

河口域における潮汐作用による堆積物 - 直上水間の鉛直輸送現象を利用した水質浄化に関する研究

九州大学工学部 学生会員 ○土屋大輔 九州大学大学院 学生会員 柏原宏輔
九州大学大学院 フェロー 楠田哲也

1. はじめに

河口域は、河川を流下してきた懸濁物質の沈降や、河川水と海水との混合による凝集(懸濁物質のフロック化)が生じ、陸上から排出されてくる物質や海洋から運ばれてくる物質の集積場所となっている。河口域の堆積物中には、多くの底生生物が生活しており、そのため、そこは浄化能力の高い場となっている。従って、堆積物-直上水間の物質輸送量が増加すれば、底生生物による浄化作用が活発になると考えられる。河口域での物質輸送現象としては、分子拡散、バイオターベーションや巻き上げによる輸送などが知られている。これら以外に、潮汐作用による堆積物-直上水間の水を媒介とした物質輸送現象がある。河口域では、潮汐作用により水位が変動する。水位変動により、堆積物内の圧力が変動し、堆積物内の気泡が収縮・膨張する。そのことにより、鉛直方向の水輸送が生じる(図-1)。本研究では堆積物-直上水間に水輸送を発生させる気泡の性質を保持する装置(気泡保持容器:図-2)を堆積物中に設置し移動水量を増加させる実験及びモデルの構築を行った。

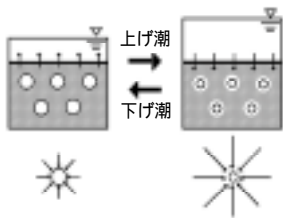


図1 潮汐作用による輸送現象の概要

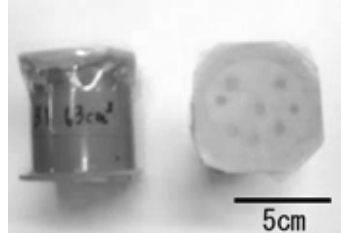


図2 気泡保持容器の全体写真

2. 実験の方法

図-3 に示すように実験用試料にマノメータを連結し、装置内に配置する。装置は試料格納部とエアコンプレッサーから成り、コンピュータにより試料にかかる圧力を調節できるようになっている。本装置を用い、潮汐変動幅約 4.5m 相当に擬した圧力変動を試料に与え、一時間毎にアクリルパイプに連結したマノメータの水位変動と堆積物表面位置を読みとり、これらの値から堆積物中に流入した移動水量を算出する。上記の実験方法を用い、気泡保持容器を堆積物試料内に設置する前の試料未攪乱の状態(case1)、容器内が空気のみ時に試料中に容器を設置した状態(case2)、容器を水で満たし容器の効果を無

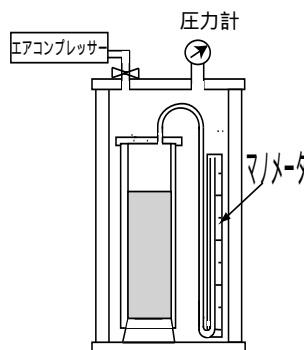


図-3 圧力制御装置略図

くしたときに試料中に容器を設置した状態(case3)の3パターンで実施した。

また、試料の透水係数を実験前に測定した。

3. 気泡保持容器を用いての水移動モデルの概要

水底堆積物は、固相(底泥粒子)、液相(間隙水)、及び気相(気泡)から構成され、各相に作用する力として、土粒子の水中重量、粒子間接触による有効応力、土粒子に挟まれている気泡の変形により伝達される見かけの有効応力、間隙水が土粒子に対して相対運動する際に粒子に作用する流体粘性力、水位変動に伴い変化する水圧、及び大気圧を考える。式の誘導に際し、以下の仮定を設ける。

- 1)土粒子及び間隙水は非圧縮性である。
- 2)土粒子群の圧密や間隙水の移動は一軸的に行われる。
- 3)気相は有効応力伝達気相(気相)と間隙水移動影響気相(気相)に分けられる。
- 4)各相のレイノルズ数は小さく、慣性を無視できる。
- 5)底泥の堆積状況は、少なくとも水平方向には均一である。
- 6)堆積物内での気泡の生成・消滅は無視できるほど小さい。
- 7)気相分率はかなり小さいため、気泡による浮力、透水係数の変化、及び間隙水が気泡に対して相対運動する際に、気泡に作用する流体粘性力は無視できるほど小さい。
- 8)気相は固相に付着しているため、相対速度は存在しない。
- 9)気相は水圧の変化によって移動し、それにより堆積物表面が変動する。
- 10)移動水量は気相の膨張収縮により発生し、気相は全く影響しない。
- 11)気泡保持容器は堆積物表層から常に一定の深さに存在する。
- 12)本モデルでは容器の形状は考慮しない。
- 13)容器の移動水量増加効果は容器の穴の総断面積にも影響を受ける。
- 14)容器内の気泡体積は十分大きいいため、この気泡の表面張力はこの気泡にかかる他の力と比較しても無視できるほど小さい。
- 15)容器の気泡にはボイルの法則が常に成立する。
- 16)容器内の水圧は吸水断面の水圧と等しい。

