

## 温排水の水中放流による局所洗掘現象 の数値シミュレーション

牛 島 省\*  
清 水 隆 夫\*\*

**概 要** 本研究では、温排水の水中放流による局所洗掘現象を予測するための数値解析手法を開発した。この解析手法では、局所洗掘により時間とともに変形する計算領域内で、温排水の移流拡散過程を2方程式乱流モデルで計算し、計算された流体の掃流力から掃流砂量と浮遊砂量を算出して砂面の変形過程を計算する。計算においては、これら2つの過程の相互作用が考慮されている。

実験結果との比較により本解析手法の適用性の検討を行った結果、次のことが明らかとなった。まず、固定床上における温排水の放流実験に適用した結果、流速の3次元的な分布が適切に計算された。また、2次元流れ場における局所洗掘実験の結果との比較から、各時刻の砂面の変形過程は数値解析によりほぼ適切に計算されることがわかった。さらに、3次元流れ場における局所洗掘実験へ本解析手法を適用した結果、最大洗掘深の発生箇所やや相違があるものの、その深さはほぼ正しく計算され、本解析手法の妥当性が示された。

### 1. はじめに

発電施設から温排水が高流速で水中放流される際に、その前面の海底が微細な砂から構成されている場合には、海底面が局所的に洗掘されて構造物等に影響を及ぼす可能性がある。このような局所洗掘現象による海底面の洗掘深や洗掘される範囲などをあらかじめ予測することは、構造物等の安定性を評価したり、防護対策を考えたりする上で重要である。

局所洗掘現象に関する初期の研究は、Rouse<sup>1)</sup>、Doddiah<sup>2)</sup>、Iwakagi<sup>3)</sup>、Duckstein<sup>4)</sup>、Laursen<sup>5)</sup>らによって、鉛直および水平噴流による洗掘現象を対象にして行われた。その後、Marion<sup>6)</sup>は2次元噴流や他の流れに対

して相似則を導こうと試みている。近年になって、Saito<sup>7)</sup>は2次元水平噴流によって生ずる局所洗掘現象の実験的な研究を行い、砂の輸送に関するモデルを提案している。しかしながら、このような過去の研究では、主として経験的な法則や比較的プリミティブなモデルの提案しかなされていないため、それらの結果は本研究で目的とするような局所洗掘現象の詳細な予測には残念ながら適用できない。

局所洗掘現象を数値的に予測する場合には、これまで多くの研究者が指摘してきたように、温排水の移流拡散の過程と海底の砂面変形の過程の相互の影響を考慮することが重要である。本研究で開発した数値解析手法では、局所洗掘により時間とともに変形する領域内で、温排水の移流拡散過程を2方程式乱流モデルにより計算する。一方、計算された温排水の掃流力から掃流砂量と浮遊砂量を算出して砂面の高さを求め、砂面の変形過程を計算する。数値解析においては、これらの両過程の計算が並行して進められるので、両者の相互作用が考慮されており、時間の経過とともに、両者は互に影響を及ぼし合いながら進行してゆくものとなる。本研究では、得られた数値解析手法を2次元および3次元流れ場における局所洗掘現象へ適用し、その妥当性を確認した。



牛島 省



清水隆夫

\*財団法人電力中央研究所 我孫子研究所 FBR部 熱流動研究室  
\*\* 本部企画部 計画課

2. 局所洗掘現象の解析手法

(1) 温排水の移流拡散過程の解析方法

a 解析モデル

発電施設から海へ放流される温排水の移流拡散過程を数値的に予測するための解析モデルとしては、運動量や熱に関する乱流拡散係数を半経験的な法則に基づいて定めたりするもの<sup>8)</sup>や、2方程式乱流モデルを用いるもの<sup>9)</sup>などがある。本研究では、成層流の乱流計測実験の結果を用いて改良を加えた2方程式乱流モデル<sup>10)</sup>により、温排水の移流拡散過程の数値解析を行う。この解析モデルでは、乱流拡散係数を求める際に半経験的な法則に基づく必要がなく、しかも従来考慮されていなかった乱流拡散係数に対する浮力の効果が、より適切な形で定式化されているところに特徴がある。

温排水の移流拡散過程の数値解析に用いる基礎方程式系をテンソル表示で示すと以下のように表される。

① 連続式

$$\frac{\partial U_i}{\partial x_i} = 0 \dots\dots\dots(1)$$

② 運動方程式

$$\frac{\partial U_i}{\partial t} + U_j \frac{\partial U_i}{\partial x_j} = -[1 - \beta(\theta - \theta_s)] \delta_{i3g} - \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\nu \frac{\partial U_i}{\partial x_j} - \overline{u_i u_j}) \dots\dots\dots(2)$$

③ エネルギー方程式

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} + U_j \frac{\partial \theta}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} (\alpha \frac{\partial \theta}{\partial x_j} - \overline{u_j \theta}) \dots\dots\dots(3)$$

④ 乱れの運動エネルギー k に関する方程式

$$\frac{\partial k}{\partial t} + U_j \frac{\partial k}{\partial x_j} = -\overline{u_i u_j} \frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \beta g \overline{u_3 \theta} + \frac{\partial}{\partial x_j} [(\nu + C_k \frac{k^2}{\epsilon}) \frac{\partial k}{\partial x_j}] - \epsilon \dots\dots\dots(4)$$

⑤ 乱れのエネルギーの散逸率 ε に関する方程式

$$\frac{\partial \epsilon}{\partial t} + U_j \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} = C_{\epsilon 1} \frac{\epsilon}{k} (-\overline{u_i u_j} \frac{\partial U_i}{\partial x_j}) + C_{\epsilon 2} \frac{\epsilon^2}{k} + \frac{\partial}{\partial x_j} [(\nu + C_\epsilon \frac{k^2}{\epsilon}) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j}] \dots\dots\dots(5)$$

これらの方程式中で、t：時間、x<sub>i</sub>：i座標であり、x<sub>1</sub>：水平・流下方向、x<sub>2</sub>：水平・横断方向、x<sub>3</sub>：鉛直上方向に向かう座標成分である。また、本報中では、x<sub>1</sub>、x<sub>2</sub>、x<sub>3</sub>は、それぞれx、y、zとも表示される。さらに、U<sub>i</sub>：平均流速のi成分、u<sub>i</sub>：変動流速のi成分、θ：温度の平均成分、θ̄：温度の変動成分、θ<sub>s</sub>：基準温度、P：圧力の平均成分、k：乱れの運動エネルギー、ε：乱れエネルギーの散逸率、α：熱拡散係数、β：熱膨張係数、ν：動粘性係数、ρ：流体の密度、g：重力

加速度、δ<sub>ij</sub>：クロネッカーのデルタである。式中で上付きバーは平均成分をとることを意味する。また、これらの方程式中では、同一項内に現われるサフィックに対して、3次元成分の和をとるというアインシュタインの規約が用いられている。

⑥ レイノルズ応力、乱流熱フラックスに関する方程式

$$-\overline{u_i u_j} = \epsilon_M (\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i}) - \frac{2}{3} k \delta_{ij} \dots\dots\dots(6)$$

$$-\overline{u_i \theta} = \epsilon_H \frac{\partial \theta}{\partial x_i} \dots\dots\dots(7)$$

ここでε<sub>M</sub>およびε<sub>H</sub>は運動量および熱に関する乱流拡散係数で、それぞれ渦動粘性係数、渦動熱拡散係数とよばれる。また、(4)、(5)式の中で、C<sub>k</sub>、C<sub>ε</sub>、C<sub>ε1</sub>およびC<sub>ε2</sub>は、モデル係数であり、表-1に示すような値である。

表-1 解析モデル中で用いる係数値

C <sub>k</sub>	C <sub>ε</sub>	C <sub>ε1</sub>	C <sub>ε2</sub>
0.09	0.075	1.44	1.90

