

河床砂れきに働く流体力について

Study On The Hydrodynamic Force Exerted On The Bed Sediment

早稲田大学	大学院	学生員	植松 龍二	R.Uematsu
早稲田大学	理工学部	学生員	浜地 克也	K.Hamachi
早稲田大学	理工学部	学生員	渡戸 正義	M.Watado
早稲田大学	理工学部	正 員	関根 正人	M.Sekine
早稲田大学	理工学部	正 員	吉川 秀夫	H.Kikkawa

1. はじめに

移動床にみられる、掃流砂れきの流送や河床からの離脱などの機構は、個々の砂れきの運動を把握することにより解明されるべきである。そのために、浸透性の材料である砂れきに働く流体力である抗力と揚力を算出することは、掃流現象の解明に非常に重要である。本研究では、河床を形成する砂粒のモデルとして、以下に述べるようにChepilと同様に風洞装置の表面に半球を密に敷き詰めたものを使用して、流れに対して鉛直方向の流速分布、Reynolds応力を測定し、Prandtlの混合距離理論を用いて、仮想底面を決定することにより、せん断力の算定を行なった。一方、粗度要素の1つの球体の圧力を測定することにより、上述の仮想底面、せん断力との適合性について検討した。また、流体力の算定の方法の1つである、抗力係数 C_d 、揚力係数 C_L 、代表流速 U_0 を用いる方法における、 C_d 、 C_L 、 U_0 の決定の仕方についても述べる。

2. 実験概要

実験は、高さ40cm、幅30cm、長さ1000cmの長方形断面風洞の底面に径 $d = 3.8\text{cm}$ の半球を六角形配置で密に敷き詰めた粗面を用い、上流側より800cm付近の底面中央部で測定を行なった。流速分布はX形のHOT-FILMを使用し、各測定40sec間2000個のデータをAD変換して、測定した。また、粗面上の半球に働く流体力を測定するには、辻本らや神田らのように片持ち梁式装置を用いて流れ方向の合力を測定する方法と、Chepilのように半球表面の圧力分布を測定して抗力と揚力の平均値を求めるといふ、主に2通りがあるが、本研究では、抗力と揚力を同時に測定でき、またそれぞれの分布状態の変化などの特性が得られる後者の方法を採用した。したがって、図1のように、粗度要素と同じ半球を底面中央部に固定し、その球の1か所に小さな孔($d = 0.2\text{mm}$)をあけ、その孔の位置を ϕ と θ を 10° きざみの点におき、孔からとった圧力と境界層外のポテンシャル領域の静圧(P_∞)との差圧(ΔP)、すなわち過剰圧力を精密微差圧計により測定した。

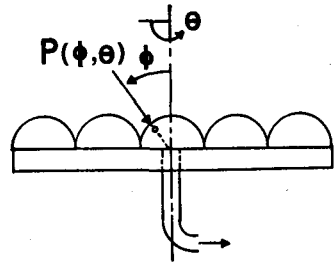


図1 圧力測定装置

3. 実験結果

(1) 流速測定結果

表1は上記の実験諸量をまとめたものである。

ここで δ : 境界層厚(cm)、 $\bar{u}$: 境界層内での平均流速(cm/sec)、 u^* : 摩擦速度(cm/sec)

z_0 : 原点の補正量(cm)、 k_s : 相当粗度(cm)、 U_∞ : 境界層外縁での平均流速(cm/sec)

d : 粗度要素である半球の直径(cm)

表1. 実験諸量

RUN	δ (cm)	$\bar{U}$ (cm/sec)	Re $= \bar{U} \delta / \nu$	u_* (cm/sec)	z_0/d	k_s/d	U_∞ (cm/sec)
1	10.4	4.44×10^2	3.17×10^4	42.6	0.16	0.61	5.25×10^2
2	10.6	6.52×10^2	4.74×10^4	60.5	0.16	0.54	7.65×10^2
3	11.4	8.49×10^2	6.63×10^4	73.9	0.16	0.45	9.85×10^2
4	11.2	10.50×10^2	8.05×10^4	88.7	0.16	0.39	12.2×10^2

