

安定河道理論と河床変動計算から見た河口水深の研究

Study on river mouth water depth analysis by steady river theory and calculation of river bed deformation

北海道大学大学院
北海道大学大学院○学生員 今瀬幹太 (Kanta Imase)
フェロー 黒木幹男 (Mikio Kuroki)

1 はじめに

現在多くの河川において河道の安定を図るために様々な取り組みが行われている。河床低下の進行した河川では河川の構造物が相対的に浮き上がる状態となり構造物の安定性が低下し補強・改築を検討する必要が出てくる。また堤防の保護、護岸の安定性を確保するために河川環境を配慮しつつ根固工を実施している。一方河床が堆積傾向にある河川では河床が上昇し河口閉塞などが起きると、洪水の危険性が高くなる。このため、堆積した土砂を人工的に取り除いたり、導堤流等の突堤の建設、河口の付換え等といった対策が行われている。本研究では浚渫などの工事が行われたときに維持可能かどうか、行われなかったときに維持可能かどうかを検討するために、大部分の河川には流量、流砂量等の変化に応じて流路の形状を調整し、その縦横断形状に一種の安定性があるとして安定河道理論を用いて、石狩川、後志利別川の2河川を取り上げ実際の河床高と安定河道理論から導出した河床高を比較した。また石狩川、後志利別川の2河川において河床変動計算を行い、算出した結果と実際の河床高および安定河道理論から得られた河床高を比較検討した。

2 安定縦断理論による計算

本研究では基礎式として以下の式を用いた。

まず特定の支配流量 Q を対象に、流れの運動方程式を次式のように表現した。

$$\frac{1}{2g} \frac{d}{dx} \left(\frac{Q}{Bh} \right)^2 + \frac{dh}{dx} = I_b - I_e \quad \dots ①$$

流れの抵抗則式は指数型の式を用いた。

$$\frac{Q}{Bh\sqrt{ghI}} = 6.9 \left(\frac{h}{d} \right)^{\frac{1}{6}} \quad \dots ②$$

平衡状態における流砂の式は次式で表した。

$$Q_B(x) = q_B B \quad \dots ③$$

流砂量式はマイヤーピーターミューラー式から

$$\frac{q_B}{\sqrt{sgd^3}} = 8(\tau_{*c} - \tau_*)^{\frac{3}{2}} \quad \dots ④$$

本研究では次式の無次元掃流力式を基礎式として用いている。

$$\tau_* = \frac{hI_e}{sd} = \beta \tau_{*c} \quad \dots ⑤$$

ただし、 $g(=9.8)$ は重力加速度、 $s(=1.65)$ は河床材料の水中比重、 $\tau_{*c}(=0.05)$ は河床材料の移動限界掃流力、 d は河床材料の平均粒径、 q_s は単位幅、単位時間あたりの流砂量、 h は水深、 B は川幅、 Q は流量、 Q_B は流砂量、 I_b は河床勾配、 I_e はエネルギー勾配、 $\beta(=1.23)$ は定数。これらの式より水深縦断形 h が定まる。

$$h = \frac{A}{1 + \frac{c_2^2}{2g} \left(\frac{Q}{Q_B} \right)^{\frac{-4}{7}}} \quad \dots ⑥$$

ここで A は積分定数となっており、次式で表される。

$$A = h_0 \left\{ 1 + \frac{c_2^2}{2g} \left(\frac{Q_0}{Q_{B0}} \right)^{\frac{-4}{7}} \right\} \quad \dots ⑦$$

ここで c_1 、 c_2 は定数でそれぞれ次式のように表される。

$$c_1 = \left\{ \frac{8\sqrt{s}(\beta-1)^{\frac{3}{2}} \tau_{*c}^{\frac{3}{2}}}{6.9(\beta \tau_{*c} s)^{\frac{5}{3}}} \right\}^{\frac{-6}{7}} = 8.43$$

$$c_2 = 8\sqrt{sg} \left(\frac{\beta-1}{\beta s} \right)^{\frac{3}{2}} c_1^{\frac{3}{2}} = 30.02$$

また、これを用いて粒径縦断形 d 、川幅縦断形 B を求めた。上から粒径縦断形、川幅縦断形の式となっている。

$$d = \frac{A}{\beta s \tau_{*c}} \frac{c \left(\frac{Q}{Q_B} \right)^{\frac{-6}{7}}}{1 + \frac{c_2^2}{2g} \left(\frac{Q}{Q_B} \right)^{\frac{-4}{7}}} \quad \dots ⑧$$

$$B = \frac{Q_B}{8\sqrt{sg}(\beta-1)^{\frac{3}{2}} \tau_{*c}^{\frac{3}{2}}} d^{\frac{-3}{2}} \quad \dots ⑨$$

