

発電所取水路内流況予測における シミュレーション結果の信頼性

ACCURACY OF FLOW PREDICTION OF INTAKE STRUCTURE OF POWER PLANT USING NUMERICAL SIMULATION

熊谷 洋¹, 小田桐悦郎²
Yo KUMAGAI, Etsuro ODAKIRI

¹正会員 工修 東北電力株式会社 送変電建設センター (旧研究開発センター土木研究G)

〒980-0811 仙台市青葉区一番町3丁目7番23号明治生命仙台ビル7F

² 東北電力株式会社 研究開発センター土木研究G

〒980-0841 仙台市青葉区中山7丁目2番1号

In connection with hydraulic experiments of an intake channel of power plant, we present a numerical simulation by mean of which an accuracy of flow distribution and a reproduction of separation are examined. Conclusions are as follows; 1) Simulation results agree well with those derived from a rough wall log-law function at the rough wall pipe ($n=0.014$). 2) Best simulation results are obtained at longer training wall and at a use of L-type lattice pattern. 3) It is found that simulation method used here makes possible to reproduce numerically the phenomenon of separation appearing frequently in an intake water channel of power plant

Key Words: Turbulence model, 3D Numerical Simulation, Computational Hydraulics, Hydraulic Structure

1. まえがき

水力発電所および火力・原子力発電所水路構造物を設計する場合、水路内の流況を把握することは重要であり、模型水路を用いて数多くの水理実験が行われている。近年、急激な曲がりや断面縮小・拡大を伴うコストダウンを目指した設計を行うようになっていたため、従来の設計概念を適用しにくい評価が難しい現象を対象にするものが多くなっている。このため、これら一連の困難な現象を解決するため従来の水理模型実験のみを用いた水理構造物設計に代わって、数値シミュレーションを用いた水理構造物設計への期待は年々高まっている。

熊谷ら¹⁾は、水理模型実験結果と数値シミュレーション結果の比較検討を積み重ね、実験結果を定性的に良好に再現することを示してきた。また、水理構造物設計への数値シミュレーションの適用事例として、東星興業(株)上先達発電所沈砂池設計へ適用を行い、一部再現性の問題や、実験結果との差異が大きい部分が見受けられるが、水路構造物形状の変更に

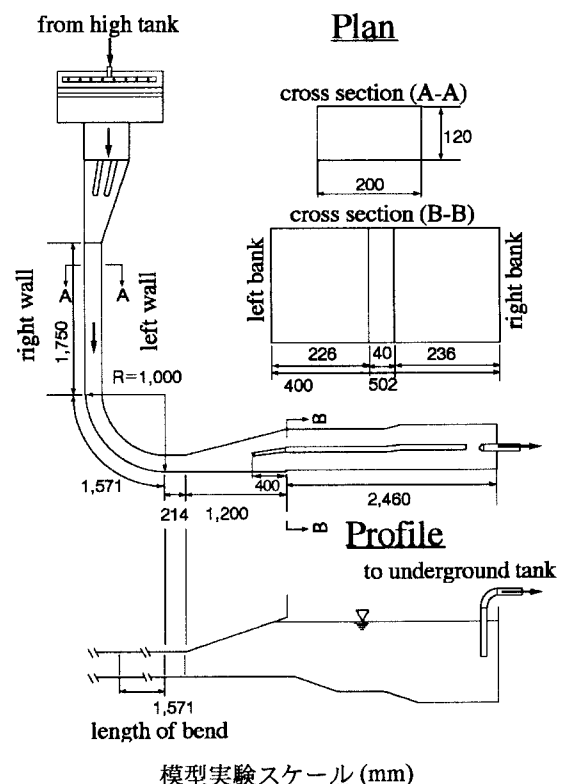


図-1 水理模型平面図および断面図

よる流況改善は、数値シミュレーションを用いて定性的に流況を把握することが可能であることを示した。

近年著しく数値流体解析が発展しており、水理設計分野において、数値シミュレーションを用いた水理設計(以下数値水理設計と記す)の適用範囲が拡大していくと考えられるが、設計部門業務に数値水理設計を定着させるためには、数値シミュレーション結果の定性的かつ定量的信頼性の確認を既往の実験結果を利用することにより実施する必要がある。

