

実水力発電施設取水路内流れの数値シミュレーション

Numerical Simulation of Flow in Real Intake Channel of Hydropower Facility

中山昭彦*・久末信幸**

Akihiko NAKAYAMA and Nobuyuki HISASUE

*正会員 Ph.D. 神戸大学大学院教授, 大学院工学研究科 (〒657-8501 神戸市灘区六甲台町1丁目1番地)

**正会員 関西電力株式会社, 電力技術研究所構築研究室 (〒661-0974 尼崎市若王寺3丁目11番地20号)

Large-Eddy Simulation (LES) technique has been applied to calculate the three-dimensional turbulent unsteady flow in the real intake channel of a small-scale hydroelectric power station. The method computes the motion of the free surface with a modified HSMAC method. The turbulence is modeled with a modified Smagorinsky sub-grid scale model with near-wall damping. With the total number of grid points of about one million, the complex and unsteady flow with localized vorticity can be reproduced reasonably well for the basic configuration as well as the case with a vortex-suppressing device. By using a similar grid that marginally resolves the near-wall flow, it may be used for predicting similar intake flows. The turbulence model, however needs an improvement to better represent the flow impinging on the end wall.

Key Words : intake flow, HSMAC method, Large-Eddy Simulation, vortex flow

1. はじめに

近年, 地球温暖化対策のひとつとして環境負荷の低い水力発電, 特に, 低落差を利用した水路式の小水力発電は, 既存設備を利用して様々な場所に設置することで, 工費も軽減できることから, その有用性が見直されている。小水力発電は, 従来の水力発電と比較して, 施設が小規模であることから, いくつかの問題が発生している。取水口への土砂流入や放水口での堆砂, そして, 取水渦による空気混入などである。特に, 取水渦は小水力発電施設の特徴である低落差, 低水位という条件で起こりやすく, 対策が必要である。

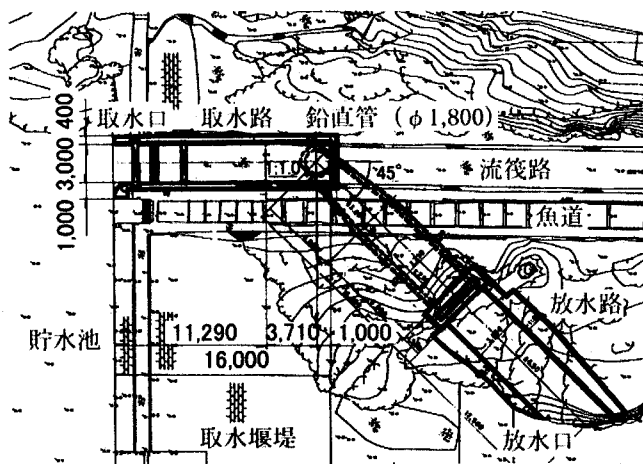
取水渦は, 決して新しい問題ではなく, また, 水力発電施設だけの問題ではなく, これまでにも, いろいろな研究がなされ, その発生条件や抑制法などについても知見が蓄積されている。たとえば, Johnson¹⁾は取水渦の発生を取水管径と被り水深の比の関係式として提案している。また, Nakayama&Jones²⁾は, 空気取入口の渦の発生条件についての準理論的考察を行っている。

近年は, 流体運動の数値計算により, 渦運動を捉えようとする試みもなされている。Constantinescu&Patel³⁾や Silva & Li⁴⁾, また, 著者ら^{5,6)}はポンプ取水槽内流れにおいて, レイノルズ平均式 (RANS) と2方程式モデルを用いた数値計算を行い, 弱い旋回を伴う流れの解析を行っている。

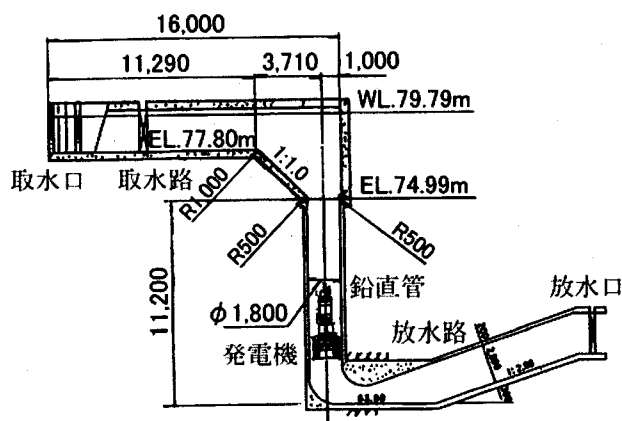
しかし, 空気を混入するような取水渦の存在する流れは, 非定常性が強く, また, 空間的にも流速が大きく変化し, 水面の窪みを伴う。既往の数値計算のように水面の変化しないレイノルズ平均流の解析では十分ではない。そこで, 著者ら⁷⁾は近年発展している Large-Eddy Simulation (LES) 法を, 理想化した小水力発電施設の取水路内流れに適用し, その有用性を調べた。ワークステーション程度の計算機で取り扱うことのできる格子数で, 弱い取水渦を捉えられることが示された。この数値計算では, 取水路, 鉛直管ともに理想化された形状で, しかも, 取水路流入部の流速分布に, 取水渦の発生要因の一つである速度勾配や横流れを人為的に導入したもので, 実際の水理条件とは異なるものであった。

