

開水路の平均流速公式について

久 宝 保*
田 中 要 三**

開水路の設計資料となる水流の平均流速公式についてのべることとする。

1. 従来公式

つぎに従来用いられた平均流速公式を示しておく。このうち Chézy (1818) の式は簡単な力の釣り合いからえられるが、実際の開水路の流速とはやや隔りがある。Bazin (1865) はその式を 実測結果にあてはめようとしたが、理論的ではない。Ganguillet-Kutter (1870) の式は有名で、その粗度係数の値が多く示されていてきわめて便利であるので、現在でも用いられている。Manning (1890) の式もその粗度が利用できるもので、現在さかんに用いられている。しかしなお実測結果とはやや相違があるので、一般に Manning 系の式と称して、Tutton (1896) の式が用いられるようになり、Forchheimer (1923)、溝江 (1932)、永井 (1942) 等の式が生じた。いま平均流速を u_w とすると、1800 年以後の公式のおもなものは¹⁾、

Eytelwein (1801), $u_w = 80.9 \sqrt{RJ}$, (R : 径深, J : 勾配)

Prony (1804), $RJ = 0.000\ 044\ 5 u_w + 0.000\ 309\ 31 u_w^2$

Du Buat (1779), Girard (1803), 同形

Du Buat (1816), $\frac{48.85\sqrt{R} - 0.80}{\sqrt{\frac{1}{J} - \ln\sqrt{\frac{1}{J} + 1.6}}} - 0.05\sqrt{R}$

Prony (1818), $RJ = 0.000\ 044 u_w + 0.000\ 309 u_w^2$

伯林 (1818), $RJ = 0.000\ 024 u_w + 0.000\ 366 u_w^2$

Chézy (1818), $C\sqrt{RJ}$, (C : Chézy 係数)

Kutter (1841), $\frac{100\sqrt{R}}{b + \sqrt{R}} \sqrt{RJ}$, (b : Kutter 係数)

Lahmeyer (1845, 1852), $\left(\frac{RJ}{0.000\ 4021}\right)^{2/3}$

Humphrey Abbot (1861),

$$\left\{ \sqrt{0.0025 m + \sqrt{68.72 R_1 \sqrt{J}}} - 0.05 \sqrt{m} \right\}^2 \\ \approx (5.0 \sim 5.7) \sqrt{R} \sqrt[3]{J}$$

$$\left(m = \frac{0.933}{\sqrt{R} + 0.457}, R_1 = \frac{A}{p + k}, A: \text{流積}, p: \text{潤辺}, k: \text{常数} \right)$$

Darcy, Bazin (1865),

$$\frac{\sqrt{RJ}}{\sqrt{0.000\ 15 - 0.000\ 40 \left(1 + \frac{0.03 \sim 1.75}{R} \right)}}$$

Guckler (1865), $J > 0.0007: \lambda_1 R^{4/3} J$
 $J < 0.0007: \lambda_2 R^{2/3} J^{1/2}$

Ganguillet-Kutter (1870),

$$\frac{23 + \frac{1}{n} + \frac{0.001\ 55}{J}}{1 + \left(23 + \frac{0.001\ 55}{J} \right) \frac{n}{\sqrt{R}}} \sqrt{RJ}$$

Courtois (1878), $50\sqrt{RJ}$

Harder (1878), $C_1\sqrt{RJ} + C_2 R\sqrt{J}$

Cunningham (1883), $43.7 R^{2/3} J^{1/2}$

Knauff (1887), $\frac{103.7\sqrt{R}}{0.3 + \sqrt{R}} \sqrt{RJ}$ (石積み)

$$\frac{114\sqrt{R}}{0.26 + \sqrt{R}} \sqrt{RJ}$$
 (粘土質)

Manning (1890), $CR^{2/3} J^{1/2}$ ($C = \frac{1}{n}$)

Tutton (1896), $CR^\alpha J^\beta$

Bazin (1897), $\frac{87}{1 + \frac{\tau}{\sqrt{R}}} \sqrt{RJ}$

Harder (1899), $25\sqrt{RJ} + 12.5 R\sqrt{J}$

Hessle (1899), $25 \left(1 + \frac{\sqrt{R}}{2} \right) \sqrt{RJ}$

Kochlin (1899), $k(1 + 0.6\sqrt{R}) \sqrt{RJ}$

Siedek (1901~1905), $\frac{J\sqrt{1000J}}{20\sqrt{B}}$ (B : 河幅)