著者ら<sup>10)</sup>は、温度成層流の乱流計測実験を行い、乱流拡散係数や乱流プラントル数に対する成層度の影響について検討を行った。その結果を用いると、(6)、(7)式中の乱流拡散係数はそれぞれ以下のように表される。

$$\epsilon_M = C_\nu f_b \frac{k^2}{\epsilon} \dots\dots\dots(8)$$

$$\epsilon_H = \epsilon_M / \text{Pr}_t \dots\dots\dots(9)$$

ここにC<sub>ν</sub>は係数(0.09)であり、Pr<sub>t</sub>は乱流プラントル数である。f<sub>b</sub>はε<sub>M</sub>に対する成層度の影響を表すもので、次式で表される。

$$f_b = \frac{1}{1 + 0.2 B_L} (B_L \geq 0) \dots\dots\dots(10)$$

ここで、B<sub>L</sub>はLaunder<sup>11)</sup>により提案された成層度の強弱を表すパラメータで、次式で定義されるものである。

$$B_L = \beta g (\frac{k}{\epsilon})^2 \frac{\partial \theta}{\partial z} \dots\dots\dots(11)$$

また、(9)式中のPr<sub>t</sub>は次のようなB<sub>L</sub>の関数として表される<sup>10)</sup>。

$$\frac{1}{\text{Pr}_t} = \frac{1.6}{1 + 0.24 B_L} (B_L \geq 0) \dots\dots\dots(12)$$

なお、B<sub>L</sub><0となる場合には、(10)、(12)式でB<sub>L</sub>=0とした形の関係式を用いる。

b 流体の基礎方程式の解析方法

数値解析は有限差分法(FDM)に基づく。基礎方程式中の非線形項の解法には、特性曲線法を適用した<sup>12)</sup>。運動方程式は、時間的にはSemi-Implicit法<sup>13)</sup>により差

分化されており、運動方程式と連続式から導かれる圧力のポアソン方程式の解法には、SOR法<sup>14)</sup>やADI法<sup>15)</sup>よりも収束性のすぐれた前処理付きの双対共役勾配法<sup>16)</sup>(MILUBCG法)を適用している。

(2) 洗掘される海底面形状の解析方法

a 海底の砂の移動形態

海浜の表層地盤を構成する砂は、その地域や、また場合によっては季節等により異なるとされている<sup>17)</sup>。本研究で対象とする砂の特性は、ある地点(x地点と仮称)の砂の特性に従うものとした。x地点の砂は、しばしば海岸地域の砂として観察される表-2に示した特性を有し、ほぼ一様粒径の砂である。本研究では、以下このような砂から海底の表層地盤が形成されると考える。

表-2 x地点の砂の特性

平均粒径(d)	密度( $\sigma$ )
0.2mm	2.65g/cm <sup>3</sup>

海底面の砂は、水中放流された温排水の掃流力がある限界値を越えると移動を開始する。砂の移動形態としては、掃流移動と浮遊移動とが考えられるが<sup>18)</sup>、White<sup>19)</sup>の限界掃流力に関する実験結果を考慮すると、温排水の掃流力が増加するにつれて、表-2に示した砂粒はまず掃流移動を開始し、その後さらに流水の掃流力が増した場合に盛んに浮遊移動を開始すると考えられる。本研究では、砂がこのような掃流移動と浮遊移動という2つの移動形態をとることによって、局所洗掘等の海底面の変形が生ずるものとした。

b 掃流砂量の算出式

掃流移動による砂の移動量を表す掃流砂量式に関しては、DuBoys<sup>20)</sup>の研究以来、古くから多くの実験式や、またある程度の理論的な裏付けが行われた半理論式などが提案されている<sup>21)-26)</sup>。このうち、Ashidaら<sup>27)</sup>は平坦な河床を対象として、次のような掃流砂量式を提案した。

$$\Phi = \frac{q_{Bx}}{(sgd^3)^{1/2}} \dots\dots\dots(13)$$

$$\Phi = 12\tau_*^{3/2}(1-0.85\frac{\tau_*c}{\tau_*})(1-0.92\frac{u_*c}{u_*}) \dots\dots\dots(14)$$

ここに $q_{Bx}$ は単位時間・単位幅あたりのx方向に向かう掃流砂量である。また、sは次式で定義される。

$$s = \frac{\sigma}{\rho} - 1 \dots\dots\dots(15)$$

また、 $\tau_*$ および $\tau_*c$ はそれぞれ無次元の掃流力と砂に対する限界掃流力であり、それぞれ次式で定義される。

$$\tau_* = \frac{u_*^2}{sgd} \dots\dots\dots(16)$$

$$\tau_*c = \frac{u_*c^2}{sgd} \dots\dots\dots(17)$$

限界掃流力に関しては、Shields<sup>28)</sup>、栗原<sup>29)</sup>、岩垣<sup>30)</sup>などにより提案された公式がある。ここでは、このうち岩垣公式を用いて限界まさつ速度 $u_*c$ を求め、(17)式より限界掃流力を計算した。まさつ速度 $u_*$ は1/7乗則<sup>18)</sup>を参考とした次式により得られるものとした。

$$\frac{U_s}{u_*} = A_1(\frac{z_B}{k_s})^{1/7} \dots\dots\dots(18)$$

ここで、 $U_s$ は砂面上方の最も近い計算点上におけるx方向の流速成分であり、 $z_B$ は砂面からその計算点までの距離である。 $k_s$ は底面粗度で、ここでは砂の粒径と同じ値とした。上式中の係数 $A_1$ は0.2である。以上の諸関係式より掃流砂量 $q_{Bx}$ が求められる。これらと同様に、y方向のまさつ速度 $v_*$ からy方向の掃流砂量 $q_{By}$ も計算される。

c 浮遊砂量の算出式

流水中に浮遊して移動する砂の量を求めるためには、流水中の浮遊砂の濃度分布を算出することが必要となる。浮遊砂濃度の輸送過程は、次式で表わされる<sup>18)</sup>。

$$\frac{\partial C}{\partial t} + (U_j - w_0\delta_{3j})\frac{\partial C}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j}(\lambda\frac{\partial C}{\partial x_j} - \overline{u_j C}) \dots\dots\dots(19)$$

ここでC:濃度の平均成分、c:濃度の変動成分、 $w_0$ :砂の沈降速度、 $\lambda$ :濃度の分子拡散係数である。乱流濃度フラックスは次のように表わされる。

$$-\overline{u_j C} = \epsilon_s \frac{\partial C}{\partial x_j} \dots\dots\dots(20)$$

さらに乱流拡散係数 $\epsilon_s$ は乱流シュミット数 $s_t$ を用いて次式で与えられる。

$$\epsilon_s = \epsilon_M / s_t \dots\dots\dots(21)$$

乱流シュミット数は、乱流プラントル数と同様に浮力の影響を受けると考えられるが、ここでは1とした。(19)式で表わされる浮遊砂の平均濃度の輸送方程式は、他の流体の基礎方程式と同様に差分して、それらと同時に解くことができる。得られた濃度分布を用いて、たとえば単位時間あたりに奥行単位長さの鉛直断面内(水深h)を通過するx方向の浮遊砂量 $q_{sx}$ は、次式から計算される。

$$q_{sx} = \int_0^h \frac{UC}{\sigma} dz \dots\dots\dots(22)$$

これと同様に、y方向の浮遊砂量のフラックス $q_{sy}$ も計算される。

(19)式を解く際に、境界条件として砂面のごく近傍の浮遊砂の濃度 $C_0$ を与える。浮遊砂濃度 $C_0$ を評価するためのモデルは、Lane & kalinske<sup>31)</sup>型のモデルと Einstein<sup>22)</sup>型のモデルという2つのモデルに大別できると

されている<sup>32)</sup>。本研究では、このうち、Lane & Kalinske<sup>31)</sup>モデルを用いることとする。このモデルでは、 $C_0$  (単位: ppm) は次式で与えられる。

$$C_0 = 5.55 \Delta F(w_0) P_*^{1.61} \dots\dots\dots(23-a)$$

$$P_* = \frac{1}{2} \frac{u_*}{w_0} \exp(-w_0^2/u_*^2) \dots\dots\dots(23-b)$$

ここで  $\Delta F(w_0)$  は、沈降速度が  $w_0$  なる砂が全砂礫中に占める割合 (% 値) である。なお、砂の沈降速度  $w_0$  は、次の Rubey の式<sup>33)</sup>を用いて算出される。

$$\frac{w_0}{(sgd)^{1/2}} = \left(\frac{2}{3} + \frac{36\nu^2}{sgd^3}\right)^{1/2} - \left(\frac{36\nu^2}{sgd^3}\right)^{1/2} \dots\dots\dots(24)$$

d 砂面の近傍の境界条件

図-1 に流体の計算に用いる諸変数の定義位置を示した。図に示すように、各流速成分は計算セルの各面上で定義され、圧力  $P_{ijk}$  はその中央で定義される。圧力以外のスカラー量である  $k$ ,  $\epsilon$ ,  $\Theta$  も圧力と同じ位置に定義される。

