

(63) 潮汐変動により誘発される水-堆積物間の鉛直流の評価

Vertical Advection between Surface Water and Sediment by Tide

○崎田 省吾^{*}, 久保 浩司^{**}, 橋本 文子^{***}, 楠田 哲也^{****}

Shogo SAKITA^{*}, Koji KUBO^{**}, Ayako HASHIMOTO^{***} and Tetsuya KUSUDA^{****}

ABSTRACT; A Vertical transport process of substances between sediments and water in tidal rivers and shallow coastal zones is caused by swelling and shrinking of bubbles in the sediments such as nitrogen, due to increase and decrease in porewater pressure by tide. When water level is rising, the porewater pressure is increasing and bubbles in the sediments are gradually shrinking. When lowering, conversely, the porewater pressure is decreasing and the bubbles are swelling. As a result, it brings vertical water flow between sediments and water.

In this study, the vertical profile of volumetric gas content on some sediment cores and the transported water volume between sediments and water are measured and the relation between volumetric gas content and transported water volume is investigated. Furthermore, this process is simulated with a newly developed model. The results show that this additional transport process plays an important role in vertical mass transport. This process is applicable to water purification by increasing air bubbles in sediments.

KEYWORDS; estuary, sediment, tide, vertical transport process, numerical modeling

1. はじめに

河川感潮域や浅海域には、陸域・沿岸域から多くの有機物が輸送・集積されることより、底泥内の微生物活性が非常に高くなっている。加えて、潮汐の影響により水位、DO、塩分等が周期的に変動するといった複雑な水理学的条件が付与されるため、河川感潮域は、周辺沿岸域全体の水質に大きな影響を与えるとともに、多様な生態系を保持する場として極めて重要である。

一般に、このような水域の堆積物内の物質輸送は、溶存態物質については拡散によって、懸濁態物質については沈降・堆積や生物擾乱によって行われると考えられている¹⁾。また、自然界に放出された重金属類や内分泌攪乱化学物質の多くは、コロイド等の微細な粒子態有機物やフミン等の溶存態有機物に吸着された形で存在し、吸脱着、及び移動を繰り返していることが知られている²⁾。したがって、このような水域における水質を正確に評価・予測するためには、物質輸送を正確に評価することが重要であるが、先に挙げた輸送方法以外、鉛直輸送に関するものは見当たらない。

本研究では、水-堆積物間の新たな物質輸送形態について検討するため、潮汐変動によって誘発される鉛直流に着目した。これは、底泥内の気相（例えば、脱窒によって生じる N_2 ）が、潮汐による水位差

^{*}九州大学大学院工学研究院附属環境システム科学研究センター (Institute of Environmental Systems, Graduate School of Engineering, Kyushu University)

^{**}新日本開発工業(株) (Project Engineering and Consultants Co.LTD)

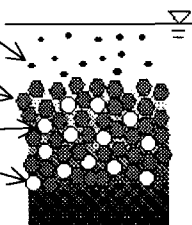
^{***}九州大学大学院工学府 (Graduate School of Engineering, Kyushu University)

^{****}九州大学大学院工学研究院 (Graduate School of Engineering, Kyushu University)

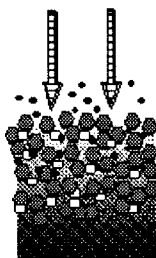
微細な粒子態有機物や
吸着性溶存態物質

堆積物

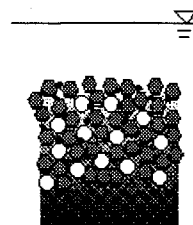
気泡



(a)



(b)



(c)

図-1 潮汐による鉛直方向移流発生概念図((a)干潮→(b)満潮→(c)干潮。水位の上昇による間隙水圧の増大が、堆積物中の気泡(例えば N_2 等)を圧縮し、それによって生じる鉛直下方流によって微細な粒子態有機物や溶存態物質が堆積物中に輸送される(b)。その後、水位が低下すると気泡の圧縮が解放され間隙水が排出するが、吸着された物質は堆積物中に保持されたままである(c)。

