

湧昇循環装置によって誘起される湖沼内流れの 数値シミュレーション

水藤 寛* 苗加 昌克*

Numerical Simulation of a Flow Induced by a Pumping-up Facilities in a Lake

Hiroshi SUITO* and Masakatsu NOUKA*

(Received December 2, 2003)

The purpose of this research is solving the flow in a lake which caused by a fan who rotates at the low speed set on the water surface for the purpose of water quality purification of a lake. Although it is shown clearly by various experiments that the water quality in a lake improved by operation of this kind of equipment, the mechanism of the flow was not fully understood. In this research, simulation of the flow which was caused by this equipment was carried out numerically, and the aspect of the flow corresponding to various conditions or the form of a lake was investigated.

Key words: Fluid dynamics, Numerical simulation

1 はじめに

水中の微生物は、酸素を消費して種々の汚染物質を分解・浄化することが知られている。しかし、流れの少ない池や湖では酸素と水の循環が滞るために、水中の酸素が不足して浄化能力が低下してしまう。そこで池や湖の水を強制的に循環させ、微生物の働きを活性化させることで水質を改善する方法が用いられている。そのような目的を持つ機構のひとつとして、低速で回転するファンを湖沼水面におくことにより池全体の水をゆっくりと循環させる方法が用いられている。本研究では、そのようなファンが湖沼内に誘起する流れを解明する目的で数値シミュレーションを行った。この種の装置の運転によって湖沼内の水質が改善されることは種々の実験・測定 [1][2] によって明らかにされつつあるが、その誘起する流れのメカニズムについては充分には解明されておらず、その流れの様相を知ることは機器の構造や配置の最適化にあたって非常に重要であると考えられる。本研究ではこの装置の引き起こす流れを数値的にシミュレートし、種々の条件や湖沼の形状に対応した流れの様相を調べた。その結果、水面で低速で回転するファンによって引き起こされた流れが水面において放射状の流れを形成すると同時に湖底から水面に上昇する流れを誘起し、結果として湖沼内の水全体がゆっくりと循環する様子が示された。

2 基礎方程式

水の運動は、次の質量保存則、運動量保存則、境界面の運動学的条件に従うものとする。

$$\lambda \operatorname{div} \mathbf{u} = 0 \quad \text{in } \Omega, \quad t > 0, \quad (1)$$

$$\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \lambda (\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u} = -\frac{1}{\rho} \nabla (\lambda p) + \nu \Delta \mathbf{u} - c \chi_b \mathbf{u} - c \chi_f (\mathbf{u} - \mathbf{u}_f) + \lambda \mathbf{g} \quad \text{in } \Omega, \quad t > 0, \quad (2)$$

$$\frac{\partial \lambda}{\partial t} + (\mathbf{u} \cdot \nabla) \lambda = 0 \quad \text{in } \Omega, \quad t > 0, \quad (3)$$

ただし、 \mathbf{u} は水の速度、 \mathbf{u}_f はファンの速度、 p は水の圧力、 t は時間、 ν は水の動粘性率、 \mathbf{g} は重力加速度、 c は物体における抵抗係数である。また、 λ は水のある領域を表す特性関数、 χ_f 、及び χ_b はそれぞれファン、側面の傾斜部分によって占められる領域を表す特性関数である。

この定式化は、通常の Navier-Stokes 方程式を仮想領域法 [8] を用いて変形し、水と空気を含めた全体の領域で成り立つ統一方程式系 [3] としたものである。

離散化手法としては差分法を用いた。MAC 法 [6] に基づいて圧力についての Poisson 方程式を解き、得られた圧力場を用いて速度場を求めてゆくアルゴリズムを採用した。移流項には 3 次精度の風上差分 [7]、その他の空間微分項には 2 次精度の中心差分を用いた。時間積分には 1 次精度の半陰解法を用いている。

* 岡山大学環境理工学部環境数理学科

計算に用いた格子は x 方向 × y 方向 × z 方向 = 100 × 20 × 100 の合計 20 万点である。格子は直交等間隔とし、格子点への変数の配置方法は、各変数を別の場所に定義するスタガード配置を用いている。

3 計算結果

3.1 水槽モデル計算

まず、比較的小さな水槽形状を用いて流れ場を求め、その概要を調べた。対象領域の形状は、上面が 1 辺 2m の正方形、深さは 0.5m とした。ファンの形状は翼の外端までが半径 60cm、内端までが半径 36cm、翼の高さが 20cm で、回転数は毎分 30 回転とする。図 1 に初期状態の全体形状を、図 1 に一定時間経過後の自由表面の形状を示す。

