

中小河川を対象とした低水路・高水敷境界の 境界混合係数に関する研究

STADY ON BOUNDARY MIXING COEFFICIENT IN COMPOUND CHANNEL

川村嘉勝¹・濱木道大²・荒井信行³・木下誠一⁴・山越明博⁵・渡邊康玄⁶

Yoshikatsu Kawamura, Michihiro Hamaki, Nobuyuki Arai, Akihiro Yamakoshi,
Seiichi Kinoshita, Yasuharu Watanabe

¹修士(地球環境科学) (株) 開発工営社 (〒060-0004 札幌市中央区北4条西5丁目1番地)

²(株) 開発工営社 (〒060-0004 札幌市中央区北4条西5丁目1番地)

³工修(株) 開発工営社 (〒060-0004 札幌市中央区北4条西5丁目1番地)

⁴国土交通省北海道開発局室蘭開発建設部 (〒050-0101 北海道沙流郡平取町字二風谷24番地4)

⁵国土交通省北海道開発局石狩川開発建設部 (〒060-8541 札幌市中央区北2条西19丁目)

⁶正会員 工博 独立行政法人北海道開発土木研究所 (〒062-8602 札幌市豊平区平岸1条3丁目1番34号)

The article discusses about the boundary mixing coefficient in compound channel.

The boundary mixing coefficient is important parameter calculated by quasi two-dimensionnal shallow water analysis. However, a rational calculated method had not been established.

To evaluate relevancy between the boundary mixing coefficient and characteristics of the stream, the boundary mixing coefficient was figured by analytical calculation.

As a result, it became clear that the boundary mixing coefficient is relative to the water depth/hight of the flood plain and roughness coefficient.

Based on these results, it was assured that the equation is related with the water depth/hight of flood plain and roughness coefficient, and it enables to obtain the accurate water level calculated by quasi two-dimensionnal shallow water analysis.

Key Words : boundary mixing coefficient, quasi two-dimensional shallow water analysis
compound open channel, roughness coefficient, water depth/hight of flood plain

1. はじめに

現在、河道計画検討において河道の流下能力を算出する方法は、特殊な場合を除き準二次元解析法を用いることになっている¹⁾。しかし、この手法を用いる場合には境界混合係数の合理的な算定方法や樹木群の評価方法が確立されていないため、中小河川や大河川の樹木繁茂の著しい区間においては過去の洪水を精度よく再現できない場合も少なくない(図-1参照)。

福岡・藤田²⁾は、境界混合係数は同一横断面形状の下でも水深によって多少変動し、かつ低水路と高水敷粗度係数の関係によっても異なるとしている。

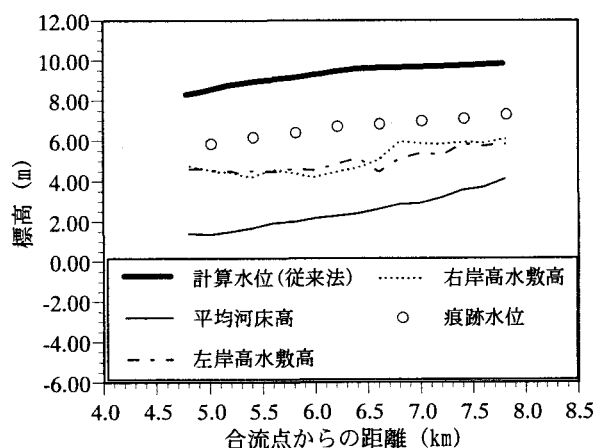


図-1 厚別川の痕跡水位と準二次元解析計算水位

特に、大河川に比べ河積が小さい中小河川では、境界混合係数の誤差が計算水位に大きく影響を及ぼす可能性がある。このため、従来示されている境界混合係数を用いて算出された水位を用い、中小河川における河道計画を策定することは課題が存在する。

