

汽水湖からの洪水放流による海域汚濁拡散及び 放水路への波浪の遡上に関する研究

STUDY ON SIMULATION METHOD OF DIFFUSION EFFECTS OF
FLOODWATER FROM DRAINAGE TUNNEL IN BAY AND SURGES AGAINST
A DESIGN FLOOD RUNNING THROUGH THE TUNNEL

小野田利宏¹・島田英和²・中村利行³・岩崎武彦⁴・河野次朗⁵

Toshihiro ONODA, Hidekazu SHIMADA, Toshiyuki NAKAMURA, Takehiko IWASAKI
and Jiroh KOHNO

¹福井県 土木部 河川課 河川整備グループ (〒910-8580 福井県福井市大手3丁目17番1号)

²福井県 嶺南地域振興局 敦賀土木事務所 地域整備課 (〒914-0811 福井県敦賀市中央町1-7-36)

³三井共同建設コンサルタント株式会社 関西支社 技術2部 (〒552-0007 大阪市港区弁天1-2-1-1000)

⁴三井共同建設コンサルタント株式会社 環境部 (〒169-0075 東京都新宿区高田馬場1-4-15)

⁵正会員 三井共同建設コンサルタント株式会社 (〒169-0075 東京都新宿区高田馬場1-4-15)

Regarding the scheme of drainage tunnel to the sea for the flood control, there are generally great concerns that how the floodwater from the tunnel affects the ecological circumstances in the bay and how the surges affect the flow in the tunnel. This paper reports what we have researched on these phenomena taking Hayase River Basin in Fukui prefecture as the example.

In this research, we performed the numerical analyses through the computer simulation. The model chosen was the two-dimensional multi-layer model for this simulation based on our observation of the tidal current circumstances. We simulated the diffusion of the turbid floodwater into the bay in the case of a design flood occurring. Also, we analyzed its effect on the marine organism according to the obtained data and knowledge qualitatively as well.

Furthermore, we simulated the influence of the surges against a design flood running through the tunnel. We used the characteristic analyzing method as the unsteady-flow calculation for this simulation.

Key Words : *Drainage tunnel, Diffusion of floodwater, two-dimensional multi-layer model, characteristic method on unsteady open channel flow*

1. はじめに

福井県の若狭湾国定公園内に位置する景勝三方五湖では、平成11年8月14日に発生した豪雨による増水によって、200戸余りの家屋が浸水し、数100haの農地が冠水する被害が発生した。三方五湖は二級河川早瀬川水系鱒川が流入する三方湖、水月湖、菅湖、久々子湖及び水月湖に嵯峨隧道と称する人工水路でつながる海水湖の日向湖で構成され、前4湖は汽水湖である。湖水面積は約10 km²を有するが、湖全体の流域面積はその約10倍であり、当該豪雨での連続雨量が約300mmを超える異常気象による湖水域への急激な降雨流出が生じ、久々子湖から若狭湾に注ぐ早瀬川及び水月湖と久々子湖を繋ぐ浦見川の流下能力が過少であったことにより湖水水位が約2m上昇した。洪水防御のために湖水域から外海への排水能力の増強案として、水月湖から世久見湾への放水路を設置する計画が考案されているが、洪水放流による海域汚濁、海生

物への影響などが懸念される。また、放流海域は波浪が高く、洪水放流時の波浪の遡上による排水能力低下が危惧される。

そこで、本研究では潮流観測データに基づく海域流動シミュレーションモデルを構築し、洪水放流による汚濁拡散予測を行った。また、波浪の遡上現象は、放水路が一樣断面水路であることから、不定流計算の特性曲線解法を用いた数値計算を行った。

2. 世久見湾海域での潮流観測

(1) 観測地点及び観測方法

世久見湾は福井県三方町に面する小規模なりアス式湾で、三方町と美浜町を分ける常神半島から田島半島にかけての東西約3 km南北約6 km、平均水深が約40mの小規模水域である。潮流観測地点は、当該水域での流れ場に関する情報を漁業関係者からの意見も合わせて収集整理

し、当該水域の平面形状及び海底地形を考慮した上で、流速・流向・水温観測ステーションを設置した(図-1)．観測機材は表-1に示す電磁流速計を使用し、風浪以外の比較的長周期の固有振動のエイリシングを防ぐため、インターバルは10分、観測値はサンプリング間隔1秒で10回のサンプリング値の平均値を記録し、平成15年6月下旬及び7月下旬の2度の15昼夜観測を実施した。

