

オギ原上を流れる洪水流に関する現地実験と オギ原の抵抗特性

Evaluation of flow resistance due to reeds based on field experiments

福岡捷二¹・渡邊明英²・盛谷明弘³・日比野忠史⁴・大村靖人⁵

Shoji FUKUOKA, Akihide WATANABE, Akihiro MORITANI, Tadashi HIBINO and Yasuto OHMURA

1. はじめに

オギ原は、河川の中流部の高水敷や中州に良く見られる植生であり、群生していることが多い。オギ原は、その高さが2m～3mであり、地下茎で縦横に繋がって生えており、密集した群落を形成する。そのため、平常時には鳥・小動物や昆虫等の生息空間を提供し、かつ川らしい景観を与える。一方、洪水時にはオギ原は流水に対する抵抗要素となるため、オギ原が洪水位を上昇させることも考えられる。しかし、その抵抗としての評価は洪水痕跡等から逆算された粗度係数が用いられているのみであり¹⁾、種々の洪水流の条件に対するオギ原のある流れ場の状況、倒伏限界、抵抗特性等は十分明らかにされていない。洪水時にオギ原は土砂や流下物の堆積場所、魚等の避難場所となることから、洪水時におけるオギの状態やオギ原内の流速がどのようになっているかを検討することは特に重要である。本研究は、オギ原群落の洪水時の挙動と洪水流に対する抵抗特性を調べることを目的としている。このため、広島県の芦田川の中州に自生しているオギ原群落内に大規模水路をつくり、通水試験を行い、流れ場の状況を詳細に測定し、オギ原の持つ抵抗特性とその評価方法について検討を行った。

2. 現地実験

2.1 芦田川オギ原群落の特性

オギはイネ科の大型多年草の植物であり、地下茎から生え、密集群落を形成する。芦田川中州内の実験対象区間のオギの高さは1.6m～2.4m 平均1.8mであり、平均茎径は0.7cmである。オギ群落の自生密度は、1m²当たり約70本程度であるが、オギが群生している所としていない所が混在している。そのため、実験水路区間におけるオギの平均密度は1m²当たり15～20本程度と小さい値になっている。

2.1 実験方法

実験水路は、芦田川9.5km 中州のオギ原群落内に鋼矢板を連続的に打ち込み、内側にベニヤ板を張って作られた。水路は植生密度や刈取状況が異なる3つの水路A,B,Cからなる。図-1及び写真-1に示す様に水路は長さ20m、幅1.0mである。高さは、約1.8mである。流量と下流端水位を変化させた種々の条件において実験を行った。流量は四角堰で、水位は1m間隔で、流速分布は電磁流速計により3断面で計測されている。

キーワード: 粗度係数, 洪水流, オギ原, 高水敷, 現地実験

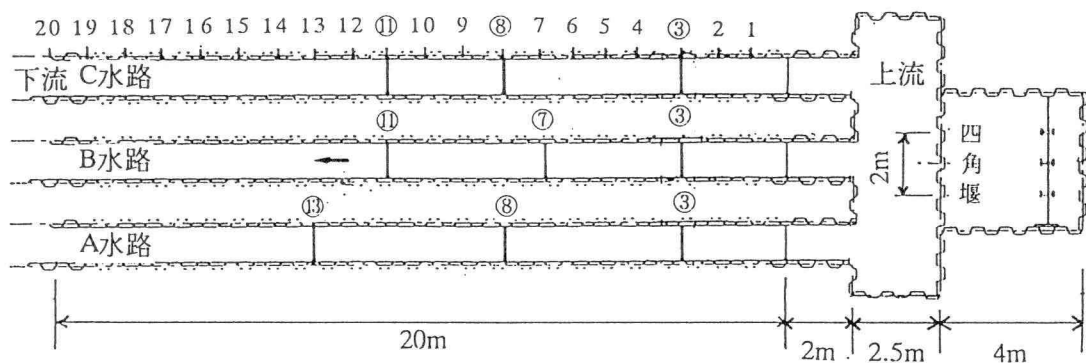
¹ 広島大学工学部教授 工学部第4類地域環境工学 (〒739 東広島市鏡山 1-4-1)