図 3、4 に、初期状態と一定時間経過後の底面における速度ベクトルを示す。初期状態においては底面に流れはないが、一定時間が経過すると水槽の中心に向かう流れが誘起されているのが観察される。

図 5、6 に、初期状態と一定時間経過後の垂直断面における速度ベクトルを示す。ここでも同様に、中心部では水底から水面に向かう上昇流が誘起されているのが観察される。

次に、計算された時間依存の流れ場を用いて、水底に仮想的に粒子を注入し、その運動を追跡する計算を行った。図 7 に、一定時間経過後のそれらの粒子の位置を示す。水底近くにあった水が、水面近くに導かれている様子が観察される。

3.2 池モデル計算

次に、実際の池に近い大きさの計算領域を設定して計算を行った。対象領域の形状は、上面が 1 辺 20m の正方形、深さは 1.4m で、正方形の 1 辺には角度 45 度の傾斜があるものとする。ファンの形状は翼の外端までが半径 60cm、内端までが半径 36cm、翼の高さが 20cm とし、回転数は毎分 8.86 回転とする。

まず、水槽モデル計算と同様に、時間依存の流れ場を用いて、水底に仮想的に粒子を注入し、その運動を追跡する計算を行った。図 8 に、一定時間経過後のそれらの粒子の位置を示す。水槽モデルにおける計算と同様に、底面近くの水が水面中心部に導かれている様子がわかる。

次に実時間で回転開始後 3 分まで計算し、その後の 10 回転について速度場の平均を求めた。図 9 に、中心を通る鉛直断面における平均速度ベクトルを示す。図の右端が池の中心部である。ファンのおかれている池の中心部で上昇流が誘起されているのがわかる。

図 10 に、水面における平均速度場を示す。矢印は速度ベクトルを表し、色は速度の絶対値を示している。赤が速度の絶対値（大きさ）が 20cm/s 以上、青が 1cm/sec 以下の部分である。緑はその中間、つまり 1cm/sec 以上、20cm/sec 以下の大きさの部分を示している。ファンの回転により、平均として放射方向の流れが形成されているのがわかる。

図 11 に、水底における平均速度場を示す。矢印は速度ベクトルを表し、色は速度の絶対値を示している。赤が速度の絶対値が 2cm/sec 以上、青が 1cm/sec 以下の部分であり、緑はその中間である。外側から中心に向かう流れが形成されているのが見られる。

図 12 に、水面下 70cm の平面における平均速度場を示す。矢印は速度ベクトルを表し、色は速度の鉛直方向成分を示している。赤が上方向に 1cm/sec 以上、青が下方向に 1cm/sec 以上の部分であり、緑はその中間である。

図 9、10、11、12 より、ファンの回転によって直径約 16m、高さ 1.4m の円筒状の循環領域が形成されているのが観察される。円筒の上面（水面）では中心から水平に外へ向かう放射状の流れ、円筒の側面では鉛直下向きの流れ、円筒の底面では中心に向かう水平方向の流れが形成され、円筒の中心軸付近で水底から水面に向かう上昇流が形成されている。

4 考察

水面で低速で回転するファンによって底面近くの水が水面に導かれていくようすが、水槽モデル、池モデルともに観察された。これは、この種の装置の運転によって、ゆっくりではあるが池全体の水を循環させることが可能であることを示しており、溶存酸素を増加させることによって微生物の働きを活性化させるであろうことが期待されるものである。

今回の計算は風によって水面に与えられる応力、温度分布による密度変化、植生の影響等を無視した理想的な基本方程式に基づいて行っている。実際の湖沼における流速については、実験との比較による計算結果の評価が必要であり、それらの詳細な検討を行うことは今後の課題である。

