

複断面河道の抵抗予測と河道計画への応用

PREDICTION OF FLOW RESISTANCE IN COMPOUND CHANNELS AND ITS APPLICATION TO DESIGN OF RIVER COURSES

福岡捷二*・藤田光一**

By Shoji FUKUOKA and Koichi FUJITA

Laboratory tests were performed to evaluate the interaction of the flow between a main channel and floodplains. In the tests, prismatic channels similar to actual river courses were used. The experimental results showed that the increase in Manning's roughness coefficient due to the interaction could be predicted by estimating an apparent shear stress acting on a vertical plane along a interface between a main channel and flood plain. The mixing coefficient at the interface f can be almost constant and its value is around 0.17. On the basis of the prediction method obtained, the classification diagram for the estimation of the flow resistance in the compound channel was proposed, by which discharge capacity is calculated well in accordance with characteristics of river course, compared with the existing method. Further more, it becomes known how the resistance to flow varies with the change in the cross-section by river improvement works.

Keywords: compound channel, flow resistance, flow interaction

1. 序 論

わが国の河川の河道断面の多くは、扇状地河道を除いて、低水路と高水敷からなる複断面形状をなしており、規模の大きい洪水が発生したときには、複断面河道での流れとなる。複断面河道内の流れは、単断面河道内の流れと異なる特性を示すことから、その抵抗予測に際しては、複断面河道内の流れの特徴を十分考慮する必要がある。従来、複断面河道の抵抗予測手法として一般的に用いられてきたのは、高水敷と低水路の流れの境界に干渉がなく、この干渉に伴う抵抗増加がないと仮定した断面分割法とよばれる手法である¹⁾。井田は、この手法を、水深に比べて幅の大きい任意横断面形状をもつ河道の不等流計算に適用する方法²⁾（井田の方法とよばれる）を開発しており、河川砂防技術基準（案）³⁾では、複断面河道を対象とした不等流計算に際しては井田の方法を用いることが示されている。しかし、複断面形状を有する水路において水位が高水敷の高さをわずかに上回る際、低水路の平均流速が水位の増大とともに減少し、断面分

割法の仮定を用いて計算された流速よりも小さくなることが、実験によっても実河道の洪水流観測によっても確認されている^{4)~6)}。実測値と断面分割法による計算値とのこのようなずれは水位予測の精度を低下させることから、その原因を解明し従来の粗度係数予測手法を改良することは河道計画上重要な課題である。一方、複断面河道においては低水路の流れと高水敷上の流れが相互に干渉し合い、境界付近では複雑な状況を示すことが知られており、低水路と高水敷の境界付近に発生する大規模渦や組織的な乱れの構造^{5),7),8)}および相互干渉が疎通能力に与える影響^{11),12),14)~22)}などについて多くの研究がなされている。しかし、これらの研究の多くは、実河道に比較して水深幅比の著しく大きいゆがめられた河道形状、流れを対象にした実験に基づいて行われており、基本的な現象の解明には役立つものの、それらの結果をそのまま実河川の抵抗予測に適用することは困難である。一方、著者らは、比較的実河道に近い形状をもつ実験水路を用いて複断面水路の抵抗特性を調べたが²³⁾、高水敷と低水路の粗度係数が等しい条件だけを対象にしたため、一般的な抵抗予測手法の議論をするに至らなかった。

そこで本研究では、実河道に近い種々の形状をもつ実験水路において、低水路粗度係数と高水敷粗度係数が等しい場合と異なる場合の2つの条件で、複断面河道の粗

* 正会員 Ph.D., 工博 東京工業大学助教授 工学部土木工学科（元・建設省土木研究所河川部河川研究室長）

** 正会員 工修 総合研究開発機構研究企画部研究員（元・建設省土木研究所河川部河川研究室研究員）
（〒163 新宿区西新宿 2-1-1 新宿三井ビル 37 階）

度係数を測定し、断面分割法による粗度係数予測値とのずれがどのような条件で顕著になるかを明らかにした。この結果をもとに、相互干渉の影響を考慮した粗度係数予測手法について検討した。以上の結果から、実河川の複断面河道における粗度係数予測手法の確立を試みた。

2. 複断面河道の粗度係数予測手法についての考察

(1) 断面分割法による合成粗度係数の予測

断面分割法では、図一に示すように断面を高水敷と低水路に分け、それぞれの断面において等流条件が成立するという仮定から、次式に示すような流量 Q と水深 H との関係が得られる。

$$Q = 2 \frac{A_{fp}}{n_{fp}} \left(\frac{A_{fp}}{S_{fp}} \right)^{2/3} \cdot I_b^{1/2} + \frac{A_{mc}}{n_{mc}} \left(\frac{A_{mc}}{S_{mc}} \right)^{2/3} \cdot I_b^{1/2} \dots (1)$$

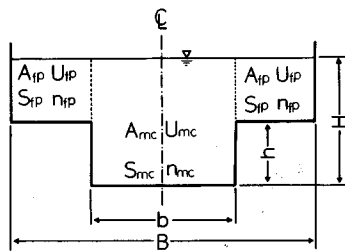
ここで I_b は河床勾配であり、添字の fp, mc はそれぞれ、高水敷、低水路の諸量に対応することを示す。なお、ここでは、説明を簡単にするため、左右対称断面を対象にしている。断面分割法では、高水敷と低水路の分割面（図一の破線）でのせん断力を無視しており、潤辺 S には分割面を含めない。このとき、合成粗度係数 N_c は次式により計算される。

$$N_c = \frac{A_{mc} + 2 A_{fp}}{Q} \cdot R_c^{2/3} \cdot I_b^{1/2} \dots (2)$$

R_c は、合成粗度係数 N_c を求めるための合成径深である。合成径深には、複断面河道を対象にした抵抗予測を行う場合に種々の長所をもつ⁹⁾井田法による径深を用いることが一般的である。井田法による径深は、高水敷と低水路の粗度係数が等しい場合に、断面分割法による合成粗度係数が水深によって変化しないように、通常の径深計算法 A/S を修正したものであり、式 (3) で表わされる²⁾。

$$R_c = \left[\frac{A_{mc} (A_{mc}/S_{mc})^{2/3} + 2 A_{fp} (A_{fp}/S_{fp})^{2/3}}{A_{mc} + 2 A_{fp}} \right]^{3/2} \dots (3)$$

以上の式 (1)~(3) によって、 N_c の計算値が求まる。



図一 記号の説明 (A : 河積, U : 断面平均流速, S : 潤辺, n : 粗度係数, B : 全幅, b : 低水路幅, h : 低水路深さ, H : 低水路底からの水深, 添字 fp は高水敷を, mc は低水路を表わす。)