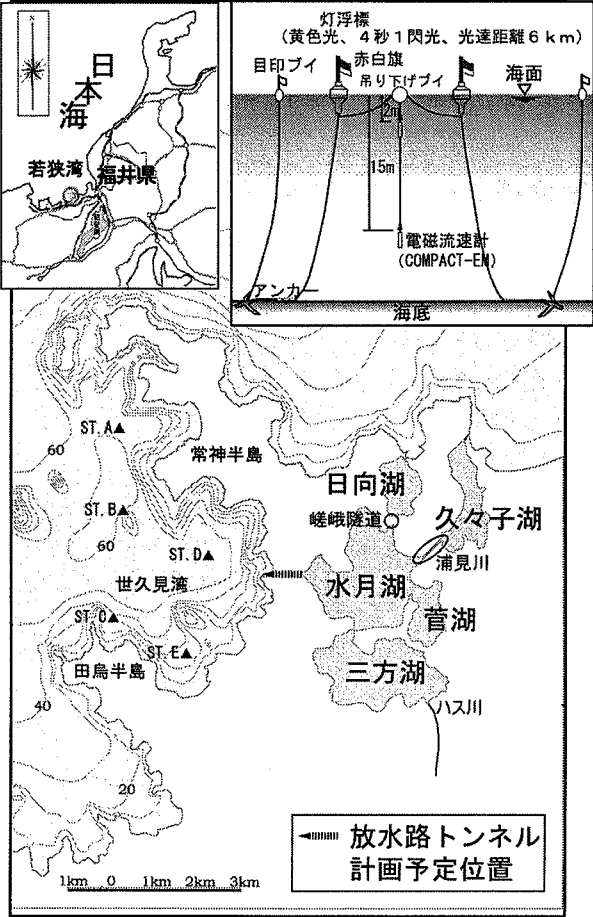


図-1 潮流観測地点位置図

表-1 小型メモリー流速 (COMPACT-EM) の仕様

項目	タイプ	レンジ	分解能	精度
流速センサー	電磁誘導方式	0～±250 cm/sec	0.01 cm/sec	±1cm/sec 又は測定値の±2%
方位センサー	ホール素子コンパス	0～360°	0.01°	±2°
水温センサー	サーミスタ	-5～40℃	0.001℃	±0.02℃

(2) 観測結果

流速の平均値は日本海側の沿岸部なので、潮汐成分及び対馬海流成分が小さく、表層(海面下2m)で5～10cm/s、下層(海面下15m)で3～6cm/s程度である(表-2)．調和解析から得られた恒流成分は、北方分速が0～4cm/s、東方分速が0～2cm/s程度であり、岸側調査地点D及びEでは1cm/s程度なので、恒流成分による1日の最大移流距離は1km程度と推定される(表-3)．また、観測結果から得られた拡散係数は10⁴～10⁶cm²/sのオーダーである(表-4)．

表-2 観測地点毎の観測期間別平均流速(単位:cm/s)

観測地点	観測期間(6月24日～7月9日)		観測期間(7月26日～8月7日)	
	表層 (海面下2m)	下層 (海面下15m)	表層 (海面下2m)	下層 (海面下15m)
ST.A	9.5	6.3	6.0	4.5
ST.B	9.0	5.0	6.1	4.4
ST.C	6.6	4.8	5.9	5.0
ST.D	5.3	3.6	4.7	2.7
ST.E	5.1	2.9	5.0	2.6

表-3 恒流成分流速 (単位:cm/s)

観測地点		観測期間(6月24日～7月9日)		観測期間(7月26日～8月7日)	
		北方分速	東方分速	北方分速	東方分速
ST.A	表層	2.9	1.3	3.8	0.1
	下層	0.6	0.5	0.5	0.3
ST.B	表層	0.4	0.9	1.3	0.9
	下層	0.4	0.0	-0.2	0.0
ST.C	表層	0.1	0.9	-0.4	-0.1
	下層	0.9	1.6	2.4	-0.6
ST.D	表層	0.5	0.7	0.6	0.9
	下層	1.3	1.2	0.7	0.5
ST.E	表層	-0.9	0.6	-0.1	-1.8
	下層	-0.6	0.3	0.4	0.7

表-4 観測地点別拡散係数 (単位:cm²/s)