図2は、測定された流速分布であり、流下方向にx軸、その鉛直上向きにz軸（原点は半球頂点）をとり、u、wはそれぞれの軸方向の速度成分である。図3はX、Z方向の乱れ度 $\sqrt{u'^2}/U_\infty$ 、 $\sqrt{w'^2}/U_\infty$ を示している。また、図4は、鉛直方向に対するReynolds応力であり、図中の直線は、測定点の上流、下流でのポテンシャル領域での静圧（ P_∞ ）を測定して得られた、 $-1/\rho dp/dx$ の傾きを持った線である。図から、Reynolds応力はこの直線にあまりのらず、流れ方向に一樣にはなっていないことがわかる（図中におけるプロットの記号は図3で述べている通りであり、以下、同様に示している）。

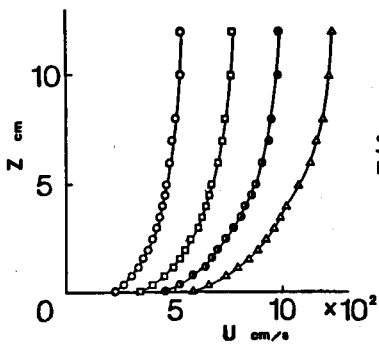


図2、流速分布図

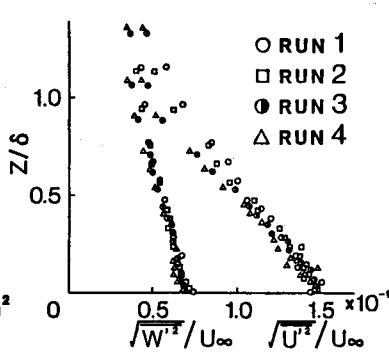


図3、乱れ度の分布図

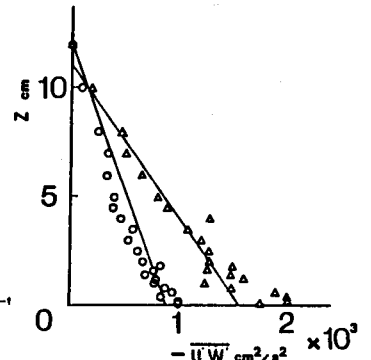


図4、Reynolds応力の分布図

また、上記の流速分布を別の観点からみるために、Prandtlの混合距離 ℓ を調べることににより、検討した。

$$\tau = -\rho \overline{u'w'} = \rho L^2 (d\bar{u}/dz)^2 \quad (1)$$

ここで、 $-\rho \overline{u'w'}$ は主流のReynolds応力、 τ は全せん断力である。Reynolds応力は図4の実験値を用い、 $d\bar{u}/dz$ は図2の流速分布の差分を用いて、(1)式より求められた ℓ の分布が図5である。この図より、 ℓ は $z=0$ の半球の頂点に於いても0ではなく、有限値を持っている。また、 ℓ の分布はばらつきがあるものの、 $z=0$ 付近に於いては、RUN.1-4全ての場合について、 $\ell = \kappa(z+z_0)$ で近似できることが分かる（ここでは $\kappa=0.4$, $z_0=0.6$, $z_0/d=0.16$ ）。このように、境界層厚に比較して粗度要素の高さが大きい場合も（今回は $d/\delta \approx 0.3 \sim 0.4$ ）、比例定数 κ が0.4となり、原点を z_0 だけ補正することにより、混合距離 ℓ を、 $\ell = 0.4(z+z_0)$ の形で表すことが可能であることがわかった。図6は、上記で述べた $z_0=0.6$ (cm)の値を用いて、 $z+z_0$ を横軸にとった流速分布である。また図中の直線は次の式を表している。

$$\frac{U}{u_*} = 5.75 \text{Log} \left(\frac{Z+Z_0}{K_s} \right) + 8.5 \quad (2)$$