$x$  および  $y$  方向の総移動砂量  $q_x$  と  $q_y$  は、それぞれ同方向の掃流砂量  $q_{Bx}$ ,  $q_{By}$  と浮遊砂量  $q_{sx}$ ,  $q_{sy}$  の和として表される。すなわち、

$$q_x = q_{Bx} + q_{sx} \dots\dots\dots(25-a)$$

$$q_y = q_{By} + q_{sy} \dots\dots\dots(25-b)$$

図-2 は、 $xy$  平面上における砂面の高さ  $B$  と、 $q_x$  と  $q_y$  の定義位置の関係を示すものである。図中で、実線で描かれたものが、図-1 に示した流体の計算スキームであり、また破線で囲んだ領域が移動砂量の連続性を考える  $xy$  平面内のコントロールボリュームに相当する。

砂のポロシティ  $\gamma$  が、砂の移動前後で変化しないと仮定すると、 $B$  と  $q_x$  および  $q_y$  の関係は次のように表される。

$$(1-\gamma) \frac{\partial B}{\partial t} = \frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} \dots\dots\dots(26)$$

本研究では  $\gamma$  の値は 0.4 とした。また、砂面近傍の流体計算のコントロールボリューム内では、流体の連続性が満足される。すなわち、図-3 に示すような状態において次式が満足される。

$$\begin{aligned} & (S_{xi} \cdot U_{ijk} - S_{xi+1} \cdot U_{i+1jk}) \\ & + (S_{yj} \cdot V_{ijk} - S_{yj+1} \cdot V_{ij+1k}) \\ & + (S_{zk} \cdot W_{ijk} - S_{zk+1} \cdot W_{ijk+1}) = 0 \dots\dots\dots(27) \end{aligned}$$

ここで  $S_{xi}$  等は流体のコントロールボリュームの各面において流体が占める部分の面積であり、図-3 ではハッチのかかっていない部分の各面の面積に相当する。

e 流体と砂面形状の計算方法

上記の砂面の変形過程の計算は、(1)で述べた流体の計算と同時に進めてゆくことが必要である。このことは、計算の手法上は何ら問題を含まないが、実用上の観点か

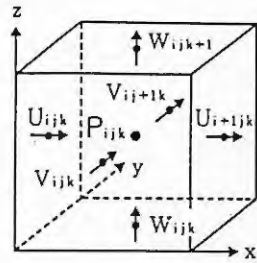


図-1 流体の計算スキーム

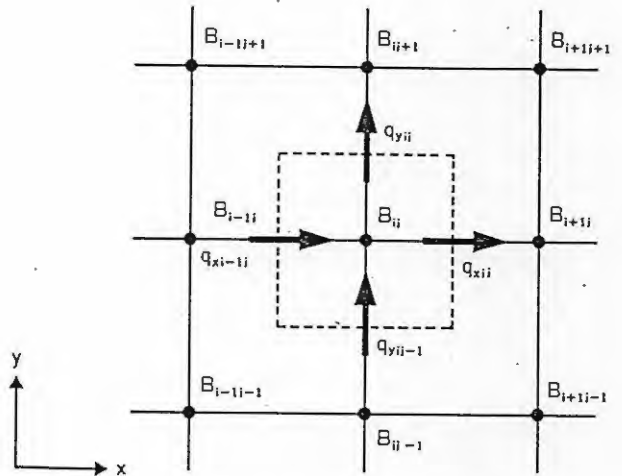


図-2 B,  $q_x$  および  $q_y$  の定義位置

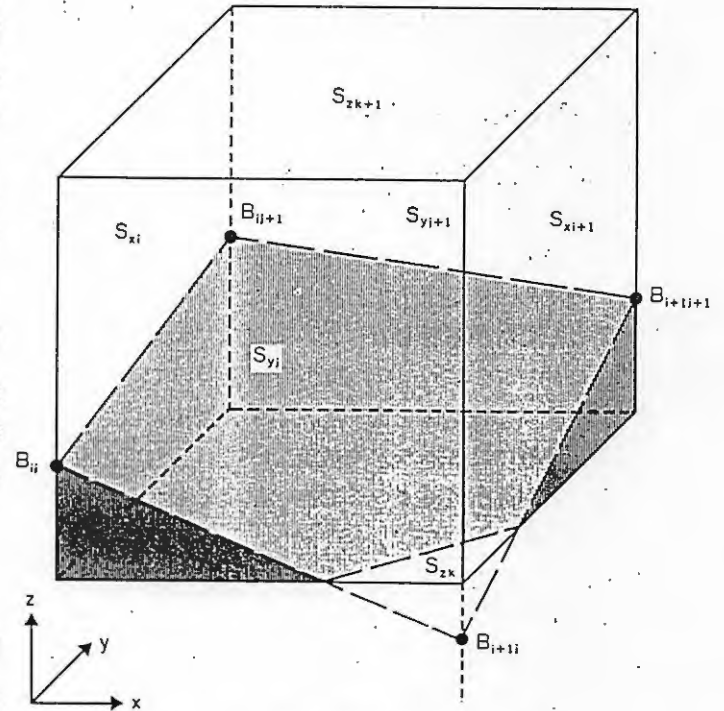


図-3 砂面近傍の計算スキーム

ら見ると、多大な計算時間が必要となるという困難が伴う。このため、本研究の数値解析では流体の計算と海底の砂面の変形過程の計算を次のようにして行うものとした。

① STEP-1:ある砂面形状に対して、流体の数値計算を時間ステップ $\Delta t_F$ で行い、流況がほぼ定常となる $N_F$ ステップで計算を終了する。時間 $\Delta t_F N_F$ における砂面の変形は無視できる程度のものであると見積もられるため、この間は砂面形状の変形過程の計算は行わない。また、時間 $\Delta t_F N_F$ は、計算の経過時間の中には加えない。

② STEP-2:砂面形状が大きく変化しない範囲では、流況はほぼ定常的であると考えて、STEP-1で得られた一定の流速分布を用いて砂面形状の変形過程の計算のみを行う。この計算における時間ステップ $\Delta t_s$ に関しては、

$$\Delta t_s \gg \Delta t_F \dots\dots\dots(28)$$

なる関係が成り立つので、計算時間の大幅な短縮化が図られる。この計算の $N_s$ ステップ後において新たに得られたある点の砂面高さ $B^{N_s}_{ij}$ が、計算を始める前の砂面高さ $B^0_{ij}$ および水深 $H^0_{ij}$ と比較して、次の関係が初めて成立した時にSTEP-2の計算を終了する。

$$\max_{ij} |B^{N_s}_{ij} - B^0_{ij}| / H^0_{ij} \geq \epsilon_1 \dots\dots\dots(29)$$

$\epsilon_1$ の値は本研究では0.01~0.02とした。このようなSTEP-2の計算が終了した後、再びSTEP-1の計算を行い、流体の移流拡散の過程と砂面計算の変形過程の計算を進めてゆく。

### 3. 解析手法の適用性

#### (1) 固定床上の温排水の3次元解析

本節では、3次元的な温排水の移流拡散過程のみに着目し、この過程に対する数値解析手法の適用性を検討する。このため、固定床上で行なわれた温排水の放流実験を対象とした数値解析を行った。実験は、 $x$ 地点の水理構造物の約1/100スケールの縮小模型を用いて実施された。縮小模型の概略図を図-4に示す。図中に示されるように、模型には3本的水中放流管が設けられており、それらから周囲水温度より7℃高い温度の温水が流出する。全放流水流量は $83.4 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$ とした。実験では、定常状態に近い条件下における流下方向流速の3次元的な分布が小型のプロベラ流速計により計測された。

