

風成流場における浅い湖での底質の浮遊機構に関する研究

Simulation of Sediment Resuspension Transport

by Wind Driven Current in a Shallow Lake

*

**

辻本剛三・H. G. Stefan・日下部重幸

By Gozo TSUJIMOTO, Heinz G. STEFAN and Shigeyuki KUSAKABE

The mechanism of sediment resuspension transport by wind driven current in a shallow lake was studied by means of a turbulence model where a shear stress by wave motion and a fall velocity of sediment described by a flocculation were included. The flow mechanism and the sediment concentration profiles depend on the aspect ration, and its tendency is similar to that in the field and experiment. Also the shear stress due to wave motion and the change of fall velocity due to a flocculation can not significantly affect the vertical profiles of sediment concentration.

Keywords: wind driven current, turbulence model, sediment

1. はじめに

湖や湾のような閉鎖性の強い水域の水質を考えていくうえで、底質の挙動はきわめて重要である。特に窒素やリンなどの物質は底面の泥や微粒子に付着したり、あるいはその内部に入り込んだ状態で存在しているので、底質の浮遊・移動・滞留時間が水質の変化に直接影響を与えることになる。閉鎖性の水域での流れに起因する外力としては、熱、風等である。年間を通じての流れは、水表面からの熱の収支で決定されるが、短期的な変動は風に起因する風成流が主であると考えられる。

一般に風成流は循環流や波浪を伴うために、大坪ら¹⁾やShengら²⁾はこれらを考慮した底質の挙動を検討しているが十分な議論がなされていない。特に水域全体への底質の浮遊機構を考えるには、波浪に伴う流れよりも循環流がきわめて重要である。しかしながら循環流のみによる底質の挙動に関する研究は少ない。現地においても循環流だけ形成されている場合はきわめて少ない。

本研究は湖のような閉鎖性の水域で風により形成される循環流による底質の浮遊機構について、水深及び波浪の影響を考慮した数値計算で検討を行ったものである。なおここで

* 正会員 工博 神戸市立工業高等専門学校助教授 都市工学科 (〒651-21 神戸市西区学園東町8-3)

** Ph.D ミネソタ大学教授 セントアソソニーフォールズ 水理学研究所 (Minneapolis, MN, USA)

***正会員 神戸市立工業高等専門学校教授 都市工学科 (〒651-21 神戸市西区学園東町8-3)

は、浅い湖を対象としているので密度成層の影響は考慮していない。

2. 計算手法

著者の1人は波動場の砂粒子の浮遊機構⁸⁾や密度成層場における密度界面の変動⁴⁾に関する検討を乱流モデルにより行っている。ここで用いる方程式群は基本的にはこれらと同じであるため、ここでは境界条件と計算条件の扱いについて述べる。本研究では底質の浮遊機構を明らかにすることを目的としているので、 x_1 : 水平方向、 x_2 : 鉛直方向とする鉛直2次元で計算を行った。底質の浮遊が流れの構造に与える影響は小さいとして、計算時間の節約のために流れの運動方程式と底質の拡散方程式は別々に解いている。また、波浪の影響は流れ場の計算には直接取り込まずに拡散方程式中に考慮した。

2. 1 境界条件

一定の風速の風が水面に作用するとして、水面ではせん断応力が一様に作用するとして、せん断応力をRodneyら⁵⁾にならって次式で与える。

$$\tau_s = C_d \cdot \rho_a \cdot w^2 \quad (1)$$

ここで、 τ_s : 水面でのせん断応力、 C_d : 抗力係数、 ρ_a : 空気の密度、 w : 風速である。抗力係数は次式で与えられる。

$$\begin{aligned} C_d &= 0.0005 \cdot w^{0.5} & w < 15 \text{ m/秒} \\ C_d &= 0.0026 & w > 15 \text{ m/秒} \end{aligned} \quad (2)$$