また安定河道理論による導出では擬似等流と仮定し $I_b = I_e$ としている。ここで黒木らは流量の縦断分布 Q を比較的多くの流域に適合する指数分布で仮定した。また流砂量の縦断分布 Q_B も流量同様、指数分布で仮定し、そ

れぞれ次のように表した。

$$Q = Q_0 \exp(qx) \quad \dots ⑩$$

$$Q_B = Q_{B0} \exp(q_b x) \quad \dots ⑪$$

ただし Q_0 は上流端の流量、 Q_{B0} は上流端の流砂量。

また河床縦断面形に関しては次式を積分した形で表せる。

$$\frac{dz}{dx} = \left\{ 6.9 \left(s \tau_{*c} \right)^{\frac{5}{3}} \sqrt{g} c_3 \right\}^{\frac{6}{7}} \left(\frac{Q_B}{Q} \right)^{\frac{6}{7}} \quad \dots ⑫$$

ここで c_3 は既知の定数

$$c_3 = \frac{1}{8 \sqrt{sg} (\tau_* - \tau_{*c})^{\frac{3}{2}}} = 25.2$$

これらより水位縦断面形 H (河岸高縦断面形) が定まる。

$$H = h + z \quad \dots ⑬$$

3 安定河道理論の実河川への適用

本研究では支川の合流やダム等の構造物の影響が小さいと考えられる範囲を対象とした。各河川において流量観測所から得た年最大流量から流量縦断面形を決定し、そこから定まった q 、 Q_0 より、粒径縦断面形、川幅縦断面形、河岸高縦断面形、の各縦断面形が資料に合うように Q_{B0} 、 q_b 、 A を決定した。ここで本研究では支配流量として年最大流量の平均を用いておりバンクフルの状態に対応している。従って以下の計算では水位縦断面形 H は河岸高の資料値を最も反映しているようなパラメータを用いた。以上のような手順で実河川の安定河床縦断面形を導出した。

(I) 石狩川

石狩川では河口から 40Km 地点より下流域を適用範囲として研究を進めていった。石狩川においては流量は流量年表から得られた石狩大橋流量観測所(河口から 26.6Km)、月形流量観測所(河口から 58Km)、の各観測所から得た年最大流量の平均を用いた。川幅は 1/50000 地形図から得た値を用いている。粒径はふるいわけ試験(1km おき)による平均粒径を用いた。平均河床高と河岸高の値は横断面(0.5Km おき)から得られた値を用いている。これらの資料値をもとに粒径縦断面形、川幅縦断面形を図-1、図-2にそれぞれ示す。

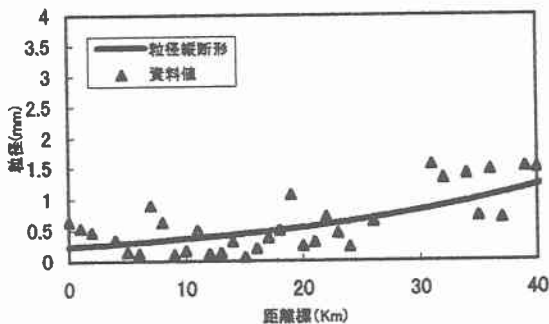


図-1 石狩川粒径縦断面形

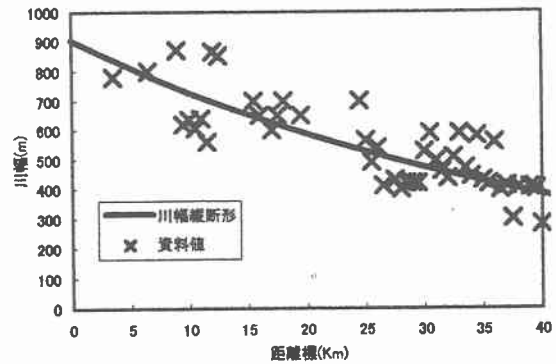


図-2 石狩川川幅縦断面形

(II) 後志利別川

後志利別川においては本研究では河口より 11.3Km 地点で合流している利別目名川までを適用範囲とした。後志利別川に関しては大富流量観測所(河口から 7.55Km)、今金流量観測所(河口から 16.1Km)、住吉流量観測所(河口から 26.25Km)、花石流量観測所(河口から 42.2Km)、から年最大流量の値を得て、川幅は 1/50000 地形図から得た値を用いた。粒径はふるいわけ試験(1Kp おき)による平均粒径を用いた。平均河床高、河岸高の値は横断面(0.5Kp ずつ)から用いた。以上の資料値から得た粒径縦断面形、川幅縦断面形を図3、4に示す。