参考文献

- [1] "湧昇循環方式を用いた水質・底質の改善実験", (財) 琵琶湖・淀川水質保全機構, (株) 高環境エンジニアリング, (2002).
- [2] "バイオファン公開実験経過報告書", NPJ ノルウェー物産 (2002)
- [3] E. Baba, H. Kawarada, W. Nishijima, M. Okada and H. Suito, *Waves and Tidal Flat Ecosystems*, Springer, (2003).
- [4] H. Fujita, H. Kawahara and H. Kawarada, "Distribution Theoretic Approach to Fictitious Domain Method for Neumann Problems", *East-West J. Numer. Math.*, Vol. 3, No.2, pp.111-126, (1995).
- [5] R. Glowinski, J. L. Lions and R. Tremolieres, "Numerical Analysis of Variational Inequalities", North-Holland publishing Company, (1981).
- [6] F. H. Harlow and J. E. Welch, "Numerical calculation of time-dependent viscous incompressible flow of fluid with free surface", *Phys. Fluids*, 8, 2182-2189, (1965).
- [7] T. Kawamura and K. Kuwahara, "Computation of high Reynolds number flow around a circular cylinder with surface roughness", *AIAA paper*, 84-0340, (1984).
- [8] H. Kawarada and H. Suito, "Numerical Method for a Free Surface Flow on the bases of the Fictitious Domain Method", *East-West J. Numer. Math.*, Vol. 5, No. 1, pp.57-66, (1997).