観測地点		生データ		長周期成分除去後データ	
		南北成分	東西成分	南北成分	東西成分
ST.A	表層	1.097×10 ⁶	5.570×10 ⁵	2.407×10 ⁴	1.343×10 ⁴
	下層	1.658×10 ⁶	1.481×10 ⁵	8.086×10 ³	7.911×10 ³
ST.B	表層	1.097×10 ⁶	4.877×10 ⁵	1.542×10 ⁴	1.429×10 ⁴
	下層	8.681×10 ⁵	7.491×10 ⁴	8.429×10 ³	7.136×10 ³
ST.C	表層	1.831×10 ⁵	6.244×10 ⁵	1.855×10 ⁴	1.429×10 ⁴
	下層	6.323×10 ⁴	1.957×10 ⁵	1.196×10 ⁴	6.328×10 ³
ST.D	表層	2.191×10 ⁵	2.174×10 ⁵	1.173×10 ⁴	7.985×10 ³
	下層	6.717×10 ⁴	1.591×10 ⁵	4.828×10 ³	3.631×10 ³
ST.E	表層	1.886×10 ⁵	2.259×10 ⁵	9.716×10 ³	9.000×10 ³
	下層	6.252×10 ⁴	3.178×10 ⁴	5.255×10 ³	3.205×10 ³

3. 海域流動シミュレーションモデルの構築

(1) 流れ場の基礎方程式

本研究では、流速が数cm/sの緩慢な流れ場であることから、支配方程式は回転系でのナビア・ストークス方程式を用いることとする。

・ x方向の運動方程式

$$\frac{\partial u}{\partial t} = -\frac{\partial}{\partial x}(u^2) - \frac{\partial}{\partial y}(uv) - \frac{\partial}{\partial z}(uw) + f_0 v - g \frac{\partial \zeta}{\partial x} - \frac{g}{\rho} \int_x^0 \frac{\partial \rho}{\partial x} dz - \frac{1}{\rho} \frac{\partial P_a}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left(N_x \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(N_y \frac{\partial u}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(N_z \frac{\partial u}{\partial z} \right)$$

・ y方向の運動方程式

$$\frac{\partial v}{\partial t} = -\frac{\partial}{\partial x}(uv) - \frac{\partial}{\partial y}(v^2) - \frac{\partial}{\partial z}(vm) + f_0 u$$

$$-g \frac{\partial \zeta}{\partial y} \frac{g}{\rho} \int_x^0 \frac{\partial \rho}{\partial y} dz - \frac{1}{\rho} \frac{\partial P_a}{\partial y}$$

$$+ \frac{\partial}{\partial x} \left(N_x \frac{\partial v}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(N_y \frac{\partial v}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(N_z \frac{\partial v}{\partial z} \right)$$

・連続の式

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

・自由表面（潮位）の式

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} = -\frac{\partial}{\partial x} \left(\int_{-H}^{\zeta} u dz \right) - \frac{\partial}{\partial y} \left(\int_{-H}^{\zeta} v dz \right)$$

・熱収支の式（温度の拡散方程式）

$$\frac{\partial T}{\partial t} = -\frac{\partial}{\partial x} (uT) - \frac{\partial}{\partial y} (vT) - \frac{\partial}{\partial z} (wT)$$

$$+ \frac{\partial}{\partial x} \left(k_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k_z \frac{\partial T}{\partial z} \right)$$

・塩素量収支の式（塩素量の拡散方程式）

$$\frac{\partial Cl}{\partial t} = -\frac{\partial}{\partial x} (u \cdot Cl) - \frac{\partial}{\partial y} (v \cdot Cl) - \frac{\partial}{\partial z} (w \cdot Cl)$$

$$+ \frac{\partial}{\partial x} \left(k_x \cdot \frac{\partial Cl}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_y \cdot \frac{\partial Cl}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k_z \cdot \frac{\partial Cl}{\partial z} \right)$$

・状態方程式は、Knudsenの式を使用した。

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

$$\rho = 1 + \sigma t / 1000$$

$$\sigma t = \Sigma t + (\sigma 0 + 0.1324) \{1 - At + Bt(\sigma 0 - 0.1324)\}$$

$$\sigma 0 = -0.069 + 1.4708 \cdot Cl - 0.001570 Cl^2 + 0.0000398$$

$$Cl^3$$

$$\Sigma t = -(T - 3.98)^2 / 503.570 \cdot (T + 283.0) / (T + 67.26)$$

$$At = T(4.7869 - 0.098185T + 0.0010843T^2) \times 10^{-3}$$

$$Bt = T(18.030 - 0.8164T + 0.01667T^2) \times 10^{-6}$$

・境界条件

海面上における風の応力

$$\frac{1}{\rho} \tau_x^{0,1} = \frac{\rho_a}{\rho} Y_a^2 W_x \sqrt{W_x^2 + W_y^2}$$

$$\frac{1}{\rho} \tau_y^{0,1} = \frac{\rho_a}{\rho} Y_a^2 W_y \sqrt{W_x^2 + W_y^2}$$