これらより水面における流れの境界条件は以下のように与えられる。

$$\tau_s = (\nu + \nu_t) \partial u_1 / \partial x_2 \quad (3)$$

$$u_2 = 0 \quad (4)$$

ここで、 u_1 、 u_2 : x_1 、 x_2 方向の流速、 ν 、 ν_t : 水の粘性係数、渦動粘性係数である。

湖のような水表面に外力が作用する場における乱れエネルギー k とその逸散率 ε に関する知見は充分でないため、ここではPatelら⁶⁾が提案している壁面乱流に関する実験式を適用して k 、 ε を摩擦速度により求めた。

底面、両壁面の流速、乱れエネルギー、及びその逸散率は以下のように与えた。

$$u_1 = u_2 = k = 0 \quad (5)$$

$$\varepsilon = 2 \cdot \nu \left(\partial k^{1/2} / \partial x_i \right)^2 \quad (6)$$

ここで、 $i = 1$: 両壁面、 $i = 2$: 底面である。底質に関しては4章で述べる。

2. 2 計算条件

計算領域は長さ L : 1000m、水深 h : 2.5、10m(ケース1、2、3)の矩形断面とした。風速は10m/秒、底質は中央粒径 d_s : 0.001cm、沈降速度 w_{s0} : 0.0087cm/秒として計算を行った。水平方向に41分割、鉛直方向に21分割し、底面、壁面および水面近傍は細かく分割し、コントロールボリューム法で差分化した。時間刻みは1秒間隔として、一定風速の風が吹き続ける条件でシンプル法で計算を行った。

3. 流れの構造について

3. 1 表面流速の変動

図-1に湖のほぼ中央付近における表面の水平流速の時間変動を示す。計算初期の風応力の作用直後から表面流速が発達し、時間経過に伴い定常状態に達する。定常状態における表面流速の値はおおよそ風速の1.5~3.0%であると言われており⁷⁾、計算結果はおおむね妥当な値を得ている。さらにアスペクト比(L/h)の低下に伴い水表面の流速が増大していることがわかる。これらの傾向は鶴谷ら⁸⁾の実験結果においても示されている。一般に定常状態に達する時間は断面の形状や風速等に依存すると考えられる。この要因を水面の圧力

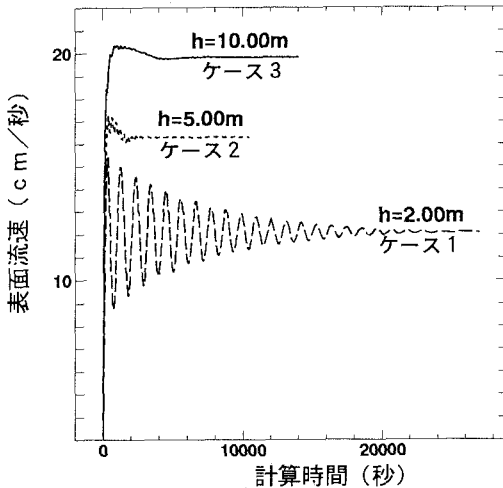


図-1 表面流速の変動

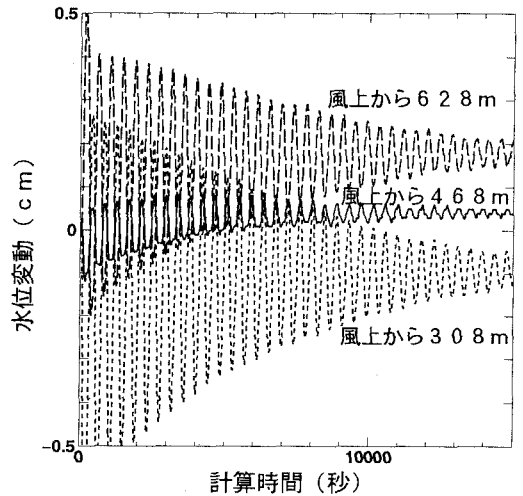


図-2 水面の水位変動(ケース1)

