

氾濫原での流量予測式とフィッツロイ横断路 (西オーストラリア)での観測との比較

A New Discharge Formula of an Overbank Flow and its Application to
Fitzroy Crossing, Western Australia

玉井 信行*

By Nobuyuki TAMAI

Resistance of the overbank flow is decomposed into surface resistance and form resistance. Form resistance caused by tall vegetation in the floodplain is explicitly formulated by the form drag of trunks and momentum loss due to macroturbulence generated by a branch-leaf complex. Hydrodynamic parameters in a formula are determined by the critical review of existing knowledge on coherent structures in turbulent open channel flows. An application of the proposed formula to the overbank flow through floodways gives good agreement with observed discharge without any tuning of coefficients.

Keywords: overbank flow, tall vegetation, Fitzroy Crossing

1. はじめに

西オーストラリア州の北部地方(Pilbara, Kimberley)では水文量の変動が激しく、乾期には河道に流水が無くなり、数カ月間しか流水が見られない河川が多い。しかし、一旦、大洪水になると平坦な地形に水が溢れ、流れは数kmの幅にも達する。遠距離と人工密度が低い故に、経常的な観測網を整備することは経済的に成立せず、高水位の場合の水位-流量曲線は低水位の観測例を外挿せざるを得ないのが現状である。従来の資料を統計的に分析することにより、水位-流量曲線を幾つかの水位区間に分割し、最適な関数形を推定する方法が提案されている(Bates, 1990)。しかし、これも低水路満杯流量までを対象としており、氾濫原上の流れを含むと外挿曲線はかなり低めの見積りとなることが多い(Bates and Pilgrim, 1983)。ここでは氾濫原上の流れを1次元的なアプローチによって、普遍的な因子で記述し、観測値が殆ど無い地域での合理的な流量予測を可能にすることを目的とする。

2. 抵抗要因の特徴について

オーストラリアの河川は極く少数を除いては無堤と言ってよく、低水路と氾濫原との間には明確な区別は見られない。低水路の中にも樹木が見られる例は多く、平坦な島大陸と呼ばれるオーストラリアでは、高水位になれば水面幅は一気に広がる。高水数という言葉は整備された高水のための断面という響きがあるので、こ

* 正会員 工博 東京大学教授 工学部土木工学科
(〒113 東京都文京区本郷7-3-1)

では氾濫原という言葉を用いる。

氾濫原での抵抗を表面抵抗と形状抵抗とに分けて考える。表面抵抗としては表面粗度と草などの背丈の低い植生を含めて考える。表面被覆の状況は氾濫原と低水路とで大差はないと考え、表面抵抗を表わす粗度係数は両者で同一と考える。低水路での粗度係数は実測例が得られ易いものであるので、氾濫原上の流れにおいても、表面抵抗についてはその河川の特徴を折り込んだ、検証された資料を得ることができる。

問題は形状抵抗の見積りである。図1は氾濫原上の樹木、灌木の模式図である。これらは氾濫原に特徴的な粗度因子である。上述のように樹木は低水路にも存在するが、大きな河川ではその密度は水辺を除いて低いので、低水路での樹木の影響は無視することにする。樹木群による抵抗を、固体が存在することによる形状抵抗と枝・葉により生ずるマクロ乱流による抵抗に分ける。後者は主としてボイルを生じさせるための抵抗因子と考える (Jackson, 1976; 木下, 1984)。次節においてこの抵抗分類に基づいて定式化を行う。