図-5は、次式で定義される無次元流速 $U^*$ の鉛直および水平方向の分布を示したものである。

$$U^* = U/U_0 \dots\dots\dots(30)$$

ここで $U_0$ は放水口における平均流速である。図-5(b)に示される、流速の鉛直方向の分布をみると、 $x=1.0$ (m)においてすでにほぼ一様な分布となっているが、図-5(a)の水平方向の分布では、なお流速勾配が存在し

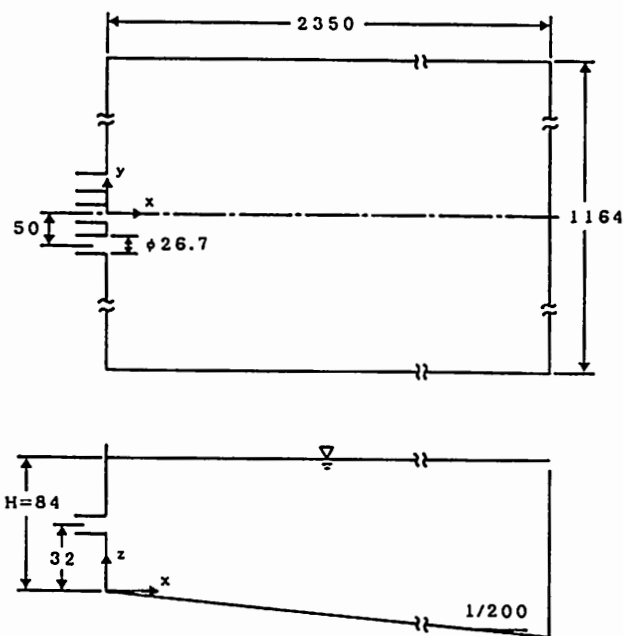


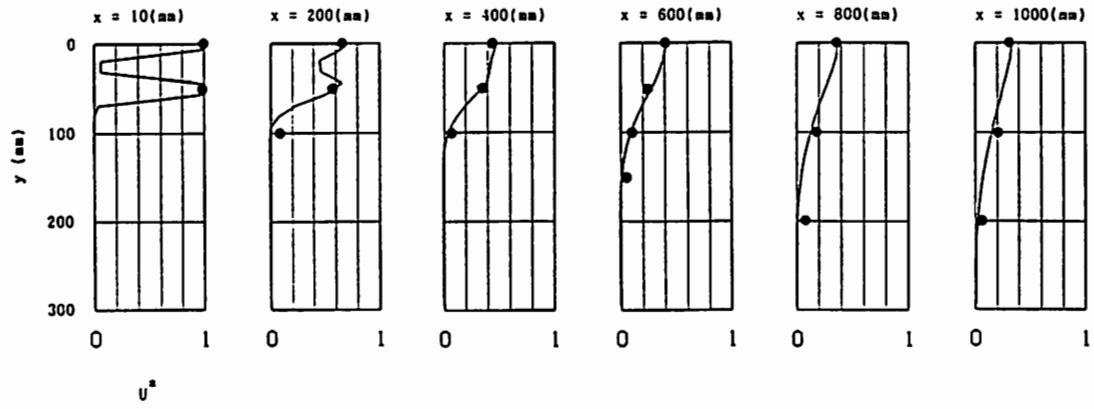
図-4 1/100スケール温排水放流実験装置

ている。このことから、水中放流された温排水の運動量の移流・拡散は、まず鉛直断面内で行なわれ、その後水平方向に進んで行くと考えられる。このような傾向を含めて、数値解析結果は実験結果と良く一致しており、本研究の数値解析手法により水中放流される温排水の流況は適切にシミュレートされると結論づけられよう。

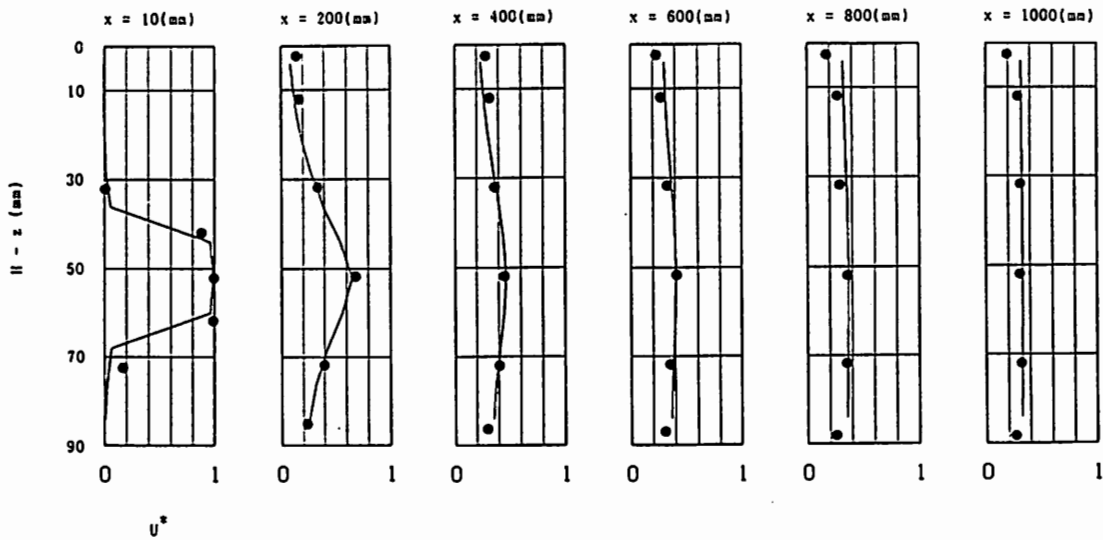
#### (2) 2次元流れ場における局所洗掘現象の数値解析

温排水の水中放流による局所洗掘現象に対する数値解析手法の適用性を詳細に検討するため、等温水を用いた2次元噴流による局所洗掘実験を行い、これを対象とする数値解析を行なった。実験装置は、実験水路(長さ32.5m、幅0.7m、深さ1.0m)と水を循環させるポンプを備えた配管系から構成される。図-6に実験水路の上流域の鉛直断面を示した。図中に示されるように、放水口前面から下流1,340mmまでは砂面上にコンクリートブロックが敷かれており、この区間では局所洗掘現象は生じない。これより下流の領域では、表-2に示した特性を有する砂が14mほど平滑に敷かれており、砂面形状の変形が生ずるものとなっている。放水口における平均流速は約0.9m/sである。実験では、水路幅中央における流下方向の1次元的な砂面形状を、台車に取り付けた砂面測定機により計測した。

局所洗掘により砂面が最も深く掘れた領域はコンクリートブロックの下流側であり、砂面形状は水路側壁面近傍を除いて水路幅方向に大きな変化はなかった。このため、数値解析は水路の上流域のみを対象にして、鉛直2次元平面上で行なった。図-7は、計算によって得られた流速ベクトルと浮遊砂濃度の等濃度線、そして実験および数値解析で得られた砂面形状を示すものである。



(a) 水平方向の分布:  $z = 32(\text{mm})$  (● 実験結果, — 数値解析結果)



(b) 鉛直方向の分布:  $y = 0(\text{mm})$  (● 実験結果, — 数値解析結果)