を水位に換算して検討する(図-2)。 L/h が大きい場合、計算の初期に水表面の圧力はオーバーシュート気味になるために、振動を繰り返して定常状態に達する。水面の振動周期は約435秒でレイリーによる理論値(452秒)にほぼ等しくなっている。しかし図-1の流速の変動周期(約1000秒)とは一致しない。この理由は明らかではないが、Liggett⁹⁾は渦動粘性係数の値によって表面流速の変動周期が異なることを示している。一方、図には示していないが、水深が増加すると計算初期に定常状態近傍の圧力値に達するために振動を生じることなく、一定値に漸近する。

3. 2 流速分布

図-3に定常状態におけるケース3の流線を50(cm^2/s)の間隔で示す。風下側の壁面近傍では速い鉛直下向きの流れが発生し、これを補流する鉛直上向きの流れが風下側で生じ、そのために風下側では鉛直方向に長い循環流がその近傍で形成されている。そのために風上側での鉛直上向き流れはそれほど顕著ではない。つまり風により発生する水表面での流れは、水域全体で釣り合っているのではなく、壁面のごく限られた領域でその流量が釣り合っているために、底面近傍の戻り流れは小さくなっている。この傾向は L/h 比が小さいほど顕著である。

図-4に水平流速の鉛直分布を示す。風向きの表面流速によって壁面近傍には逆向きの流れが形成されているが、境界層の発達は著しくはなく、表面流速値の数%程度の速度である。また流速が反転している位置は、水深の30%程度の場所であり、 L/h が増加するに伴いその位置が低下している。

3. 3 乱流量について

図-5に乱れエネルギーの分布を1(cm/s)²の間隔で示す。水表面からのエネルギーが下方に伝達する様子が再現されている。特にアスペクト比の増加に伴いその影響が底面近傍まで広がっている。また、風下側の壁面近傍で鉛直下向きに広がっている。

図-6に渦動粘性係数の分布を2(cm^2/s)の間隔で示す。従来より湖の流れを扱う場合、

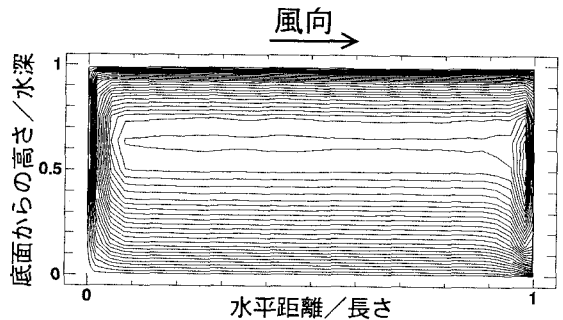


図-3 流線(ケース3)

その値を鉛直方向に一定として扱うことが多い。しかしながら各ケースとも鉛直方向に値が分布し、水深の中程でその値が最も大きくなっている。その地点は、図-5の乱れエネルギーの分布とは異なり、流速が反転している近傍である。特に水深が浅いケースでは、他のケースと比較して水面での乱れエネルギーの値が著しいにも関わらず、渦動粘性係数はきわめて小さな値となっている。これはエネルギー逸散が水面近傍では大きくなるためである。また風下側では鉛直下向きの速い流れに伴う、渦動粘性値の大きな領域が発生している。アスペクト比の減少に伴い、値の大きな領域が中心部に張り出してきている。