そこで、本研究では、以下に示す手順により、主に中小河川を対象に河道特性に関する要素（川幅、低水路幅、高水敷高、粗度係数、水深等）と低水路と高水敷境界における境界混合係数の関係について検討し、準二次元解析における境界混合係数の推定を可能とすることを目的としている。

第一段階では、「河道計画検討の手引き」¹⁾に示されている手法を用いて粗度係数を設定し、実測した樹木密生度等を用いて平面二次元解析を行い、得られた計算水位と痕跡水位を比較することにより、設定した粗度係数や樹木密生度等の妥当性を確認する。

次に、複断面直線河道をモデル河川とし、河道特性に関する要素を順次変更して、平面二次元解析により算出した水位を基に、準二次元解析により算出した水位がそれに一致するような境界混合係数を算定する。

さらに、その結果を基に、低水路と高水敷境界における境界混合係数と河道特性に関する要素を組合せた種々のパラメータとの関係について検討する。検討の結果、川幅や低水路幅と有意な関係が認められず、境界混合係数は相対水深（=低水路水深/高水敷高）と反比例の関係にあり、さらに、その関係が粗度係数の変化に対して一定の変化傾向のあることがわかった。

本研究で、低水路と高水敷境界における境界混合係数の有効な算定手法を確立したことにより、中小河川における複断面河道の準二次元解析法による流下能力評価がより正確に可能となった。

2. 平面二次元解析法と準二次元解析法

本研究で用いる平面二次元解析法と準二次元解析法について以下に示す。

(1) 平面二次元解析法

複断面開水路流れでは低水路と高水敷境界部では大規模平面渦が発生し、横断方向の乱流混合現象に大きな影響を与える。このような三次元性の強い流れ場の解析は厳密には三次元モデルによらなければならないが、膨大な計算時間を要し実用的とはいえない。そこで、既往文献を調査し、このような乱流混合による抵抗増を渦動粘性係数に含めて平面二次元解析を試み、洪水痕跡をもとに再現性を確認した。

以下に、直交曲線座標系（流下方向： s_o 軸、横断方向： n 軸）における平面二次元解析法の運動方程式ならびに連続式を示す。

$$u \frac{\partial u}{\partial s} + v \frac{\partial u}{\partial n} + \frac{uv}{r} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial s} - \frac{\tau_s}{\rho h} + 2 \frac{\partial}{\partial s} \left(\varepsilon \frac{\partial u}{\partial s} \right) + \frac{\partial}{\partial n} \left(\varepsilon \frac{\partial u}{\partial n} \right) - \frac{a_w}{2} C_d u \sqrt{u^2 + v^2} \quad (1)$$

$$u \frac{\partial v}{\partial s} + v \frac{\partial v}{\partial n} - \frac{u^2}{r} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial n} - \frac{\tau_n}{\rho h} + \frac{\partial}{\partial s} \left(\varepsilon \frac{\partial v}{\partial s} \right) + 2 \frac{\partial}{\partial n} \left(\varepsilon \frac{\partial v}{\partial n} \right) - \frac{a_w}{2} C_d v \sqrt{u^2 + v^2} \quad (2)$$

$$\frac{\partial(uh)}{\partial s} + \frac{1}{r} \frac{\partial(rvh)}{\partial n} = 0 \quad (3)$$

ここに、 u, v : s_o, n 方向の水深平均流速、 h : 水深、 p : 圧力、 ρ : 流体の密度、 r : 曲率半径、 r_o : s_o 軸上の曲率半径、 $ds = ds_o r / r_o$ 、 C_d : 抗力係数、添字 s_o, n : s_o, n 方向についての量とする。

