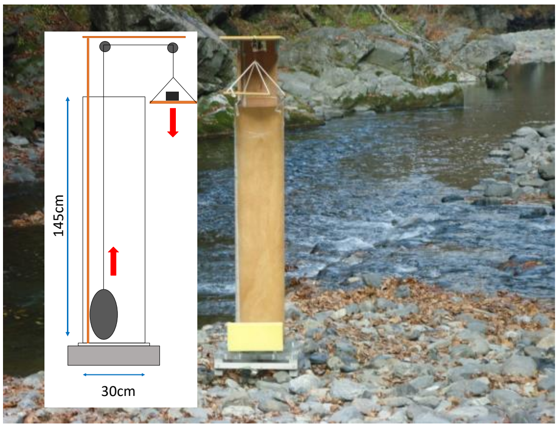
付着藻類繁茂の有無と礫間距離による河床礫群の抗力特性変化に関する基礎実験

埼玉大学　学生会員　○長谷見　優
埼玉大学大学院　正会員　田中　規夫
埼玉大学　学生会員　松尾　昂祐
埼玉大学　非会員　中嶋　一貴

１．研究背景と目的

ダム下流河川においては，土砂供給量の減少，それに伴うアーマーリング現象により，付着藻類の異常繁茂や水生昆虫群集の多様度低下がみられる．そのため，多くのダムにおいてフラッシュ放流や置き砂による土砂還元が行われている．土砂還元を行うにあたって，還元土砂が巨礫背後の遮蔽域に堆積しやすいことから，土砂移動特性を把握するためには，巨礫背後の遮蔽域の流れ場を把握することが重要であること，巨礫背後の遮蔽域の流れ場に影響を与える巨礫群の抗力特性を把握することが必要性であることが，Tanaka ら[1)]によって指摘されている．



図−1 実験装置(坂田・田中[2)]より引用)

巨礫の持つ抗力の測定と，礫付着藻類が抗力に及ぼす影響調査は，坂田・田中[2)]の吊り上げ実験によって行われているが，課題が２つある．１つは礫の吊り上げが単体での実験であったこと，２つ目は付着藻類の繁茂量が異常繁茂状態と比較すると比較的少ない条件下で行われていること，である．実際の河床において，巨礫は連続して存在しているため，抗力を測定する際にも，礫が連続している状態（前の礫の遮蔽を受けた状態）で実験する必要がある．また，巨礫背後では剥離渦が発生し，それに伴って流速が変化する．前述した礫が連続している状況下では，下流側の礫に働く抗力も前礫との位置関係により変化する可能性が高い．そのため，吊り上げ実験の際に，礫の間隔を変えて調査する必要がある．また，２つ目の付着藻類繁茂量は後流そのものを大きく変え，結果として抗力特性もそれに伴って変化する可能性がある．

そこで本研究では，坂田・田中[2)]によって行われた吊り上げ実験を連結した礫で，付着藻類あり・なしで比較することで，実際の河床により近づいた抗力を求めることを目的とした．

２．実験概要

２．１抗力測定実験(単独・連結比較)

礫の抗力特性を沈降実験で把握する場合には，礫の周囲に３次元的な交番渦が形成され礫が振動するが，実際の河床の場合には，剥離渦が上方のみから形成される．また，流体に対して礫の投影面が変化しないような状態での実験が求められる．しかし，条件を満たす実験水路と分力計を用いた実験をするためには，礫の持ち運びと水路への設置が必要である．礫の付着藻類が剥がれないよう，また活性を失わないように持ち運び，かつ水路に設定するのは困難である．そうした状況を踏まえ，実験装置は坂田・田中[2)]が用いた円筒水槽において連結礫を吊り上げた．実験には荒川本川本田地先で採取した礫を使用し，付着藻類あり(P)，なし(N)の状態でそれぞれ単独(S)，連結(C)による吊り上げを行った．経験により，礫を短軸長 c と中軸長 b の比によって扁平形礫($c/b < 0.56$)と丸形礫($c/b > 0.6$)に分類したとき，本実験では用いた礫はすべて扁平形礫に分類された．

