

# 潮汐ダムによる閉鎖性湾内漁場の水質改善

水産工学研究所 漁場水理研究室 久保 敏  
開発システム研究室 山本正昭  
研究期間：平成4年度～6年度

## 1 緒言

水深が相対的に深くかつ閉鎖性の湾では、波が静かで養殖場や幼稚仔保育場としての価値は高いものの、養魚の排泄物や残餌の腐敗に由来する底質の汚染が進行し漁場環境の悪化をもたらす事態を生じている。特に夏場には成層が発達して表層からの酸素の供給が滞り、底層水が貧酸素化するため、漁場としてはしばしば問題となる。この問題に対しては従来から湾内では密度成層の発達により内部波が発生し、これが湾内の海水混合を助け湾内の海水交換に若干なりとも寄与していること等がわかっている。また積極的改善策としては、バクテリアを含む粒子を散布し底層の汚濁物質を分解したり、湾奥部と外海とを水路で結び湾内の海水交換を促進するなどの方策が提案されている。湾奥に水路などをもうけ外海と湾内の水通しをよくするのは有力な解決策であるが、地形的条件により採用が難しい場合が多い。

このような場合に対応できるものとして、木村（高知大学）は潮汐エネルギーを利用した潮汐ダム<sup>1)</sup>を提案している（図1）。この潮汐ダムは湾の一部を堤防で仕切った貯水池と、これに付属する導水管とからなり、潮汐による水面の上下変化を利用し湾内底層部の貧酸素水を貯水池へ導入するものである。底層水は一般に貧酸素ではあるが栄養塩に富み条件が整えばプランクトン等の増加をもたらす水産生物にとって好ましい環境をもたらす。ダム内に導入された貧酸素水は空気中からの酸素の補給が強化され、さらに湾内に比べ比較的浅いダム内では日光の透過により光合成が活発化しプランクトンの増加と溶存酸素（DO）の増加が見込まれ、水質改善された水を湾内に返すことにより湾内の水質改善が期待できるものである。木村は潮汐ダムの大きさは湾全体の面積の1/10程度必要である<sup>2)</sup>とした上、湾内上下層の密度分布をもとに位置エネルギーを計算した。そして湾内の成層を破壊し上下均一な密度分布とするために必要なエネルギーを成層化強度と定義し、これと湾内の水温分布および塩分分布との関係を論じている。これによれば成層化強度は塩分分布との相関が高く水温分布との相関は比較的小さいとの結論を得ている<sup>3)</sup>。また酸素の豊富な水を底層に排出した場合、これが底層の水質環境改善に及ぼす効果は周囲の水の連行、すなわちパイプから排出された水と周囲の貧酸素水との混合率の大小により変化し、混合率を高めるためストレーナと呼ばれる拡散装置を採用し潮汐ダムの効果を高める工夫をしている<sup>4)</sup>。

本研究では夏季成層下における閉鎖性湾底層水の水質改善に向けての効果的手法を開発するため、ダムへの吸排水位置の違いにより海水交換機構が変わることに着目し、室内模型実験により検討を行った。すなわち、高酸素水を底層に供給する方法のほか、底層水を上層水と混合し湾外に流出させることにより、外海高酸素水の流入を促進する方法、或いは中層に排水し境界面を破壊する方法等の得失を検討した。吸排水位置は吸水管と排水管を分離すれば、自動バルブ操作により比較的容易に制御できる。

さらに水槽実験では難しい現象を再現するための数値シミュレーションモデルを改良し、現地実験での問題点を抽出すると共に、実海域をモデルとした海水交換の数値シミュレーションを実施し、確認する作業を通じて閉鎖性湾内の水質改善についての潮汐ダムの効果を調べた。