樹木密生度（単位体積の流体塊中にある樹木の投影面積） a_w を以下に示す。

$$a_w = Na_t / Ah_t \quad (4)$$

ここに、 N : 樹木数、 A : 樹木繁茂面積、 a_t : 樹木一本あたりの幹及び枝の総投影面積、 h_t : 樹木水深とする。

また、 s_o, n 方向のせん断力 τ_s, τ_n および渦動粘性係数 ε を以下に示す。

$$\frac{\tau_s}{\rho h} = \frac{gn_m^2}{h^{4/3}} u \sqrt{u^2 + v^2} \quad (5)$$

$$\frac{\tau_n}{\rho h} = \frac{gn_m^2}{h^{4/3}} v \sqrt{u^2 + v^2} \quad (6)$$

$$\varepsilon = au_* h \quad (7)$$

ここに、 n_m : マニングの粗度係数、 a : 比例定数、 u_* : 摩擦速度とする。

マニングの粗度係数は、「河道計画検討の手引き」¹⁾で示されている手法を用い、低水路については河床材料代表粒径・流速係数等、高水敷については地被状況を基に粗度係数を設定する。

(7)式の比例定数 a は、Lau and Krishnappan³⁾によると0.10~0.20、Webel and Schatzmann⁴⁾によると0.13~0.18、泉ら⁵⁾によると0.2~0.5程度の値としている。

表-1 美唄川、厚別川概要

河 川 名	美唄川	厚別川
河 道 形 状	複断面	複断面
検 討 区 間	3.0-6.4km	4.8-7.8km
平均河床勾配 (I_b)	1/638	1/957
川 幅 (B)	70~120m	80~100m
低水路幅 (b)	20~30m	10~20m
低水路粗度係数 (n_{mc})※1	0.020	0.020
高水敷粗度係数 (n_{fp})※1	0.045	0.045
樹 木 データ※2	現地調査により設定	
洪水発生年月	H9.8	H10.9
ピーク流量 (Q)	220m ³ /s	153 m ³ /s

※1: 推定粗度、※2: 樹木群位置、樹高、密度

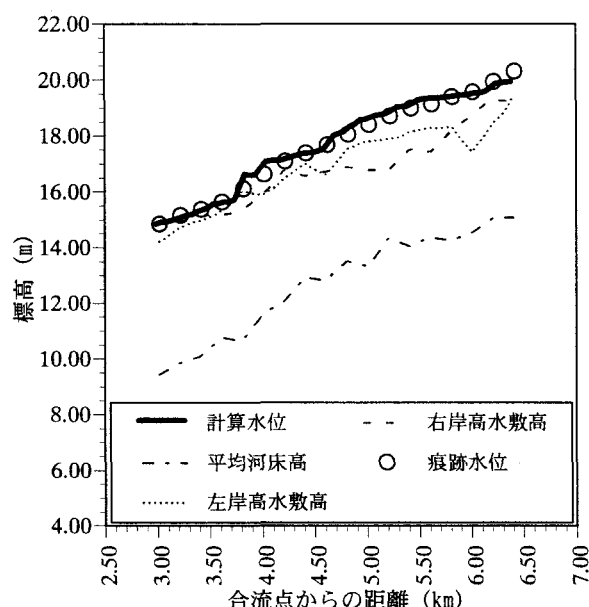


図-2 H10.9洪水における美唄川洪水再現計算

本研究においては、石狩川の一、二次支川で表-1の河道諸元を持つ美唄川及び厚別川の洪水痕跡水位による再現計算を行い、両河川とも $a=0.20$ 程度で痕跡水位と計算水位が一致する結果が得られた。一例として、平成10年9月洪水時における美唄川の再現計算結果を図-2に示す。

なお、この値は前述のLau and Krishnappan、Webel and Schatzmannや泉らにより示された値とほぼ同じ値であることから、以降の検討では $a=0.20$ を採用する。前述したように a の値は三次元性の強い乱流混合による抵抗増を見込んだ値となっている。

(2) 準二次元解析法

準二次元解析法は河道断面内を横断形状や樹木繁茂状況、粗度の状況から、顕著な流速差が生じると考えられる位置でいくつかの断面に分割し、分割断面ごとの平均流速と平均水位を求める手法であり、「横断面内流速分布の計算」と「縦断水位の計算」