また、ある水深に対する流量が実測により求めれば、式 (2), (3) を用いることによって、 N_c の実測値を得ることができる。合成粗度係数 N_c は、複断面河道における流れの抵抗特性を簡潔に表現しており、また式 (2) からわかるように、 N_c の変化は疎通能力の変化と直接結びついている。以上より、本研究では、式 (2), (3) で定義される合成粗度係数 N_c を用いて、複断面河道の抵抗特性を調べることにする。

(2) 分割面に作用するせん断力を考慮した合成粗度係数予測手法

複断面河道では、流速の異なる低水路と高水敷上の流れの間で運動量の交換が起こる。低水路と高水敷との分割面には、この運動量交換により見掛けせん断力が作用していると考えられる。このせん断力は「見掛けのせん断力」(Apparent Shear Stress) とよばれ^{10), 11)}、これを用いることにより、低水路と高水敷上の流れそれぞれについて次のようなつり合い式を立てることができる^{11), 12)}。

$$\tau_{mc} S_{mc} + \tau_{as} \cdot 2(H-h) = \rho g A_{mc} I_b \dots (4)$$

$$\tau_{fp} S_{fp} - \tau_{as} \cdot 2(H-h) = \rho g A_{fp} I_b \dots (5)$$

ここで、 τ_{mc}, τ_{fp} は、それぞれ高水敷と低水路の潤辺における平均のせん断力であり、 τ_{as} は、分割面に作用する見掛けのせん断力である。断面分割法においては、 $\tau_{as} = 0$ としている。以下に、 τ_{as} を考慮した合成粗度係数予測式を示す。まず、 τ_{fp}, τ_{mc} を次式により表わす。

$$\tau_{mc} = \frac{\rho g n_{mc}^2 u_{mc}^2}{R_{mc}^{1/3}} \dots (6)$$

$$\tau_{fp} = \frac{\rho g n_{fp}^2 u_{fp}^2}{R_{fp}^{1/3}} \dots (7)$$

ここで、 $R_{mc} = A_{mc}/S_{mc}$, $R_{fp} = A_{fp}/S_{fp}$, u_{mc} : 低水路の平均流速, u_{fp} : 高水敷の平均流速, である。式 (6), (7) は、各分割断面の潤辺に作用するせん断力が、単断面河道と同様、マンニングの抵抗則により分割断面内の平均流速と関係付けられると仮定したことを意味する。一方、見掛けのせん断力 τ_{as} について、石川らは¹³⁾、横断方向に流速差のある開水路平面せん断流において τ_{as} が流速差の 2 乗と流体の密度との積に比例するとおくと、横断流速分布の実験値を説明し得ることを示している。これは、開水路流の横断方向の流速差に伴う運動量交換の機構が自由せん断乱流のそれと近似的に等しいとの考えに基づくものであり、同じ τ_{as} 表示法が Evers¹⁴⁾, McKee ら¹⁵⁾ によっても提案されている。ここでは、同様の考えに基づき、 τ_{as} が次式により表現できると仮定する。

$$\tau_{as} = \rho \cdot f \cdot (u_{mc} - u_{fp})^2 \dots (8)$$

ここで ρ は水の密度である。 f は低水路と高水敷との境界での混合の激しさを表わす境界混合係数である。式

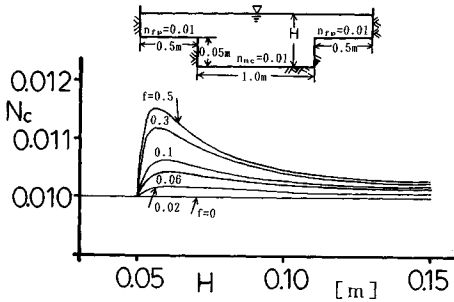


図-2 合成粗度係数 N_c と水深 H との関係 (計算値)

(4)~(8) を連立させることにより, 次式が得られる.

$$\frac{\rho g n_{mc}^2 u_{mc}^2}{R_{mc}^{1/3}} \left(\frac{b}{2} + h \right) + \rho f (u_{mc} - u_{fp})^2 (H - h) = \rho g H \frac{b}{2} I_b \dots (9)$$

$$\frac{\rho g n_{fp}^2 u_{fp}^2}{R_{fp}^{1/3}} \left(\frac{B-b}{2} + H - h \right) - \rho f (u_{mc} - u_{fp})^2 (H - h) = \rho g (H - h) \frac{(B-b)}{2} I_b \dots (10)$$

未知数は u_{mc} , u_{fp} であり, 上2式を連立させて解けば u_{mc} , u_{fp} が得られ, これらの結果から任意の水位に対する流量を求めることができる. 流量が求まれば, 式(2), (3)より N_c を計算することができる. 図-2には, 低水路と高水敷の粗度係数が等しい場合の合成粗度係数の計算例が, f をパラメーターとした実線で示されている. $f=0$ の計算値が断面分割法による合成粗度係数を表わす. 図より, 断面分割法の N_c は水深によらず一定であるのに対し, τ_{as} を考慮した N_c は水位が高水敷上にのったときに増加し, 低水路と高水敷の流れの相互干渉の影響が N_c に表現されていることがわかる.

本方法を実用的なものとするには, 境界混合係数 f の大きさを知らなければならない. そこで, 実験によって f 値を調べ, 本方法の妥当性を明らかにするとともに, f 値に代表される混合の強度が複断面河道のどのような因子の影響を受けるかを調べる.

3. 実験内容

図-1に示されるような複断面河道の横断面形状の特性は, b/B , b/h , H/h という3つのパラメーターで表わされる. これらは低水路流と高水敷上の流れとの混合形態を支配する重要なパラメーターと考えられる. そこで, これらのパラメーターが混合形態に与える影響を把握することを目的として, 数種の b/B , b/h をもつ複断面水路を対象とした実験を行った. 実験における b/B と b/h の具体的な数値を設定する際の参考にするため, 全国主要河川から抽出した55地点における b/B と b/h との関係を調べ, 結果を図-3に示した. 図から, 日