図-5 流速分布

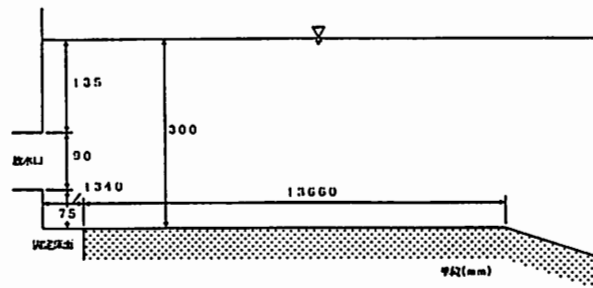
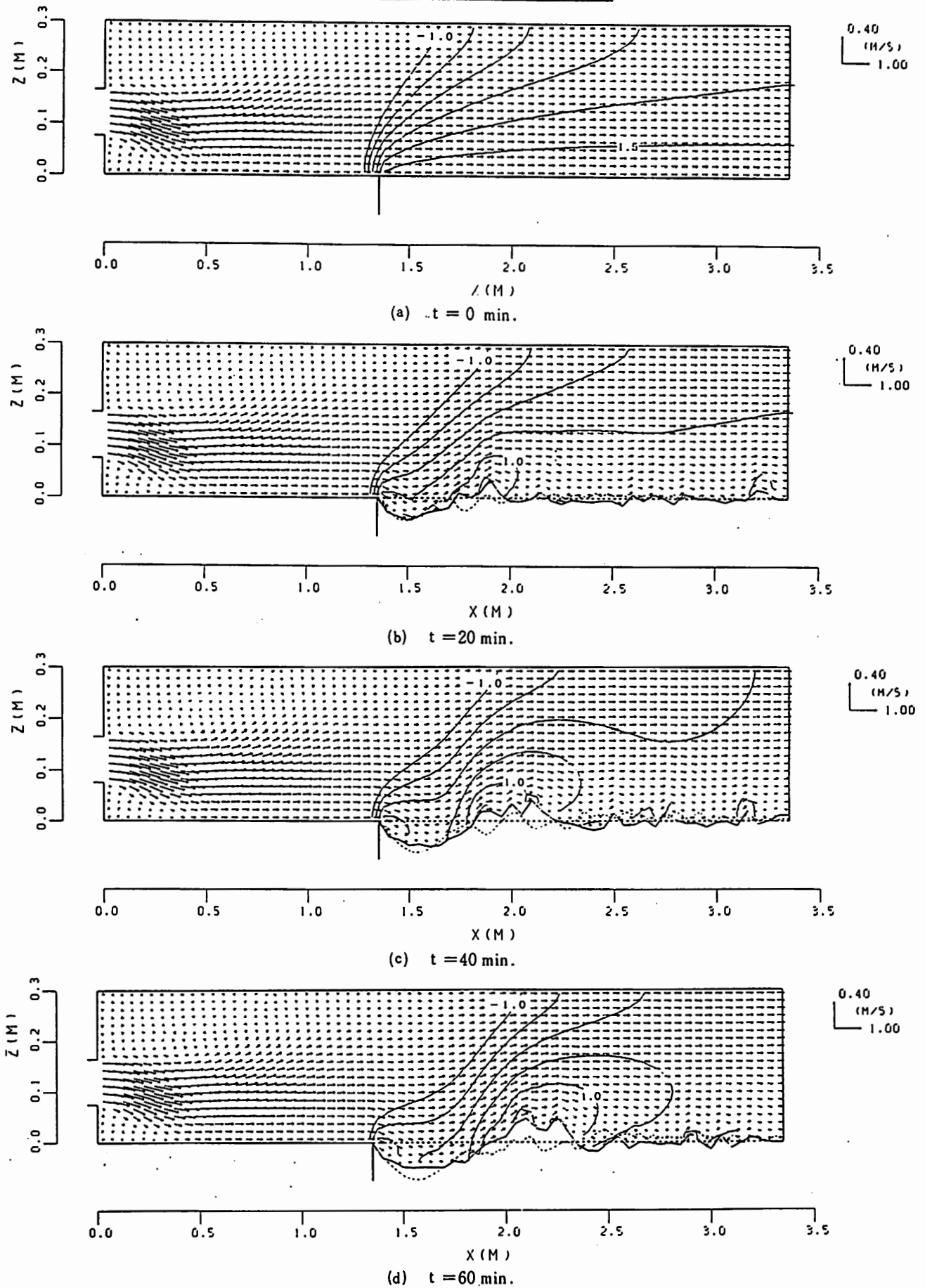


図-6 2次元流れ場における局所洗掘実験水路の概要

このうち、等濃度線は濃度（単位：ppm）の対数値に対して描かれており、図中の数値は  $\log_{10}C$  の値に相当する。また図中の細かい破線が実験により計測された砂面形状、実線が解析により得られた砂面形状で、太い破線は初期の水平な砂面形状に相当する。図-7(a)に示されるように、放水口から噴出した流れは下方へ向かって進み、固定床に沿う壁面噴流となった後、鉛直方向へ拡散してゆく傾向がみられる。時間の経過とともに、コンク

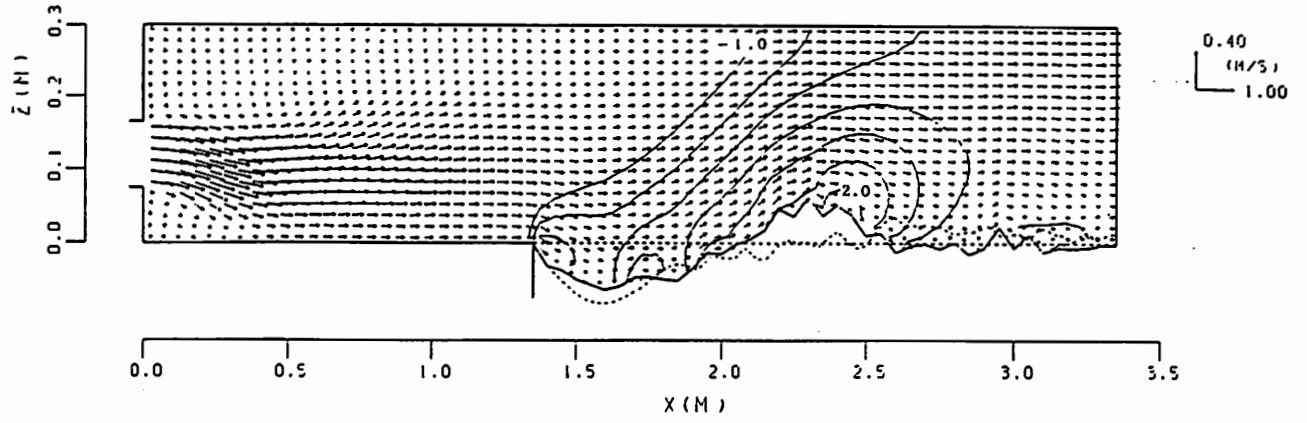
リートブロックのすぐ後方の砂面上で洗掘が進み、より下流側では洗掘された砂の一部が堆積し、残りの砂は計算領域外へ運ばれる。実験開始後4時間までの各時刻の洗掘形状は、解析結果とほぼ一致しているとみられる。なお、数値解析では、掃流砂量が全移動砂量の90%以上を占めており、ここで対象とした局所洗掘現象においては、砂の輸送形態として掃流移動が支配的であることが示唆される。



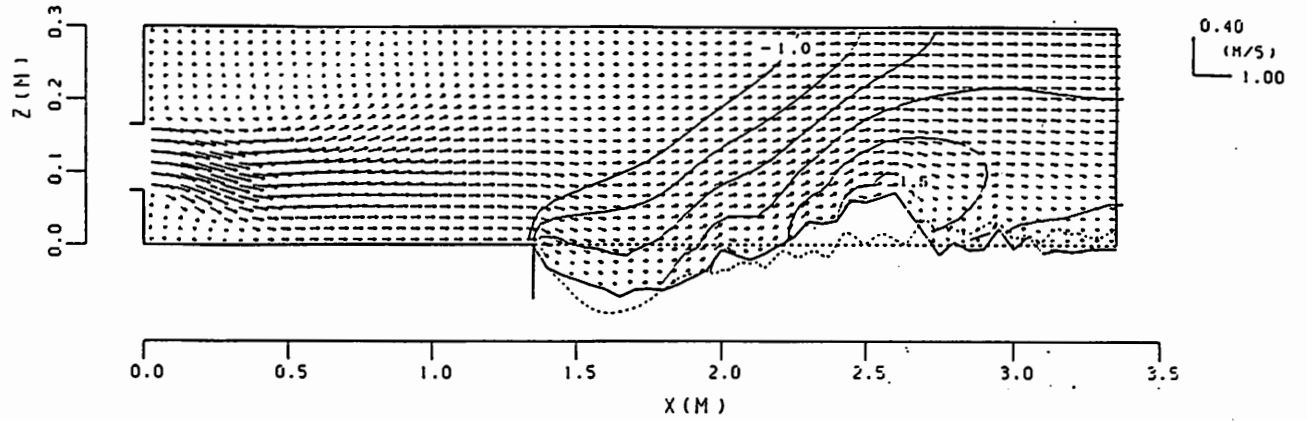
(... 砂面形状の計測結果, — 砂面形状の解析結果, 流速ベクトルと等浮遊砂濃度線は解析により得られたもの)

