昭和56年石狩川洪水時の実測河床波データを 用いた河床抵抗則の検証と 実河川への適応に関する研究

A RESEARCH ON VERIFICATING THE LAW OF RIVER BED RESISTANCE AND ADAPTING IT TO REAL RIVERS USING BED WAVE OBSERVATION DATA OF 1981 FLOOD IN ISHIKARI RIVER

平井 康幸¹・山口 里実²・井上 卓也³・清水 康行⁴ Yasuyuki Hirai, Satomi Yamaguchi, Takuya Inoue, Yasuyuki Shimizu

¹ 正会	員(独)土木研究所寒地土木研究所(〒062-8602 札幌市豊平区平岸1条3丁目)
² 正会員	工博	北海道大学大学院工学研究科准教授(〒060-8628 札幌市北区北13条西8丁目)
3正会員	工博	(独)土木研究所寒地土木研究所(〒062-8602 札幌市豊平区平岸1条3丁目)
⁴ 正会員	工博	北海道大学大学院工学研究科教授(〒060-8628 札幌市北区北13条西8丁目)

An estimation of bed share stress was conducted from the observation data of river bed wave figure on 1981 flood in the Ishikari River. Estimated stress values were compared with those obtained from the law of river bed resistance using widely thus far. It was revealed that estimated stress values were in the range of 1 to 3 and tended to be bigger than those from the hydraulic observation data. It was suggested that stress value from wave figure didn't made an impact on hydraulic conditions in overall river course, thus values from hydraulic observation data were smaller than values obtained from wave figure. It was also suggested that estimation of roughness coefficient and reflecting it to river planning for disaster reduction should be safe side, considering figure dispersion and value range.

Key Words : bed share stress, flood observation, bed wave figure, law of bed resistance, coefficient of roughness

1. はじめに

沖積河川では小規模河床形態により河床抵抗が変化す ることが知られており、利根川¹⁾や石狩川²⁾では洪水期間 中の抵抗変化が実際に観測されている.近年、地球規模 気候変動による降雨パターンと流出の変化が指摘されて おり³⁾、非定常流である洪水中の水位予測は河川管理上 の重要課題となっている.また、洪水期間中には河床材 料がフラッシュされることにより大きく河積が変化する ことが知られており²⁾、この予測には有効せん断力をよ り正確に算定する技術が求められている.洪水位、有効 せん断力を正確に予測・算定するには河床抵抗の的確な 評価が必要である⁴.

従来,抵抗予測に関する研究が数多く行われており, 中でも小規模河床形態における全抵抗と摩擦抵抗(有効 せん断力)の予測について盛んに研究が行なわれてきた. 河道に河床波が発達すると,河床波の形状による抵抗が 働くため全抵抗は形状抵抗の増加とともに増大することになる.これに対して、形状抵抗の増加に伴って流速が 低下することによって摩擦抵抗は減少することになる. 洪水期間中の流況は全せん断力を用いて評価されるのに 対し、流砂量は有効せん断力を用いて評価される.した がたって、全せん断力と有効せん断力の関係を正確に算 定しないと、洪水期間中の河床変動を十分に再現できな い.また、河床変動による河積変化を予測できなければ、 洪水位の正確な予測も困難となる.

抵抗予測に関する研究は大きく分けて2通りの手法が ある.1つめの手法は、実験や観測資料を基に、河床波 が形成されたときの全せん断力と有効せん断力の関係を 水理データから統計的に定式化する方法である.この手 法による研究として、Engelund⁵⁾、岸・黒木⁶⁾などが挙げ られる.Engelund⁵⁾は、Guy、Simons and Richardson⁷⁾に よって行われた数多くの実験結果から、同一の河床形態 をもつ流れにおいて、有効せん断力が全せん断力のみの 関数になることを示している.



岸・黒木⁶は, Engelund⁵の概念を発展させ, 無次元化 された有効せん断力が無次元化された全せん断力と径深 粒径比(*R/d_m*)の関数になると修正している.これらの手 法は,河床波形状(波長,波高)の予測なしに河道内の抵 抗を算出でき,非常に実用的である.そのため,河道計 画⁸⁹⁹に適用され,マニングの粗度算定に用いられている.

