

京都大学大学院 学生員 藤田 正治
 京都大学防災研究所 正員 芦田 和男
 徳島大学工学部 正員 岡部 健士

1. まえがき 粒子の浮遊機構に関して、とくにシルトや細砂などの微細粒子の浮遊限界は明らかにされておらず、そのために、それらの流水中での運動形態の遷移条件が明確でなく、また浮遊砂量の推定精度も悪い。本研究では、浮遊砂の中に多く含まれるシルトや細砂を対象として、それらが河床を構成する場合と粗粒子の間隙中に存在する場合について、浮遊限界に関する検討を行い、その成果を用いて浮遊砂底面濃度式を提案し、その適合性を検討する。

2. 浮遊限界に関する実験 実験水路は幅30cm、長さ8mで、路床には平均粒径 $d_r=3\text{mm}$ の砂れき粗度が貼付されており、上流から4mの位置に図-1に示すような流砂採集装置が設置されている。実験は、微細砂(44~420 μ を表-1に示す6つの階級に分けたA~F砂)を粗度が隠れる程度に敷いたExp.A-I~F-I、A砂(44~74 μ)、E砂(149~177 μ)を粗度が突出する程度に敷いたExp.A-II、E-IIであり、流量を段階的に増加させて、各流量のときの掃流砂、浮遊砂を採集するとともに、粒子の移動状況を観察した。実験条件は表-1のとおりで、Exp.A-I~F-Iはほぼ滑面、Exp.A-II、E-IIはほぼ粗面領域での実験である。なお、流砂の採集はExp.A-I~F-Iで行い、河床波として流送される粒子を掃流砂として計測した。浮遊限界とは、河床の粒子が掃流力の増加に伴って、浮遊し始める限界であって、このときの摩擦速度を U_{fso} とする。従来浮遊限界として、 $U_{*c} \approx U_{*s}$ (U_{*s} : 粒子沈降速度) が指摘されているが、これは浮遊砂が無視できない状態になる限界であり、著者らの実験結果によると、全流砂量 q_T に占める浮遊砂量 q_s の割合が4%位の状態に相当する。このときの摩擦速度を U_{fst} とする。以下、得られた結果について述べる。

(a) 微細砂が河床を構成する場合 Exp.A-I~F-I で得られた結果より、 $q_s/q_T=0$ 、4%のときの摩擦速度を U_{fso} 、 U_{fst} とし、また岩垣¹⁾の考え方に従って掃流限界(U_{*c})を求め、これらを図-2に示す。図中の d_c は、 $U_{*c}=U_{*s}$ を浮遊限界としたときに、掃流限界と浮遊限界が等しくなる粒径である。この図から次のような事がわかる。従来の $U_{*c} \approx U_{*s}$ という条件式は、 d_c に近い粒径0.015cmより大きい粒子に対して $U_{*c} \approx U_{fst}$ の値にほぼ対応するが、 $d < 0.015\text{cm}$ では妥当でない。 U_{fso} は $d < 0.015\text{cm}$ では $U_{fso} \approx U_{*c} \approx U_{fst}$ であり、このような粒子は移動し始めるとすぐ浮遊し、わずかな掃流力の増加で急激に浮遊砂量が増加することがわかる。また、 $d > 0.015\text{cm}$ では、粒径が大きくなるほど、 U_{*c} 、 U_{fso} および U_{fst} の開きが大きくなる。

(b) 粗粒子の間隙中に微細砂が存在する場合 図-3は、Exp.A-I、A-II、E-I、E-IIの実験結果より U_{fso} および粒子がこぼり始めるときの摩擦速度 U_{*ci} を求め、それらと砂粒Reynolds数との関係を示したものである。砂粒Reynolds数は、Exp.A-I、E-I(図中の(1)、(4))では U_{*cd}/ν 、Exp.A-II、E-II(図中の(2)、(3)、(5)、(6))では $U_{*cd}r/\nu$ をとっている。また、同図に各実験での l/d_r の値も示す。こゝに、 l は図-3中の模式図に示す微細粒子の堆積厚である。この図

