

波運動による底泥物質の掃流現象に関する基礎研究

住友 恒*・石橋道生**・栗山由彦***

1. はじめに

水系に堆積した沈降性の汚濁物質は水の運動により沈降、再浮上を繰り返し、水質の悪化に大きな影響を与えている。特に水質汚濁で問題となる物質はヘドロなどに見られるように微細な粒子を含み、粘着性が強く、従来から掃流、浮流の対象として扱われてきた流砂とは性質の異なるものである。そこで水質の変化に注目して、水質物質の掃流現象について以下若干の検討を加えた。

2. 水質物質の掃流現象について

従来、掃流の問題を扱う際には、粒子に作用する力のバランスから考える限界掃流力の考え方が中心であった。しかし水質汚濁物質は多くの場合、微細粒子であり、小さい流体運動でも移動することが考えられる。このような点から掃流を固体と液体との関係で考えるよりも、液体と液体との混合としてとり扱った方が説明しやすいのではないかと考える。言い換えれば、流体運動場では水質物質は固体として底面に沈殿しているのではなく、非常に高濃度の流体が底面に存在するものとするわけである。以上のような点から、本研究では対象とする場をまき上げによって底面から水質が流入し拡散して行く上層と、水質物質が高濃度で一緒に混合している粘性の影響の強い底層とに分割して考える。

これら二層の密度が比較的近い場合は密度流における水量水質交換の問題として考えることができる。著者らは淡塩水二層流間の水質混合に関して、碎波に限定せず量的にバランスした波の変形と往復運動によっても水質の移動がおこると考えて、境界面の乱れ特性を考慮して水質交換を評価することをすでに試みた¹⁾。

本研究においても底層の粘性流部から上層への水質の移動を交換面の乱れから考察してみた。

ところで、掃流で対象とする物質は沈降性の物質であり、イオン性物質や溶存酸素などのような溶解性物質ではない。したがってその質量輸送プロセスを数式化する

際には特に注意が必要である。すなわち粒子と流体相互の影響、たとえば粒子の流体に対する相対速度などが問題となって来る。本研究では上層へ流入してくる物質は微細粒子であると考え、流体とともに運動するとして流体に対する影響は特に考慮しなかった。上記の理由から適用限界などについては今後さらに考察が必要と考えている。

3. 理論的考察

ひとまず、一般開水路流における掃流現象について考察してみる。図-1 におけるように流れは二次元と考えて底面に原点をとり、水平方向に x 軸を、鉛直方向上向きに z 軸をとる。水深を h 、境界面を η とする。 η は時間的に変動しており、この変動に関与する何らかの水理因子の特性によって水質物質が上層へ輸送されると考える。 η の時間平均を δ とする。この中では水質は一緒に混合されているとする。

水質の収支式は次式である。

$$\frac{\partial c}{\partial t} + \frac{\partial(cu)}{\partial x} + \frac{\partial(cw)}{\partial z} = w_0 \frac{\partial c}{\partial z} \dots\dots\dots(1)$$

ここで、 c は濃度、 u, w はそれぞれ流速の x 成分と z 成分、 w_0 は沈降速度で下向きを正とした。実際の場合では水質物質は凝集、破壊などをおこし w_0 は変化すると考えられるが、ここでは一定と考えた。

式 (1) を境界面 $z=\eta$ から水面 $z=h$ まで積分して次式を得る。

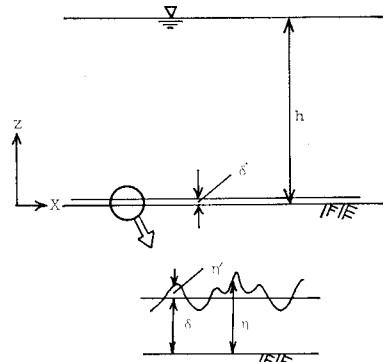


図-1 Schematic figure of notation

* 正会員 工博 京都大学助教授 工学部衛生工学科
** 正会員 工修 現(株)東京電力
*** 学生会員 京都大学大学院工学研究科 衛生工学専攻

$$\int_{\eta}^h \frac{\partial c}{\partial t} dz + \int_{\eta}^h \frac{\partial(cu)}{\partial x} dz + \int_{\eta}^h \frac{\partial(cw)}{\partial z} dz = \int_{\eta}^h w_0 \frac{\partial c}{\partial z} dz \dots\dots\dots(2)$$