層間の粘性応力

$$\frac{1}{\rho} \tau_x^{k-1,k} = Y_i^2 (U_{k-1} - U_k) \sqrt{(U_{k-1} - U_k)^2 + (V_{k-1} - V_k)^2}$$

$$\frac{1}{\rho} \tau_y^{k-1,k} = Y_i^2 (V_{k-1} - V_k) \sqrt{(U_{k-1} - U_k)^2 + (V_{k-1} - V_k)^2}$$

海底での粘性応力

$$\frac{1}{\rho} \tau_y^{bottom} = Y_b^2 V_k \sqrt{U_k^2 + V_k^2}$$

$$\frac{1}{\rho} \tau_y^{bottom} = Y_b^2 V_k \sqrt{U_k^2 + V_k^2}$$

ここで、各式中の変数や記号は以下のとおりである。

u, v, w: x, y, z 方向の流速成分 (cm/sec)

ζ: 平均水面から自由表面までの変位 (水位) (cm)

H: 平均水面から海底までの深さ (cm)

ρ: 流体の密度 (g/cm³)

f₀: コリオリパラメータ (sec⁻¹)

g: 重力加速度 (cm/sec²)

Pₐ: 大気圧 (g/cm · sec²)

T: 水温 (°C)

Cl: 塩素量 (‰)

Nx, Ny, Nz: x, y, z 方向の水平渦動粘性係数

Kx, Ky, Kz: x, y, z 方向の渦動物質拡散係数

kx, ky, kz: x, y, z 方向の温度拡散係数

Wx, Wy: x, y 方向の風速 (cm/sec)

ρₐ: 大気密度 (g/cm³)

(2) モデル構築及び流れ場のシミュレーション結果

① 計算領域：世久見湾の外からの流入が想定されるため、世久見湾全体を含む南北13.2 km、東西9.4 kmとする。

② 格子間隔：複雑な世久見湾の形状を再現できるよう100mメッシュとする。

③ 鉛直モデルの区分：0～5m、5～30m、30m以深の三層区分。

海域の鉛直区分については、有光層の深度を目安に設定した。有光層は一般に「透明度の3倍程度」とされている。世久見湾における透明度のデータは、今回の現地調査結果では春季10.2m～12.4m、夏季7.5m～8.3m、秋季5.5m～9.0m、冬季8.5m～12.0mである。また、過去の公共用水域水質調査のうち、海中公園データによれば15～20m程度（春19～20、夏15m）である。したがって、夏季の有光層は30m程度であることが想定される。また、表層は風浪等の大気の影響を直接受ける層であり、洪水放流水が比重の関係から表層のみを流れる現象が想定されるために設定したものである。

