

干潟の物理環境変化予測手法の開発

水産工学研究所水産土木工学部

武内智行・仲宗根琢磨

調査協力機関：福島県水産試験場相馬支場

調査実施年度：平成8～10年度

緒言

1) 研究の背景

内湾の河口干潟、潟湖内の干潟などはアサリなどの二枚貝の増殖場として利用されている。しかし、干潟の物理環境条件等（流況、水位変動、干出域分布等）を総合的に予測評価する手法が確立していないため、干潟を利用した増殖場造成計画に際して、限られたデータのみで検討せざるを得ない状況にある。これは、予測評価のための現地調査等に多大な労力と費用が必要なことも一因であり、より効率的な環境予測・適地選定手法の開発が求められている。

また、環境の維持・保全の観点から干潟周辺の詳細な環境予測手法が求められているが、これに十分対応できる手法が確立していないため、干潟の機能解明等のための物質循環モデル・生態系モデルの構築が十分には進んでいない。

2) 研究の目的

本研究では、干潟の物理環境等の変化予測手法を確立し、増殖場造成及び干潟環境の維持・保全に資することを目的とする。

なお、潮汐のみによる通常の流況変化予測手法はほぼ確立しているが、干潟のように干出・没水を繰り返す領域を含む場合や水温・塩分変化を伴う場合の流況予測手法等は未だ十分ではない。

調査の内容と方法

1) 各年度の調査内容与方法

8年度は流況予測シミュレーションの検証データ収集の一環として福島県松川浦の現地潮位観測を松川浦内の磯部地先、岩の子地先、松川浦地先の3地点（図1）で行った。また、松川浦や他の干潟での流況、水位変動等に関する既往資料の収集も行った。流況予測シミュレーションについてはプログラムの骨格部分の開発を行った。

現地観測は次のように行った。足場パイプを組み立てた簡易なやぐらに、水圧センサーとデータロガーを取り付けて、水位を自動連続観測した。また、水温計を支柱下端付近に結びつけて水温観測も行った。水位・水温とも2分間隔で観測した。観測期間は平成8年7月18日から8月13日までとした。なお、外海の潮位については既設観測所（相馬港）のデータを入手した。

調査の実施に際しては、福島県水産試験場相馬支場および当所日向野主任研究官（現国際農林水産業研究センター）と足立研究員（現主任研究官）の協力を得た。

9年度は、8年度に開発した骨格部分を基にプログラムの改良を進め、福島県松川浦を対象に流況シミュレーションを実施した。流動の水平分布、経時変化の把握ならびに干出時間の水平分布、経時変化（大潮・小潮等）の把握を行い、プログラムの基本的性能を確認した。

10年度は、9年度に作成したプログラムを更に改良するとともに、福島県松川浦を対象に実証シミュレーションを行った。

2) 基礎方程式

本研究では、多層レベル密度流モデルを基礎として、干潟に適用できるプログラムを開発した。多層レベルモデルは、平面近似された回転地球上の粘性非圧縮性流体で、鉛直方向には静力学的平衡、