² 広島大学工学部助教授 工学部第4類地域環境工学

³ 建設省中国地方建設局河川計画課長

⁴ 運輸省港湾技術研究所環境海洋環境部評価研究室主任研究官

⁵ 東京建設コンサルタント



図中の数字は水位測定断面，○で囲んだ断面は流速測定断面を示す。

図-1 実験水路平面形状

下流端の越流堰の高さは水路 B,A,C の順で高く、それぞれの水路の堰高を固定し、表-1 に示すように流量を変化させている。水路 A 内のオギは前年のオギが枯れた状態で残されたままであり、その中に新しいオギが生育している。水路 B,C 内では芽立ち前に古いオギが刈り取られ、新しいオギのみ生えているものである。実験は平成7年7月に行われており、写真-1 に示されているようにオギは十分生育している状態であった。

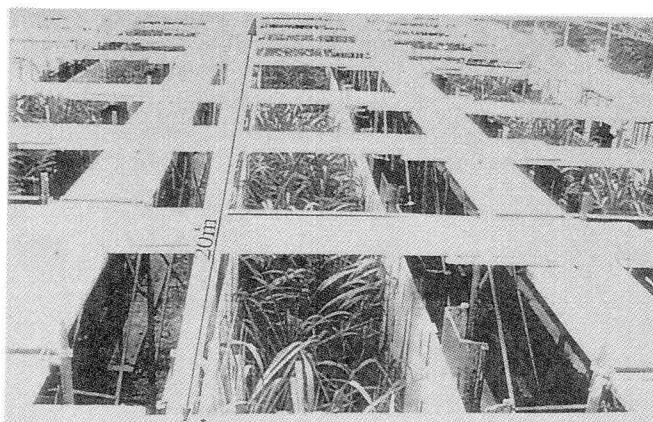


写真-1 実験水路とオギの状況

2.2 実験結果

図-2 は水路 B,C での水位の縦断変化を示している。それぞれの水面勾配は、水路 B で 1/500、水路 C で 1/80、水路 A で水面勾配は 1/110 である。これらの水面勾配は流量を変化させてもほとんど変化しなかった。

図-3 は、水路 A に流量 $0.78 \text{ m}^3/\text{s}$ を通水した場合の断面 No.13 の位置で測定した断面内における流速分布のコンター線を表わしたものである。この断面位置では左岸側にオギが密生しているために、左岸側で流速が遅くなっている。右岸側にはほとんどオギがないため、 1 m/s 以上の高流速が生じている。この時、オギは倒伏しており、上層部の高速流が生じている場所にはオギはない。オギのある領域は流速がおおよそ 60 cm/s 以下の所に当たる。

図-4 は、水路 C に流量 $0.44 \text{ m}^3/\text{s}$ を通水した場合の流速の時間変動を倒伏前と倒伏後について表わしている。倒伏前のオギ群内部の流速は、水面から 70 cm の深さの位置のものを表わしている。これより、流速は平均的に $60 \text{ cm/s} \sim 80 \text{ cm/s}$ 程度と小さくなっており、 50 cm/s 程度の大きな時間変動が生じていることがわかる。観察によれば、この時にはオギの密集している所と密集していない所でオギ自身も大きく揺動し、

表-1 実験条件

	流量(m^3/s)
水路 A	0.78, 0.44, 0.22
水路 B	0.76, 0.62, 0.38, 0.29, 0.15
水路 C	0.71, 0.44