2つめの手法は、Yalin¹⁰、吉川・石川¹¹などによる、 力学的に河床波形状(波長,波高)を用いて形状抵抗を 算出する方法である.また、三輪・大同¹²は、河床波の 形状特性の算定式を導入した抵抗予測式を提案している. 2つめの手法は、1つのめの手法に比べ河床波による形状 抵抗と砂粒表面の粗さによる摩擦抵抗を、より明確に把 握することできる.

しかし、上述の研究は、実験による水理及び河床デー タによる検討が中心であり、実河川の河床形状データを 用いた抵抗変化と小規模河床形態の関係や従来の抵抗予 測式の実河川への適応性に関する検討例は数少ない.そ こで本研究では、石狩川における既往洪水時の実測資料 ³を用いて、観測された河床波形状から推定される抵抗 を検討し、マニングの粗度係数や有効せん断力の変化な どについて検討を行った.

2. 石狩川下流部における河床波観測について

石狩川下流域では,既往最大洪水である昭和56年洪水 時に,実河川では観測例が極めて少なかった河床波形状 が計測されている.

図-1は石狩川の河口付近における昭和56年8月上旬洪 水時の流量ハイドログラフ²⁾と洪水中に行われた同時水 位観測結果に基づいて、清水・板倉¹³⁾が逆算したマニン グの粗度係数である.**表-1**は河口から11km地点で行われ た流量観測表である.

清水・板倉¹³⁾は河口から11km地点で行われた流量観測 資料を基に,無次元せん断力 τ_* と無次元有効せん断力 τ_* の関係を整理している(図-2). τ_* 、は τ_* '= $R'i_d/Sd_m$ で与え られ, R'は次式により定義している.



図-2 石狩川下流部のτ*とτ*'の関係¹³⁾

表-1 石狩川篠路鉄道橋観測所の流量観測表²⁾

No	月日時刻		流量(m ³ /s)	No	月日時刻		流量(m ³ /s)
5	8/5	14時	8,620	8	8/6	15時	9,869
6		16時	8,697	11	8/9	12時	2,606
7	8/6	11時	10.904	12		15時	2.438

注) No. は報告書の表²⁾ に記載されている番号.



図-3 深浅測量位置図²⁾

 $u = \sqrt{gR'i_e} \left\{ 6 + 5.75 \log(R'/2d_m) \right\}$ (1)

ここで、u は平均流速, R' は r_*' に対する径深である. 図-2には、岸・黒木^のによる r_* と r_*' の関係を実線で示してある. 石狩川下流の場合図中に破線で示すように、 TRANSTIONを下まわる傾向がみられる. 清水・板倉¹³⁾ は、この理由として、河床波が十分に発達(DUNE I → DUNE II)する前に、崩壊が進行したためと推測している. また、図-1から流量の増加とともに逆算粗度係数が 減少する傾向にあり、小規模河床波の形態によって粗度 係数が変化していることが伺える.

図-3は河床波の深浅測量位置図²,図-4は河床波の観 測結果²である.図-4のa~eの記号は図-1で示した時刻 における値を表している.図-4をみると,a,bでは波長 約300m,c~eでは約20~80mと時刻により大きく異なっ ており,洪水期間中に小規模河床波(Dune)が発達し, その形状が流量規模によって変化していたことが伺える.



3. 河床波観測資料と抵抗推定式の比較

dmの関係は次式で表している.