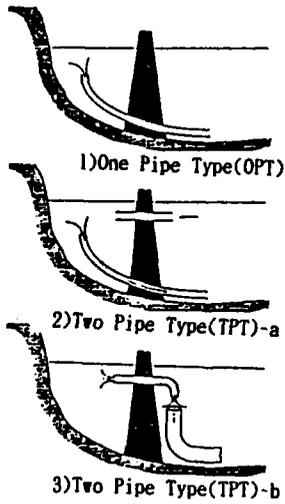


図1 潮汐ダム概念図<sup>1)</sup>

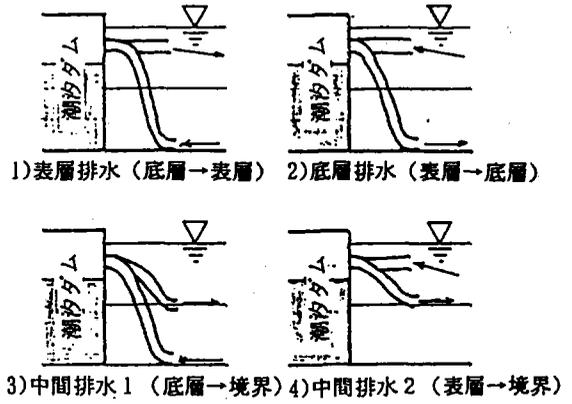


図2 潮汐ダム模型給排水方式

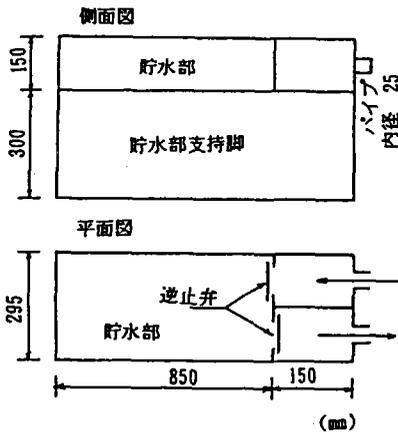


図3 潮汐ダム模型

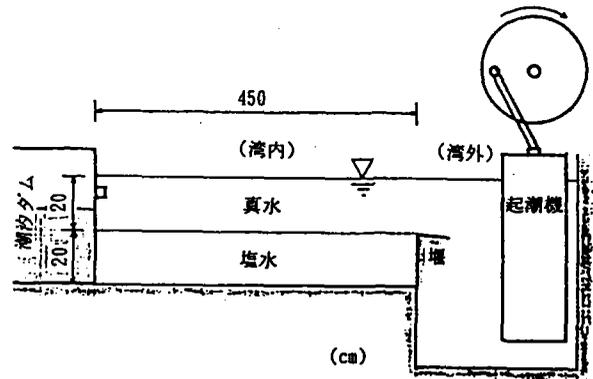


図4 実験概要

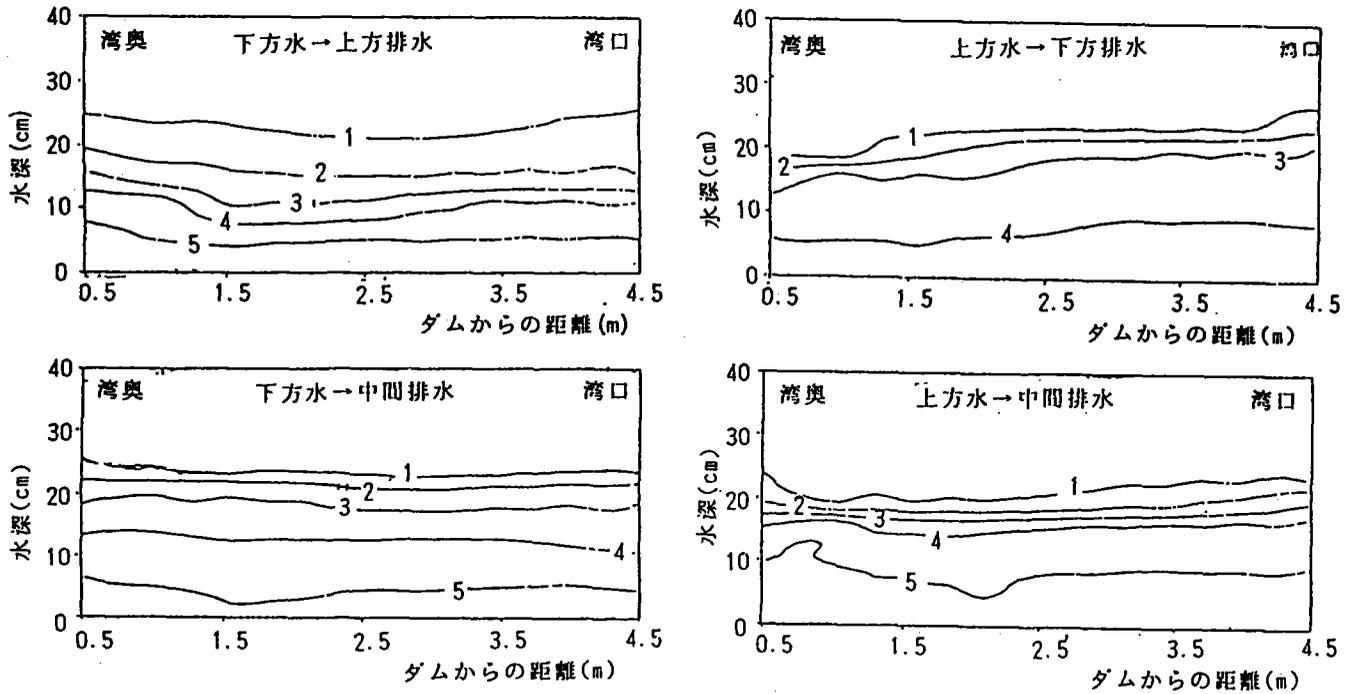


図5 10潮汐後の水槽内密度分布

## 2 調査方法と結果

### 2. 1 水槽模型実験

#### 1) ダムの吸排水方式

水深が相対的に深くかつ閉鎖性の湾では境界層ができ底層水の交換が少なく、底質の悪化とともにしばしば無酸素状態となることがある。この環境を改善する工法の1つとして潮汐ダムが提案されている。1本のパイプを用い、上潮時底層水をダムに引込んで、曝気後、再び下潮時底層に戻す方式の研究が盛んであるが、2系統のパイプを用いる吸排水方式については、海水交換機構、適用場所、適用時期等を考慮し、以下に示す潮汐ダムの4つの方式(図2)が考えられる。これら密度の異なる潮汐ダムからの噴出水によって生ずる新水塊の性質と挙動を観測、解析した。さらに、適用可能な吸排水方式について検討した。

①底層水流入表層排水：底層水をダム内に吸入しそれを表層に排出する。

上げ潮時底層用パイプのゲートが開き、下げ潮時表層用パイプのゲートが開く簡単な自動ゲートを設置すれば、ダム内外の水位差を利用して、上潮時、底層水をダム内にパイプで取込み、自然曝気・光合作用による酸素添加と日射による水温上昇後、表層に放流する。

②表層水流入底層排水：①と逆向きの自動ゲートを設置し、上げ潮時、表層水をダム内に流入させ、下げ潮時にこの高酸素水を底層に供給する。

③底層水吸入中層排水：上げ潮時、下層水をダムに引き込み、下げ潮時の流速を最大に利用して、境界層に噴流を吹出して上下層の混合を行い、中間層を作る。これが重力により流出するのに伴い外海水の流入を促進することができる。

④表層水流入中層排水：上げ潮時、表層水をダム内に引き込み、それを上下層の境界に排出する。

#### 2) 実験方法

まず今回の模型実験では、閉鎖性内湾を想定して、起潮装置付き二次元水槽の一端に潮汐ダム模型(図3：水面積 $2,400\text{cm}^2$ )を置き、湾口に相当する部分に潜水堰を作り、塩水と真水よりなるそれぞれ20cm厚さの2層水塊の湾水域模型を設けた(図4：水容積 $660,000\text{cm}^3$ )。この場合下層の塩水は湾内底層に発生する貧酸素水、また上層の真水は湾内表層水に対応し、2層化している状況を再現しているとみなしている。他端の起潮機により潮汐を与え、表1に示すいくつかの周期、潮差、そして水槽内の密度差のもとに、潮位、流速、塩分分布、界面高さ、堰を越えて出ていく塩水量等について測定した。