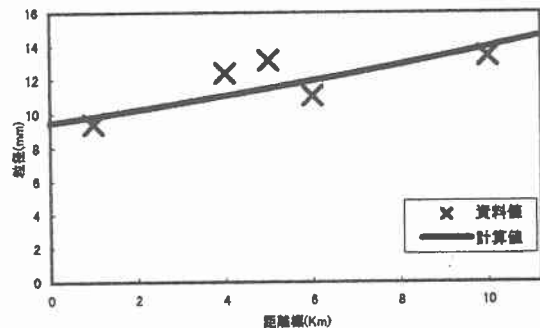


図-3 後志利別川粒径縦断面形

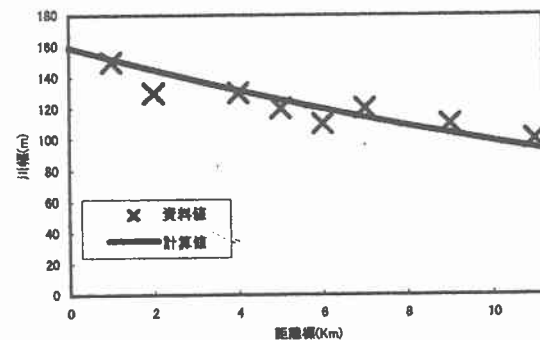


図-4 後志利別川川幅縦断面形

4 安定河道理論を用いた計算結果

石狩川、後志利別川の両河川において、粒径、川幅の資料値をもっとも反映しているようなパラメータ Q_{B0} 、 q_b 、 A を決定した結果得られた河床高、河岸高縦断面形を以下に示す。以下の図において、△印は河岸高の資料値、×印は資料から得られた河床高の値を表しており、安定河道縦断面形の理論から導出した河床高計算値、河岸高計算値はそれぞれ実線で表している。以下の図-5、図-6

において石狩川、後志利別川の両河川の安定河道理論から導出した河床、水位縦断径を示す。

(I) 石狩川

石狩川においては河口部で安定河床縦断形と水位縦断形がそれぞれ実際の資料値より高い値が出たものの、今回の適用範囲全般では安定河床縦断形と実際の資料値に大きな差は無いことがわかった。従って本研究における解析範囲内では比較的安定した河川であると言える。

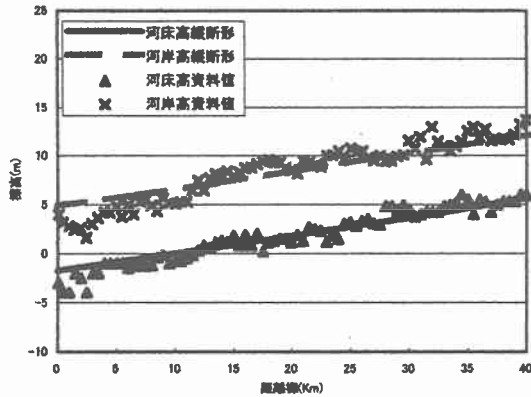


図-5 石狩川河床高、河岸高縦断形

(II) 後志利別川

後志利別川に関しては河口部で安定河床縦断形と実際の河床縦断形に差が出たものの、今回の適用範囲全般では、あまり差が無いことがわかった。河口部における資料値の河床高の変化は砂州の存在および、川幅が広がった為だと思われる。従って解析の範囲内では比較的安定した河川であるといえる。