図-7-1 2次元流れ場における局所洗掘

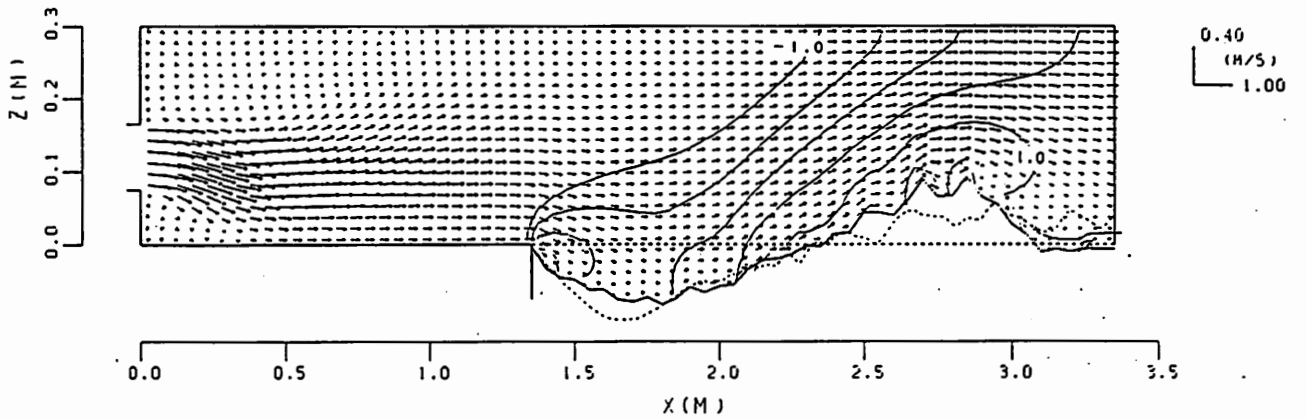
温排水の水中放流による局所洗掘現象の数値シミュレーション



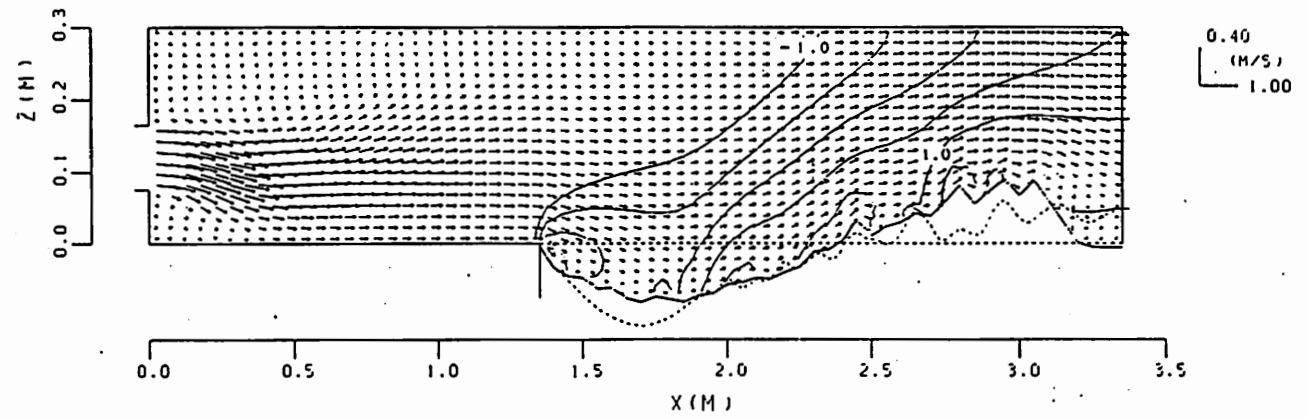
(e)  $t = 90 \text{ min.}$



(f)  $t = 120 \text{ min.}$



(g)  $t = 180 \text{ min.}$



(h)  $t = 240 \text{ min.}$

(... 砂面形状の計測結果, — 砂面形状の解析結果, 流速ベクトルと等浮遊砂濃度線は解析により得られたもの)

図-7-2 2次元流れ場における局所洗掘



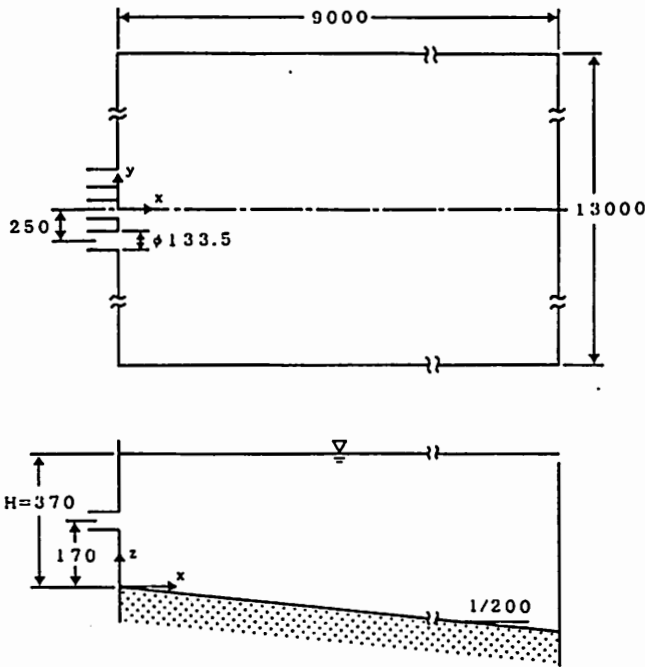


図-8 3次元流れ場における局所洗掘実験模型

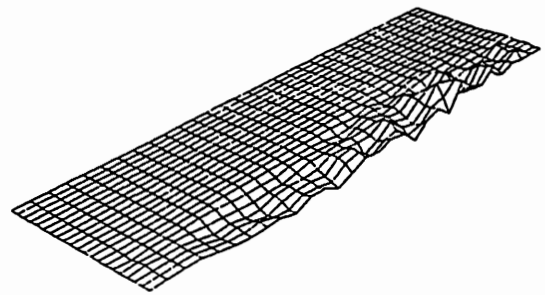
(3) 3次元流れ場における局所洗掘現象の数値解析

発電所から放流される温排水の挙動は、実際には3次元のなものである。洗掘された海底面の砂面形状は一般的には2次元のなものである。このような実現に近い状況を再現するために、図-8に概略的に示したx地点の約1/20スケールの縮小模型を用いて、局所洗掘実験を行った。実験装置底面には表-2に示したような特性を有するほぼ一様粒径の砂が約1/200の勾配で敷かれており、砂面は上流端に設置してある3つの放水口から噴出する等温水により局所的に洗掘される。3個の放流水口からの総流量は、 $4.66 \times 10^{-2} \text{ m}^3/\text{s}$ である。洗掘された砂面形状は、測量用の機器により計測された。