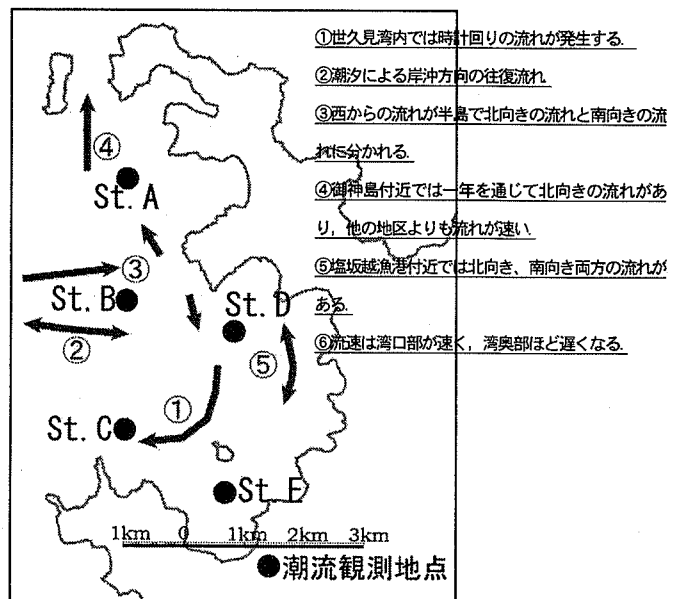


図-2 ヒアリング流況概況図

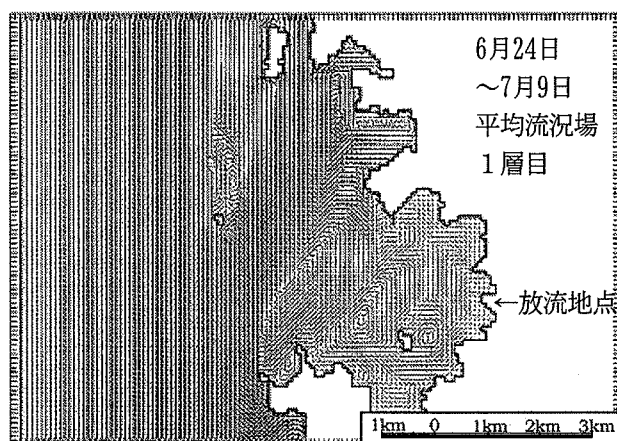


図-3 流況シミュレーション結果

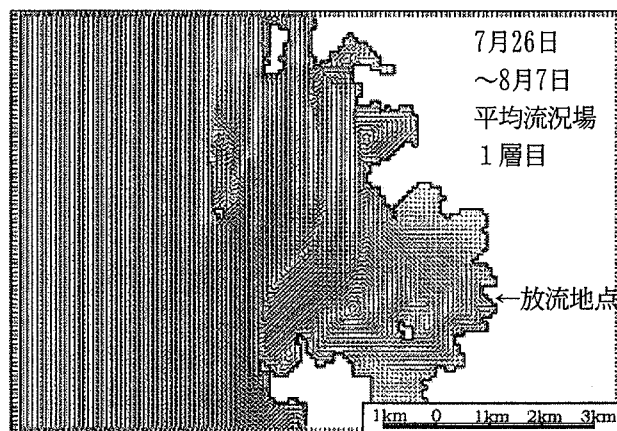


図-4 流況シミュレーション結果

洪水放流による世久見湾の流況の変化を確認するため
現況と放流ピーク時の潮流観測地点(表-5参照)における
変化量を求めた(最大放流量80m³/s)。

表-5 現況と放流ピーク時との流況の比較

ケース	層	現況との差	St. A	St. B	St. C	St. D	St. E
6月24日～ 7月9日 実況観測 流況場	1層	流速比(%)	1.4	1.3	2.5	8.3	27.1
		流向(度)	62	86	30	53	3
	2層	流速比(%)	1.2	1.4	2.2	10.3	20.4
		流向(度)	60	84	28	52	2
	3層	流速比(%)	1.1	1.1	1.9	6.2	11.3
		流向(度)	62	85	27	50	2
7月26日～ 8月7日 実況観測 流況場	1層	流速比(%)	1.2	1.4	2.2	10.3	25.2
		流向(度)	59	82	27	50	1
	2層	流速比(%)	1.1	1.3	1.9	9.9	22.0
		流向(度)	59	80	28	49	0
	3層	流速比(%)	0.6	1.0	2.2	9.1	20.1
		流向(度)	55	76	20	45	0

4. 洪水の放流による汚濁拡散予測

(1) 基礎方程式

汚濁拡散解析は以下に示す2次元拡散方程式を用いた。

$$\begin{aligned} \text{上層: } \frac{\partial S_1 \cdot h_1}{\partial t} = & -\frac{\partial}{\partial x}(U_1 \cdot S_1 \cdot h_1) - \frac{\partial}{\partial y}(V_1 \cdot S_1 \cdot h_1) + \frac{\partial}{\partial x}\left(kh_1 \frac{\partial S_1}{\partial x}\right) \\ & + \frac{\partial}{\partial y}\left(kh_1 \frac{\partial S_1}{\partial y}\right) - k_z(S_1 - S_2) + W \cdot S^* + L_0 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{n層: } \frac{\partial S_n \cdot h_n}{\partial t} = & -\frac{\partial}{\partial x}(U_n \cdot S_n \cdot h_n) - \frac{\partial}{\partial y}(V_n \cdot S_n \cdot h_n) + \frac{\partial}{\partial x}\left(kh_n \frac{\partial S_n}{\partial x}\right) \\ & + \frac{\partial}{\partial y}\left(kh_n \frac{\partial S_n}{\partial y}\right) + k_z(S_1 - S_n) - W \cdot S^* + L_0 \end{aligned}$$

ここで、式中の変数や記号は以下のとおりである。

x, y : 水平方向のx, y座標, U_n, V_n : n層目のx方向, y方向の
流速, W : 鉛直流速, h_n : n層目の厚さ, k : 水平拡散係数, k_z : 鉛直
混合係数, S_n : n層の物質濃度, L_0 : 流入負荷量, $S^* : W > 0$ の
とき $S^* = S_n$, $W < 0$ のとき $S^* = S_1$

(2) 検討方針

放流水の水質条件については、公共用水域水質調査に
基づく水月湖内の過去20年間の水質データより、最も高
い濃度を示していた平成5年のCOD濃度, SS濃度を
設定することとした。また、塩分・水温については、水
月湖南部(上層)の夏期平均値として設定した(塩分3%,
水温28.96℃, COD26mg/l, SS54mg/l, 但し粒径は
現地観測より0.001873mm, 最大放流量80m³/s, 放流時間
48時間、総放流量730万m³)。

