

温排水の水中放流による局所洗掘現象の数値解析

Prediction of Local Scour Caused by Warmed Cooling-Water Jets

牛島 省*、清水 隆夫**、佐々木 明***、瀧澤 靖彦****

By Satoru USHIJIMA, Takao SHIMIZU, Akira SASAKI and Yasuhiko TAKIZAWA

This paper describes an investigation on a numerical prediction method to estimate local scour due to the cooling-water jets discharged from power stations. The method presented simulates the unsteady convection and diffusion processes of the warmed jets with a two-equation turbulence model within the calculation area being deformed by the local scour. The profile of the scoured sand bed is predicted by computing the amount of both the bed load and the suspended load in parallel with the simulation of the flow itself. The prediction method was applied to the experiments and its validity was reasonably confirmed.

Keywords : numerical prediction, local scour, warmed cooling water, turbulence model

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が及ぼされる可能性がある。このため、放流施設等の構造物の安定性を評価したり、洗掘に対する防護対策を考えたりする上で、局所洗掘現象による海底面の洗掘深さや洗掘される範囲などをあらかじめ予測しておくことが重要である。

噴流によって生ずる局所洗掘現象に関しては、これまでに実験的・理論的な研究が数多く行なわれてきており^{1)~7)}、また近年は砂面変形に関する数値解析的な検討も進められている^{8)~10)}。しかしながら、従来の研究結果のみから発電施設現場の局所洗掘現象を予測することは容易でないと思われたため、電中研では温排水の移流拡散と砂面の変形を同時に数値解析する手法の検討を行なった。

* 正会員 工博 (財)電力中央研究所 我孫子研究所 FBR部

(〒270-11 千葉県我孫子市我孫子1646)

** 正会員 工修 (財)電力中央研究所 本部企画部 計画課

(〒100 東京都千代田区大手町1-6-1 大手町ビル7階)

*** 正会員 東北電力(株)電力技術研究所

(〒981 宮城県仙台市青葉区中山7-2-1)

**** 東北電力(株)土木部

(〒981 宮城県仙台市一番町3-7-1)

2. 局所洗掘現象の解析手法

2.1 温排水の移流拡散の解析方法

発電施設から海へ放出される温排水の移流拡散を計算するための解析モデルに関しては、これまで多くの研究が行われている¹¹⁻¹⁵⁾。本研究で用いるのは、乱流拡散係数等に対する浮力の効果を考慮した2方程式乱流モデルであり¹⁶⁾、基礎方程式系は以下のように表される。

$$\frac{\partial U_i}{\partial x_i} = 0 \quad \text{---(1)}, \quad \frac{\partial \theta}{\partial t} + U_i \frac{\partial \theta}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\alpha \frac{\partial \theta}{\partial x_i} - \overline{u_i \theta} \right) \quad \text{---(2)}$$

$$\frac{\partial U_i}{\partial t} + U_j \frac{\partial U_i}{\partial x_j} = -[1 - \beta(\theta - \theta_s)] \delta_{ij} g - \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\nu \frac{\partial U_i}{\partial x_j} - \overline{u_i u_j} \right) \quad \text{---(3)}$$

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

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + U_j \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} = C_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon}{k} \left(-\overline{u_i u_j} \frac{\partial U_i}{\partial x_j} \right) + C_{\varepsilon 2} \frac{\varepsilon^2}{k} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\nu + C_{\varepsilon} \frac{k^2}{\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] \quad \text{---(5)}$$

これらの方程式中で、 t ：時間、 x_i ： i 座標であり、 x_1 ：水平・流下方向、 x_2 ：水平・横断方向、 x_3 ：鉛直上方向に向かう座標成分である。また、本報中では、 x_1, x_2, x_3 は、それぞれ x, y, z とも表示される。さらに、 U_i ：平均流速の i 成分、 u_i ：変動流速の i 成分、 θ ：温度の平均成分、 θ ：温度の変動成分、 θ_s ：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_{ij} ：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スに対して、3次元成分の和をとるという規約が用いられている。上式中のレイノルズ応力、乱流熱フラックスは、ブシネスクの仮説により与えられる。また、(4)、(5)式中で、 $C_k, C_{\varepsilon}, C_{\varepsilon 1}$ および $C_{\varepsilon 2}$ は、モデル係数である ($C_k=0.09, C_{\varepsilon}=0.075, C_{\varepsilon 1}=1.44, C_{\varepsilon 2}=1.90$)。渦動粘性係数 (ε_m) と渦動熱拡散係数 (ε_H) は、成層流実験の結果¹⁶⁾に基づき、それぞれ以下のように表されるものとした。

$$\varepsilon_m = C_v \frac{1}{1+0.2B_L} \frac{k^2}{\varepsilon} \quad \text{---(6)}, \quad \varepsilon_H = \frac{1.6}{1+0.24B_L} \varepsilon_m \quad \text{---(7)}, \quad B_L = \beta g \left(\frac{k}{\varepsilon} \right)^2 \frac{\partial \theta}{\partial z} \quad \text{---(8)}$$