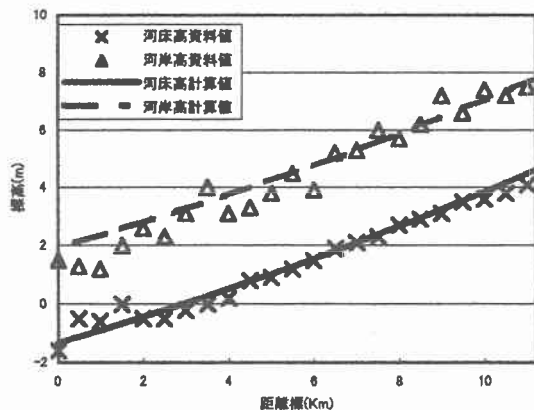


図-6 後志利別川河床高、河岸高縦断形

5 1次元河床変動計算

本研究では各粒径ごとの流砂量 q_{Bi} はマイヤーピーター-ミュラー式より次の式を用いた。

$$q_{Bi} = 8P_i \sqrt{sgd_i^3} (\tau_{ci} - \tau_{c0})^3 \quad \dots(14)$$

ただし P_i は粒径 d_i が交換層中に占める割合を、各粒径の無次元限界せん断力 τ_{ci} は次式の浅田式から求める。

$$\tau_{ci} = \tau_{c0} \left[\frac{\log_{10} 23}{\log_{10} \left(2 + 21 \frac{d_m}{d_i} \right)} \right]^2 \quad \dots(15)$$

ここで d_m は平均粒径、 τ_{c0} は平均粒径の限界掃流力となっており、岩垣の式を用いて求めた。表層における粒度分布の連続式は、平野の式より次のように表される。

$$\Delta \frac{\partial P_i}{\partial t} + P_i \frac{\partial z}{\partial t} + \frac{1}{1-\lambda} \left(\frac{\partial q_m}{\partial x} \right) = 0 \quad \dots(16)$$

ここで Δ は交換層厚を表しており、本研究では最大粒径とした。 P_i^* は次のようになる。

$$P_i^* = P_i \dots \frac{\partial z}{\partial t} > 0$$

$$P_i^* = P_i \dots \frac{\partial z}{\partial t} < 0$$

以上のような計算式を用いて、石狩川、後志利別川の両河川において河床変動計算を行った。流量は両河川における年最大流量を元に決定した流量縦断形における上流端の流量を1日、その後流量年表から得られた年平均流量を364日あたえるという条件で計算を進めていった。川幅は適用範囲内における資料から得られた値を用いた。粒径は図-7に示すように近似を行い、そこから0.5Kmおきに読み取った値を用いている。また河口部の水位は資料値を用いている。

また本研究では実河川スケールを想定しているため、河床波による影響を考慮する必要がある。今回考慮した河床波は砂堆河床Ⅰ、砂堆河床Ⅱで、その区分に関しては岸・黒木⁽²⁾らの方法にのっとりた。具体的に無次元せん断力 τ_c によって河床形態が次のように区分される。

$$\tau_c < 0.02 \left(\frac{h}{d_m} \right)^{\frac{1}{2}} \quad \dots \text{砂堆河床Ⅰ}$$

$$\tau_c > 0.02 \left(\frac{h}{d_m} \right)^{\frac{1}{2}} \quad \dots \text{砂堆河床Ⅱ}$$

その結果得られた抵抗係数を用いて計算を行った。

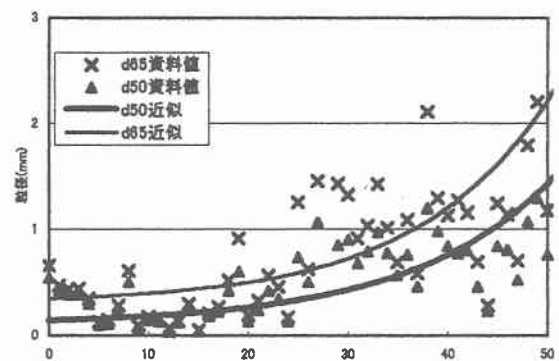


図-7 粒径近似

7 河床変動計算の実河川への適用

石狩川、後志利別川の両河川において河床変動計算を行った結果をそれぞれ図-8、9に示す。図中の太線は

支配流量を1日あたえて、その後通常時の流量を364日あたえる計算を30回繰り返した河床変動計算から得られた、河床高縦断面形、河岸高縦断面形を示しており、細線は安定河道理論を用いて導出した安定河床縦断面形と河岸高縦断面形を示している。

(I) 石狩川

石狩川では今回の適用範囲内では安定河道理論から導出した河床縦断面形と水位縦断面形が河口部で資料値よりも高い値を示したが、今回の適用範囲全般では大きな差はなかった。また河床変動計算から算出した河床縦断面形と河岸高縦断面形は安定河道理論から導出した河床高、河岸高縦断面形と近い値を示している。粒径に関しては解析範囲内では、支配流量をあたえた直後は全ての地点で粗粒化していくが、通常時の流量をあたえ続けると下流部では細粒化し、上流部では粗粒化する傾向がみられた。また計算を繰り返すにつれ、下流部では細粒化し、上流部では粗粒化する傾向がみられた。水深に関しては今回の研究の適用範囲内では資料値と安定河道理論を用いた計算値、河床変動計算から算出した計算値との大きな値の差はなかった。