本研究では, 実際の小水力発電施設の計画にあたり, 上記のような取水路流れの特性が, 数値解析にてどの程度再現できるかを検討するために, 実物のスケール模型に合わせた形状と水理条件で数値計算を行った。模型実験結果と比較することにより, 計算結果の妥当性などを検討した。さらに, 設計にあたって重要な, 取水渦防止工を設置した場合についても数値計算を行い, その効果などがどの程度再現できるかを検証した。

2. 取水路内流れの概要



(a) 平面図



(b) 縦断面図

図-1 小水力発電施設の実例

小水力発電施設の実例を図-1 に示す。取水路により河川や貯水池などから水を引き込み、発電機に通じる鉛直管に流入する構造である(久末⁸⁾)。通常、河川には堰堤が設置され安定した水深が確保されるが、取水路流入部は、その設置位置や河川の流況などにより、対称な形状ではなく、流入速度分布も一様ではない。したがって、取水路内の流況把握のための模型実験、あるいは数値計算においては、堰堤などの貯水部を含めた形状により行われるべきである。

本研究で対象とする流れ場の領域を図-2 に示す。貯水部から発電機タービン位置までを対象とする。これは、久末⁸⁾の模型実験の形状に合わせている。鉛直管の直径を D として、貯水部は幅 $4D$ 、長さ $1.3D$ である。取水路は幅 $1.7D$ 、長さ $8.9D$ である。貯水部から取水路流入部は、実物、模型と同様に、左右で半径の異なる円弧状とした。

後述するが、取水渦防止工であるフラップを設置した形状においても数値計算を行い、渦制御の有効性の検証の可能性を調べた。

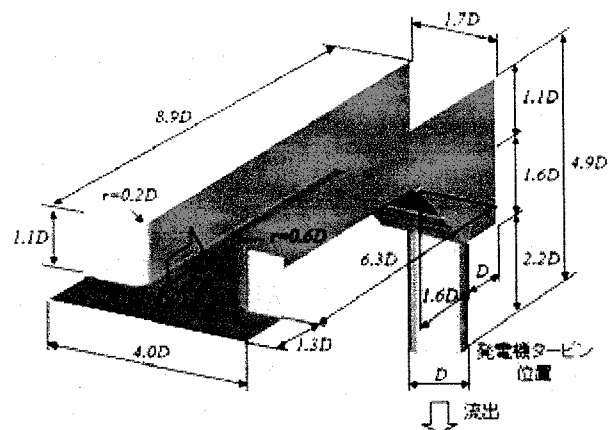


図-2 計算対象領域

3. 基礎式および数値計算法

本研究で用いた LES 法は前報⁷⁾ とほぼ同じであるので詳細は省くが、概要は以下のとおりである。基礎式は無次元流速ベクトル u_i と無次元圧力 p についての連続式と運動方程式

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{Fr^2} \delta_{i3} - \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{1}{Re} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \tau_{ij} \right) \quad (2)$$

である。ここで、 x_i は x_3 方向を鉛直上向きにとったデカルト座標、 t は無次元時間である。 Fr 、 Re は、それぞれ u_b 、 x_i の無次元化に用いた速度、長さを基にしたフルード数、レイノルズ数である。 τ_{ij} は乱流のサブグリッドスケール (SGS) 応力である。SGS 応力は、線形渦粘性モデル

$$\tau_{ij} = -2\nu_t S_{ij} + \frac{2}{3} k_t \delta_{ij} \quad (3)$$

を用いる。ここで、 ν_t は渦動粘性係数、 S_{ij} はひずみ速度テンソル、 k_t は SGS 成分の乱流エネルギーである。渦動粘性係数 ν_t には Smagorinsky モデルを用いるが、標準 Smagorinsky モデルは、壁面近傍、衝突部、また、層流では過剰な粘性を与える。その解決方法の一つは、dynamic Smagorinsky モデルであるが、dynamic 手法に必要な陽的フィルタリングは、複雑な三次元流れ場に適用するのは難しい。本計算法では、通常の Smagorinsky モデルに加え、修正 Smagorinsky モデルを用いる。通常 Smagorinsky モデルは

$$\nu_t = (C_S \cdot \Delta)^2 \cdot \{S_{ij} S_{ij}\}^{\frac{1}{2}} \quad (4)$$

である。 Δ は粗視化スケールで、本計算法では三方向の格

表-1 計算法の概要

要点	手法
圧力解法	HSMAC 法
水面計算法	圧力・速度と同時緩和
移流項の差分	3 次精度風上差分
時間進行	3 次精度 A-B 法
座標	直交座標
格子	スタaggered 格子
サブグリッドモデル	修正 Smagorinsky 壁面近傍はダンピング
壁面境界	粘着条件