ここで C_v は係数(0.09)であり、 B_L はLaunder¹⁷⁾により提案された成層度の強弱を表すパラメータである。 $B_L < 0$ となる場合では、(6)、(7)式で $B_L = 0$ とした形の関係式を用いる。なお、後述するように流れの中には浮遊砂が含まれる場合があるが、流れに対する浮遊砂の影響はここでは考慮していない。

数値解析は有限差分法(FDM)に基づく。運動方程式は、時間的にはセミ・インプリシット法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、収束性の良い前処理付きの双対共役勾配法(MILUBCG法)を用いた。

2.2 洗掘される砂面形状の解析方法

砂の移動形態としては、掃流移動と浮遊移動を考える。

(a) 掃流砂量の算出式

掃流砂量式に関しては、多くのものが提案されている。局所洗掘が生ずる際には複雑な砂面形状が現れるが、ここでは芦田¹⁸⁾が平坦な河床を対象として提案した次式を用いることとした。

$$\frac{q_{sx}}{(s g d^3)^{1/2}} = 12 \tau_*^{3/2} (1 - 0.85 \frac{\tau_{*c}}{\tau_*}) (1 - 0.92 \frac{u_{*c}}{u_*}) \quad \text{---(9)}$$

ここに σ は砂の密度、 d は砂の平均粒径である ($\sigma=2.65 \text{ g/cm}^3, d=0.2 \text{ mm}$)。 q_{sx} 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り、 s は $\sigma/\rho - 1$ で与えられる。また、 τ_* ($=u_*^2/s g d$) および τ_{*c} ($=u_{*c}^2/s g d$) 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る。限界掃流力は、岩

垣公式による限界まさつ速度 u_{*c} を用いて求められた。まさつ速度 u_* に関しては、これまでに多くの詳細な検討がなされているが、ここでは簡単に $1/7$ 乗則を参考とした次式により与えられるものとした。

$$\frac{U_s}{u_*} = A_1 \left(\frac{z_B}{k_s} \right)^{1/7} \quad \text{---(10)}$$

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 の値 (0.2) はパラメータサーベイにより決定された。以上の諸関係式より掃流砂量 q_{sx} が求められる。これらと同様にして、 y 方向のまさつ速度 v_* から y 方向の掃流砂量 q_{sy} も計算される。

(b) 浮遊砂量の算出式

浮遊砂濃度の輸送過程は、次式で表わされる¹⁹⁾。

$$\frac{\partial C}{\partial t} + (U_j - w_0 \delta_{3j}) \frac{\partial C}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\lambda + \varepsilon_s) \frac{\partial C}{\partial x_j} \right] \quad \text{---(11)}$$

ここで、 C ：濃度の平均成分、 w_0 ：砂の沈降速度、 λ ：濃度の分子拡散係数である。上式中の乱流拡散係数 ε_s は乱流シュミット数 S_t を用いて、 $\varepsilon_s = \varepsilon_m / S_t$ で与えられる。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、ここでは定数 (1.0) とした。浮遊砂の平均濃度の輸送方程式は、流体の基礎方程式と同様に差分化して、それらと同時に解かれる。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。

$$q_{sx} = \int_0^h \frac{U C}{\sigma} dz \quad \text{---(12)}$$

これと同様にして、 y 方向の浮遊砂量のフラックス q_{sy} も計算される。(12) 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 を与えるが、このために本研究では、Lane & Kalinske²⁰⁾ モデルを用いた。このモデルでは、 C_0 (単位: ppm) は次式で与えられる。

$$C_0 = 5.55 \Delta F (w_0) \left[\frac{1}{2} \frac{u_*}{w_0} \exp(-w_0^2 / u_*^2) \right]^{1.61} \quad \text{---(13)}$$

