

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

ORIGIN OF THREE-DIMENSIONAL VORTICAL FLOWS AROUND AN INTAKE AND ITS PREDICTION METHOD

中山昭彦¹・焦徳思²・市成準一³

Akihiko NAKAYAMA, Desi JIAO and Junichi ICHINARI

¹正会員 PhD 神戸大学大学院 自然科学研究科 (〒657-8501 神戸市灘区六甲台町1-1)

²学生会員 神戸大学大学院 自然科学研究科 (〒657-8501 神戸市灘区六甲台町1-1)

³正会員 神戸大学 都市安全研究センター (〒657-8501 神戸市灘区六甲台町1-1)

Flow structure and the criteria for formation of intake vortices have been studied experimentally and numerically. A particular emphasis is placed on the influence of the inflow property such as shear and nonuniformity on the flow pattern and formation of intake vortex. In the experiment, it is verified that when the inflow contains vorticity or circulation, an intake vortex can form. Computational study is made to see if the highly three-dimensional and vortical flow in the intake bay can be predicted. Although there still is a limitation as to the grid density that can be handled with present-day work stations, and intense line vortex cannot be predicted, weak recirculation of the flow can be aptly predicted by the present method.

Key Words: Hydraulic intake, subsurface vortex, three dimensional flow, finite difference calculation

1. はじめに

貯水池や河川の取水口付近の流れは3次元流となり、旋回流や渦を伴った流れになることが多い。渦流が発生すれば、渦はその強度により糸状になり、水槽と取水口の形状、相対位置などにより水槽壁、水槽底または水面に端を発し取水管内に連なる。いったん渦が発生すれば流速、圧力が局部的に急変する。また流れが非定常になり、脈動の発生、浮遊砂の吸引、局部的洗掘など様々な問題が引き起こされるため、その発生は極力抑制されるべきである¹⁾。渦は流れの非一様性、境界層内の渦度、角のある壁面や横流れにより放出された渦など、元々存在する渦度が吸引により線状に集中するためと考えられているが、粘性や境界の位置などの重要性も指摘されている。渦の発生原因の源である渦度、循環の由来は個々のケースにより異なり、防止法も異なる。渦流の発生の特性そのものはよく似ており、一般的取水槽についての渦流の特性、渦発生状況を調べることは取水口渦に関する基礎的知識を蓄積する意味で有意義である。

水槽の水面に端を発する渦(図-1の Γ_2)は排水時に起

こる流出渦として古くから研究され²⁾³⁾、特に水理構造物に関する渦流の説明がDenny⁴⁾によりなされている。また荻原⁵⁾により発生条件に安定性、形状等の理論及び実験研究がなされ、流量、水深、またレイノルズ数などに関係することが分かっている。図-1の Γ_0 、 Γ_1 は水深の深い取水口が底面や側壁に近い時発生する水面下渦である。筆者は一樣流中に取水管を置いた場合の渦流発生が、壁の位置と相対吸引強度に大きく影響されることを実験、計算にて見出している⁶⁾。取水槽内の取水管の場合、取水槽内に流入してくる流れ全てが取水管に流入するので渦発生条件は少々異なると考えられる。本研究では水深の大きい長方形水槽内に設置された取水管周辺の3次元流が如何に流入面での流速、流れの状態に影響されるかを調べ、これらが数値計算により予測出来るかを調べるものである。

2. 取水管回り渦とその要因

水面下渦はその発生状況により次の3種類に分類出来る。タイプ1では弱い旋回流が生じるのみで明確な渦核

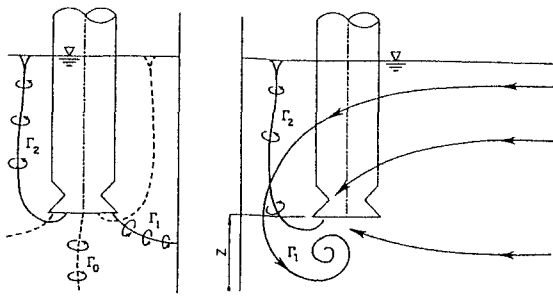
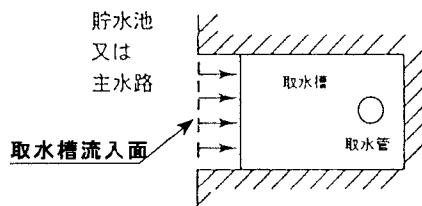