変動によって発生する間隙水圧変動に起因して、膨張・収縮を繰り返すことにより流れが生じるというものである(図-1)。ここでは、未攪乱底泥コアに、潮汐差による水圧変動を擬似的に与えることによって鉛直流が生じるかについて、実験によって確認した。さらに、モデル化、及び数値計算によって現象を整理・検討した。

2. 圧力制御装置を用いた底泥－直上水間の移動水量の測定

2.1 実験試料

実験に供した底泥は、博多湾に注ぐ河川感潮域・干潟の3地点から採取した未攪乱コアである。それらを以後、名島、和臼、多々良底泥とする。採取した底泥は、直ちに冷凍保存し、必要に応じて解凍し、それぞれについて気泡含有率、透水係数を測定した。気泡含有率の測定は、土粒子密度試験法に準拠した。すなわち、ピクノメータ(口径約50mm、容積100mL)の中に、出来るだけ乱さないように約10gの底泥を入れ、静かに純水を満たす。その時の全質量と、ピクノメータを湯せんにかけて脱気、放冷した後、同様に測定したものの質量差を、それぞれの温度における純水の密度で除して底泥内の含有気泡量とし、底泥全体積に対する割合で表した。透水係数の測定は、定水位透水試験法によった。その値は名島で $4.21 \times 10^{-3} \text{cm/s}$ 、和臼 $2.95 \times 10^{-2} \text{cm/s}$ 、多々良で $1.31 \times 10^{-4} \text{cm/s}$ であった。また、各底泥の粒度、土粒子密度、間隙比、強熱減量を測定した。

2.2 実験方法

内径7cm、高さ50cmの亚克力カラムを用いて、底泥を未攪乱状態で採取(30cm)し、底泥上部に、各地点で採取した河川水、または海水を約10cm満たしたものを、図-2に示す実験装置内に配置した。装置は、試料格納部とエアコンプレッサからなる。コンピュータによりエアコンプレッサバルブの開閉を制御することによって、試料にかかる圧力を調整することができる。本装置を用い、潮汐変動を擬した加・減圧(潮位差2mに設定)を6時間周期で1潮汐行い、1時間毎に試料格納部に連結したマンノメータの水位変動値と底泥表

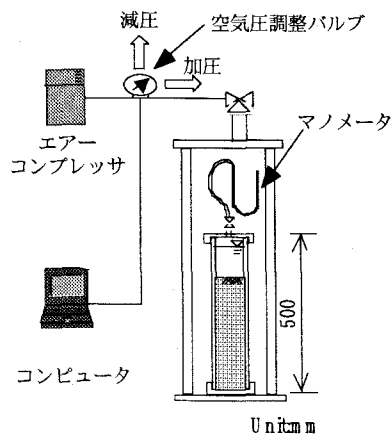


図-2 実験装置図

面高を同時に測定した。底泥 - 直上水間の移動水量は、それらの差から算出した。

3. 実験結果及び考察

3.1 堆積物内の気泡含有量

各試料の深さ方向の体積気泡含有率の分布を図-3に示す。全体として、体積気泡含有率は3%以内であり、底泥の種類、また、深さ方向に大きな差異が見られることが分かる。名島は、表層から30cm程度まで2%程度の気泡が存在し、それ以深では、1%未満であった。和臼は、25～30cm付近を除き、概ね1%前後であった。多々良は、表層よりもむしろ、5～15cm、25～35cm付近の含有率が大きくなっていた。

各堆積物とも、深さ方向に1ヶ所、または数ヶ所の気泡含有率のピークが現れており、各地点それぞれで、微生物活動の活発な層が異なることが示唆された。

3.2 底泥 - 直上水間の移動水量

各試料について、潮位差2m相当の圧力変動を6時間周期で1回与えた際の、底泥 - 直上水間の水の移動量（水頭表示）を図-4に示す。図より、1回の干満によって、多々良では0.6mm、名島で1.1mm、和臼で0.4mm程度の水分移動を生じることが確認された。しかしその量は、潮位差2mと比べると、極めてわずかであった。この理由としては、未攪乱コアの全長が約30cmほどで、試料内に十分な量の気泡が存在しなかったためと考えられる。

