

II-447

高濃度浮泥層界面での連行現象に関する実験的研究

九州大学 ○学生員 崎田省吾 正員 山西博幸
学生員 酒井啓範 正員 楠田哲也

1. はじめに

粘土、シルト等の微細粒子よりなる軟弱な底泥を有する沿岸域では、波作用によって底面近傍に高濃度浮泥層が、その上に比較的低濃度の上層水層が形成される。濃度分布の安定したこのような系にさらに大きな外力がかかると、高濃度層から上層水層への懸濁物質の巻き上がりが生じ、新たな定常濃度分布に達する。本研究では沈降性粒子を多量に含んだいわゆる高濃度浮泥層から、上層水層への質量輸送（連行現象）に着目し、従来型の密度流連行現象との比較、検討を行なうことを目的とする。

2. 実験装置及び方法

本研究ではU字型振動流水槽を使用した。試料（土粒子密度 $\rho_s=2460\text{kg/m}^3$ 、中央粒径 $d_{50}=2.4\mu\text{m}$ ）を海水と混合させ所定の濃度に設定した後、振動流水槽内へ注入し、完全混合状態から濃度分布がほぼ定常状態になるまで振動させた。その後、周期一定のまま振幅を大きくして実験を続け、所定の時間毎に水路側面から鉛直方向9点で採水を行った。また、電磁流速計を用い、適宜、鉛直方向流速分布を測定した。なお、実験条件を表-1に示す。

表-1. 実験条件

Run No.	初期濃度 ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	周期 (sec)	振幅 (m)
1	9.1	6.0	0.05 → 0.08
2	10.8		0.05 → 0.14
3	10.4		0.05 → 0.18
4	19.9		0.05 → 0.08
5	19.3		0.05 → 0.11

3. 実験結果及び考察

(1) 鉛直方向濃度分布

図-1はRun1の鉛直方向濃度分布の経時変化を示している。図中の直線は目視による浮泥層界面高を表している。目視による界面高と濃度勾配の急変する領域（ルートライン）とはほぼ一致していた。図より、時間の経過とともに浮泥層界面から上層水中へ懸濁物質が連行され、界面高が低下していく様子が読みとれる。実験開始数分後には上層水層と高濃度浮泥層との間に濃度遷移層が現れ、この遷移層を介して2つの明瞭な界面が生じた。

また、濃度分布と同時に測定した鉛直方向の流速分布（図-2）より、底面直上の不動層を除いた残り3層のうち上側2層（上層水層と遷移層）の懸濁物質は水平方向に周期運動するだけであったが、浮泥層内では微細粒子を多量に含んだ混相流体としての高粘性のため急峻な速度勾配が生じていた。また、浮泥層内での周期的な粒子運動を観察した結果、従来の研究（山西・楠田、(1994)）同様、上層水のそれに比べて位相が先に進んでいた。

(2) 見かけ連行量の算出

各時間毎の界面の位置を基準としてそれより上方に存在する懸濁物質量を算出し、単位面積当たり換算したものを見かけ連行量とした。この経時変化を図-3に示す。連行は実験初期の段階で急速に起こるが、開始30分以降はほとんどその変化はなくなり濃度分布もほぼ一定となった。また、同一周期では振幅が大きい（つまり外力が大きい）ほど見かけ連行量も大きくなった。

(3) 連行係数とリチャードソン数の関係

浮泥層界面から連行される物質量の評価として連行係数を次のように定めた。連行速度、すなわち浮泥層界面を介して上層水中へ連行される単位時間当たりのFlux量（図-3における曲線の傾き）を上層水平

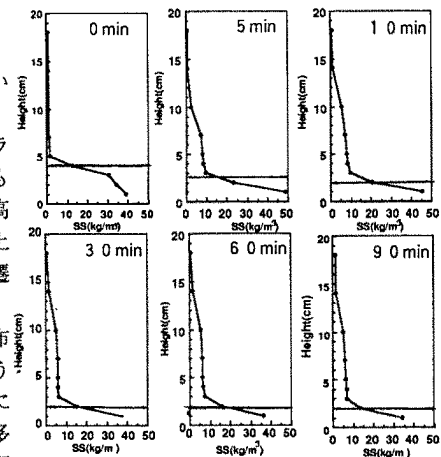
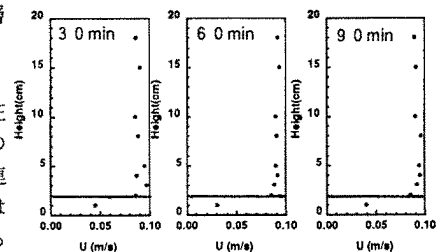


図-1. 鉛直方向濃度分布 (Run1)

図-2. 鉛直方向流速分布 (Run1)
(ただし、——は下側界面高を表す)