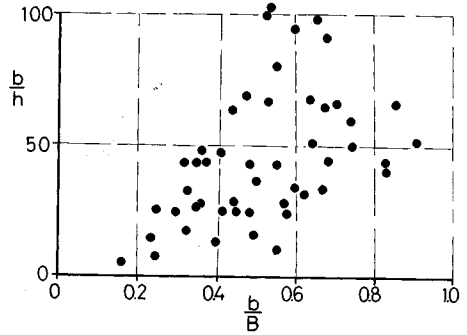


図-3 全国主要河川における b/h と b/B との関係

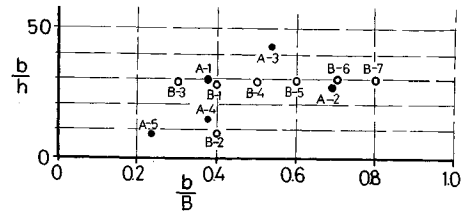


図-4 実験の対象とした複断面水路形状

本の主要河川の b/h は10から100の間にあり, 中でも20~50に半数以上が集まっていることがわかる. ところで, 複断面河道の抵抗や見掛けのせん断力を求めるための実験は従来より数多く行われており^{(11), (12), (15)~(22)}, また, それらの実験結果に基づいて, τ_{as} と水路形状, 水理量との間の関係を表わす式が数多く提案されている^{(12), (15)~(21)}. しかし, これらの実験に用いられた水路は, 文献17)を除いていずれも b/h が6以下で水深幅比が日本の一般的な複断面河道に比べて著しく大きい断面形状をもっており, その結果をそのまま実河川の抵抗予測式に用いることはできない. また, 文献12), 16), 20), 21) 以外の実験は, 低水路と高水敷の粗度係数が同じという条件で行われており, 高水敷粗度係数が低水路粗度係数よりも通常大きいという実河道の条件とは異なっている. 日本では比較的高い堤防が造られているため洪水発生時の高水敷水深がかなり大きくなることから考えても, 高水敷水深が増大したときに低水路と高水敷との間の流速差が小さくなる高水敷粗度係数の小さい水路だけではなく, 高水位時にも流速差が残る高水敷粗度係数の大きな水路での水理特性を知ることが重要である. 以上に示した従来の実験の問題点を踏まえ, 本研究では, 図-3に示した日本の河川の横断面形状と実験水路の横断面形状が極力同じ領域に入るように, 図-4に示す $b/B \sim b/h$ を実験水路諸元とした. また, 実験では, 高水敷の粗度係数が低水路の粗度係数よりも大きい場合 (以後, シリーズAとよぶ) と, 低水路と高水敷の粗度係数

表-1 実験水路の諸元

| 実験シリーズ | 水路長 [m] | 水路勾配 | 水路幅 [m] | n_{mc} | n_{sp} |
|--------|---------|---------|---------|----------|----------|
| A | 30 | 約1/1000 | 2 | 約0.01 | 約0.028 |
| B | 50 | 約1/1000 | 3 | 約0.01 | 約0.01 |

表-2 各実験ケースの横断面形状

| 実験シリーズ | ケース番号 | B(cm) | b(cm) | h(cm) | 備考 |
|--------|-------|-------|-------|-------|-------|
| A | 1 | 200 | 75.7 | 5.0 | 片側高水敷 |
| | 2 | 200 | 137.8 | 5.0 | 両側高水敷 |
| | 3 | 200 | 106.8 | 5.0 | 片側高水敷 |
| | 4 | 200 | 75.8 | 5.0 | 両側高水敷 |
| | 5 | 200 | 47.0 | 5.0 | 両側高水敷 |
| B | 1 | 300 | 120 | 4.2 | 両側高水敷 |
| | 2 | 300 | 120 | 12.1 | 〃 |
| | 3 | 300 | 90 | 3.1 | 〃 |
| | 4 | 300 | 150 | 5.1 | 〃 |
| | 5 | 300 | 180 | 6.0 | 〃 |
| | 6 | 300 | 210 | 6.9 | 〃 |
| | 7 | 300 | 240 | 8.0 | 〃 |

*両側高水敷の場合いずれも左右対称断面

がほぼ同じ場合（以後、シリーズBとよぶ）の2種類の条件を設定した。表-1には、実験に用いた水路諸元を、表-2には各実験ケースの断面形状を示す。いずれも断面一様の直線水路である。水路は、粗度の小さいベニヤ板と粗度の大きいプラスチックの多孔体を組み合わせて造った。実験にあたっては、まず、低水路と高水敷別々に通水して低水路と高水敷の粗度係数 n_{mc} , n_{sp} を求めておき、次に複断面河道について低水路深さの3倍までの数種の水位について流量を求めた。同時に、水位の縦断分布を3mピッチで測定した。また、アルミ粉や染料を投入することにより、表面流況の可視化を行った。実験により得られた水位の縦断変化と流量から、各水位測定点間ごとの粗度係数を不等流の式から逆算し、それらを縦断方向に平均することによって合成粗度係数 N_c を求めた。なお、径深計算法には、式(3)を用いている。

4. 実験結果と考察

(1) 高水敷粗度係数が低水路粗度係数よりも大きい場合（シリーズA）

図-5に、各複断面形状についての合成粗度係数 N_c と水深 H との関係のプロットした結果を示す。なおこの図では、 H が低水路深さ h によって、 N_c が n_{mc} によって無次元化されている。図中の実線は断面分割法による予測値である。図から、いずれの複断面形状においても、合成粗度係数の実測値が断面分割法による予測値よりも大きく、また、両者の差が高水敷水深の増大とともに大きくなっていることがわかる。図中の破線は、見掛けのせん断力 τ_{as} を考慮した合成粗度係数の計算値である。

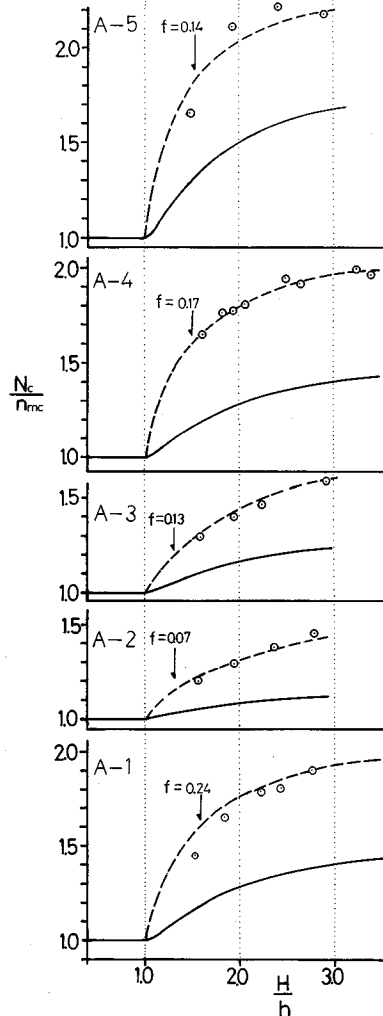


図-5 合成粗度係数 N_c と水深 H との関係（シリーズA）

破線を計算する際に用いる境界混合係数 f 値は、実測値と計算値が最もよく一致するように定めており、その値が図中に示されている。破線と実測値とを比較すればわかるように、適正な f 値を用いて計算された合成粗度係数値は実測値をよく再現する。