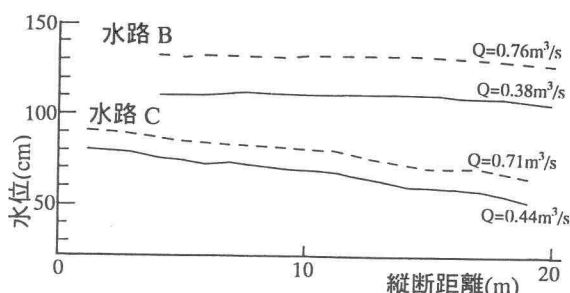


図-2 水位縦断変化

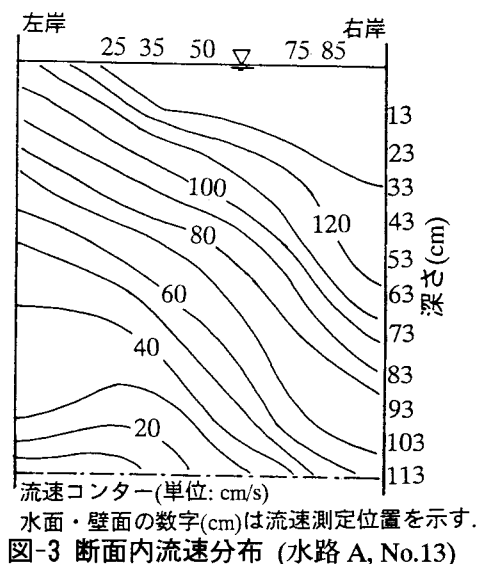


図-3 断面内流速分布 (水路 A, No.13)

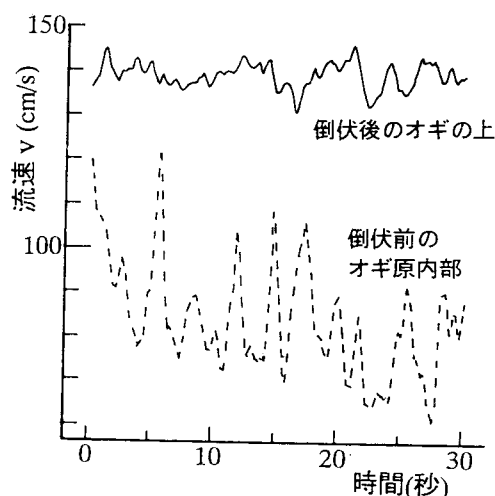


図-4 流速時間変動 (水路 C)

それに伴いオギ原の内部の流れも大きく変動するように流れていた。一方、オギが倒伏した場合の水面下 50 cm の深さの位置における流速は、倒伏前の流速と比べると、平均流速も約 140 cm/s と非常に大きくなっており、流速の時間変動の揺れ幅もまた小さくなっている。したがって、オギが倒伏する前にはオギによる流れの揺動等によって流れの混合が大規模かつ活発に行われ、オギ原は大きな流体抵抗を生じさせているが、倒伏した後では倒伏したオギ原上の流れに対して、大きな抵抗を生じさせていない結果となっている。すなわち、オギ原による流体抵抗の大きさはオギ原の倒伏状況によって大きく異なることになる。

水路 B の実験では、流量を増すとオギは水没したが、完全には倒伏していなかった。オギ原には場所によって疎密がある。流量を増加させるにつれてオギの密度が低い部分に流れが集中するようになり、その部分のオギは倒伏するようになる。このとき、オギ原はまだ全体的には倒伏しない。この状態では先に述べたようにオギが揺動し、流れはその間を縫うように蛇行する。流量がさらに増加するとやがてオギは徐々に倒伏していき、水面下に没するようになる。この傾向はいずれの水路についても同様に起こっている。

このオギ原が倒伏する限界は、流速と水深の両方に依存する。水路 C では水深が小さいために倒伏しなければオギ原は水没しないが、流速が速いためにオギ原が倒されて水没し、流れはその上を流れるようになっていた。本実験では、流量がほぼ同一であるならば、水深が大きい水路 B の場合よりも流速が速い水路 C の方が倒伏しやすかった。図-5 は、各水路における水深と断面平均流速の関係を示している。これより、流量が $0.7\text{m}^3/\text{s}$ 以上となった最大流量時に何れの水路においてもオギ原が倒伏または半倒伏状態で、水没していることが分かる。

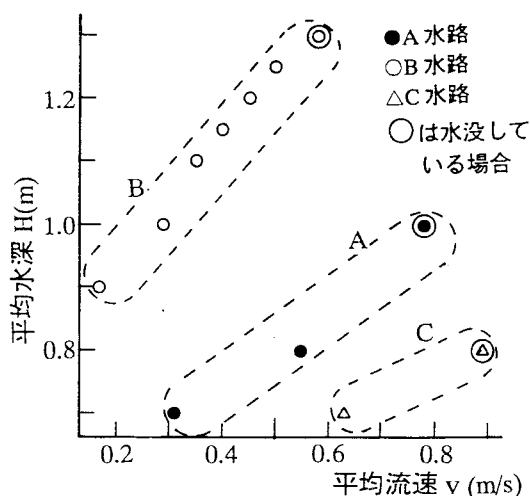


図-5 水深と流速の関係

3. オギ原の抵抗特性

オギ原が持っている抵抗を、ここでは以下に述べる 2 つの方法を用いて表わし、抵抗の評価方法について検討を行う。第一の方法は、オギ原の水中部分についても水が流れると仮定して全断面が有効通水断面であるとして等価粗度係数を用いて評価する方法である。第 2 の方法は、流水中のオギの存在状態や密集の度合