また、今回の3地点の透水係数の値は、大きい順に和臼 ($2.95 \times 10^{-2} \text{cm/s}$) > 名島 ($4.21 \times 10^{-3} \text{cm/s}$) > 多々良 ($1.31 \times 10^{-4} \text{cm/s}$) であったが、移動水量はこの順と一致しなかった。底泥 - 直上水間の移動水量は、潮位差、気泡量、及び透水係数の関数となると考えられる。

微生物による分解は、半日という時間スケールで反応が進行していくが、その速度は物質、微生物濃度等によって異なる。ここでは、満潮時に底泥内に浸入した物質が、底泥内部で粒子表面に吸着され、干潮時には、フィルタリングされた底泥間隙水が直上水中へ出ていくこと、及び、分子拡散の不可逆性を想定している。したがって、微生物に利用されなかった余剰物質が、すべて直上水中に戻ることはないと考えられる。

4. 底泥 - 直上水間鉛直流のシミュレーション

4.1 底泥内の気泡存在形態について

底泥内には、様々な大きさの気泡が存在すると考えられる。透水性の極めて高い砂層であれば、潮汐による間隙水圧の変動により、気相が収縮・膨張した体積と等しい分だけの水分移動が底泥 - 直上水間で生じると考えられる。しかし、砂と比して透水係数が非常に小さい底泥の場合、気相の収縮・膨張量がそのまま水分移動量とならないことは、図-2に示す実験装置を用いて加・減圧を行った際、マノメータの水位のみならず、底泥表面高もまた、同時に変動したことから分かる。

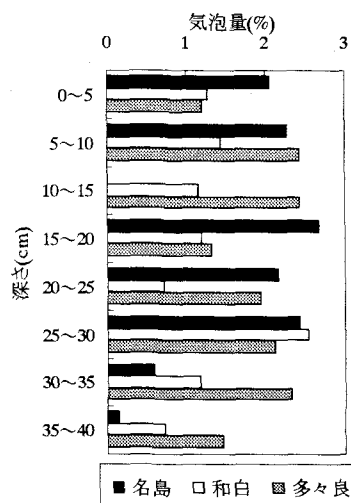


図-3 各底泥深さ方向の体積気泡含有率

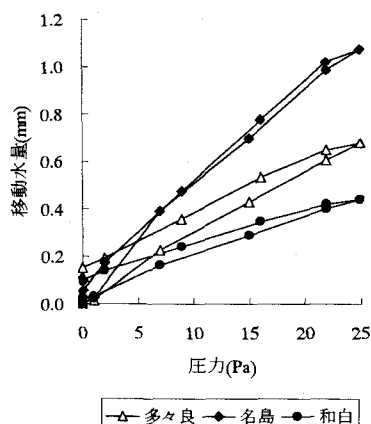


図-4 底泥 - 直上水間の移動水量

間隙水圧増加に対し、気泡は収縮する。その結果、間隙水は移動しなければならないが、底泥粒子と同程度かそれより大きな気泡の場合、透水性が低いために間隙水自体の流動がすぐには起こらず、その結果として、底泥粒子に発生した有効応力の増分による底泥層全体の沈下によって間隙水は移動する。一方、底泥粒子より小さな気泡は有効応力を担うことができないので、間隙水自体が流動すると考えられる。

そこで、底泥内に存在する気相を、以下のように気相Ⅰ、気相Ⅱの二つに分ける(図-5)。

(1) 気相Ⅰ(有効応力伝達気泡)：

底泥粒子と同程度かそれより大きな気泡からなり、有効応力を伝達する気相。

(2) 気相Ⅱ(間隙水移動影響気泡)：

気相Ⅰの気泡より小さなサイズで底泥粒子に付着した状態で存在する。有効応力を伝達せず、間隙水の移動にのみ影響を与える気相。

気泡の内圧は外圧より表面張力分だけ大きいこと、また、その表面張力は、気泡半径に反比例して増大することより、気相Ⅱは気相Ⅰより破断されにくい。したがって、本研究における含有気相量測定法(2.1 参照)は、上記気相Ⅱと気相Ⅰの一部を概ね測定していると考えられる。

以下、気相Ⅰ、気相Ⅱを分けて、底泥-直上水間の鉛直流モデルを構築する。

4.2 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、各層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Ⅰ)と間隙水移動影響気相(気相Ⅱ)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Ⅱは固相に付着しているため、相対速度は存在しない。