#### 3) 実験結果

この結果、上記のどのケースにおいても潮汐ダムに吸入された水が湾部に排出された時点で塩水と真水の混合が生じ、それが中間的密度を持ついわゆる中間層を形成した。、図5に4つの給排水方式でかつ同じ条件で10潮汐後の密度分布を示す。表層排水方式は濃度に薄い層の上昇が大きい。表層水流入底層排水方式は底層の密度が低下するが境界層が残り湾奥が下がっている。中間層へ排水する方式は境界層付近に排水したにも拘わらず境界層は壊れにくい。

この層は内部波を伴う密度流となり、ゆっくりとした速度で水槽内を移動し湾口に相当する堰を越え湾外に流出した。この現象から底層の塩水は中間層に取り込まれ湾外へ排出されると同時に、湾外から新たな水が補給されることが確認できた(図6)。

実験ケースにより中間層の生成量、湾外への流出量、湾内塩分濃度の変化に違いがあった。潮汐ダムからの排出流量が大きいとき塩水と真水との混合率が上昇し、湾外への流出量が多くなった(図7-1)。吸排水方式によっても中間層の水質の違いを生じた。底層水を吸入し表層へ排水す

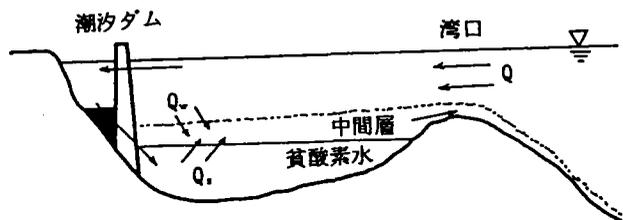


図6 底層水排除による水質改善

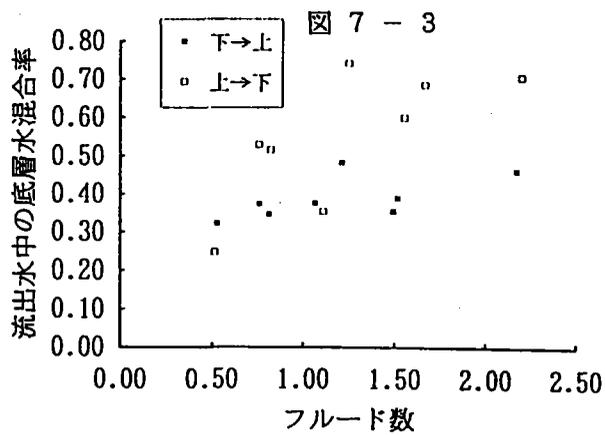
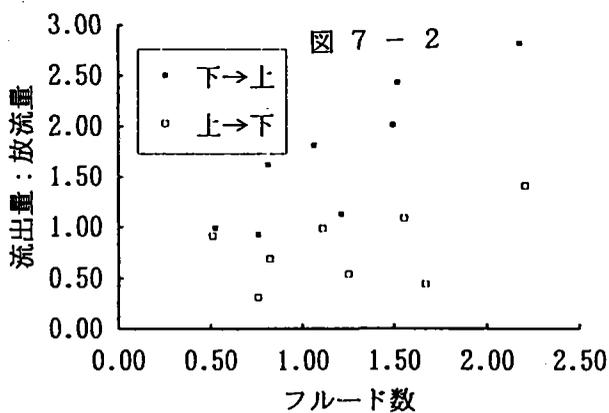
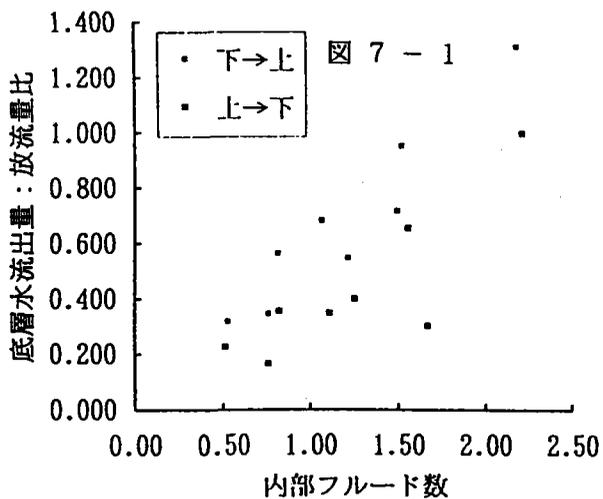


図7 フルード数との関係

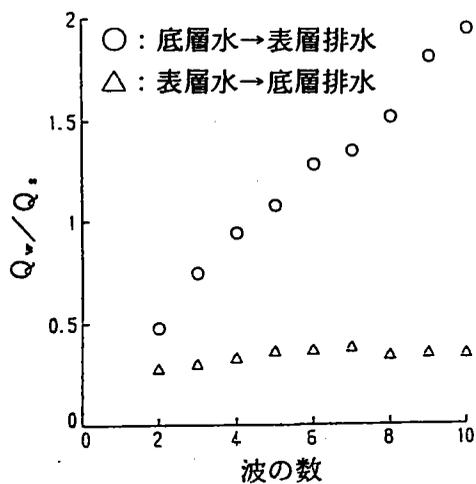


図8 波の数ごとの  $Q_w/Q_s$

表1 潮汐ダム実験ケース

給排水位置	潮位 cm	周期 sec	塩分差 ‰	ケース	給排水位置	潮位 cm	周期 sec	塩分差 ‰	ケース
底→表 層層	2	240	5	A-1	表→底 層層	2	240	5	B-1
	2	240	10	A-2		2	240	10	B-2
	2	360	5	A-3		2	360	5	B-3
	2	360	10	A-4		2	360	10	B-4
	4	240	5	A-5		4	240	5	B-5
	4	240	10	A-6		4	240	10	B-6
	4	360	5	A-7		4	360	5	B-7
	4	360	10	A-8		4	360	10	B-8