に応じて断面を分割し、各分割断面内のオギに働く抵抗と分割境界面に働くせん断力を各分割断面の平均流速差を用いて計算し、分割断面平均流速と全抵抗を求めていく方法である。後者は、著者らが樹木群のある河道の抵抗予測に用いた方法と同様である²⁾。

3.1 等価粗度係数を用いる方法

オギ原の抵抗をマンニングの抵抗式

$$n = \frac{1}{Q} A h^{2/3} I^{1/2} \quad (1)$$

に従って逆算し、これと等価な粗度係数として評価する。ここに、 n : 粗度係数, Q : 流量, A : 通水断面面積 (全断面積 = 水深 * 水路幅), h : 水深, I : 水面勾配である。

図-6 は式(1)から逆算された粗度係数と水位との関係を示している。各水路における実験結果は、流量の増加に伴って水深が増加していき、これと共に等価な粗度係数の値はいずれの場合も小さくなっていくことがわかる。この時の粗度係数の大きさは、0.06 ~ 0.12 程度の値を示している。水深の増大に伴って粗度係数が小さくなる理由は、水深の小さいときには直立しているオギ(茎と葉)は流れに対して大きな抵抗となるが、水深と流速が増大していくとオギが少しずつ下流側へ倒伏していき、流水を疎害する投影面積が減少すること、及び倒伏することによって抵抗を受け難い形態へ変化するためである。また、オギ原が倒伏した状態では、いずれの場合においても水深(0.8 m - 1.4 m)、流速(0.5 m/s - 0.9 m/s)、勾配(1/80 - 1/500)の大きさの違いに関らず、粗度係数は 0.05 ~ 0.06 のほぼ一定の値を示している。このことから、オギが倒伏し、水没した状態では、オギ原上の流れの粗度係数は 0.06 の値を用いることができると考えて良い。