子幅 $\Delta_1, \Delta_2, \Delta_3$ および底面からの距離に依存し

$$\Delta = (\Delta_1 \cdot \Delta_2 \cdot \Delta_3)^{\frac{1}{3}} (1 - \exp(-z^+/26)) \quad (5)$$

で与える。ただし、 $z^+ = u_* x_3 / \nu$ で、 u_* は底面摩擦応力、 $x_3 = z$ は底面からの距離である。底面摩擦応力 u_* は、底面から一点目の計算点での速度に粘性応力の式を用いて評価している。したがって、壁面近傍の粘性底層は、ある程度解像されている必要がある。また、Smagorinsky 定数は $C_s = 0.13$ としている。このモデルは、衝突部など非回転性流れで過剰な渦粘性を与える。そこで、本計算法では時間スケールにひずみ速度だけではなく、回転テンソル W_{ij} を導入した

$$\nu_t = (C_s \cdot \Delta)^2 \cdot \{S_{ij} W_{ij}\}^{\frac{1}{2}} \quad (6)$$

を用いる。これは、衝突部での過剰乱れ生成を抑制するモデルに似た修正法である。

水面は、水平位置 (x_1, x_2) についての水面高さ関数で表されるとすると、粗視化された水面高 $h(x_1, x_2)$ についての支配式は

$$\frac{\partial h}{\partial t} + u_1 \frac{\partial h}{\partial x_1} + u_2 \frac{\partial h}{\partial x_2} - u_3 = \frac{\partial \tau_{h1}}{\partial x_1} + \frac{\partial \tau_{h2}}{\partial x_2} \quad (7)$$

であるので、この式も同時に解くことになる。ここで、速度成分は、いずれも水面位置での値で、 τ_{h1} 、 τ_{h2} は水面粗視化による水面サブグリッド項である。これらの項についてのモデル法は未知で、その効果についてもはっきりしていない⁹⁾ため、本計算法では無視している。運動方程式が、三次元場での計算であるのに対し、水面位置の計算は、水面の位置の情報のみで計算することができる。本計算法では、速度成分を(1)式を満たすよう反復修正する段階で、水面を含むセルでは(7)式に従い水面高を求める、修正 HSMAC 法^{10,11)}を適用する。

本計算法の概要を表-1 に示す。本計算法の精度は、実験室スケールの平坦開水路および段落ち流れなど、単純な形状流れで検証され、RANS 法の 2 方程式モデルとも比較

表-2 模型実験条件および数値計算条件

条件	模型実験	数値計算
取水路 Re 数 $V_{ch} H_{ch} / \nu$	7.6×10^4	5×10^4
取水路 Fr 数 $V_{ch} / \sqrt{g H_{ch}}$	0.27	0.25
平均水深 H_{ch} / D	1.1	1.0

されている¹¹⁾。平均量については、境界近傍の低レイノルズ数領域で調節されている RANS 法の計算結果に比べ、必ずしも優れているとはいえないが、乱流応力の非線形性、非等方性は、実験に近い結果を示している。何よりも瞬時乱れ構造が適度に再現されており、対象とする小水力発電施設の取水路内流れのように、非定常性、三次元性の強い流れ場の計算には適しているといえる。

4. 計算条件

4.1 取水路形状と流入、流出条件

基本的に、久末ら⁸⁾の模型実験の条件に合わせて計算条件を設定した。計算領域流入面 ($x_1 = x = x_{in}$) は、貯水部に設定した。流速はほぼ一定で、発達した開水路流とし、次のような対数則分布

$$u_1(x_{in}, x_2, x_3) = u(z) = u_* \left(\frac{1}{0.41} \log \frac{zu_*}{\nu} + 5.2 \right) \quad (8)$$

を与え、横断方向、鉛直方向速度成分は

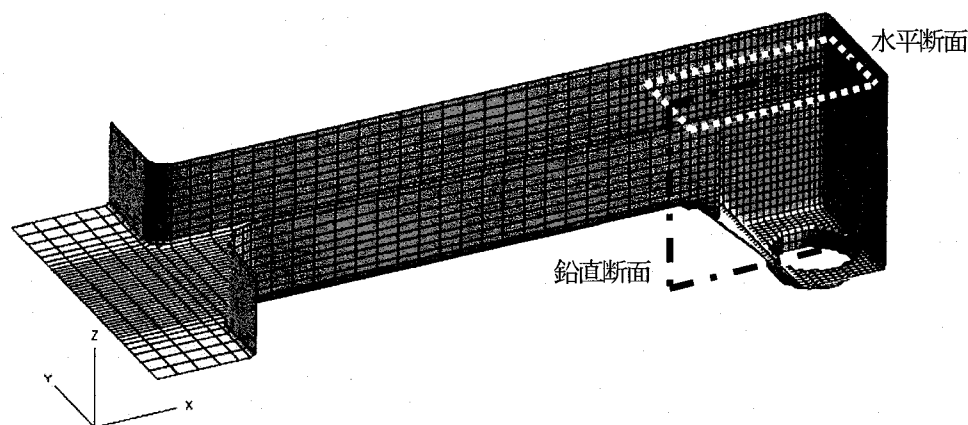
$$u_2(x_{in}, x_2, x_3) = v(x_{in}, y, z) = 0 \quad (9)$$