給排水位置	潮位 cm	周期 sec	塩分差 ‰	ケース
底→中	4	240	5	C-5
表→中	4	240	5	D-5
ダム無	4	240	5	O-5

る方式は塩分濃度が低く層の厚さの厚い中間層となり、流出水量がダム放水量の1から3倍程度と多かった(図7-2)。逆に表層水を吸入し底層へ排水する方式は塩分濃度が高く層の厚さの薄い中間層となり、流出水の底層水混入率は0.6前後とやや高かった(図7-3)。総合的には、図7-21に見られるように、上方排水の方が底層水を効率よく流出させることができた。効率がよい場合、潮汐ダムに吸入した量と同等量を湾外へ流出させることができた。

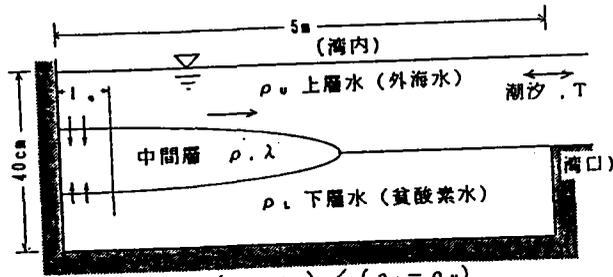
しかし、中間層を形成する真水( $Q_w$ )と塩水( $Q_s$ )の比率は時間の経過とともに変化し、流出する水の塩分は、表層へ排水する方式では段々真水の割合が多くなり、逆に底層に排出する方式では大きな変化は見られなかった(図8)。

## 2. 2 数値シミュレーション

次に以上の潮汐ダム模型による水槽実験の数値シミュレーションによる再現と水槽実験では物理的にコントロールが困難な条件や計測が困難な状況を再現するため、計算機によるシミュレーションを行った。

### 1) 湾流入河川水と内部潮汐の流動現象の再現

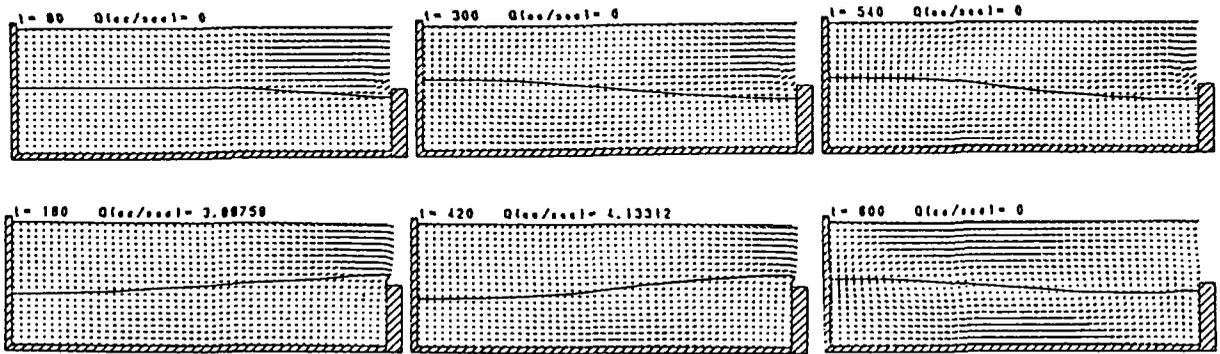
このシミュレーションで用いた水槽モデルは上記の水槽実験をもとに、長さ5m、深さ40cmの二次元水槽とし、この水槽の中に密度界面を設定した(図9)。そして躍層間を中間層が移動する様子



左：図9 シミュレーションで用いた水槽モデル概念図  
 中：図10 潮汐による密度界面の変動と流速分布

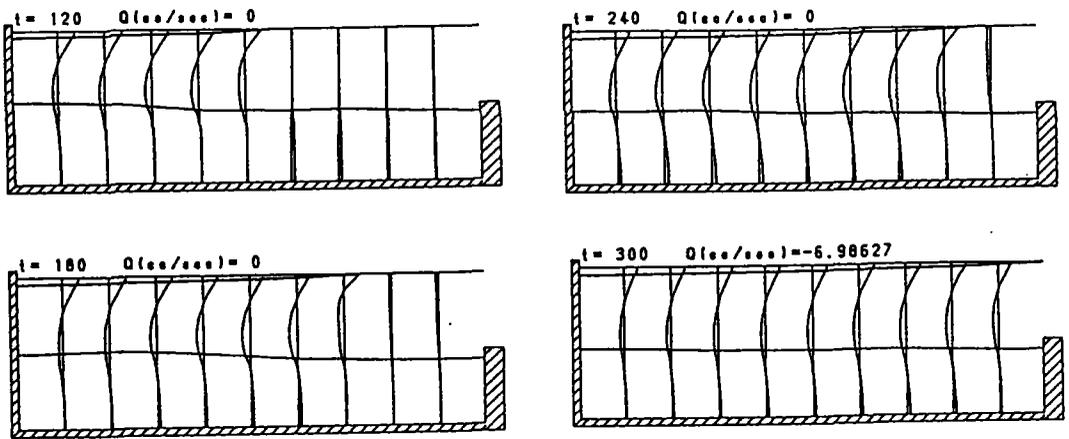
$\rho_u$  : 上層水密度  
 $\rho_L$  : 下層水密度  
 $\Delta\rho$  :  $\rho_L - \rho_u$   
 $\lambda$  : 中間層の下層水含有率  
 $l_s$  : 中間層の生成長さ  
 $T$  : 潮汐周期  
 $\nu$  : 動粘性係数  
 $Q_u$  : 下層水排出量

なお以下の図中では、  
 $\rho_{01}$ : 河川水密度  
 $\rho_{02}$ : 上層水密度 ( $\rho_u$ )  
 $\rho_{03}$ : 中間層密度 ( $\rho$ )  
 $\rho_{04}$ : 下層水密度 ( $\rho_L$ )  
 $LENG = l_s / dx$