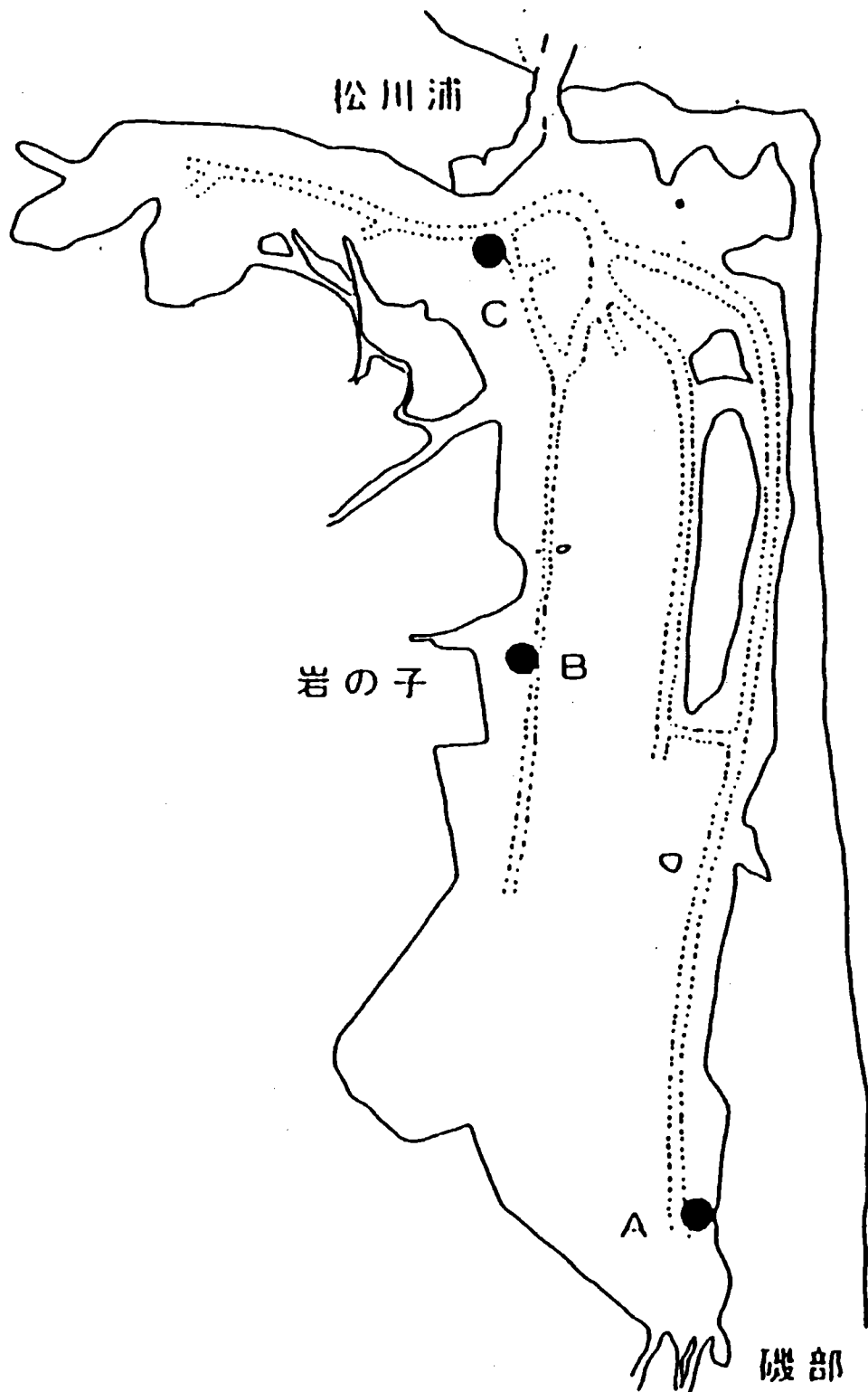


図1 松川浦内測点位置図（平成8年度水位等観測地点）

f - 平面近似が成立することを仮定している。

基礎方程式は次の7つの方程式，すなわち平面のxおよびy方向の運動量方程式，質量保存式，自由表面の式，熱量，塩素量の保存則と状態方程式である。これらの式から，多層レベル密度流モデル

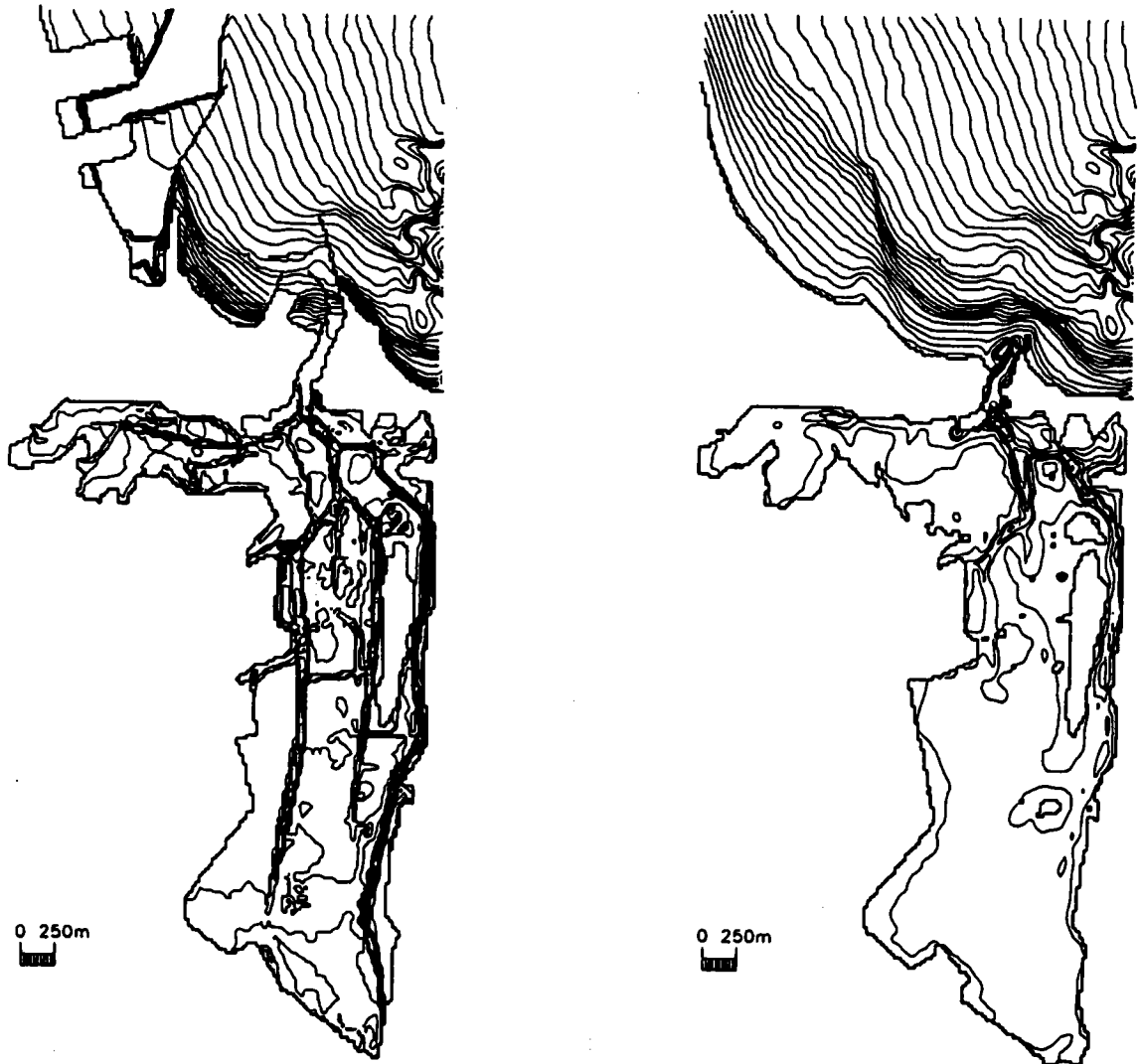


図2 松川浦水深図 (左: 現況, 右: 作藩前, 等深線は0.5mピッチ)

の基礎式を導く。

本モデルでは、鉛直方向 (z 方向) に次のような層 (level) 区分を行う。

- ・第1層 (top-level) : $z = \zeta$ から $z = -H_1$ まで (表面から第1層下端まで)
- ・第 k 層 (level- k) : $z = -H_{k-1}$ から $z = -H_k$ まで (第 k 層の上端から下端まで)
- ・第 K 層 (bottom-level) : $z = -H_K$ から $z = -H$ まで (最下層の上端から海底まで)

基礎方程式を各レベル内で z 方向に積分して整理すると、最終的に付表のような多層レベル密度流モデルの基礎式を得る。

3) 差分式と計算方法

多層レベル密度流モデルの基礎式の内、運動方程式を移流項は風上差分、時間項は前進差分、その他の項は中心差分で近似する。その他の式についても同様である。

まず、運動方程式①と② (丸囲み数字は付表の式番号に対応) から流量フラックス M と N (水平流速 u , v) を求める。次に、質量保存式と自由表面の式③から鉛直流速 w と水位 ζ を求める。これらの結果を熱収支の式④, および塩素量収支の式⑤に代入して、次の時間ステップの水温・塩分を求める。密度場は状態方程式⑥から算出する (水温と塩素量とから求まる)。