(1) 波形勾配の比較

Yalin・Karahan¹⁴⁾が提案した波形勾配推定式は、次式で 表される.

$$\lambda = 0.0127(\eta - 1)\exp\left(\frac{1 - \eta}{\eta_m - 1}\right)$$
(2)

ここで、 $\eta = \tau_* / \tau_{*c}$ 、 τ_{*c} は無次元限界掃流力(0.03)、 η_m は最 大波形勾配 λ_{max} が生じるときの η の値で、次式で表される.

$$\eta_m = 1 + \frac{e}{0.0127} \lambda_{\max} \tag{3}$$

ここで、e は自然定数の底である. 三輪・大同¹²は Yalin・Karahan¹⁴の実験資料をもとにJ_{max}と水深粒径比h_m/

$$\lambda_{\max} = \begin{cases} -0.058 + 0.02 \ln\left(\frac{h_m}{d_m}\right) & :\frac{h_m}{d_m} < 400\\ 0.062 & :\frac{h_m}{d_m} \ge 400 \end{cases}$$
(4)

ここで、 h_m は平均水深、 d_m は平均粒径である. これによると最大波形勾配 λ_{max} は水深粒径比 h_m/d_m が400以上の場合一定となる.

次に、昭和56年の観測資料から、平均波長、平均波高、 無次元せん断力を整理する.河床波の観測は、昭和56年 8月7日14時から8日14時までの間に計5回行われている (図-4参照).一方、流量観測は表-1に示すように昭和56 年8月5日15時から9日16時にかけて計8回行われている. このうち、河床波観測と流量観測が同時に行われた、8 月8日のデータを用いることとする.

図-4のcとdを基に、Duneと推定される河床波の波長お よび波高を算出した結果、波長λ=20-84m、波高h=1.1-3.5mの間であった.また、8月8日10時及び13時の流量観 測資料を基に逆算した無次元せん断力は、τ=1.3-1.5の間 であった.

図-5に河床波観測結果とYalin・Karahan¹⁴⁾による波形勾



波形勾配推定式の比較

配推定式の比較を示す.昭和56年8月8日の石狩川における水深粒径比は9000~10000程度であるため,図中の実線は、水深粒径比h_m/d_mが400以上の場合の波形勾配推定式を用いている.これによると、観測値は波形勾配推定式に比べ大きい.このことから、昭和56年8月洪水中の河床波は十分に発達していたと推測される.

(2)形状抵抗の算定

吉川・石川¹¹⁾によると形状抵抗τ"は、抗力係数C_Dを用いて次式で与えられる.

$$\tau'' = \frac{1}{2} C_D \Lambda \rho u_m^2 \tag{5}$$

ただし,

$$C_{D} = \frac{4(1-4\lambda)(2+\zeta)}{(2-\zeta)^{2} \{2+(1-8\lambda)\zeta\}} \left\{ \frac{2(1-4\lambda)\zeta}{2+(1-8\lambda)\zeta} + 0.13 \right\}$$
(6)

$$\Lambda = \frac{\lambda}{1 + \zeta/2} \tag{7}$$

$$\zeta \equiv \frac{H}{h_m}, \quad \lambda \equiv \frac{H}{L} \tag{8}$$

ここで、 ρ は水の密度、 u_m は平均流速、Hは波高、Lは波 長である.

観測諸量を用いて、形状抵抗 τ "を求め、 τ_* "= τ "/sgdより無次元の形状抵抗を算出すると、図-5に示した波形勾配の値に応じて τ_* "=0.82~2.96となった.

(3) 抵抗則との比較

小規模河床形態における流れの全抵抗は,表面摩擦抵抗と河床波による形状抵抗に分けられ,次式のように表わされる.

$$\tau'' = \tau' + \tau'' \tag{9}$$

本節では、従来抵抗則として提案されてきた全抵抗 (全せん断力)と摩擦抵抗(有効せん断力)との関係式 について、観測された河床波形状(波長・波高)から求 められた値との比較を行った.

a) 三輪・大同の抵抗則式

三輪・大同¹²は、河床波上の河床面に沿うせん断力分 布式を導き、摩擦抵抗を河床波上のせん断力の一波長分 の平均として定義することによって次式のように表わし ている.

$$\tau' = \frac{4}{7} \prod' \left(\frac{h_m}{k_s}\right)^{-1/4} \rho u_m^2 \tag{10}$$