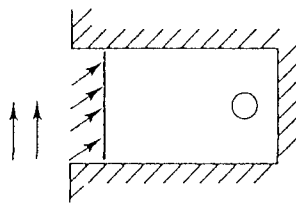
図-1 取水口渦

はない。タイプ2ははっきりした細い糸状の渦核が形成される。タイプ3はさらに強力で中心圧がキャビテーション限界を越すものまでである。これらの内、本研究で扱うものはタイプ1あるいはタイプ2で、強度としては比較的弱いものである。渦流の原因は流れの中に何らかの原因で渦度が存在していることである。渦度は非一様

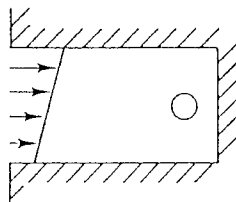
(a) 一様流入



(b) 横流れ



(c) 水平せん断



(d) 底面せん断

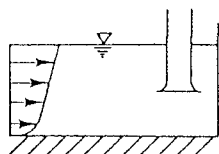


図-2 取水口槽内流れに渦度発生要因。

性やせん断から発生するが、図-2は一般的な矩形取水槽にベルマウス付きの円筒形取水管を設置した時の取水槽への流入状況を表わしたものである。図-2(a)は水槽外部から取水管にかけて対称で一様流れになっている理想的な状況である。図-2(b)-(d)は実際の取水槽の状況により流入速度分布が一様でなくなり、旋回流が発生する状況を示している。図-2(b)は貯水池あるいは取水する河川の流速が水槽流入速度に比べ大きい場合で、取水槽入り口での水平せん断や角での剥離が原因で鉛直方向の渦度が発生する場合である。図-2(c)は何らかの理由で流入面水平面内で速度勾配が生じている場合で大きな水平循環が存在する。図-2(d)は底面での境界層が発達している場合で水平方向の渦度が存在する。こういった流入面での特性と渦の種類は関係している。例えば、鉛直方向渦度の存在する場合はそれに直角な底面に接着する渦は発生しやすい。しかし取水管に向かう流れは取水管近傍で急速に加速するので渦引き伸ばし効果により流線に沿った方向の成分が増強され、流線の形状、加速の程度にも依存するため簡単に予測出来ない。これらの場合について実験で流況を調べ、数値計算にてそれが予測可能かを調べる。

取水管回りの流れは取水槽流入面での速度分布特性以外にレイノルズ数、吸引流量、取水管と取水槽の大きさ、形状、相対位置などにも影響される⁵⁻⁶⁾。

3. 実験

(1) 実験装置と実験方法

本研究では単純な矩形水槽内に置かれた取水口に起こる渦について実験を行った。実験に用いられた取水口水槽および取水口の模型の概要が図-3に示されてある。図の左側が取水される貯水槽、中心部が導入水路で右端に取水管が設けられ、下流にもう一つ水槽が取り付けられてある。上流貯水槽は一定の流量で給水され、流量、水位は三角堰で制御される。本実験では図-2(b)の横流れ流入にあたる流れは対象としない。取水管はフレキシブルチューブで下流側水槽に繋がれ、下流水槽は越流堰で水位調整されている。取水管は直径5.1cm (2インチ) のアクリル製で同じアクリル製のベルマウスが取り付けられてある。入り口から約25cm の位置にvortometer が取り付けられており、渦度の検出が行われる。上下水槽の水位落差は一定に保たれ、吸引はサイホン式である。実験は4種類の流入条件で行われ、染料による可視化観測が行われた。渦流になっている場合、染料を渦中心部と外側にも注入した。実験1では取水槽流入面での流速が一様で対称になるよう制御し、実験2では流入面に障壁を設け水平面内で循環が生じるようにした。取水管の位置は実験1に比べ浅く水深の約1/2である。実験3は実験2と同様水平面内で速度勾配があるようにされ、ベルマウスは水路床に接近して置かれている。実験4では流入部