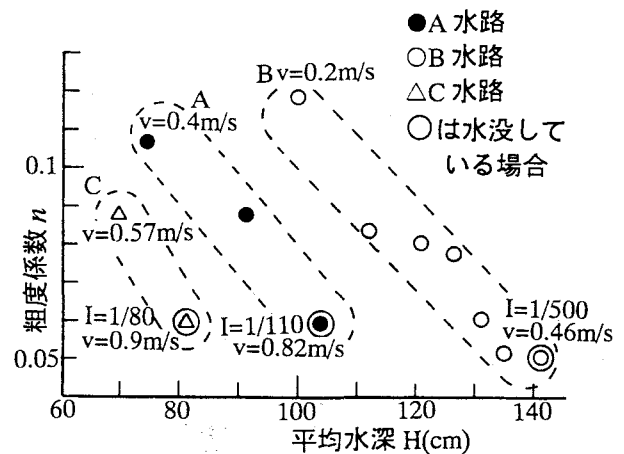


図-6 等価な粗度係数の値と水深の関係

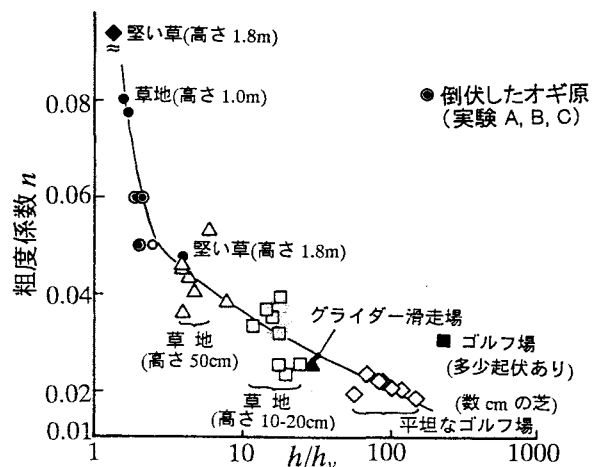


図-7 水深 h と草の高さ h_v の比と粗度係数の関係

図-7 は、洪水観測結果に基づいて得られている水深 h と草の高さ h_v の比と逆算粗度係数の関係¹⁾を表したものである。この中に本実験で得られた結果も示している。本実験の倒伏したオギ原上の流れの等価粗度係数の値は、これまで得られている粗度係数の結果とほぼ同様な傾向の値を与える。一般的には草本類上の流れの粗度係数の値は、図-7 で表わされる曲線を用いて推定されており、今回の結果から図-7 は倒伏オギの粗度係数の値も含め、草本類について利用できるものと思われる。

3.2 断面分割法

水路内のオギの状態によって断面内部が分割され、各断面についての運動量の釣り合い式を立てることににより、抵抗が計算される。断面は、図-8 に示すように、オギのない断面(断面 I)、オギの葉や茎が占めている断面(断面 II)、倒伏したオギの茎が占めている断面(断面 III)の 3 つの断面に分割される。ここでは、各分割断面の境界に働くせん断抵抗を逆算し、この分割断面法の有効性について検討することにする。

3つの分割断面の境界の位置は、通水中及び通水後の写真やビデオから倒伏高さを読み取ったり、通水後に現地で倒伏状態を調査した結果から推定した。同位置における断面内の流速分布とこのように定めた境界面の位置の関係について比較すると、境界面 I-II は流速約 60 cm/s, 境界面 II-III は流速約 20cm/s の等流速線とほぼ一致している。したがって、流速場が得られている場合においては、逆に流速の大きさがオギの位置及び倒伏高さの指標となる。

各分割断面における運動量の釣り合い関係を以下に示す式で記述する。

$$(断面 I) \quad \left(\frac{n_{w1}^2}{h_{I1}^{1/3}} S_{I1} + \frac{n_{w2}^2}{h_{I2}^{1/3}} S_{I2} \right) u_I^2 + \frac{n_{I-II}^2}{R_I^{1/3}} S_{Ib} |u_I - u_{II}| (u_I - u_{II}) = A_I I \quad (2)$$

$$(断面 II) \quad \left(\frac{n_{w1}^2}{h_{II1}^{1/3}} S_{II1} + \frac{n_{w2}^2}{h_{II2}^{1/3}} S_{II2} + \frac{C_D a_v B h_{II}}{2g} \right) u_{II}^2 - \frac{n_{I-II}^2}{R_I^{1/3}} S_{Ib} |u_I - u_{II}| (u_I - u_{II}) + \frac{n_{II-III}^2}{R_{II}^{1/3}} S_{IIb} |u_{II} - u_{III}| (u_{II} - u_{III}) = A_{II} I \quad (3)$$

$$(断面 III) \quad \left(\frac{n_{w1}^2}{h_{III1}^{1/3}} S_{III1} + \frac{n_{w2}^2}{h_{III2}^{1/3}} S_{III2} + \frac{C_D a D B h_{III}}{2g} \right) u_{III}^2 - \frac{n_{II-III}^2}{R_{II}^{1/3}} S_{IIb} |u_{II} - u_{III}| (u_{II} - u_{III}) = A_{III} I \quad (4)$$

ここに、添字 I, II, III は断面, 1, 2, 3 はそれぞれ左岸, 右岸, 底面, b は境界面, w は壁面を表わす。n は壁面及び底面の粗度係数, n_{I-II} , n_{II-III} は上式で定義されたオギ境界面に作用する抵抗を評価するための粗度係数, u: 断面平均流速, S: 潤辺長 R: 径深, B: 水路幅, C_D : オギの抗力係数, a_v : 単位幅・単位高さ当たりのオギの総投影面積, a: 単位幅当たりのオギ本数, D: 茎の直径である。式(2)~(4)は壁面及び境界面に働くせん断力とオギによる抵抗の和が重力による流下方向の力と釣り合うとしたものであり、断面を分割することによって、オギによる直接抵抗に係わるオギ内部における流速の大きさを決めることができる。