鉛直上方を正とする。

連続の式

$$\text{液相: } \frac{\partial \varepsilon_l}{\partial t} + \frac{\partial V_l}{\partial z} = \delta(z = n_c) q_c \quad (1)$$

$$\text{固相: } \frac{\partial \varepsilon_s}{\partial t} + \frac{\partial V_s}{\partial z} = 0 \quad (2) \quad \text{気相: } \frac{\partial C_{gl}}{\partial t} + \frac{\partial N_{gl}}{\partial z} = 0 \quad (3)$$

$$\text{ここで, } \varepsilon_{gl} = C_{gl} \frac{RT}{P_w + P_\sigma} \quad (4) \quad \frac{\partial C_{gl}}{\partial t} + \frac{\partial N_{gl}}{\partial z} = 0 \quad (5)$$

$$\varepsilon_{gII} = C_{gII} \frac{RT}{P_w + P_\sigma} \quad (6) \quad N_{gl} = C_{gl} v_{gl} \quad (7)$$

$$N_{gII} = C_{gII} v_{gII} \quad (8) \quad V_l = \varepsilon_l v_l \quad (9) \quad V_s = \varepsilon_s v_s \quad (10)$$

$$V_{gl} = \varepsilon_{gl} v_{gl} \quad (11) \quad V_{gII} = \varepsilon_{gII} v_{gII} \quad (12)$$

$$\varepsilon_l + \varepsilon_s + \varepsilon_{gl} + \varepsilon_{gII} = 1 \quad (13)$$

全体の応力平衡は、仮定から各層に作用する応力の合力を0として、

運動方程式全体：

$$\frac{\partial}{\partial z} (P_l + P_s + P_{gl}) + \{ \varepsilon_s (\rho_s - \rho_l) + (\varepsilon_{gl} + \varepsilon_{gII}) (\rho_g - \rho_l) \} g = 0 \quad (14)$$

$$\text{液相: } \frac{\partial}{\partial z} \left\{ \frac{\mu}{k} \left(V_l - \frac{\varepsilon_l V_s}{\varepsilon_s} \right) \frac{\varepsilon_s + \varepsilon_{gII}}{\varepsilon_s + \varepsilon_{gl} + \varepsilon_{gII}} + \left(V_l - \frac{\varepsilon_l V_{gl}}{\varepsilon_{gl}} \right) \frac{\varepsilon_{gl}}{\varepsilon_s + \varepsilon_{gl} + \varepsilon_{gII}} \right\} = 0 \quad (15)$$

固相と気相、気相については、有効応力の固相、及び気相の伝達率が気相分率に比例しているとして、

$$\text{固相: } \frac{\partial}{\partial z} \left\{ \frac{\mu}{k} \frac{\varepsilon_s + \varepsilon_{gII}}{\varepsilon_s + \varepsilon_{gl} + \varepsilon_{gII}} \left(V_l - \frac{\varepsilon_l V_s}{\varepsilon_s} \right) + \left(\varepsilon_s (\rho_s - \rho_l) + \varepsilon_{gl} (\rho_g - \rho_l) \right) \right\} g = 0 \quad (16)$$

$$\text{気相: } \frac{\partial}{\partial z} \left\{ \frac{\mu}{k} \frac{\varepsilon_{gl}}{\varepsilon_s + \varepsilon_{gl} + \varepsilon_{gII}} \left(V_l - \frac{\varepsilon_l V_{gl}}{\varepsilon_{gl}} \right) + \left(\varepsilon_{gl} (\rho_g - \rho_l) \right) \right\} g = 0 \quad (17)$$

