

北海道一級河川における川幅と流量の関係

The relationship between hydraulic condition and river width of rivers in Hokkaido

北見工業大学工学部土木開発工学科 ○学生員 玉山大助 (Disuke Tamayama)
 北見工業大学工学部社会環境工学科 正員 渡邊康玄 (Yasuharu Watanabe)
 北海道科学技術総合振興センター東京出張所 正会員 清治真人 (Masato Seiji)

1. はじめに

現在の河川の河道幅の多くは、維持管理のしやすさから、その河川自身が形成した川幅に基づき決定されている。しかし、近年では局所的な集中豪雨が多発し、それに伴う流量の増加により河川形状の変化が予測され、河川自身が形成した川幅に基づき決定されている川幅の考え方を治水、維持管理の両面から考え直すなくてはならない。今後の河川管理には、このような流量の変化に対応でき、なおかつ維持管理の容易な川幅の設定が必要である。流量と川幅の関係は、河岸満杯流量の0.5乗に比例するとするレジーム則や、動的平衡状態における礫河川における側岸部の静的安定条件を用いた池田の理論式¹⁾で表されている。レジーム則については、藤田²⁾が安定流路の幾何形状について次元解析により、その妥当性を検証している。また、山本³⁾は、改修等によって人工的に川幅が変化された河道の応答について実際の河道データを基に解析し、川幅は流量と摩擦速度に規定されており水量が変化しない場合その川が形成した川幅に戻ることを示している。しかしながら、扇状地や河口部近傍では流路の分岐が安定的に存在する場合があるが、その形成については従来の研究では説明できていない。

ここでは、比較的継続時間が長く河道に大きな影響を与えるといわれる融雪出水が生じる北海道内の一級河川データを用いて流量と川幅との関係を把握するとともに、これらの河川の川幅の決定機構について、河道の横断的な形状の安定という視点から捉え、線形安定理論を適用して解明することを試みる。すなわち、無限の川幅を持つ河川を考えその河床の横断方向の不安定性から論ずるものであり、線形安定解析に中規模河床形態の発生機構を説明する手法を応用し、安定する川幅を見出すものである。また、解明された決定機構は、北海道内の一級河川データを再度用いて、実証を試みる。

2. 安定解析

本研究では、図-1に示す座標系を元に安定解析を行う。川幅一定の直線水路における拡散項を省略した定常2次元浅水式と連続の式および掃流砂を対象とした流砂連続の式を等流時の水深、流速で無次元化すると、以下の基礎式が得られる。

$$\frac{\partial U}{\partial t} + U \frac{\partial U}{\partial x} + V \frac{\partial U}{\partial y} + \frac{\partial H}{\partial x} + \frac{\tau_x}{D} = 0 \quad (1)$$

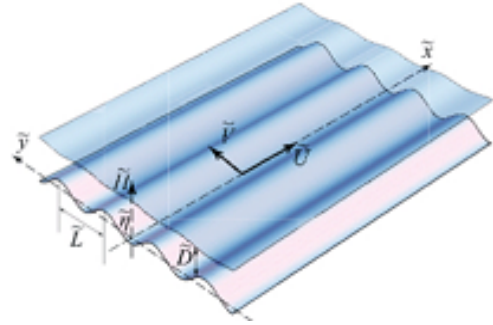


図-1 座標系

$$\frac{\partial V}{\partial t} + U \frac{\partial V}{\partial x} + V \frac{\partial V}{\partial y} + \frac{\partial H}{\partial y} + \frac{\tau_y}{D} = 0 \quad (2)$$

$$\frac{\partial D}{\partial t} + \frac{\partial(UD)}{\partial x} + \frac{\partial(VD)}{\partial y} = 0 \quad (3)$$

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + Q_0 \left(\frac{\partial Q_{bx}}{\partial x} + \frac{\partial Q_{by}}{\partial y} \right) = 0 \quad (4)$$