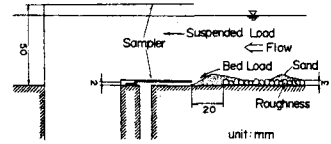


図-1 流砂採集装置

表-1 実験条件

Exp. No.	d (μ)	W_s (cm/s)	Slope (1/25)	Q (cm^3/s)	U_{*c} (cm/s)	Fr	Re	u_{*d}/ν	u_{*f}/ν	u_{*s}/ν
A-I	44-74	0.504	1/685	0.20	1.06	0.45	2700	0.63	—	—
B-I	88-105	1.018	1/695	-2.65	-2.13	-0.64	-35000	-1.26	—	—
C-I	105-125	1.422	1/695	-2.90	-2.29	-0.53	-35700	-1.05	—	—
D-I	125-149	1.680	1/436	0.20	1.12	0.62	2600	1.43	—	—
E-I	149-177	2.153	1/436	-2.68	-2.57	-0.68	-33700	-3.52	—	—
F-I	297-420	4.200	1/185	0.22	1.33	0.29	2900	1.97	—	—
A-II-(1)	44-74	0.504	1/456	0.22	1.33	0.29	2900	—	40	93
A-II-(2)	44-74	0.504	1/456	-0.94	-1.90	-0.38	-31300	—	57	-133
E-II-(1)	149-177	2.153	1/456	0.43	1.56	0.33	14300	—	31	51
E-II-(2)	149-177	2.153	1/456	-1.93	-2.26	-0.43	-64000	—	-52	-87
E-II-(3)	149-177	2.153	1/456	0.40	1.50	0.36	5300	—	47	105
E-II-(4)	149-177	2.153	1/456	-1.01	-1.88	-0.42	-32700	—	-68	-153
E-II-(5)	149-177	2.153	1/456	0.40	1.50	0.36	5300	—	45	79
E-II-(6)	149-177	2.153	1/456	-1.01	-1.88	-0.42	-32700	—	-56	-98

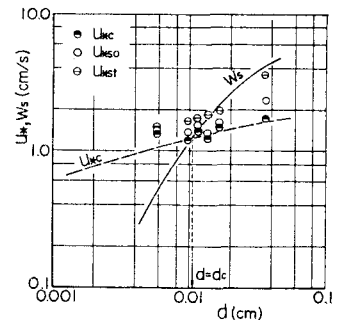


図-2 U_{*c} 、 U_{fso} 、 U_{fst}
 (図中の曲線は実験値の内插曲線)

から次の事が考察される。微細砂が河床を構成している場合は、微細粒子でも静止で掃流で浮遊と遷移するが、粗粒子の間に存在するときは、 $l/d_r (<1)$ の値によって、静止で浮遊と遷移する。また、 U_{kso} は粗粒子の遮蔽効果と乱れに及ぼす効果に影響され、 l/d_r が1から減少するに伴って小さくなり、さらに減少すると遮蔽効果のために、反対に大きくなり、 dr/l がある値のとき最小となる。

3. 浮遊限界に関する理論 U_{kso} は浮遊砂量 q_b になる重要な限界であり、これに関して検討する。なお、微細砂が河床を構成する場合を対象とし、河床は滑面とする。さて、このような河床条件では、2で述べた結果から、粒子は掃流状態になければ浮遊しないことが明らかである。そこで、粒子の掃流から浮遊の遷移機構について、圧力変動に伴う揚力 F_L により粒子は掃流状態の離脱高さ y_0 まで持ちあげられ、その位置での鉛直方向の最大変動速度 U_{max} が、 $U_{max} > U_s$ のとき浮遊すると考え、浮遊限界式を次式で与える。

$$U_{max} = U_s \quad \dots\dots\dots (1)$$

粒子の離脱高さ y_0 は、滑面ではbuffer層以下において、初期離脱速度 V_0 のみによって規定されるものとする。 V_0 は、揚力 F_L を粘性底層外の変動速度 v と関連づけて $F_L = \frac{1}{2} C_L \rho v^2 \pi d^2$ (C_L :係数)とし、揚力の作用時間を $\Delta t = d/U_s$ と仮定すると、力積方程式から求められる。その結果と粒子の運動方程式より、 y_0 は(2)式のように求められる。

