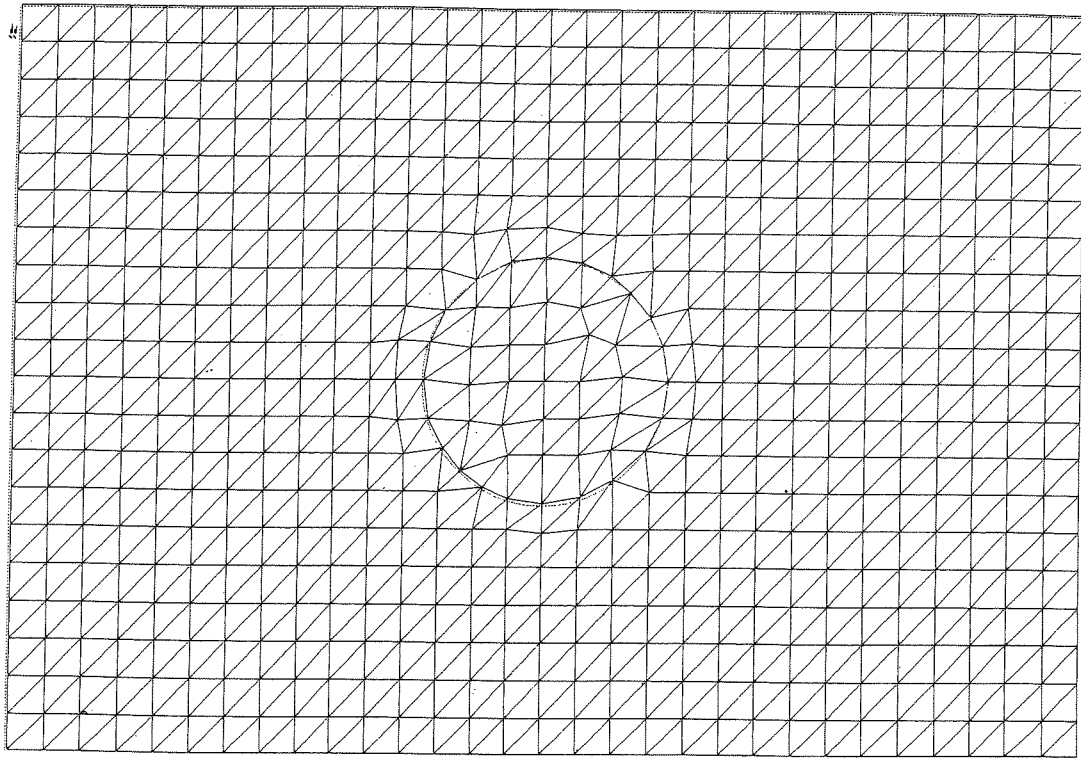


図40 単位生け簀計算用のメッシュ図

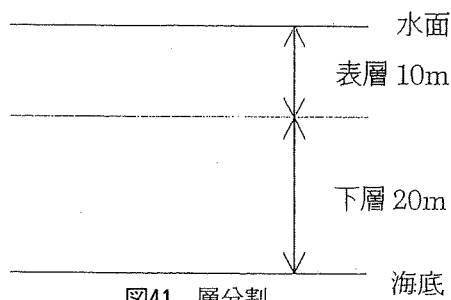


図41 層分割

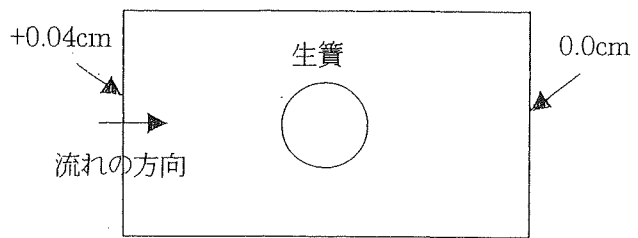


図42 境界水位の設定

表8 抵抗係数

生け簀の種類	係数 $C_0$	太さ $d$	間隔 $s$	抵抗係数 $K$
ハマチ用	0.83	0.3	3.03	0.347
マダイ用	0.83	0.2	2.16	0.324