$$u_3(x_{in}, x_2, x_3) = w(x_{in}, y, z) = 0 \quad (10)$$

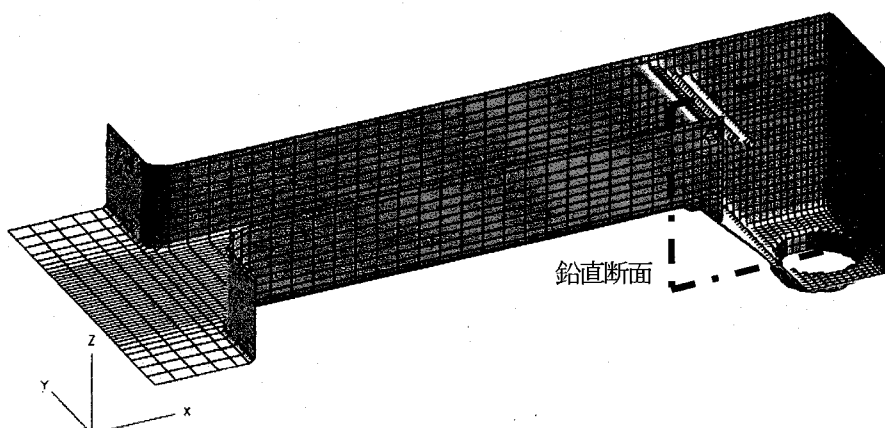
とした。乱流速度分布を仮定するが、速度変動は導入していない。流入速度および流量は、摩擦速度 u_* で設定される。下流端は、発電機タービンの直前の位置としている。発電機タービンを通過する流れの詳細は、非常に込み入っており、通過する平均流速の 2 乗は出力に比例するが、模型実験において一定に保たれていることから、数値計算でも一定と仮定する。ただし、流入流量および流出流量は、平衡を保つために、計算ステップ毎に流入速度を調節している。

4.2 計算格子および計算条件

本研究で用いた計算格子を図-3 に示す。図が煩雑にならないよう、格子線は一本おきの表示としている。いずれも直交座標、不等間隔格子で、流れ方向、横方向、水深方向に、それぞれ 119, 83, 84 である。図-3(a)は原設計の形状、図-3(b)は鉛直管斜め上方に渦防止工フラップを設置した形状である。渦防止工フラップは、直交格子で近似している。水面は、一時的に、また、局所的に上昇するため、平均水面よりも上に、多くの格子点をとっている。



(a) 原設計



(b) 渦防止工フラップ設置

図-3 計算格子

水路部の平均流速 V_{ch} と平均水深 H_{ch} を基にした、模型実験条件と数値計算条件の詳細を表-2に示す。水面位置、流入流速は、計算ステップ毎に変化するため、フルード数は厳密には合わされていないが、ほぼ実験値に等しい。計算は、一様流を仮定した初期状態から開始し、平均流が流れ場全体を流れ過ぎる時間（約 $10D/V_{ch}$ ）以上の助走計算を行い、平均を行っている。

5. 計算結果

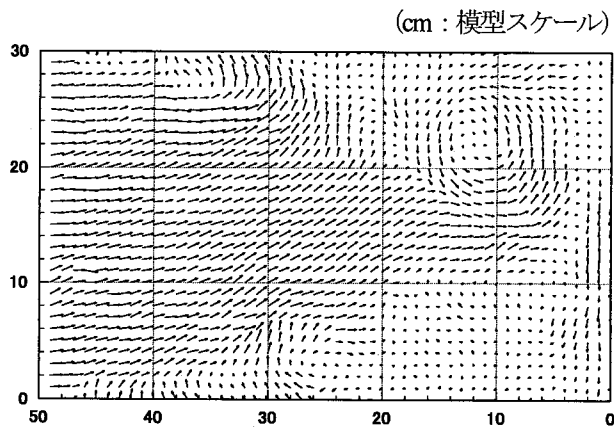
5.1 流速ベクトル分布

図-4 に原設計の形状における水平断面瞬時流速ベクトル分布の、PTV による実験結果と計算結果の一例の比較を示す。図-3(a)内の点線で示した範囲である。いずれも、水路終端の水面近傍における水平断面瞬時流速ベクトル分布である。計算結果例は、計算開始後約 $20D/V_{ch}$ の一例である。流れは、水路終端壁に衝突し左右に分かれるが、(a)実験結果例1は反時計回りの旋廻流が卓越し、(b)実験結果例2は水路左岸近傍に渦が発達する。(c)計算結果例でも、水路終端壁に非常に近いが、旋廻流があるのが伺える。