表1 主な計算ケース一覧

Case-No.	計 算 条 件		
	地形条件	潮位変動条件	粗度係数(n)
Case-1	現況	大潮時 (±0.7m, 12時間周期)	0.03
Case-2	現況	小潮時 (±0.3m, 12時間周期)	0.03
Case-3	現況	相馬港実測潮位時系列	0.03
Case-4	作濤前	大潮時 (±0.7m, 12時間周期)	0.03(浦奥は0.09)
Case-5	作濤前	小潮時 (±0.3m, 12時間周期)	0.03(浦奥は0.09)
Case-6	作濤前	相馬港実測潮位時系列	0.03(浦奥は0.09)

干潟の計算に適用する場合は、これらの計算の際に、各時間ステップ毎に各メッシュの干出・没水を判定し、その取り扱いを行う必要がある。これについては、高潮等の計算に通常用いられている方法に準じた扱いとした。すなわち、干出メッシュの周囲の水位がある値を超えたら没水、逆に、没水メッシュの周囲の水位がある値より小さくなったら干出とする。

4) 計算条件

松川浦全域の平成7・8年度測量の地形データ（以下、現況という）および昭和30年測量の地形データ（以下、作濤前という）を福島水試相馬支場より入手し、これらを基に、濤筋の流れが再現できるようにメッシュ分割を行った。また、外海部については、相馬港港湾計画平面図から読みとり、作濤前については港湾施設が無いものとして扱った。（図2）

・空間差分(dx, dy, dz) :

水平方向 25m×25m

鉛直方向 3層に分割(第1層：水面～1m, 第2層：1m～2m, 第3層：2m以深)

・時間差分(dt) : 0.5sec

・水平渦動粘性係数(N_x, N_y) : $0.2m^2 \cdot sec^{-1}$

・水位境界：外海境界に表1に示す3通りの潮位変動を与えた。なお、相馬港実測潮位時系列は1996年7月17日21時からのデータである。

・流速境界：外海境界で自由流出入

・流速初期値：全領域で $0.0m \cdot sec^{-1}$ 。

・密度分布効果は考慮せず。水温、塩分は全領域で一定（水温21℃、塩分31.3psu）とし、水面での熱収支は考慮せず。

・コリオリ力：考慮せず。

5) 計算ケース

まず初めに、プログラムの検証のため、現況再現計算を行う必要がある。検証後に干出時間等予測のための計算を行う。主として、表1に示す6ケースについて計算した。

調査結果

1) 現地調査

松川浦はほぼ南北に長い汽水湖で、南北方向約5km、東西方向は最大で約3kmであり、北側に浦口が開いている。そのすぐ外側には松川浦漁港（外港）と相馬港がある。

磯部、岩の子、松川浦の3地先で潮位観測を行ったが、磯部と岩の子地先では、水位の低い時間帯

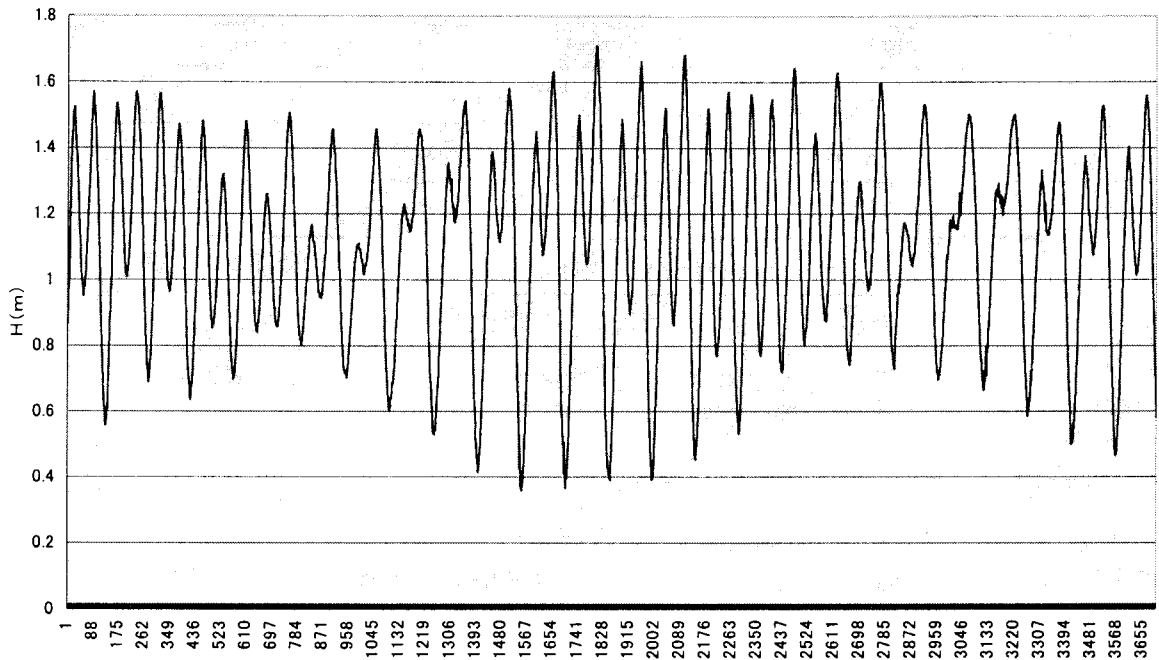


図3 松川浦地先の水位データ

(1996.7.18.15:40から2分間隔, 横軸目盛りはデータの通し番号, 縦軸の基準は基本水準面)

のデータに異常が見られた。ここでは、全期間中正常なデータが得られた松川浦地先の結果を図3に示す。ほぼ半日周潮であるが、小潮時から大潮時にかけて日潮不等が著しかった。