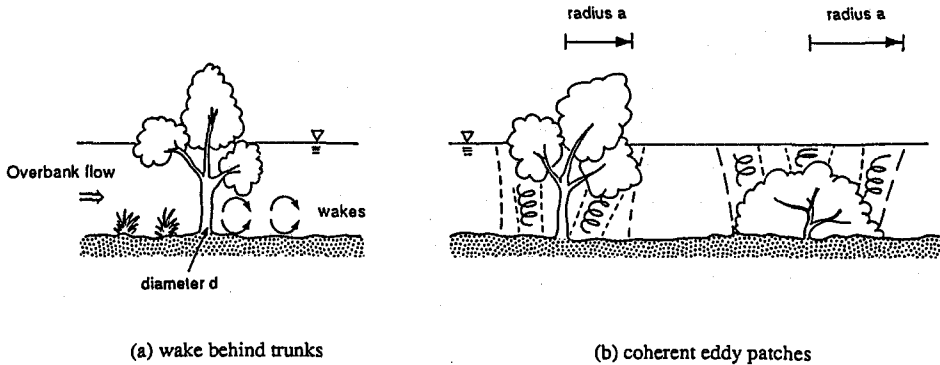


図1 氾濫原上の樹木と組織渦塊の生成の模式図

3. 樹木の形状抵抗の定式化

まず、樹木に被われている地域の割合を β_s とする。 $(1 - \beta_s)$ の地域では表面抵抗のみを考えればよく、この地域には低水路と同一の粗度係数を用いる。オーストラリアの河川では径深に対する依存性はシェジー公式の方が経験的に優れているとのことであった (水公社Mr. Brian Chesterによる) ので、本論文ではシェジー式を用いる。樹木域の中での樹木の密度については後述する。 U_{r0} を氾濫原上の流れの断面平均流速、 U_{r0f} を樹木のない領域での断面平均流速、 U_{rat} を樹木域での断面平均流速とすると

$$U_{r0} = (1 - \beta_s) U_{r0f} + \beta_s U_{rat} \quad (1)$$

を得る。添字0は1次元的な取扱であることを示す。樹木域外での流速は $U_{r0f} = C_m D_r^{1/2} S_0^{1/2}$ で示される。ここに、 C_m は低水路のシェジーの係数、 D_r は氾濫原での水深、 S_0 は水面勾配である。

樹木の幹を円柱で近似する。 M を円柱の横断方向の間隔、 L を縦断方向の間隔、 d を円柱直径、 ρ を水の密度、 C_D を抗力係数とすれば、幹による抗力 F_{D1} は $F_{D1} = (1/2) C_D \rho U_{rat}^2 \cdot D_r d$ となる。

次に、マクロ乱流による運動量損失を見積ろう。本論文ではこのマクロ乱流を組織渦塊とよぶことにする。組織渦塊の代表的な発生周期を T とし、継続時間を T_d とする。渦塊を加速するに要する運動量は $\rho \pi a^2 D_r U_{rat} (T_d / T)$ である。ここに、 a は組織渦塊の代表半径であり、鉛直方向には渦塊は全水深を占めていると考える。定常状態を考えているので生成される割合と消失する割合は同一であり、 $T = T_d$ である。組織渦塊の生成による慣性抵抗 F_{D2} は次式で与えられる。

$$F_{D2} = \rho \pi a^2 D_r U_{rat} / T \quad (2)$$

組織渦塊は樹木の周りに留まるのではなく、代表周期 T で樹木から放出される。従って、この渦塊の存在によって流れが完全に閉塞されることはない。現在の議論では横断面内において樹木の枝葉が $2a/M$ の領域を

占めていると考えている。枝葉による流れの障害係数 1_b を導入して、有効断面係数 A' を $A' = (1 - 2 \cdot 1_b a / M)$ と書くことにする。組織渦塊の速度は 0 から出発して最終的には樹木域での平均流速 U_{f0t} に達する。代表速度としては、総合的に見て $0.5 U_{f0t}$ と考える。したがって、 $1_b = 0.50$ と考えるのが、現在のところ最も妥当であると思われる。

表面粗さによって生ずる底面せん断応力の縦断方向成分を τ_{bx} とする。この τ_{bx} は表面抵抗のみを表わすので、シェジの係数は低水路と氾濫原で共通であり、 C としては C_m を用いればよい。有効断面積の減少を考慮して流水部分のみの表面抵抗力 SD は $SD = A' L M \tau_{bx} = A' L M \rho g U_{f0t}^2 / C_m^2$ となる。重力加速度の流れ方向の成分は $g S_0$ であり、これが有効質量 $\rho A' L M D_f$ に作用する。したがって、力の釣り合い式は次式となる。

$$D_f S_0 - \frac{1}{C_m^2} U_{f0t}^2 - \frac{C_D}{2g} \frac{D_f d}{A' L M} U_{f0t}^2 - \frac{\pi a^2}{A' L M} \frac{D_f U_{f0t}}{g T} = 0 \quad (3)$$

開水路において代表的なバースト周期 T_B は次式で与えられる (Nakagawa and Nezu, 1981)。

$$T_B U_{max} / H = 1.5 \sim 3 = \alpha_P \quad (4)$$

ここに H は水深 (D_f)、 U_{max} は水表面での最大流速である。微視的なバーストと水深規模の代表長さを持つマクロ乱流との直接的な関係には未だ不明な部分も多いが、 T と T_B の間に線形な関係を仮定する。

$$T = \alpha_B T_B = \alpha_B \alpha_P D_f / U_{max} = (\alpha_B \alpha_P / \alpha_S) (D_f / U_{f0t}) \quad (5)$$