鉛直方向上向きを正とすると(図-6)、連続の式は、

$$\text{液相: } \frac{\partial \varepsilon_l}{\partial t} + \frac{\partial V_l}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

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

$$\text{気相: } \frac{\partial C_{gf}}{\partial t} + \frac{\partial N_{gf}}{\partial z} = 0 \quad (3)$$

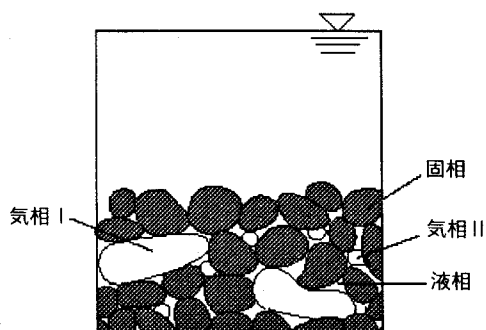


図-5 底泥内気泡の存在形態
(気相Ⅰ:有効応力伝達気泡、
気相Ⅱ:間隙水移動影響気泡)

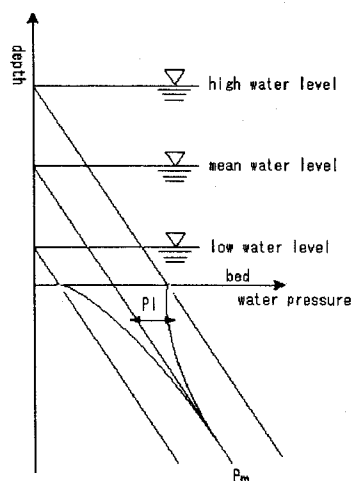


図-6 モデル概念図

ここで、

$$\varepsilon_{gl} = C_{gl} \frac{RT}{P_w + P_\sigma} \quad (4) \quad \frac{\partial C_{gl}}{\partial t} + \frac{\partial N_{gl}}{\partial z} = 0 \quad (5) \quad \varepsilon_{gII} = C_{gII} \frac{RT}{P_w + P_\sigma} \quad (6) \quad N_{gl} = C_{gl} v_{gl} \quad (7) \quad N_{gII} = C_{gII} v_{gII} \quad (8)$$

$$V_l = \varepsilon_l v_l \quad (9) \quad V_s = \varepsilon_s v_s \quad (10) \quad V_{gl} = \varepsilon_{gl} v_{gl} \quad (11) \quad V_{gII} = \varepsilon_{gII} v_{gII} \quad (12) \quad \varepsilon_s + \varepsilon_l + \varepsilon_{gl} + \varepsilon_{gII} = 1 \quad (13)$$

運動方程式

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

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

固相と気相 I、気相 II 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するとして、

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

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

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、 I, II : それぞれ、気相の有効応力伝達部分、非伝達部分を表す、 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_s : 表面張力による気泡内圧増分、 t : 時間、 P_s : 有効応力、 P_l : 過剰間隙水圧、 P_{gl} : 気相 I 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

新たに、仮定 9) 気泡は水圧変動に対応して膨張・収縮するが、量的に少ないので間隙水の流れには影響を及ぼさない、とすると運動方程式は以下ようになる。

$$\text{全体: } \frac{\partial}{\partial z} (P_l + P_s) + \left\{ \varepsilon_s (\rho_s - \rho_l) \right\} g = 0 \quad (14')$$

$$\text{液相: } \frac{\partial P_l}{\partial z} - \frac{\mu}{k} \left(V_l - \frac{\varepsilon_l V_s}{\varepsilon_s} \right) = 0 \quad (15')$$