本研究においては、既に運転開始した地点の発電所取水路系のシミュレーション結果と過去に実施した発電所取水路系の水理実験結果との比較を定性的かつ定量的に行い、流量配分結果に関するシミュレーション結果の信頼性の検討を実施するものとする。

2. 実験装置および方法

実験データは、女川原子力発電所2号機復水器冷却用取水路の水理模型実験データ²⁾を使用した。図-1および図-2に水理実験模型を示す。流量配分データは、流量測定点にプロペラ流速計を設置して流速を測定し、流速測定点の分担通水面積を乗じて算出した。ポンプ室の各水路の流量配分は、ベンド下流部の漸拡部に設置される導流壁により決定される。そのため、ベンド下流部の漸拡部のはく離領域の確認は、染料および流況確認糸を用いて目視観察により行った。

検討形状は4パターンとした。図-3に検討ケースを示す。検討ケースは、1)原案(Case-1),2)導流壁を原案より上流へ10m延長(Case-2),3)導流壁を原案より上流へ15m延長(Case-3),4)導流壁を原案より上流へ20m延長(Case-4,最終設計案)である。

3. 計算手法

数値計算で使用したソルバーは、汎用流体解析ソフト「SCRYU Ver1.8」((株)ソフトウェアクレイドル社)を使用した。移流項は、1次風上差分と比較してより高精度なMUSCL法を用いた。立坑部分および取水口前面は自由水面を有するが、取水口前面はL.W.L水位、立坑部水位は損失計算から求め、水面条件をフリースリップとして計算した。乱流定数は、Launder-Spaldingが提唱する値³⁾を使用した。流入条件は、取水口の流量配分に影響がないよう十分遠方までメッシングし、一様流速流入条件を設置した。流出口は図-2に示すCWP部に一様流出条件を設置した。流入部の乱流境界条件は、 $k=10^{-4}(m^2/s^2)$ 、 $\epsilon=10^{-4}(m^2/s^3)$ とした。解析格子数は、1パターンのみで実施した。発電所取水路は複数の条数を持ち、解析では複