ここに、 $\alpha_S = U_{max} / U_{f0t}$ 、 $\alpha_B = T / T_B$ である。式 (5) を式 (3) に代入すると次式を得る。

$$D_f S_0 - \frac{1}{C_m^2} U_{f0t}^2 \left(1 + \frac{C_m^2}{2g} C_D \beta_t + \frac{C_m^2}{g} \beta_b \frac{\alpha_S}{\alpha_B \alpha_P} \right) = 0 \quad (6)$$

ここに、

$$\beta_t = D_f d / A' L M, \quad \beta_b = \pi a^2 / A' L M \quad (7)$$

である。したがって、氾濫原の樹木域での等価なシェジの係数 C_{ft} は次式で与えられる。

$$\begin{cases} C_{ft} = C_m / (1 + K_1 + K_2)^{1/2} \\ K_1 = (C_m^2 / 2g) C_D \beta_t, \quad K_2 = (C_m^2 / g) (\beta_b \alpha_S / \alpha_B \alpha_P) \end{cases} \quad (8)$$

式 (8) に示されるように樹木域での等価シェジ係数は低水路の表面粗度と樹木群の幾何学的、流体力学的特性によって表わされる。流体力学的な係数については次節で考察する。

式 (1) により全断面での平均流速が定まると、氾濫原全体での等価なシェジ係数 C_f が、次式で得られる。

$$C_f = \{ (1 - \beta_s) + \beta_s / (1 + K_1 + K_2)^{1/2} \} C_m \quad (9)$$

4. 流体力学的な係数値に関する考察

本論文で対象としている組織渦塊は幾つかのボイルから成り、かつ全体もボイル状の挙動を示すものと想定している。大規模なバースト運動の発生周期に関する係数を、砂漣の後方に生ずる中規模なバーストを経由して考えることとする。Asaeda et al. (1989) は砂漣後方の中規模なバーストの発生周期 T_m を実験的に次のように得た。

$$T_m = 7.5 D_f / D_{f0t} \quad (10)$$

ここに平均流速、水深は氾濫原の樹木域のものに置換している。これより微視的なスケールのバースト周期との比は次式となる。

$$T_m / T_B = (7.5 D_f / U_{f0t}) / (\alpha_P D_f / U_{max}) = 7.5 \alpha_S / \alpha_P \quad (11)$$

速度の鉛直分布として対数則を考えると、最大流速と平均流速との比 α_S は水深と相当粗度 k_s との比の関数となる。 D_f / k_s が 5 から 30 の範囲で $\alpha_S = 1.2$ と近似できる。

砂漣後方の中規模バーストのスケールは砂漣の高さ程度であり、全水深に達するような組織渦塊に比べると

一段階小さいと考えられる。したがって、組織渦塊は中規模バーストとの幾つかが融合して、さらに大規模な乱流構造に達したものと考える。式(11)の関係をTとT_mとの間にも適用する。

水路半幅に千鳥状の円柱を配列した実験においては抗力係数C_Dは1と2の間の値を示した(Tamai and Kodaira, 1989)。上記実験を参考にしてC_D=1.5とする。こうした考察により式(8)で定義される係数K₁, K₂に含まれる流体力学的な係数は求められたことになる。表面抵抗を表わすシェジ係数と樹木群の幾何特性を知れば、K₁, K₂の具体的な値を次式から定めることができる。

$$K_1 = 0.75 \beta_t (C_m^2 / g), \quad K_2 = 3.0 \times 10^{-2} \beta_b (C_m^2 / g) \quad (12)$$

5. フィッツロイ横断路への適用

5.1 1986年洪水の状況と地形

フィッツロイ川の全流域面積は約85,000 km²で、フィッツロイ横断路の地点での流域面積は約45,000km²、流路長は300kmである。フィッツロイ横断路より下流にかけて広い氾濫原が発達している。観測は1956年以降に記録されており、86年洪水はその中の第2位の記録である。この洪水では、氾濫原上の一番多くの点で水位が記録されているので、これを対象とすることにした(全ての現地資料は Main Roads Department, WAの内部の資料に依る)。