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

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

ここで、仮定 10) 気相 I と気相 II の気泡径は各々一定である、とすると

$$\frac{\partial \varepsilon_{gl}}{\partial t} + \frac{\partial V_{gl}}{\partial z} + \frac{RT}{P_w + P_\sigma} \left\{ \varepsilon_{gl} \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{P_w + P_\sigma}{RT} \right) + V_{gl} \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{P_w + P_\sigma}{RT} \right) \right\} = 0 \quad (18-1)$$

$$\frac{\partial \varepsilon_{gII}}{\partial t} + \frac{\partial V_{gII}}{\partial z} + \frac{RT}{P_w + P_{cl}} \left\{ \varepsilon_{II} \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{P_w + P_{cl}}{RT} \right) + V_{gII} \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{P_w + P_{cl}}{RT} \right) \right\} = 0 \quad (18-2)$$

$$\frac{\partial}{\partial z} (V_l + V_s + V_{gl} + V_{gII}) + \frac{RT}{P_w + P_{cl}} \left\{ \varepsilon_{gl} \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{P_w + P_{cl}}{RT} \right) + V_{gl} \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{P_w + P_{cl}}{RT} \right) \right\} + \frac{RT}{P_w + P_{cl}} \left\{ \varepsilon_{II} \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{P_w + P_{cl}}{RT} \right) + V_{gII} \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{P_w + P_{cl}}{RT} \right) \right\} = 0 \quad (19)$$

$w = \int_0^z \varepsilon_s \rho_s dz$ (20) より、座標 (z, t) を質量座標系 (w, t) に変換すると、式 (19) は以下ようになる。

$$\begin{aligned} \varepsilon_s \rho_s \frac{\partial}{\partial w} (V_l + V_s + V_{gl} + V_{gII}) + \frac{RT}{P_w + P_{cl}} \left\{ \varepsilon_{gl} \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{P_w + P_{cl}}{RT} \right) - \varepsilon_{gl} \rho_s V_s \frac{\partial}{\partial w} \left(\frac{P_w + P_{cl}}{RT} \right) + \varepsilon_s \rho_s V_{gl} \frac{\partial}{\partial w} \left(\frac{P_w + P_{cl}}{RT} \right) \right\} \\ + \frac{RT}{P_w + P_{cl}} \left\{ \varepsilon_{II} \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{P_w + P_{cl}}{RT} \right) - \varepsilon_{II} \rho_s V_s \frac{\partial}{\partial w} \left(\frac{P_w + P_{cl}}{RT} \right) + \varepsilon_s \rho_s V_{gII} \frac{\partial}{\partial w} \left(\frac{P_w + P_{cl}}{RT} \right) \right\} = 0 \quad (21) \end{aligned}$$

仮定 8) より $v_s = v_g$ (22)、従って $-\varepsilon_{gII} \rho_s V_s + \varepsilon_s \rho_s V_{gII} = 0$ (23) となる。

仮定 3) より、気相 I は膨張・収縮の際に、間隙水を土粒子に対して相対的に移動させないことより、

$$\varepsilon_{gl} \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{P_w + P_{cl}}{RT} \right) + (\varepsilon_s \rho_s V_{gl} - \varepsilon_{gl} \rho_s V_s) \frac{\partial}{\partial w} \left(\frac{P_w + P_{cl}}{RT} \right) = 0 \quad (24)$$

$$\text{式 (21), (22), 及び (23) より、} \varepsilon_s \rho_s \frac{\partial}{\partial w} (V_l + V_s + V_{gl} + V_{gII}) = \frac{RT}{P_w + P_{cl}} \varepsilon_{gII} \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{P_w + P_{cl}}{RT} \right) \quad (25)$$

上式を積分し、また $V_s = V_{gl} = V_{gII} = 0$ 、さらに底泥表面、及び最下面では $V_l = 0$ であるから、

$$V_l|_{\text{表面}} = \int_0^w \frac{\varepsilon_{gII}}{\varepsilon_s \rho_s} \frac{RT}{P_w + P_{cl}} \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{P_w + P_{cl}}{RT} \right) dw \quad (26)$$

$$\text{式 (15')} \text{ を座標変換 } (z, t) \rightarrow (w, t) \text{ すると、} \rho_s \varepsilon_s \frac{\partial P_l}{\partial w} - \frac{\mu}{k} \left(V_l - \frac{\varepsilon_l V_s}{\varepsilon_s} \right) = 0 \quad (27)$$

$$\text{底泥のある点、つまり累積質量が一定の点に着目すると、} V_s = 0 \text{ となるので、} V_l = \frac{k}{\mu} \rho_s \varepsilon_s \frac{\partial P_l}{\partial w} \quad (28)$$

