

防衛大学校工工学教室 正会員 山田 正

同上

正会員 池内 正幸

同上

堀江 良徳

1. はじめに 一般に山地流域の降雨流出系は斜面と河道部の流れに大別されよう。そのうち斜面流れは浸透流および部分的な表面流出としてとらえることが近年の内外の研究によって次第に明らかにされてつある。一方河道部の流れに関しては水文学的にはまだ明らかにされていない部分も多いようである。ところで山地河川の急流部においては河床形状が一見不規則あるいは不規則に近い形状とみなし得るような河川がある。本研究は上記の水文学的見地から不規則底面上の開水路流れに関してその抵抗則や水面形を明らかにすることを目的としたものであるが、本報告では主に水面形の問題が扱われている。

2. 実験装置 実河川は移動床をかつ二次元的な底がりをもった河床形状をしているが、ここでは研究の第一段階として一次元的(流れ方向にのみ変化する)な水路床上の流れを扱った。用いた水路は幅50cm、長さ13mの可変勾配開水路である。本研究でははじめに水路床形状が規則的な $\sin$ 形をしている場合を調べ、つぎに水路床形状として $\sum_{n=1}^m a_n \sin(2\pi x/L_n)$ を与えられる(一見)不規則な路床形状の場合の流れにつき検討した。以後二つの場合をそれぞれケースA、ケースBと略称する。ケースAの河床波の振幅は5cm、波長は50cm、ケースBの場合の河床波は上式で $m=6$ 、 a_n はすべて2.06cm、 L_n は30, 60, 90, 120, 150, 180cmである。なお路床ははじめアクリル板で作ったが抵抗が小さすぎるために図1に示す水面形状しか得られないため、後に市販のビニール製波板(波高0.8cm、波長3.2cm)をその上に敷き、粗度を大きくすることにより壁面抵抗を増した。さらに水路の末端部には風胴用のハネカムを置き、水路端部からの波の反射を極力抑えた。水面形はガラスばりの側面を通し、カメラによる写真撮影により行なった。撮影ではシャッター速度を遅くし(2秒程度開放)、多少ゆれ動く水面形の平均的な形状をとっている。その他に壁面に沿う圧力分布や壁面せん断応力の分布の測定には、外径1mmの静圧管およびフレストン管を用い、流速分布の測定には通常のピトー管のほか、レーザ流速計も併用している。

3. 実験結果 ケースAの路床が $\sin$ 曲線の場合:

この場合には(i)流速が大きく射流が現れる場合と、(ii)水路全長にわたって常流が流れる場合につき分けて調べている(本報告では(ii)の場合は載せていない)。図1は $\sin$ 形の路床上に水路全長にわたって射流が流れている場合の水面形(以後射流の水面形と呼ぶ)と流線と、図2はいわゆるシュート&プール状態を流れている水面形とそのときの流線を示している。図3, 4はそれぞれ流れに沿う摩擦速度 U_τ の分布、および流れに沿う壁面圧力(水頭)の分布を示しており、実験条件は図1, 2に対応している。

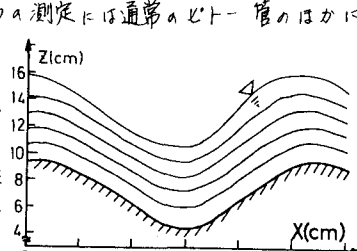


図1. 射流の水面形と流線(勾配1/53, 単位幅流量1000 cm³/s)

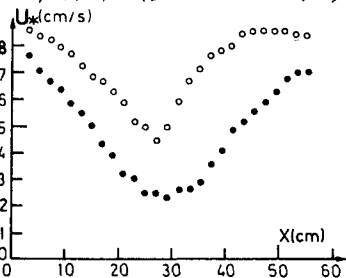


図3. 流れに沿う摩擦速度の分布 (図中○: 図1に対応, ●: 図2に対応)

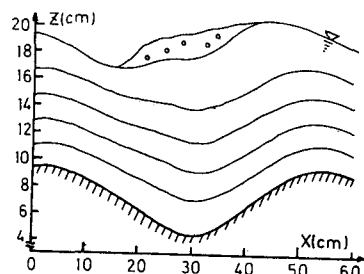


図2. シュート&プールの水面形と流線(流量は図1に同じ, 勾配1/70)

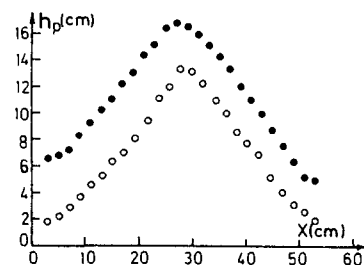


図4. 流れに沿う壁面圧力分布(水頭表示) (図中○: 図1に対応, ●: 図2に対応)

