

## 火力発電所放水口内外の流れ場の数値予測と実験による検証

石 大 片      原 山 岡      孟 巧 樹\*

**概要** 本論文は、神戸製鋼所神鋼神戸発電所の海水放水口を設計するために行われた数値シミュレーション及びその水理実験による検証について述べたものである。本論文では複雑な平面形状をもつ放水口内外の三次元流れ場を直交格子及び非構造格子を用いて予測し、水理実験との比較検討を行うことにより数値解析の予測精度及び水理構造物設計への適用の可能性について考察した。多数の導流壁を有する放水口内の流れ場の解析には直交格子の予測精度が不十分であり、非構造格子を用いた解析手法が有効であることが分かった。

**キーワード：**火力発電所放水口，許容放流流速，三次元流れ場，数値解析，非構造格子

### 1. はじめに

発電所施設における水路構造物を設計する場合、水路内部の流れ場を定量的に把握することは重要である。特に水路構造物の平面形状が複雑な場合や水路の設置場所が制約を受ける場合、水路内の流れ場は複雑となり、既存の設計指針が適用しにくいケースが発生する。従来、このような流れ場に関する検討は水理実験により行われてきたが、近年、流体解析技術の進歩及びコンピュータ性能の向上に伴い、これまでに大型計算機を必要とした大規模な数値解析がワークステーションにより行えるようになり、沈砂池内の複雑な流れ<sup>1)</sup>や貯水池内の三次元流れ<sup>2)</sup>の予測に数値シミュレーション技術を適用した例も報告されている。

以上のような背景を踏まえて、本論文では神鋼神戸発電所の海水放水口設計に数値シミュレーション技術を適用し、数値予測の精度及び実際の水路構造物設計への適用の可能性について考察した。本解析の対象となった放水口の平面形状は立地条件の制約から非対称であり、また放水口の出口部には波浪の進入を防ぐためのカーテンウォールが設置されている。更に隣接する岸壁での操船への影響を避けるため、放水口出口での流速を30cm/s以下に低減し放流するという設計条件が設けられている。

本論文ではまず数値シミュレーションに使用された数値モデル及び解析結果を検証するために行った水理実験の概要を説明する。そして数値解析により導流壁なしと導流壁ありの二つの放水口を対象にして数値シミュレーションを行い、水理実験との比較検討により

数値解析の予測精度を評価する。

### 2. 数値モデルの概要

#### 2.1 基礎方程式

本解析では以下のような基礎方程式を用いた。

・連続の式

$$\frac{\partial \rho U_j}{\partial x_j} = 0 \quad (1)$$

・運動量の保存式 (Navier-Stokes方程式)

$$\frac{\partial \rho U_j U_i}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \mu \frac{\partial^2 U_i}{\partial x_j^2} + F_i + \frac{\partial}{\partial x_j} (-\rho \overline{u_i' u_j'}) \quad (2)$$

(i = 1, 2, 3)

・乱流エネルギー-kの方程式

$$\frac{\partial \rho U_j k}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] - \rho \overline{u_i' u_j'} \frac{\partial U_i}{\partial x_j} - \rho \epsilon \quad (3)$$

・乱流エネルギー散逸率εの方程式

$$\frac{\partial \rho U_j \epsilon}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] - C_{\epsilon 1} \frac{\epsilon}{k} \rho \overline{u_i' u_j'} \frac{\partial U_i}{\partial x_j} - C_{\epsilon 2} \frac{\rho \epsilon^2}{k} \quad (4)$$

ここで、 $U_j$ と $u_j'$ はそれぞれ平均と変動流速の各方向成分、 $F_i$ は外力の各方向成分、 $\rho$ は流体の密度、 $p$ は圧力、 $\mu$ は粘性係数である。レイノルズ応力 $-\rho \overline{u_i' u_j'}$ と渦粘性係数 $\mu_t$ は以下のようなモデル式により表される。

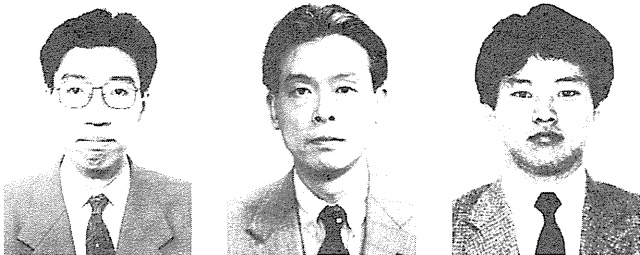
$$-\rho \overline{u_i' u_j'} = \mu_t \left( \frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \rho k \delta_{ij} \quad (5)$$