で構成される。

a) 横断面内流速分布の計算

横断面内流速分布の運動方程式を以下に示す。

$$\frac{n_i^2 u_i^2}{R_i^{1/3}} S_{bi} + \frac{\sum_j (\tau'_{ji} S'_{wji})}{\rho g} + \frac{\sum_j (\tau_{ji} S_{wji})}{\rho g} = A_i I \quad (8)$$

ここに、 S_b :底面せん断力が働く潤辺長、 S_w :樹木群境界の潤辺長、 S'_w :樹木群境界以外の分割断面境界の潤辺長、 τ :樹木群境界に作用するせん断力、 τ' :樹木群境界以外の分割断面境界に作用するせん断力、 u :分割断面での平均流速、 n :マンニングの粗度係数、 R :径深、 A :河積、 I :エネルギー勾配、添字 i : i 番目の分割断面についての量、添字 ji : j 番目の分割断面境界についての量である。

なお、せん断力 τ 、 τ' は下式を与える。

$$\tau_{ji} = \rho f \Delta u_{ji} |\Delta u_{ji}| \quad (9)$$

$$\tau'_{ji} = \rho f' \Delta u_{ji} |\Delta u_{ji}| \quad (10)$$

ここに、 f :樹木群境界の境界混合係数、 f' :樹木群境界以外の境界混合係数とする。

また、全断面の流量 Q は下式により表わされる。

$$Q = \sum_i (u_i A_i) \quad (11)$$

b) 縦断水位の計算

縦断水位分布の運動方程式を以下に示す。

$$\frac{dH}{dx} + \frac{d}{dx} \left(\alpha \frac{u^2}{2g} \right) + \frac{\tau}{\rho gh} + \frac{\tau'}{\rho gh} + \frac{1}{2g} a_w C_d u^2 = 0 \quad (12)$$

$$\int u^2 dA = \beta \sum_i (u_i^2 A_i) \quad (13)$$

ただし、 β は運動量補正係数である。

3. 低水路・高水敷境界の境界混合係数の検討

複断面河道では、低水路と高水敷上の流れの間で活発な運動量輸送が生じ、低水路の流速が減速、高水敷上の流れが加速され、全体として流水抵抗が増大する。

このような付加的抵抗をもたらす運動量輸送は、大規模な平面渦を通して行われることが多く、福岡、藤田^{2,6)}の系統的な実験から、高水敷粗度係数が低水路粗度係数より大きく、低水路と高水敷上の流れとの間に一定の流速差が保たれ、相対水深(h/D)が1~3の幅の広い範囲の条件のもとでは大規模平面渦が形成されることが確認されている。また、この実験結果を基に一般的に用いられている

表-2 モデル河川の河道特性

河道特性パラメータ	設定値
河道形状	複断面直線河道
河床勾配 (I_b)	1/500~1/2500
川幅 (B)	50~100m
低水路幅 (b)	20~80m
低水路川幅比 (b/B)	0.20~0.80
高水敷高 (D)	2.0~4.0m
相対水深 (h/D)	1.0~5.0
低水路粗度係数 (n_{mc})	0.020~0.040
高水敷粗度係数 (n_{fp})	0.030~0.060

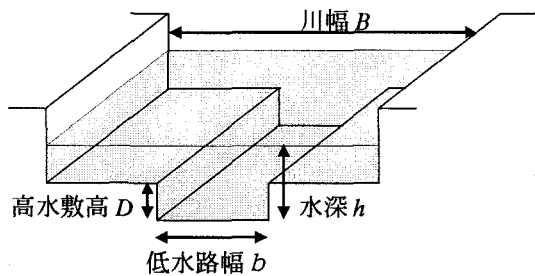


図-3 複断面直線河道イメージ図

境界混合係数の値が決められている。

しかし、高水敷粗度係数と低水路粗度係数が同じ条件で $h/D > 1.5$ 程度となると、高水敷先端から斜昇流の発生が実験的に示されている²⁾。

このため、相対水深が大きい条件では低水路と高水敷上の流れの間の流速差に起因する渦構造と断面形状に起因する斜昇流が交互に発生し、乱流的な不規則な流れ場を持つため、低水路と高水敷間の流体交換がもたらす抵抗増大効果が小さくなる⁷⁾。