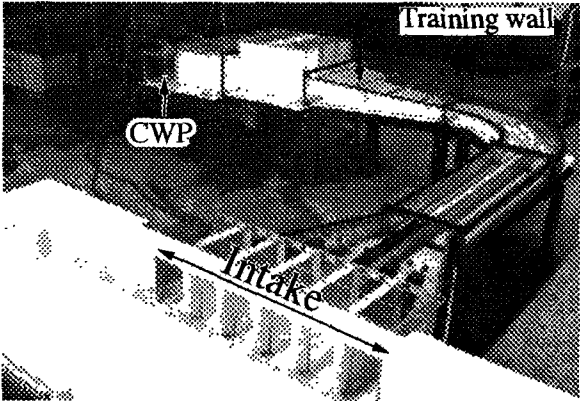


図-2 取水口から見た水理模型全体

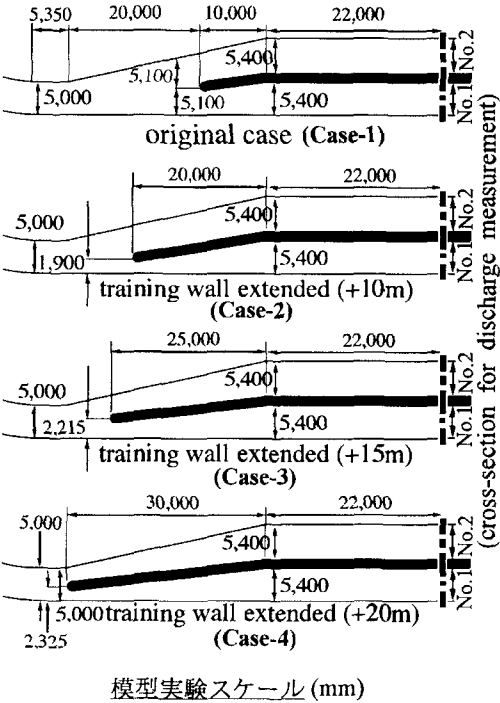


図-3 検討ケース

表-1 計算および境界条件

Equations :	
Basic Equations	Continuity equation
	Reynolds equation
Discretization method	FVM (Unstructured grid)
Differential scheme	MUSLE (3rd. order accuracy)
Turbulence model	k- ε model
Used computer	DEC Alpha Server 4000
Calculation	Steady calculation
Element number	82,000 (case-1,2,3,4)
Calculation time	1.4h per 100cycle
Boundary conditions :	
Water surface	Free slip
Wall	Rough wall log-law
Inlet and Outlet	Constantly velocity

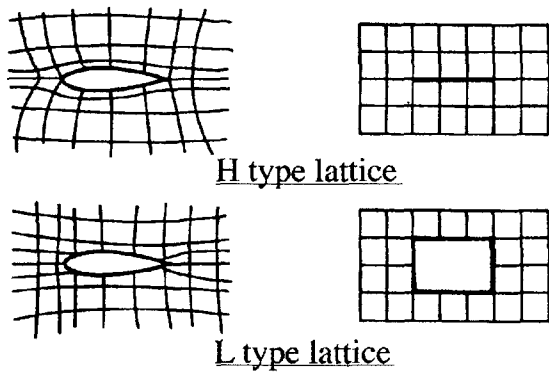


図-4 格子パターン⁵⁾

数の条数を有する取水路系を一括して解析するが、解析格子数は計算機容量による制限を受ける。実用上、1条あたり80,000要素程度の解析は可能であることから、解析格子数は82,000要素とした。計算条件、境界条件、使用計算機および計算時間を表-1に示す。

シミュレーション結果の検証に関しては、格子パターンによる解依存性が一ノ瀬⁴⁾により指摘されており、数値水理設計を実施する場合、格子パターンによる解依存性を把握することは、シミュレーション結果の信頼性を向上させる上で必要不可欠であることから、格子パターンの違いによる解依存性の確認を実施した。今回検討した格子パターンは、H型、L型の2種類⁹⁾とした。今回検討したそれぞれの格子パターンを図-4に示す。また、図-5に取水路系導流壁挿入部分の解析格子(L型格子、H型格子)を示す。

4. 実験と数値シミュレーションの比較検討結果

(1)取水路内部流況

今回対象とした発電所取水路は、取水路途中に90度のベンドを有し、ベンド終了部位より鉛直方向および水平方向に漸拡している。Case-1においては、漸拡部始端部より導流壁先端部にかけて、1)循環流、2)2次流、3)はく離、が観測され、極めて複雑な流況を呈している。図-6に模型内にタフト格子を設置し流れを可視化した様子を示す。循環流の様子が可視化されていることがわかる。

(2)粗面对数則の妥当性

今回、SCRYU Ver1.8に組み込んだ粗面对数則およびmanning-strickler式は、(1),(2)で示される。

$$\frac{U}{U_*} = 8.5 + 5.75 \log_{10} \frac{y}{k_s} \quad \text{-- (1)} \quad k_s = (7.66 n \sqrt{g})^6 \quad \text{-- (2)}$$

U_* :摩擦速度(m/s), U :平均速度(m/s), y :無次元距離,
 k_s :相当粗度, n :粗度係数, g :重力加速度(m/s²)