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\epsilon} \quad (6)$$

式(3), (4), (6)中の定数は表-1に示されている値を用いた。

表-1 乱流モデルの定数値

$C_{\epsilon 1}$	$C_{\epsilon 2}$	$C_\mu$	$\sigma_k$	$\sigma_\epsilon$
1.45	1.92	0.09	1.0	1.3



石原 孟

大山 巧

片岡 秀樹

\* 清水建設株式会社 技術研究所 風工学チーム 研究員 工博  
 \*\* 清水建設株式会社 技術研究所 水工学チーム 主任研究員 工博 会員  
 \*\*\* 神戸製鋼株式会社 鉄鋼カンパニー生産本部 神戸製鋼所発電所建設本部 工事部 課長

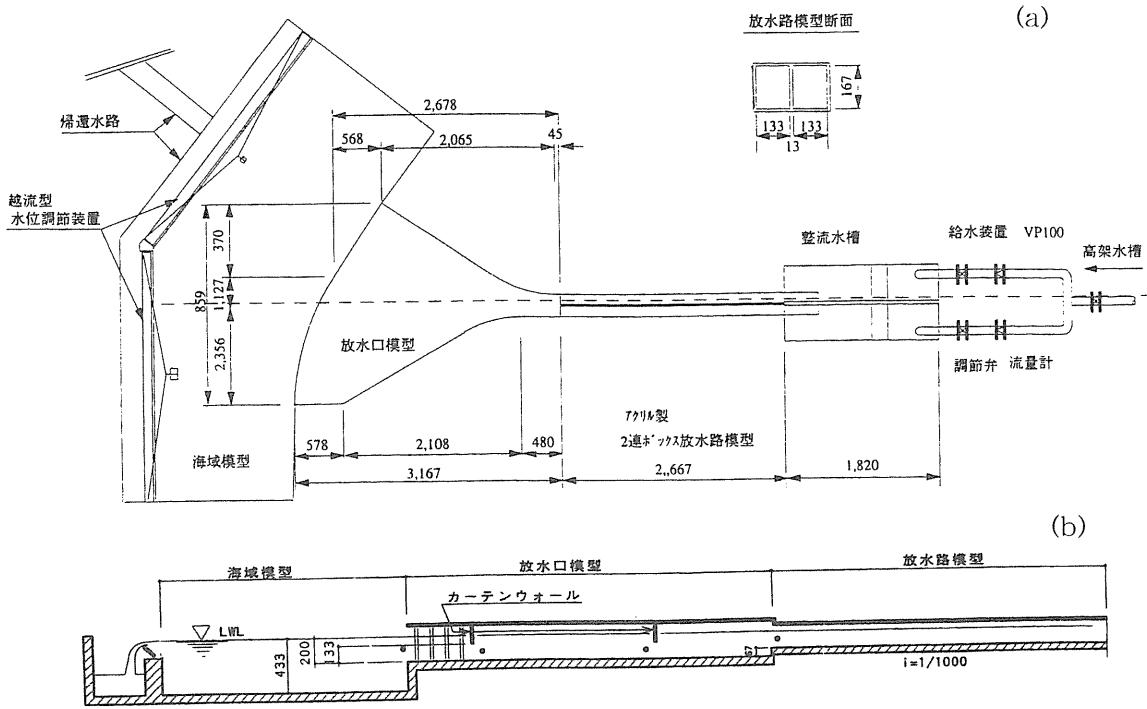


図-1 水理実験模型の平面図と縦断面図

(a) 平面図；(b) 縦断面図

2.2 解析手法と解析条件

本解析は有限体積法により行った。数値解法はPatankarにより提案されたSIMPLE法を用いた。解析では直交格子と非構造格子を用いた。直交格子を用いる場合、放水口内の格子間隔を短くし、計算精度の向上に努めた。解析格子の総数は約50万である。一方、非構造格子を用いる場合は導流壁と群杭を精度よく再現するために約60万の格子を使用した。数値モデルは実験に合わせて1/30の縮尺率で作成した。