(3) 洪水放流に伴う汚濁拡散予測

低塩分水、水温上昇及び汚濁指標(COD, SS)の拡散範囲
及び日数は、図-5, 6に示すとおりであり、放流地点から
約2kmの範囲で、1週間程度影響が続くものと想定される。

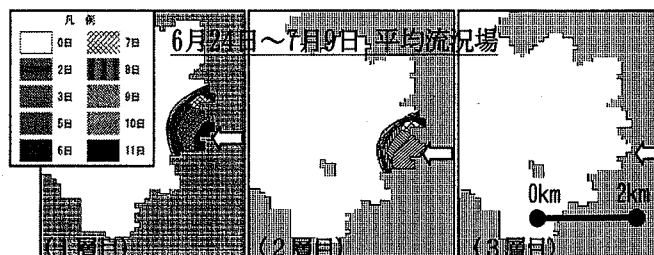


図-5① 塩分が30%以下に低下する範囲と日数

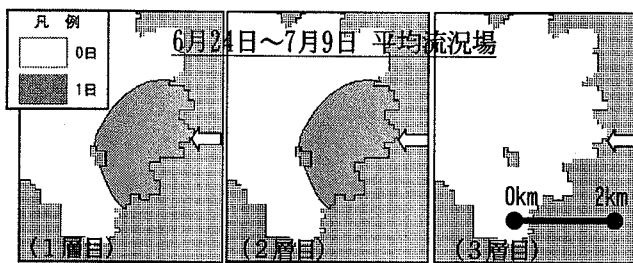


図-5② 水温が1℃程度変化する範囲と日数

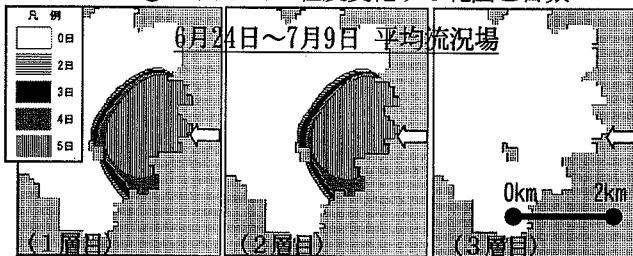


図-5③ CODが2mg/l以上になる範囲と日数

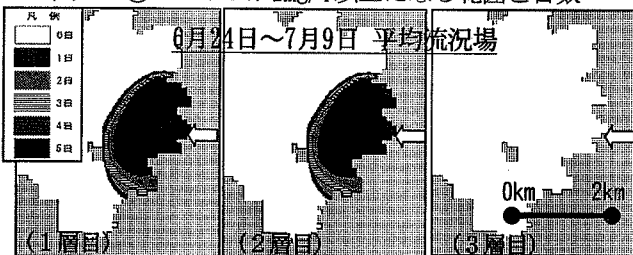


図-5④ S Sが2mg/l以上になる範囲と日数

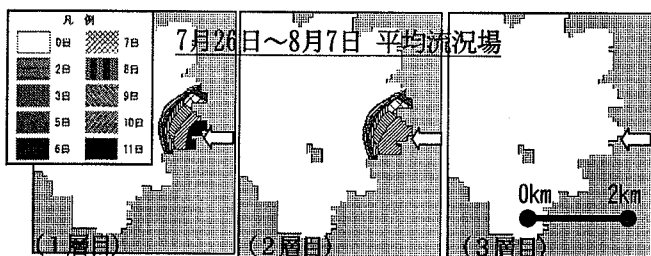


図-6① 塩分が30‰以下に低下する範囲と日数

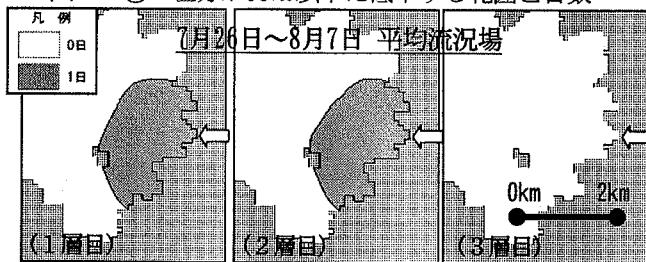


図-6② 水温が1℃程度変化する範囲と日数

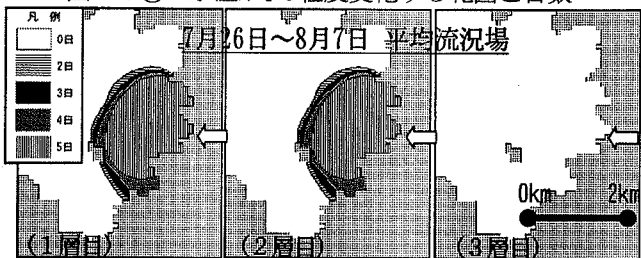


図-6③ CODが2mg/l以上になる範囲と日数

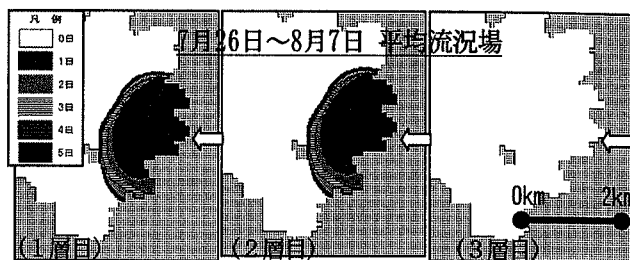


図-6④ S Sが2mg/l以上になる範囲と日数

5. 放水路への波浪の遡上水理解析

(1) 基礎方程式

放水路断面は縦断方向に一樣であることから、開水路非定常流の解析は、以下の一次元エネルギー解析法が適用できる¹⁾。

連続式：

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q$$

エネルギー式：

$$\frac{\beta}{g} \cdot \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\alpha v^2}{2g} + \lambda h \cos \theta \right) = S_0 - S_f$$

ここで、式中の変数や記号は以下のとおりである。

A：流水断面積 (m²) Q：流量

q：単位流下距離当たりの横流入量 (m³/s/m)

v：平均流速 (m/s)

S₀=sin θ：水路勾配 (cos θ≒1)

S_f：摩擦勾配で抵抗則として

Manning公式を適用する際 S_f=n²v²/R^{4/3}

(n：Manningの粗度係数 R：径深 (m))

h：水深 (m) α：エネルギー係数

β：運動量係数 λ：圧力分布補正係数

t：時間 (sec) x：距離 (m) (下向き補正)

エネルギー解析法による特性曲線表示は、次の通りである。

特性曲線：

$$\frac{dx}{dt} = \frac{\alpha + \beta}{2\beta} \cdot v \pm c$$

に沿って

$$\frac{\lambda \cos \theta}{B} \left(\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} - q \right) + \left(\frac{\alpha - \beta}{2\beta} v \pm c \right) \left(\frac{\beta}{g} \cdot \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{\partial H}{\partial x} + S_f \right) = 0$$