2) 現況再現計算

相馬港の実測潮位の時系列データを境界条件として与えた現況再現計算結果を、平成8年度に松川浦内で現地調査した水位変動および福島県保健環境部が平成8年度に実施した流況調査データと比較した。その結果、浦内と外海（相馬港）との潮位変動の差の特性や流速の大きさにおいて、ほぼ満足できる結果が得られたので、前述の計算条件による予測計算を行うこととした。

3) 流速分布

流速分布の一例として、図4にCase-1（大潮時）の下げ潮および浦内がほぼ最干潮時の流速分布を示す。下げ潮時には滞筋に沿った流れが卓越している（上げ潮時も同様である）。干潮に近い時間帯では、浅い部分の干出が著しいことがわかる。

4) 水位変化特性

外海（相馬港）および浦内（松川浦、岩の子、磯部）の水位変化を比較し、内外の潮位差、満干潮時の水位および位相の差などを定量的に明らかにした。大潮時・小潮時とも位相差は浦奥に行くほど大きい（図5）。現況大潮時の満潮位は位相差はあるものの外海と浦内とではほとんど差違はない。一方、最干潮時の浦内の水位は、外海と比べて大潮時には大きく異なり、外海より高い水位となる。小潮時には、現況ではほぼ同じ干潮位となっている（ただし、位相差はある）。作滞前は大潮時、小潮時とも浦奥の水の引きが悪く、満潮位・干潮位とも浦の奥に行くほど外海との差が大きくなっている。なお、現況の浦奥の大潮時の満潮位は、作滞による海水交換促進によって浦奥まで海水が容易に侵入するようになったため、作滞前よりも10cm程度高くなっている。

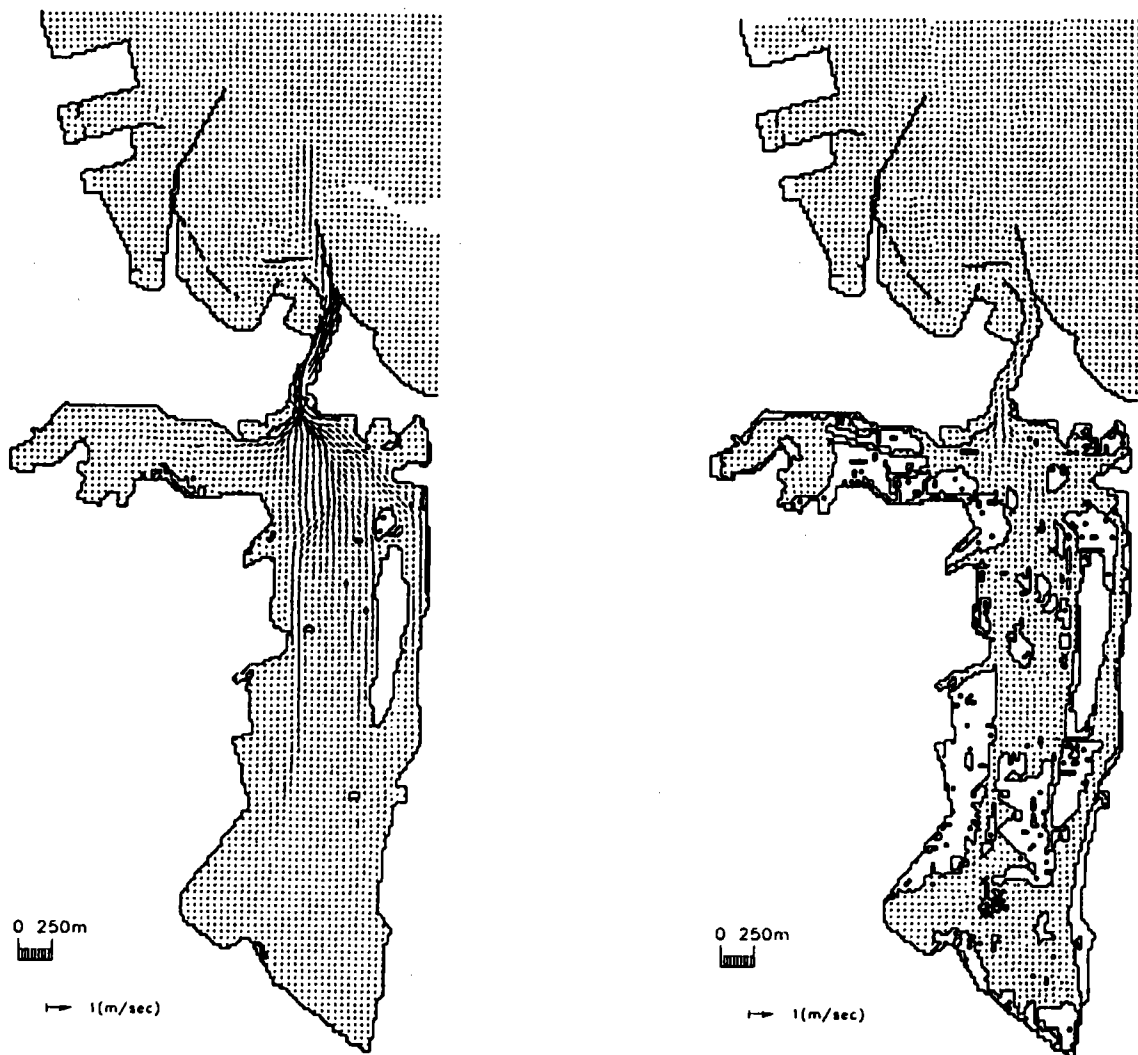


図4 流速分布（現況大潮時，左：下げ潮，右：浦内が最干潮に近い状態）

5) 干出時間の平面分布

各計算条件における干潟の干出・没水域やその時間変化を明らかにした。大潮時には広い領域が干出するが、小潮時には一部の限られた領域しか干出しないことが明確にわかる（図6）。

6) 海水交流・海水交換

作濤前の地形と現況の地形を用いた計算結果を比較した。その結果、潮位変動状況によって異なるが、大潮時で1.9倍、小潮時で2.7倍であり（表2）、海水交換量はおよそ2倍あるいはそれ以上に増加していることが確認できた。これは、作濤による流動促進効果が大きい。