水面の変動は対象とする水質の混合に関してはこの場合ほとんど影響を与えないものと考え h は一定とみなす。 η は時間的に変動しているから式(2)で考えているコントロールボリュームは時間変動している。そこで積分区間を η の平均値である見かけの境界面 δ から h までの部分 (δ, h) と、時間変動部 (η, δ) とに分割する。

$$\int_{\delta}^h \frac{\partial c}{\partial t} dz + \int_{\delta}^h \frac{\partial(cu)}{\partial x} dz + \int_{\delta}^h \frac{\partial(cw)}{\partial z} dz + \int_{\eta}^{\delta} \frac{\partial c}{\partial t} dz + \int_{\eta}^{\delta} \frac{\partial(cu)}{\partial x} dz + \int_{\eta}^{\delta} \frac{\partial(cw)}{\partial z} dz = \int_{\delta}^h w_0 \frac{\partial c}{\partial z} dz + \int_{\eta}^{\delta} w_0 \frac{\partial c}{\partial z} dz \dots\dots\dots(3)$$

式(3)より次式を得る。

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_{\delta}^h cz dz + \frac{\partial}{\partial x} \int_{\delta}^h cudz = - \frac{\partial}{\partial t} \int_{\eta}^{\delta} cz dz - \frac{\partial}{\partial x} \int_{\eta}^{\delta} cudz - [cw]_h + w_0[c]_h - w_0[c]_{\eta} \quad (4)$$

上式が上層部における水質物質の保存式である。左辺第1項は考えている体積での平均濃度変動、第2項は移流による流入項、右辺第1項、第2項が境界面の変動による底層から上層への水質移動を表わし、第3項は水面の条件、第4項、第5項は沈降により水面から落ちてくるものと、底層へ堆積して行くものを示している。

ここで $\delta - \eta = \eta'$ とおき、この間では c, u など諸量が一定と見なせるという近似を行なえば、式(4)は次式のように一層明瞭となる。

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_{\delta}^h cz dz + \frac{\partial}{\partial x} \int_{\delta}^h cudz = - \frac{\partial}{\partial t} (c_0 \eta') - \frac{\partial}{\partial x} (c_0 u \eta') - [cw]_h + w_0[c]_h - w_0 c_0 \dots\dots(5)$$

ここで c_0 は (δ, η) 間で定数と考えた c の値で底層濃度と考えられる。

式(5)より、平均的には一定厚さ δ の境界層の、瞬間的な変動 η' によって底層濃度 c_0 が上層に運び込まれるとともに、沈降によって底層へ堆積して行くと考えられる。

底層ではすでに述べたように、粘性の大きい水質物質が乱れによって一様に混合されていると考えられる。上層への飛び出し η' は、せん断応力、乱れの状態、水質物質の特性などによって規定されよう。

底層での挙動を流体に関する境界層の理論から考察してみる。乱流境界層では境界面を通して乱流状態とポテンシャル流とが不規則に流出入を繰り返している。境界層内の流速変動は境界層外縁に近づくにつれて小さくなり激しい乱流運動を示す区間と、ほぼ一定の速度を持続

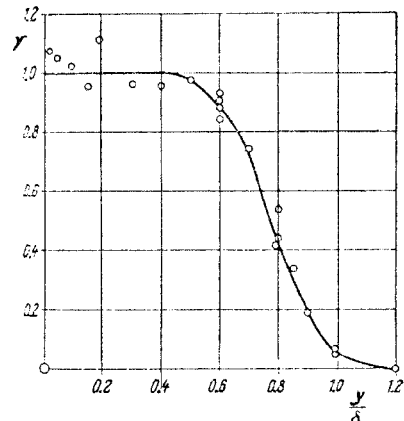


図-2 Variation of the intermittency factor r in a turbulent boundary layer measured by P.S. Klebanoff (Schlichting: Boundary Layer Theory)

する区間とが交互に出現し、壁から離れるにつれて層流部分のしめる割合が多くなる。この乱流変動のしめる割合 (intermittency factor) r は 図-2 のようになることが報告されている²⁾。本研究で導入した水質に注目した底層を乱流境界層と同様に考えることができるかどうかは今後検討すべき点であるが、 r が境界層からポテンシャル流れ部への飛び出しを示すことを考えれば、 η' による水質混合を r との関係から定量化できるのではないかと考えている。