ここで、 $\tilde{t}$; 時間、 $\tilde{x}$, $\tilde{y}$; 縦断方向、横断方向座標軸、 $\tilde{U}$, $\tilde{V}$; 縦断方向、横断方向の流速、 $\tilde{H}$; 水位、 $\tilde{D}$; 水深、 $\tilde{\eta}$; 河床高 ($= \tilde{H} - \tilde{D}$)、 $\tilde{\tau}_x$, $\tilde{\tau}_y$; 縦断方向、横断方向のせん断力、 $\tilde{Q}_{bx}$, $\tilde{Q}_{by}$; 縦断方向、横断方向の掃流砂量、 $\tilde{\rho}$; 水の密度、 $\tilde{g}$; 重力加速度、 p ; 河床の空隙率である。各記号に付されている $\sim$ は、有次元である事を意味する。ただし、ここでは各記号は、等流水深で無次元化しており、さらに $Q_0 = (\delta d_s^3)^{1/2} / [F_0(1-p)]$ 、(d_s ; 無次元粒径、 δ ; 河床材料の水中比重) $\eta = F_0^2 H - D$ とおいている。A を摂動パラメータとし、(U, V, H, D) を式 (5) で表す。

$$(U, V, H, D) = (1, 0, H_0, 1) + A(U_1, V_1, H_1, D_1) \quad (5)$$

摂動量には式 (6) で表す横断方向に波長 $\tilde{L}$ を持ち、 $\partial x / \partial t = \omega / r$ なる微小攪乱を与えている。摂動量の縦断方向の形状は、上流から下流に向けて分岐する現象を考えることとし、無限上流 ($x = -\infty$) で振動が0、下流端で微小な振動を持つ形状を与えることとし、縦断的な増幅率を r としている。

$$(U_1, V_1, H_1, D_1) = (C_1 u_1, S_1 v_1, C_1 h_1, C_1 d_1) E_1 \quad (6)$$

ただし、

$$(S_1, C_1, E_1) = (\sin(\lambda y), \cos(\lambda y), \exp(rx + \omega t)) \quad (7)$$

$$\lambda = 2\pi \frac{\tilde{D}}{\tilde{L}} \quad (8)$$

式(5)～(8)に式(5)および式(6)を代入し、式(9)中の摂動量の時間に関する増幅率 ω が十分に小さく摂動パラメータと同様のオーダーであると仮定すると、Aの1次オーダーに関して式(9)が得られる。

$$\begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & a_{14} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & a_{24} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & a_{34} \\ a_{41} & a_{42} & a_{43} & a_{44} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1 \\ v_1 \\ h_1 \\ d_1 \end{bmatrix} = 0 \quad (9)$$

ここで、 $a_{11} \sim a_{44}$ は、行列の要素である。それぞれを次式で表す。

$$\begin{aligned} a_{11} &= r + \frac{2C_{f0}}{1 - C_T} \\ a_{12} &= a_{21} = a_{24} = a_{33} = 0 \\ a_{13} &= a_{31} = a_{34} = r \\ a_{14} &= \frac{(-1 + C_D + C_T)C_{f0}}{1 - C_T} \\ a_{22} &= r - C_{f0} \\ a_{23} &= -\lambda \\ a_{32} &= \lambda \\ a_{41} &= \frac{2Q_T Q_0 r q_{f0}}{1 - C_T} \\ a_{42} &= Q_0 \lambda q_{f0} \\ a_{43} &= \left(\omega + \frac{Q_0 R \lambda^2 q_{f0}}{\sqrt{\tau_{f0}}} \right) F_0^2 \\ a_{44} &= -\omega + \frac{Q_0 q_{f0}}{(-1 + C_T) \sqrt{\tau_{f0}}} \\ &\quad \left[\{(-1 + C_T)Q_D - C_D Q_T\} \right. \\ &\quad \left. r \sqrt{\tau_{f0}} - (-1 + C_T) R \lambda^2 \right] \end{aligned}$$