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: ここでは 100) である。

(c) 砂面近傍の境界条件

流体の計算に用いる諸変数のうち、各流速成分は計算セルの各面上で定義され、圧力 P_{ijk} はセルの中心で定義される。圧力以外のスカラー量も圧力と同じ位置に定義される。図 1 は、 xy 平面上における砂面の高さ B と、 x および y 方向の総移動砂量 q_x 、 q_y の定義位置を示すものである。 q_x と q_y は、それぞれ同方向の掃流砂量 q_{sx} 、 q_{sy} と浮遊砂量 q_{sx} 、 q_{sy} の和として表される ($q_i = q_{si} + q_{si}$)。図中で、実線で描かれた部分が、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 γ 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¹⁹⁾。

$$(1 - \gamma) \frac{\partial B}{\partial t} = \frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} \quad \text{---(14)}$$

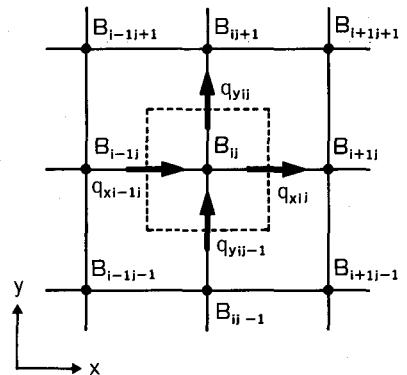


図1 B 、 q_x および q_y の定義位置

本研究では γ の値は 0.4 とした。また、砂面を含む流体計算のコントロールボリューム内では、流体の連続式に対してボラスボディモデルを用いて、流体の連続性に対する砂面変形の影響を考慮した。なお、砂面

近傍では液体に対する摩擦抵抗を本来考慮すべきであるが、後述する2次元局所洗掘実験結果との比較では、フリースリップ条件下で流速分布が良く一致したことから、同条件を採用している。

(d) 流体と砂面形状の計算方法

上記の砂面の変形の計算は、2.1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、両過程の時間スケールが著しく異なるので多大な計算時間が必要となり、実用上好ましくない。このため、次のような計算方法をとることとした。①STEP-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 Δt_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。②STEP-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 Δt_s に関しては、 $\Delta t_s \gg \Delta t_F$ 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 $B^{ns}_{i,j}$ が、STEP-2の計算を始める前の砂面高さ $B^o_{i,j}$ および水深 $H^o_{i,j}$ と比較して、 $\max_{i,j} \{|B^{ns}_{i,j} - B^o_{i,j}| / H^o_{i,j}\} \geq \varepsilon_1$ なる関係が初めて成立した時にSTEP-2の計算が終了する。 ε_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形状の変形過程の計算を進めてゆく。

3. 解析手法の適用性

3.1 2次元流れ場における局所洗掘現象の数値解析

等温水を用いた2次元噴流による局所洗掘実験を行い、これに対する数値解析を行なった。図2に実験水路（長さ32.5m、幅0.7m、深さ1.0m）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1340mm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、砂が14mmほど平滑に敷かれており、砂面形状の変

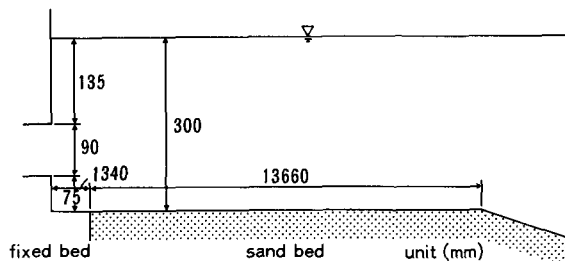


図2 実験水路の上流部分

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($\Delta x=50\text{mm}$, $\Delta z=15\text{mm}$, $\Delta t_F=0.015\text{s}$, $\Delta t_s=6\text{s}$)。図3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。このうち、等濃度線の数値は $\log_{10}C$ の値に相当する(C の単位はppm)。図3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、計算領域の下流端では、浮遊砂濃度と掃流砂量の流下方向の勾配に対して、 $\partial C / \partial x = 0$ および $\partial^2 q_b / \partial x^2 = 0$ なる条件を用いている。