これらの図より壁面近傍の流線形状には両者の間にそれほど顕著な差はないにもかかわらず壁面せん断応力の値およびその分布形は大きく異なっている。特にジェットノールから射流の水面形が現れる遷移時には壁面せん断応力の値が大きくジャンプすることになった。図5, 6は水面形遷移における水面変化の様子を模式的に示したものである。この図よりジェットノールから射流への遷移は上流側から生じ、一方射流の水面形からジェットノールへの遷移は下流側から伝わっている。またこれらの現象には衝撃波が水路幅一柱に伝わるか否かが重要なkeyになっていようである。図7は上記の遷移現象についてそのときの流量および勾配について表わしたものである。この図より水面形の遷移はたゞ一本の(I, q)関係を示す曲線では表わされず、過去の水面形がどちらの形であったかによって異なる(I, q)関係となることわかる(水面形遷移における履歴効果)。ケースBの不規則底面の場合: 写真1(a), (b), (c)はこのときの水面形を示すものである。この写真よりたとえ底面が不規則形をしていようと、常流のときには現れる水面形はsine形をしていることがわかる。この水面形は定在波の特性を有しているが、

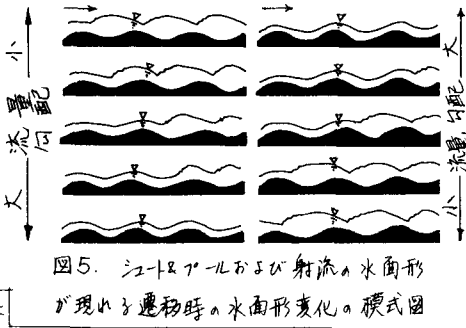


図5. ジェットノールおよび射流の水面形が現れる遷移時の水面形変化の模式図

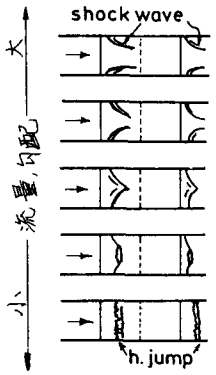


図6. 図5の平面図

図8はこのときの波の波長の無次元表示 $koh = 2\pi h/L_0$ (L_0 : 波長) とフルード数の関係を示したものである。図中の実線は $Fr = \sqrt{\tan k koh / koh}$ (h は平均水深) を示している。本実験で得られた定在波の波長が上式の関係をよく満たしていることがわかる。これは流れの平均流速 = 波長 L_0 をもつ微小振幅波の位相速度という関係を満たしていることを意味している(それ故に定在波として存在し得る)。結局不規則底面上の流れでは、底面の不規則性により、さまざまな波長をもつ水面波が誘起されるが、そのうち上記の関係を満たす波動成分のみが定在波として存在し得るのではないかと推測される。現在、このような観点から理論解析を進めている。なお上記の現象は、不規則外力を受け振動の問題に似て(減衰項が小さいとせば)、固有振動が誘起されるという現象とアナロジー的にも考えられよう。図9はフルード数に対する現れる定在波の波高を示している。この図より波高は大略フルード数の増加とともに大きくなるということがわかる。フルード数が0.8より大きくなると、水路の一部ではジェットノールの水面形が現れるが、これが不規則底面上の流れの一つの特性であると思われる。

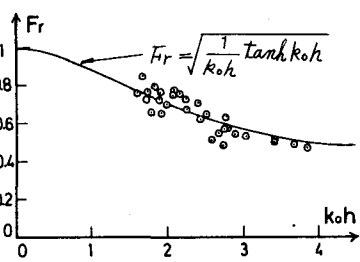


図8 不規則底面上の流れに現れる定在波の波長とフルード数の関係

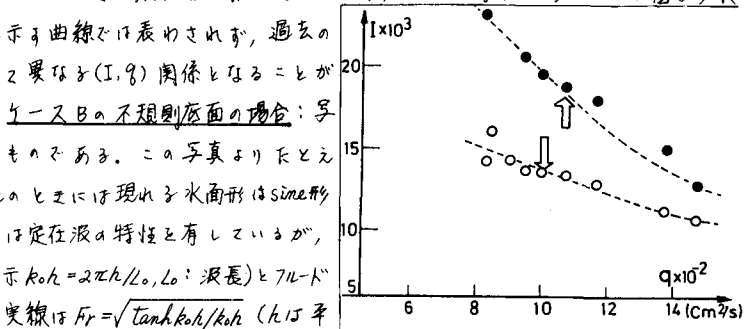


図7. 射流の水面形とジェットノールの水面形の遷移における路床勾配と流量

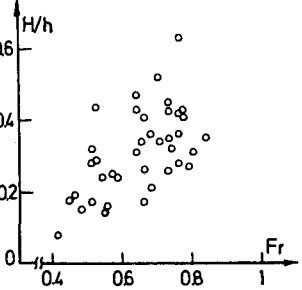


図9. 不規則底面上の流れに現れる定在波の波高とフルード数

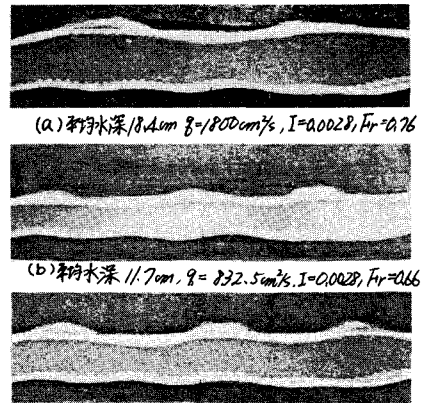


写真1 不規則底面上の水面形 (平均的なフルード数は全て1以下である)