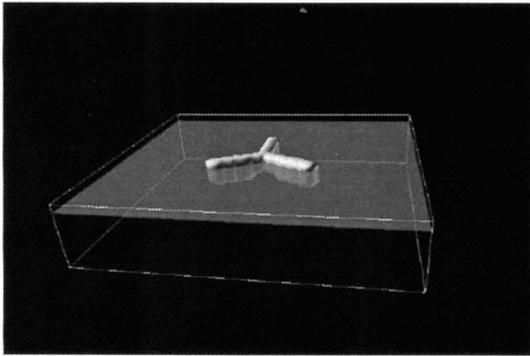


図 1: 水槽モデル：自由表面形状（初期状態）

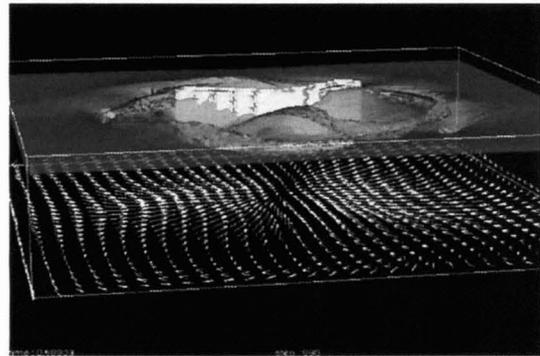


図 4: 水槽モデル：底面における速度ベクトル（一定時間経過後）

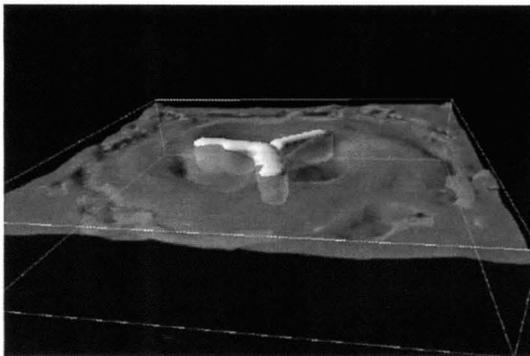


図 2: 水槽モデル：自由表面形状（一定時間経過後）

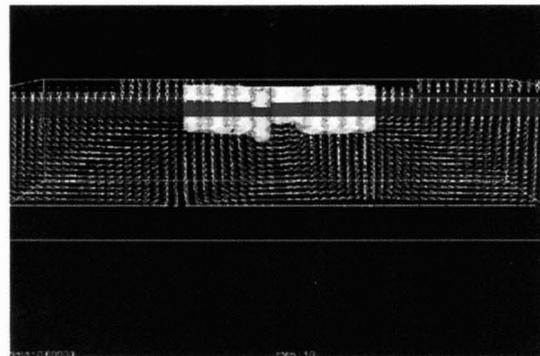


図 5: 水槽モデル：垂直断面における速度ベクトル（初期状態）

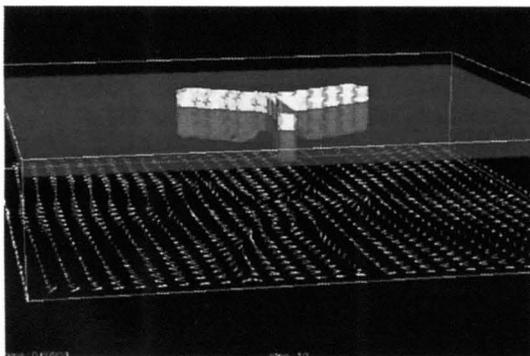


図 3: 水槽モデル：底面における速度ベクトル（初期状態）

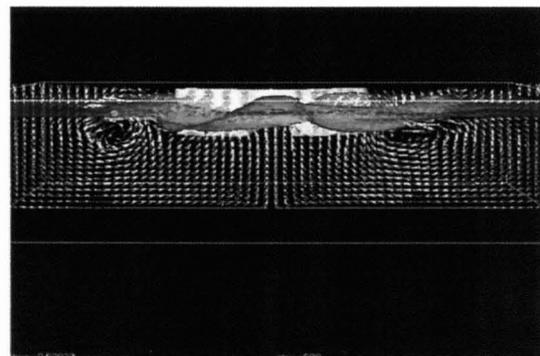


図 6: 水槽モデル：垂直断面における速度ベクトル（一定時間経過後）

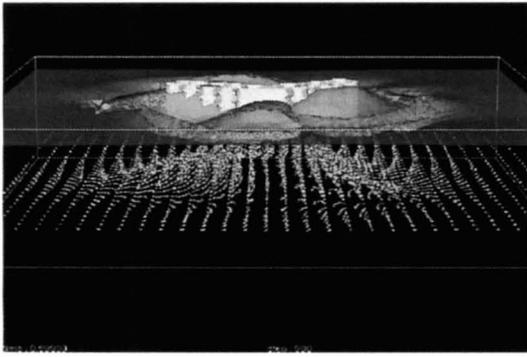


図 7: 水槽モデル: 仮想粒子追跡

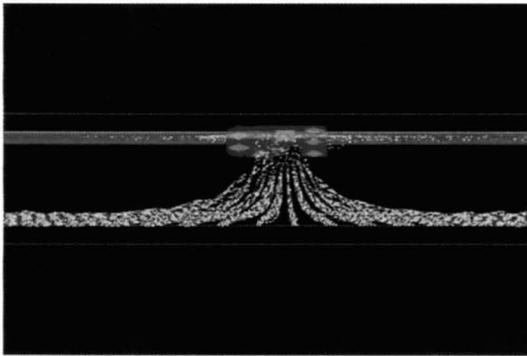


図 8: 池モデル: 仮想粒子追跡



図 9: 池モデル: 垂直断面における時間平均速度ベクトル

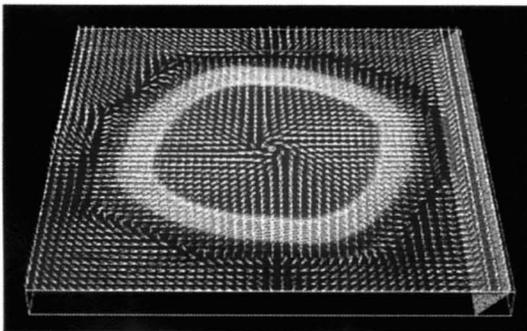


図 10: 池モデル: 水面における時間平均速度ベクトルおよび速度の絶対値

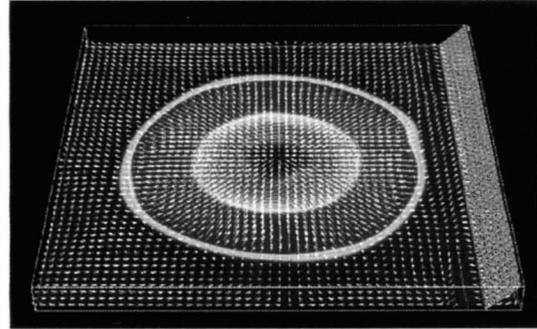


図 11: 池モデル: 底面における時間平均速度ベクトルおよび速度の絶対値

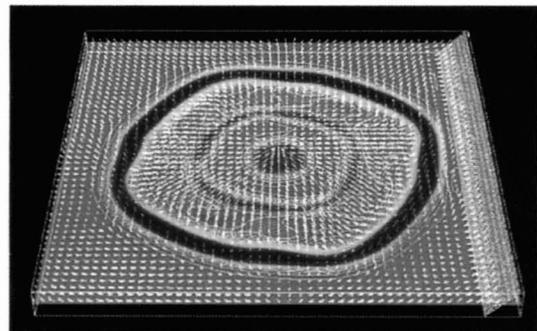


図 12: 池モデル: 水面下 70cm における時間平均速度ベクトルおよび鉛直方向の速度成分