$L = 100$   
 $M = 40$   
 $DX(\text{cm}) = 5$   
 $DY(\text{cm}) = 1$   
 $A0(\text{cm}) = 2$   
 $V0(\text{cm}^3/\text{sec}) = 0$   
 $\rho_{01} = 1$   
 $\rho_{02} = 1.035$   
 $\rho_{03} = 1.035$   
 $\rho_{04} = 1.037$   
 $\nu(\text{cm}^2/\text{sec}) = 1$   
 $T(\text{sec}) = 240$   
 $LENG = 0$   
 $test = 03$

1cm/s



$L = 100$   
 $M = 40$   
 $DX(\text{cm}) = 5$   
 $DY(\text{cm}) = 1$   
 $A0(\text{cm}) = 0$   
 $V0(\text{cm}^3/\text{sec}) = .5$   
 $\rho_{01} = 1$   
 $\rho_{02} = 1.035$   
 $\rho_{03} = 1.035$   
 $\rho_{04} = 1.037$   
 $\nu(\text{cm}^2/\text{sec}) = .5$   
 $T(\text{sec}) = 0$   
 $LENG = 0$   
 $test = h3$

1cm/s

図11 河川流入による密度界面の変動と水平流速分布

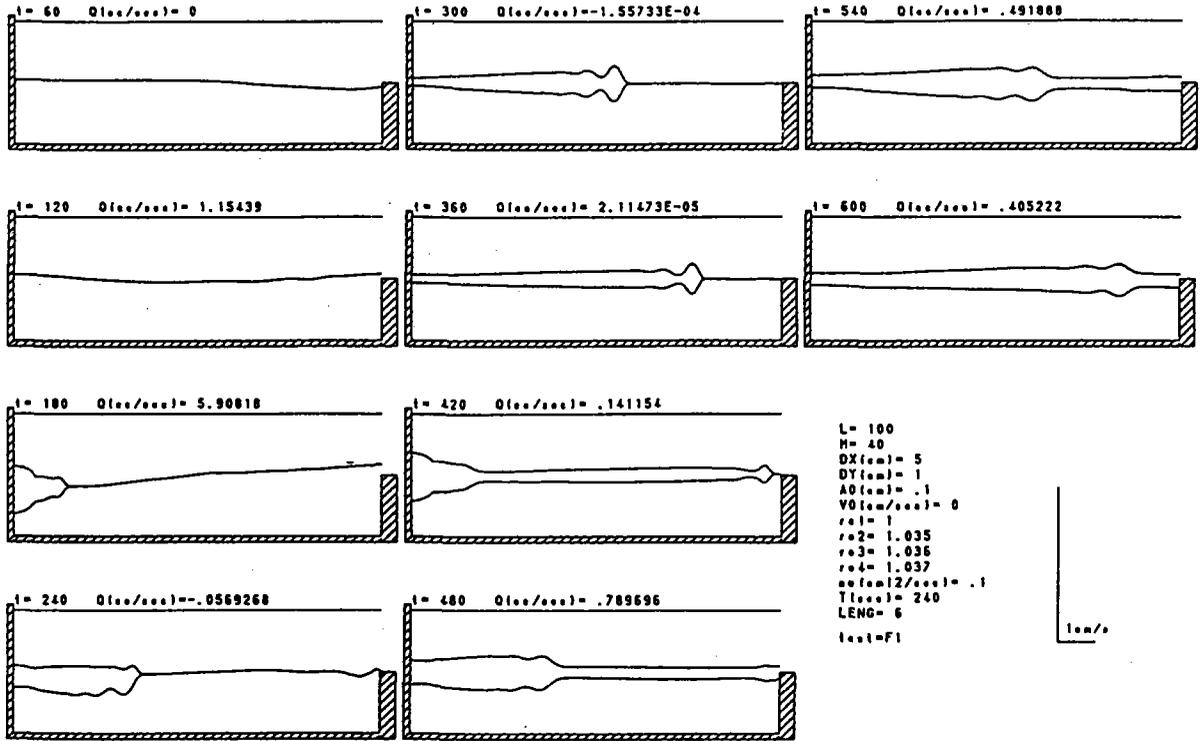


図12 潮汐場における中間層の進行の様子



水面積 $10\text{km}^2$ ，容積 $85 \times 10^6\text{m}^3$   
 軸長 $10\text{km}$ ，湾央水深 $18 \sim 20\text{m}$   
 湾央部で年間 $800\text{t}$ のハマチ養殖，  
 湾口部でアサリ生息，採貝，潮干狩り

図13 浦の内湾の地形

や底層水塊の流出の様子などを求めたほか、潮汐や河川の流入による密度界面の動きなどを計算した。なお、ここでは分子拡散、乱流拡散による流体の混合は考えず、密度界面の移動を流体の動きをもとに追跡し、界面形状の変化を求めた。また水槽端の潮汐ダムによる上下層水の混合部分では、上下層水が与えられた割合で混合し中間層を生成するとした。

潮汐ダムにより形成された中間層は密度流となり、湾内を移動し湾口から外海へ流出する。これにともない底層の貧酸素高密度水は徐々に減少し、逆に湾外から新たな水が供給され湾内の水質改善につながる。この様子を中心に数値計算により求めた結果を示す。

#### 1-1)潮汐の影響 (図10)

潮汐により水槽内に一定の周期で水が出入りする場合の密度界面の変動の様子を示す。密度界面は半波長の振動を発生し、湾口の界面は外海水流入時に下降し、逆に流出時には上昇した。これより湾内に発生する内部波によっても海水交換が行われていることを示すことができた。

#### 1-2)河川の影響 (図11)

水槽左端に想定した河川から水が流入を始めた場合の密度界面の変動の様子を示す。河川水の流入にともない湾内表層水は河川水と同じ方向に引かれ外海へ流出する。この流出を補うため湾口では下部から外海水が流入するが底層部には大きな影響はないことが示された。