マーカー粒子を用いた海水交換シミュレーションにより、浦内の海水交換状況を明らかにした。その結果、作濤前の浦奥の海水交換は現況に比較して極めて悪いことを確認した（図7）。ただし、浦の口に近い部分の海水交換は現況と比べて大差ない。マーカーの残存率を指標とした海水交換量の領域の体積に対する比（これは海水交換量をパーセント比で表した数字であるので、海水交換量比と表示しておく）は表2に示すとおりである。図7に示すように、領域①は浦の奥半分、領域②は浦の口に近い部分である。奥（領域①）の値は口に近い部分（領域②）よりもかなり小さいことがわかる。小潮時の値は大潮時に比べて両領域とも大潮時より小さい。現況と作濤前では、領域①の値は倍以上

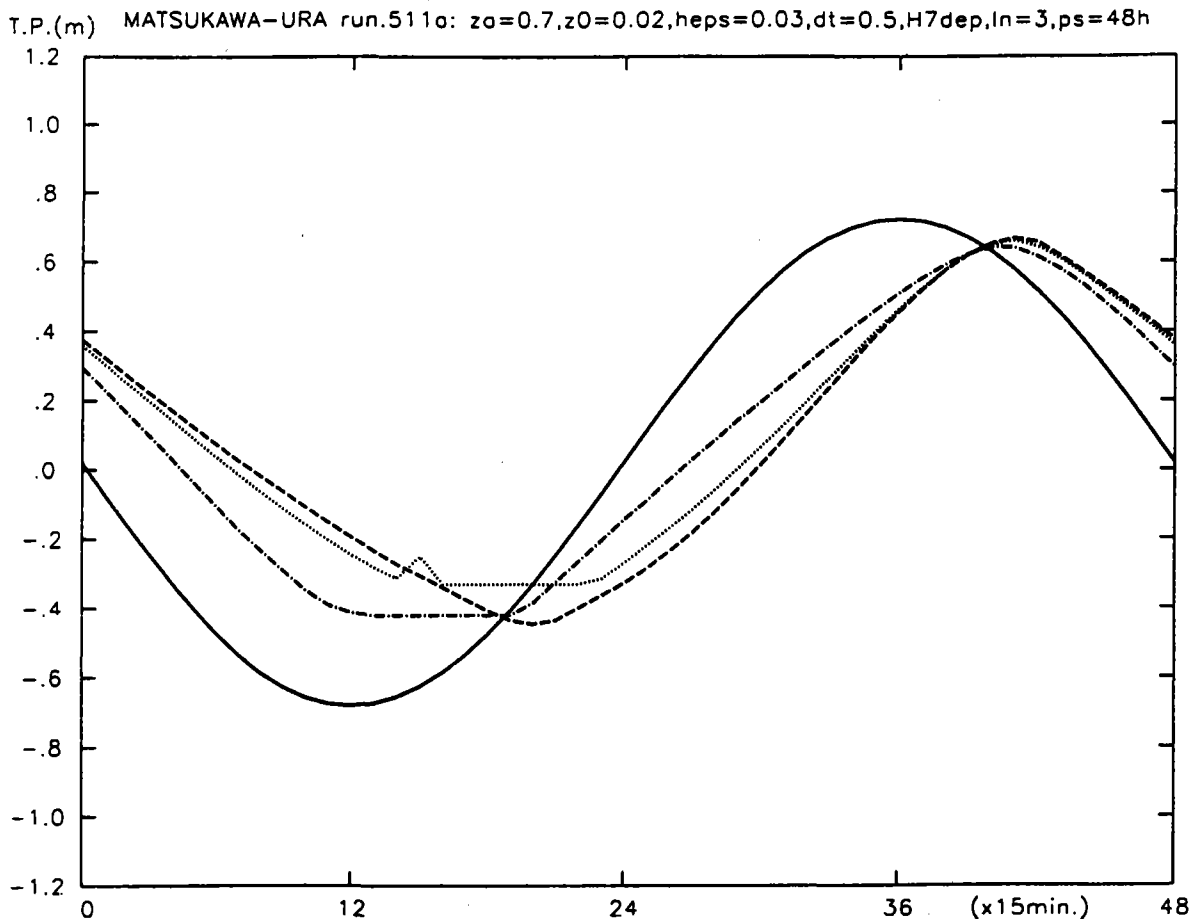


図5 a 水位変化の一例

(現況大潮時, 実線: 外海, 一点鎖線: 松川浦, 点線: 岩ノ子, 破線: 磯部)

に大きくなっている。ただし、領域②については、作濤前の水深が浅く、干出領域が広いため、海水交換量の絶対値は現況の半分以下であるが、体積比で見ると現況に比べて若干高い値になっている。

考察

以上の結果から、本研究で開発したシミュレーション手法を用いることにより、海水交換促進効果の定量的把握及び干出・没水域の平面分布等の物理環境予測が可能となった。

なお、従来の予測手法は2次元的手法がほとんどであったが、本研究では準3次元的手法を開発し、より現実的な予測結果を得ることができるようになった。

本研究の成果は、干潟を利用した増殖場造成計画に資することができる。例えば、干出時間の平面分布の効率的な予測が可能となったことは、干潟を利用した増殖場の造成適地（より生産性の高い場所となる可能性のある所）の効率的選定に役立ち、今後、増殖場造成をより効果的に行うことができる。また、環境の維持・保全の観点から、干潟の物質循環モデル・生態系モデル作成の試みがなされているが、物理環境予測手法と組み合わせることにより、現実的で精度良いモデルの構築が可能になり、干潟の機能解明等に資することができる。

なお、地形変化を考慮できる手法とし、プログラムにはそのためのルーチンを組み込んでいるが、今後、検証のためのシミュレーションを行いつつ、さらに改良する必要がある。また、地温変化予測については、現地観測データに乏しいため、プログラムへの組み込みは将来の課題とした。

T.P.(m) MATSUKAWA-URA run.524a: $z_0=0.7, z_0=0.02, h_{eps}=0.03, dt=0.5, S_{30dep}, ln=3, ps=48h$