境界条件については水面にフリースリップ条件、壁面に対数則を適用した。また放水路の入り口ではべき指数1/7の勾配流及びそれに対応する乱流エネルギーkと乱流エネルギーの散逸率εの分布を与えた。流出口では圧力一定の境界条件を使用した。なお、数値解析から得られた各水理量はすべて実物スケールに変換した。

3. 水理実験の概要

実験は日本工営株式会社中央研究所の水理研究室で行った。実験では実物の1/30の模型を用いた。模型と実物との関係を表-2に示す。また各水理量の縮尺はフルードの相似則により求め、表-3に示した。

図-1には水理実験模型の平面図と縦断面図を示す。放水口上流部に接続する放水路の模型(2連ボックス形式)は実物延長80mとし、放水口出口前面の海域模型は実50m相当の岸沖方向の範囲を再現した。放水口内の水位は海域模型の下端に設けた越流型水位調整装置により制御した。また放水路への給水は独立して行った。

放水口内外の流速分布を調べるために、40以上の測定点を設けた。図-2には主要な流速測定点の位置を示す。放水口出口での測定点(1~16番)は水深3.6m(模型スケールで0.12m)の場所に設置し、放水口内の測定点(17~40番)は水深4m(模型スケールで0.13m)の場所に設置した。流速計測は電磁流速計により行い、水平方向の2つの速度成分を測定した。流速の測定結果は表-3により実物スケールに変換した。

表-2 実物と模型との対比

水理量	実物	模型 (1/30)
放水路の幅と延長	4.0m と 80.0m	0.13m と 2.67m
放水口の幅と延長	80.0m と 95.0m	2.67m と 3.17m
水路内の水深	3.50m	0.12m
放水口内の水深	6.00m	0.20m
最大流量	65.0m <sup>3</sup> /s	13.2l/s
吐口1門の流量	3.4m <sup>3</sup> /s	0.7l/s
放水路内の流速	2.32m/s	42.4cm/s
放水口内の流速	2.32~0.13m/s	42.4~2.4cm/s
放水路内流れのレイノルズ数	8.12E+6	4.94E+4
放水口内流れのレイノルズ数	1.39E+7~	8.47E+4~
	7.8E+5	4.75E+3