(2) 高水敷と低水路の粗度係数がほぼ同じである場合（シリーズB）

図-6に、図-5と同様の方法により表示された合成粗度係数 N_c と水深 H との関係を示す。図中の実線は断面分割法による予測値である。この図より以下のことがわかる。 $N_c/n_{mc} \sim H/h$ 関係には2つのパターンがみられる。第1のパターンは、低水路幅 b に対する水路全幅 B の比 b/B が相対的に小さい実験ケース B-1, 2, 3 でみられ、高水敷に水がのると N_c が断面分割法による計算値よりも大きくなり、さらに水位が上昇すると再

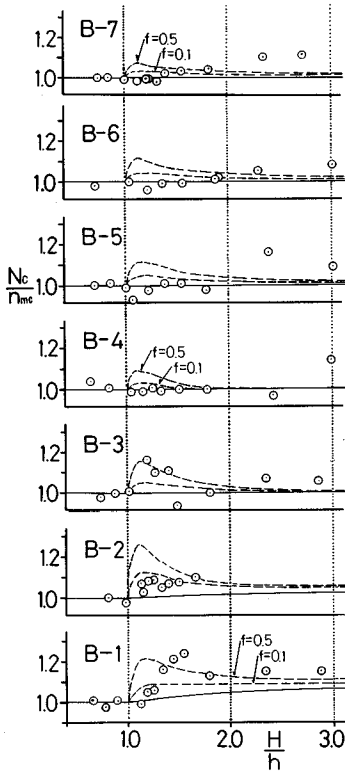


図-6 合成粗度係数 N_c と水深 H との関係 (シリーズB)

び N_c が減少して断面分割法による計算値に近づくと
いうものである。この場合 N_c は、最大で約2割増大する。
第2は、 b/B が大きい実験ケース B-4, 5, 6, 7 でみ
られ、 N_c の増加がほとんどないパターンである。第一の
パターンで N_c が増加するのは、高水敷と低水路の流れ
の相互干渉によるものと考えられる。図-6には、 τ_{as}
を考慮した計算値が破線で示されている。相互干渉の影
響が合成粗度係数に現われやすい領域、すなわち高水敷
水深が小さい ($1 < H/h < 1.5$) 範囲において実測値と
破線を比較することにより、相互干渉の効果をよく説明
する f 値の概略を知ることができる。 N_c の実験値の顕
著な増加がみられる実験ケース B-1, 2, 3 の f 値は 0.1
~0.5 程度の値を示しているのに対して、このような増
加がみられない実験ケース B-4, 5, 6, 7 では、 f が大
きくても 0.1 以下の値を示している。

(3) 低水路と高水敷の間の混合現象

流況観察の結果から、複断面河道の流れには2種類
の特徴ある組織的な構造があることが明らかとなった。す
なわち、第1は、低水路肩付近で間欠的に発生する強い
ボイルである。写真-1はその一例を示したものである。
ボイルにより底面付近の流体が表層に移動するため、低
水路河岸付近にところころアルミ粉のない領域が現わ

れていることがわかる。図-7は、写真-1に対応した
断面内の流速分布を示したものである。図中の等流速分
布は、直径5mmのプロペラ流速計により測定した横断
面内各点の20秒間の平均流速値に基づいて描いたもの
である(図-8も同様)。この図から、低水路河岸上の
流速がその両側に比べてかなり減少していることがわ
かる。これらは、今本ら⁶⁾が指摘している高水敷先端から
の斜昇流によるものと考えられる。もう1つの特徴ある
流れの構造は、鉛直の軸をもつ大規模な平面渦である。
その一例を写真-2に示す。この渦は次のような性質を
もっている。まず渦の影響範囲がほとんど高水敷内に位
置する。また渦は規則的であり、かつ長時間にわたって
その形を維持する。すなわち、写真-2に示したような
高水敷上のアルミ粉のパターンがそのまま下流へ移動す
る。渦の存在が表面に散布されたアルミ粉の集散状況よ
り確認できることからわかるように、渦は水平方向の流
速変動だけではなく、湧昇流と沈降流を伴っている。そ
の構造を図-9に示す。大規模渦に伴って、低水路の底
面付近の流体が高水敷へ鉛直上向きの流速成分をもち
ながら輸送され、一方、高水敷上の流体がやや沈降し
ながら低水路へ輸送される。前者の輸送は渦中心の下流側で、
後者は上流側で行われる。以上より、高水敷と低水路の
流体の混合は、二次元的ではなく、組織的な湧昇・沈
降流を伴う三次元的な形で行われることがわかる。図-8
には写真-2に対応する横断面内の流速分布が示されて
いる。図-7にみられた低水路肩の上での低流速域はみ
られない。ここで、2種類の組織的構造のうち、前者を
高水敷先端からの斜昇流、後者を大規模平面渦とよぶと、
これらの発生の有無は図-10により表わされる。図か
ら、高水敷と低水路の粗度係数が同じ場合(シリーズB)
には、 H/h の増大に伴い大規模平面渦から斜昇流へ流
れの形態が変化するのに対して、高水敷粗度係数が低水
路に比べて大きい場合(シリーズA)には、すべての領
域で大規模平面渦の発生がみられる。これらのことは、
大規模平面渦発生の必要条件が低水路と高水敷上の流れ
との顕著な流速差であることを示している。また、図-
10から、大規模平面渦発生の有無は b/B にはほとんど
影響されないことがわかる。ただし、 b/B の違いによ
って大規模平面渦の形に次のような違いがみられる。す
なわち、 b/B が大きい(0.6程度以上)場合には、写真
-3に示すように、高水敷の幅が小さいため渦が境界か
らの制約を受け、ほぼ同じ大きさをもつ非常に規則的な
配列となる。一方、 b/B が小さい(0.6程度以下)場
合には、渦が境界からの制約を受けなくなるため、渦の
スケールがばらつき写真-2にみられるようにやや不規
則となる。

(4) f 値についての考察

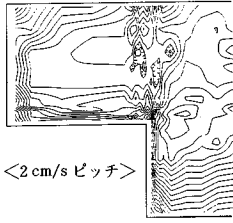


図-7 横断面内の流速分布
(ケース B-2, $H/h=2.25$)

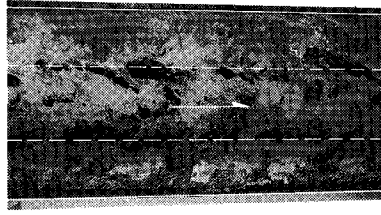


写真-1 高水敷先端からの斜昇流
(ケース B-2, $H/h=2.25$)