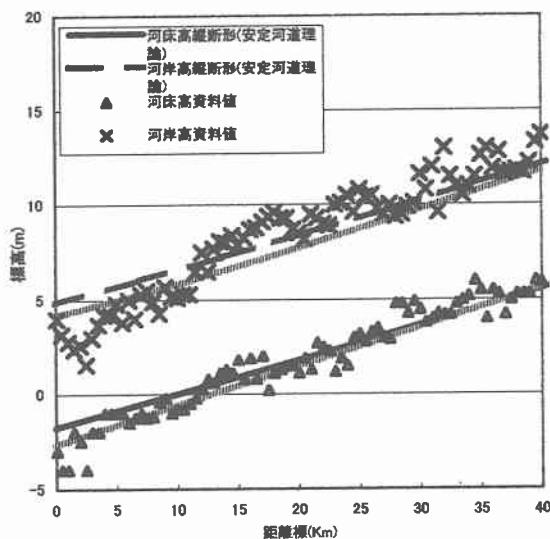


図-8 石狩川河床高、河岸高縦断面形

(II) 後志利別川

後志利別川に関しては河口部で安定河道理論から導出した河床高、河岸高縦断面形と資料から得られた河床高と河岸高の値との間に多少の差が見られたものの、今回の適用範囲全般では、あまり差が無いことがわかった。河口部における資料値の河床高の変化は砂州の存在および、川幅が広がった為だと思われる。また河床変動計算から算出した河床縦断面形と河岸高縦断面形は安定河道理論から導出した河床高、河岸高縦断面形と近い値を示している。粒径に関しては解析範囲内では、支配流量をあたえた直後は全ての地点で粗粒化していくが、通常時の流量をあたえ続けると下流部では細粒化し、上流部では粗粒化する傾向がみられた。また計算を繰り返すにつれ、下流部では細粒化し、上流部では粗粒化する傾向がみられた。水深に関しては後志利別川においても、石狩川同様に河口部で安定河道理論を用いた計算値、河床変動計算から

算出した計算値が資料値よりも大きな値を示し、上流部になるにつれ資料値と計算値の値の差は小さくなっていった。

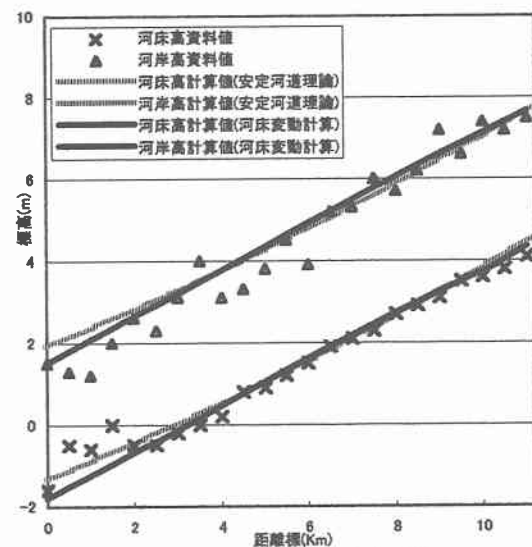


図-9 後志利別川河床高、河岸高縦断面形

8 まとめ

今回の研究では、石狩川、後志利別川の2河川において、安定河道理論から安定河床縦断面形を導出するとともに、河床変動計算も行った。その結果、両河川とも今回の適用範囲内では河床変動計算から算出した河床縦断面形は、安定河道理論から導出した河床縦断面形に近い値を推移しており本研究の条件下では安定すると推測できる。また安定河床縦断面形と資料値との間において大きな差は無く、両河川とも比較的安定した河川と言える。水深に関しては今回の対象河川における適用範囲内では、安定河道理論と河床変動計算による計算値と実際の資料値が近い値を示しており、河川が安定するのに必要な水深は保たれてるといえる。従って本研究の結果からは、今回の対象河川に関しては浚渫等の工事による効果は一時的には見込めるが、長期間維持していくのは難しいと思われる。

9 参考文献

- 1) 清水 康行：沖積河川における流れと河床変動の予測手法に関する研究、開発土木研究所報告・第93号
- 2) 岸・黒木：移動床における河床形状と流体抵抗、北海道大学工学部研究報告・第67号
- 3) 黒木・板倉：安定河道縦断面形状に関する研究、土木学会水工学論文集
- 4) 山本 徹：安定河道理論による流域の土砂生産の評価