上記から、相対水深が増大することにより境界混合係数が減少することが示唆される。

そこで、相対水深をはじめ、河道特性に関する様々なパラメータが境界混合係数に与える影響について検討する。表-2に変更するパラメータの項目とその範囲について示す。

(1) 方法

本研究では平面二次元解析法により水位を算出した。次に、同一条件において準二次元解析法により算出した水位がそれに一致するような低水路・高水敷境界の境界混合係数を算定する。

なお、対象とする河道形状は図-3に示すような複断面直線河道とし、表-2に示す河道特性に関するパラメータについてその値を数段階に変化させた。

(2) 検討結果

a) 相対水深 (h/D) と境界混合係数

上記の検討方法により相対水深を数段階に変化さ

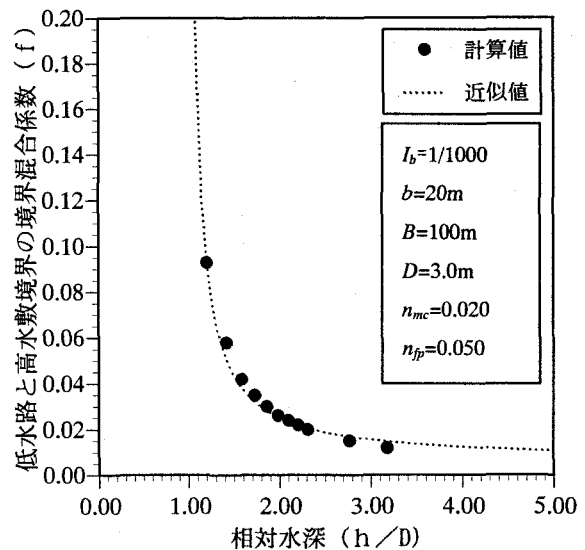


図-4 相対水深と境界混合係数の関係

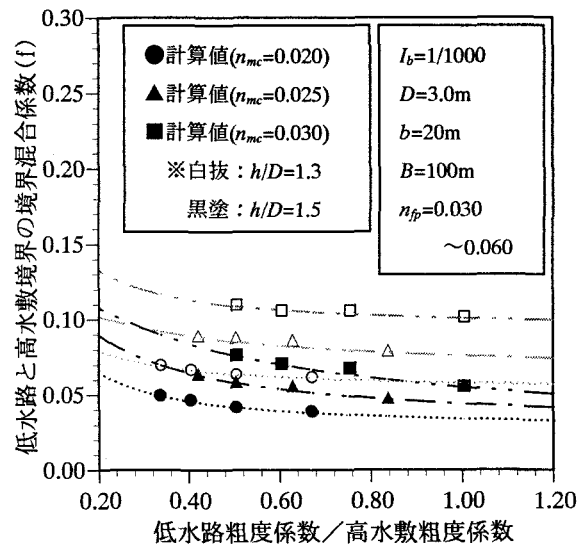


図-5 低水路粗度係数/高水敷粗度係数と境界混合係数の関係

せ、境界混合係数を算出した。

算出結果を図-4に示す。