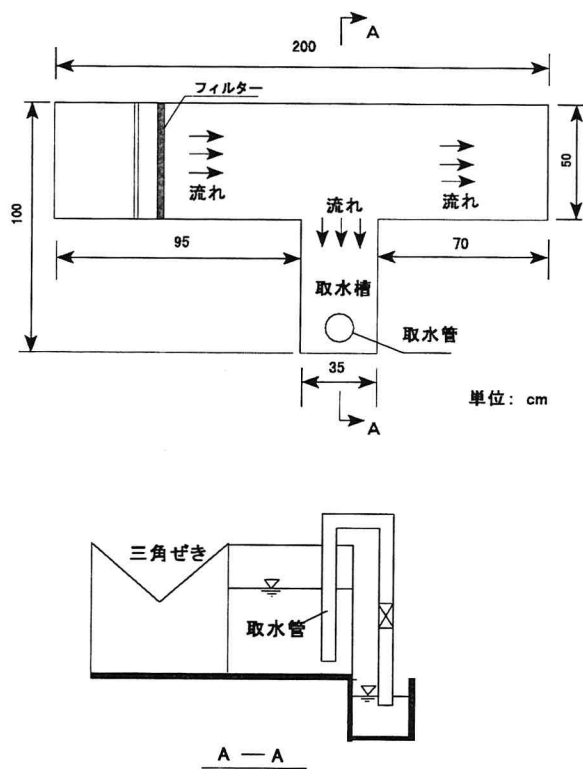


図-3 実験水槽と取水口の模型

上半に障壁を設け鉛直面で速度勾配と循環が生じるようにしてある。取水管内の流量は全ての実験で一定で約5000cc/secに保たれた。取水管直径と平均流速で定義されるレイノルズ数は約 1.5×10^5 である。

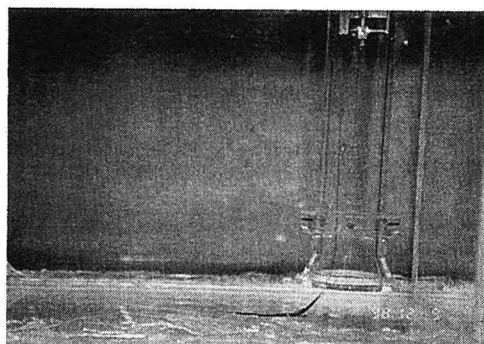
(2) 可視化実験結果と考察

図-4(a)-(d)に実験の可視化写真を示す。実験1の結果では上流の流れは一様で、取水口付近の流れもスムーズで旋回流は見られず、渦は発生していない。Vortometerも静止したままであった。実験2の結果では強度は低いですが、水面に達する渦の形成が見られる。実験3の結果は見難いが水槽底に達する渦が発生している。また実験4の可視化結果は壁に達する渦が見られる。これらの結果は染料を渦核中心からやや離れた部分に注入しているので、渦により誘発された旋回流を示している。実験2, 3, 4は実験1と同じ流量で行われたが、それぞれ強度の弱いタイプ1の水面渦、壁渦、床渦が形成しているのが観察される。

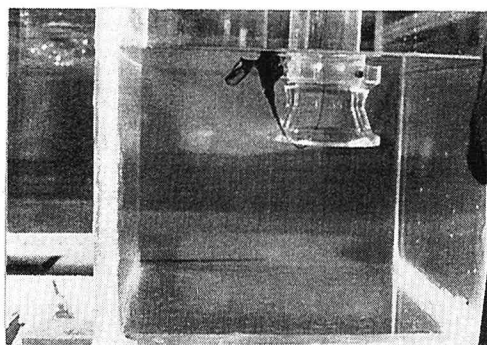
4. 数値計算

渦度の集中する強い渦糸を含む流れの計算は、渦の直径は境界層厚さと同じ様に、レイノルズ数が大きくなれば非常に小さくなり、これを数値計算で解像する事はこれまで困難である。中山⁶⁾はレイノルズ数が大きい場合、粘性の重要になる渦核部分は無視し、その外の領域でポテンシャル流仮定をして渦発生を予測を試みている