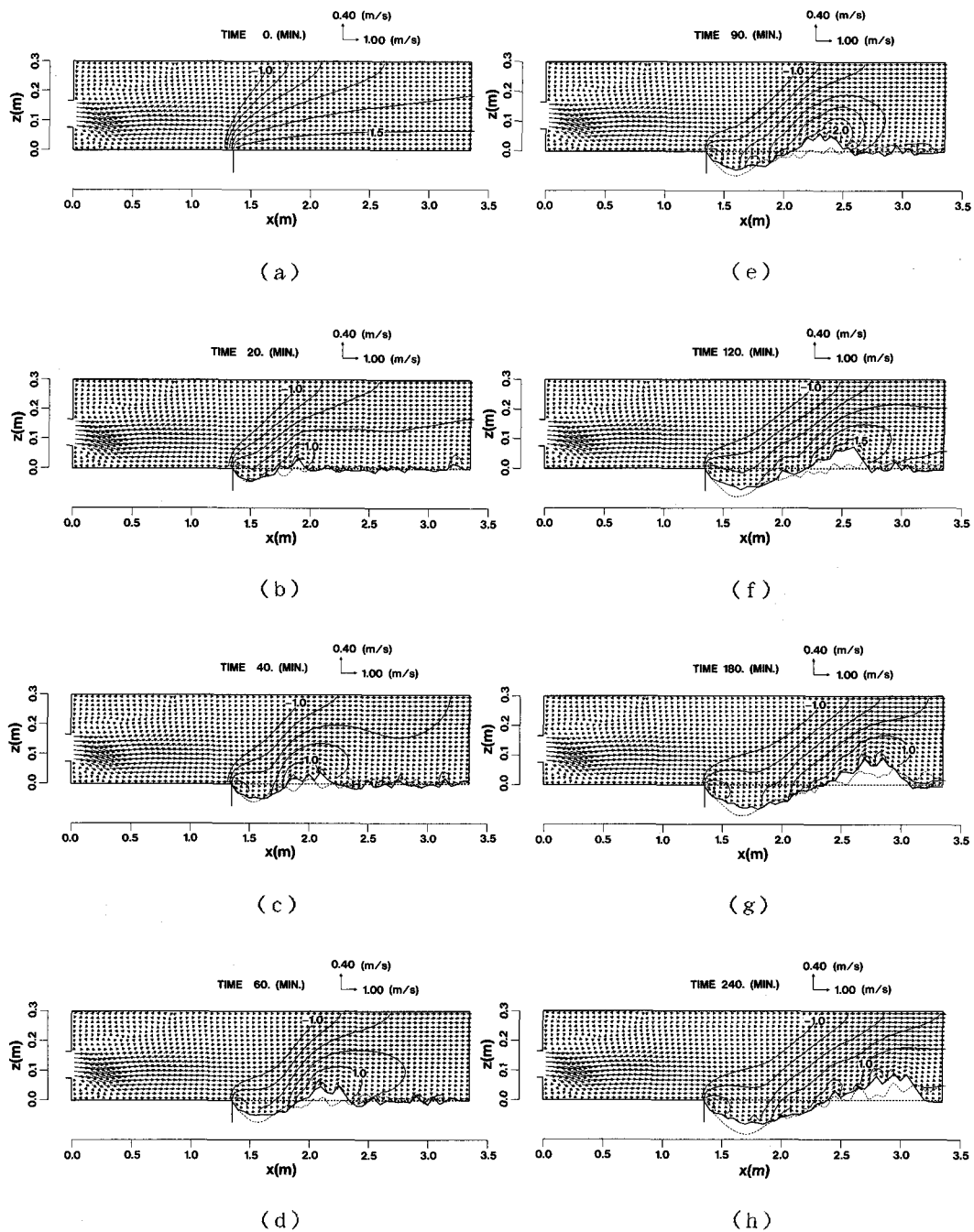


図3 砂面形状、流速ベクトルおよび等濃度線

(砂面形状のうち、実線：解析結果、細い破線：実験結果、太い破線：初期の砂面形状)

3.2 3次元流れ場における局所洗掘現象の数値解析

発電施設から放流される温排水の挙動は、実際には3次元的なものである。洗掘された砂面形状は一般的には2次元的なものとなる。このような実現象に近い状態を再現するために、図4に概略的に示した現地の約1/20スケールの縮小模型を用いて、局所洗掘実験を行なった。3個の放水口から流出する等温水の総流量は、 $4.66 \times 10^{-2} \text{ m}^3/\text{s}$ 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5は、実験開始から30分後における、実験および数値解析($\Delta x=200\text{mm}$, $\Delta y=60\text{mm}$, $\Delta z=20\text{mm}$, $\Delta t_r=0.025\text{s}$, $\Delta t_s=3\text{s}$)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、およそその砂面形状はほぼ満足に予測されていると思われる。次に、放流水の温度が周囲水より7℃高い条件下での局所洗掘現象の計算を行い、等温条件の結果と比較した。図6に見られるように、非等温条件下では洗掘の進行がやや遅く、また砂面の起伏が比較的なだらかであるという計算結果が得られた。