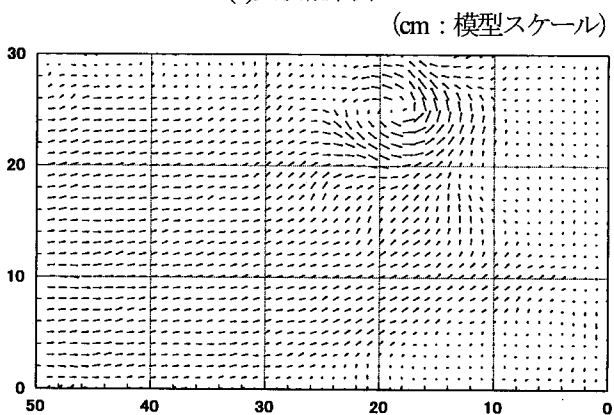
流れの瞬時構造の再現性が重要であるが、数値計算の検証という意味では、平均流速ベクトル分布が比較し易い。図-5 に原設計の形状における鉛直断面平均流速ベクトル分布の実験結果と計算結果の一例の比較、図-6 に渦防止工フラップを設置した形状における鉛直断面平均流速ベクトル分布の実験結果と計算結果の一例の比較を示す。図-3(a),(b)内の一点鎖線で示した範囲である。いずれも水路中心の鉛直断面流速ベクトル分布である。水路床が傾斜している部分における流れの剥離と再付着の流況は、顕著な特性を表すため、実験結果と計算結果の比較の基準となる。

図-5 は原設計の形状で、(a)実験結果例は、水路床の傾斜部が始まる屈曲点のやや下流側で剥離し、鉛直管に流入する前に再付着していることを示している。(b)計算結果例は、剥離してはいるが、剥離点がやや上方の位置で、水路床の屈曲点に近い。水面近傍では、(a)実験結果例は、水路終端壁に衝突した流れが上下方に分かれ、上方に向かう流れは反時計回りの旋廻流を形成している。(b)計算結果例は、上方に向かう流れが弱く、旋廻流が形成されていない。これは標準 Smagorinsky モデルでも同様の傾向である。

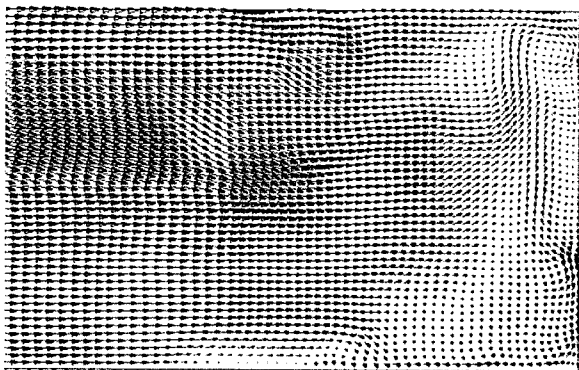
図-6 は渦防止工フラップを設置した形状で、(a)実験結



(a) 実験結果例 1



(b) 実験結果例 2



(c) 計算結果例

図-4 水平断面瞬時流速ベクトル分布の一例 (原設計)

果は、水路床の傾斜部での剥離は非常に小さいか、あるいは、なくなり、流速は大きくなっている。(b)計算結果は、この剥離領域が小さくなってはいるものの、その程度は小さく、流速の増加は見られない。また、渦防止工フラップの下流域では、(a)実験結果は、流速が非常に小さくなり死水領域が形成されているが、(b)計算結果は、逆流と上向き流れが見られる。

以上のように、流速ベクトル分布の比較からは、水路終端壁の衝突部流れの再現性と、それによる水面近傍の旋廻流の再現性に難点があるものの、全体的には、ほぼ実験で見られる流速ベクトル分布を再現しているといえる。

5.2 瞬時流れ場の渦構造

取水路から鉛直管にいたる流れの変動は、非常に大きい。瞬時流れ場の特性を把握するには動画が有効である。しかし、ここではいくつかの一例を示し、実験で観察される瞬時流れの特性の数値計算による再現性を考察する。

図-7(a),(b)に原設計の形状、(c)に渦防止工フラップを設置した形状における瞬時流れ場の計算結果の一例を示す。右岸側側壁は、水路内の流れ場が見やすいように省略している。それぞれ、瞬時の水面形および渦構造の可視化として速度勾配テンソルの第2不変量 λ_2 の等値面を示している。不変量 λ_2 は乱流渦の検出によく用いられ、管状をした取水渦の検出にも Vorticity number と共に有効である¹²⁾。

水面変動は、水路部水深で10パーセント程度であり、実験でも観察されているが非常に大きい。水路長辺方向と横断方向の幅で規定される振動成分は大きいものの、正弦波ではなく、水路床の傾斜部で波が大きく変形している。水面変動は、計算の初期条件にも依存し、上流端まで伝わり、振動は長時間続く。さらに、長時間計算を進め、初期依存する水面振動を減衰させるべきものか検討すべきである。水面にいくつか窪みが見られる。この窪みと取水渦による圧力低下との関連は渦生成において重要である。