$$\text{また、式 (24) も同様に考えると、} \varepsilon_s \rho_s \frac{\partial V_l}{\partial w} = \frac{RT}{P_w + P_{cl}} \varepsilon_{gII} \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{P_w + P_{cl}}{RT} \right) \quad (29)$$

$$\text{すなわち、} \varepsilon_s \rho_s \frac{\partial V_l}{\partial w} = \frac{RT}{P_a + P_m + P_l + P_{cl}} \varepsilon_{gII} \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{P_a + P_m + P_l + P_{cl}}{RT} \right) \quad (30)$$

式 (28), (30) より

$$\varepsilon_s \rho_s \frac{\partial}{\partial w} \left(\frac{k}{\mu} \rho_s \varepsilon_s \frac{\partial P_l}{\partial w} \right) = \frac{RT}{P_a + P_m + P_l + P_{cl}} \varepsilon_{gII} \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{P_a + P_m + P_l + P_{cl}}{RT} \right) \quad (31)$$

上式を、条件を与えて解くことにより P_l, V_l を算定し、底泥移動水量の算出が可能となる。

4.3 計算結果

式 (31) に以下の条件を与えて P_l を、さらに式 (30) より V_l を求め、底泥表面の移動水量を求めた。計算に用いた各パラメータを表-1 に示す。

初期条件: $P_i = 0$ at $t = 0$

境界条件: $P_i = a \sin \frac{\pi}{6} t$ at $w = 0$ (ただし a : 潮位変動振幅)

$$\frac{\partial P_i}{\partial w} = 0 \quad \text{for } w = -\infty$$

表-1 パラメータ値

ρ_s	: 2.65 (g/cm ³)
ε_s	: 0.56 (-)
ε_{gl}	: 0.01 (-)
k	: 1.0×10^{-5} (cm/s)
r	: 10 (μm)
a	: 2.0 (m)

計算より求められた過剰間隙水圧の鉛直分布を図-7に示す。ただし、気泡含有率の鉛直分布を考慮して計算したが、その影響は小さかったため、計算の簡略化上、鉛直方向一様分布で計算した。図より、潮汐作用によって底泥内部に過剰間隙水圧が生じ、それらは、深くなるにつれほぼ一定となっていくことが分かる。これは、水圧の増加に伴い気泡が収縮すると、その近傍の間隙水が流動し、それによって水粒子が持っている圧力エネルギーの一部が運動エネルギーに変換されるためである。図-8に、その際の移動水量計算結果を示す。実験より得られた結果(図-4参照)と比べ、シミュレーションでは透水係数が1オーダー小さいにもかかわらず、大きな水分移動(一潮汐で約15mm)が生じていた。計算では、底泥層厚を実験と同じ30cmに設定すると、過剰間隙水圧の変動層厚(約150cm)より小さくなることから、移動水量が安定しなかった。したがって、計算では底泥層厚を20m(不透水層までの深度を想定)

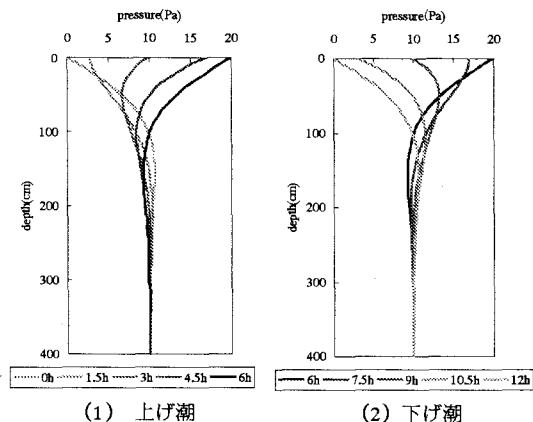


図-7 底泥内の過剰間隙水圧分布計算値

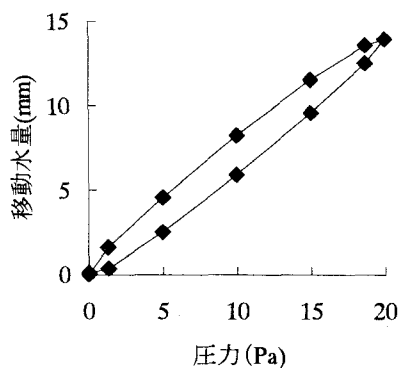


図-8 水位変動による底泥-直上水間の移動水量(ここで圧力とは、底泥表面水圧である。)