ただし,

$$\Pi' = \left(\frac{B'}{A}\right)^2 C^{1/4} \tag{11}$$

$$B' = \frac{2}{2-\zeta} \xi^{-1/8} \left(1 - n\lambda\right)^{3/8} \left(1 + \lambda^2\right)^{3/16}$$
(12)

$$A = 8.94$$
 (13)

$$B = \frac{2}{2 - \zeta} \left\{ \xi \left(1 - n\lambda \right) \right\}^{-1/2}$$
(14)

$$C = A^2 \left\{ 0.26 + \frac{\lambda}{\left(F_r B\right)^2} \right\}$$
(15)

$$\xi = \frac{L}{h_m} \tag{16}$$

ここで、 $k_s(=2d_m)$ は等価砂粗度、 F_r はフルード数である. 三輪・大同¹²⁾によると、 τ_* が0.08以上において、摩擦抵抗と無次元有効せん断力は概ね等しい.

さらに彼らは、形状抵抗に河床波の形状特性(波形勾配,波長)から算出される (5)式を適用することで抵抗則式を提案し、提案した抵抗則式から $\tau_* \geq \tau_*$ の関係を h_m/k_s を介して次のように示している.

$$\tau_* = \left\{ 1 + \frac{7}{8} \frac{C_D \Lambda}{\Pi} \left(\frac{h_m}{k_s} \right)^{1/4} \right\} \tau_*$$
(17)

観測値を適用して (17) 式より算出される全抵抗を無 次元化して図-6に示した.ここで示される無次元せん断 カ τ_* と無次元粒子せん断力 τ_* 'の差が (5) 式より算出さ れる形状抵抗 τ_* "の無次元量に等しくなり(前章で示した ように τ_* "の値は 0.82~2.96 となる),この値が観測さ れた河床波に起因していると考えられる抵抗の増加分を 表わしている.

また、三輪・大同¹²は、提案した抵抗則式にYalin・ Karahan¹⁴によって示された波形勾配((2)式)を適用して、 全抵抗を構成する摩擦抵抗と形状抵抗について詳細に検 討している.このとき河床波の波長についてもYalin¹⁵に 従って、水深の5倍としている.図-6には、三輪・大同 ¹²に従って(2)式を適用した場合の無次元せん断力(灰色 の一点波線)の値も合わせて示した.

b) 岸・黒木の抵抗則式

岸・黒木⁶はEngelund⁵の手法にGilbert¹⁵及び佐藤・吉



図-6 三輪・大同¹²⁾の手法と今回観測値による
無次元せん断力の比較

$$\tau_* = f\left(\tau'_*, R/d\right) = T\left(\tau'_*\right) D\left(R/d\right) \tag{18}$$

川・芦田¹⁰による水路実験データを加え、その理論を修 正した以下の式を提案した.ここで、 $T(\tau_*)$ 及びD(R/d)はそれぞれ τ_* 、及びR/dのみの関数であることを表す. 彼らは各河床形態に対する抵抗則式を統計的手法により 算定し、以下に示す τ_* と τ_* の関係を導いている.

Dune I $\tau'_* = 0.21 \tau_*^{1/2}$ (19)

Dune II $\tau_* = 1.49(R/d)^{-1/4}\tau_*$ (20)

TRANSITION I $\tau_* = 6.5 \times 10^7 (R/d)^{-5/2} \tau_*^{11/2}$ (21)

TRANSITION II $\tau_* = 0.07 (R/d)^{2/5}$ (22)

FLAT $\tau_* = \tau_*$ (23)

図-7に岸・黒木[®]の抵抗則式と今回観測値による無次 元せん断力の比較を示した.図-7にはR/dが1000,5000, 10000のときの岸・黒木[®]による_{7*}と_{7*}'の関係を示してい る.岸・黒木[®]によれば,R/dの大きさにより,DUNE1 からTRANSITONまたはDUNE2へ移行する分岐点が変化 する.昭和56年8月洪水中のR/dは9000から10000程度で あるため,この時の_{7*}と_{7*}'の関係は,図-7の黒実線が該 当する.