表-3 フルードの相似則による諸量の縮尺

長さ	時間	流速	流量
1/30	1/5.477	1/5.477	1/4930

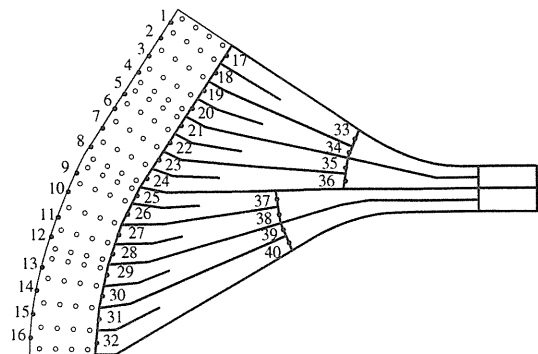


図-2 流速測定位置

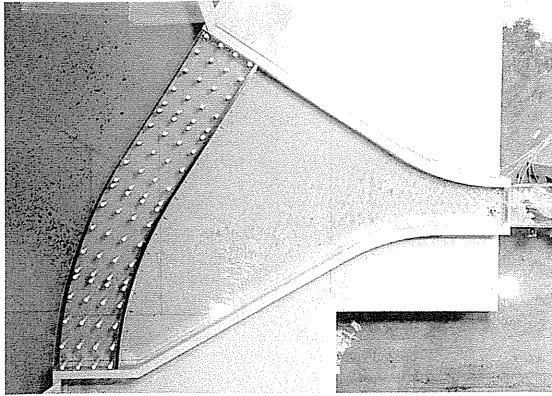


図-3 導流壁を設置しない場合の流況

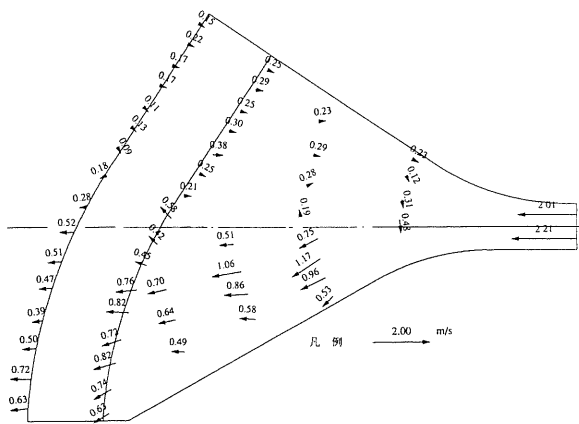


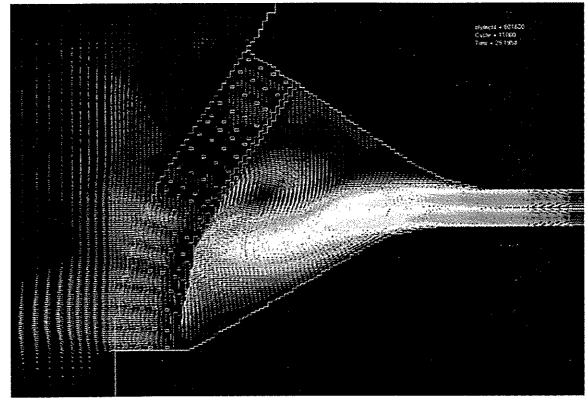
図-4 導流壁を設置しない場合の流速測定結果

#### 4. 数値解析の結果

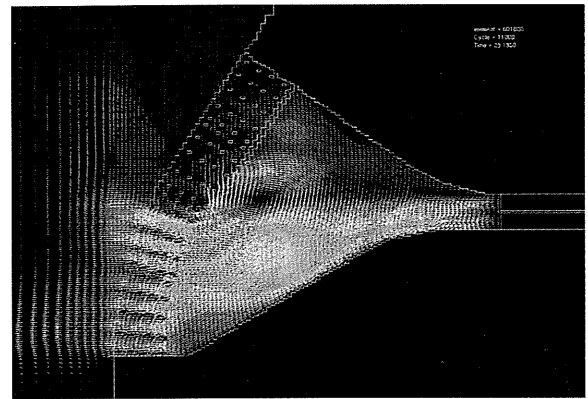
##### 4.1 導流壁を設置しない場合

図-3には導流壁を設置しない場合の流況を示す。左岸側の水面に波の立っている場所が見られ、流れが速くなっていることを伺わせる。図-4には流速の測定結果を示す。この図から分かるように、導流壁を設けない場合には流れが大きく左岸側に偏流し、逆に右岸側に時計回りの大きな循環流が形成されている。その影響で、左岸側の流れが速くなり、反対に右岸側では海域から放水口に向かって逆流していることが分かる。

図-5は流れの解析結果であり、図-5(a)と(b)はそれぞれ水面と水深4mの水平面内における流速のベクトル図を表す。ベクトルの長さは流速の大きさ、矢印は流れの方向を表す。ベクトルの色が赤色に近づくほど流速が速くなることを意味する。全体的に見ると、この二つの水平面における流れのパターンは図-3と図-4の流れのパターンとよく一致している。図-6には解析と実験との比較結果を示す。緑のプロットは実験値、赤い実線は計算結果、図中の数字は測定点番号を表す。放水口出口(図-6(a))では時計回りの循環流の影響で右岸側の速度が20cm/s程度であるのに対して、左岸側の流速は70cm/sに達し、30cm/sの許容放流流速条件を大きく超えている。同様な傾向はカーテンウォールの位置(図-6(b))にも見られる。放水口の内(図-6(c))では時計回りの循環流の影響で右岸側の流速値は50cm/s以下となり、左岸側の流速値は1m/sに近い値となっている。全体的に見ると、数値解析結果は実験値と良好な一致を示している。