ここで、 τ_f は無次元掃流力、 C_f は河床の摩擦係数、 q_f は流砂量である。添え字の $_0$ は等流時の値であることを示す。 C_D 、 C_T は C_f をそれぞれ D 、 τ_f で微分した等流時の値、 Q_D 、 Q_T は q_f をそれぞれ D 、 τ_f で微分した等流時の値である。また、 R は流砂と流れの方向のずれを表すEngelundの式⁴⁾の係数である。

式(9)が解を持つための条件として次の行列式が得られる。

$$\begin{vmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & a_{14} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & a_{24} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & a_{34} \\ a_{41} & a_{42} & a_{43} & a_{44} \end{vmatrix} = F_1(\lambda, \omega, \tau_{f0}, d_s) \quad (10)$$

$$= 0 \quad (11)$$

式(11)に τ_{f0} と d_s を与えることによって、任意の波数の時間に関する増幅率 ω を算出することが出来る。すなわち、任意の水理条件下において、最大の増幅率となる波数を求めることが可能になる。

3. 安定解析結果

(1) 理論

前節で任意の波数の時間に関する増幅率 ω が求められた。 ω に表れる流砂量 q_f および河床抵抗係数 C_f

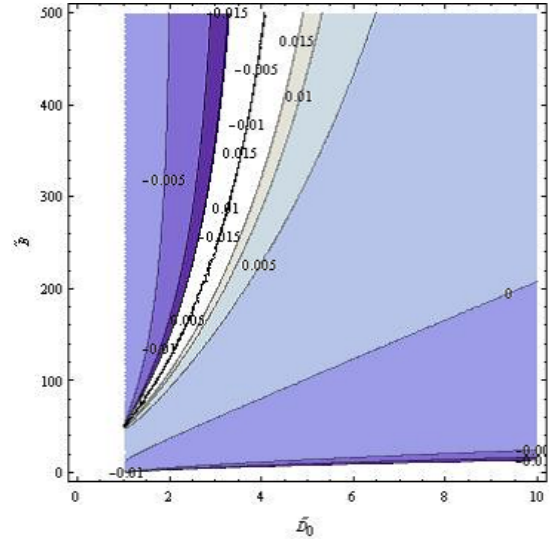


図-2 等流水深と川幅の関係 ($r = 0.2$, $\tilde{d}_s = 0.05m$, $I = 1/250$) 時間増幅率 ω のコンター

にはMeyer-Peter & Müllerの式(12)およびEngelund & Hansenの式(13)を用いる。

$$q_f = 8(\tau_f + \tau_{f0c})^{3/2} \quad (12)$$

$$C_f = \frac{1}{\left[6 + 2.5 \ln \left(\frac{1}{2.5 d_s} \right) \right]^2} \quad (13)$$

ここで、 τ_{f0c} は限界掃流力である。河床材料の粒径 $\tilde{d}_s$ 、空隙率 p 、水中比重 δ 、Engelundの式⁴⁾の係数 R 、河床勾配 I 、限界掃流力 τ_{f0c} 、及び初期微小攪乱の増幅率である r を式(9)に与えると、任意の水理条件下における川幅 $\tilde{B}$ と等流水深 $\tilde{D}_0$ の関係式が得られる。初期微小攪乱の増幅率 r は未知数であるが、渡邊らの研究⁵⁾を参考に、ここでは $r = 0.02$ を与えることとする。また、算出された $\tilde{B}$ を式(14)に代入することで、流量と川幅の関係が求められる。

$$\tilde{Q} = \tilde{B} \tilde{D}_0 \sqrt{\tilde{g} \tilde{D}_0 I C_f^{-1/2}} \quad (14)$$

一例として図-2 ($r = 0.2$, $\tilde{d}_s = 0.05m$, $I = 1/250$)を示す。すると、流量と川幅の関係を見ることが出来る。