２．２礫の間隔が抗力に及ぼす影響調査

実験２．１と同様の装置を用いて，礫の間隔を変えて吊り上げを行った．遮蔽域の流速は礫の高さの半分ほど先で変曲点に達するとされているが，実験２．１のような礫間が 13.8cm と広い場合でも，単独の方が連結より抗力が大きかった(図−2)ため，下流側の礫が受ける流速が衰えたといえる．ここに，礫単独の抗力係数

キーワード　付着藻，抗力係数，吊り上げ実験，連結礫，礫間隔
連絡先〒338-8570 埼玉県さいたま市桜区下大久保 255 埼玉大学 TEL048-858-3564 E-mail: tanaka01@mail.saitama-u.ac.jp

Cd，礫連結の抗力係数$\overline{\mathrm{Cd}}$とレイノルズ数 Re は以下の式のより定義した．

$$\mathrm{Cd}=\frac{W_0'-W_0}{\rho u^2 A} \quad (1) \qquad \overline{\mathrm{Cd}}=\frac{W_0'-W_0}{\rho u^2(A_1+A_2)} \quad (2) \qquad \mathrm{Re}=\frac{u\cdot b}{\nu} \quad (3)$$

ここに，W'_0：おもりの重量(N)，W_0：水中重量(N)，ρ：水の密度(g/cm^3)，u：終局速度(m/s)，A：礫の投影面積(m^2)，A_1：連結における礫 1 の投影面積(m^2)，A_2：連結における礫 2 の投影面積(m^2)，b：礫の中軸長(m)，ν：水の動粘性係数(kg/m·s) である．

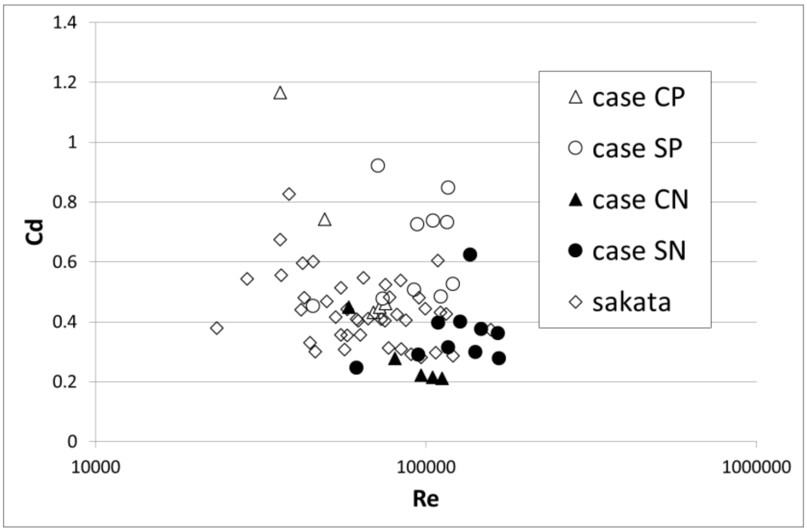


図-2 レイノルズ数 Re と付着藻類の有無，単独・連結礫による抗力係数 Cd の変化

実際の河川において，河床礫の間隔は多様であるため，様々な間隔での実験が求められる．底面上の物体は以後の再付着点距離は，単一半球の場合は半径の 1.7 倍程度[3]、相互干渉が弱い半径の 4 倍の距離で配置された半球、もしくは単一半球の場合はレイノルズ数やフルード数によって異なるが，半径の 0.8，1.8 倍程度[4]，球の場合は直径の 1 倍程度[5]であることから，今回は，礫高さの半分ほどの間隔から，当初の実験条件である間隔 13.8cm（直径の約 3.7 倍）までを，3 ケース変化させた実験を行い，礫間隔と抗力係数の関係について調査した．実験は，図-2 の実験結果から，付着藻類の有無が抗力係数に及ぼす影響は一様であると判断したため，付着藻類なしで行った．