(a) 水面



(b) 水深4m

図-5 導流壁を設置しない場合の流れの解析結果

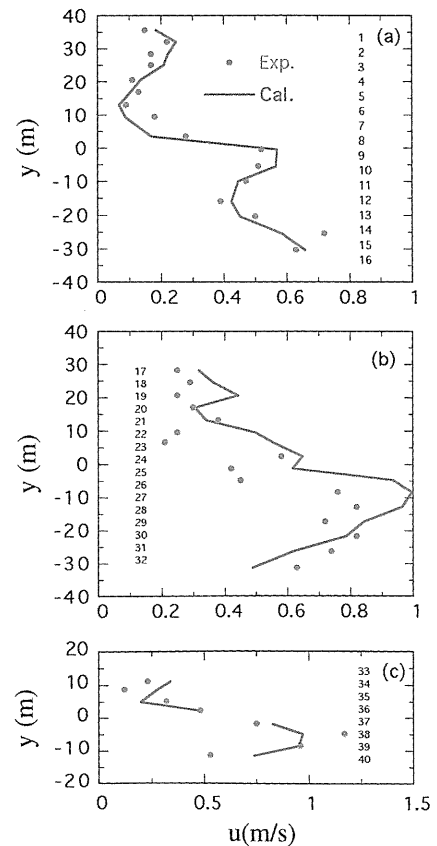


図-6 直交格子を用いた解析と実験との比較(導流壁なし)  
(a) 放水口出口;(b) カーテンウォール部;  
(c) 放水口内部

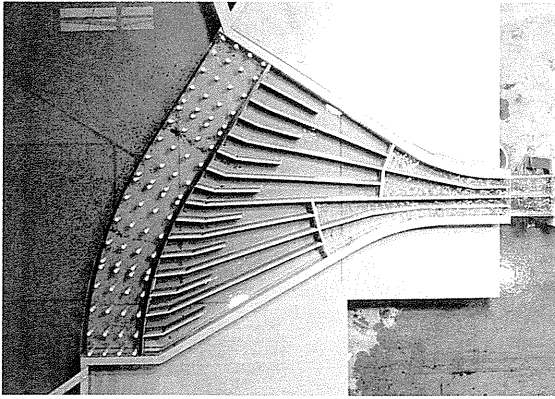
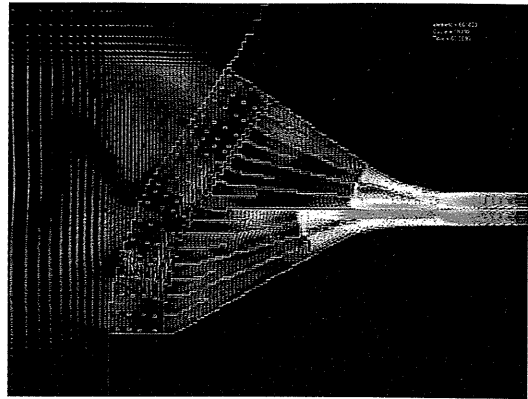


図-7 導流壁を設置した場合の流況



(a) 水面

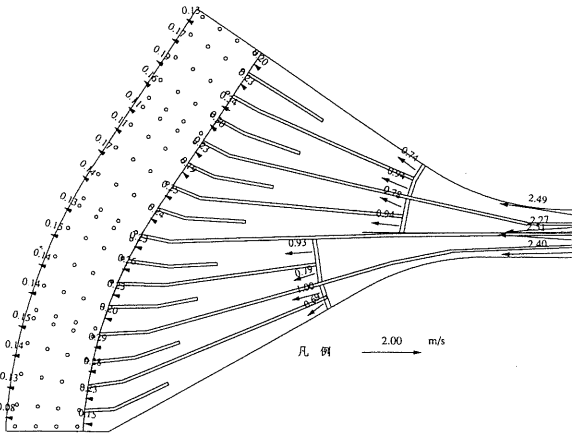
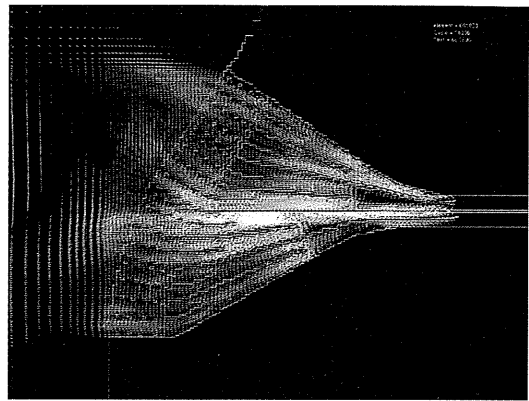


図-8 導流壁を設置した場合の流速測定結果



(b) 水深4m

図-9 導流壁を設置した場合の流れの解析結果

#### 4.2 導流壁を設置した場合

図-7には導流壁を設置した場合の流況を示し、上流側のカーテンウォールまで水面に波が立っていることを確認できる。一方、下流側では水面が静かになっている。図-8には流速の測定結果を示す。この図から、導流壁を設けた場合には流れが制御され、ほぼ均等に放流されていることが分かる。