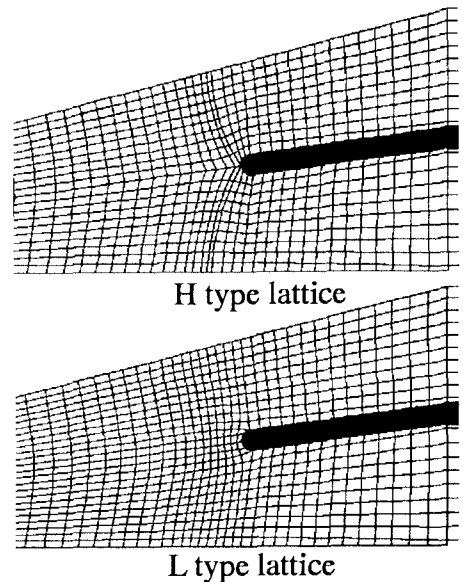


図-5 導流壁先端部付近の解析格子(case-1)

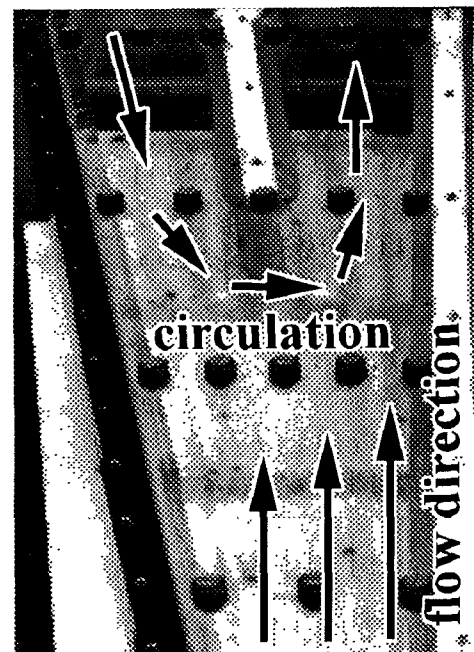


図-6 導流壁先端部における流況(循環流の生成)

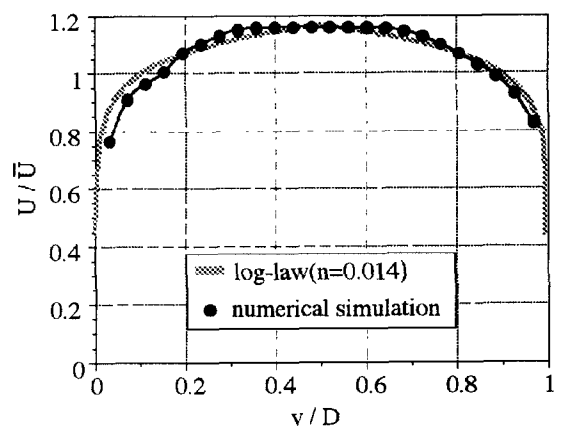


図-7 粗面对数則とシミュレーション結果比較

粗面对数則の流速分布と粗度を考慮した数値シミュレーション結果(粗度係数 $n = 0.014$)を図-7に示す。粗面对数則と比較した結果、粗度を考慮した数値シミュレーション結果は壁面付近がやや粗面对数則式より小さいが、全体的に良好に一致する。したがって、粗度を考慮した数値シミュレーション結果は良好な流速分布を示していることがわかる。

(3) 流量配分比較

流量配分に関する実験結果と数値シミュレーション結果の比較を図-8に示す。

図-8から、流量がほぼ2等分されているケース(Case-2,3,4)に関しては、格子パターンの違いによる流量配分の違いは見いだされなかった。実験結果と比較した流量配分の数値シミュレーション結果は、流況が複雑なCase-1を除いては、10%以内の誤差で計算されている。

導流壁位置が短い水理実験原案(Case-1)の場合、格子パターンの違いによる流量配分の差が16%あり、実験結果と比較した場合、24%から40%の差異が見られる。

バンド下流部は、水平方向および鉛直方向に漸拡を有し、バンド終了部から導流壁先端部にかけては、2次流、はく離、および循環流が観察され、特に、はく離に関しては、漸拡始端部から全層および部分的にはく離を生じているなど極めて複雑な流況を呈している。ここの部分の実験結果とシミュレーション結果の比較検討結果は、漸拡始端部から流下するにしたがって実験結果とシミュレーション結果の差異が大きくなることが指摘されている⁶⁾。流況がCase-1のように複雑な場合、流量配分予測結果の誤差を大きくなる傾向にあると考えられるため、数値水理設計で流量配分を評価する場合、注意が必要である。