4. 考察

(1) 流量観測水理データから算出した抵抗との比較

図-6に示すように,流量観測の水理データから清水・ 板倉¹³が算定した無次元せん断力は,今回河床波観測の 波形データから算定した無次元せん断力の範囲内にあり, 水理データ内には河床波による形状抵抗の増加が含まれ ていると考えられる.しかし,波形データから





算定した値のほうが全体的に大きい傾向にあった.この 要因として、実河川においては河床波に起因する形状抵 抗が河道内全体にまで影響を与えていない可能性が考え られる.本研究で用いた河床波は、低水路中央付近に 沿って観測されており、横断方向全てを網羅していない ため、低水路の端部では中央部に比べ河床波の規模が小 さい可能性がある.図-6に示した観測河床波形状からの 無次元せん断力_{7*}は1~3程度の幅があり、同じ区間でも 水理量や河床材料の平面的な分布によって河床波形状は 異なり、抵抗も異なることが推測される.

また,観測河床波形状から算出した無次元せん断力は, 図-6に示す三輪・大同¹²⁾の手法による値よりも大きい傾向を示した.河床波の形状による抵抗と言う同じアプローチでありながら差異が生じた要因として,三輪・大同¹²⁾がh_m/dの範囲として400以上を同一に考えているのに対して,石狩川洪水におけるh_m/dは10000程度と大きく,その適用範囲に限界があることも考えられる.

(2)河床の全抵抗について

図-7に示すように、本研究で河床波観測データから算 定した無次元せん断力は、岸・黒木のの抵抗則式による 手法と概ね一致した. すなわち, 岸・黒木の手法は, 清 水・板倉13が流量観測の水理データから算定した値に比 べ,無次元せん断力でを大きく(無次元有効せん断力で) を小さく)見積もる結果となった。清水・板倉¹³⁾はこの 要因として河床波が十分に発達する前に崩壊が進行した ためと推測しているが,石狩川で実際に観測された河床 波の波形勾配はYalin・Karahan¹⁴⁾らによる推定式より大き い値となり(図-5)、河床波は十分に発達していたと考え られる、河床波が十分に発達していたにもかかわらず、 岸・黒木のの手法では無次元せん断力なを大きく評価 (無次元有効せん断力で、を小さく評価) する結果となっ た要因として、岸・黒木⁶の手法は径深粒径比R/d が概 ね1000程度以下の範囲で主に検討されてきたのに対して, 河床波観測地点の石狩川下流域ではR/d が10000 程度と

大きいため、適用範囲に限界があることも考えられる.

なお、本研究で算出した河床波形状からの無次元せん 断力は、幅を持ちながらも岸・黒木[®]の抵抗則式による 値と良く一致している.このことから、河川防災上、安 全側で洪水位を検討・設定する場合、岸・黒木[®]の手法 は適用性が高いと考えられる.

(3) マニングの粗度係数について

観測データや従来提案された抵抗則式から推定される 抵抗をマニングの粗度係数へ換算し、その差異について 検討した.

流量観測の水理データからの算定では、河床波が観測 された図-4のc)8月8日10:00及び d)8月8日13:00 におけ るマニング粗度係数の値は n=0.022~0.023であった. こ れに対して、河床波観測で計測された形状(波長,波 高)から吉川・石川¹¹⁾や三輪・大同¹²⁾に従って算定した 全抵抗を水位に換算して求めた値はn=0.021~0.030 程度 であった. また、岸・黒木⁶ に従って算定した値は n=0.026~0.027 となった(ここで、観測された水理デー タが示す全抵抗を用いて全抵抗と摩擦抵抗の関係式(19) から摩擦抵抗を求め、式(1)より平均流速を推定するこ とによってマニングの粗度係数を求めた). 岸・黒木の 抵抗則から推定される粗度係数は観測の水理データから の値よりも大きい傾向だが、どちらの値も河床波形状か ら算定される粗度係数の範囲内であった.

なお、図-6に示す三輪・大同の抵抗則式を適用して算 定したマニングの粗度係数は n=0.013~0.016 となり、 他の手法よりも小さい値となった. この要因として、 Yalinによる式(2)は図-5に示されるように計測された河 床波形状に対して波形勾配を若干過小評価しているため と考えられた. 波形勾配が粗度係数に与える影響の感度 は大きく、河川防災上は安全側で洪水位を検討・設定す べきあると示唆された.