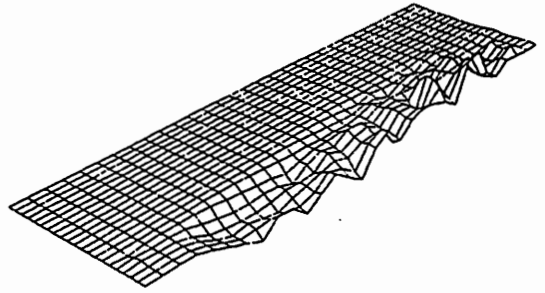
図-9は、数値解析によって得られた砂面形状の鳥瞰図である。図中には実験開始より、10、20、30分後の形状が示されており、時間の経過とともに進行する局所洗掘の状況が2次元的に示されている。図-10は、実験開始から30分後における、実験および数値解析で得られた砂面の等高線を示すものである。これらの結果のうち、実験で得られた等高線の分布は、砂面形状の概略を示すもので砂面の細かい起伏は描かれていない。実験結果と数値解析結果を比較すると、最も深く洗掘された点の位置などにやや相違があるが、最大洗掘深はほぼ一致しており、おおよその砂面形状はここでの数値解析手法により満足に予測されていると考えられる。図-11に次式で定義される、数値解析結果から算出された掃流砂量 $Q_B$ と浮遊砂量 $Q_s$ の等高線の分布を示した。

$$Q_B = (q_{Bx}^2 + q_{By}^2)^{1/2} \dots\dots\dots(31)$$

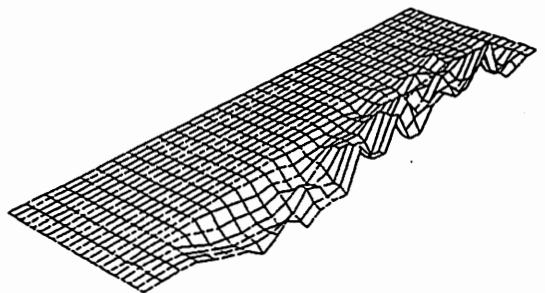
$$Q_s = (q_{sx}^2 + q_{sy}^2)^{1/2} \dots\dots\dots(32)$$



(a) t = 10 min.



(b) t = 20 min.



(c) t = 30 min.

図-9 数値解析により得られた砂面形状

$Q_B$ および $Q_s$ は、洗掘深さが最大である点よりも下流側で大きな値となっており、実験開始後30分においてはなお局所洗掘現象が進行していることを示している。また、 $Q_B$ と $Q_s$ の分布形状は良く似たものとなっているが、 $Q_s$ の値は $Q_B$ の約1/10程度であり、数値解析結果では掃流砂量が全移動砂量の大部分を占めている。

4. おわりに

本研究では、温排水の水中放流により生ずる海底の砂面の局所洗掘現象を予測する解析手法を開発した。この解析手法は、乱流拡散係数などに対する浮力効果を考慮した2方程式乱流モデルを用いて温排水の移流拡散過程の計算を行い、この計算から得られた温排水の掃流力に基づいて、底面の砂の移動量を求める。砂の移動形態としては、掃流移動と浮遊移動を考慮し、掃流砂量に関しては既往の掃流量式を用いてその値を計算する。また、

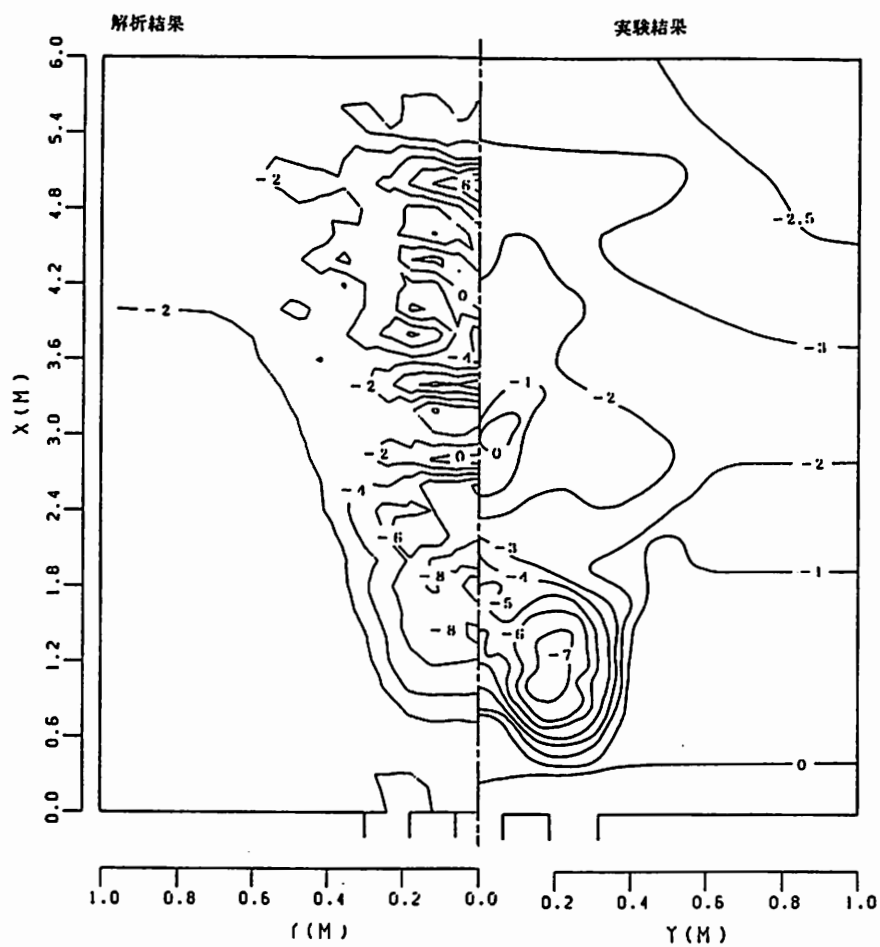
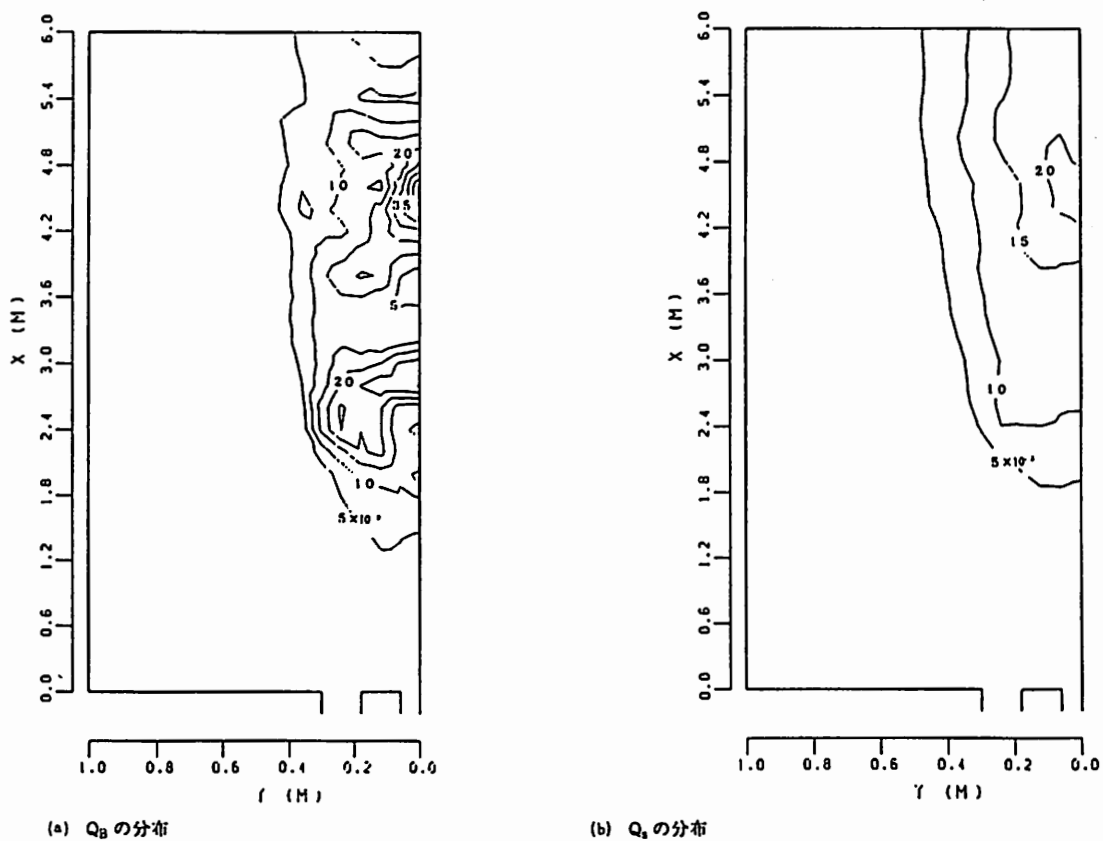