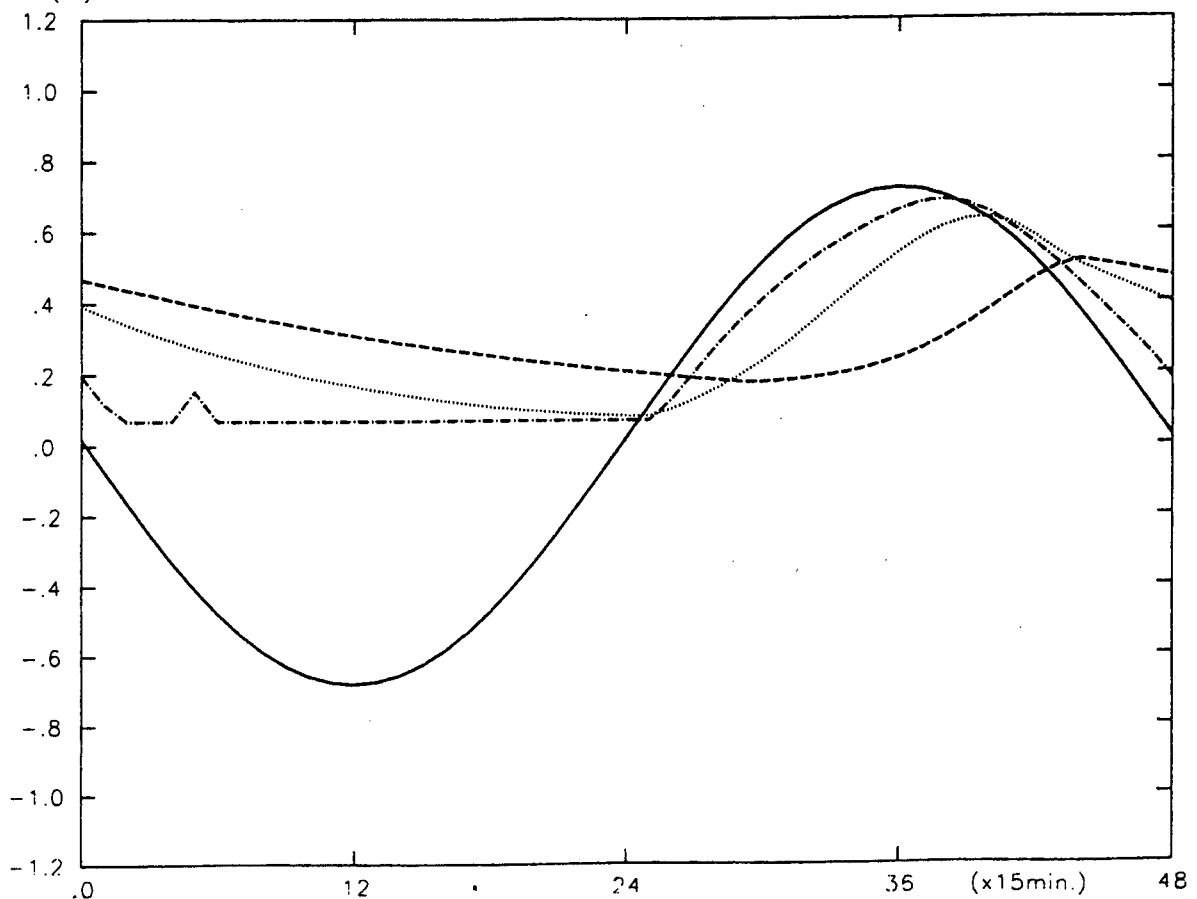


図5b 水位変化の一例

(作滞前大潮時, 実線: 外海, 一点鎖線: 松川浦, 点線: 岩ノ子, 破線: 磯部)

摘要

1. 本研究では、干潟の物理環境等の総合的な変化予測手法を確立し、増殖場造成及び環境の維持・保全に資することを目的とした。
2. 福島県松川浦を対象とした実証シミュレーション等を行い、次の成果を得た。
 - ①現況再現計算結果を、水位変動や流況に関する現地調査結果とし、ほぼ満足できる結果を得た。
 - ②作滞による海水交換促進効果を明らかにした。
 - ③内外の潮位差、最干潮時の水位差などを定量的に明らかにした。
 - ④干出・没水域の経時変化や干出時間の平面分布を明らかにした。
3. 以上の結果から、本研究で開発したシミュレーション手法を用いることにより、海水交換促進効果の定量的把握及び干出・没水域の平面分布等の物理環境予測が可能となった。なお、従来の予測手法は2次元的手法がほとんどであったが、本研究では準3次元的手法を開発し、より現実的な予測結果を得ることができるようになった。
4. 本研究の成果は、干潟を利用した増殖場造成計画に資することができる。例えば、干出時間の平面分布の把握には、従来は多大な労力と費用を費やした調査が必要であったが、本手法を用いることにより、効率的な予測が可能となった。このことは、干潟を利用した増殖場の造成適地（より生産性の高い場所となる可能性のある所）の効率的選定に役立ち、今後、増殖場造成をより効果的に