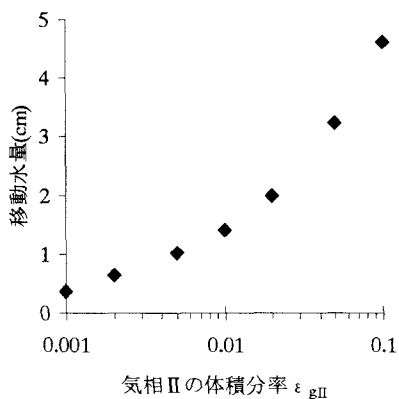


図-9 気相IIの体積分率と移動水量の関係
($k = 1 \times 10^{-5}$ cm/s の時)

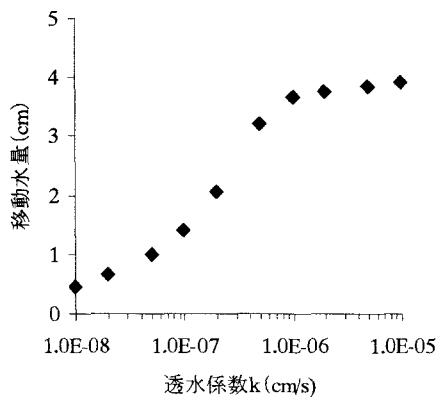


図-10 透水係数と移動水量の関係
($\varepsilon_{gl} = 0.01$ の時)

としており、結果として気泡含有量が大きくなったため、移動水量も大きくなったと考えられる。このことから、気泡の存在が、鉛直方向の移動水量に影響を与えていることが示唆される。沈降、堆積は1日で数mmに及ぶこともあるが、年平均では数cmのオーダーであり、分子拡散は、1日1cm程度である。これらと比し、本現象は、気泡量によっては1日数cmに及ぶこともあると考えられるが、現地測定結果に基づいたモデルの評価が今後の課題である。

次に、気相Ⅱの体積分率、及び透水係数が変化した際の、底泥表面における移動水量をそれぞれ図-9, 10に示す。図より、気泡量、又は透水係数が増加すると、底泥表面における移動水量もまた大きく増加した。実際の水域において透水係数を大きく変化させることは困難であることが多いと考えられるが、人工的に気泡量を増加させることにより、水の移動量を増加させ、底泥の有する浄化機能を強化した水質浄化法が期待できる。

5. まとめ

本研究のまとめを以下に示す。

- (1) 潮汐による水位変動により底泥内の気泡が収縮・膨張し、それに伴い底泥 - 直上水間で鉛直流が生じる。
- (2) 底泥 - 直上水間の輸送には、底泥内の気泡量だけではなく、透水係数が強く影響する。
- (3) 上記現象をモデル化した。その結果、底泥内の気泡含有率が増加すると、底泥 - 直上水間の水分移動量も増加する。

今後は、底泥内気相量の測定方法を再検討するとともに、気相量の季節変動、温度の影響等を精査し、鉛直流のより詳細な評価、及び分子拡散やBioturbationによる物質輸送との関連を検討する必要がある。

[参考文献]

- 1) 宗宮 功 編著：自然の浄化機構，pp.149-184，1990
- 2) 楠田哲也 編著：自然の浄化機構の強化と制御，pp.159-180，1994
- 3) 久保浩司：河口域での水圧変動による底泥 - 直上水間の鉛直輸送およびその水質浄化機能に関する研究，九州大学修士論文，2000
- 4) 井上令作：飽和度の高い砂層における間隙水圧の伝ば，土木学会論文報告集，第236号，pp.81-92，1975
- 5) 善 功企ら：海底地盤の波浪による液状化および高密度化，運輸省港湾技術研究報告書，第26巻，pp.125-180，1987
- 6) 地盤工学会：土質試験，2000
- 7) 日本化学会：化学便覧 基礎編，1984