4 ケースに関する流量配分の実験結果とシミュレーション結果を比較した結果、図-8よりL型格子の方がH型格子より良好な結果を得ることができた。

(4) はく離と循環流の再現性

図-9に、水路形状原案Case-1におけるはく離の発生状況、流速分布および流速ベクトルを示す。図-10に、導流壁を上流へ10m延長したCase-2および導流壁を上流へ15m延長したCase-3におけるはく離の発生状況、流速分布および流速ベクトルを示す。図-11に、最終設計案であるCase-4におけるはく離の発生状況、流速分布および流速ベクトルを示す。

Case-1の場合、実験では漸拡部下流部において水路高に対する部分はく離(天井部)、水路高に対する

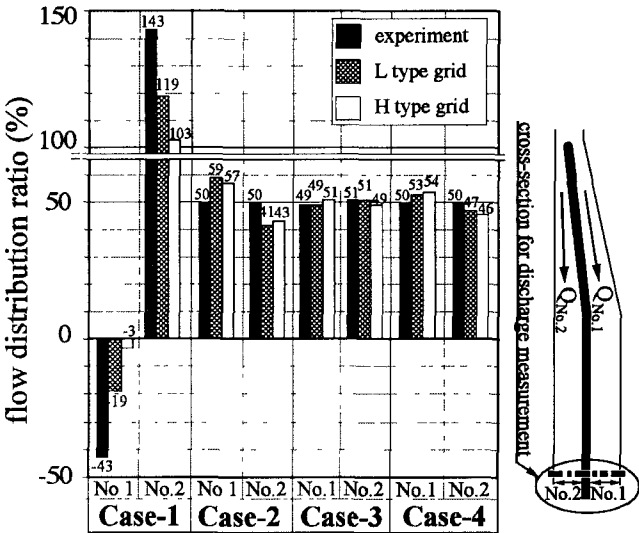


図-8 流量配分結果(数値シミュレーションと実験結果の比較)

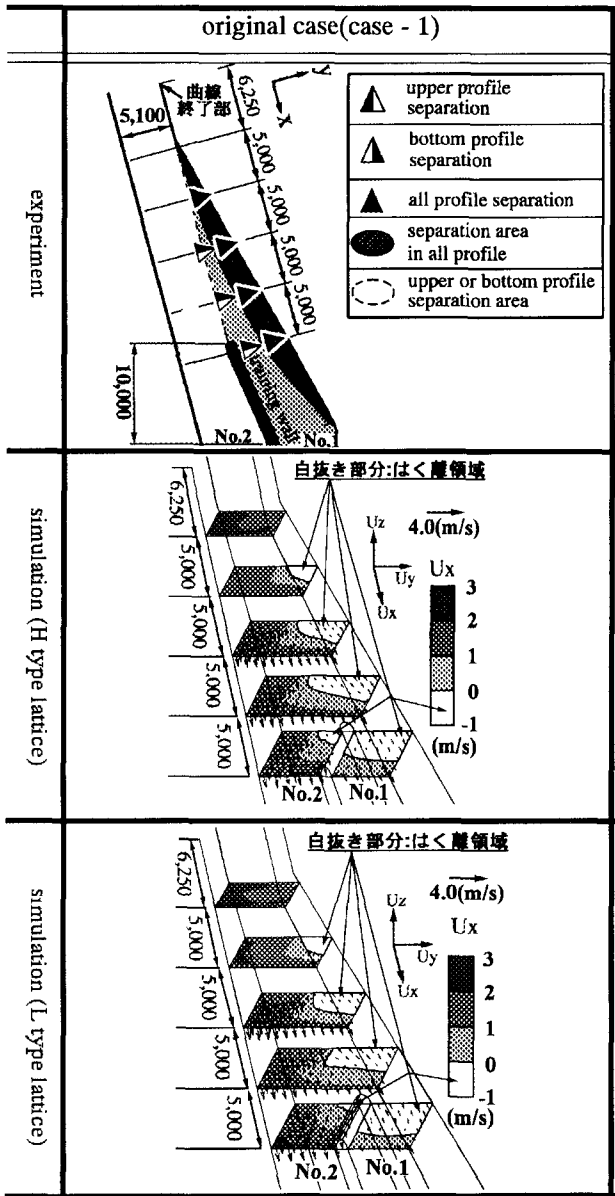


図-9 はく離発生状況および取水路内流速分布(Case-1)