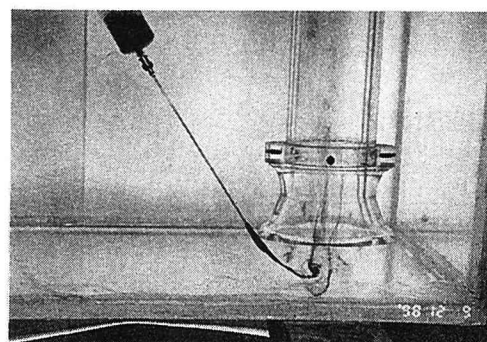
(a) 実験1, 一様流入



(b) 実験2, 水平循環



(c) 実験3, 水平せん断



(d) 実験4, 鉛直せん断

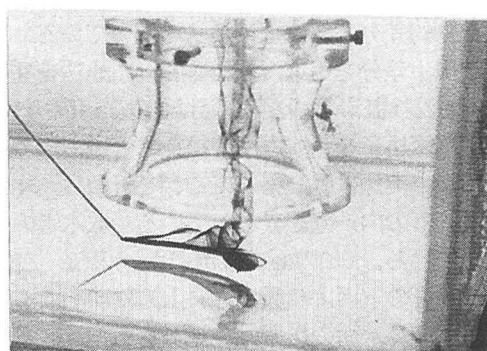


図-4 可視化による流況

が、実験と同様な傾向を示すものの、渦発生に要する吸引流量については実験値よりかなり大きくなっている。またConstantinescu et al.⁷⁾は同様な計算で、粘性流の計算と非粘性流の計算を行い、非粘性計算の方が実験に近いとしているが、渦生成、消散には粘性が必要であるの

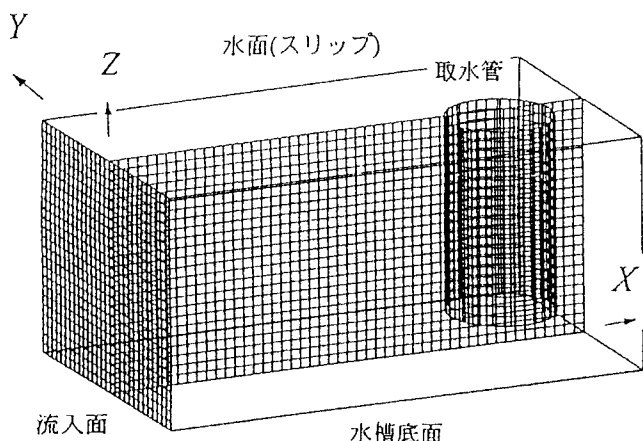


図-5 検証のための計算格子

で、本計算では粘性の運動式を用いる。また本計算では糸状に集中する渦を予測しようとするのではなく、異なった流入条件の基での水槽内の流況が3次元粘性流体の運動方程式の数値解析で実験で正しく予測出来るかを見るものである。実験で行われた条件での渦流の予測が可能かどうか調べる。従って流入面で横流れ、水路床のせん断による速度勾配、及び流入速度の水平分布が一樣でない場合の吸込み流れに与える影響を数値解析する。

(1) 数値計算法

数値計算では直方体取水槽の上流側の一面から水が流入し、円形断面取水管により取水される流れ場を層流3次元ナビアー・ストークスの式を解く事により計算する。粘性の効果を入れることは必須である。計算法は食い違い格子を用いるMAC法に基づくもので、静止状態の初期条件から非定常流の時間発達を計算し、定常状態の得られたときの結果を最終結果とした。差分スキームは、粘性項は2次精度中心差分でCrank-Nicholson法を適応した陰的差分で、SOR反復法で解いている。移流項には3次風上差分を用い、Adams-Bashforth法を採用している。図-5は検証計算のための計算領域と用いられた直行等間隔計算格子を示す。図では取水管は円形で表示されているが、実際は直交格子でこれを近似し、マスキング法で取水管の内外壁を表わしている。取水管の壁厚はゼロとしている。 $x=0$ の面より流れが流入し、右側の円形断面取水管の下面より吸入され上方に流出する。取水口の位置は深く水面の影響は無視できるとし、水面である上端は固定壁としスリップ条件を与えた。周囲3壁面及び床での粘性の影響は無視出来ないので粘着条件を与え、取水管面はスリップ条件を与えた。