一方、解析(図-9)ではこの流れのパターンを完全に捉えていない。流れが中央の水路に集中していることは水深4mのベクトル図(図-9(b))から分かる。図-10には解析と実験との比較結果を示す。数値解析から得られた流速値はカーテンウォールの下(図-10(b))で実験値よりかなり大きくなっている。その影響で、放水口出口の流速値は実験値より大きくなり、40cm/sを超える場所も見られた。その理由は以下のように考えられる。

導流壁を設置した場合には直交格子を適用すると、本来滑らかな導流壁が階段状に表現されてしまう。その結果、導流壁の側面に沿う流れは減速し、逆に導流壁の間の流速が増大する。一般にコンクリート壁のマニング係数は0.015程度であるのに対して、0.5mの階段(実物スケール)を有する導流壁は大きなマニング係数をもつ。この見かけ上のマニング係数 $n$ ( $=0.0417k_s^{1/6}$ )は壁面表面の粗度高さ $k_s$ から求めると、0.037となる。ここで、 $k_s$ は0.5mと仮定した。このように、多数の導流壁を有する放水口内の流れ場の予測には直交格子を適用した場合に十分な予測精度が得られないことが分かる。この問題は格子幅を狭めることにより改善することが可能であるが、三次元流れの場合に格子数が極端に増えてしまい、現実的に適用することが困難である。