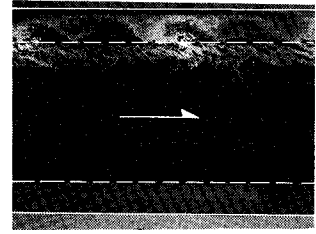


写真-3 高水敷幅が小さい場合の大規模平面渦
(ケース B-6, $H/h=1.19$)



図-8 横断面内の流速分布
(ケース B-2, $H/h=1.12$)

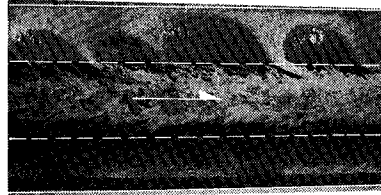


写真-2 大規模平面渦 (ケース B-2, $H/h=1.12$)

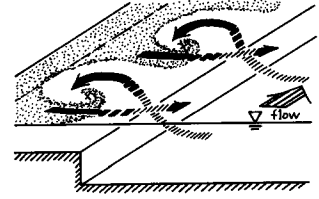
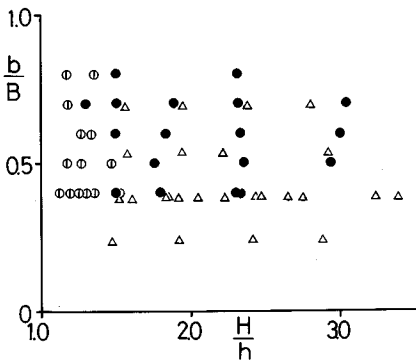


図-9 大規模平面渦に伴う流れの三次元構造



凡例
 シリーズA △…大規模平面渦
 ▲…高水敷先端からの斜昇流
 シリーズB ○…大規模平面渦
 ●…高水敷先端からの斜昇流

図-10 大規模平面渦と高水敷先端からの斜昇流の発生条件

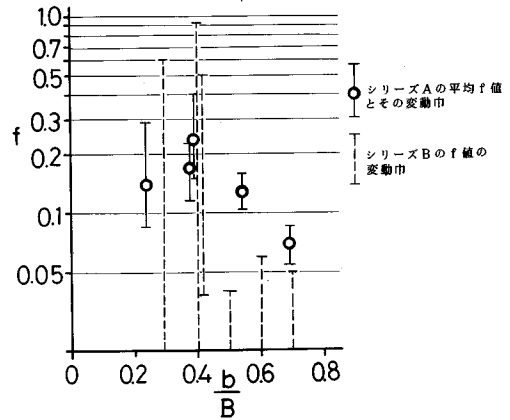


図-11 f と b/B との関係

図-11に、本実験により得られた合成粗度係数から逆算した境界混合係数 f 値と b/B との関係を示す。 f 値は同一横断面形状の下でも水深によって多少変動するので、図には水深平均値とその変動幅を示した。また、実験シリーズBでは、干渉効果による粗度係数の増加が小さく、しかも限られた水深範囲でしか明確に現われないので、逆算 f 値の精度が実験シリーズAに比較して低い。そのため、図には変動範囲のみが点線で示されている。図から、 b/B が0.5以上になると、 b/B の増大とともに f 値がやや減少する傾向がみられる。これは、 b/B が大きくなると高水敷幅が小さくなり、低水路と高水敷上の流れとの干渉に寄与する大規模渦が側壁の影響を受け、渦による運動量交換量が小さくなるためと推

定される。より信頼性の高い実験シリーズAの結果から、 $b/B=0.2\sim 0.6$ の範囲における f 値が0.17程度の値をもつと判断できる。したがって、実用的には、 f 値にこの程度の値を与えておけば、干渉効果を考慮した抵抗予測が十分可能となる。

ところで、石川らは、式(8)で定義される f 値を、開水路の広長方形断面内の粗度を場所的に変えることによって作り出した平面せん断流に関する実験から調べ、 f 値が0.015~0.03であり、自由せん断流の理論から導いた値とほぼ一致することを述べている¹³⁾。一方、本実験からは、低水路幅の割合が全幅の6割程度以下の場合、本実験で得られた f 値がこれらの値よりも1オーダー大きく、0.17程度の値をとるという結果が得られている。このことは、複断面河道では、高水敷と低水路

の流れの干渉の強度が開水路平面せん断流における混合の強度よりも大きくなることを示している。この原因としては、平面せん断流が二次元的な混合現象であるのに対して複断面河道の低水路と高水敷の流れの混合が図-9に示したように三次元的であることが考えられる。

5. 複断面河道の河道特性把握手法

(1) 河道特性把握のねらい

洪水流の抵抗予測は、河道計画における最も重要な検討項目の1つである。前章までの結果から、複断面河道の抵抗を予測するための手法が得られ、これを用いることにより、原理的には、実河道の抵抗を実用上十分な精度で予測することができる。しかし、実際の河道を対象とする場合、低水路、高水敷それぞれの粗度係数を精度良く求めることが困難であり、比較的精度良く求まる水理量は、ある規模の洪水データの逆算により得られた合成粗度係数だけである。したがって、式(9)、(10)による合成粗度係数の予測は必ずしも実河道の合成粗度係数予測の精度向上にはつながらない。このような状況を考慮した場合、逆算合成粗度係数を用いることを前提にした計画洪水発生時の合成粗度係数予測の精度向上にとって重要な情報だけを、本研究で得られた複断面河道の抵抗特性から簡潔に抽出することが重要であると考えられる。以下、この観点からの検討を行う。

(2) 複断面河道の抵抗特性を代表する特性量

河道計画に必要な計画規模洪水に対応する合成粗度係数を予測する最も簡便な方法は、断面内の粗度係数の分布も干渉も考慮せず、洪水観測データから逆算された合成粗度係数をそのまま予測値とするものである。これを手法1とよび、予測値を N_1 とする。手法2は、断面分割法である。これは、合成粗度係数と水位との関係を予測するために一般的に用いられる手法であり、予測値を N_2 とする。第3は、2. で取り上げた断面分割法に高水敷と低水路の流れの干渉による見掛けのせん断力 τ_{as} を考慮して合成粗度係数を予測する手法であり、これを以後手法3とよび、予測値を N_3 とする。粗度係数逆算対象洪水の水位は計画規模洪水の水位よりも通常小さいので、手法1では、合成粗度係数の水深による変化が小さいと仮定していることになる。しかし合成粗度係数は、前章で示されたように、高水敷上の流れと低水路流れとの干渉と一潤辺内の粗度の違いが原因となって、水位とともに変化するのが一般的である。干渉効果が卓越する複断面河道では、手法3による予測値が実験値に最も良く適合し、手法2の予測値は、上述の干渉効果を考慮していないため合成粗度係数を過小評価することになる。一方、合成粗度係数予測の繁雑さは、手法1, 2, 3の順に大きくなる。