が成立する。

ここで、Bは水面幅であり、Cは次式で与えられる微小擾乱の波速である。

$$C = \sqrt{\left(\frac{\alpha - \beta}{2\beta} \cdot v \right)^2 + \frac{\lambda g A \cos \theta}{\beta B}} = \sqrt{\frac{gA}{B}}$$

流れは常に常流であると仮定し、述べた特性曲線の方向に応じてx方向の差分のとり方をかえればexplicitな数値計算式として次式が与えられる。

・上流から下流に伝わる関係

$$\left(\frac{\lambda \cos \theta}{B} \right) i \left(\frac{A_i^{t+1} - A_i^t}{\Delta t} + \frac{Q_i^t - Q_{i+1}^t}{\Delta x_i} - \frac{q_i^t + q_{i+1}^t}{2} \right) + \left(\frac{\alpha - \beta}{2\beta} V + C \right) i$$

$$\left(\frac{\beta}{g} \cdot \frac{V_i^{t+1} - V_i^t}{\Delta t} + \frac{H_i^t - H_{i+1}^t}{\Delta x_i} + \frac{Sf_i^t + Sf_{i+1}^t}{2} \right) = 0$$

・下流から上流に伝わる関係

$$\left(\frac{\lambda \cos \theta}{B} \right) i \left(\frac{A_i^{t+1} - A_i^t}{\Delta t} + \frac{Q_i^t - Q_{i-1}^t}{\Delta x_{i-1}} - \frac{q_i^t + q_{i-1}^t}{2} \right) + \left(\frac{\alpha - \beta}{2\beta} V - C \right) i$$

$$\left(\frac{\beta}{g} \cdot \frac{V_i^{t+1} - V_i^t}{\Delta t} + \frac{H_i^t - H_{i-1}^t}{\Delta x_{i-1}} + \frac{Sf_i^t + Sf_{i-1}^t}{2} \right) = 0$$

(2) 波浪の遡上解析結果

水月湖から世久見湾への放水路計画は図-7に示すトンネル放水路計画である。放水路下流端での朔望平均満潮位はTP+0.5mであり、福井県港湾計画における確率W=1/50年での設計波高は3.15mで、周期が10秒の進行波が放水路下流端に到達すると想定される(図-8)。これらの条件で進行波の遡上を数値計算した結果は、最大流量時で図-9に示すとおりであり、進行波はトンネル水路内で波高が急激に減衰することが判る。この現象は断面が馬蹄形断面であることから朔望平均満潮位TP+0.5mでの水面幅7.8mが波浪の外注で4.6mまで減少し、エネルギーフラックスも減少することに起因するものと考えられる。

