

水面被覆を伴う閉鎖性水域における風波シミュレーション Wind Wave Simulation in a Closed Water Body with Covering at Water Surface

濱上 邦彦* 藤原 正幸**

HAMAGAMI Kunihiko, FUJIHARA Masayuki

1. はじめに

ため池などの閉鎖性水域では流入流出が少なく、水域内流動が乏しいため、水温成層が顕著となる夏期においては貧酸素化などの水質問題がしばしば発生する。このような閉鎖性水域における水質浄化の一手法として、水生植物により栄養塩類を吸収し系外へ排出する手法が提案されているが、同手法においては水面における水生植物の繁茂が水域内流動の駆動力である風や熱の作用に影響を及ぼすことが考えられ、この影響について評価することが重要であると言える。

本研究では、流動の駆動力の一つである風的作用について、閉鎖性水域における風波発達の特徴および被覆による影響を検討するために数値シミュレーションを行った。

2. 数値モデルの概要

本研究では、LES モデリングに伴うフィルタリング操作が施された以下の基礎方程式を用いる。

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial \rho}{\partial x_j} = -\rho \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} \quad (1)$$

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{P}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_i} (2(\nu + \nu_e) \bar{D}_{ij}) - g \delta_{i2} \quad (2)$$

$$\frac{\partial \bar{P}}{\partial t} + u_i \frac{\partial \bar{P}}{\partial x_i} = -\rho C_s^2 \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} \quad (3)$$

ここに、添え字 $i, j (=1, 2, 3)$ はそれぞれ (x, y, z) 軸方向を示し、上付きの $\bar{\quad}$ は GS 成分での値を示している。また、歪みテンソル \bar{D}_{ij} 、 \bar{P} は以下のように定義される。

$$\bar{D}_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right), \quad \bar{P} = \bar{p} + \frac{1}{3} \rho \tau_{ii} \quad (4)$$

ここに、 $\tau_{ij} = u_i u_j - \bar{u}_i \bar{u}_j$ は SGS のレイノルズ応力である。SGS 渦動粘性係数 ν_e は、乱流エネルギーの SGS 成分 k の輸送方程式に対して局所平衡を仮定することにより、次のようにモデル化される。

$$\nu_e = (C_{smg} \Delta)^2 |\bar{D}| \quad (5)$$

ここに、 C_{smg} はスマゴリンスキー定数である。

また、数値モデリングとしては CIP 法をベースとした C-CUP 法を用いており、圧力に関しては連続の式より求めたポアソン方程式を SOR 法を用いて解いた。また、自由表面である気液界面を明確に区別するために、密度関数を導入した。

計算領域は主流、スパン、鉛直方向にそれぞれ 168cm, 20cm, 25.6cm とし、格子点数を 220 点, 25 点, 32 点とした。格子間隔はすべて 0.8cm となる。流入部には 8cm の風洞を設けて風速 1m の一様な風を流入させた。流出部においては勾配 1 の消波域を設けた。以下の計算結果においては液相のある水槽部のみを表示する。

3. 計算結果の考察

3.1. 風波形状

Fig.1 は送風開始後 10 秒における水面形状を示している。送風後まもなく風的作用により、スパン方向にほぼ一様な風波が形成される。吹送距離に伴って、その波高・波長が大きくなり、吹送終端部において、吹き寄せられた表層水が下層に潜り込む形で循環流が形成されることがわかる。

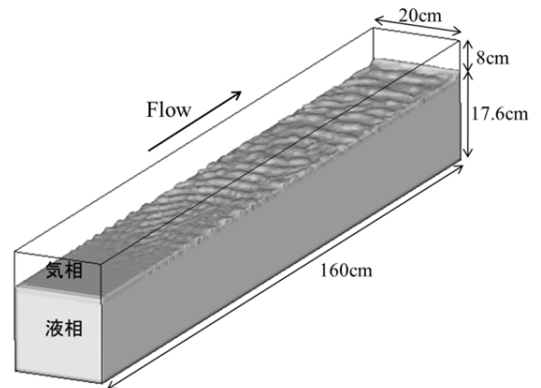


Fig.1 送風開始 10 秒後における界面形状

*岩手大学農学部 Faculty of Agriculture, Iwate University, **愛媛大学農学部 Faculty of Agriculture, Ehime University