#### 1-3)間欠的に中間層が生成された場合の中間層の挙動 (図12)

潮汐ダムは半周期ごとに中間層を生成する。この時の中間層の挙動を示す。潮汐の発生にともない界面は変動を始める。その後中間層が界面にそって湾口部に向かって進行し、湾外へ排出されることにより湾内の海水交換に寄与する様子を示すことができた。

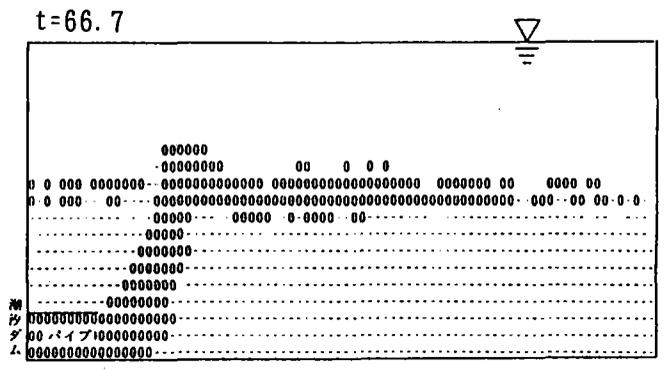
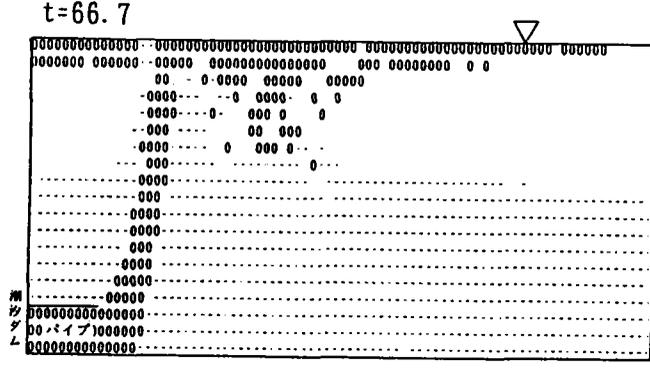
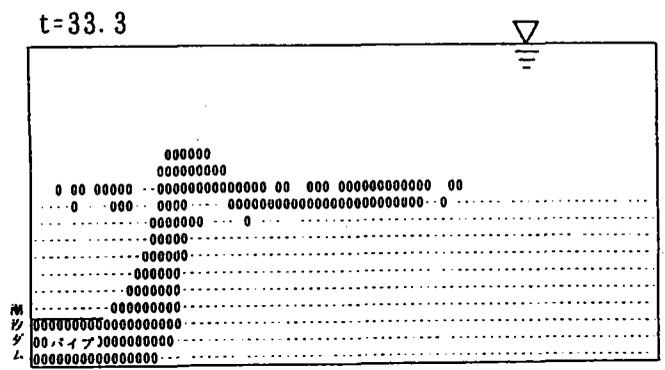
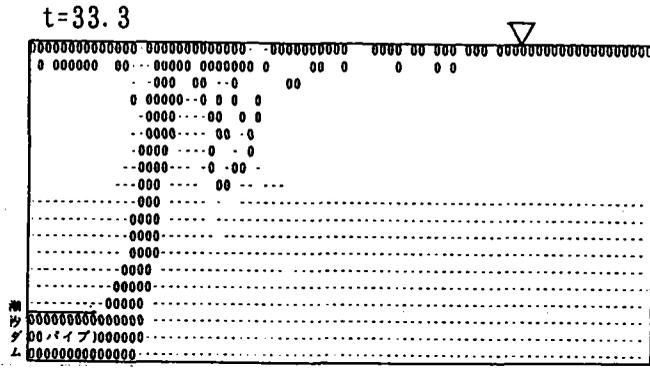
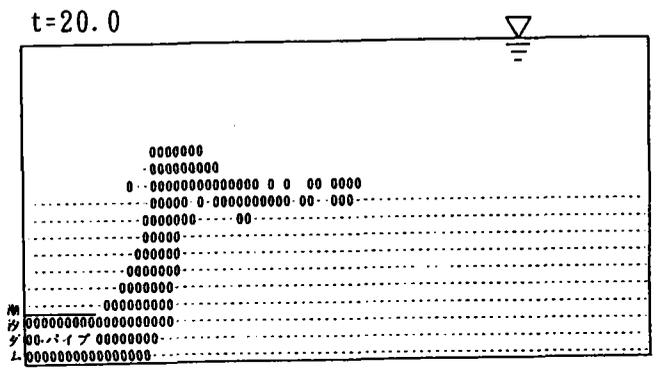
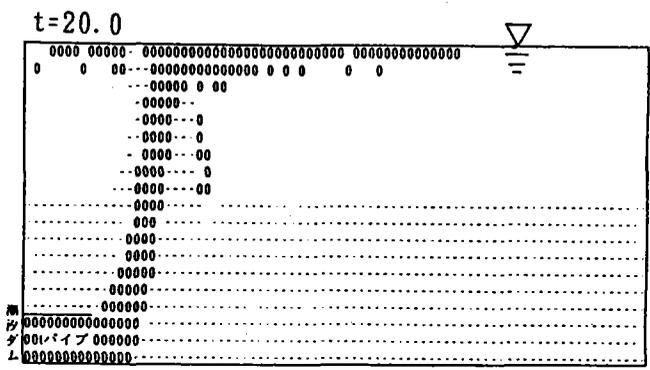
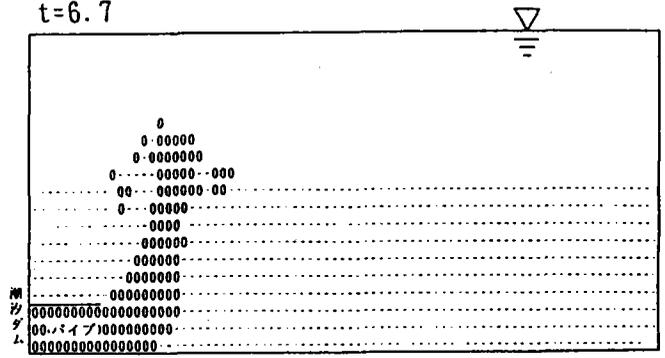
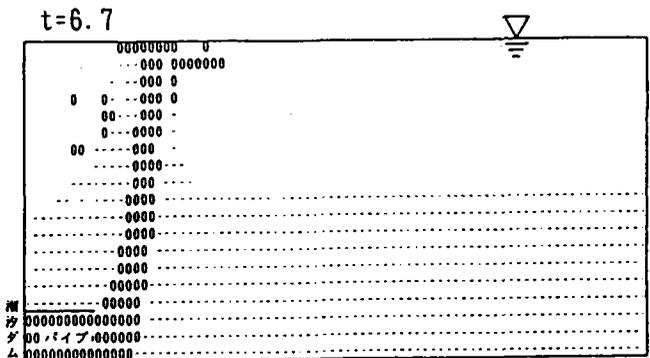
そのほか次のような事柄を数値計算で表すことができた。