太さと間隔の単位はcm

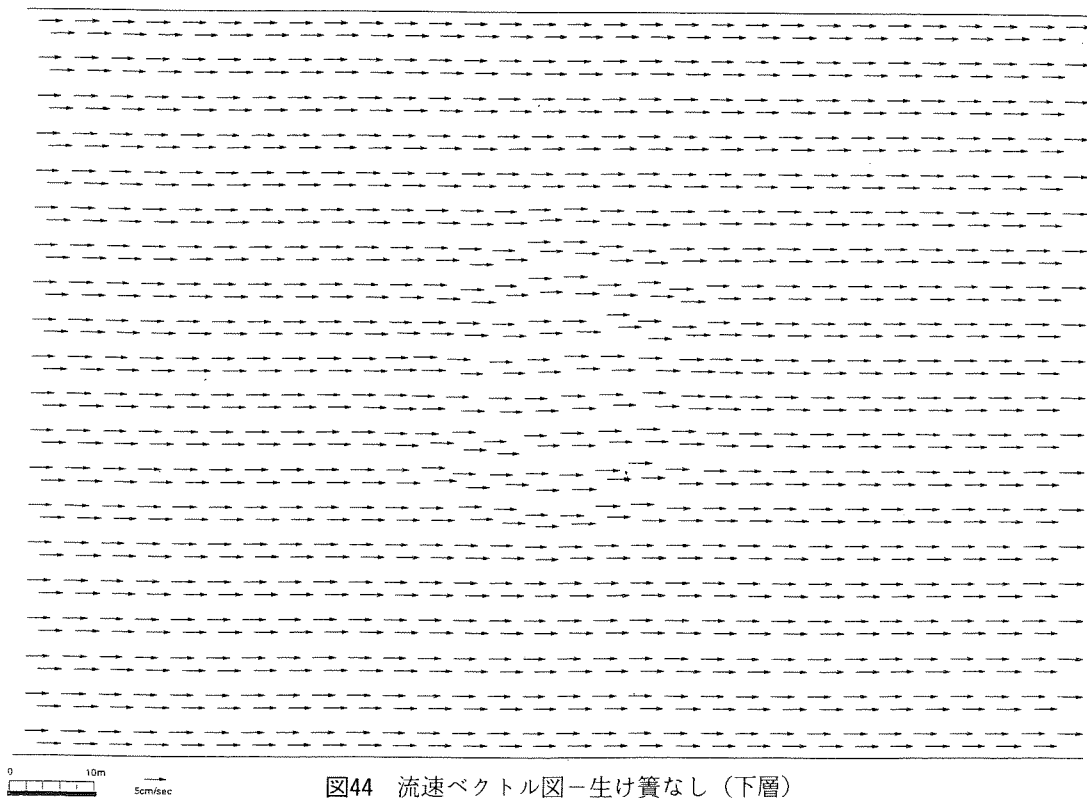
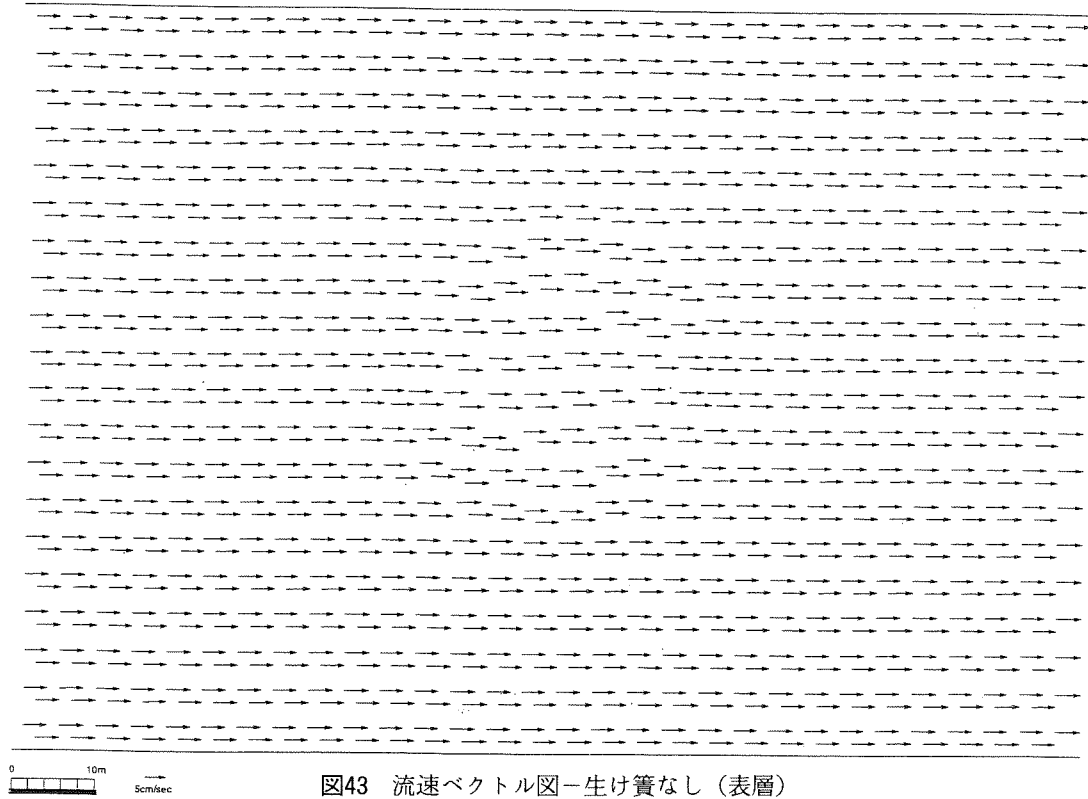
表9 計算に用いたパラメータ

項目	値
海底摩擦係数	0.0026
渦動粘性係数	5000

(4) 生簀単体でのシミュレーション結果

抵抗係数が 0.31 の場合の計算結果を以下の図に示す。

図43と図44は生簀が無い場合の表層と下層の流速ベクトル図である。また、図45と図46が生簀単体がある場合の表層と下層の流速ベクトル図である。更に、生簀の影響を調べるために、生簀が無い場合に



比べて流速がどの程度減速しているかを示したのが図47である。なお、下層では影響がわずかであるため表層のみを示してある。

この結果によれば、生簀の中で流速が約1割程度減速し、生簀の周囲にも狭い範囲で同じ程度減速する領域が見られる。下層はほんのわずかではあるが、加速される領域が見られた。