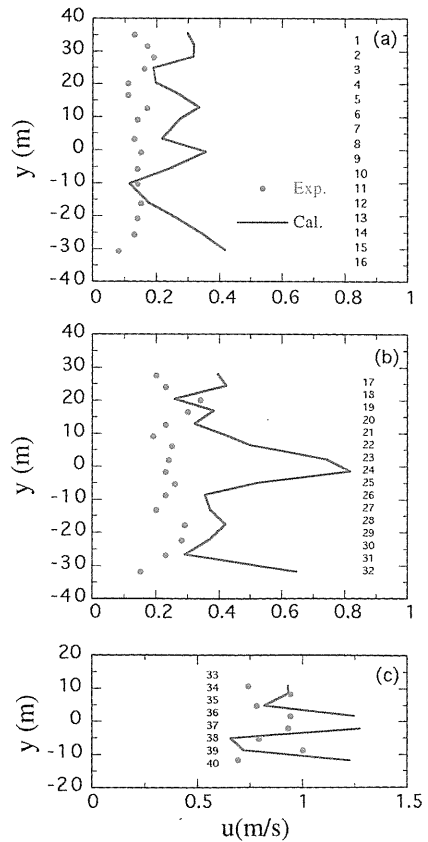


図-10 直交格子を用いた解析と実験との比較(導流壁あり)  
(a) 放水口出口；(b) 下流側カーテンウォール部；  
(c) 上流側カーテンウォール部

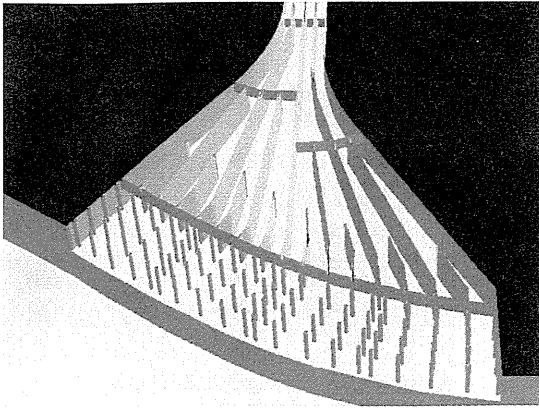


図-11 数値模型

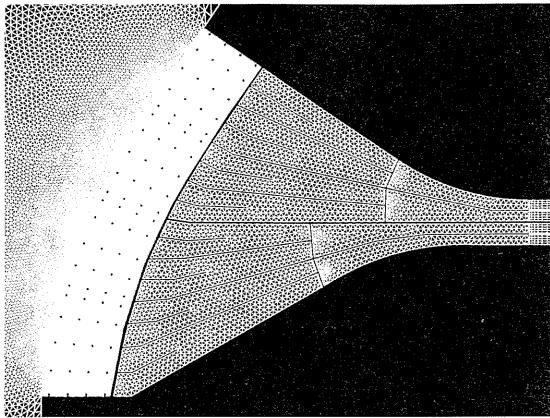
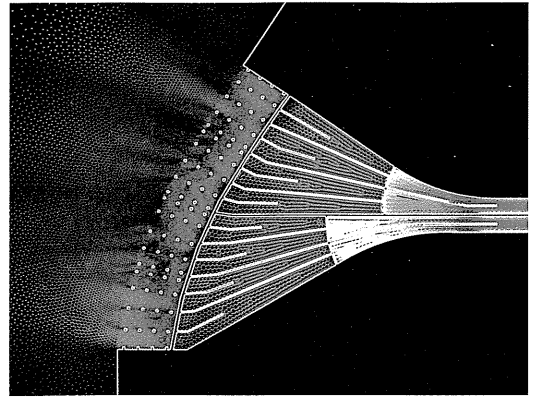
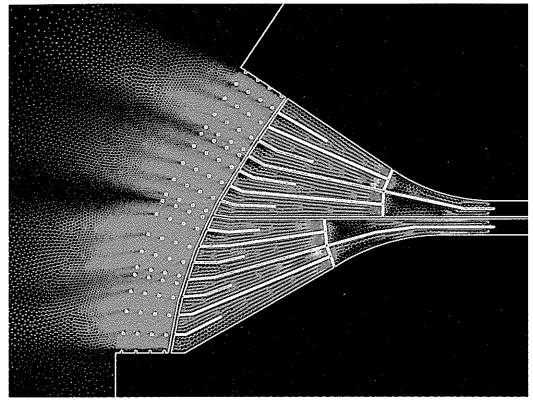


図-12 非構造格子を用いた場合の解析格子



(a) 水面



(b) 水深4m

図-13 非構造格子による解析結果

#### 4.3 非構造格子による解析

この問題を解決するために、本研究では非構造格子による解析手法を用いた。図-11には設計図をもとに作成した数値模型を示し、放水口出口付近の群杭及び曲面をもつ導水壁を厳密に再現した。図-12には解析格子を示す。0.7mの直径をもつ群杭の解像度を上げるために、放水口出口付近に格子を集めた。

図-13には非構造格子による解析結果を示す。図-9に比べ、非構造格子による流れのパターンは水理実験の結果に近く、放水口出口及び下流側カーテンウォールでの流速分布もほぼ均等になっている。図-14には非構造格子と直交格子による解析結果の比較を示す。直交格子の結果(青い点線)に比べ、非構造格子により得られた流速値(赤い実線)は実験値とよく一致していることが分かる。特に図-10に見られた流速の過大評価が非構造格子を用いた場合に完全になくなっている。導流壁を設置した場合は、30cm/sの許容流速条件がクリアされていることは非構造格子による解析結果からも確認できる。

#### 5. まとめ

本研究では、火力発電所放水口内外の三次元流れ場を直交格子及び非構造格子を用いて予測し、実験との比較により数値シミュレーションの予測精度及び水理構造物設計への適用可能性を明らかにした。直交格子による流れ場の解析は複雑な形状をもつ水理構造物に対して十分な予測精度が得られない可能性があり、使用上注意を有する。一方、非構造格子による流れ場の解析の予測精度は直交格子より格段に向上し、水理構造物の設計に必要な定量的な情報を提供できることが分かった。

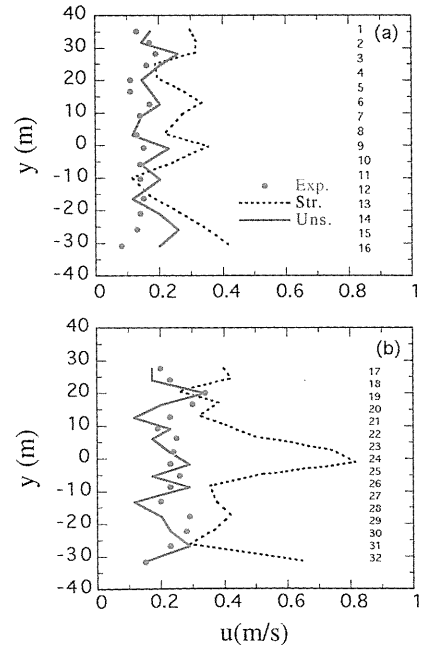


図-14 非構造格子と直交格子の解析結果の比較  
(a) 放水口出口；(b) 下流側カーテンウォール部

#### 参考文献

- 熊谷 洋；今井正寿；中井至知。3次元数値シミュレーションによる沈砂池水路形状検討。水工学論文集。Vol.39, 1995, p.367-372.
- 米山 望；田中伸和。貯水池内三次元流動シミュレーション。電力土木。No.281, 1999, p.44-48.