- ①時間の経過にともない中間層厚さは発達し、それと同時に底層水厚さは徐々に減少する。
- ②同一条件では底層水排出速度は最初の20波程度の時間では大きな変化はない。
- ③実験条件により中間層生成量は変化し、中間層生成量の増加にともない湾外への底層水流出速度は増加する。
- ④上下層の密度差が大きいほど湾外への底層水流出速度は増加する。

## 2)混合水塊の挙動

高知県の浦の内湾(図13)で実験規模の潮汐ダムが設けられ、この効果を見るため研究調査が続けられている。その中で、夏季にはダム内の水は温められやすく、底層のパイプから排出された水は上層に向かって移動しているケースが認められている。しかし日射の弱い曇りの日や夜間はダム内の水の水温はあがらずパイプから排出する水は必ずしも表層に向かうとは限らない。潮汐変化の時間帯により排出される水の挙動は様々に変化すると考えられる。

以上の現地調査をもとに再現シミュレーションを行った。用いた式は三次元ナビエストークの運動方程式と連続式であり、排出水の混合は考慮していない。今回のケースでは水槽内での密度変化はわずかであり、運動方程式はブーシネスク近似を行い密度変化は浮力項の中でのみ考慮した。計算に際しては差分法による陽的解法の一つである食違い格子によるMAC法を用いた。この手法の特長は、計算の省力化が図られ、この種の難点であった圧力の値が市松模様には波打つspurious誤差の発生が抑えられる効果をもっている。また1セル内に27個のマーカーを置き、初期条件、境界条件で各セル内のマーカーの密度を設定し、流体の移動をもとにこれを追跡し湾内密度分布を求めた。なお、計算で使用した湾の大きさは横80cm、縦20cm、奥行き30cmとし、パイプの長さは9cm、太さ3×4cmで、湾モデルの左端下部の中央から右にのびている。また $dx=1cm$ ,  $dy=1cm$ ,  $dz=1cm$ ,  $dt=0.0667s$ 、 $\nu =$



図中の印の説明  
「 」 : 表層水  $\rho = 1.025 \text{g/cm}^3$   
「-」 : 底層水  $\rho = 1.028 \text{g/cm}^3$   
「0」 : 排出水  $\rho = 1.022 \text{g/cm}^3$

図中の印の説明  
「 」 : 表層水  $\rho = 1.022 \text{g/cm}^3$   
「-」 : 底層水  $\rho = 1.028 \text{g/cm}^3$   
「0」 : 排出水  $\rho = 1.025 \text{g/cm}^3$

図 14-1 パイプから排出された水が表層水面にまで上昇する場合の湾断面密度分布の時間変化

図 14-2 パイプから排出された水が上下層界面まで上昇する場合の湾断面密度分布の時間変化

1cm<sup>2</sup>/sとした。パイプからの噴出速度は5cm/sである。

図15に示すように、湾内海底に設置されたパイプ先端から温められた水が噴出した場合、その水が表層に向かう様子をシミュレーションした。図14-1の数値計算はパイプから排出された水が上層水より軽い表層まで上り表層を流下する場合であり、図14-2は一旦上昇した水塊が少し沈降して上下層界面を進行してゆく様子を現している。

以上、シミュレーションによっても水槽実験の結果は概ね再現でき潮汐ダムによる底層水排除の効果が期待できた。また、シミュレーションは淡水の流入や水温の上昇等による湾内の複雑な成層状態にも対応でき、かつ、詳細な水塊の動きも表現できることが分かった。

### 3. まとめ

この実験において得られた結果を簡条的に述べ現地での問題と対応づける。

1) 潮汐ダムがない場合にも潮汐による水の出入りが起因して湾内には内部波が発生し、この影響のため湾外への底層水流出が生じる。しかし、潮汐ダムを設置することにより海水交換機能は格段に上昇する。

2) 潮汐ダムの排出流量が大きい程、ダム外部（湾）水と混合、希釈しやすく、湾外へ流出する流量も多くなった。ただ、排出流量を大きくすると生成される中間層も同時に増加し、ダム付近では表層近くまで中間層の影響が及ぶ場合も考えられる。

3) 潮汐ダムの吸排水方式については、最初の10波程度の潮汐においては、底層水吸入表層排水方式の底層水流出量が大きい、時間と共に能力が低下し、その後は表層水吸入底層排水方式の方が流出量中底層水の割合も大きく能力も低下しない（図15）。

4) 表層排出方式を取ると表層と中間層の密度差が小さくなり、それらの境界線位置は上昇した。これを現地での問題としてとらえれば表層部での養殖魚への影響、栄養塩の増加、あるいはプランクトンの増加など問題を含んでいるが、直接的にはダムで充分曝気された水塊を放流するよう調節すればよいであろう。