Matakiewicz (1905), $33.922 T^{0.923} J^{0.48}$,
 $35.4 T^{0.7} J^{0.493+10J}$ (T : 水深),

Christen (1906), $7 \sqrt[3]{TJ} \sqrt[3]{\frac{B}{2}}$

Biel (1907), $100 RJ \left/ \left(a + \frac{f}{\sqrt{R}} + \frac{br}{u_w \sqrt{R}} \right) \right.$, $r = g \mu / \tau_w$

William Hazen (1910), $CR^{0.63} J^{0.54}$

Matakiewicz (1911), $\frac{116 T^{0.493+10J}}{2.2 T^{2/3} + \frac{0.15}{T^2}} T$

Linboe (1911), $\alpha \left(\beta - \frac{T}{B} \right) T^{0.9} J^{0.42}$ 等の一連

Ringelmann (1912), $80 R\sqrt{J}$

* 正員 徳島大学教授, 工学部土木工学科

** 徳島大学助教授, 工学部土木工学科

1) 主として Forchheimer: "Hydraulik", 物部長穂: "水理学", 浅野 好: "開水路の水理" を参考とした。

- Gröger (1913), $23.781 T^{0.776} J^{0.458}$,
 $22.11 T^{0.58} J^{0.43}$
- Hermanek (1913), $0.5 \sim 0.1 \sqrt{RJ}$
 $T < 1.5 : 30.7 T \sqrt{J}$
 $1.5 < T < 6 : 34 T^{3/4} J^{1/2}$
 $T > 6 : \left(50.2 + \frac{T}{2}\right) T^{1/2} J^{1/2}$
- Barnes (1923), $0.97 \sqrt{\frac{2gT}{(\sigma_2/\sigma_1)^2 - 1}}$, (σ_2/σ_1 : 断面係数)
- Forchheimer (1923), $\lambda R^{0.7} J^{0.5}$
- Hopf, Fromm (1923),
 $10 \sqrt{2g} \left(\frac{R}{k_s}\right)^{0.157} \sqrt{RJ}$, R/k_s : 比粗度)
- Eisner (1923), $\frac{\sqrt{2gRJ}}{\sqrt{\lambda \left(\frac{u_w R}{\nu}, \frac{R}{k_s}\right)}}$
- Winkel (1923~1928), $R^{5/7} J^{1/7} (185 - 210 T^{0.5/7})$
- Lindquist (1926), $\frac{108.9}{\sqrt{1 + \frac{0.582 \sqrt{RJ}}{\sqrt[3]{u_w R}}}}$
- Matakiewicz (1927), $J = 0 \sim 0.016$, $35.4 J^{0.498+10J} T^{0.7}$
 $J > 0.016$, $2.38 T^{0.7}$
- 溝江 昇 (1932), セメント水路: $175 R^{0.7} J^{0.56}$

砂敷セメント水路: $(150 - 11840 J^{0.793}) R^{0.7-0.56}$
 河川: $(90 - 122 J^{0.186}) R^{0.7} J^{0.56}$

- Montes (1935), $\frac{a}{n} R^x R^{0.5}$, $a = \frac{1}{x}$, $x = 0.65 \sim 0.88$
- 永井荘七郎 (1942), $\frac{1}{n_N} R^{0.55} J^{0.20}$

ただし, g : 重力加速度, μ : 水の粘性係数, ν : 水の動粘性係数, k_s : 不規則な起伏平均高, C, K, λ, \dots 粗度係数, である。単位はすべて m-sec である。