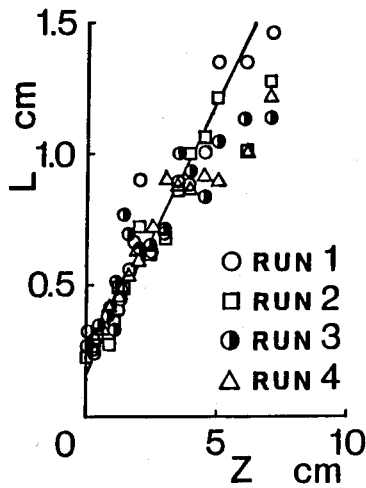


図5、混合距離の分布図

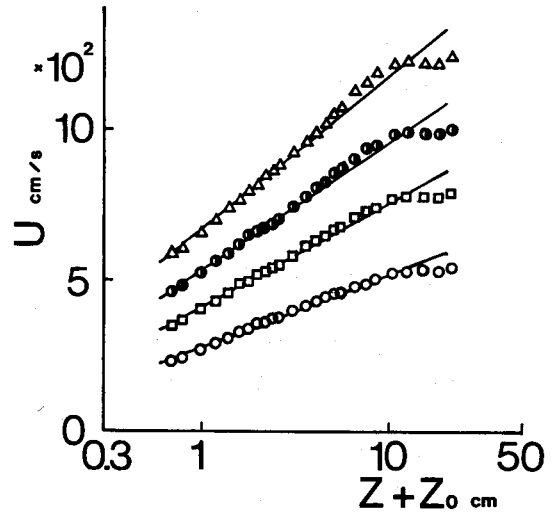


図6、流速分布の対数表示

図6から分かるように、全てのRUNにおいて境界層内では(2)式によく一致している。表1の u_* 、 ks は図6より算出した値である。一方、Einsteinらも直径 $d = 6.75\text{cm}$ の半球を本実験と同様に密に敷き詰めた場合の実験を行っており、 z_0/d の値を0.2にすると、流速分布が(2)式によく一致すると報告している。このことから、粗度要素である直径 d の半球が密に敷かれている場合、 z_0/d の値は、粗度の径、Reynolds数に関係なく、0.2前後となり、その値を使うことにより、粗度近傍に於いても流速分布は(2)式の対数則にのることが明らかになった。

(2) 圧力測定結果

表2に、圧力分布より測定した流体力の実験結果を示す。

表2、流体力測定結果

RUN	抗力 D (gf)	揚力 L (gf)	L/D	$\delta_D/(d/2)$	$\delta_L/(d/2)$	u_*' (cm/sec)
1	0.0252	0.0196	0.777	0.638	0.822	40.0
2	0.0424	0.0247	0.584	0.649	1.112	51.9
3	0.0837	0.0567	0.677	0.645	0.953	72.9
4	0.1120	0.0651	0.583	0.629	1.079	84.3

ここで、 δ_D と δ_L は、図7のように、それぞれ抗力、揚力の作用点と球の中心との距離である。また、表2における u^* は要素の一つ一つが底面せん断力を均等に受け持つと考えて次式で与えた。

$$U_*' = \sqrt{\frac{\tau_0}{\rho}} = \sqrt{\frac{D/A'}{\rho}} \quad (3)$$

(τ_0 : 底面せん断力、 D : 抗力、 A' : 一つの半球の粗度としての受持ち面積、 ρ : 密度)

表1での流速分布から算出した u^* と、表2の圧力分布より算出した u^* を比較すると、表1での摩擦速度の方が全てのRUNにおいて多少大きめの値になっている。これは圧力分布より算出した摩擦速度は図8の受持ち面積の中で滑面によるせん断力を無視していることと、抗力を、半球にかかる摩擦を無視し、圧力の総和として求めているためによる差と思われる。しかし、以上のことより、流速分布から摩擦速度を算出し、図8のような受持ち面積を考えることにより、ある程度の精度で粗度要素に働く抗力を算出できることが明らかになった。

図10は抗力の分布を2次元的に表現したもので、図9の帯状の表面に働く抗力 $D(\phi)$ を $l(\phi)$ で割った値を Di として、その Di を Di/D_{max} (D_{max} : Di の最大値) で無次元表示したものである。したがって、曲線と縦軸で囲まれる面積に D_{max} の値を掛けたものが、それぞれのRUNの抗力となっている。また揚力に関する図11も同様である。図12、

13は粗度要素頂点の過剰圧力 ΔP_0 を用いての、要素表面の無次元表示した圧力分布である。図12は、先に述べた D_{max} の位置 $\phi = 50^\circ$ の水平断面である。ここで各点の過剰圧力の大きさは、圧力分布と円周との距離で表現されており、正負は円周の内側が正、外側が負の値を示している。図9-12より明らかのように、すべてのRunにおいてかなりよい相似性を示している。このために、表2における、 L/D 、 $\delta_D/(d/2)$ 、 $\delta_L/(d/2)$ の値は一定値に近いものとなった。一方、Chepilらは、粗度要素として半球を用い、半球と半球の間に径の2倍あけるという疎の状態、底面に粗度を敷いた場合には、 L/D の値は0.8前後となると報告している。