(2) 理論と観測データの比較

図-3、図-4は、安定解析から求められた流量、川幅の関係と、北海道内の1級河川における流量、川幅の関係を急勾配、緩勾配の例として河床勾配、粒径別に見たものである。河床勾配は、 $I > 1/375$ 、 $1/375 \geq I > 1/750$ 、 $1/750 \geq I > 1/2500$ 、 $1/2500 \geq I$ に区分して図示した。粒径に関しても同様に、 $d_s < 0.0075$ 、 $0.0075 \leq d_s < 0.025$ 、 $0.025 \leq d_s < 0.075$ 、 $0.075 \leq d_s$ (単位:m)とした。なお、それぞれの区分表示については、代表値を取って $I = 1/250$ 、 $I = 1/500$ 、 $I = 1/1000$ 、 $I = 1/5000$ 、 $d_s = 0.005m$ 、 $d_s = 0.010m$ 、 $d_s = 0.050m$ 、 $d_s = 0.100$ と表している。図-3、図-4の青いプロッ

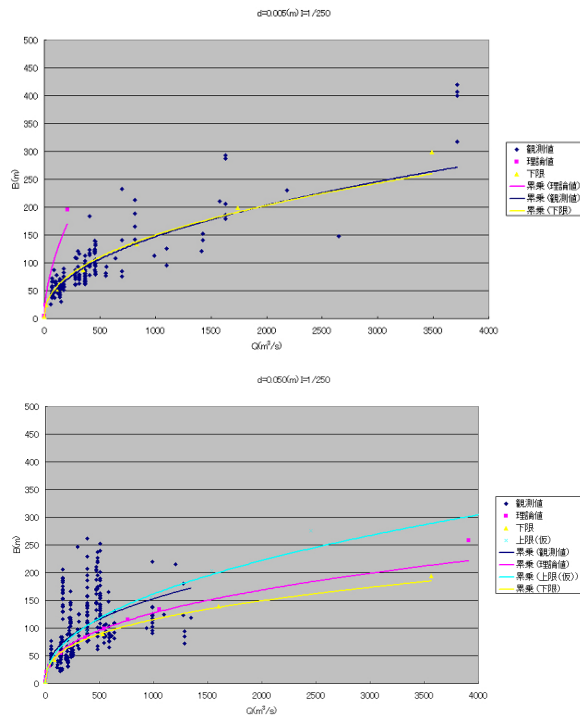


図-3 流量と川幅の関係 ($r = 0.2$, $I = 1/250$ 、上図 $\tilde{d}_s = 0.005m$ 、下図 $\tilde{d}_s = 0.05m$)

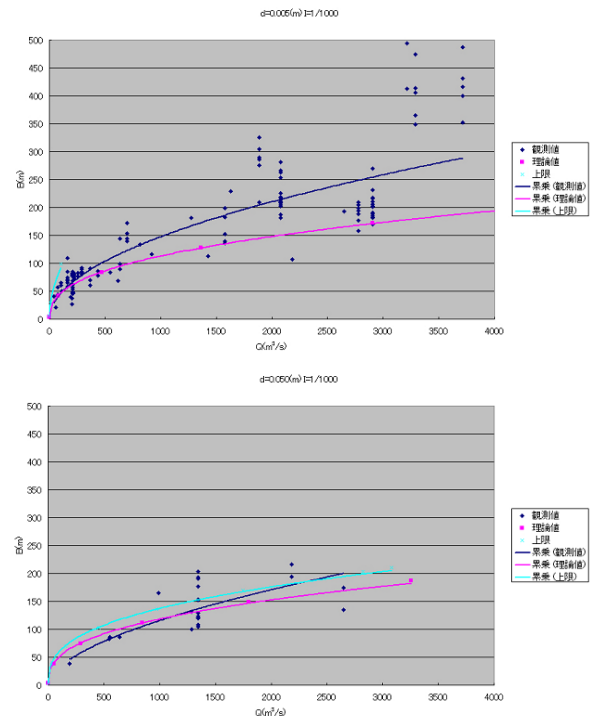


図-4 流量と川幅の関係 ($r = 0.2$, $I = 1/1000$ 、上図 $\tilde{d}_s = 0.005m$ 、下図 $\tilde{d}_s = 0.05m$)