5. まとめ

本研究では、昭和56年石狩川洪水時の実測河床波デー タを用いて河床波形状による無次元化された全抵抗(無 次元せん断力) τ*を算定し、三輪・大同¹²⁾、清水・板倉 ¹³⁾、岸・黒木⁶との比較を行なった.本研究により、以 下の事項が明らかとなった.

- 河床波形状の観測データから算出した無次元せん断 力t*は、水理観測データから算出した値よりも大き い傾向を示した.この要因として、本研究で用いた 河床波は、低水路中央付近に沿って十分発達した大 きな河床波を中心に観測しており、河床波が河道内 全体にわたって発生・発達していなかった可能性が 考えられた.
- 2) 河床波形状から算出した無次元せん断力では、同じ

く河床波形状からのアプローチである三輪・大同¹²⁾ の手法よりも大きな傾向となった.この要因として, 三輪・大同が示した*h_m/d*>400の範囲を同一とする考 え方には適用限界があるものと示唆された.

3) 河床波形状から算出した無次元せん断力τ・は、1~3 程度の幅を持ちながらも、岸・黒木⁶による値と良 く一致した.この数値幅は河道内の場所ごとの河床 波規模の違いに起因すると考えられ、河川防災上、 安全側で洪水位を検討・設定する場合は、岸・黒木 ⁶の抵抗推定手法は適用性が高いと考えられた.

参考文献

- 石川忠晴:利根川・江戸川の河道粗度係数について、土木 研究所資料,第1943号,46,1983.
- 2) 竹本成行,高木譲治,牧野成雄,森田康志:石狩川下流部 における洪水観測について(第2報),河川に関する調査・ 試験・研究報告書,北海道開発局土木試験所河川研究室, 1982.
- 3) IPCC 編,気候変動 2007 IPCC 第 4 次評価報告書--政策決 定者向け要約- 邦訳版.
- 4) 井上卓也,濱木道大,荒井信行,中田満洋,高橋季承,林 田寿文,渡邊康玄:準3次元河床変動モデルによる石狩川河 口付近の昭和56年洪水再現計算,河川技術論文集,第10巻, pp. 101-106, 2004.
- 5) Engelund, F. : Hydraulic Resistance of Alluvial Streams, *Journal of the Hydraulics Division, ASCE, Proc. ASCE, Volume 92, No. HY2*, pp. 315-326, 1966.
- 岸力,黒木幹男:移動床流における河床形状と流体抵抗(I), 工学部研究報告第67号,北海道大学,1973.
- 7) Guy, H.P, Simons, D.B and Richardson, E.V : Summary of alluviail channel data from flume experiments, 1956-61, *Geological Survey Professional Paper* 462- I. U.S. Government Printing Office, Washington, 1996.
- 8) 山本晃一: 一様砂からなる開水路移動床の抵抗と流砂量, 土木学会論文集,第357号, II-3, pp.55~64, 1985.

9)河道計画検討の手引き,財団法人 国土技術研究センター編.

- 10)Yalin, M.S.: On the average velocity of flow over a movable bed, *La Houille Blanche*, No.1, pp.45-51, 1964.
- 吉川秀夫,石川忠晴:砂蓮・砂堆上の流れの抵抗について, 土木学会論文報告集,第281号, pp.55-63, 1979.
- 12)三輪浩,大同淳之:河床波による流水抵抗の構造と移動床 系の予測,水工学論文集,第55巻,pp. S758-S762,2011.
- 13)清水康行,板倉忠興:浮遊砂を考慮した河床変動計 算手法,土木試験所月報No.396,北海道開発局土木 試験所河川研究室,1986.
- 14)Yalin, M.S. and Karahan, E.: Steepness of sedimentary dunes, Jour. Hydraulics Division, ASCE, Vol.105, No.HY4, pp.381-392, 1979.

(2012.4.5受付)