ここでは逆に、式(2)~(4)に実験から得られた断面内流速分布を与えることによって、各境界面の粗度係数 n_{I-II} , n_{II-III} を求める。両側の壁面の粗度係数を 0.015, II 断面における抗力係数を 1.5, III 断面における抗力係数を 1.2 と設定する。逆算して得られた粗度係数 n_{I-II} , n_{II-III} , n_3 の値を表-2 に示す。

水路 A, 水路 C では共にオギが完全に倒伏しており、倒伏の状況はほぼ同様であった。このため、水路 A, 水路 C における境界面 I-II, 境界面 II-III における粗度係数はそれぞれほぼ同様な値 $n_{I-II} = 0.09 - 0.13$, $n_{II-III} = 0.22 - 0.29$ となっている。水路 A と水路 C では

水理条件が異なっているにも関わらず、ここで得られた値がほぼ一致したことから、完全倒伏した場合にはこの値を用いて、流れ場と抵抗を評価して良いと考えられる。一方、水路 B ではオギは水没しても流速が小さかったために完全には倒伏しておらず、水路 A, 水路 C と違う値を示した。したがって、断面分割法についてもオギの状態や倒伏状況に対して十分考慮して用いる必要がある。

図-9 は、通水流量が少なく、オギがまだ水没していない状態における場合の分割断面と断面内における流速分布を示している。これまで述べてきたようにオギが水没していない場合、オギによる流体抵抗は大きい、オギの内部の流速も大きな流体混合によって加速されており、オギの断面を死水域とするには、断面

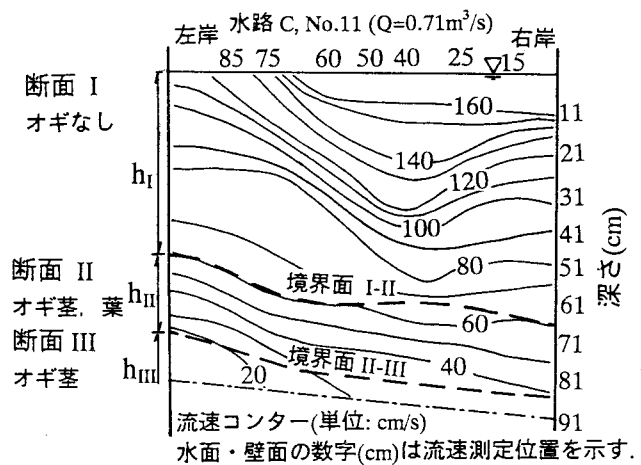


図-8 オギが水没した場合における断面分割

表-2 境界面に作用するせん断力に対する粗度係数

水路/断面	n_{I-II}	n_{II-III}	n_3
A/ No.3	0.080	0.296	0.282
A/ No.13	0.108	0.290	0.285
A/ 平均値	0.094	0.293	0.284
B/ No.3	0.025	0.104	0.138
B/ No.7	0.044	0.142	0.178
B/ 平均値	0.035	0.123	0.158
C/ No.3	0.136	0.176	0.276
C/ No.11	0.121	0.263	0.316
C/ 平均値	0.129	0.220	0.296

を無視し得ない大きさの流速を持っている。ここでも、先と同様に断面を分割し、断面分割法の適用を試みる。オギのある所とない所の水平混合については、境界混合係数として $f = 0.03^2$ の値を用い、流速差 Δu により $\tau = \rho f \Delta u^2$ で表わされるせん断応力が作用すると仮定した。各境界面に作用するせん断応力を逆算し、先に定義した境界面での粗度係数を求めると図-9中に示したような値を取った。これより、境界面の粗度係数の値は、大きくばらついていることが分かる。これは、水没していないオギの状態や揺動等に応じてオギの抵抗特性が変化したこと、オギの状態が縦断的に大きく変化しており、流れが上下流の影響を受けるために局所等流で流れ場を近似し得なかったこと、境界混合係数の値に幅を持つということ等が考えられる。オギが水没していない場合のオギ原の抵抗を断面分割法を用いて評価するためには、さらに検討が必要になる。