図-10 砂面の等高線図



(a)  $Q_B$  の分布

(b)  $Q_s$  の分布

図-11 掃流砂量と浮遊砂量

浮遊砂量は、浮遊砂の濃度の輸送方程式を解き、計算で得られた濃度と流速の積で表される濃度フラックスを鉛直方向に積分することにより求める。このような掃流砂量と浮遊砂量から構成される総移動砂量と砂に対する連続式から砂面の高さが決定される。本解析手法による計算では、このような砂面の変形の過程と温排水の移流拡散の過程の相互作用が考慮されており、時間の経過とともに両過程は互いに影響を及ぼし合いながら進行してゆく。水理実験結果との比較から、本研究で開発した局所洗掘現象の予測手法の適用性を検討した結果、以下のよう  
な結果が得られた。

- ① 温排水の移流拡散過程に対する解析手法の適用性を検討するため、固定床上で得られた3次元温排水放流実験の数値解析を行った。その結果、温排水の流速分布は鉛直断面内で比較的早く拡散し、その後横断方向に拡散してゆくという解析結果が得られた。この傾向は実験結果と良く一致した。
- ② 放流水による砂面の変形過程に関する解析手法の適用性を検討するため、等温水を用いて行われた2次元流れ場における局所洗掘実験の数値解析を行った。数値解析では鉛直2次元平面を計算領域とし、実験開始から4時間後までの砂面形状や流速分布等に関する実験結果との比較検討を行った。局所洗掘が最も顕著に進行するコンクリートブロックの下流側の領域では、数値解析により得られた各時刻の砂面形状は実験結果と良く一致した。
- ③ 3次元的な流れ場の下にある2次元的な砂面の局所洗掘現象に対する解析手法の適用性を検討した。解析対象とした局所洗掘実験では、放水口前面で局所洗掘が生じ、下流側では移動した砂が一部堆積する。解析結果と実験結果を比較すると、最大洗掘深の発生場所が解析結果ではやや下流側かつ中心側に現れる傾向があったが、最大洗掘深さについては両者はほぼ一致した。また、掃流砂量と浮遊砂量の分布形状は両者で似た形となっているが、その値は前者が1オーダー程度大きく、掃流移動による砂の移動が支配的であるという傾向が数値解析により示された。

以上の結果から、本研究で開発した局所洗掘現象の予測手法の適用性は概ね良好であると考えられる。なお、今後の課題としては、本予測手法の現地への適用性を検討するため、実測データとの比較検討を行うことが考えられる。

#### 謝 辞

本研究を行うにあたり、局所洗掘実験等で御協力頂き、実験結果を提供して頂きました東北電力(株)電力技術研究所の佐々木明氏と東北電力(株)土木部の瀧澤靖彦氏に

謝意を表します。また、(株)DCC田口富貴子さんと中園有子さんには数値計算で御協力頂きました。

#### 参 考 文 献

- 1) Rouse, H. (1940). "Criteria for similarity in the transportation of sediment." Proc. Hydr. Conf., Univ. of Iowa, Bull. 20, 33-49.
- 2) Doddiah, D., Albertson, M. L. and Thomas, R. (1953) "Scour from jets." Proc. Minnesota Int. Hydr. Conv., IAHR, 161-169.
- 3) Iwagaki, Y., Smith, G. L. and Albertson, M. L. (1958) "Analytical study of the mechanics of scour for three-dimensional jet." Colorado State Univ. Research Foundation, Presented at ASCE Hydr. Conf.
- 4) Duckstein, L., Iwagaki, Y. and Albertson, M. L. (1960), "Analytical study of the mechanics of scour for two dimensional jet." Prepared for US Bureau of Public Roads under Contract CPR11 5504.
- 5) Laursen, E. M. (1952). "Observations on the nature of scour." Proc. 5th. Hydr. Conf., State Univ. of Iowa, Bull. 34, 179-197.
- 6) Marion, R. C. (1966). "Similarity laws for localized scour." J. Hydr. Div. Proc. ASCE, Vol.92, No. HY 3, May, 13-36.
- 7) Saito, T. (1979). "Studies on the scour from submerged plane jet." Proc. JSCE No.282, 53-63.
- 8) 和田明・片野尚明・荒木洋：3次元数値モデルによる排水ブルームの挙動解析—単一放流管の場合—，電力中央研究所報告，研究報告：378031，1982。
- 9) 和田明・荒木洋：冷却水放水口近傍での高温領域拡散予測手法の開発，電力中央研究所報告，研究報告：385034，1986。
- 10) 牛島省・守屋祥一：2方程式乱流モデルの成層流への適用性，電力中央研究所報告，研究報告：U87070，1988。
- 11) Launder, B. E. (1975). "On the effects of a gravitational field on the turbulent transport of heat and momentum." J. Fluid Mech., Vol.67.
- 12) 牛島省：温度成層化現象に対するブシネスク近似を用いない乱流モデルの提案，電力中央研究所報告，研究報告：U89037，1989。
- 13) Roache, P. J. (1976). "Computational fluid dynamics." Hermosa Publishers Inc.
- 14) Young, D. (1954). "Iterative methods for solving partial difference equations of elliptic type." Trans. American Mathematical Society, Vol.76, 92-111.
- 15) Douglas, J. (1962). "Alternating direction methods for

- three spacevariables." Numerische Mathematik, Vol.4, 41-63.
- 16) 日本物理学会編：スーパーコンピュータ，培風館 1988。
- 17) 榎木亨：漂砂と海岸侵食，防災シリーズ3，森北出版，1983。
- 18) 岩佐義朗：水理学，朝倉書店，1980。
- 19) White, S. J. (1970). "Plane bed thresholds of fine grained sediments" Nature, Vol.228, Oct.
- 20) DuBoys, P. (1879). Ann. ponts et chaussees, ser.5. 18.
- 21) Meyer-Peter, E. and Muller, R. (1948). "Formulas for bed-load transportation." Proc. of the 2nd Cong. of the IAHR, Stockholm.
- 22) Einstein, H. A. (1950). "The bed load function for sediment transportation in open channel flow." U. S. Dept. of Agric. Soil Consev. Serv., Tech. Bull., No.1026.
- 23) Bagnold, R. A. (1957). "The flow of cohesionless grains in fluids." Philosophical Trans. Royal Soci. of London, Vol.249. Research Foundation, Presented at ASCE Hydr. Conf.
- 24) Shinohara, K. and Tsubaki, T. (1959). "On the characteristic of sand waves formed upon the beds of the open channel & rivers." Report of Research Institute for Applied Mechanics, Kyushu Univ., Vol.VII, No.25.
- 25) 佐藤清一・吉川秀夫・芦田和男：河床砂れきの掃流運搬に関する研究(1)，建設省土木研究所報告，第98号，1957。
- 26) 芦田和男・道上正規：移動床流れの抵抗と掃流砂量に関する基礎的研究，土木学会論文報告集，第206号，1972. 10.
- 27) Ashida, K, Takahashi, T. and Mizuyama, T. (1978). "Study on bed load equations for mountain streams." J. of the Japan Society of Erosion Control Eng., Vol.107, 9-17.
- 28) Shields, A. (1936). "Anwendung des Ahnlichkeitsmechanik und Turbulenzforschung auf die Geshiebebewegung, Mitteilungen der Preussischen Versuchsanstalt für Wasserbau und Schiffbau" Berlin, Heft.26
- 29) 栗原道徳：限界掃流力について，九大流体工学研究所報告，4巻3，1948。
- 30) 岩垣雄一：限界掃流力の流体力学的研究，土木学会論文集，第41号，1956。
- 31) Lane, E. W. and Kalinske, A. A. (1941). "Engineering calculation of suspended sediment." Trans. A. G. U., Vol.22.
- 32) 芦田和男・高橋保・水山高久：山地河川の掃流砂量に関する研究・新砂防，107，1978。
- 33) Rubey, W. W. (1933). "Settling velocities of gravel, sand and silt particles." Amer. Jour. Sci., Vol.25, 325-338.