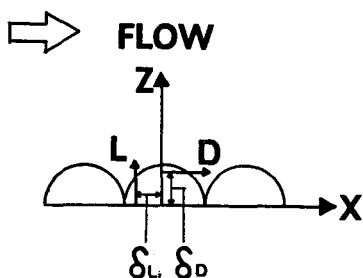


図7、抗力、揚力の作用点

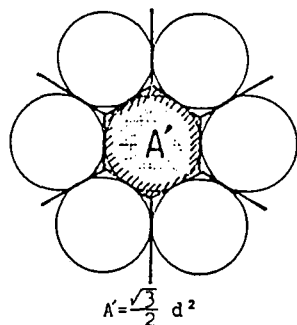


図8、1つの要素の受持ち面積

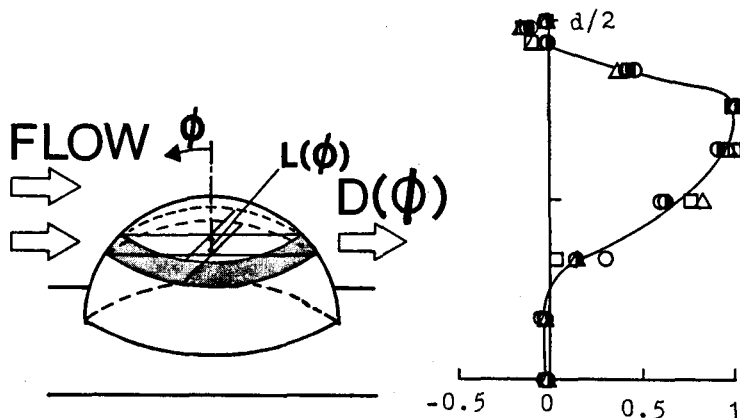


図9、抗力の2次元表示図

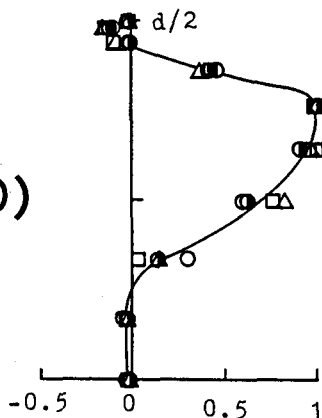


図10、抗力成分の分布図

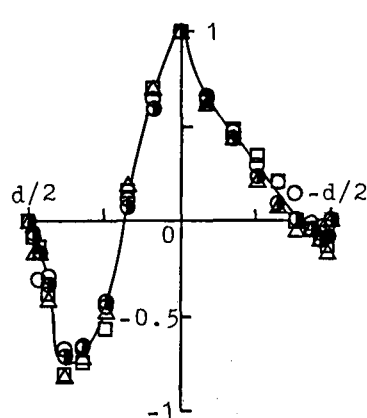


図11、揚力成分の分布図

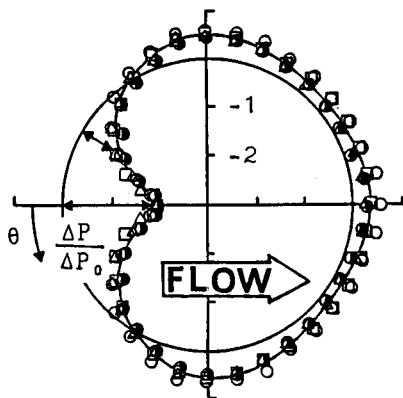


図 12、水平断面上の圧力分布図

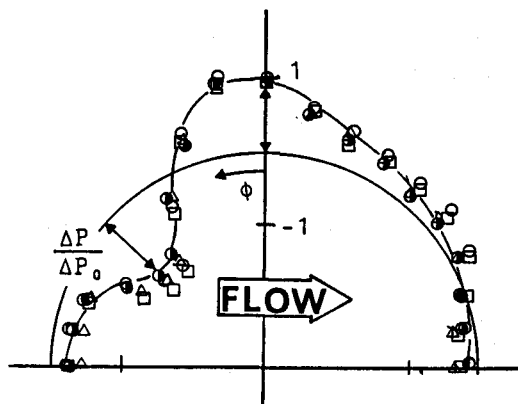


図 13、垂直断面上の圧力分布図

また、先に述べたように仮想底面の位置は、約 $\phi = 50^\circ$ の所であり、図 10 より $D_{i\max}$ の位置また図 13 より過剰圧力 ΔP の最大の位置と同じになり、 ϕ がそれ以上の表面では、 D_i 、 ΔP の値は 0 に近くなる。これらのことは、仮想底面の位置で乱れの生成が最大となり、その面以下では粗度要素より上方の鉛直方向での運動量の交換による主流の乱れ (Reynolds 応力) にはあまり寄与していないことを示している。したがって、仮想底面を上述した位置に決定することの妥当性については、圧力分布からも説明することが出来る。