全層はく離、および循環流が発生しているが、シミュレーションにおいては使用する格子パターンに拘わらず水路高に対する部分はく離および循環流が再現されている。しかし、使用する格子パターンに拘わらず実験で発生した水路高に対する全層はく離を再現するまでには至らなかった。実験結果とシミュレーション結果を比較した結果、L型格子の方がH型格子より良好な計算結果であると考えられる。理由として以下のことが示される。1)図-9で循環流を生じている部位の流速がH型格子の場合より速い、2)したがって流量配分結果がH型格子より実験に近い結果になっている。

Case-2の場合、実験では漸拡部下流部において水路高に対する部分はく離(天井部)および水路高に対する全層はく離が発生しているが、シミュレーションにおいては使用する格子パターンに拘わらず水路

高に対する部分はく離が再現されている。水路高に対する全層はく離は、L型格子の場合、全層はく離に近い計算結果が得られたが、H型格子の場合、部分はく離(底部)の計算結果となり、全層はく離を再現するまでには至らなかった。したがって、実験結果とシミュレーション結果を比較した結果、L型格子の方がH型格子より良好な計算結果であると考えられる。Case-3の場合、実験では漸拡部下流部において水路高に対する部分はく離(天井部)および水路高に対する全層はく離が発生しているが、シミュレーションにおいては使用する格子パターンに拘わらず水路高に対する部分はく離が再現されている。また、実験では導流壁で仕切られたNo.1水路においては、はく離は発生していないが、シミュレーションではH型格子およびL型格子を問わずはく離が計算される結果となった。水理設計を実施する場合には安全側の計