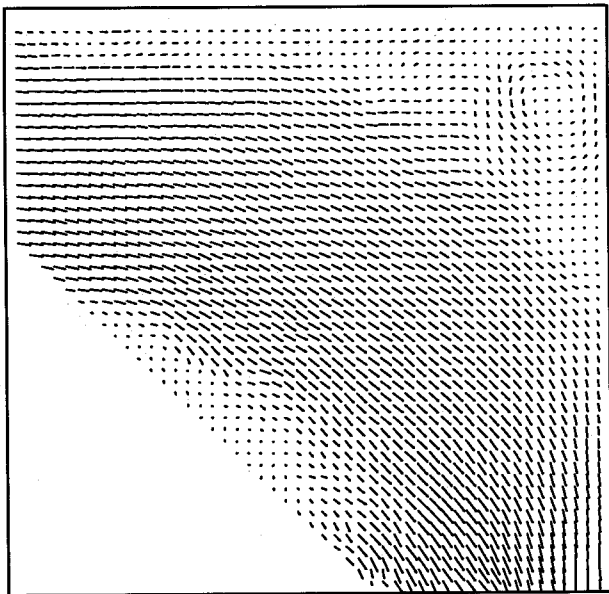
図-7(a),(b)は、原設計の形状である。不変量 λ_2 の等値面は、鉛直管上方の渦の状態をよく表している。縦方向に渦があるときは、水面から鉛直管に連結するように発生し、ある時は途切れている様子がわかる。これは、実験での動画の流況に酷似している。図示している不変量 λ_2 の値は、乱流渦などの可視化の値の10倍以上で、渦の強度としては非常に大きい。ただし、この渦構造と水面の窪みとの間には、はっきりとした相関関係は見られない。

図-7(c)は、渦防止工フラップを設置した形状である。渦防止工フラップにより下流側の水面が乱され、また、上流への backwater のような効果も見られる。渦は、原設計の形状の計算結果と同じ不変量 λ_2 の値の等値面では、鉛直管入口のみで上方には何も見られない。この渦防止工フラップは、開発候補であり、必ずしも効率の良いものではないが、ある程度、渦の制御ができることがわかっている。計算結果でも、渦が抑制されているのがわかる。

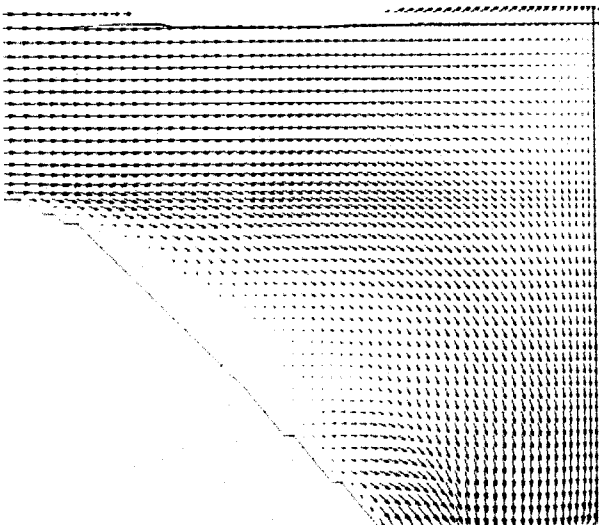
このように本計算法によって、実際の小水力発電施設の取水路内流れにおいて、平均速度場では見られない瞬時構造の大きな差が検証でき、これまでの理想化した取水路内流れの数値計算⁷⁾から一歩実用化に近づけたといえる。

6. 結論

実際の小水力発電施設の取水路形状と模型実験の条件に合わせた取水路内流れにおいて、LES法を用いて数値計算を行った。剥離や再付着または衝突など乱流数値計算としては困難な点が多い流れで、しかも、局所的渦が含まれるというもので、厳密な数値計算は決して容易ではない。