表1 1986年洪水で観測された流量

河川および洪水路	流量(m ³ /s)
Two Mile Creek Floodway	2,580
Two Mile Creek	630
Cooree Billabong Floodways	8,180
Blue Bush Creek	360
Gogo Floodway	2,750
計	14,500

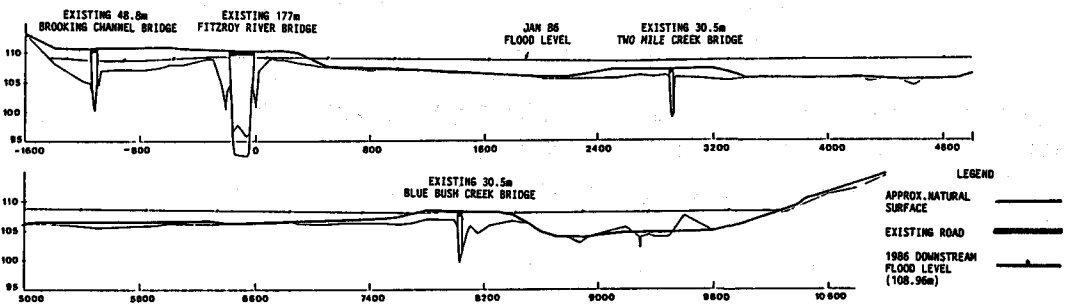


図2 フィッツロイ横断路の縦断方向の断面図

フィッツロイ横断路の縦断方向の断面図を図2に示す。フィッツロイ川の本流自身は溢水していない。フィッツロイ川左岸からGogo地点までの間で観測された流量を表1に示す。この区間には2つの小河川が含まれているが、それらの流量と幅は小さい。したがって、この区間全体を氾濫原上の流れと見做すことが可能であると考えられる。自然地盤高の平均はE L 106.30mと考えられる。1986年洪水の横断路下流側での水位はE L 109.00mであり、氾濫原上での水深D_f=2.7mである。上流側水位は背水の影響を受けるので、下流側の記録を用いる。フィッツロイ川左岸からGogo地点までの等価な長方形断面の幅は9,400 mである。

5.2 氾濫原での流れの考察

まず表面抵抗を表わすシェジ係数を求める。これはフィッツロイ川の本流の資料を用いて算出する。フィッツロイ橋の地点での断面形はほぼ台形で上辺が180m、底辺が100mである。底面はE L 92.5mであるので、水深は16.5mである。等価な長方形断面に直すと、幅140m、深さ16.5mとなる。水面勾配を求めるには、氾

濫原上の数カ所の水位資料を図面から読み、平均を取った。その結果、 $S_0 = 2.6 \times 10^{-4}$ である。残念ながら1986年洪水では本流における水位記録は見当たらないが、1983年の例はこの氾濫原上の値に近いので、1986年洪水での本川の水面勾配も $S_0 = 2.6 \times 10^{-4}$ とする。フィッツロイ橋での流量は $5,300 \text{ m}^3/\text{s}$ と報告されているので、低水路のシェジー係数 C_m は

$$C_m = Q_m / (A_m R_m^{1/2} S_0^{1/2}) = 39.0 \quad (13)$$

である。添字 m は低水路の水理量を示す。この値がフィッツロイ横断路地域の表面抵抗を表わす係数と考えられる。

背丈の高い植生の流れへの効果は以下のように算出される。総括的な樹木域の割合 β_s は空間密度の平均値として得られる。2つの水路の水際の計400m 区間では90%の割合で樹木が見られ、他の領域では6800mの区間で70%、2200m区間で60%程度である(Mr. Jerome Goh, Main Roads Dept. による)。したがって、対象区間9400mの内、包括的に言って $\beta_s = 0.69$ の区域を樹木域と考えることにする。樹木域においては木の間隔は代表的に10mと考えてよく、幹の直径は0.2-0.6mである(Mr. Jerome Goh による)。従って、 $L = M = 10 \text{ m}$ 、 $d = 0.40 \text{ m}$ とした。枝葉の広がり a は9mと考えるので、 $a = 4.5$ となる。 β_t と β_b は式(7)に依り計算することができる。有効断面係数 A' は $A' = 0.55$ である。形状抵抗の比を表わす係数、 K_1 と K_2 は式(12)により求められ、樹木域および氾濫原全体の等価なシェジー係数は式(8)と式(9)で求められる。これらの一覧を表2に示す。