均見かけ密度と上層水最大流速で割ったものを見かけ連行係数 E_1 とした。

$$E_1 = (dW/dt) / (\rho U) \cdots (1)$$

この見かけ連行係数 E_1 とリチャードソン数 Ri との関係を図-4に示す。なお、ここで用いたリチャードソン数は層平均リチャードソン数で、次式となる。

$$Ri = \Delta \rho g h_s / (\rho U^2) \cdots (2)$$

ここで、 ρ ：上層水平均密度、 $\Delta \rho$ ：上層水と高濃度層の密度差、 U ：上層水最大流速、 h_s ：上層水層高さ、 g ：重力加速度、である。

本研究でのリチャードソン数に対する連行係数の値は、従来からの密度流の研究（たとえば玉井、1987）で主として対象とされている塩水や温度成層等における場合（図-4の直線 E で $E = 2 \times 10^{-3} Ri^{-3/2}$ ）よりもオーダーで2～3桁程度小さな値となっている。この理由としては、懸濁物質を高濃度に含む浮泥の場合、浮泥界面から上層水中への物質輸送は生じるものの粒子群の下方への沈降により見かけ上連行が抑制され、沈降性懸濁粒子群により形成された密度界面では、常に復元力が作用しているからと考えられる。また、懸濁物質がフロックを形成しているので連行にはさらにエネルギーが必要とされることも考えられる。この意味ではリチャードソン数についても、慣性力と浮力とのエネルギー比という本来の定義では小さく見積もってしまうことになり厳密な値であるとは言い難い。

（4）連行係数とリチャードソン数に関する検討

（a）連行係数について 見かけ連行係数に粒子沈降による効果を加味することで上向きの真の連行量を算出した。すなわち、

$$(\text{上向きの真の連行量 } E_2) = (\text{見かけ連行量 } E_1) + (\text{沈降分})$$

これより算出される連行係数 E_2 は、

$$E_2 = E_1 + (\rho_h w_s) / (\rho U) \cdots (3)$$

ここで、 ρ_h ：界面密度、 w_s ：静水中沈降速度、である。

（b）リチャードソン数について 式（2）の分子は密度差のある流体が、お互いの位置を逆にする時の単位体積当たりの位置エネルギーの変化を表しているが沈降性粒子を高濃度に含む場合、それらが沈降によって失う位置エネルギーを考慮する必要がある。ここでは粒子群が沈降によって失う位置エネルギーを式（2）に加えることによってリチャードソン数の修正を行った。すなわち、

$$(\text{粒子が沈降によって失う単位時間、単位体積当たりの位置エネルギー}) = \rho_h g w_s \cdots (4)$$

これらの結果を図-5に示す。 (E_3) がリチャードソン数を修正したもの

この図より、連行係数に関しては沈降分を考慮すると従来からの経験則にはほぼ一致した。リチャードソン数について、本実験の範囲内では沈降分の修正による変動はほとんどなかった。式（4）の考え方で修正を行う際は粒子群の沈降距離を正確に把握するために更に検討を加える必要がある。

<参考文献> 楠田哲也・山西博幸（1992）：「振動流下における高濃度層の形成・保持機構に関する研究」、海岸工学論文集第39巻、pp. 286-290。、玉井信行（1987）：「連行概念の統一化と連行係数の評価法」、土木学会論文集第381号/II-7、pp.1-11。、山西博幸・楠田哲也（1994）：「振動流下における高濃度浮泥層の流動特性とその保持機構に関する研究」、海岸工学論文集第41巻、pp.426-430。

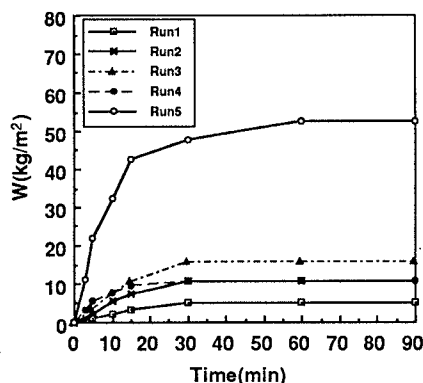


図-3.見かけ連行量経時変化

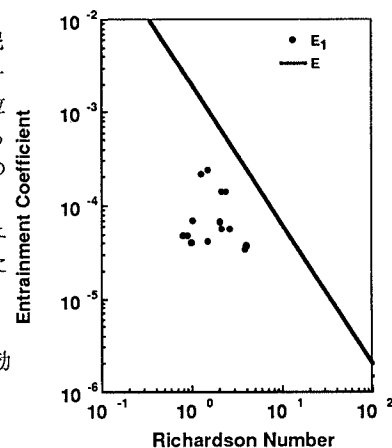


図-4.リチャードソン数と見かけ連行係数の関係

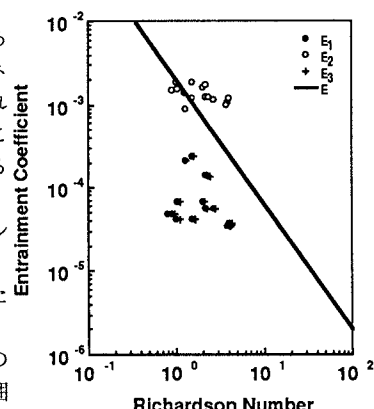


図-5.リチャードソン数と連行係数の関係