$N_3 \sim H$, $N_2 \sim H$ (水深) 関係の中で、特に次の2つの水理量が河道計画に重要である。

- ① dN_3/dH : 水深の増大に伴う N_3 の増加率
- ② $N_3 - N_2$: N_3 と N_2 との差

計画規模洪水の水深と逆算洪水の水深との差 ΔH とすると、手法1には近似的に $\Delta H \cdot dN_3/dH$ だけ誤差が生じる。したがって dN_3/dH の大きさにより、手法1を採用することの妥当性を判断できる。 $N_3 - N_2$ は、干渉に起因する付加的な抵抗による粗度係数増加量の大きさを表わす。この量が大きいことは、干渉による付加的な抵抗を生じやすい河道であることを意味する。また、 $N_3 - N_2$ が小さいときには、手法3より簡便な手法2を用いることが可能であると判断できる。以上の考察から、複断面河道の水理特性を把握するための指標を dN_3/dH , $N_3 - N_2$ と考える。

(3) dN_3/dH , $N_3 - N_2$ と河道特性量との関係

左右の高水敷の高さと粗度係数が等しい図-1に示す単純な複断面形を対象とする。高水敷上の流量、流速が低水路内の流量、流速に比較して小さいことから、低水路流との干渉による高水敷流速の増加分は合成粗度係数の値にわずかな影響しか与えないと考えられる。そこで、第1次近似として、高水敷上の流れの力のつり合いを表わす式(10)の代わりに、流れの干渉を表わす項を省略した式(11)を用いる。

$$\frac{\rho g n_r^2 u_r^2}{R_r^{1/3}} \left(\frac{B-b}{2} + H-h \right) = \rho g (H-h) \frac{(B-b)}{2} I_b \dots\dots\dots(11)$$

式(9)と式(11)を連立させ、さらに各分割断面の径深がそれぞれの水深に等しいとして、 N_3 の第1近似値 N'_3 を得る式を求め、この結果から dN'_3/dH , $(N'_3 - N_2)/N_2$ を計算すると、それぞれ下式で表わされる C_1 , C_2 を得ることができる。

$$C_1 = \frac{dN'_3}{dH} = \frac{n_m}{(xyz^{5/3} + A)^2} \cdot \left\{ \frac{5}{3} xz^{2/3} z'(A-y) - B(1+xz^{5/3}) \right\} \quad [m, s \text{ 単位}] \dots\dots\dots(12)$$

$$C_2 = \frac{N'_3 - N_2}{N_2} = \frac{(1-A)}{xyz^{5/3} + A} \dots\dots\dots(13)$$

ここで、 $x = b_r/b_m$, $y = n_m/n_r$, $z = H_r/H_m$

$$A = \frac{\theta}{(1+\theta)} \cdot yz^{2/3} + \frac{1}{(1+\theta)} \cdot \sqrt{1+\theta - \theta y^2 z^{4/3}},$$

$$B = \frac{\theta'}{(1+\theta)^2} \cdot yz^{2/3} + \frac{2}{3} \frac{\theta}{(1+\theta)} yz^{-1/3} z'$$

$$- \frac{\theta'}{(1+\theta)^2} \cdot \sqrt{1+\theta - \theta y^2 z^{4/3}}$$

$$+ \frac{1}{(1+\theta)} \cdot \left(\frac{\theta' - \theta' y^2 z^{4/3} - \frac{4}{3} \theta y^2 z^{1/3} z'}{2\sqrt{1+\theta - \theta y^2 z^{4/3}}} \right),$$

$$\theta = \frac{S_r \cdot f \cdot H_m^{1/3}}{g b_m n_m^2}, \quad \theta' = \frac{2f}{g b_m n_m^2} \left\{ \frac{4}{3} H_m^{1/3} - \frac{1}{3} h H_m^{-2/3} \right\},$$

$$z' = \frac{h}{H_m}$$

また、 b_m ：低水路幅、 b_r ：高水敷の全幅、 n_m ：低水路粗度係数、 n_r ：高水敷の粗度係数の平均、 H_m ：低水路水深、 H_r ：高水敷の平均水深、 S_r ：干渉によるせん断力が作用する部分の潤辺長（低水路の両側に高水敷があるとき $S_r = 2H_r$ 、低水路の片側にだけ高水敷がある場合には $S_r = H_r$ ）、 h ：低水路深さ、 g ：重力加速度、である。このように、 dN_3/dH 、 $(N_3 - N_2)/N_2$ は河道横断面形、低水路高水敷の粗度係数および水深によって規定されることがわかる。

ところで図-12、13には、全国の代表的な複断面河道について、上記の近似、単純化を行わず式(8)~(10)に基づく数値計算より求めた dN_3/dH 、 $(N_3 - N_2)/N_2$ と式(12)、(13)より求めた C_1 、 C_2 との関係を示す。ここでデータには、図-3に示した全国主要河川の河道横断面形状とそこで実際に生じた洪水時の水位、粗度係数などの諸量を用いている。 C_1 、 C_2 を導くにあたっては近似や単純化を行っているため、それらと dN_3/dH 、 $(N_3 - N_2)/N_2$ とは一致しないが、両者の間には、図に示すように、次に示すほぼ一意の関係があることがわかる。

$$dN_3/dH \doteq C_1 \dots\dots\dots(14)$$

$$(N_3 - N_2)/N_2 \doteq 0.64 C_2 \dots\dots\dots(15)$$

以上のように、複断面河道の抵抗特性を代表する特性量

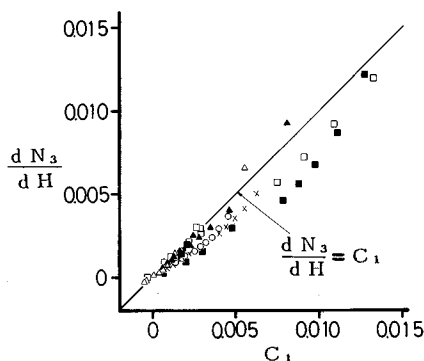


図-12 C_1 と dN_3/dH との関係

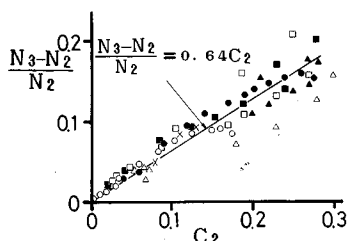


図-13 C_2 と $(N_3 - N_2)/N_2$ との関係

dN_3/dH と $N_3 - N_2$ は、河道横断面形、高水敷・低水路の粗度係数および水深から簡単に求められる河道特性量 C_1 、 C_2 によって表わすことができる。