実験装置はより大きいほうが望ましいが，円筒の断面積 A_C が 627.475cm^2 に対し、使用した礫の投影面積 A_S は一番大きい礫で 50.2cm^2 なので，側壁部分を考慮しても最大で A_S/A_C =0.080 となる．岡本・山口[5]の

表-1 実験に使用した礫

	礫1	礫2	礫3
長径(cm)	9.1	12.2	13.1
短径(cm)	7.8	10.1	9.5
高さ(cm)	3.2	3.7	4.9
体積(cm^3)	120.1	235.5	318.1
質量(g)	300.5	708.9	937.5
密度(g/cm^3)	2.5	3.0	2.9
重量(N)	2.9	7.0	9.2
水中重量(N)	1.8	4.6	6.1
投影面積 *As*(cm^2)	23.1	35.1	50.2
As/*Ac*	0.037	0.056	0.080
備考	単独実験に使用	連結実験の後ろおよび単独実験に使用	連結実験の前に使用

風洞実験を参考にすると，側壁の存在で周囲流体が加速される影響により，Cd は 2～8%程度小さくなる可能性がある．しかし，岡本・山口[5]の風洞実験では風洞断面が四角形で物体が球という条件だったのに対し，本

研究の吊り上げ実験では周囲流体が入る水槽が円柱で物体は実際の礫で球よりは扁平であるため，定量的な値はおおよその目安として記載したものである．いずれにせよ，現場に存在する様々な形状の礫を対象としており，その代表値を把握することを目的としているので，側壁影響は小さいと判断してよい．

２．３実験で使用した礫について

実験には，前述したように荒川本川本田地先で採取した礫を使用した．使用した礫の各値を**表-1** に示す．

３．結果および考察

３．１抗力測定実験(単独・連結比較)

図-2 に抗力係数 Cd のレイノルズ数 Re による変化を示す．付着藻類の有無で比較した場合，CN と CP，および SN と SP では，どちらも付着藻類ありの方が抗力係数は 1.5～1.7 倍ほど増加していた．坂田・田中[2)]の実験ではおよそ 1.25 倍ほどであり，本研究の実験の方が付着藻類の影響が大きかったと判断できる．坂田・田中[2)]の実験で使われた礫の付着藻類が表面を薄く覆う程度であったのに比べ，本研究で用いた礫の付着藻類（**図-3，4**）は，実験時に下流側になびくほど多かった($0.03 g/cm^2$)ため，上記のように影響が大きかったと判断できる．藻の生え方に着目すると，坂田・田中[2)]で使われた礫の付着藻は古い藻であり，礫表面に一様に生えていたため，摩擦が小さくなり，抗力への影響も少なかったと考えられる．対して本研究で使った礫の付着藻は比較的新しい藻であり，礫表面にまばらに生えていたため，摩擦が大きく，抗力への影響が大きくなったと考えられる．いずれにせよ，付着藻の繁茂で抵抗が大きくなるため，底面付近にはより低速の流速域が形成される．すなわち，礫背後の土砂移動性が低くなると考えられる．

また，連結と単独で比較した場合，すなわち CP と SP，および CN と SN では，どちらも当初の予想通り単独の方が連結の２倍ほど大きくなった．礫の後流域では流速が低下するため，下流側の礫が受ける抗力係数が下がったため，連結礫全体としての平均抗力係数が下がったと考えられる．

図-3 坂田・田中[2)]で使われた礫および付着藻

図-4 本研究で使った礫３および付着藻

３．２礫の間隔が抗力に及ぼす影響調査

連結実験にて礫間隔を変えた場合の抗力係数の比較を**図-5** に示す．間隔 7.0cm の場合から抗力に変化が顕著に表れた．その後は間隔 3.3cm，7.0cm としても大きな変化は見られなかった．よって 13.8cm から 7.0cm，すなわち礫高さ(3.7cm)のおよそ2～3.5倍の範囲内で変化が顕著に表れる点が存在すると考えられる．これは，既往研究[3),4)]の再付着点距離よりも長い．扁平で高さよりも横幅が広い礫の再付着点距離が長いため，やや大きめの値となったと考えられる．