これによると、相対水深が高くなると境界混合係数は小さくなり、かつ0に漸近する傾向が見られた。

b) 低水路粗度係数 (n_{mc}) および高水敷粗度係数 (n_{fp}) と境界混合係数

a)と同様に、低水路粗度係数と高水敷粗度係数を変化させ、境界混合係数を算出した。

算出結果を図-5に示す。

それによると、低水路粗度係数と高水敷粗度係数の比が大きくなると境界混合係数が小さくなる傾向が見られた。

また、低水路粗度係数が大きくなれば同一の相対水深に対して境界混合係数は大きくなる傾向がみら

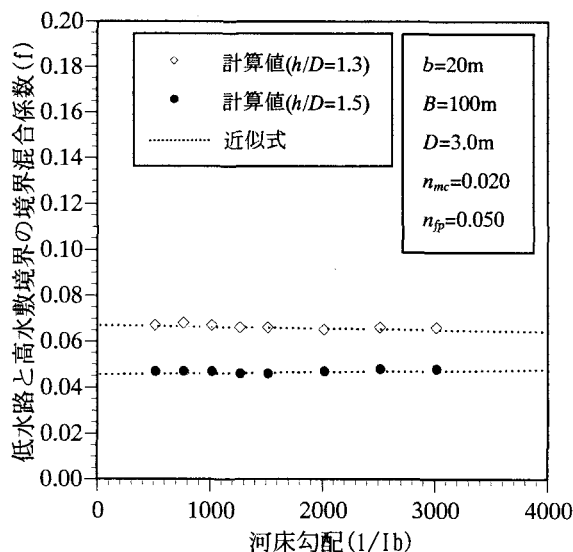


図-6 河床勾配と境界混合係数の関係

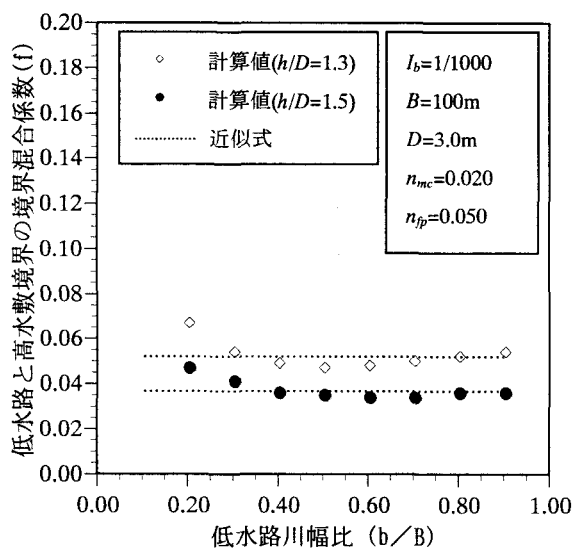


図-7 低水路川幅比と境界混合係数の関係

れた。

c) その他の河道特性要素と境界混合係数

河床勾配 (I_b)、低水路幅 (b)、川幅 (B)、低水路川幅比 (b/B)、高水敷高 (D)、高水敷粗度係数 (n_{fp}) について、その値を数段階に変更し、境界混合係数を算出した。