(4) 複断面河道の抵抗予測手法の分類図

いま、(3)で求められた dN_3/dH と $(N_3 - N_2)/N_2$ を用いて、複断面河道の適切な抵抗予測手法の選択法について論じる。図-14は、縦軸に $(N_3 - N_2)/N_2$ を表わす $[0.64 C_2]$ ととり、横軸に dN_3/dH を表わす $[C_1]$ をとる。対象とする河川の河道特性量から C_1 、 C_2 を計算し、それぞれの河川が分類図上でどの位置に属するかによって各河川の用いるべき抵抗予測手法が決まる。すなわち、分類図上の左方に位置すれば、水深による粗度係数の変化が小さい (dN_3/dH が小)ので、合成粗度係数予測手法1の適用が可能となる。一方、分類図上の右方では、手法1の適用は不適切となる。このとき、その位置が右下にある場合には、 $(N_3 - N_2)/N_2$ が小さくなるので、手法2の適用が可能となるが、右上に位置する場合には、手法3を用いる必要が出てくる。図-15は、分類図上の位置に応じた代表的な河道断面図を概念的に示したものである。高水敷水深が大きい、あるいは低水路幅の広い河道では手法1の適用が可能となり、逆に、こうした形状をもたない河道では手法1の適用は不適切となる。この場合低水路が深い、あるいは高水敷粗度係数が大きい場合には手法3の適用が必要となり、そうでない場合は手法2の適用が可能となる。以上のように、複断面

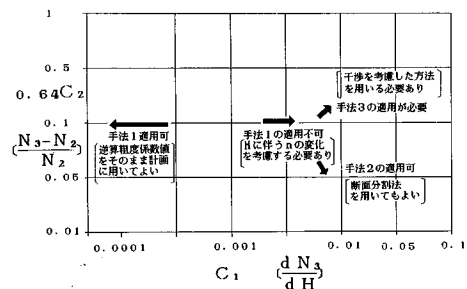


図-14 複断面河道の抵抗特性分類図と合成粗度係数予測手法選択の考え方

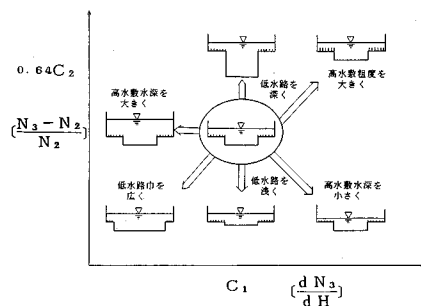


図-15 河道特性と分類図上の位置との関係 (概念図)

河道の抵抗特性分類図を用いることによって、合成粗度係数予測手法選定の合理的な判断を行うことができる。

(5) 分類図を用いた河道特性の把握

河道計画を策定する際、当該河川の抵抗特性、全国の河川の中での位置付け、また河道改修による河道特性量の変化等を見積もることができる簡便な指標があれば便利である。ここでは、上記の河道の抵抗特性分類図を用い、洪水流にかかわる河道特性の把握手法を提案する。分類図によって、合成粗度係数の水深による変化率と干渉効果による合成粗度係数の増加割合という洪水流にとって重要な水理特性がわかるので、これらをもとに検討対象河道についての評価を行うことができる。図-16は、計画高水位(H.W.L)時の現況河道の諸量を用いて上述の分類図にプロットしたものである。この図から、各河道が全国の複断面河道の中でどのような位置付けにあるかがわかる。図-17は、図-16の各河道が現況から計画になる際の、 C_1 、 C_2 の分類図上での変化の方向を示したものである。この図から、 C_1 軸については、変化しないか負の方向に動くものがほとんどであることがわかる。このことは、大部分の河道で、計画高水位付近の水深の上昇による粗度係数の増加率が不変あるいは減少することを意味している。一方、 C_2 軸については、正の方向に動くもの、負の方向に動くものの両方があることがわかる。正の方向に動く改修は、改修により干渉効果が増大することを意味している。以上のように、複断面河道の抵抗特性分類図を用いることにより、各河道がもっている疎通能力に関する特性、その全国河道の中での位置付けを明確にすることができる。また、改修に伴う分類図上のプロット位置の変化から、疎通能力の観点からみた改修の影響評価を簡便に行うことができる。

なお、改修に伴う河道特性変化の把握は、ここで述べた疎通能力の観点に加えて河床変動や河岸侵食等の観点からも行わなければならない。一例として、図-18に示す河床形態の形成領域区分図²⁴⁾を用いて説明する。図中の矢印に例が示されているように、改修により河道の横断面形状や河床材料が変化すると、河床形態の領域区分図上でその位置が移動する。その移動が異なる河床形態にまたがる場合には、改修による水当たり部の新たな発生やその位置、程度の変化が予想され、その対策を検討する必要が生じてくる。このように、河床安定の観点からも、改修に伴う河道特性の変化をあらかじめ予測し、先に示した疎通能力の観点からの検討と合わせて、与えられた条件の中でより望ましい河道横断面形状を見出していくことが合理的な河道改修を進めるうえできわめて重要である。

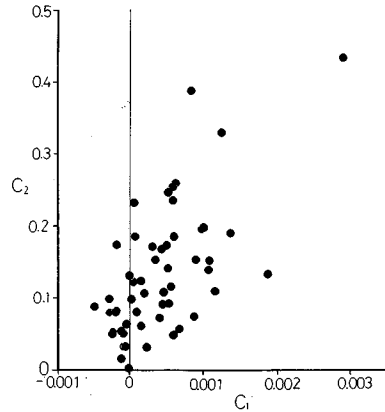


図-16 全国の代表的な複断面河道の分類図上の位置(計画高水位時の現況河道)

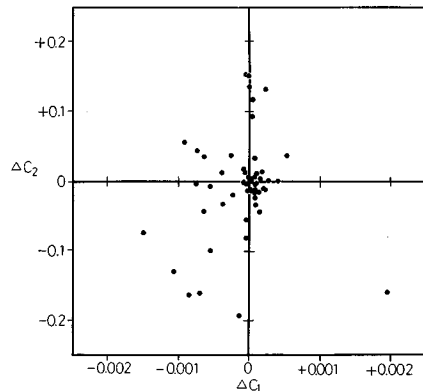


図-17 河道の状態が現況から計画に変化したときの C_1 、 C_2 の変化の方向 (ΔC_1 、 ΔC_2)