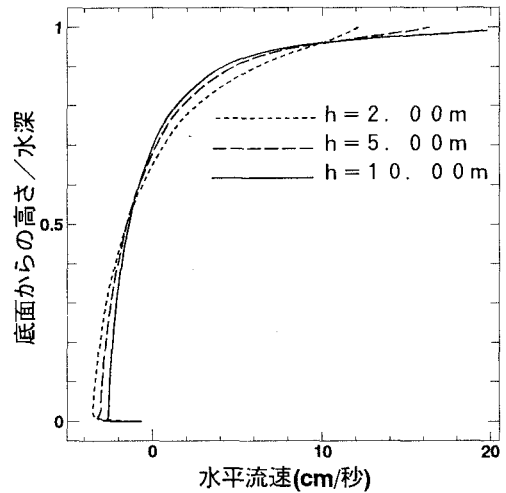


図-4 水平流速の鉛直分布

4. 底質の浮遊機構について

底質の拡散は、浮遊砂の保存式中の拡散係数を渦動粘性係数と同値に定めて、流れ場の運動方程式と同じ手法で解く。

4. 1 境界条件

湖や湾のような水域の底質は、海岸や河川で扱うような砂粒子とは異なり、粒径がきわめて細い泥が主であるために底質の特性を考慮しなければならない。例えば底質自身は電気的な性質を有しているために、フロックによって沈降速度が変化し、また一旦、浮遊した底質は容易に沈降しないために、非平衡な状態になっている。このような特性は数値計算では容易に取り込むことができる。

フロックと沈降速度 w_s の関係は DeVantie $r^{10)}$ や Zeng $r^{11)}$ によって示されているように、その場における底質の濃度値 c やせん断応力 τ の値に関係し(7)、(8)式のように表されている。

$$w_s = \alpha \cdot w_{s0} \cdot c^\beta \quad (7)$$

$$w_s = w_{s0} \cdot \exp(-k \cdot (\tau - \tau_c)) \quad (8)$$

ここで、 α 、 β ：実験定数、 w_{s0} ：フロックのない状態での沈降速度、 k ：実験定数、 τ_c ：限界せん断応力である。(7)式から底質濃度の増加は沈降速度を増加させ、(8)式からせん断応力の増加は沈降速度を減少させる関係になっている。せん断応力の増加は底面からの底質の浮遊を促進させるため浮遊底質の濃度の増加となり(7)、(8)式は相反する。本来、フロックによる沈降速度の扱いには底質の特性を考慮しなければならないが、現時点では十分な議論がされていないので、本計算では底質濃度の影響による沈降速度の変化を(7)式を用いて計算を行う。

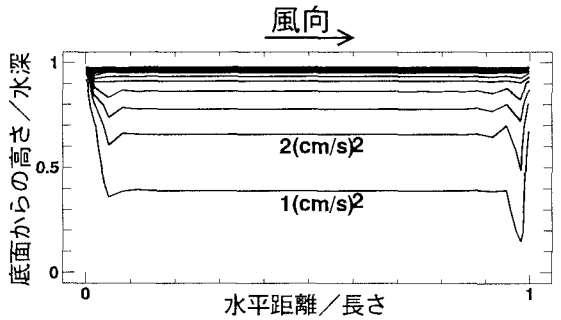


図-5 乱れエネルギー (ケース2)

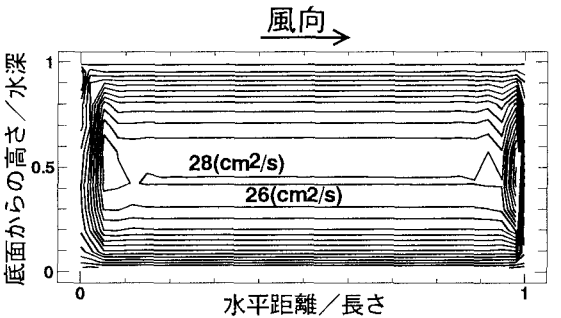


図-6 渦動粘性係数 (ケース2)

波浪の影響は Wilson $r^{12)}$ の有義波高の推定式において、吹送距離を 1 km として有義波

高、有義周期を算出し、得られた波浪条件から微小振幅波を仮定して底面のせん断力を推定した。波動場の底面付近のせん断応力は、周期的な振動を繰り返しているためにそのスケールと方向は時間的に変動する。しかしながら、現実的にはその時間スケールはきわめて短いためその影響は底面にのみ作用すると考えられる。よってここでは半周期間の平均的なせん断応力が底面に常に作用するとして計算を行った。