5) ダムからの排出流量を増やすためにはダム内に導入する水量を増やす必要がある。ダム内に導入される水量は潮汐による水位の上下変動と密接に関係しているほか、ホースを通過する際のエネルギー損失も見逃せない。潮汐エネルギーを有効につかうためには、ホース内部でのエネルギー損失を最小限とするためホースの管径を太くし内部の流速を落とし、ホースの長さは最小限短い方が好ましい。

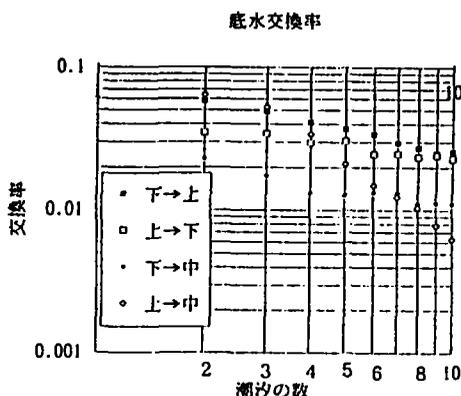


図15 底水交換率と潮汐数の関係

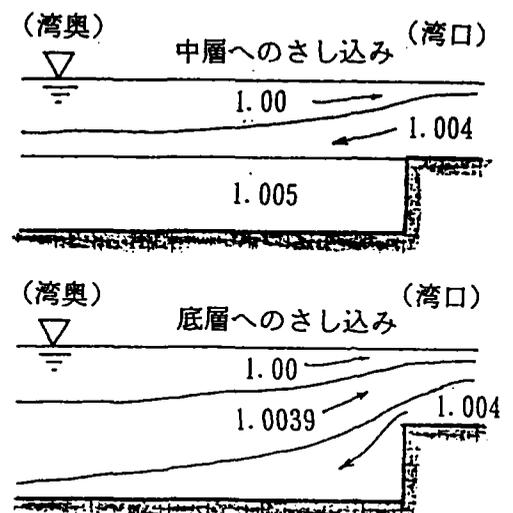


図16 差し込み想定図

6) なお、中間層の生成は上下層の混合によるものであり、その混合率を高めれば中間層の生成量も増加する。このためホース先端部では周囲の水との混合を助けるため様々な工夫が考えられる。これは今後の課題である。

7) また底層へ排水する方式は湾内の底層の塩分濃度低下の度合いが比較的大きく、この結果、湾内密度の分布形態の違いにより図16に示すような外湾からの差し込みによる海水交換が期待できる。ただ底層部へのさし込みと底層の貧酸素水塊の消滅との間には複雑な機構をもつ側面があり、浦の内湾の例では、さし込みが弱まると以前よりさらに大規模に貧酸素化しハマチの大量へい死の原因となった事例が報告<sup>5)</sup>されている。

8) 日光によりダム内の水が温められパイプから排出された水が表層に向かうケースが認めらる。

9) 筆者らの研究によると、長周期湾水振動が存在すれば、これを利用することにより小さい面積で大きい効果が期待される<sup>6)</sup>。

10) 現地においては、降雨や日射或いは外海水によりダムや湾内の密度が変化し放出水の水質や挙動も複雑に変わる。また、潮汐ダム内に導かれた水は周囲の空気に晒され、さらに日光が当たることにより植物プランクトンが活性化し、DO濃度の向上につながるが、夜間や曇天時には期待し得ない<sup>7)</sup>。

以上のような状況を勘案すれば、潮汐ダムの吸排水は緻密な管理が必要と思われる。すなわち、ダム内外の水質をモニターしながら、上下2層のパイプラインとバルブを使って吸排水位置を自動的に操作し、効率よく底層水の排除を行うことが重要であろうと思われる。

#### 4 摘要

湾内は波が静かでハマチ養殖などの漁業に都合の良い場所として用いられている。こうした湾内の特徴を十分に生かすためには、湾の特性上生じやすい湾内水の汚濁の問題を解決することが必要になる。湾内の水質汚濁は特に夏場湾内が成層化するとき特に底層部で発生しやすいことが知られている。これは河川水の流入や水温差による表層と底層との間に生じる密度成層により上下層の対流が抑制されることから、底層部で貧酸素化が発生することによる。今回の研究課題は潮汐の力によりこの成層を破壊し、上下層間の対流を活発化することが可能かどうかまた、どのような手法が有効かを確認することが目的であり、模型実験、シミュレーション、現地調査など3年間の研究により潮汐ダムの有効性を示すことができた。

潮汐ダムはおおむね当初の期待にかなうものであり、今後いくつかの問題点を解決すれば実用に供する事が可能であると考えられる。以下今後に残された問題を箇条書きで述べる。

- 1) 今後はシミュレーション手法をより充実して検証するとともに、実物大の試験用潮汐ダムを現地に造り、排出水が湾内水質環境および海洋生物に与える影響を長期的に調べる必要がある。
- 2) ダム内外の放流水の水質をモニターしながら表層水と底層水の吸排水の制御システムを改良し、排出水の混合を高める工夫をすればより効果が上がると思われる。
- 3) 湾内の環境保全のために潮汐ダムの多面的な利用法を考える必要がある。

#### 参考文献

- 1) 木村他、1993：内湾の貧酸素化防止のための潮汐ダムの開発に関する研究(1)、水産工学、30巻、1号、23
- 2) 高知水試、平成3年度：貧酸素水塊被害防止対策事業報告書、42
- 3) 木村他、平成7年度：水柱位置エネルギーによる浦ノ内湾の成層強度と水温・塩分成層の関係、

日本水産工学会学術講演会講演論文集、115

4)木村他、平成7年度：噴流水の連行率が底層水の密度とD O変化に及ぼす影響について、日本水産工学会学術講演会講演論文集、141

5)宗景他、1990：差込み現象が浦の内湾の海洋環境に及ぼす影響、第37回海岸工学講演会論文集、779

6)山本他、平成7年度：成層混合による海水交換促進とその効果推定法、日本水産工学会講演会論文集、137

7)藤原他、平成4年度：砂浜海岸に造成された中間育成池の水質環境、水産工学研究所技報（水産土木）、17