トは北海道内1級河川のデータ、青い曲線はその近似曲線、赤色の曲線は安定解析より得られた流量、川幅の関係である。また、水色の曲線、黄色の曲線はそれぞれ、その範囲内における理論的な最大値、最小値である。水色もしくは黄色の曲線が無いところは、最大もしくは最小値が赤色の曲線と近似しているため省略している。

急勾配の例、 $I = 1/250$ 、 $d_s = 0.005m$ の場合、赤色の曲線が短い、赤色の曲線を延長させてみると、青色のプロットはほぼ理論内に収まる。 $I = 1/250$ 、 $d_s = 0.050m$ の場合、流量が $0 \sim 500m^3/s$ の間で川幅にばらつきが目立つ。緩勾配の例、 $I = 1/1000$ 、 $d_s = 0.005m$ の場合、水色の上限値の曲線が短い、これも延長させてみると、青色のプロットはほぼ理論内に収まる。 $I = 1/1000$ 、 $d_s = 0.050m$ の場合、データ数が少なく、青色のプロットもばらつきが目立つが、その近似曲線は理論内に収まることがわかる。これらから、安定解析の結果についての妥当性が見て取ることができた。

(3) 観測データの検証

先のグラフでは、観測データが理論から大きく外れているところもあった。その点について、簡単に考察を行う。大きく外れたデータの場所は雨竜川の KP8～12、空知川の KP4、5、7～10、12、札内川の KP10～14、KP20～23、十勝川の KP12、KP59～63、常呂川の KP45、石狩川の KP10～12、KP172、忠別川の KP12、天塩川の KP44、鶴川の KP12、13、16、利別川 KP6 地点などがあった。例として、雨竜川、鶴川、空知川を取り上げる。

図-5 は、雨竜川 KP5～12 の地図⁶⁾及び、川幅と河床材料の縦断変化を示したものである。理論が適合する箇所と適合しない箇所において、流量、河床材料の粒径を調べた結果、図-5 に見られるように、理論が実測値に一致する箇所と一致しない箇所とで、一貫した理由は見つからなかった。本解析で使用しているデータを採取した 2000 年に、大鳳川との合流点を下流に下げる工事が行われていることが原因とも考えられる。

図-6⁶⁾は、鶴川 KP8～16 について図-5 と同様に示したものである。これらの地点で理論が適合する箇所は、KP8～11、KP14、15 である。この地点においても一貫した理由は見つからなかったが、理論が実測値に一致しなかった地点での川幅が他の箇所よりも広がっているのかを明確にする必要がある。なお、図-6 を見ると、KP12、13 では両岸に護岸が施されており、この護岸による影響が川幅を大きくしているのではないとも考えられる。

図-7⁶⁾の空知川では KP4、5、KP7～10、12 の地点における理論値が実測値からはずれていた。この付近では、ほとんどの地点で理論値は実測値を表現していない。平面図を見ると、蛇行が発達している箇所であり、このことが原因とも考えられる。

4. おわりに

理論から大きく外れた地点について、未だ、すべてを検証したわけではない。今回の検証では、粒径、河川形状、過去の河川整備に着目した。しかし他にも、微

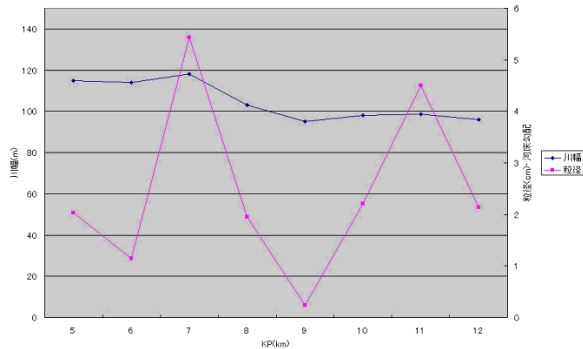


図-5 雨竜川

小攪乱の縦断方向の増幅率 r 、浮遊砂の影響なども考慮に入れなければならないだろう。しかしながら今回算出された結果には、ある程度の妥当性は得られたことから川幅決定機構開発の1つの可能性と成りえる。川幅決定機構が明らかになれば、維持管理の容易な川幅の設定が可能となる。それにより、工費、維持管理費の削減も見込める。また治水の観点からも、川幅や流量の制御は重要であり、川幅決定機構の開発は重要となる。