また、底面の非平衡性は沈降フラックス、乱れによるフラックス、再浮上量を考慮した Shengらや Fukuda¹³⁾ の考えかたに倣った。ただし再浮上量は底質の特性によって異なるために、ここでは Kendrick の提案している式⁵⁾を考慮して次式で与える。

$$-ws \cdot c + \frac{\nu_t}{\sigma_t} \frac{\partial c}{\partial x_z} = -E \tag{8}$$

$$E = 0.00711\tau_b$$

ここで、 c ：底質の濃度、 ν_t ：渦動粘性係数、 σ_t ：シュミット数（＝1.0）、 E ：再浮上量(kg/m²sec)、 τ_b ：底面のせん断応力(N/m²)である。

水面では表面を横切るフラックスがゼロの条件を課している（上式で $E = 0$ とおく）。計算は定常状態における流れ場の値を用いて底質濃度の時間的な変化を検討した。

4. 2 濃度分布

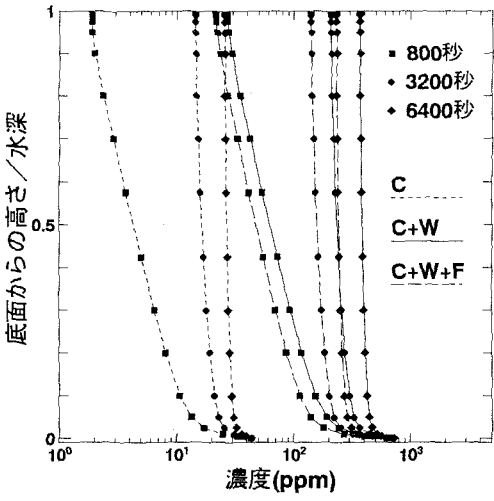
図－7 に湖の中央付近におけるケース1の底質濃度の鉛直分布の時間的な変化を示す。図中 c ：循環流、 w ：波浪、 F ：フロックの影響を表している。時間経過に伴い鉛直方向に一様に分布する、現地で観測されている結果と定性的に一致している¹⁴⁾。循環流のみ、循環流と波浪、循環流と波浪とフロックと各要素が底質の濃度分布形状に与える影響はあまりない。ただ循環流のみによる濃度値は極めて小さく、波浪による影響が大きいことがわかる。またフロックにより底質濃度の減少が見られる。

水域全体における循環流のみによる濃度の分布を図－8に示す。図中の線は10ppm値である。水深によって浮遊機構が異なり、水深が浅いケース1では底面の底質が一様に浮上し、時間経過とともに水域全体の濃度が一様になり、その時間応答も早い一方、水深が深いケース3では、風下側から底質が浮上し、風上側の濃度値は小さいままであり、時間応答もきわめて遅い。ケース2では、初期の分布形状はケース3に類似して風下側から浮遊するが、時間経過と共にケース1のように水域全体に分布する。

5. まとめ

本研究では、閉鎖性の水域における風送流による底質の浮遊機構について数値計算により検討し、次のような知見を得た。①流れの構造や底質の浮遊機構はアスペクト比の影響を受ける②フロックの影響は濃度分布の形状には影響を及ぼさない。③波浪による底面せん断応力の底質濃度の分布形状への影響はあまり見られない。今後は風速、波・流れ共存場、底面形状を考慮した底質の挙動の検討を行う必要がある。

謝辞：本研究の大部分は、第一著者がミネソタ大学セントアンソニーフォールズ水理学研究所に文部省・神戸市在外研究員として滞在中（1993年4月～10月）に行われた



図－7 底質濃度の鉛直分布（ケース1）

ものである。ここに記して謝意を表す。

参考文献

1)大坪国順・村岡浩爾：霞ヶ浦における底泥の再浮上に関する現地観測およびシミュレーション、第29回水理講演会論文集、pp.353-358,1985

2)Sheng,Y.P and W.Lick:The transport and resuspension of sediments in a shallow lake,J.G.R.,Vol.84,No.C4,pp.1809-1826,1979