4. 実験的考察

η' の物理的な性格を考察するには至らないが、研究の第一段階として、ここではつぎのように考えて、波運動下での水質物質の掃流について、実験的考察を行なった。

式(5)より

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_{\delta}^h cz dz + \frac{\partial}{\partial x} \int_{\delta}^h cudz = - \frac{\partial}{\partial t} (c_0 \eta') - \frac{\partial}{\partial x} (c_0 u \eta') - [cw]_h + w_0[c]_h - w_0 c_0$$

ここで h のかわりに対象とする水深を上層中の z_0 までとると次式を得る。

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_{\delta}^{z_0} cz dz + \frac{\partial}{\partial x} \int_{\delta}^{z_0} cudz = - \frac{\partial}{\partial t} (c_0 \eta') - \frac{\partial}{\partial x} (c_0 u \eta') - [cw]_{z_0} + w_0[c]_{z_0} - w_0 c_0 \dots\dots(6)$$

右辺の第3項、4項はいま考えている体積の上面を通しての水質の流入である。右辺第1項、2項、5項が底層との間の水質の流出入である。そこでこれを見かけのまき上げ量と考えて次のようにおく。

$$\left\{ - \frac{\partial}{\partial t} (c_0 \eta') - \frac{\partial}{\partial x} (c_0 u \eta') - w_0 c_0 \right\} \rho = q \dots\dots(7)$$

したがって式(6)は次のようになる。

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_{\delta}^{z_0} cdz + \frac{\partial}{\partial x} \int_{\delta}^{z_0} cudz = \frac{q}{\rho} - [cw]_{z_0} + w_0[c]_{z_0} \quad (8)$$

式(8)は上層底面から厚さ $(z_0 - \delta)$ の体積について考えた水質の保存式である。

波運動開始直後のたち上がり期では

$$\frac{q}{\rho} \gg [cw]_{z_0} - [c]_{z_0} w_0$$

と考えられるから式(8)は次のようになる。

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_{\delta}^{z_0} cdz + \frac{\partial}{\partial x} \int_{\delta}^{z_0} cudz = \frac{q}{\rho} \quad (9)$$

さらに z_0 を δ の近くにとれば、波運動下では u は小さな周期運動であり、一定の時間スケールで現象をみれば移流による効果は無視できる。

$$\int_{t_1}^{t_2} \frac{\partial}{\partial t} \int_{\delta}^{z_0} cdz dt = \int_{t_1}^{t_2} \frac{q}{\rho} dt \quad (10)$$

したがってまき上げ量をたち上がり期の濃度変化で表わすと次のようになる。

$$q = \frac{\rho}{t_2 - t_1} \left\{ \left[\int_{\delta}^{z_0} cdz \right]_{t_2} - \left[\int_{\delta}^{z_0} cdz \right]_{t_1} \right\} \quad (11)$$

ただし、 $(t_2 - t_1)$ は周期の一定倍時間。

一方、波運動開始後十分な時間が経過した後の平衡状態では式(8)の左辺は0とみなすことができ、右辺第2項も w は周期運動をするから一周期について時間で積分すれば0である。したがって次式を得る。

$$\int_{T_1}^{T_2} \frac{q}{\rho} dt + w_0 [c]_{z_0} \int_{T_1}^{T_2} dt = 0 \quad (12)$$