(2) 実験結果との比較による数値計算法の検証

本計算法をAnsar⁸⁾の実験結果と比較する事により検証した。用いた計算格子は図-5に示してある。水槽、取

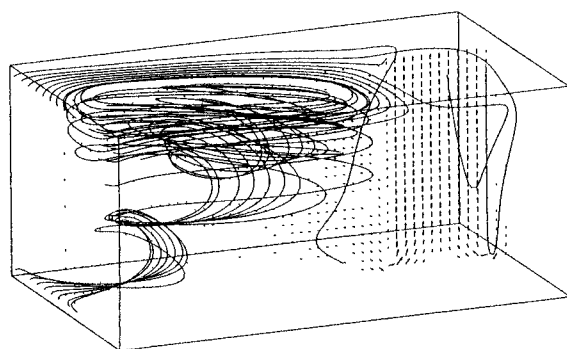


図-6 計算結果、流速ベクトルと流線。

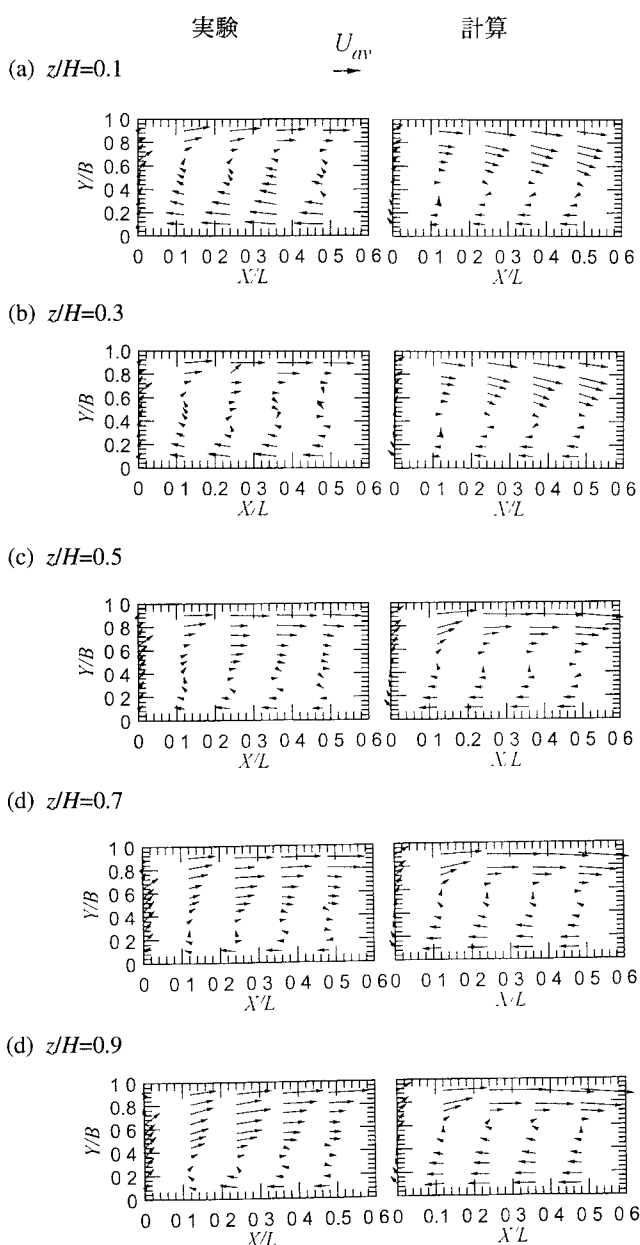


図-7 計算結果と実験結果の比較。

(a) 実験, $\theta=112.5^\circ$ (b) 計算, $\theta=90^\circ$

(a) ケース 1, 一様流

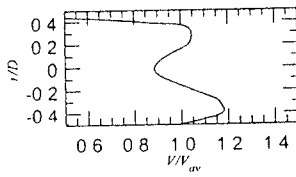
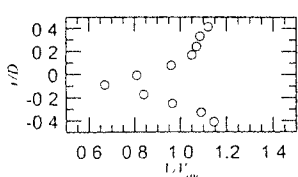
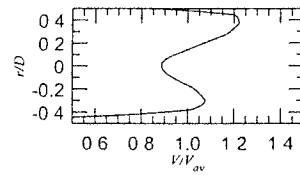
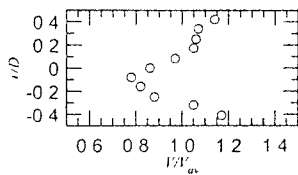
(c) 実験, $\theta=202.5^\circ$ (d) 計算, $\theta=180^\circ$ 

図-8 取水管内流速分布の比較.