3)Tsujiimoto G. et al.: A study on suspended sediment concentration and sediment transport mechanism over rippled sand bed using a turbulence model,Coatal Eng.in Japan, Vol.34,No.2,pp177-189,1991

4)道奥康治・辻本剛三・宮本仁志：吹送密度流の流動・混合特性、水工論文集、第37巻、pp.293-298,1993

5)Rodney M.W. and H.G.Stefan:Conceptual model for wind-generated sediment resuspension in shallow ponds,Proc. National Symposium on Mixing, Hydrology, Sedimentology and Reclamation,pp.263-268,1987

6) Patel V.C.,et al. : Turbulence models for near-wall and low Reynolds number flows(Review),AIAA,Vol.15,No.23,pp.1308-1319,1985

7)Smith I.R.:Hydraulic conditions in isothermal lakes,Freshwater Biology,pp.119-145,1979

8)鶴谷広一・中野晋・加藤始・一戸秀久：吹送流に関する風洞実験、港湾技術研究所報告、第22巻、第2号、pp.127-174,1983

9)Liggett J.A.:Unsteady circulation in shallow homogeneous lakes,ASCE,Vol.95,HY4,1969

10)Bruce A.DeVantier and Leo C.Rijn:Effect of basic parameters on computed concentration and transport rates,Advances in Hydro-Science and Eng. Vol.1,pp.630-637,1993

11)Xiaochuan Zeng,Kai Yen and Yixin Yan:Study on the behaviors of cohesive sediment in the Yangtze estuary,24th ICCE,Abstract,pp.62-63,1994

12)例えば水理公式集、土木学会、pp.486-487、1985

13)Fukuda,M.K.:The entrainment of cohesive sediments in fresh water,Ph.D. dissertation,Case Western Reserve Univ.,1978

14)Erdmann J.B.,H.G.Stefan et al.:Some aspects of sediment resuspension in Duluth-Superior harbor, Univ. of Minnesota,SAPHL,External Mem.,No.230,1992

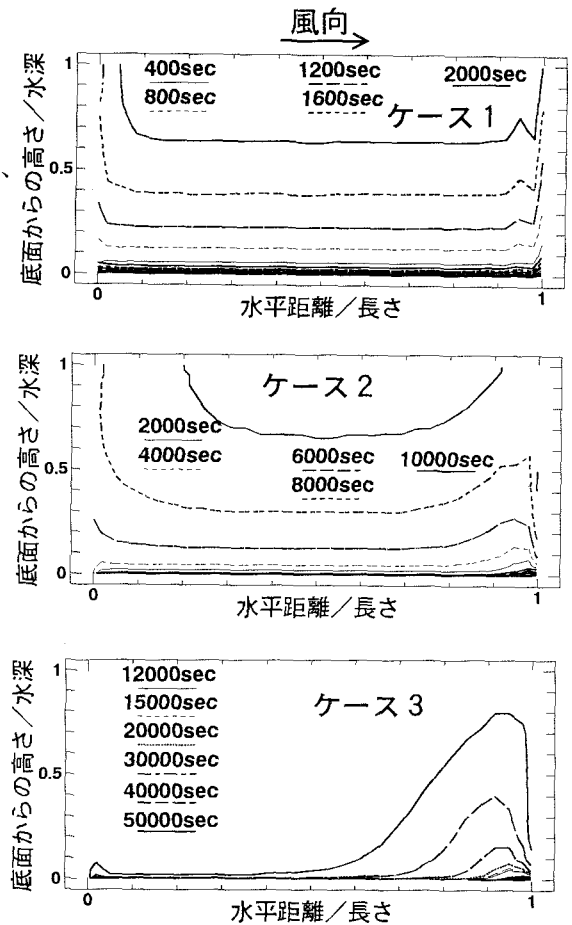


図-8 循環流のみの濃度分布