$$y_0 = \frac{(\frac{\sigma}{\rho} + \frac{1}{2} K \frac{\sigma}{\rho} - 1) g d^4}{18^2 v^2} \left[18 \frac{\nu K v}{d} \frac{U_s - U_c}{U_s} - \ln \left\{ 18 \frac{\nu K v}{d} \frac{U_s - U_c}{U_s} + 1 \right\} + 1 \right] + d \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここで、 σ, ρ : 粒子および流体密度、 ν : 動粘性係数、 $Kv = \frac{3}{2} C_L \frac{\sigma}{\rho} \tau^2$ 、 $\tau = v/U_k$ 、 τ : 係数である。次に、 $y = y_0$ における U_{max} は、従来の研究成果²⁾を参考にして、

$$U_{max} = 3V' \quad \dots\dots\dots (3) \quad \frac{V'}{U_k} = \begin{cases} 1 & \frac{U_k y_0}{\nu} > 50 \\ -\frac{1}{2500} \left(\frac{U_k y_0}{\nu} - 50 \right)^2 + 1 & \frac{U_k y_0}{\nu} \leq 50 \end{cases} \quad \dots\dots\dots (4)$$

のように近似できるものとする。以上より、無次元限界掃流力 U_c/U_s および Kv を与えると、(1)-(4)式より U_{kso} が算定される。図4は、 U_{kso} の計算値と理論値を比較したものであり、図に示すように、 $Kv=40$ のとき、両者はよく一致する。 Kv は底面での圧力変動に伴う揚力に関する係数であり、壁面での圧力変動に関する研究³⁾より、 $\tau=3$ として Kv の値を評価すると25~50程度である。

4. 浮遊砂底面濃度 U_{kso} に対する y_0 を基準面の位置とし、また v の確率分布を上・下限が $\pm U_{max}$ の正規分布で近似できるものとする。ついで、道⁴⁾と同様の解析を行うと、底面濃度に関する推定式として次式を得る。

$$C_b = \frac{2}{3} K \left(\frac{A}{\xi_0} - B \right) \quad \dots\dots\dots (5) \quad \text{ここに、} A = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \left(e^{-\frac{\xi^2}{2}} - e^{-\frac{\xi_1^2}{2}} \right), B = \int_{\xi_1}^{\xi_0} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{\xi^2}{2}} d\xi, \xi = \frac{v}{U_s}, \xi_0 = \frac{U_s}{U_c}$$

$\xi_1=3$ 、 K は係数である。 $d=59, 163\mu$ の場合について、 $K=0.015$ として(5)式と実験値(浮遊砂量から計算)とを比較したのが図5である。かなり大きな異なる粒子に対して両者の適合性はよく、この理論の妥当性が示唆される。

5. あとがき 以上のように、本研究の理論は実験値を十分説明しうるものと思われるが、浮遊機構についての詳細な検討を行い、粒子の浮上のプロセスをさらに明確にしていきたい。

- <参考文献> 1) 岩垣: 限界掃流力に関する基礎的研究, 土木学会論文集, 第41号, S.31.2, PP.1~20
2) 3) 津津: 間水路流の乱流構造に関する基礎的研究, 京都大学学位論文, S.52.7, P.80, P.16
4) 道上: 流砂と河床変動に関する基礎的研究, 京都大学学位論文, S.47.10, PP.99~101

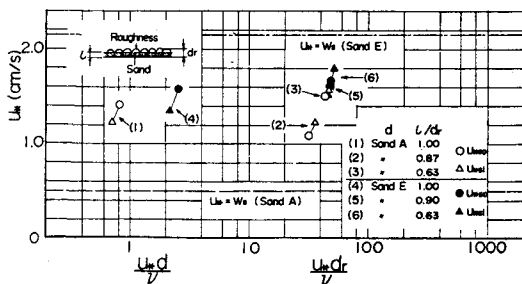


図-3 U_{kso}, U_{ksi} と U_{cd}, U_{cdr} の関係

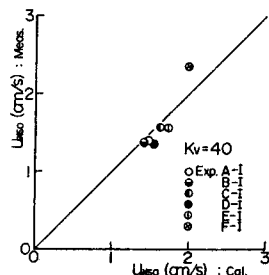


図-4 U_{kso} の実験値と理論値

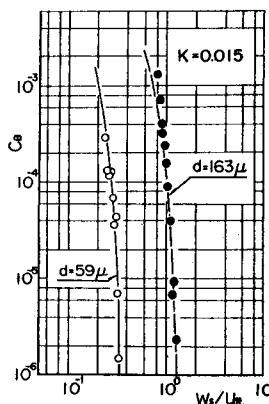


図-5 C_b の実験値と理論値