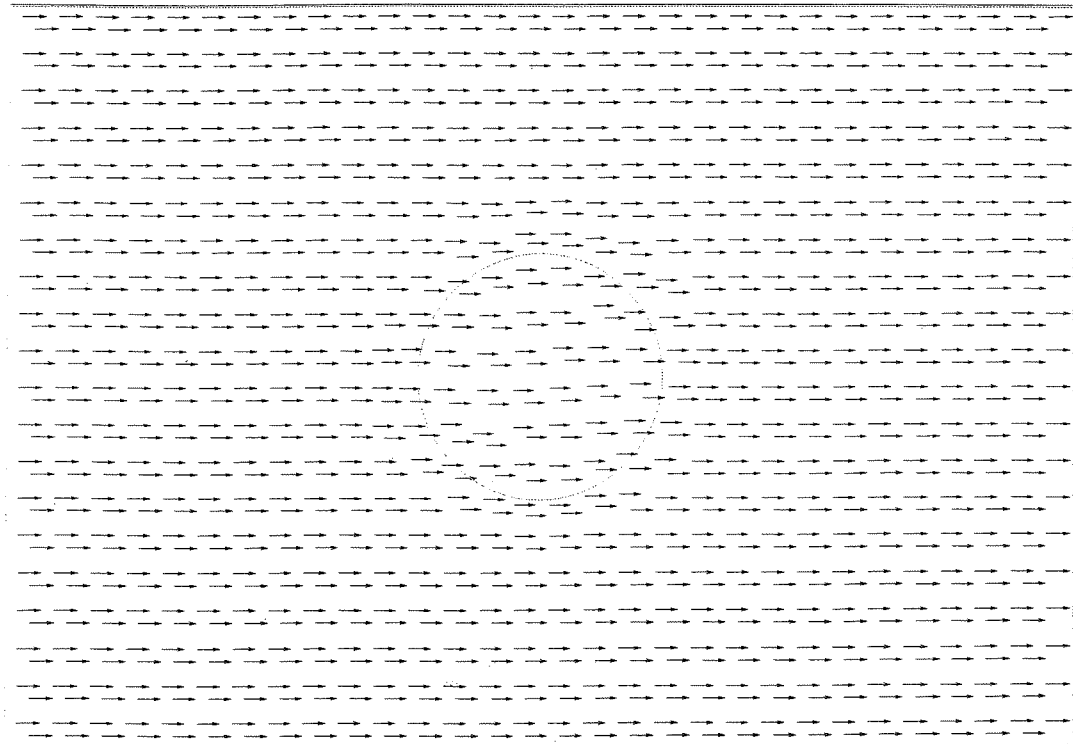


図45 流速ベクトル図-生け簀あり（表層）

抵抗係数：0.33

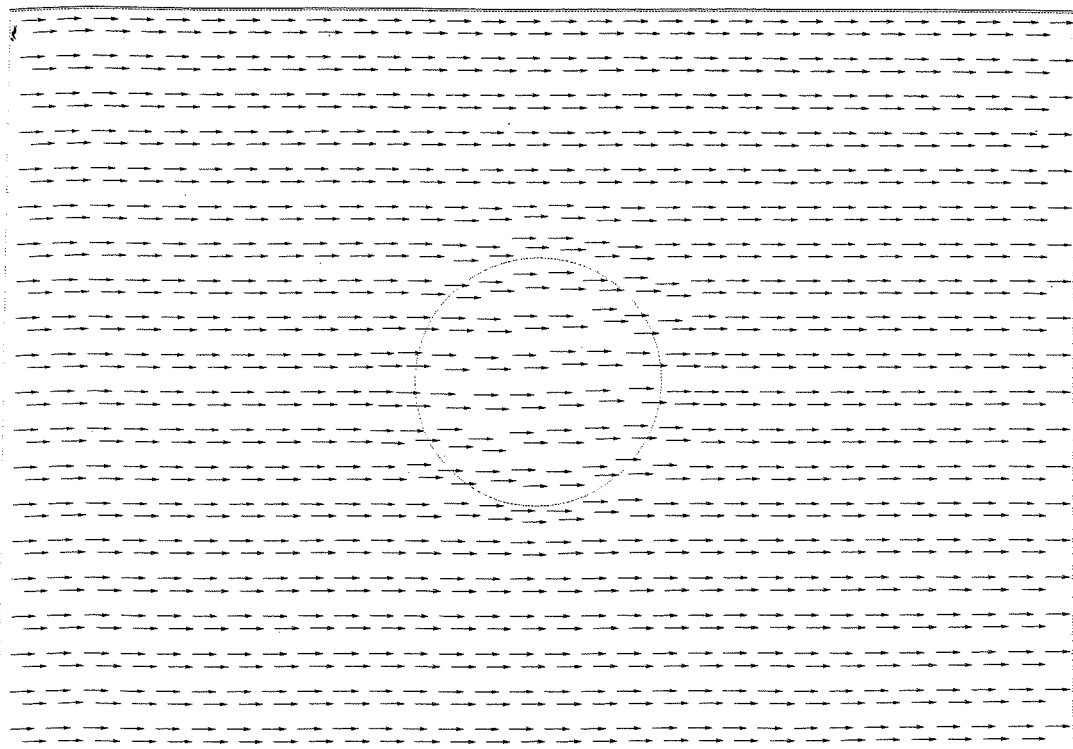


図46 流速ベクトル図-生け簀あり（下層）

抵抗係数：0.33

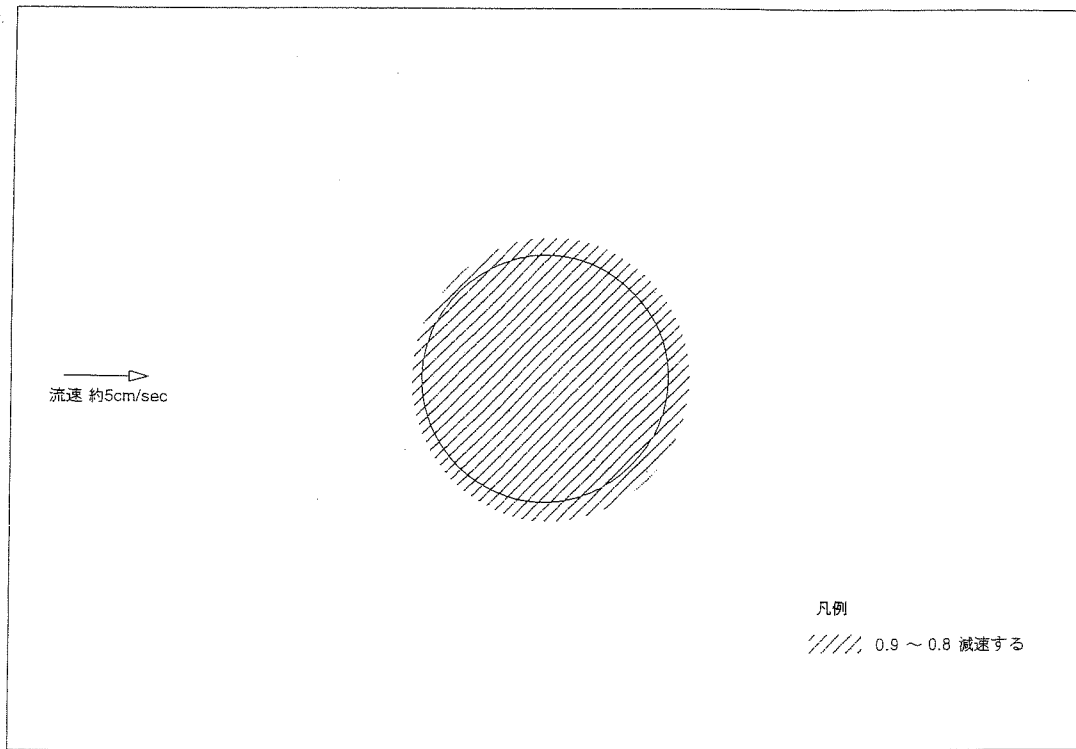


図47 単体生け簀が流れに及ぼす影響

抵抗係数: 0.33

### 3) 生簀群周辺の流況解析

生簀単体の場合と同様に、理論抵抗係数を用いて生簀群が流れに及ぼす影響をシミュレーションにより調査した。