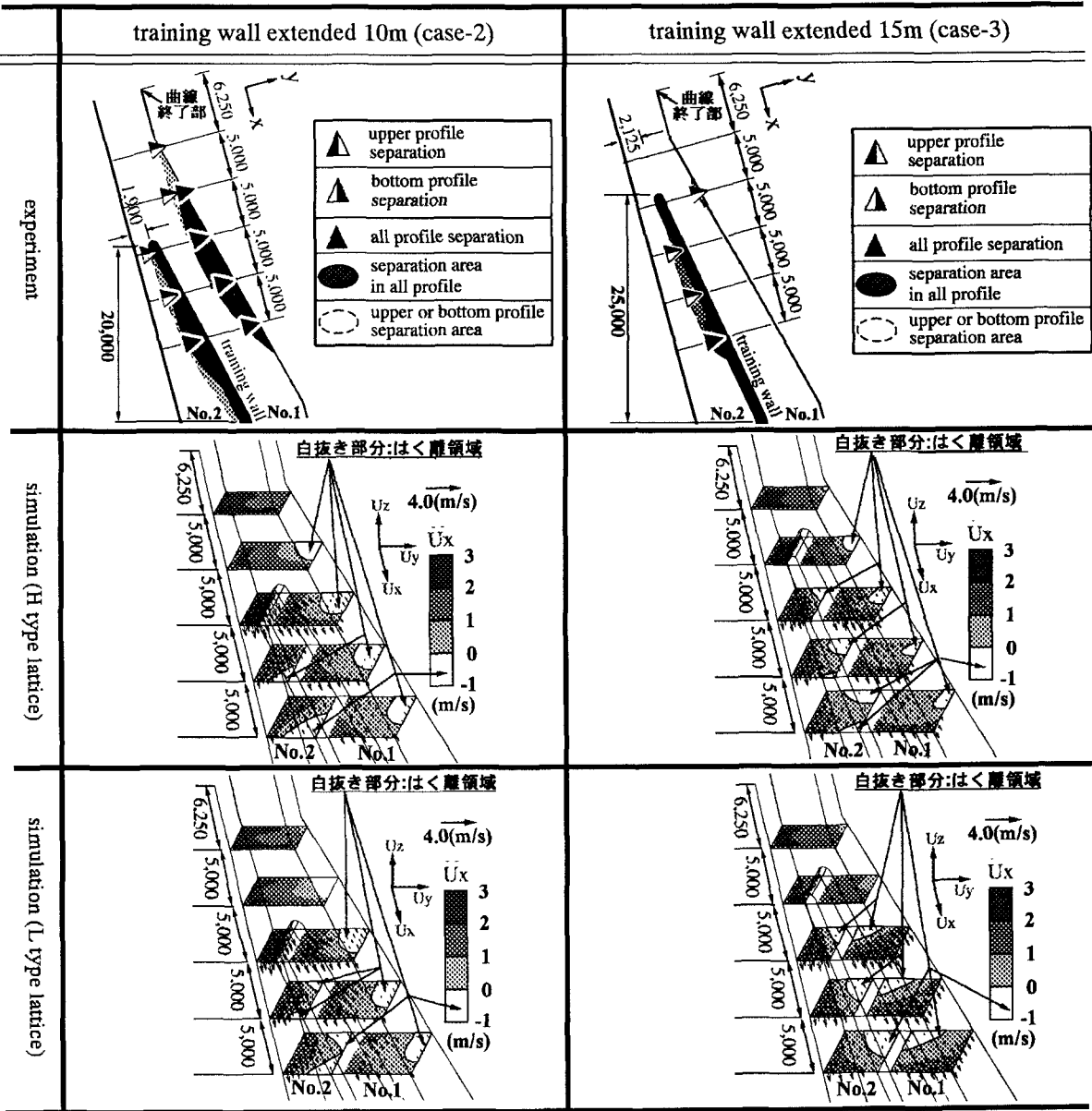


図-10 はく離発生状況および取水路内流速分布(Case-2,3)

算結果であるが、この解析結果は今後の検討課題である。

Case-4の場合、実験では導流壁で仕切られたNo.1水路において水路高に対する部分はく離領域は観測されていないが、シミュレーションではどちらの格子パターンを使用した場合でもはく離が発生している。導流壁で仕切られたNo.2水路においては、H型格子では、右下部にはく離領域が生成されており、実験結果と異なる結果になっている。一方、L型格子では、右上部にはく離領域が生成されており、実験結果と同様な傾向になった。

格子パターンの違いにより、はく離領域の発生状況が異なることがわかり、はく離発生領域に関しては、4ケースをL型格子の方がH型格子より良好な傾向を示した。

5. あとがき

今回、3次元数値シミュレーションを女川原子力発電所2号機復水器冷却用取水路の水理模型を対象にして行った結果、次のような結果を得た。

- 1) 粗度を考慮したシミュレーション結果は、粗面対数則式と良好に一致した。
- 2) 流量配分が均等に配分される実験ケース(Case-2,3,4)の場合、流量配分結果は格子パターンの影響をあまり受けなかったが、流速分布は格子パターンの影響を強く受ける結果となった。
- 3) 流量配分が均等に配分されないケース(Case-1)の場合、流量配分結果は格子パターンの影響を強く受ける結果となった。

- 4) 流速分布は、L型格子を使用した方がH型格子を使用した場合より比較的良好な結果を得られた。
- 5) 流量配分が均等に配分される実験ケース(Case-2,3,4)の場合、L型、H型のどちらの格子を使用しても、実験結果と比較して流量配分比は10%以内の誤差で計算可能である。
- 6) 流速分布を考慮した上で流量配分計算を実施する場合、L型格子を使用が望ましいと考えられる。