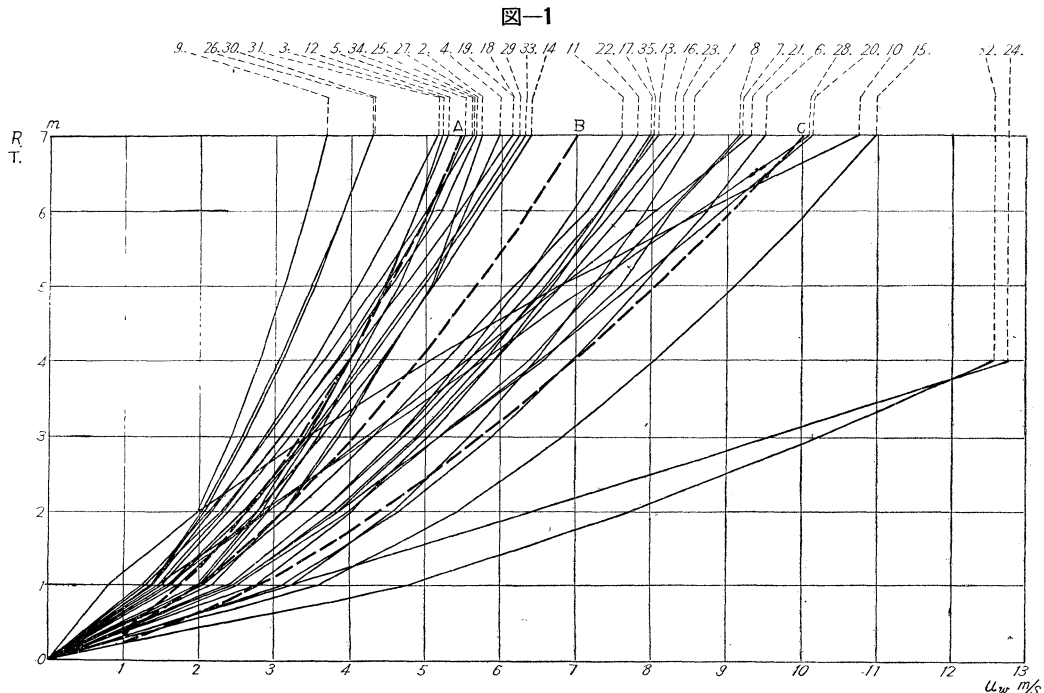
いま例えば $J=0.0016$ とした場合に, 上述の公式のうち比較的容易に計算されるものを比較図示すると 図-1 のようになり, 実際河川でそのいずれを使用すべきかを限定できない状態にあるといえよう。しかし大ざつばに見て, 曲線Aのまわりに集中する曲線群と曲線BおよびCの中間に集中する曲線群の2つに分れるようである。

2. 河川における最近の平均流速公式

1. 対数公式²⁾

$$\frac{u_w}{u^*} = 6.0 + 5.75 \log_{10} \frac{y_1}{k_s}, \quad \frac{y_1}{k_s} > 1 \dots\dots\dots (1)$$

2) 例えば, 岩垣雄一: "開水路水流の理論", 水工学の最近の進歩, 土木学会 (1953)



1. Eytelwein	1801	10. Guckler	1865	19. Hessele	1899	28. Strickler	1923
2. Prony	1804	11. Ganguillet Kutter	1870	20. Koechlin	—	29. Forchheimer	1923
3. Du Buat	1816	12. Courtois	1878	21. Matakiewicz	1905	30. Matakiewicz	1927
4. Prony	1818	13. Harder	1878	22. "	1905-1911	31. Warshaw	1930
5. Berlin	1818	14. Cunningham	1883	23. William Hazen	1910	32. Mizoe	1932
6. Kutter	1841	15. Knauff	1887	24. Ringelmann	1912	33. "	1932
7. Lahmeyer	1845	16. Manning	1890	25. Groeger	1913	34. "	1932
8. "	1852	17. Bazin	1897	26. "	1913	35. Nagai	1942
9. Humphrey Abbot	1861	18. Harder	1899	27. Hermanek	1913		

ただし、 u_w ：平均流速、 u^* ：摩擦速度 $\sqrt{\tau/\rho_w} = \sqrt{gy_1 J}$ 、 y_1 ：平均水深、 k_s ：相当粗度である。

(k_s は河床の平均起伏高さや底床の最大粒子の高さにはほぼ等しいが、Froude 数で変化し、その高さよりやや大きい)

2. 指数公式

$$\frac{u_w}{u^*} = 7.66 \left(\frac{y_1}{k_s} \right)^{1/6}, \quad \frac{y_1}{k_s} > 10 \quad \dots\dots\dots (2)$$

3. 底質が移動しない場合の公式³⁾

$$\left. \begin{aligned} k_s &= K_1 d_s \\ d_s &= d_{25} d_{50} / d_{75} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (3)$$

(d_{25}, d_{50}, d_{75} は底質のふるい分け通過百分率の 25, 50, 75% に応ずる粒径)

4. 底質が移動する場合の公式

1) 砂漣発生²⁾

$$\log_{10} \frac{k_s}{d_m} = 3.48 \left[1 - 0.225 \left\{ \frac{(u_R^*)^2}{\left(\frac{\tau_s}{\tau_w} - 1 \right) g d_m} \right\} \right]^{-1/2} \dots\dots\dots (4)$$