シミュレーションモデルは単体の場合と同じものを用いた。

#### (1) 検討範囲

生簀単体の場合と同様の配慮をして、検討範囲は図48に示す範囲とした。

#### (2) 計算メッシュ

図49 に計算メッシュ図を示す。

#### (3) 計算条件

基本的には生簀単体の場合と同じである。

生簀の抵抗係数は 0.31 を用いた。

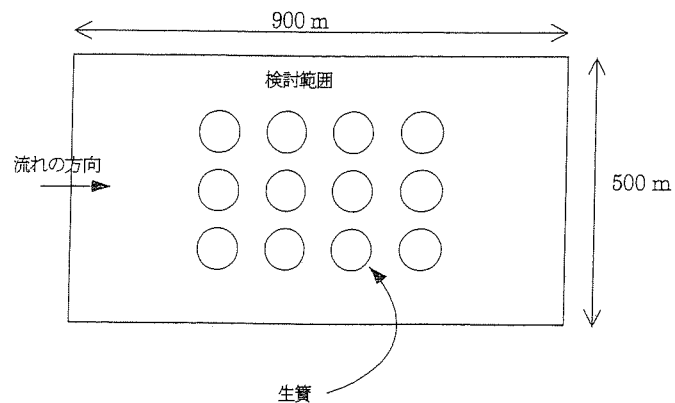


図48 検討範囲

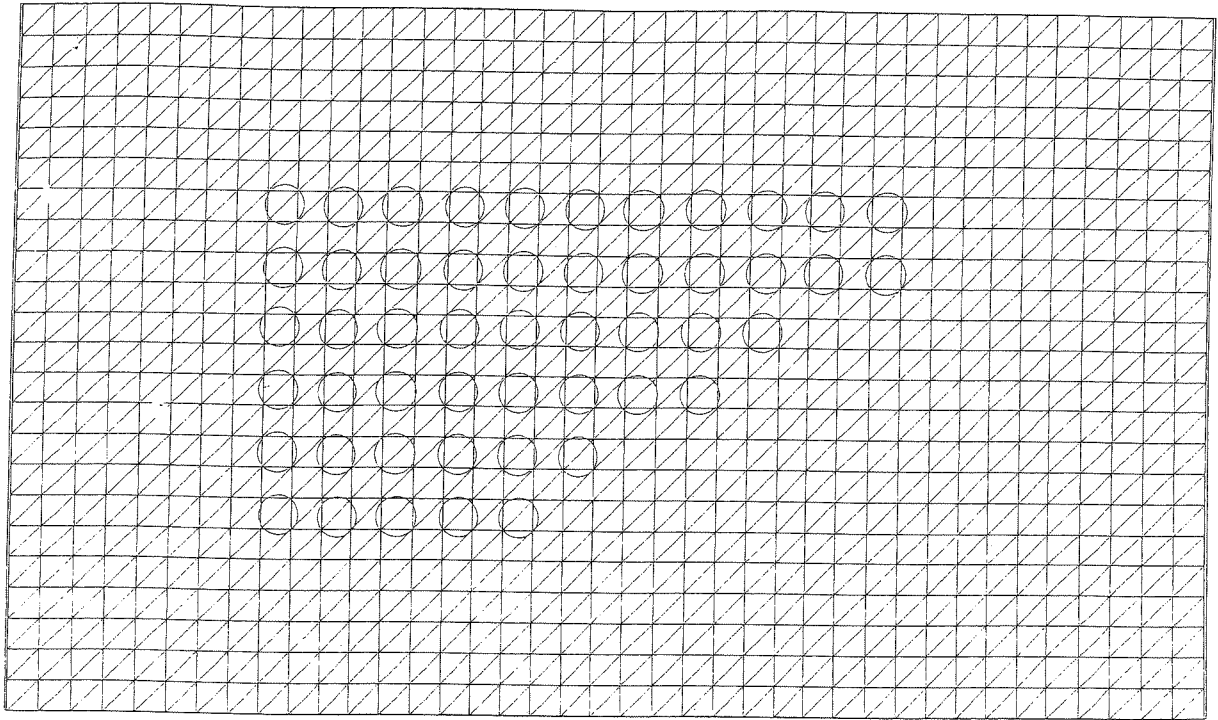


図49 生け簀群のシミュレーションメッシュ図