(3) 流体力の算定法について

従来から言われているように、流体力の算定を抗力係数 C_d 、代表流速 U_0 を用いた次式による方法を検討してみる。

$$D = C_d A \frac{\rho U_0^2}{2} \quad (4)$$

ここで、抗力 D は表 2 の値を使い、 U_0 は表 1 の U_∞ の値を用い、面積 A を今回は半球が密に敷かれている場合についてのみ考えているので、先に述べた図 6 の半球 1 つの受持ち面積を用いる。図 13 は、この結果を示しており、Reynolds 数にかわりなく、代表流速に U_∞ をもちいることにより、抗力係数 C_d は一定値 0.01 に近い。このように、 U_∞ を測定し、図 14 のような Reynolds 数と抗力係数の関係図を用いることにより、抗力の算定は可能となる。また、境界層厚 δ が未知であり、 U_∞ の位置が簡単にわからない場合には、半球が密に敷かれている場合には仮想底面を、 $0.2d$ の位置に仮定し、境界層内の平均主流速を数点測定し、(2) 式対数分布則にのせることにより、摩擦速度を、ひいては抗力を算定することが可能である。一方、抗力 D を算定することができれば、揚力 L は表 2 のように L/D の値が一定値 0.6 に近いことより、揚力

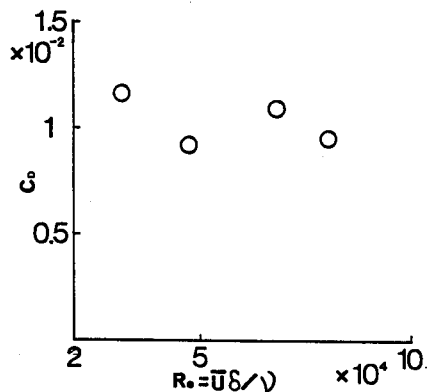


図 14、Reynolds 数と C_d の関係図

も同時に算定することができる。

3. 終わりに

今回は、流体力の算定法として、主に仮想底面を用いて境界層内の流速分布から決定することを検討してみた。ここで、仮想底面の位置については、過去の論文と比較して、今回のような河床モデルの時は粗度要素の径の0.2倍の値をとればよいことが明らかになった。また、最大流速を代表流速にすることによって抗力係数 C_d も一定値に近くなることと、Reynolds数に関係なく抗力と揚力の比は一定値0.6の値をとるということなども明らかになった。しかし、本実験においては、すべてのRunにおいて、境界層厚が10cm前後であること、粗度要素の径を一種類しか用いてないなどの、実験条件が限られているために、今後、数多くの異なった条件において同様の実験をすることが今後の課題である。また、河川の護岸の適当な粗度を確保するためにどのような粗度要素およびその配列について調べておくことが重要と思われるので、この点について今後検討していくつもりである。

参考文献

- 1) Einstein, H.A: Hydrodynamic Forces on a Rough Wall, Reviews of modern physics, Vol.21, 1949
- 2) Chepil W.S: The Use of Evenly Spaced Hemispheres to Evaluate Aerodynamic Forces on a Soil Surface, Trans. A.G.U. Vol.39, No.3, 1958
- 3) 中川・辻本・細川: 底面に沿って転動する粒子の運動と流体力について, 第23回水理講演会論文集、1979
- 4) 山田・川端: 浸透層上の流れの抵抗則に関する実験的研究, 土木学会論文集, 第325号, 1982
- 5) 神田・鈴木: 球状粗度の床面における浅い流れの抵抗特性, 土木学会論文集, 第357号, 1985
- 6) 城・植松・藤崎・吉川: 粗度近傍の流れと流体力に関する実験的研究, 第31回水理講演会論文集 1987
- 7) Schlichting, H: Boundary-Layer Theory, Seventh-Edition, McGraw-Hill