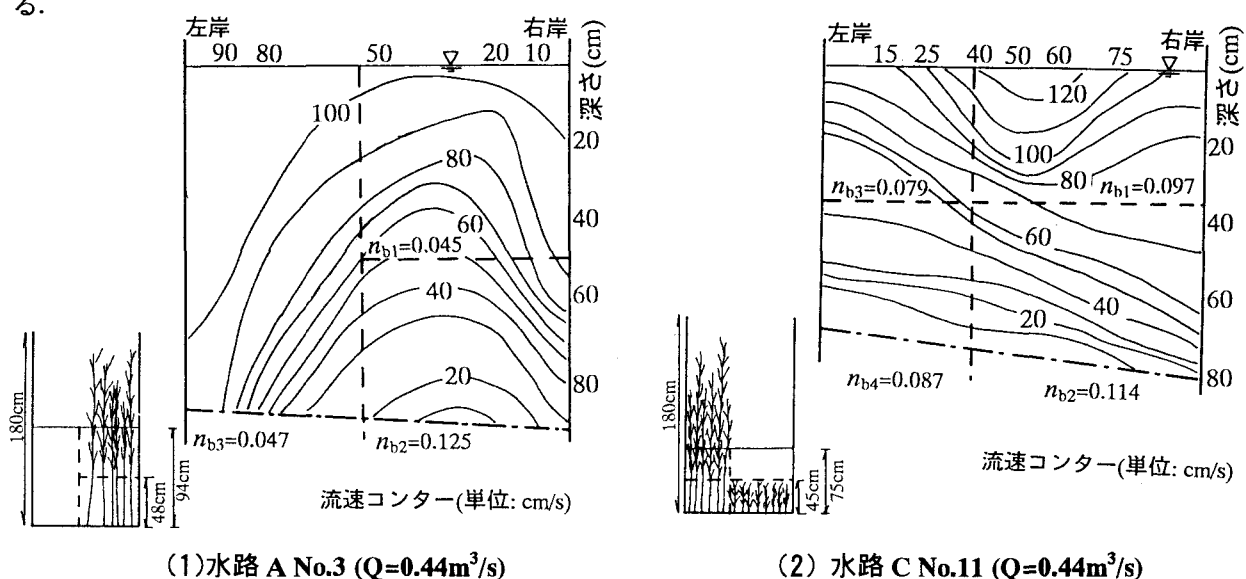


図-9 水没していないオギの場合の分割断面と流速分布

4. おわりに

以上のことから、オギ原内及びオギ原上の流れの抵抗特性は、オギの倒伏状態によって大きく変化することが分かった。そのため、オギが未倒伏の場合や非水没の場合の流体抵抗を一般的な形で表わすことは難しい。しかしながら、水位が高くなり流体抵抗が問題となるような大洪水の時には、流速と水深が大きくなる。このときには、本実験から明らかのようにオギは倒伏するものと考えてよく、粗度係数 $n = 0.06$ を用いて、オギ原上の流れと抵抗を評価しても問題がないと考えられる。計算法に改良を要するが、断面分割法を用いれば、オギ内部の流速を求めることができる事を示した。本実験によれば、オギ内部の流速は、種々の水理条件下においてもオギの上層部では $60 \sim 80 \text{ cm/s}$ 以下、底面に近い下層でも $20 \sim 40 \text{ cm/s}$ 以下の値となっていた。これらはオギ原のある河道の流速に関する指標の一つとなり得るもので、オギ原を治水と環境の両観点から管理する上で有益な情報となる。

謝辞: 本文は建設省中国地方建設局福山工事事務所と協同で行われた実験結果を取りまとめたものであり、本実験の準備・実施に当たり御尽力下さった福山工事事務所の方々に感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 建設省河川局治水課・土木研究所:河道特性に関する研究-洪水流の挙動と河道特性-, 第42回建設省技術研究会河川部門指定課題論文集, 1989.
- 2) 福岡捷二・藤田光一・新井田浩:樹木群を有する河道の洪水水位予測, 土木学会論文集 No.447/II-19, pp.17-24, 1992.
- 3) 大村靖人・福岡捷二・山本広・日比野忠史:オギ原上を流れる洪水流の粗度係数, 第51回土木学会年次学術講演会講演概要集第2部 pp.732-733, 1996.