#### (4) 結果の解析

図50 と図51 は生簀がない場合の表層と下層の流速ベクトルを示したものである。また図52と図53 は生簀群が有る場合の表層と下層の流速ベクトルを示したものである。更に、生簀の流れに対する影響を分かりやすくするために、生簀単体の場合と同様に流速の変る範囲を示したのが図54である。この図は生簀が無い場合の流速、約5cm/秒に対して減速する割合を示したものである。

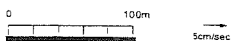
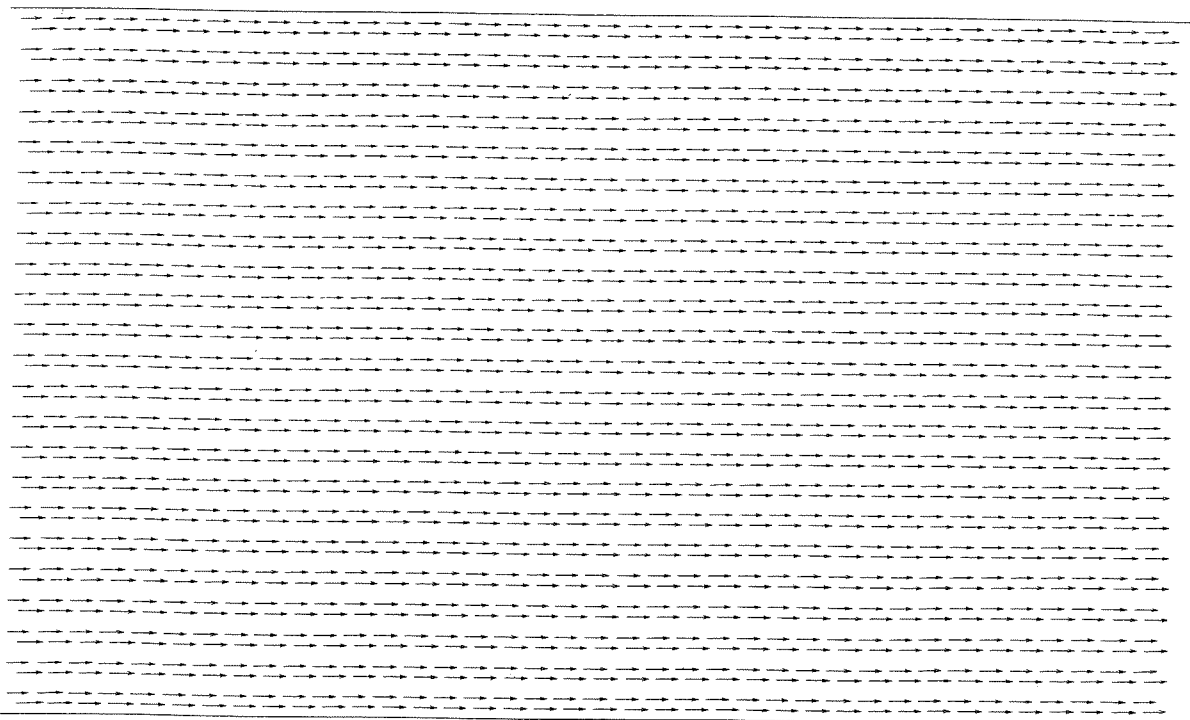