謝辞:本研究は、科学研究費補助金基盤研究(R)(代表:渡邊康玄、課題番号:20360224)の助成を受けて行われた。また、河道データに関しては国土交通省北海道開発局から提供していただいた。記して謝意を表す。

参考文献

- 1) 池田駿介, Gary PARKER, 千代田将明, 木村善考:直線礫床河川の動的安定横断形状とそのスケール、土木学会論文集、375、-6、pp.176-126、1986。
- 2) 藤田裕一郎:沖積河川の流路変動に関する基礎的研究、京都大学学位論文、1980。
- 3) 山本晃一:沖積河川学-堆積環境の視点から、山海堂、1994。
- 4) Engelund, F.: The motion of sediment particles on an inclined bed, Tech. Univ. Denmark ISVA Prog. No.53, pp.15-20, 1981。
- 5) 渡邊康玄、早川博、清治真人:安定解析に基づく川幅の自律形成機構、水工学論文集、第53巻、2009.3。
- 6) 北海道開発局各開発建設部による管内図

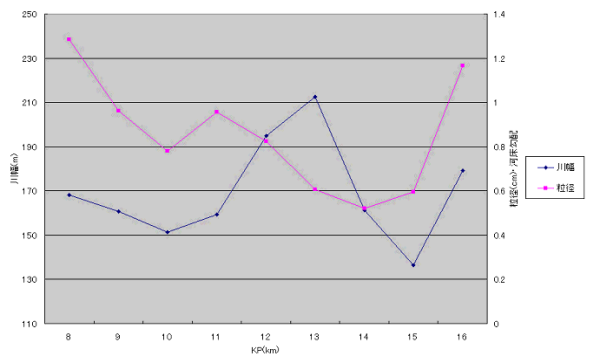


図-6 鷲川

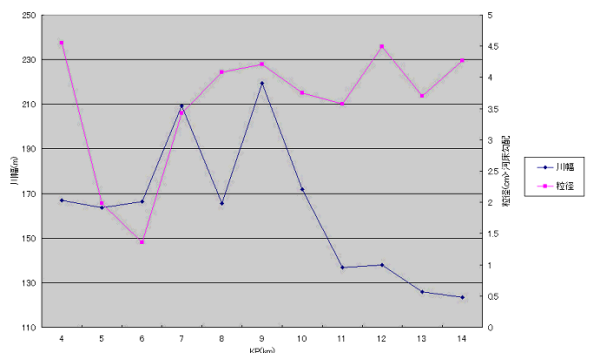
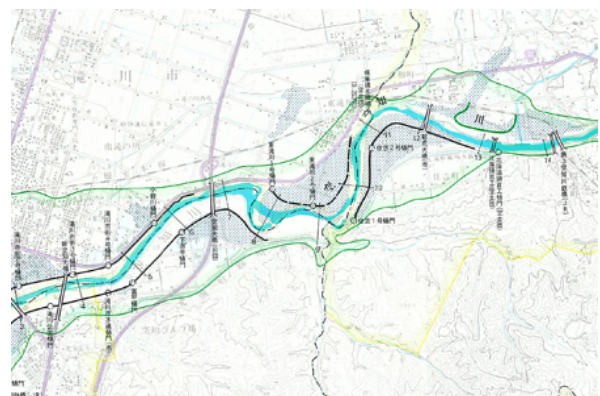


図-7 空知川