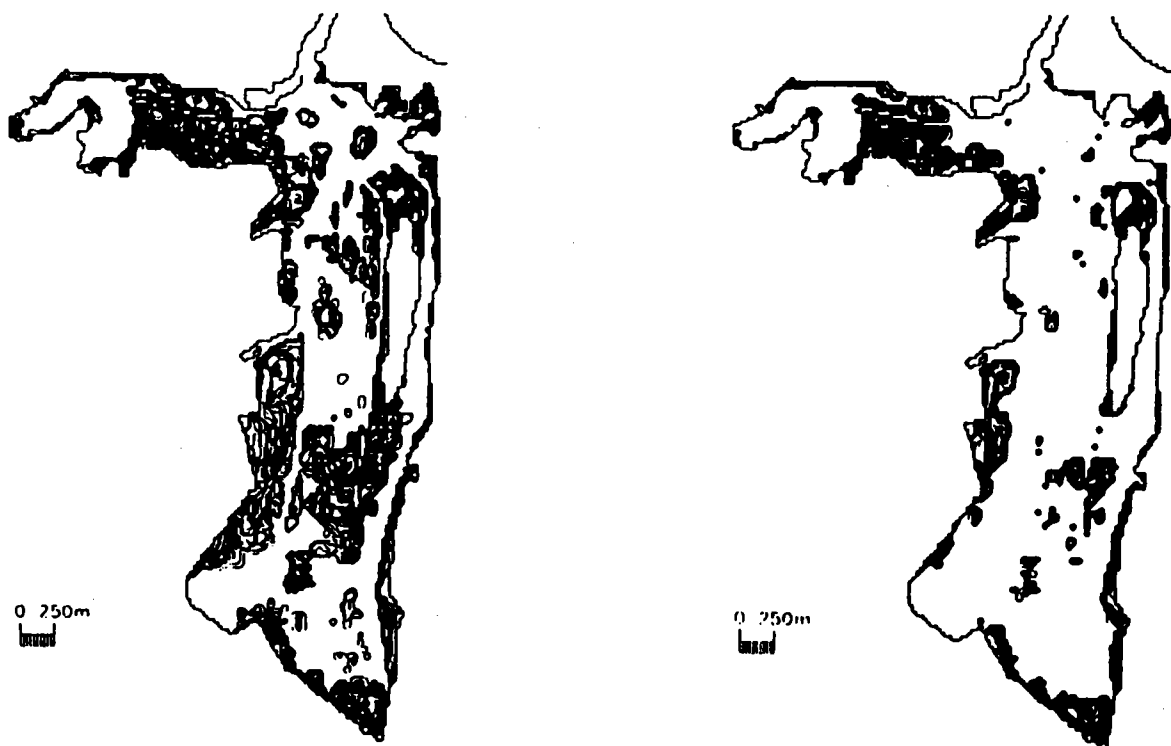


図6 1 潮汐（12時間）当たり15分以上干出する区域（左：大潮時，右：小潮時）

行うことができる。また，環境の維持・保全の観点から，干潟の物質循環モデル・生態系モデル作成の試みがなされているが，物理環境予測手法と組み合わせることにより，現実的で精度良いモデルの構築が可能になり，干潟の機能解明等に資することができる。

5. なお，地形変化を考慮できる手法とし，プログラムにはそのためのルーチンを組み込んでいるが，今後，検証のためのシミュレーションを行いつつ，さらに改良する必要がある。また，地温変化予測については，現地観測データに乏しいため，プログラムへの組み込みは将来の課題とした。

参考文献

- 1) 福島県保健環境部，1996：松川浦における窒素・燐の環境基準設定調査報告書，209pp.
- 2) 武内智行，1999：干潟の干出・没水シミュレーション，日本学会会議水力学・水理学研究連絡委員会第3回シンポジウム「C. G. で見る流れの世界」講演論文集，52-54.

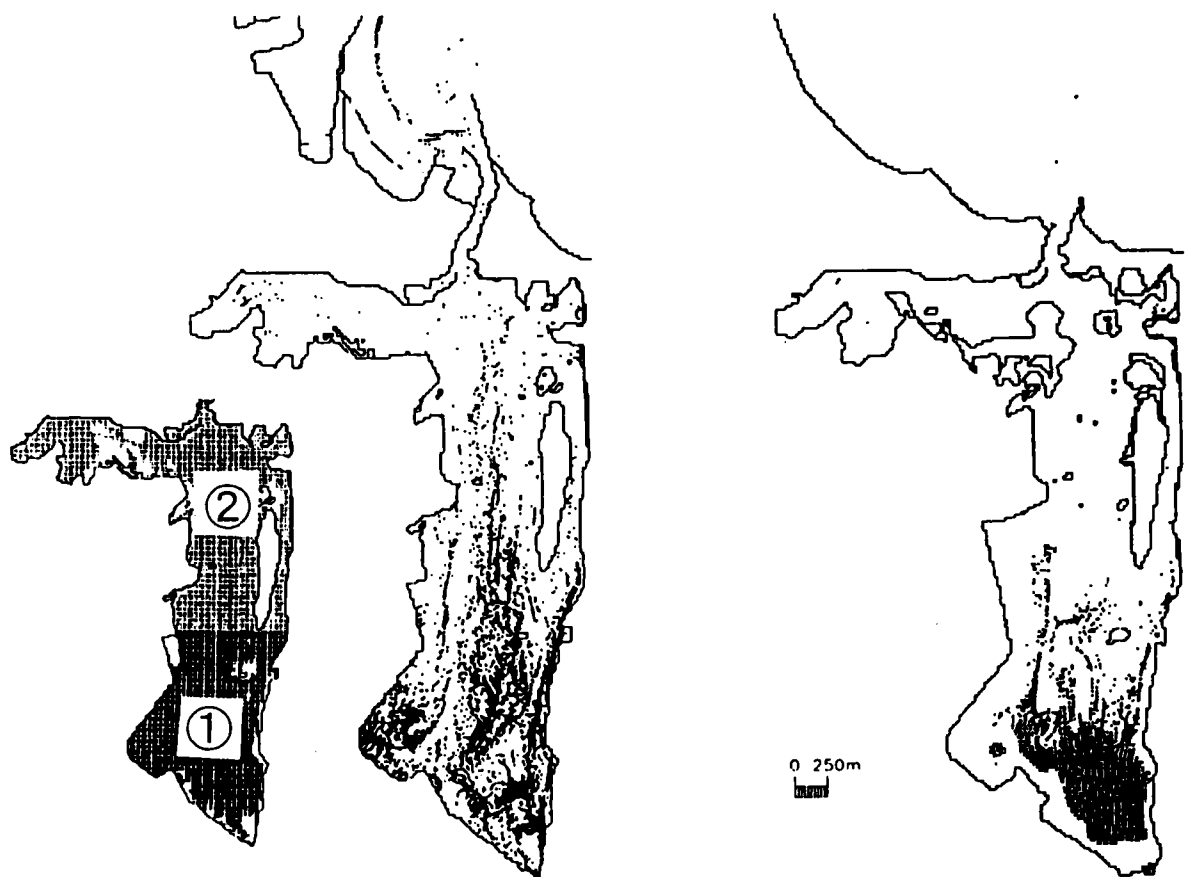


図7 浦奥（領域①）に配置したマーカー粒子の1潮汐後の分布
（左：現況，右：作濬前，いずれも大潮時）

表2 海水交流量・海水交換率

Case-No.	計算条件	海水交流量 (m ³ /12h)	海水交換量比 (%)	
			領域①	領域②
Case-1	現況・大潮時	6.07x10 ⁶	14.4	71.0
Case-2	現況・小潮時	3.29x10 ⁶	0.3	42.3
Case-4	作濬前・大潮時	3.25x10 ⁶	6.0	80.4
Case-5	作濬前・小潮時	1.24x10 ⁶	0.0	59.5