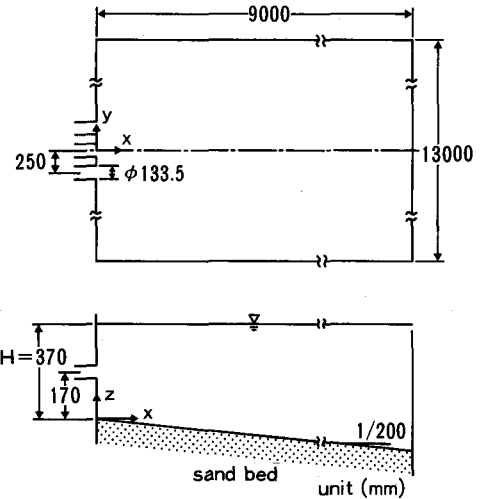


図4 実験装置の概略図

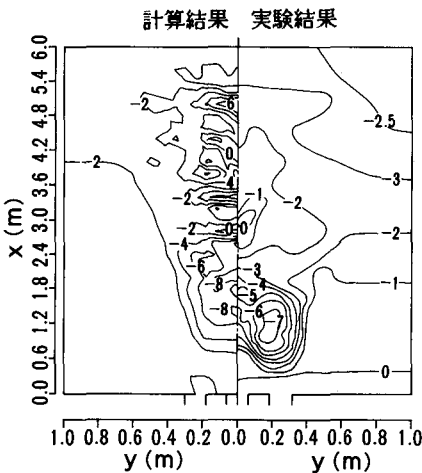


図5 実験・解析で得られた砂面の等高線
(放水開始から30分後、図中の数値は、 z cm)

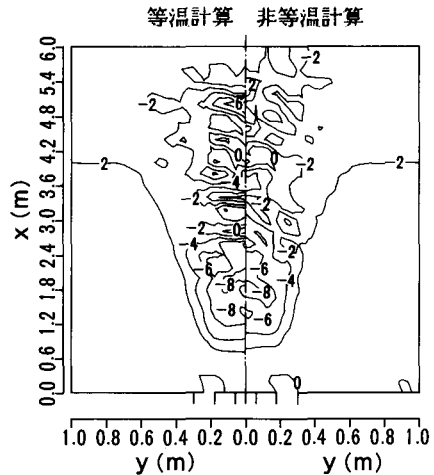


図6 等温・非等温計算で得られた砂面の等高線
(放水開始から30分後、図中の数値は、 z cm)

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数値解析手法の検討を行った。水理実験結果との比較から、数値解析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、砂面近傍の境界条件等の改良や波浪の影響を考慮することなどが考えられる。また、現地の実測データが入手できればそれとの比較検討も行いたい。

《参考文献》

- 1) Rouse, H., Proc. Hydraul. Conf. Univ. of Iowa, Bull. 20, 1940.
- 2) Doddiah, D., Proc. Minnesota Int. Hydraul. Conf., IAHR, 1953.
- 3) 岩垣・土屋・今村, 京大防災年報第8号, 昭40.
- 4) Tsuchiya, Y. & Iwagaki, Y., Proc. 12th Cong. IAHR, 1967.
- 5) 斉藤, 土木学会論文集第282号, 1979.
- 6) Chatterjee, S. S. & Ghosh, S. N., J. Hydraul. Div., Proc. ASCE, Vol. 106, No. HY11, 1980.
- 7) Hassan, N. M. K. N. & Narayanan, R., J. Hydraul. Eng., ASCE, Vol. 111, No. 11, 1985.
- 8) Shimizu, Y. & Itakura, T., J. Hydraul. Eng., Vol. 115, No. 3, 1989.
- 9) 芦田・江頭・劉, 水工学論文集, 1991.
- 10) Akiyama, J., Hong, L. D., and Ura, M., 水工学論文集, 1991.
- 11) 和田・片野・荒木, 電中研研究報告, 1982.
- 12) 和田・荒木, 電中研研究報告, 1986.
- 13) 松井・岩佐・細田, 土木学会年講, 1984.
- 14) 室田・中辻, 水講論文集, 1986.
- 15) 松梨・岡田・黒林, 水講論文集, 1987.
- 16) Ushijima, S. & Moriya, S., Proc. 3rd Int. Symp. on RFMTM, 1988.
- 17) Launder, B. E., J. Fluid Mech., Vol. 67, 1975.
- 18) 芦田・高橋・水山, 新砂防, 107, 1978.
- 19) 岩佐, 水理学, 朝倉書店, 昭55.
- 20) Lane, E. W. & Kalinske, A. A., Trans. AGU, Vol. 22, 1941.