

(Ⅱ - 26) 山地河川の跳水によるエネルギー損失を考慮した抵抗係数の導出

中央大学理工学部 学生員○田辺 光一 中央大学大学院 学生員 寺本 康宏
中央大学理工学部 正 員 日比野 忠史 中央大学理工学部 正 員 山田 正

1 はじめに:山地河川のうち河道内で跳水が頻繁に発生しているような0次あるいは1次河川においては、跳水によるエネルギー損失に起因する抵抗の増大が考えられる。本研究は流況の異なる2つの山地河川について河床縦断形状、河床勾配について計測し、河床のスペクトル特性について考察したものである。さらにマンニングの粗度係数に占める跳水のエネルギー損失の効果が解析されている。

2 観測概要:本研究で観測を行った山地河川は神奈川県丹沢の玄倉川と千葉県房総半島の養老川の上流部の支流である。両河川はともに1/2.5万の地形図で2次河川に分類される。本観測では約1kmの河床縦断形状が計測され同時に河床材料も観測されている。図1は両河川の河床縦断曲線であり図2は河床縦断形状変化の図である。図1より河床勾配

表1 玄倉川と養老川の諸特性

	地質年代	流域面積	河床材料及び河床堆植物	河床基盤
玄倉川	第3紀層	1.70km ²	主に石英閃緑岩 多量の砂礫 (粒径 20cm~100cm)	露出していない
養老川	第4紀層 更新世代	0.70km ²	少量の砂礫 (粒径 5cm~20cm)	露出している (軟らかい剥離性の泥岩)

は部分的にみると直線を形成していることがわかる。また表1は観測の結果をまとめたものである。

3 河床形状のスペクトル特性:

観測を行った両河川について(a)観測河床の実データ(b)直線回帰した平均河床との偏差についてFFT法によるスペクトル解析を行った。著者らの前報^[1]により両河川ともに基本波の整数倍の卓越波長があり、スペクトルの高波数部分では波数の2乗則で減衰していることがわっている。

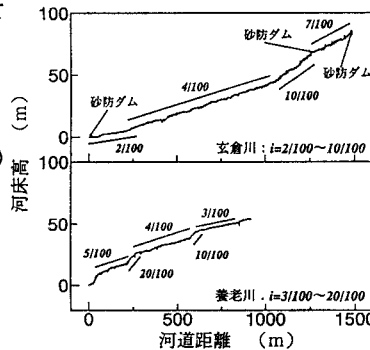


図1 山地河川の河床縦断形状

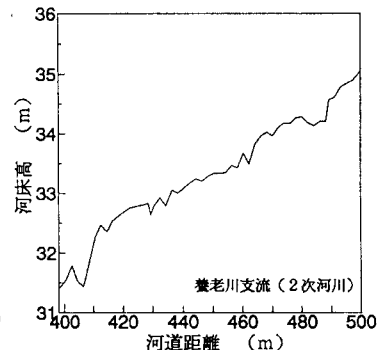
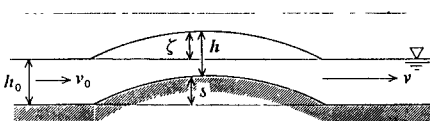


図2 山地河川の河床縦断形状変化

4 跳水によるエネルギー損失を考慮したマンニングの粗度係数 n_j の導出:河床に凹凸が存在する流れでは常流、



$$\eta = s/h_0, \quad y = h/h_0$$

図3 河床に突起がある流れの概要図

射流の水面形の他に射流から常流に水面形が遷移するとき跳水が発生する。その際の跳水の発生条件は著者らの1人(山田)により既に求められている^[2]。図3において上流一様部のフルード数を Fr とすると、連続式とBernoulliの式から得られる無次元水深 $y(=h/h_0)$ についての3次式(1)より根の存在条件(2)が以下のよう求めることができる。

$$y^3 - y^2(1 + \frac{1}{2}Fr^2 - \eta) + \frac{1}{2}Fr^2 = 0 \quad (1), \quad \eta < 1 + \frac{1}{2}Fr^2 - \frac{3}{2}Fr^2 \quad (2)$$

(2)式において解の存在しないところで跳水が1回発生すると考えている。

河道内での全エネルギー損失 $h_{t, \dots, 1}$ は $h_{t, \dots, 1} = h_{t, 1} + h_{t, 2}$ で表すことができる。ここに $h_{t, 1}$ は平面上の底面摩擦によるエネルギー損失であり、 $h_{t, 2}$ は跳水によるエネルギー損失である。 $h_{t, 1}$ はマンニングの粗度係数 n_0 で表すことができ $h_{t, 2}$ は付加的なマンニングの粗度係数 n_j として表すことができる。上流部の水深 h_0 より跳水発生時の共役水深条件から跳水後の水深 h_1 を求め、一回の跳水によるエネルギー損失 h_j を求める。一