① X方向運動量方程式

$$\frac{\partial M_k}{\partial t} \equiv - \frac{\partial}{\partial x} (M_k u_k) - \frac{\partial}{\partial y} (M_k v_k) - (uw) \Big|_{z=-H_{k-1}} + (uw) \Big|_{z=-H_k} + f_o N_k + \frac{h_k}{\rho_k} \left([P_x]_k - \frac{1}{2} g h_k \frac{\partial \rho_k}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(N_x \frac{\partial M_k}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(N_y \frac{\partial M_k}{\partial x} \right) + \frac{1}{\rho} \tau_x^{k-1, k} - \frac{1}{\rho} \tau_x^{k, k+1}$$

② Y方向運動量方程式

$$\frac{\partial N_k}{\partial t} \equiv - \frac{\partial}{\partial x} (N_k u_k) - \frac{\partial}{\partial y} (N_k v_k) - (vw) \Big|_{z=-H_{k-1}} + (vw) \Big|_{z=-H_k} - f_o M_k + \frac{h_k}{\rho_k} \left([P_y]_k - \frac{1}{2} g h_k \frac{\partial \rho_k}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(N_x \frac{\partial N_k}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(N_y \frac{\partial N_k}{\partial x} \right) + \frac{1}{\rho} \tau_y^{k-1, k} - \frac{1}{\rho} \tau_y^{k, k+1}$$

③ 質量保存式および自由表面の式

$$w_k = 0 ; w_{k-1} = w_k - \frac{\partial M_k}{\partial x} - \frac{\partial N_k}{\partial y} \quad (k=2, 3, \dots, K) ; \frac{\partial \zeta}{\partial t} = w_1 - \frac{\partial M_1}{\partial x} - \frac{\partial N_1}{\partial y}$$

④ 熱収支の式

[level-1, top-level]

$$\frac{\partial}{\partial t} (h_1 T_1) = - \frac{\partial}{\partial x} (M_1 T_1) - \frac{\partial}{\partial y} (N_1 T_1) + (wT) \Big|_{z=-H_1} + \frac{\partial}{\partial x} \left(h_1 k_x \frac{\partial T_1}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(h_1 k_y \frac{\partial T_1}{\partial y} \right) - \frac{Q_s}{c_v \rho} - \left(k_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) \Big|_{z=-H_1}$$

[level-k]

$$\frac{\partial}{\partial t} (h_k T_k) = - \frac{\partial}{\partial x} (M_k T_k) - \frac{\partial}{\partial y} (N_k T_k) - (wT) \Big|_{z=-H_{k-1}} + (wT) \Big|_{z=-H_k} + \frac{\partial}{\partial x} \left(h_k k_x \frac{\partial T_k}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(h_k k_y \frac{\partial T_k}{\partial y} \right) + \left(k_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) \Big|_{z=-H_{k-1}} - \left(k_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) \Big|_{z=-H_k}$$

⑤ 塩素量収支の式

$$\frac{\partial}{\partial t} (h_k C_{l_k}) = - \frac{\partial}{\partial x} (M_k C_{l_k}) - \frac{\partial}{\partial y} (N_k C_{l_k}) - (wC_l) \Big|_{z=-H_{k-1}} + (wC_l) \Big|_{z=-H_k} + \frac{\partial}{\partial x} \left(h_k K_x \frac{\partial C_{l_k}}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(h_k K_y \frac{\partial C_{l_k}}{\partial y} \right) + \left(K_z \frac{\partial C_l}{\partial z} \right) \Big|_{z=-H_{k-1}} - \left(K_z \frac{\partial C_l}{\partial z} \right) \Big|_{z=-H_k}$$

⑥ 状態方程式(Knudsen's equation)

$$\rho = \rho (C_l, T) ; \rho = \frac{\sigma_l}{1000} + 1$$

$$\sigma_l = \Sigma_l + (\sigma_o + 0.1324) \{ 1 - A_l + B_l (\sigma_o - 0.1324) \} ; \sigma_o = -0.069 + 1.4708 C_l - 0.001570 C_l^2 + 0.0000398 C_l^3$$

$$\Sigma_l = - \frac{(T-3.98)}{503.570} \cdot \frac{T+283.0}{T+67.26}$$

$$A_l = T(4.7867 - 0.098185T + 0.0010843T^2) \cdot 10^{-3} ; B_l = T(18.030 - 0.8164T + 0.01667T^2) \cdot 10^{-6}$$

ここで、

$M_k \equiv \int h_k u dz, N_k \equiv \int h_k v dz, \tau^s$: 風による表面応力, h_k : レベルkの厚さ,

$\tau^{k-1, k}$: レベルkとk-1の間の内部応力, τ^b : 海底摩擦応力(マンニングの粗度係数nに置き換えて扱った),

u, v, w : x-, y-, z-方向の流速成分,

ζ : 静水面からの水面の高さ, ρ : 流体の密度, f_o : コリオリパラメータ,

P_o : 大気圧, T : 水温(°C), C_l : 塩素量,

N_x, N_y, N_z : x-, y-, z-方向の渦粘性係数,

K_x, K_y, K_z : x-, y-, z-方向の物質拡散係数,

k_x, k_y, k_z : x-, y-, z-方向の熱拡散係数,

x, y : 水平面の直角座標,

z : 静水面から上向き鉛直座標

干潟の計算では、各時間ステップ毎に各メッシュの干出・没水の判定とその取り扱いがこれに加わる。