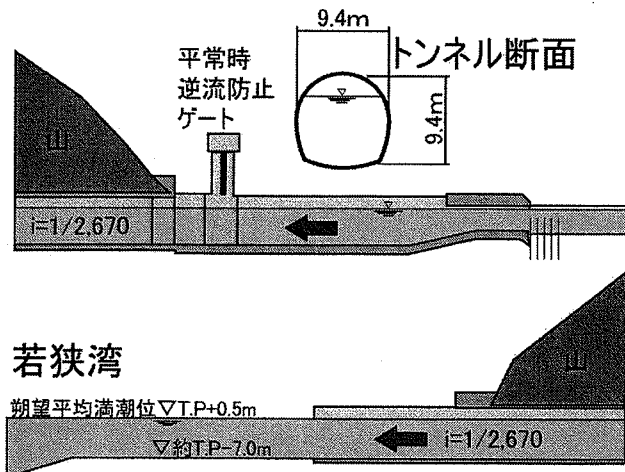


図-7 放水路縦断概要図

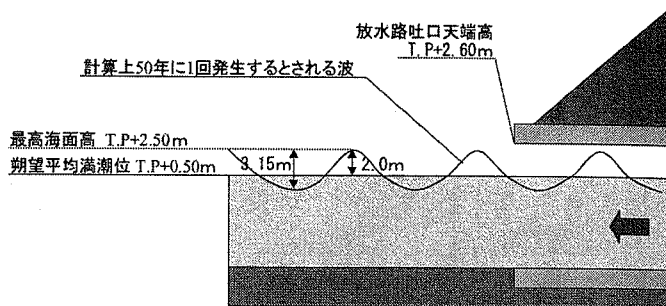


図-8 トンネル放水路に進入する進行波の条件

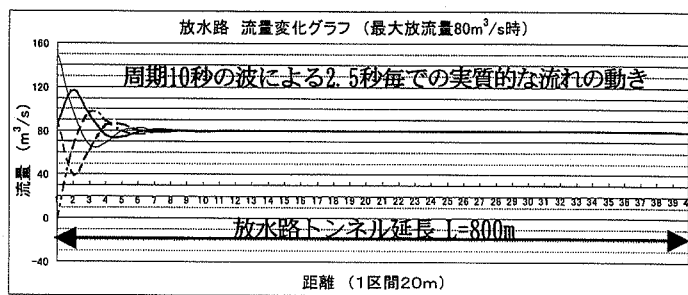
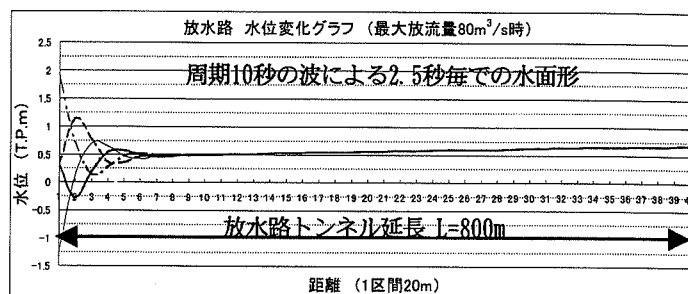


図-9 波浪水位・流量グラフ (最大放流量80m³/s時)

6. おわりに

本研究により、洪水放流による海域への汚濁・拡散の影響範囲が定量的に解析する手法が示された。

なお、海生生物に対する影響は過去の知見を合わせて研究を進める必要があるが、得られた結果から定性的に判断すると、当該影響海域では逃避行動が可能な魚類等を除いて、動きの鈍い底生動物や現地に多く繁茂するホンダワラなどの海藻類などには影響が出ることもあり得ることが、推論される。

波浪の遡上計算は、放水路断面を小さくするために採用した水利断面が、波浪の遡上面でも合理的であることが確認できた。

謝辞：本研究を遂行するにあたり、福井県三方町漁業協同組合には、ヒアリングに関するご協力を頂いた。また、福井県水産試験場及び若狭湾エネルギー研究所の関係各位には、解析等に関する各種情報提供のご協力いただいた。ここに記して感謝の意を表する。

参考文献

- 1) 岩佐義昭, 井上和也, 片山猛：開水路非定常流の数値計算法について, 京都大学防災研究所年報, 第19号B, 1976.4.

(2004.4.7受付)