なお，Suren ら[6]は，礫に苔が付着した場合の抗力係数について，表面に厚みを持ってクッションのように生えるタイプは抗力係数を増加させるが，礫背後まで流線型で生えるタイプは抗力係数を減少させることを示し，苔が生えることで礫がさらに動きづらくなることを示唆している．本実験の結果では，比較的長い付着藻類で流線型をしたものでも抗力係数は増加する傾向があり，Suren ら[6]の結果とは異なった．苔と付着藻類では硬さや流れに対する振動特性が異なることから，傾向が異なったと考えられるが，これについては更なる研究が必要だと考えられる．

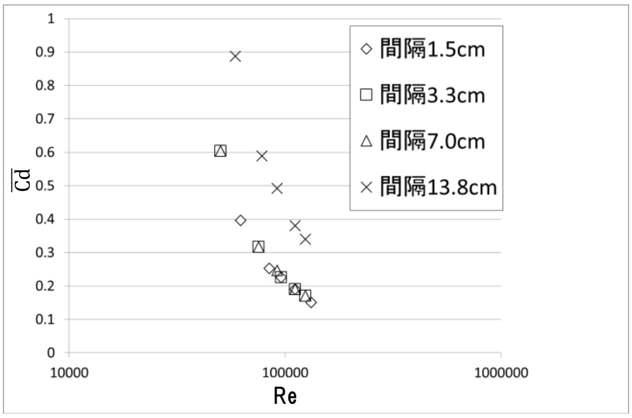


図-5 レイノルズ数 Re と礫間隔による$\overline{Cd}$の変化

また，坂田・田中[2]において議論されたように，抗力係数が大きくなるということは粗度層流速を減少させ，遮蔽域の土砂を動かしづらくさせる．すなわち，底面せん断力を減少させると考えられる．

４．結論

吊り上げ実験では，礫が連続で存在する場合よりも，礫が単独である場合に抗力係数が増加した．この結果は，実際の河川において，巨礫周辺ではアーマーリング現象の初期過程において土砂を動かしやすいが，アーマー化した河床では土砂を動かしづらいということを表している．また，付着藻の繁茂で抗力係数は増大した．すなわち，アーマー化した河床で付着藻が繁茂するとさらに土砂が動きづらい可能性が示された．今回の実験で使用した礫のような扁平で高さよりも横幅が広い礫では，既往研究[3),4)]と比べて，再付着点距離が長くなった．よって今後は礫の形と間隔が抗力係数に及ぼす影響を究明していくことが重要となるであろう．

謝辞　本研究を実施するにあたり，河川財団・H26－27 年度河川整備基金（代表者：田中規夫）の支援を受けた．坂田良介氏に研究の助言をいただいた．記して謝意を表す．

参考文献

1) Tanaka N. et al., Turbulent structures in form-induced sublayer and subsurface layer of modeled armoured gravel bed stream, and sand movement, Proc. of the 19th IAHR-APD Congress 2014, Hanoi, Vietnam, 2014.

2) 坂田良介・田中規夫：野外における河床礫の抗力係数測定法の提案と付着藻繁茂による抗力特性の変化，土木学会第 70 回年次学術講演会Ⅱ-034，p.67-68, 2015.

3) 田中規夫：底面上の 3 次元ならびに 2 次元物体後方の組織的渦構造の変動特性，ながれ 10(2), 93-105, 1991.

4) 高橋迪夫; 木村喜代治. 礫床河川の流れの抵抗に及ぼす巨礫の影響に関する二，三の基礎的検討. 水工学論文集, 1992, 36: 241-246.

5) 岡本史紀; 山口昌宏. 平面壁上の球のまわりの流れに及ぼす風洞壁の閉塞影響. 日本航空宇宙学会誌, 1988, 36.415: 396-401.

6) Suren, A.M. et al., Drag coefficients of stream bryophytes: experimental determinations and ecological significance, Freshwater Biology 45, pp. 309–317, 2000.