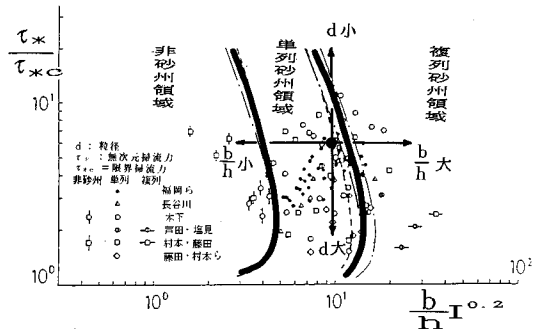


図-18 河床形態区分図

6. 結 論

実河川に近い種々の複断面形状をもつ実験水路を用いて、複断面河道における洪水流の抵抗特性を調べ、その結果得られた成果を用いて実際の河道計画への応用について述べた。結論を要約すると以下のようである。

(1) 高水敷と低水路の流れの干渉が原因となって両者の境界に作用する見掛けのせん断力 τ_{as} を考慮することにより、従来一般に用いられてきた断面分割法による合成粗度係数の予測精度を大幅に向上させることができることを示した。

(2) 低水路幅・全幅比が0.2から0.6の範囲で、高水敷の粗度係数が低水路の粗度係数の3倍程度という条件では、 τ_{as} を考慮した合成粗度係数の予測に際して必要となる境界混合係数 f の値が、0.17程度の値をとることが明らかになった。以上により、 τ_{as} を考慮した精度の高い合成粗度係数予測を行うことが可能となった。

(3) 複断面河道の抵抗特性を表わす指標として、水深による合成粗度係数の変化と低水路流と高水敷上の流れとの干渉による合成粗度係数の増加割合を選び、上記(1)、(2)の成果に基づき、これらの諸量を横断面形状、高水敷、低水路の粗度係数および水深から簡便に求める方法を示した。

(4) 上記の2つの水理量を縦軸と横軸にした複断面河道抵抗特性分類図を提案し、この分類図上に検討対象河道の水理量をプロットすることにより、用いるべき合成粗度係数予測手法の選択や、改修による水理特性変化の把握を容易にかつ合理的に行うことができることを示した。

謝 辞：実験と解析を進めるにあたり、長岡技術科学大学大学院生 渡辺政美君に多大なる援助を受けた。ここに記して感謝の意を表わす。

参 考 文 献

- 1) たとえば、Chow, V. T. : Open-Channel Hydraulics, International Student Edition, McGraw-Hill, pp.138~140, 1959.
- 2) 井田至春：広巾員水路の定常流一断面形の影響について一，土木学会論文集，第69号別冊(3-2)，1960.
- 3) 建設省河川局監修：改訂建設省河川砂防技術基準(案)調査編，52年改訂，山海堂，pp.185~186，1977.
- 4) Zheleznyakov, G. V. : Interaction of Channel and Flood Plain Streams, Proceedings of 14th Congress, IAHR, Paris, France, 1971.
- 5) Sellin, R. H. J. : A Laboratory Investigation into the Interaction between the Flow in the Channel of a River and that over its Flood Plain, La Houille Blanche, No. 7, pp. 793~801, 1964.
- 6) Bhowmik, N. G. and Demissie, M. : Carrying Capacity of Flood Plains, Journal of the Hydraulics Division, ASCE, Vol. 108, No. HY3, pp. 443~452, 1982.
- 7) 今本博健・久下俊夫：複断面流れの水理特性に関する基礎的研究，京都大学防災研究所年報，第17号B，pp. 665~679, 1974.
- 8) 今本博健・石垣泰輔・稲田修一：複断面開水路流れの水理特性について，京都大学防災研究所年報，第25号B-2，pp. 509~527, 1982.
- 9) 福岡捷二・藤田光一：洪水追跡法(その4)—1次元解析法の有効性とその適用限界一，土木技術資料，第28巻，第11号，pp. 46~51, 1986.
- 10) Toebe, G. H. and Sooky, A. A. : Hydraulics of Meandering Rivers with Flood Plains, Journal of the Waterways and Harbors Division, ASCE, Vol. 93, No. WW2, pp. 213~236, 1967.
- 11) Myers, W. R. C. : Momentum Transfer in a Compound Channel, Journal of Hydraulic Research, Vol. 16, No. 2, pp. 139~150, 1978.
- 12) Wormleaton, P. R., Allen, J. and Hadjipanous, P. : Discharge Assessment in Compound Channel Flow, Journal of the Hydraulics Division, ASCE, Vol. 108, No. HY9, pp. 975~994, 1982.
- 13) 石川忠晴・山崎真一・金丸督司：開水路平面せん断流に関する実験的研究，第39回年次学術講演会概要集，第2部，pp. 473~474, 1984.
- 14) Ogink, H. J. M. : The Effective Viscosity Coefficient in 2-D Depth-averaged Flow Models, Proceedings of the 21st Congress, IAHR, Melbourne, Australia, 1985.
- 15) McKee, P. M., Elsayy, E. M. and McKeogh, E. J. : A Study of the Hydraulic Characteristics of Open Channels with Flood-plains, Proceedings of the 21st Congress, IAHR, Melbourne, Australia, 1985.
- 16) 高橋 保：河道における洪水流の特性に関する研究，京都大学学位論文，pp. 135~159, 1971.
- 17) Rajaratnam, N. and Ahmadai, R. : Hydraulics of Channels with Flood-plains, Journal of Hydraulic Research, Vol. 19, No. 1, pp. 43~60, 1981.
- 18) 玉井信行・河原能久：複断面開水路流れの特性と抵抗則に関する研究，第25回水理講演会論文集，pp. 113~118, 1981.
- 19) Knight, D. W. and Demetriou, J. D. : Flood Plain and Main Channel Flow Interaction, Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, Vol. 109, No. 8, pp. 1073~1092, 1983.
- 20) Knight, D. W. and Hamed, M. E. : Boundary Shear in Symmetrical Compound Channels, Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, Vol. 110, No. 10, pp. 1412~1430, 1984.
- 21) Nalluri, C. and Judy, N. D. : Interaction between Main Channel and Flood Plain Flow, Proceedings of the 21st Congress, IAHR, Melbourne, Australia, 1985.
- 22) Noutsopoulos, G. and Hadjipanous, P. : Discharge Computations in Compound Channels, Proceedings of the 20th Congress, IAHR, Moscow, USSR, 1983.
- 23) 福岡捷二ほか：複断面河道における洪水流の抵抗特性，第30回水理講演会論文集，pp. 499~504, 1986.
- 24) 福岡捷二・山坂昌成・清水義彦：平衡形状に着目した中規模河床形態の卓越波数と形成領域区分，土木学会論文集，第363号/II-4，pp. 115~124, 1985.

(1988.11.26・受付)