ただし $(T_2 - T_1)$ は周期の一定倍時間とすればよい。ゆえに平衡状態のデータからまき上げ量を表わすには、平均量を用いて次のように示される³⁾。

$$q = \rho w_0 [c]_{z_0} \quad (13)$$

以上述べた式(11)、(13)を用いて実測し、実験の結果から、底面せん断応力と q との関係を調べた。

底面せん断応力は波形の実測値から理論式を用いて計算した。

5. 実験概要

実験は図-3に示すように長さ7m、深さ0.5m、幅0.3mの片面透明塩化ビニル張りの水路に造波器をとりつけて行な

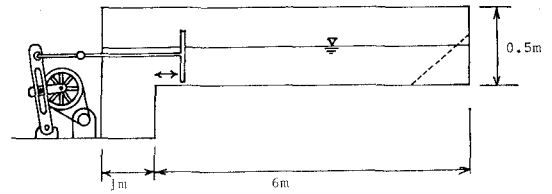


図-3 Experimental flume

った。水質物質としては微細粒子を含み粘着力を有する性質をもつものが必要であるので、沈降性の炭酸カルシウムおよび処理後の下水汚泥を用いた。水質物質は水路中に厚さ約1cmに敷きつめ半日沈降させた。波運動をおこし時間に対する濃度の変化を濃度が平衡状態になるまで測定した。測定は水質物質上面から2cm上の点で行なった。同時に平衡状態での水深方向鉛直濃度分布を測定した。濃度の測定はすべて光電管式の濃度計を用いた。波高は電気抵抗線式の波高計を用いて測定した。波速はストップウォッチによって測った。

6. 実験結果

たち上がり時の時間濃度曲線の傾きより式(11)を用いて q を計算した。濃度は1秒おきによりみとり、3秒の平

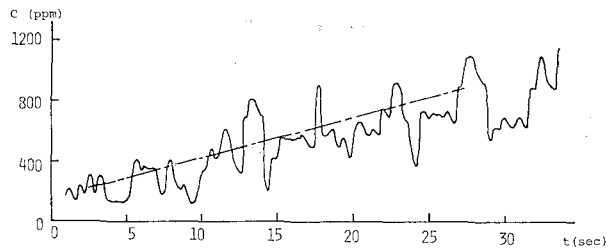


図-4 An example of measured data

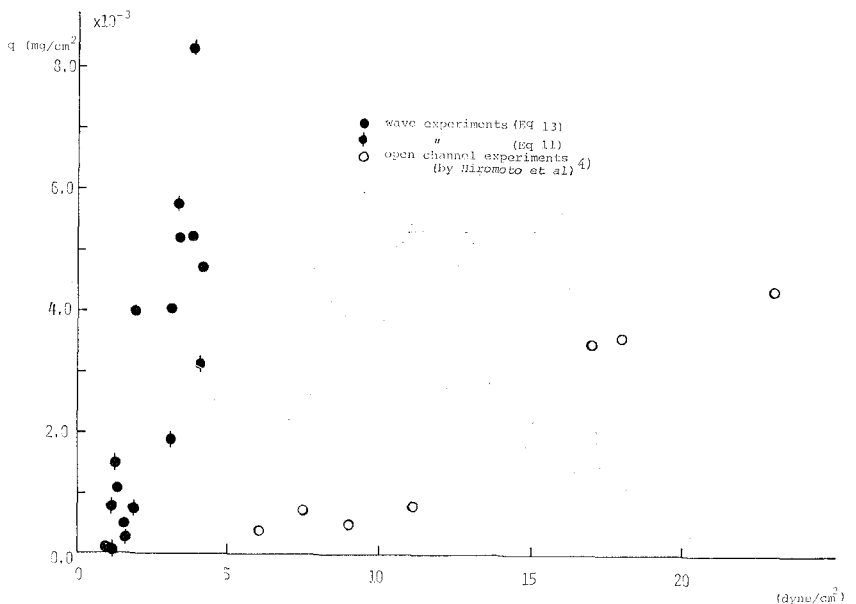


図-5 q versus τ (CaCO_3)

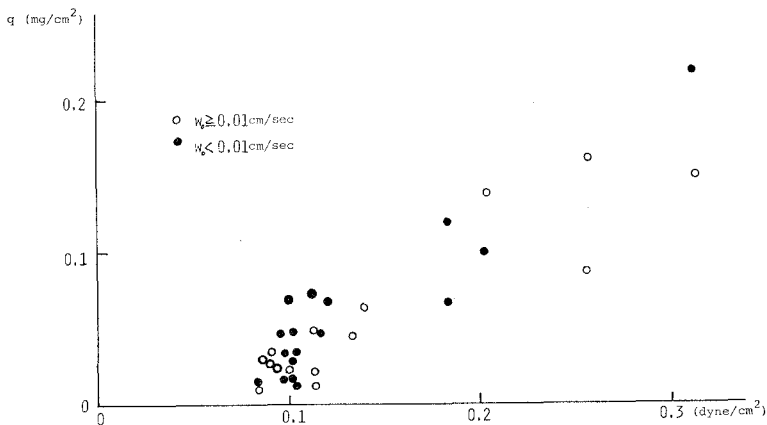


図-6 q versus τ (下水汚泥 Eq. 11)