1次元的な取扱いによる氾濫原上の流れの速度は式(1)あるいは式(9)で与えられる等価シェジー係数 C_f を用いて求めることができる。得られた係数値を用いると、非樹木域での流速は $U_{f0f} = C_m D_f^{1/2} S_0^{1/2} = 1.03 \text{ m/s}$ 、樹木域での流速は $U_{f0t} = C_{ft} D_f^{1/2} S_0^{1/2} = 0.36 \text{ m/s}$ である。氾濫原の断面平均流速 U_{f0} は

$$U_{f0} = C_f D_f^{1/2} S_0^{1/2} = 21.2 \cdot 2.7 \times 2.6 \times 10^{-4} = 0.56 \text{ m/s} \quad (14)$$

表2 フィッツロイ横断路での1986年洪水の氾濫原の流れの水理量一覧

D_f (m)	$L=M$ (m)	d (m)	a (m)	β_s	β_t	β_b	K_1	K_2 ($\text{m}^{1/2} \cdot \text{s}^{-1}$)	C_{ft} ($\text{m}^{1/2} \cdot \text{s}^{-1}$)	C_f	S_0
2.7	10	0.40	4.5	0.69	1.96×10^{-2}	1.16	2.28	5.40	13.2	21.2	2.6×10^{-4}

である。したがって、氾濫原上の流れの全流量 Q_f は

$$Q_f = U_{f0} \cdot A_f = 0.56 \times 2.7 \times 9400 = 14,200 \text{ m}^3/\text{s} \quad (15)$$

式(15)に得られた予測値は表1に示された観測値と極めてよく一致していると言ってよい。経験的な係数には調整を加えていないので、理論構成は本質的な事象を正しく扱えていると考えられる。

組織渦塊の発生周期は $T = 33.8 D_f / U_{f0t} = 254 \text{ sec} = 4.2 \text{ min}$ となる。参考までにフィッツロイ横断路での予測値を示したが、組織渦塊については現地資料の充実が望まれる。

6. 結論

本解析により明らかにされた点は次のようにまとめられる。

- 1) 氾濫原の抵抗要因を表面抵抗と形状抵抗、慣性抵抗に分離し、理論的にこれを導くことができることを示した。
- 2) 表面抵抗を表わす係数は低水路と氾濫原とで共通と考え、その地域の地被状態が、低水路で検証されたシ

エージ係数で代表されると考えた。他の抵抗は、後流を生じさせる固体として形状抵抗と、ボイル状の大規模乱流（組織渦塊とよぶ）の生成に伴う慣性抵抗とを考慮した。

- 3) フィッツロイ横断路の1986年洪水での氾濫原の流れに理論式を適用し、係数の調整なしに観測された流量を正しく再現できることを示した。

謝辞

筆者の西オーストラリア大学での滞在（1990.7-1990.10）に関しては、Gledden Visiting Senior Fellowship、西オーストラリア大学と総合研究奨励会、東京大学工学部の財政的援助を得たことを記し、関係者に謝意を表わす。西オーストラリア大学の Prof. Jorg Imberger, 水公社の Dr. Charles G. Jeevaraj, 道路局の Mr. Jerome Goh の協力に謝意を表わす。

参考文献

- ASAEDA, T., NAKAI, M., MANANDHAR, S. K. and TAMAI, N. (1989) Sediment entrainment in channel with rippled bed, J. Hy. Eng., ASCE, Vol. 115, HY3, pp. 327-339.
- BATES, B. C. and PILGRIM, D. H. (1983) Investigation of storage-discharge relations for river reaches and run off routing models, Civil Engineering Transactions, Inst. of Engineers, Australia, pp. 153-161.
- BATES, B. C. (1990) A statistical log piecewise linear model of at-a-station hydraulic geometry, Water Resources Research, Vol. 26, No. 1, pp. 109-118.
- JACKSON, R. G. (1976) Sedimentological and fluid-dynamic implications of the turbulent bursting phenomena in geophysical flows, J. Fluid Mech., Vol. 77, pp. 531-560.
- 木下良作 (1984) 航空写真による洪水流解析の現状と今後の課題, 土木学会論文集, 第345号, II-1, pp. 1-19.
- NAKAGAWA, H. and NEZU, I. (1981) Structure of space-time correlations of bursting phenomena in an open-channel flow, J. Fluid Mech., Vol. 104, pp. 1-43.
- TAMAI, N. and KODAIRA, T. (1989) Establishment of flow field and bed form with staggered array of piles in sandy rivers, Proc. 4th Int. Symp. on River Sedimentations, Beijing, pp. 1427-1434.