図50 流速ベクトル図—生け簀なし（表層）

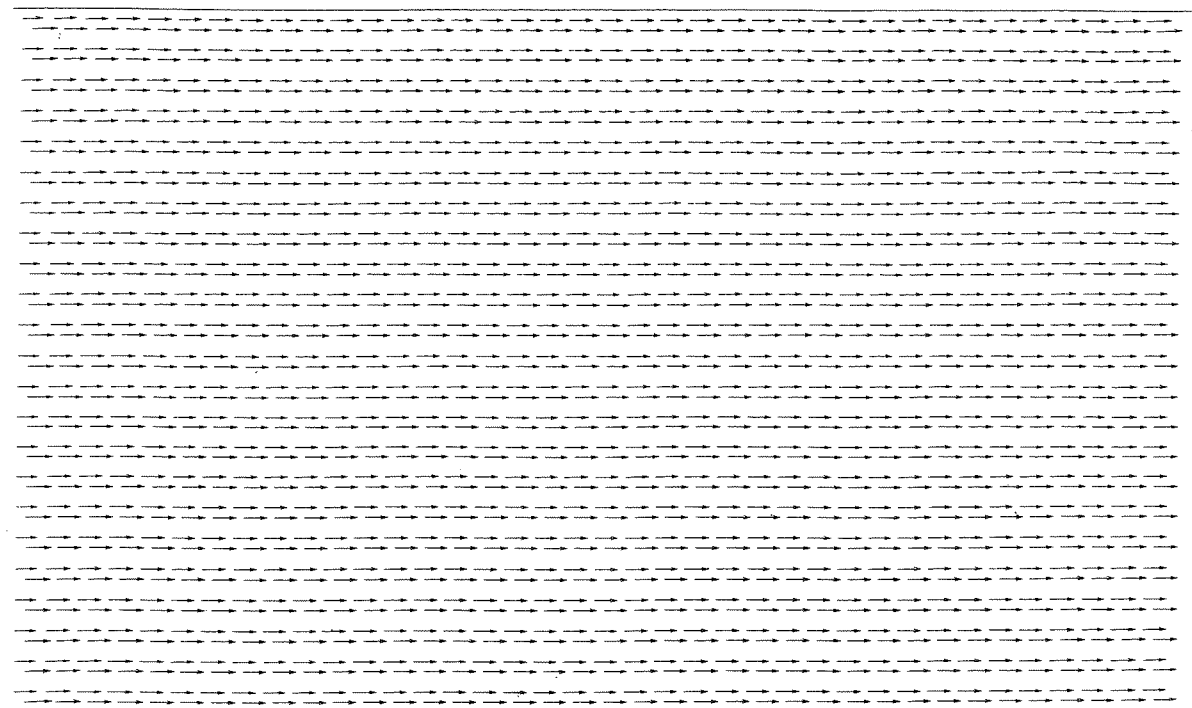


図51 流速ベクトル図ー生け簀なし（下層）

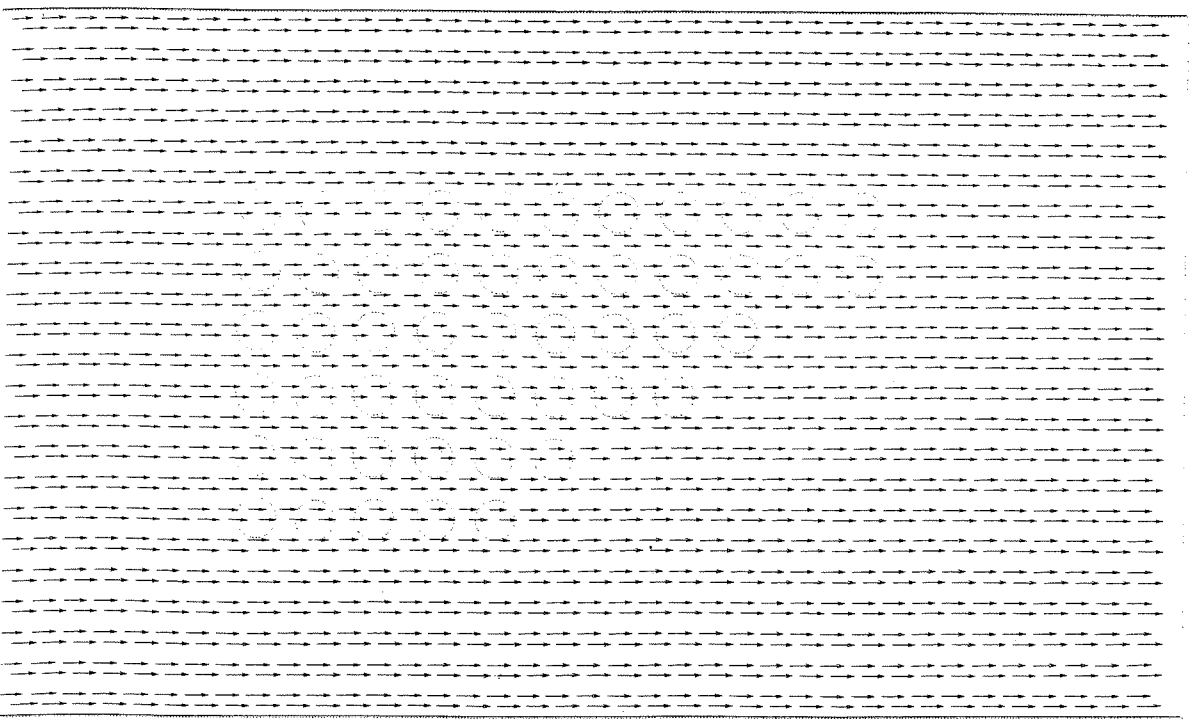
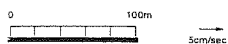
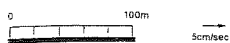