一例として、河床勾配、低水路川幅比と境界混合係数の関係をそれぞれ図-6、7に示す。

この結果、上記要素を変化させても境界混合係数は大きく変化しないことがわかった。

(3) 境界混合係数の算定式

(2) の検討結果から、低水路と高水敷境界の境界混合係数は低水路粗度係数と相対水深に大きく関係していることが推測される。

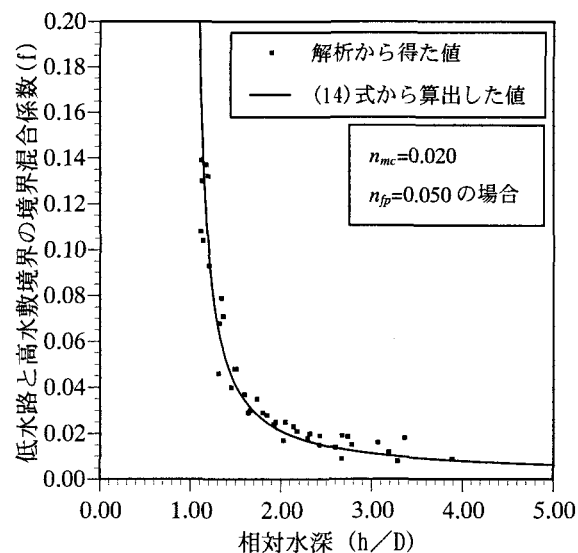


図-8a 平面二次元・準二次元解析により算出された境界混合係数と(14)式から算出した値の比較図

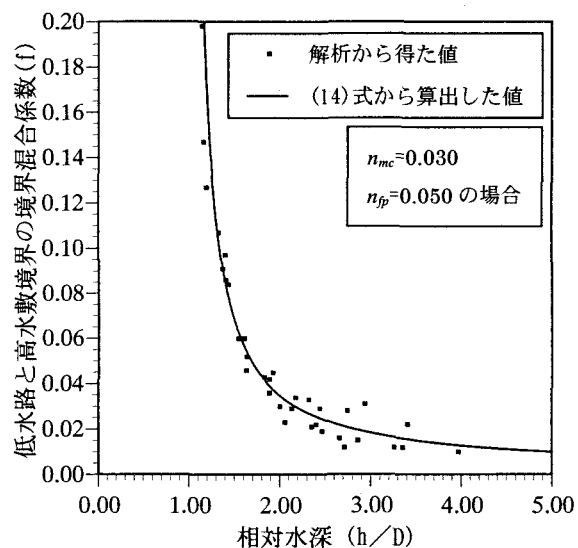


図-8b 平面二次元・準二次元解析により算出された境界混合係数と(14)式から算出した値の比較図

そこで、低水路粗度係数と相対水深をパラメータに、最小二乗法により境界混合係数を推算したところ(14)式が得られた。

$$f = \frac{c + dx}{a + bx} \quad (14)$$

$$\begin{aligned} x &= h/D - 1 & a &= 5.13 \exp(-1.58n_{mc}) \\ b &= 1.90 \exp(-18.3n_{mc}) & c &= 0.0130 \exp(34.4n_{mc}) \\ d &= 0.00187 \exp(-0.352n_{mc}) \end{aligned}$$

ここに、 f : 低水路・高水敷境界の境界混合係数とする。

また、平面二次元解析と準二次元解析の比較により算出された境界混合係数と(14)式から算出した値を比較し、図-8a, bに示す。

表-3 月寒川・嶮淵川概要

河 川 名	月寒川	嶮淵川
河 道 形 状	複断面	複断面
検 討 区 間	1.0~4.4km	3.8~6.8km
平均河床勾配 (I_b)	1/812	1/2798
川 幅 (B)	50~60m	50~60m
低水路幅 (b)	10~20m	15~20m
低水路粗度係数 (n_{mc}) ^{※1}	0.020	0.020
高水敷粗度係数 (n_{fp}) ^{※1}	0.045	0.045
樹 木 デ ー タ ^{※2}	航空写真判読	
洪水発生年月	H13.9	H13.9
ピーク流量 (Q)	63.2m ³ /s	70.8m ³ /s