(椿東一郎氏による緩流河川における相当粗度 k_s を与える。 d_m は境 隆一氏による底質の平均粒径、

$$d_m = \frac{A_1 + A_2}{100} \cdot \frac{A_1 + 2A_2}{2A_1 + A_2}$$

A_1 ：底質のふるい分け百分率の 50% 以下の和、 A_2 ：

同じく 50% 以上の和。 $u_R^* = \sqrt{gRJ}$)

2) 砂漣不発生¹⁾

$$\frac{k_s}{d_m} = 10 \left\{ \frac{(u_R^*)^2}{\left(\frac{\tau_s}{\tau_w} - 1 \right) g d_m} \right\}^{0.769} \dots\dots\dots (5)$$

(石原、岩垣博士による)

3) 不規則起伏³⁾

$$\frac{k_s}{d_s} = \frac{K_2 y_1 J}{(r_s/r_w - 1) d_s} \dots\dots\dots (6)$$

$$u_w = C_s g^{0.5} y_1^{0.5} J^{0.323} \dots\dots\dots (7)$$

5. とくに浅い流れ³⁾

$$\frac{u_w}{u^*} = 5.75 \left[\left(1 + \frac{1}{28.5} \frac{k_s}{y_1} \right) \log_{10} \left(1 + 28.5 \frac{y_1}{R_s} \right) - 1 \right] \dots\dots\dots (8)$$

$$y_1/k_s < 1$$

(J. Rotta の粗面円管の理論より、玉石上の水流の実験結果による。 r_s, r_w はそれぞれ水と底質との単位体積重量)

ただし、3) は筆者による(未発表)。

以上のように最近の傾向は、乱流理論より発した相当粗度の解明による平均流速公式と、それを実用的に近似させた指数公式が多い。

4) 岩垣雄一：“雨水流による地面浸食機構に関する基礎的研究”(昭和30年)

学会備付図書(国内)一覧(23)

I. 昭.32.12.~昭.33.1. 間に寄贈を受けた分

○土木学会東北支部設立 20 周年記念誌 ○土木学会中国四国支部 第 9 回学術講演会講演要旨 昭.32.11.27~28 ○雨量年表 第 4 回 昭.27.~昭.28. (建設省河川局) ○鉄筋コンクリート設計方法 第 3 次改訂：工博 吉田徳次郎(養賢堂) ○コンクリートパンフレット 54 コンクリート工作：工博 近藤泰夫(日本セメント技術協会) ○河川堤防のための土質力学 理工文庫：内田一郎(理工図書KK) ○神瀬調査報告書(第四港建) ○都市不燃化運動史(都市不燃化同盟) ○圧縮空気および空気圧縮機について(その 1) 研究資料 35：鈴木啓司(鹿島建設技研) ○日本塩学会誌 第 1 巻~第 10 巻(通巻 1~49

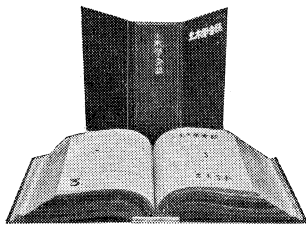
号) 昭.22.~昭.31. 総目録 ○佐野利器(佐野博士追想録編集委員会) ○人間世界の遷り変り：高西敬義 ○東大土木同窓会会員名簿 昭.32.10.現在 ○衛生工業協会会員名簿 昭 33 年度 ○造船協会会員名簿 昭.32.12.10 現在 ○東京建築士会会員名簿 昭 33 年版 ○日本金属学会会員名簿 附金属関係会社録 昭.32.9.30 現在 ○農業土木学会会員名簿 昭 32 年度

II. 昭.32.12.~昭.33.1. 間に購入した分

○地震力を考えた構造物設計法 OHM 文庫 309：工博 岡本舜三(オーム社)

付記 学会備付図書(国内)一覧(22)は 42-12・p. 18 に掲載

土木学会誌“合本用ファイル”の頒布について



御要望に答えて学会誌合本用の専用ファイルを作りました。ピンで簡単に製本ができ、必要なときにはその号だけ抜き出せる特長があり、購入された方々より非常に便利だとの好評を得ております。目下のところ学会誌だけですが、さらに御希望が多ければ論文集用ファイルも考えております。第 6 回目の製品を目下頒布中ですからなるべく一括して御注文下されば送料が安くなります。

なお製品はテッサー工業KKと特約したものであります。

記

体 裁：B5判 学会誌 12冊綴用、薄グリーン・クロース装、金文字入り
頒 価：1部 140円(〒30円) 申込方法：御送金次第、折返しお送り致します。