図52 流速ベクトル図ー生け簀あり（表層）

抵抗係数：0.33





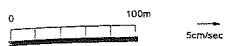
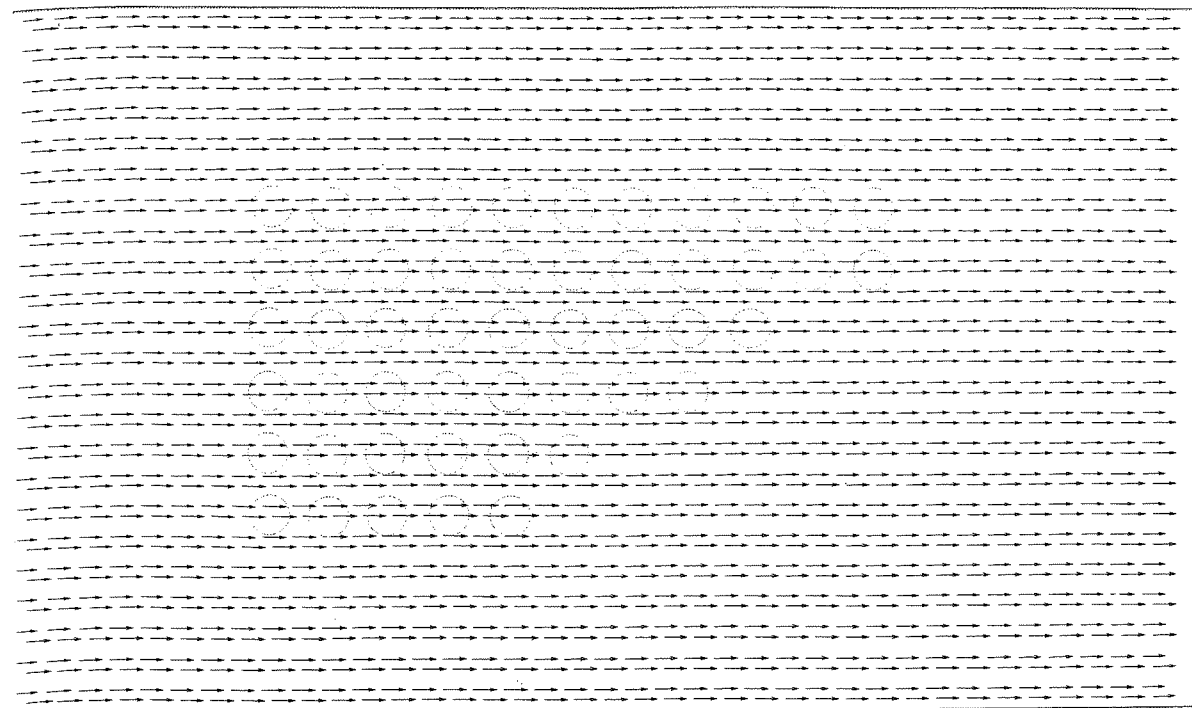


図53 流速ベクトル図-生け簀あり (下層)