キーワード：閉鎖性水域，吹送流，水生植物，風波

3.2. 風波のスペクトル

風波の実験においては、Fig.1 に示したような 2 次元的な風波のエネルギースペクトルには顕著なピークが見られる。Fig.2 は風波の変動時系列より求めたパワースペクトルを示しており、図中の F は水槽における位置を、実線は Phillips (1958) が導いた発達した風波のスペクトル特性の式

$$ps(f) = \beta g^2 f^{-5} \quad (6)$$

を表している。ここに、 ps は風波のスペクトル、 f は周波数、 g は重力加速度である。なお、 β は Burling (1967) が与えた $\beta = 9.51 \times 10^{-6}$ を用いた。水槽始端部付近における界面変動は小さく、そのスペクトル形状も異なっていたが、風波が視覚的に形成されている領域においてはその吹送距離ともない (6) 式に近づくことがわかり、このことから本数値計算で得られた風波の界面挙動は概ね妥当であると判断できる。

3.3. 第二不変量分布

本数値計算においては、気相・液相を同時に解いているため、自由界面において行われる渦の鉛直輸送の特性を知ることができる。Fig.3 は気側および液側界面近傍における速度勾配テンソルの第二不変量 Q の等値面を示している。なお、図中には初期水面（静止水面高さ）における流下方向速度の乱れ強度をカラー表示している。図より、気相においては、スパン方向に対して平行に発達している風波に沿って、2 次元的な渦構造が形成されていること、液相においても、風波の峰に沿う、スパン方向に平行な渦構造を確認でき、流れ場が三次元性の強い渦構造であることがわかる。

3.4. 被覆の影響

以上の結果より、本数値計算での風波の再現計算の妥当性が示された。これを用いて水面被覆が風波の発達に及ぼす影響について検討を行った。

Fig.4 は風向に対して一様な被覆が水槽中央部に存在する場合の被覆部付近における界面形状および液相の速度分布を示している。水面形状より、被覆の存在により風波の発達が阻害され、被覆後には波高が著しく減少していることがわかる。また液相においては、吹き寄せにより運ばれた上層流が下方へと輸送されている。これにより、水槽内の循環流が分断され、二つの大きな循環流が形成

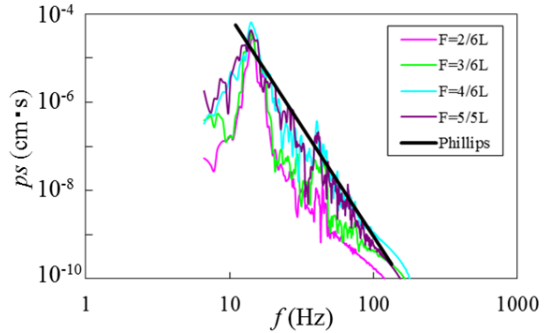


Fig.2 風波のスペクトル

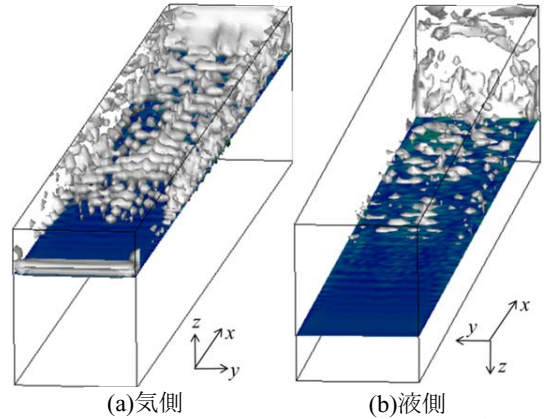


Fig.3 第二不変量の等値面図 ($Q=100s^{-1}$)

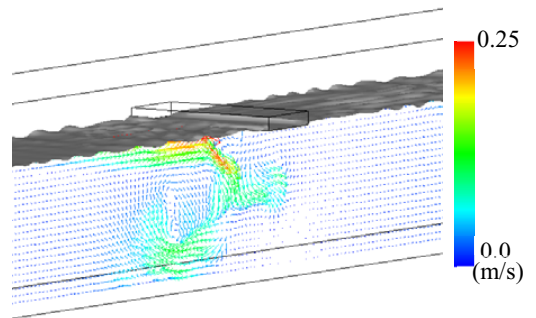


Fig.4 一様被覆部における速度ベクトル

されることがわかる。

4. おわりに

水面被覆を伴う水域内の流動予測モデルの開発のために風波の再現計算を行った。被覆の存在は風波の発達を阻害し、水域内の流れに大きく影響を及ぼすことを示した。

参考文献：山下晋，肖鋒，青木尊之，高橋桂子 (2010) : CIP 有限体積法による風波シミュレーション，ながれ 29, pp.277-286