水管の大きさは長さ：高さ：幅の比が 42:60:24 で格子数は $31 \times 53 \times 26$ である. $x=0$ の面より流れが流入し, 右側の円形断面取水管の下面より吸入され上方に流出する. この場合水槽への流入条件は実験で測定された速度分布と設定している. 水深をもとにしたレイノルズ数はやはり2000である.

図-6に計算結果の概要を示すために流線と断面内での流速ベクトルを示している. 実験と定量的に比較するため, 水平断面 $z/H=0.1, 0.3, 0.5, 0.7, 0.9$ での速度分布を図-7に示してある. U_{av} は取水槽流入面での断面平均流速である. 旋回流の中心の位置の水深方向の変化は逆になっているが, 大きさなどは良く合っている. 図-8は取水管流入面での鉛直速度成分の計算結果と実験結

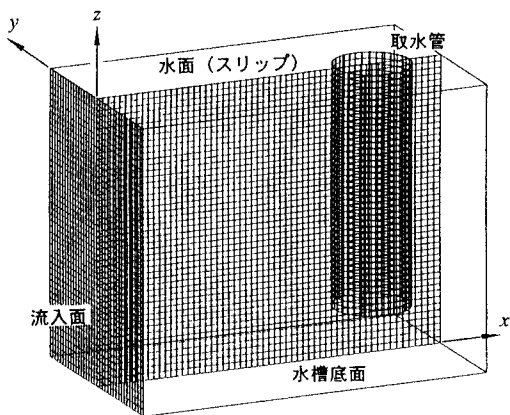
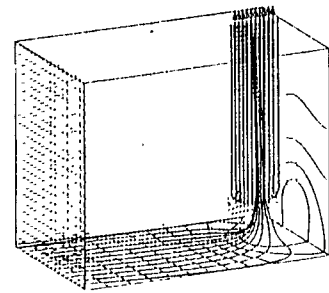
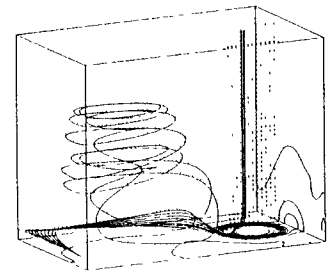


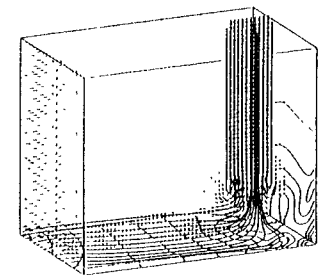
図-9 流入条件の影響を調べるための計算の格子.



(b) ケース 2, 横流れ



(c) ケース 3, 水平せん断



(d) ケース 4, 底面せん断

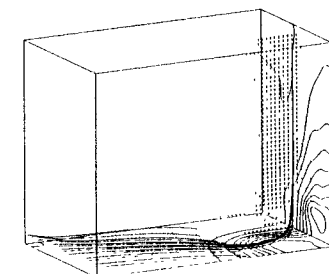


図-10 計算結果.

果を比較したものである. x - y 平面内で x 軸正の方向を $\theta=0$, y 方向を $\theta=90^\circ$ として, 実験は $\theta=112.5^\circ$ 及び 202.5° 計算は $\theta=90^\circ$ 及び 180° の線上の速度分布である. 実験値の位置と計算結果の位置はずれているが, 通常の長い管内流れと異なり, 速度は中心線近傍で最小になること, 非対称性があることなど実験に似た結果になっているのが分かる.