(a) 実験結果例

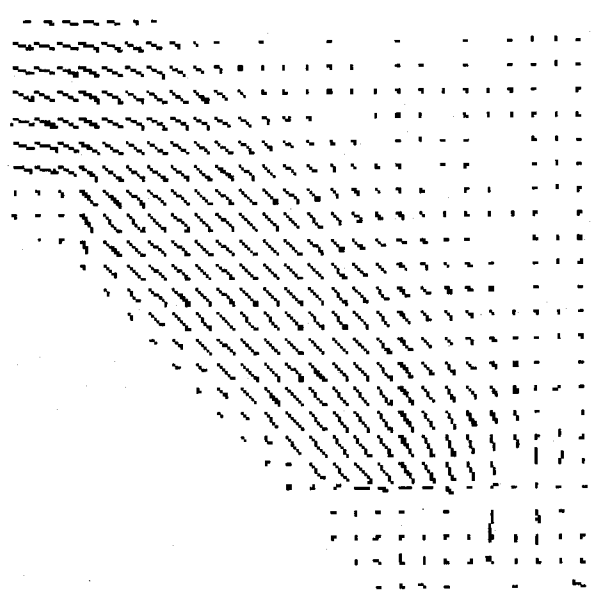


(b) 計算結果例

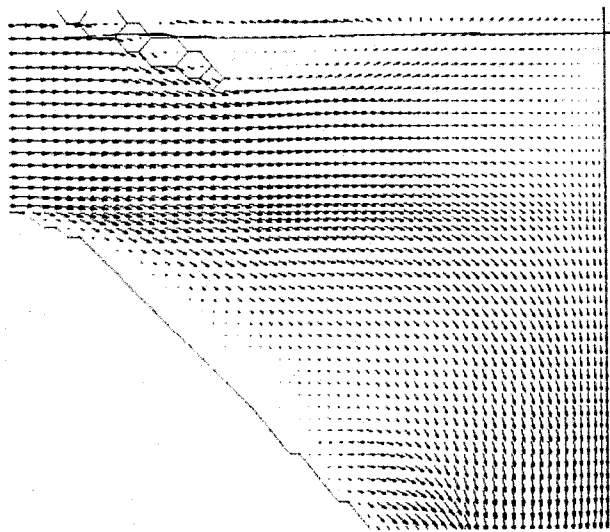
図-5 鉛直断面平均流速ベクトル分布の一例 (原設計)

LES法を用いた数値計算の試みとしては、水面変動の再現から渦の生成など、かなり実際に近い結果が得られた。今後さらなる改良を行えば、実際の設計計画にも適用できる可能性が十分にあることがわかった。

乱れの低い層流的な部分や、非回転性の大きな変形を伴う衝突部など、数値計算に用いたSmagorinsky乱流モデルでは不十分な点も多い。また、水面変動のLES粗視化の影響や、表面張力の効果も無視したものである。しかし、応用計算としては適度な結果が得られ、使い易いことを考慮すると、Dynamic modelなど高度なコーディングの必要なモデルよりも実用性がある。ただし、本計算法でも壁面をある程度解像している必要があり、実スケールになると



(a) 実験結果例



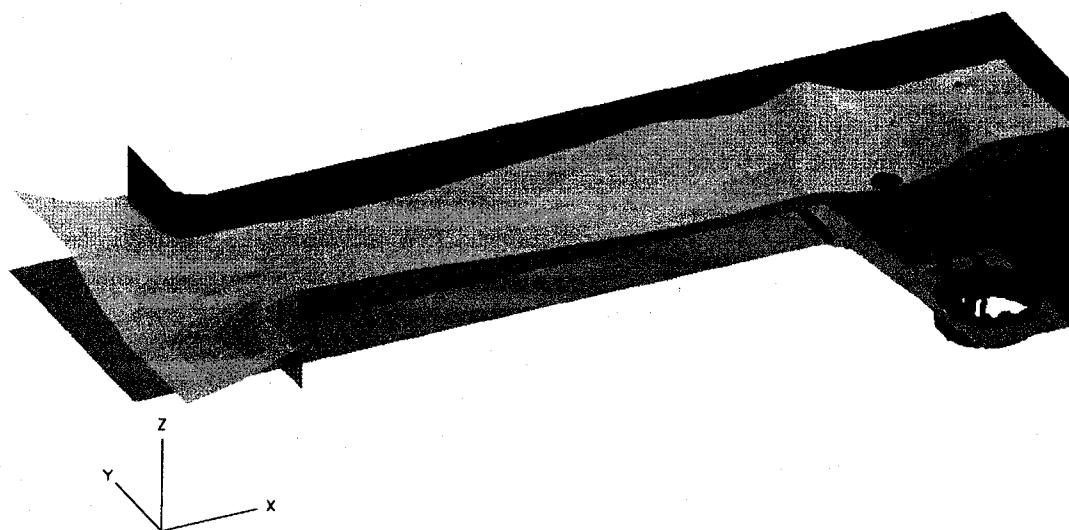
(b) 計算結果例

図-6 鉛直断面平均流速ベクトル分布の一例
(渦防止工フラップ設置)

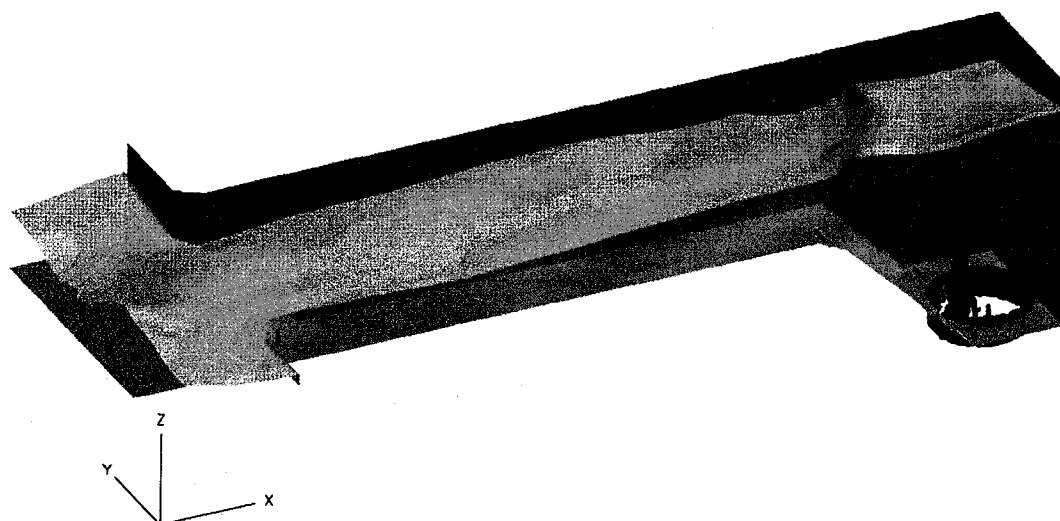
格子数をさらに増やす必要がある。高レイノルズ数壁面モデルの開発が進めば、この面でも向上できる。今後、実験との詳細比較や、実際の運転状態に合わせた条件での計算などを行い、検証すべきである。