※1：推定粗度、※2：樹木群位置、樹高、密生度

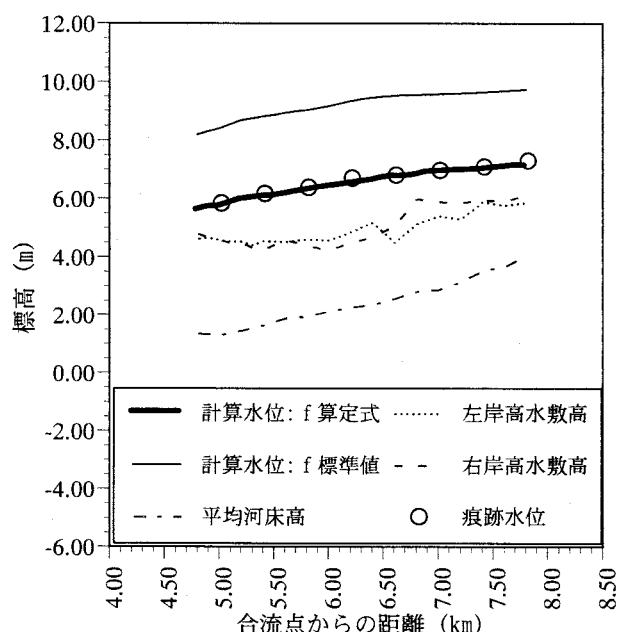


図-9 洪水痕跡水位と準二次元解析による計算水位の水位比較縦断面図(厚別川の例)

(4) 実河川実測値による検証

上述した(14)式の妥当性を検証するため、石狩川の支川である美唄川、厚別川、月寒川、嶮淵川(表-1、3参照)を対象に洪水再現計算を実施した。洪水再現計算結果の一例を図-9に示す。

それによると、(14)式から導かれた境界混合係数を用いて算出した準二次元解析による計算水位は痕跡水位をほぼ再現していることがわかる。

このことから、本研究で得られた境界混合係数の関係式である(14)式の妥当性が確認された。

4. 考察

上記検討の結果、低水路と高水敷境界の境界混合係数は、低水路粗度係数と相対水深 (h/D) との

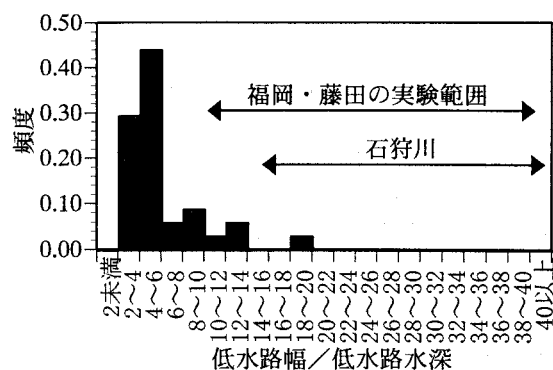


図-10 石狩川水系の主な中小河川における低水路幅・低水路水深比の頻度

間に密接な関係があることが明らかになった。

福岡・藤田の実験では、境界混合係数は低水路幅・低水路水深比が10~40程度の間において低水路・川幅比と関係があるとされているが、本研究で対象とした中小河川の低水路幅・低水路水深比はほとんどがその値より小さく(図-10参照)、上記の関係は確認できなかった。

5. おわりに

本研究において、低水路幅・低水路水深比が10程度以下の中小河川を対象に低水路・高水敷境界における境界混合係数の有効な算定手法を確立できた。これにより、本手法を用いて準二次元解析法を行うことにより、正確な流下能力評価が可能となった。

参考文献

- 1) (財)国土技術研究センター編：河道計画検討の手引き，山海堂，2002。
- 2) 福岡捷二，藤田光一：複断面河道の抵抗予測と河道計画への応用，土木学会論文集，No.411/II-12，pp63-72，1989。
- 3) Lau, Y.L., and Krishnappan, B.G., Transverse dispersion in Rectangular channels, Journal of the Hydraulics Division, ASCE, Vol.103, No. HY10, pp.1173-1189, 1977。
- 4) Webel, G and Schatzmann, M. Transverse mixing in open channel flow, Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, Vol.110, No.4, pp.423-435, 1984。
- 5) 泉典洋，松田幸子，田中仁：洪水時における高水敷上への細粒土砂堆積，水工学論文集，No.44，pp419-424，2000。
- 6) 藤田光一，福岡捷二：洪水流における水流乱流混合，土木学会論文集，No.429/II-15，pp27-36，1991。
- 7) 石垣泰輔，今本博健：可視化法による複断面開水路流れの3次元構造に関する研究，土木学会論文集，No.515/II-31，pp45-54，1995。

(2003. 4. 11受付)