ここで、 ε ：体積分率、 V ：体積(空塔)速度、 v ：実速度、 l, s, g ：それぞれ液、固、気相を表す、 μ ：それぞれ気相の有効応力伝達部分、非伝達部分を表す、 t ：時間、 C_g ：底泥単位体積当りの気相の質量、 N_g ：単位水平面当りの気相の質量、 T ：絶対温度、 R ：気体定数、 P_w ：水圧(大気圧、過剰間隙水圧を含む)、 P_σ ：表面張力による気泡内圧増分、 P_s ：有効応力、 P_l ：過剰間隙水圧、 P_{gl} ：気相が伝達する有効応力、 μ ：液相の分子粘性係数、 k ：透水係数、 ρ ：密度、 g ：重力加速度、 q_c ：容器内の水圧状態で決まる値

4. 実験結果及び本モデルによる計算結果との比較

図-4～6 にそれぞれ 17.5cm³、30cm³、60cm³ の容器を使用した時の圧力-移動水量関係を示す実験値の一部とそれに対するモデルによる計算値を示す。各実験での透水係数は各図の下に示す。

グラフには Case1、Case2、Case3、モデル Case2、モデル Case3 を示す。モデル Case2 は Case2 の本モデルによる計算値、モデル Case3 は Case3 の本モデルによる計算値である。実験結果より、容器体積が大きくなるにつれ移動水量の増加量が上昇することがわかる。しかし、容器体積に対する移動水量増加量の変化速度は体積が増加するにつれ減少することが確認できる。これは堆積物の

透水係数が小さいためと考える。すなわち、透水係数の小ささが気泡に流入する水量の変化を水位変化より遅らせるためである。体積の小さい容器では実験値とモデルの計算値は近い値もしくは、やや計算値のほうが大きな値になる傾向が見られる。逆に、大きな容器では、実験値のほうが大きな値になりやすいと考えられる。Case2 の下半分の曲線が実験値とモデルの計算値では非常にずれていることが確認できる。また、本モデルは透水係数の影響を大きく受ける特徴もある。

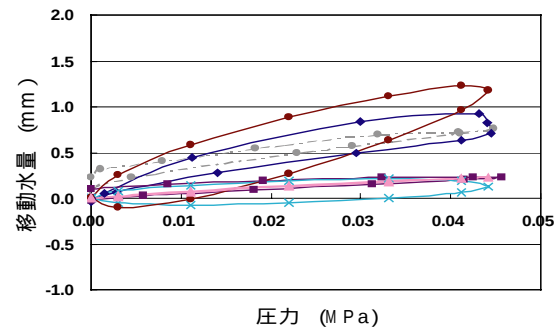


図4 $k=1.51 \times 10^{-9} \text{ m/s}$ 17.5cm³容器設置時の圧力と移動水量の関係

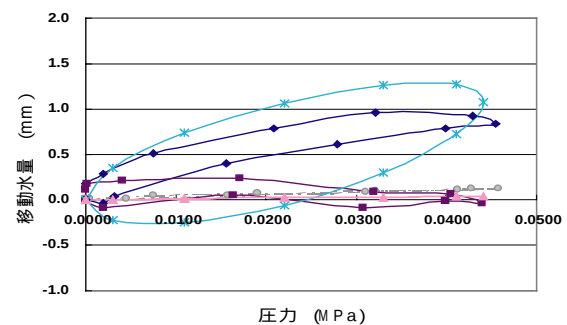


図5 $k=1.37 \times 10^{-7} \text{ m/s}$ 30cm³容器設置時の圧力と移動水量の関係

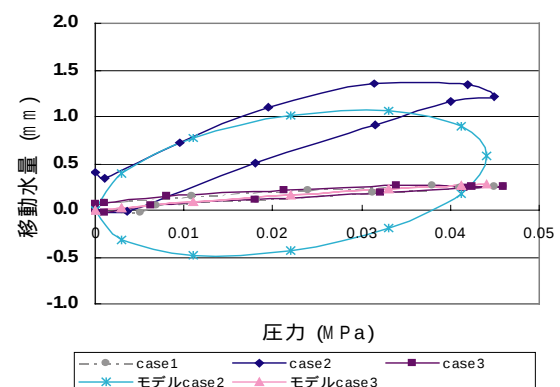


図6 $k=1.04 \times 10^{-7} \text{ m/s}$ 60cm³容器設置時の圧力と移動水量の関係

5. 結論

- 1) 堆積物中における気泡保持容器による移動水量増加効果は容器体積が増加すると共に増加する。増加効率は反対に、減少する。
- 2) 本モデルは容器体積が小さいと過剰に、容器体積が大きいと過少に値を示す。
- 3) 本モデルの計算値は実験値以上に透水係数の値に強く影響される