定区間で跳水が k 回起きるとすると跳水によるエネルギー損失 h_{1j} は、 $h_{1j}=k \times h_j$ として表すことができる。この h_{1j} が区間 j のエネルギー損失となる。一般的に付加的なマンニングの粗度係数 n_j は、河床形状ごとに異なるがその統計的平均値を求めるには同じ河床特性を持つ多くの観測データが必要となる。この労力を省くために本研究は以下の方法を採用している。すなわちフーリエ変換によって得られた観測河床のスペクトルから、位相をランダムにとったフーリエの逆変換をすることにより、同一のスペクトル特性を有する多くの河床形状を再現している。図4は観測河川につき計算された付加的なマンニングの粗度係数 n_j であり流れのフルード数の関数として表される。図4より付加的なマンニングの粗度係数 n_j の値は観測した2つの河川で流況が異なるのに対して、それぞれある Fr 数でピーク値をとる同一の傾向を示した。

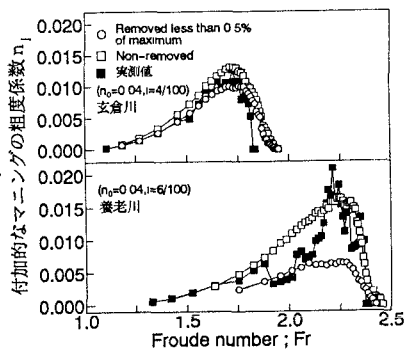


図4 上流一様 Fr 数と付加的なマンニングの粗度係数 n_j

5 全体的な粗度係数 n_{total} の評価の方法:開水路において一定区間内のエネルギー損失水頭は(3)式で表すことができる。

$$h_l = f' \frac{l}{h_0} \frac{v_0^2}{2g}, \quad f' = \frac{2gn^2}{\sqrt{h_0}} \quad (3)$$

(3)式において底面摩擦による損失係数 f' を f'' 、跳水による損失係数 f' を f 、とすると全エネルギー損失 h_{total} は(4)式のように表される。

$$h_{total} = h_{lf} + h_{lj} = (f'' + f_j) \frac{l}{h_0} \frac{v_0^2}{2g} = (n_0^2 + n_j^2) \frac{lv_0^2}{\sqrt{h_0}} \quad (4)$$

よって底面の摩擦損失による粗度係数 n_0 に跳水による損失の付加的なマンニングの粗度係数 n_j を加えた全粗度係数 n_{total} は(5)式のように考えることができる。

$$n_{total} = \sqrt{n_0^2 + n_j^2} \quad (5)$$

(5)式を用いてマンニングの粗度係数 n_{total} を求めている。

図5より観測した河川の場合、マンニングの粗度係数 n_{total} は n_0 に対して約10%程度増加しており観測河床の場合には跳水による抵抗増大の効果は小さい。次に山地河川における0次谷を想定して玄倉川の観測河床の河床高を3倍、5倍にした河床形状について n_{total}/n_0 を計算し、図5で観測河川のそれと比較してみた。図5よりマンニングの粗度係数 n_{total} は n_0 に対して3倍河床で15%、5倍河床で30%程度増加している。即ち河床の凹凸を大きくすることにより、跳水によるエネルギー損失を考慮した付加的なマンニングの粗度係数 n_j は底面摩擦に起因するマンニングの粗度係数 n_0 に対して無視することができないものとなっている。

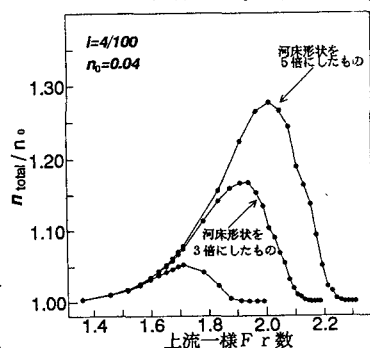


図5 付加的なマンニングの粗度係数 n_j の相対的評価

6 まとめ: (1)河床縦断曲線は部分的に直線を形成している。(2)今回観測した2つの河川では流況が全く異なっているにもかかわらず卓越波長は基本波の整数倍となっており、スペクトルの高波数部分では-2乗則で減衰している。(3)付加的なマンニングの粗度係数 n_j の値はある Fr 数でピーク値をとる。(4)観測を行った河川では河床形状による摩擦損失は約10%程度であり、跳水による抵抗増大の効果は小さい。(5)河床の凹凸を大きくすることにより跳水によるエネルギー損失を考慮したマンニングの粗度係数 n_j は、底面摩擦に起因するマンニングの粗度係数 n_0 に対して無視できないものとなっている。

今後は水路実験を行い、付加的なマンニングの粗度係数の理論値と実験値との比較検討を行うつもりである。

参考文献[1]寺本康宏, 日比野忠史, 山田正:山地河川の河床縦断特性の解析と抵抗係数の導出, 水文・水資源学会1993年研究発表会要旨集, pp. 260-261, 1993. [2]山田正, 池内正幸, 村上良宏:溪流を模擬した開水路流れの水面形遷移と抵抗則に関する研究, 第30回水理講演会論文集, pp. 73-78, 1986. [3]日野幹雄, 池田信己, 伊藤雄二:乱流拡散におけるLagrange相関とEuler相関, 第20回水理講演会論文集, pp. 127-132, 1976. [4]山田正, 池内正幸, 堀江良徳:不規則底面を持つ開水路流れに関する研究, 第38回年次学術講演会講演概要集第2部, pp. 605-606, 1984.