今回、原子力発電所取水路系の水理模型実験を用いてシミュレーション結果の信頼性を検証したが、今後、他地点の水理模型実験に対して同様な手法で信頼性の検討を実施し、シミュレーション結果の信頼性に関するデータを蓄積し、蓄積データを水理構造物設計へフィードバックしていく予定である。

6. 参考文献

1) Yo Kumagai: Research on the Application of Numerical

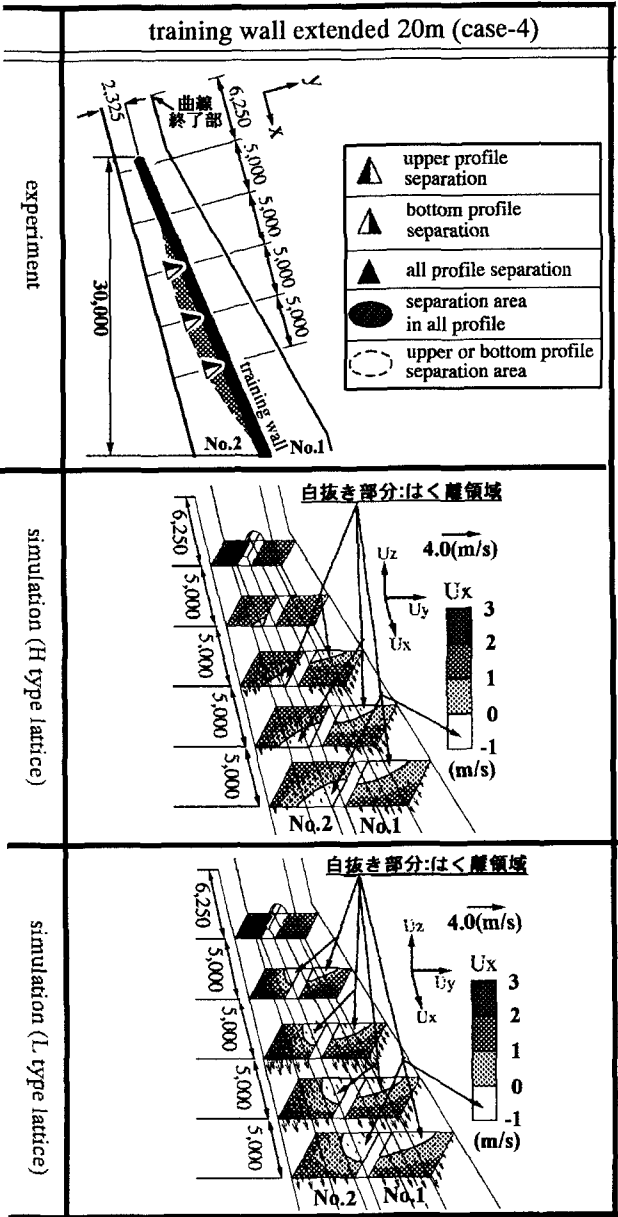


図-11 はく離発生状況および取水路内流速分布(Case-4)

Simulation in Water Channel Design, 27th IAHR Congress, Proceedings of Theme B 767-772, 1997.

2) 氏家久芳,佐々木牧夫:流れの数値シミュレーションと水理模型実験との適合性-女川原子力発電所の例,電力土木, No235, p45~p52, 1991年11月号.

3) Launder, B.E. and Spalding, D.B.: The numerical computation of turbulent flow, Comp.Meth.in. Appl.Mesh, and Eng., 269, 1974

4) 一之瀬健一, 伊藤晋吾: CFDの信頼性検討 (ブラボボディ・ドラッグオーバーシュート現象の再現性), ソフトウェアクレイドル 第6回ユーザー事例発表会講演集, 1996

5) 中橋, 藤井: 格子生成法とコンピューターグラフィックス, P16-18, 東京大学出版会, 1995

6) 熊谷洋, 佐々木牧夫, 三瓶隆雄: 取水路内流況の数値解析と実験結果の比較, 水工学論文集第40巻, p675~680, 1996.

(1998.9.30受付)