(3) 流入条件を変えたときの取水槽流れの計算

次に上記の計算法で異なる流入条件を設定した時の流

れの状況の予測を行う。この場合、水槽、取水管の大きさは長さ：高さ：幅の比が 5:4:3 で格子数は $60 \times 48 \times 36$ である。計算は流入速度分布の異なる 4 ケースについて行われた。ケース 1 では一様流入、ケース 2 では流入面に横流れがある場合、ケース 3 は底面上のせん断があり、鉛直面内速度勾配がある場合、ケース 4 は流入速度の水平分布が一様でない場合である。いずれのケースも流出速度と取水管直径を基にしたレイノルズ数は一定で、2000 と実験に比べかなり低レイノルズ数である。これは現在のワークステーションレベルの計算機で扱える格子数の制限で、これ以上のレイノルズ数では安定計算が出来ないためである。結果は図-10 に示されてある。流入面内、及び取水管軸を含む x 軸に平行な面内での流速ベクトルの分布、底面 $z=0$ 及び下流端壁 $x=L$ での圧力分布を等圧線で、それに流入面の底面に最も近い計算格子上の点から発する流線が示されてある。図-10(a) の一様流入流速分布の結果では壁面圧の低下も流線のねじれも見られずスムーズな流れになっている。図-10(b) は流入速度分布に水平勾配を与えたもので、取水口近傍で流線の収束と多少のよじれが見られる。また壁面での圧力低下も見られ、渦形成の初期兆候と思われる。図-10(c) は流入面に横流れを重ねたもので底面に圧力低下が見られる。流入面の隅角部で旋回が見られるがこれは与えた流入条件のためと考えられる。最後に図-10(d) は底面にせん断を与え、鉛直面内で流速勾配を与え、循環を発生させたもので、流線の収束とよじれ、圧力低下ともに見られ、渦形成と考えられる。計算のレイノルズ数に制限があるため実験条件とは多少異なるが、これらの計算結果は先に示した実験観測の傾向をよく捉えている。

5. おわりに

取水槽に置かれた取水管ベルマウスに発生する渦流を実験的に再現し、対応する数値計算を行った。実験では、取水槽の流入が一様で対称のときで旋回のない効率良いスムーズな流れが、流入面でなんらかの渦度が存在すれば取水槽内流れの状況が大きく変わり渦流になり得る事を示している。これは循環を含む流れが強力に吸引された時に、既存の渦度が凝縮されるためであると考えられる。

数値計算では現段階で扱える格子密度に制限があり、実験時のレイノルズ数よりかなり低い値で行われたが、既往の取水槽内流れの実験を再現しており、信頼性が確認された。また本実験の流入条件での異なる流況や壁面

圧低下の予測など渦流の特性も再現されることが見出された。流入面で導入水路床でのせん断と横流れの影響のある場合取水槽入り口付近での剥離渦が重要になる事も確認された。低いレイノルズ数での計算で局部粘性の効果がなかなか得られないものの渦発生初期の現象は表わせたもの考える。今後計算機の高速度大容量化に伴い更に密な格子での計算が可能でなれば、高いレイノルズ数でのシミュレーションが可能になり、もっとはっきりした結果が得られるものと期待される。高レイノルズ数になれば乱流遷移が起り、モデルの問題もある。しかし近年開発されている低レイノルズ数領域や、遷移領域にも適応出来るものを組み込める可能性もある。

謝辞：本研究は神戸大学益田奨学金の援助を受け、アイオワ大学の中藤博士の指導協力を得て行われた。ここに謝意を表する。

参考文献

- 1) Tsou, J.L., Melville, B.W., Ettema, R. and Nakato, T.: Review of problems at water intake pump sumps, Joint Power Conference, Phoenix, Oct. 1994.
- 2) Lugt, H.J.: Wirbelstromug in Natur und Technik, Verlag G. Braun, 1979, 日本語訳, 大橋, 山口: 渦—自然の渦と工学における渦, 朝倉書店.
- 3) Quick, M.C.: Efficiency of air-entraining vortex formation at water intake, Proc. ASCE J. of the Hydraulics Division, pp. 1403-1416, 1970.
- 4) Denny, D.F.: An experimental Study of air-entraining vortices in pumpsumps., Proc. Inst. Mech. Engrs. Vol. 170, No.2, pp.106-116, 1956.
- 5) 荻原能男: 空気吸入渦に関する研究, 土木学会論文報告集, 第215号, pp.15-25, 1973.
- 6) 中山昭彦: 取り入れ口渦の発生条件, 土木学会論文集 No.447/II-19, pp.9-15, 1992.
- 7) Constantinescu, G., Patel, V.C., Ansar, M. and Nakato, T.: Computational Fluid Dynamics Model for Pump-Bay Flow, IIHR Technical Report No.387, The University of Iowa, U.S.A., 1997.
- 8) Ansar, M.: Experimental and theoretical studies of pump-approach flow distributions at water intakes, Ph.D. Thesis, The University of Iowa, 1997.

(1998. 9.30受付)