参考文献

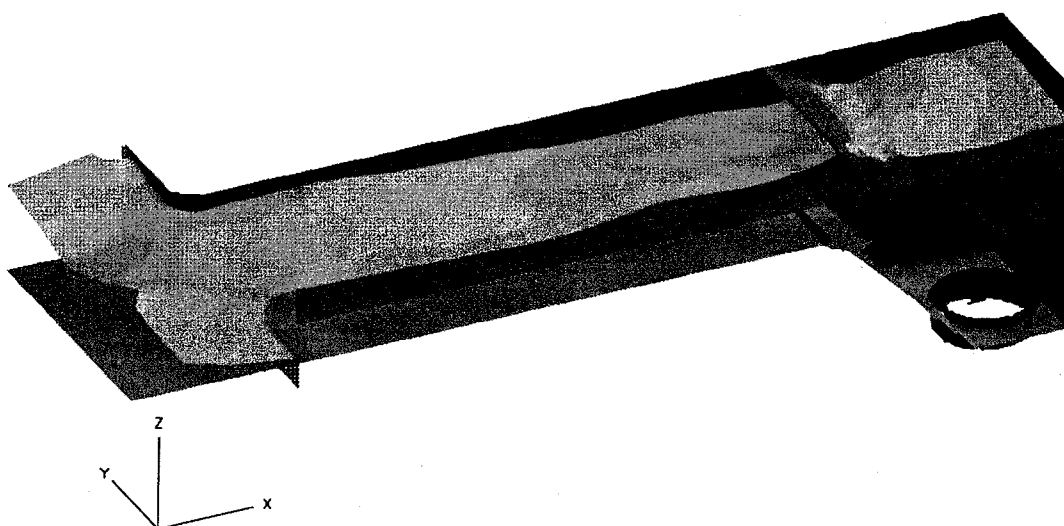
- 1) Johnson, P. L.: Hydro-Power Intake Design Consideration, J. Hydr. Eng., vol. 114, pp. 651-661, 1988.
- 2) Nakayama, A. and Jones, J.R.: Correlation for formation of inlet vortex, AIAA J., Vol. 37, pp. 508-510, 1999.
- 3) Constantinescu, G. and Patel, V.C.: Numerical model for



(a) 原設計 ($t=25D/V_{in}$)



(b) 原設計 ($t=29D/V_{in}$)



(c) 渦防止工フラップ設置 ($t=20D/V_{in}$)

図-7 瞬時流れ場の計算結果の一例 (水面形, λ_2 等値面 ($\lambda_2=700 V_{in}^2/D^2$))

- simulation of pump-intake flow and vortices, J. Hydr. Eng., Vol.124, pp.123-134, 1998.
- 4) Silva, J.M. and Li, S. : Numerical study of the influence of the inlet flow in a practical water-pump intake, Proc. XXIX IAHR Congress, Theme D, Vol.1, pp.593-600, Beijing, 2001.
 - 5) 中山 昭彦, 焦 徳思, 市成 準一 : 取水管回りの渦を伴う 3 次元流の要因とその予測計算法, 水工学論文集, 第 43 巻, pp.485-490, 1999.
 - 6) Nakayama, A. and Jiao, D.: Velocity-gradient tensor and local topology of three-dimensional flows in intake bay, XXIX IAHR Congress Proc. Theme D, Vol.1, pp.442-447, Beijing, 2001.
 - 7) 中山 昭彦, 竹内健造, 久末信幸, 松村友宏 : 水力発電取水路内渦流の数値シミュレーション, 水工学論文集, 第 51 巻, CDROM, pp.763-768, 2007
 - 8) 久末信幸, 竹原幸生 : 画像計測を用いた取水渦の発生要因に関する実験的検討, 水工学論文集, 第 50 巻, pp.883-888, 2006.
 - 9) 横嶋 哲, 中山 昭彦 : 開水路乱流の LES における水面変動のフィルタリング効果, 水工学論文集, 第 46 巻, pp.379-384, 2002.
 - 10) Hirt, C.W. and Cook, J.L.: Calculating three-dimensional flow around structure and over rough terrain, J. Comp. Phys. pp.324-340, 1972.
 - 11) 中山 昭彦, 江田智行, 松村友宏 : 修正 HSMAC 法による開水路乱流の LES, 水工学論文集, 第 49 巻, pp.661-666, 2005.
 - 12) 中山 昭彦, 焦 徳思 : 速度勾配テンソル不変量解析を応用した取水槽流れの 3 次元渦構造特性の検索, 水工学論文集, 第 45 巻, pp.451-456, 2001.

(2007 年 4 月 12 日 受付)