均値が 100 ppm をこえる点と 3 秒の平均値が 800 ppm をこえる点を結んで勾配を求めた。この方法がたち上がり曲線の平均勾配を最もよく表わしていると考えたからである。一例を図-4 に示す。こうして求めた q をせん断応力 τ に対してプロットしたものが 図-5, 図-6 である。どちらの図もせん断応力の増加に伴って q が増加する傾向がみられるが、炭酸カルシウムの方が下水汚泥の場合よりばらつきが少ない。これは下水汚泥は性状が複雑であるのに対して炭酸カルシウムの粒子はほぼ均一であるためと考えられる。各実験ごとに行なった沈降分析の結果を見ても、沈降速度は炭酸カルシウムがほぼ平均して 0.014 cm/sec であったのに対し、下水汚泥は 0.002 cm/sec ~ 0.023 cm/sec と広範囲にわたっている。

式(13)を用いて沈降速度と平衡状態における濃度分布を用いて q を求めた。平衡状態の濃度分布および波運動停止後の濃度分布の変化の一例を図-7 に示す。沈降分析として、波運動停止後の水路を沈降筒の代用をなし得ると考えて 図-7 より沈降速度を計算した。こうして求めた q を τ に対してプロットしたものを、炭酸カルシウム

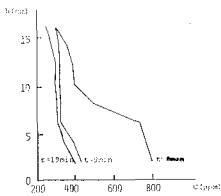


図-7 An example of vertical concentration distribution

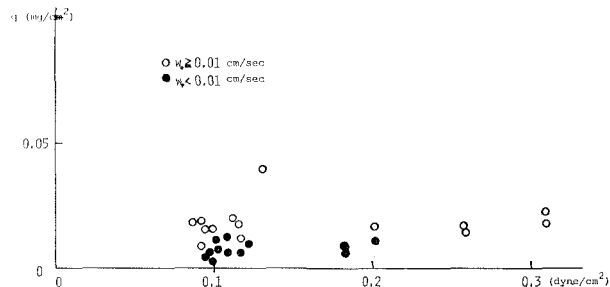


図-8 q versus τ (下水汚泥 Eq. 13)

および下水汚泥についてそれぞれ 図-5 中および 図-8 に示す。両図より q は τ の増加に伴って増加する傾向が見られる。この場合も下水汚泥より炭酸カルシウムの方が傾向が明瞭である。

図-5 より炭酸カルシウムを用いた実験では q の値はほぼ同じ値を示し、平衡状態の濃度分布と初期状態の濃度変化の両面より流出量を検討することが可能になると考えられる。図-6, 図-8 より下水汚泥を用いた実験では q は式(11), (13) のどちらかで計算しても

τ に対して同じ傾向がみられると言うものの、q の値は約 2~10 倍の差がある。これはさきにも述べたように、下水汚泥は種々の性格をもった粒子を含み、さらにそれらが凝集や破壊を繰り返すため、沈降速度を一定と見なすことができないためであると考えられる。

実験設備の關係でせん断応力のもっと小さい部分での測定は行なえなかったが、水質物質は種々の特性をもった粒子が混合しているので限界掃流力などの定義は容易でないと考えている。

7. まとめ

水質物質は種々の物理的、化学的特性をもった粒子の混合したものであり、かつそれらが互いに影響をおよぼしあっている。この点を考慮して本研究では水質物質のまき上げに関して限界掃流力を考えるよりも、二相流れの混合という立場から考察を加え、交換面の乱れからの評価を試みた。交換面の乱れによる水質の移動に関しては今後検討をかさねたい。さらに波運動下におけるまき上げ量を初期状態の濃度変化と平衡状態の濃度分布から定量化した。その結果比較的均一粒子である炭酸カルシウムについては一定の一致をみたが下水汚泥については因子が複雑なためさらに検討すべき問題を残した。

参考文献

- 1) 住友・山田・松岡・栗山: 淡塩水二層境界面における水質混合について, 土木学会第21回海岸工学講演会, 1974年11月.
- 2) Schlichting: Boundary-Layer Theory, McGRAW-HILL, 1968.
- 3) 石橋: 波による水質汚濁物質の掃流現象に関する研究, 京都大学修士論文, 1975年2月.
- 4) 住友・弘元・松尾: 水質物質の掃流に関する実験研究, 土木学会年講, 昭48年10月.