抵抗係数 : 0.33

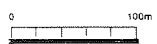
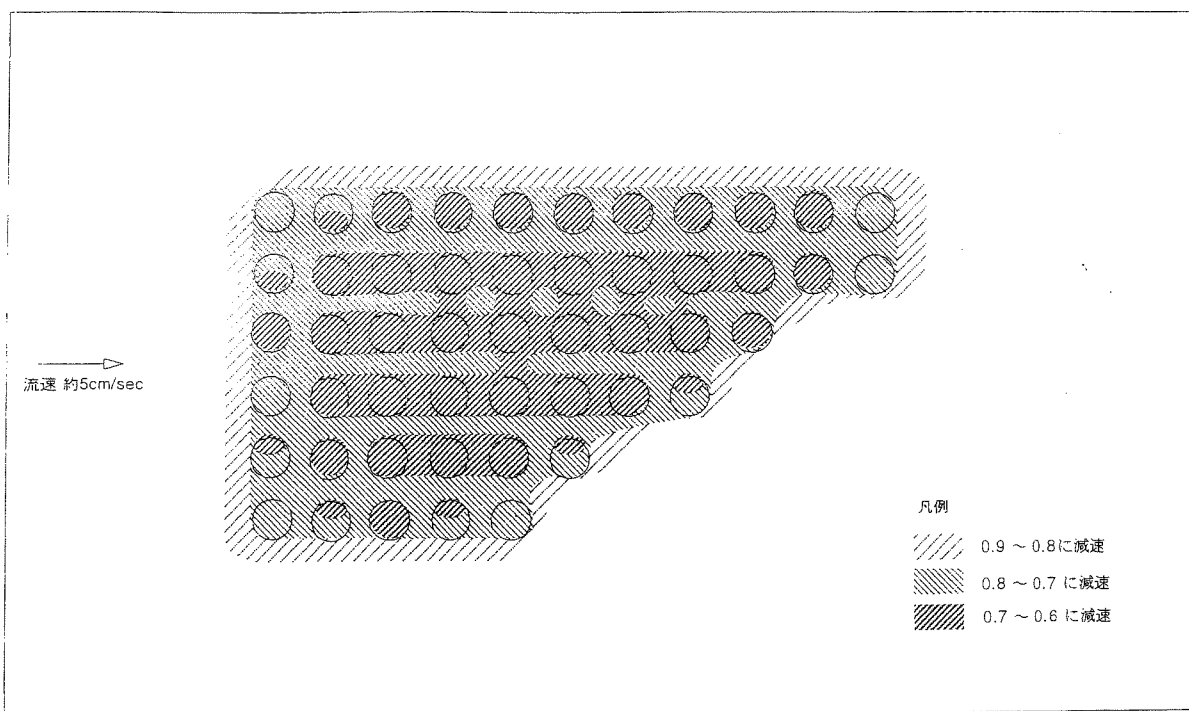


図54 生け簀群が流れに及ぼす影響 (表層)

この結果から以下のことが分った。

- ① 生簀群の内部で、生簀群の外側の流速に比べると最大6割近くまで減速している。
- ② 生簀群の中であるが、生簀群の外側の海域で7割程度まで減速している。
- ③ 生簀群の外側に1割程度減速する海域があるが、さほど広い範囲ではない。

これらの結果と流速観測と比べてみるとほぼ似かよった傾向を示しているので、抵抗係数の理論値が妥当なものと考えられる。

### Ⅲ 文 献

- 1) 和歌山県：和歌山県漁業地区別統計表（昭和51年－平成10年度）
- 2) 芳養晴雄・小久保友義・竹内照文，1990：田辺湾環境把握調査．昭和63年度和歌山県水産試験場事業報告，55－70.
- 3) 芳養晴雄・小久保友義，1991：田辺湾環境把握調査．平成元年度和歌山県水産試験場事業報告，44－55.
- 4) 小久保友義・芳養晴雄・竹内照文，1992：田辺湾環境把握調査．平成2年度和歌山県水産試験場事業報告，52－65.
- 5) 小久保友義・芳養晴雄・竹内照文，1993：田辺湾環境把握調査．平成3年度和歌山県水産試験場事業報告，64－76.
- 6) 小久保友義・竹内照文・山内 信，1994：田辺湾環境把握調査．平成4年度和歌山県水産試験場事業報告，88－99.
- 7) 竹内照文・小久保友義，1995：田辺湾の環境調査．平成5年度和歌山県水産試験場事業報告，51－63.
- 8) 狭間弘学・難波武雄・木村 創・巨海敏之，1997：漁場保全対策事業 生物モニタリング調査．平成8年度和歌山県水産増殖試験場報告，29，45－59.
- 9) 竹内照文・奥山芳生・狭間弘学・小川満也，1998：生物モニタリング調査．平成9年度和歌山県水産増殖試験場報告，30，45－57.
- 10) 竹内照文・狭間弘学・芳養晴雄・小川満也，1999：生物モニタリング調査．平成10年度和歌山県農林水産総合技術センター水産増殖試験場報告，31，83－93.
- 11) 芳養晴雄・小川満也，1999：生物モニタリング調査（印刷中）.
- 12) 日本水産資源保護協会，1995：水産用水基準（1995年版）. 68pp.
- 13) 水産庁研究部漁場保全課，1997：漁場保全対策推進事業調査指針・漁場保全対策推進事業調査報告書様式（海面）・漁場保全対策推進事業調査報告書様式（内水面）pp.137.
- 14) 加来靖弘・渡辺勇二郎・竹内淳一・坂本博規・中筋 孝・西浦幸雄・田上伸治，1975：新川改修事業に係る漁場の実態調査－Ⅱ．昭和49年度和歌山県水産試験場事業報告，179－192.
- 15) 和歌山県水産試験場，1993：平成4年度貧酸素水塊被害防止対策事業報告書．pp.25.
- 16) 竹内淳一，1985：紀伊半島の東岸で春季と夏季に発生する沿岸湧昇．関東・東海ブロック水産海洋連絡会報，7・8合併号，38－54.
- 17) 中筋 孝・加来靖弘・渡辺勇二郎・坂本博規・芳養晴雄・南 忠七，1976：浅海漁場開発事業漁場環境調査－Ⅲ 防波堤工事の進捗に伴う潮流調査及び定地観測(2)．昭和50年度和歌山県水産試験場事業報告，119－126.
- 18) 武岡英隆・大森浩二，1996：底質の酸素消費速度に基づく適正養殖基準の決定法．水産海洋研究，60，45－53.