

# 水草が繁茂している用水路の流れ

An Open-channel Flow With Water Plants

福岡捷二\*・渡辺明英\*\*・津森貴行\*\*\*

By Shoji FUKUOKA, Akihide WATANABE and Takayuki TSUMORI

While the water plants in small rivers through city play an important roll on the environment of rivers and have a function to purify the water quality, the water plants increase the roughness of a water channel. In Nikaryo channel passing through Kawasaki city, we surveyed the distribution of water plants and measured the velocity profiles at cross-section with water plants. It was revealed that the states of water plants varies with the passage of time and the area occupied by water plants becomes the dead water zone. And it was showed that the longitudinal water level distribution could be evaluated, applying the sheer stress model using the boundary mixing coefficient to the flow in the open channel with the water plants, and Manning's roughness coefficient  $N$  of the flow with water plants is about 0.08.

Keywords: water plants, dead water zone, roughness of channel, boundary mixing coefficient, conveyance capability.

## 1. はじめに

中小河川、農業用水路等のうち通常流れが比較的緩やかな場所には、さまざまな水生植物が繁茂している。これらの水生植物は、夏から秋にかけて十分な日射と栄養分の供給を受け急激に繁茂することが多い。こうした状況ではこれらの水草の存在が流水の疎通能を小さくする。一方で、水草のあるところには、水生動物が生息し、ひとつの生態系を形成している。また、水と緑にあふれた貴重な親水スペースとして市民の憩いの場を提供している。これまでの水草の水理に関する研究は、主に水草による流速場の変化、混合の機構について実験水路で検討しているものが多い<sup>(1)(2)</sup>。

本研究は、現地農業用水路において水生植物の生育

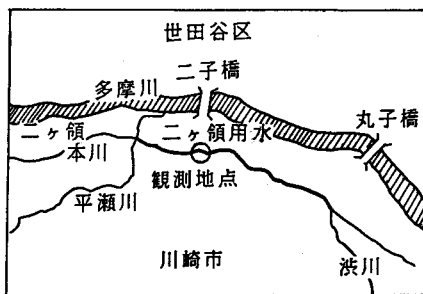


図-1 調査地点周辺図

- |     |   |               |
|-----|---|---------------|
| *   | 正会員 Ph. D、工博 東京工業大学助教授<br>(〒152 東京都目黒区大岡山 2-12-1) | 工学部土木工学科      |
| **  | 正会員 工修 東京工業大学助手                                   | 工学部土木工学科 (同上) |
| *** | 学生会員 東京工業大学大学院修士課程                                | 土木工学専攻 (同上)   |

特性を把握し、水理学的観点から水草の影響を理解するため調査を行い、水草の繁茂形態、流れに及ぼす抵抗、通水能を評価する。さらに用水路における水草の環境面の役割を考察することを目的としている。

## 2. 水草の繁茂状況と流況について

図-1 に示す神奈川県川崎市を流れる二ヶ領用水の、二子南橋付近で現地調査を行った。二ヶ領用水は図-1 に示すように中心市街地を流れる用水である。調査は1992年9月と11月の2回、水草の繁茂状態と流れの状況について行った。用水路内に繁茂している支配的な水草は、コカナダモ（とちかがみ科）とヤナギモ（ひるむしろ科）の2種類である。これらは、日本各地に分布し、主として小さい川や水路内に多く見られ、水質汚濁に強い沈水性の多年生草本である。コカナダモ（図-2）は、密生して水底の泥中にひげ根をはやし、長さは約30～60cm、細長い円柱形で多くの節があり多少分岐する。葉は数片が輪生し、線形で先は尖り柄がない。なおコカナダモは冬になっても枯れることなく越冬する。ヤナギモ（図-3）は、細長い茎を持ち、まばらに分岐する。葉は無柄で互生し細長く尖った先端部分を持つ。現地水路の河床は直径20cm程度の玉石が敷き詰められており、これらの玉石を薄く覆うように5cm程度の泥が堆積している。いずれの水草もこの泥中に根をはやしている。

### 2.1 平成4年9月の調査結果

写真-1 は水草の繁茂の様子である。ヤナギモが用水路内の中央付近を中心に繁殖しているのがわかる。ヤナギモ一株の全長はほぼ1.8mで、下流になびき、ヤナギモの終端の真下付近から新しいヤナギモがはえてきている。そしてヤナギモの終端は水面にまで達している（図-4）。コカナダモは高さ約20cmで水路中央付近に群生し、流下方向に帯状に連なっている。ヤナギモがコカナダモを覆い隠すように繁茂しているため、上からコカナダモの全体像を見ることはできない。

図-5 は断面1（位置は図-6 参照）での主流速のコンターである。流速は2成分電磁流速計を用いて測定した。コンターは3cm/sピッチで描いている。水草の分布もあわせて示してある。この図よりコカナダモの



図-2 コカナダモ



図-3 ヤナギモ

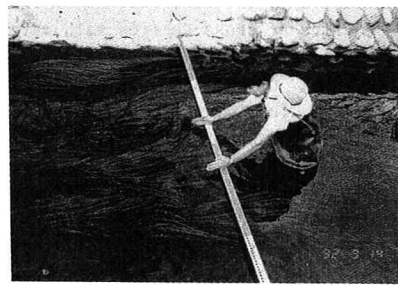


写真-1 水草の繁茂状況（9月）

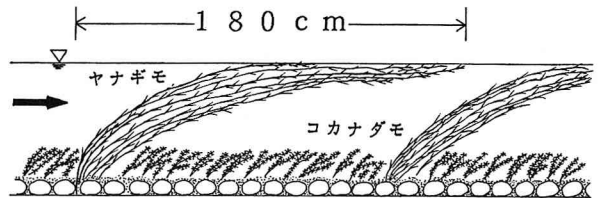


図-4 水草の繁茂形態（9月）

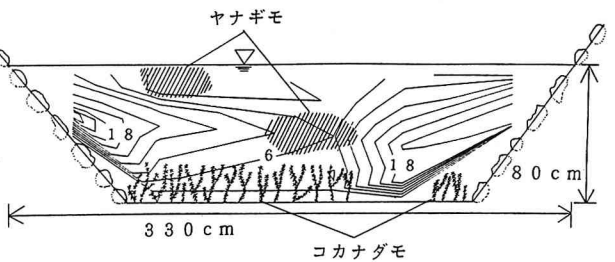


図-5 流速コンター（断面1）

ある領域では流速がほぼゼロになり、死水域とみなすことができる。ヤナギモのある領域でも流速は減少しているが、コカナダモの領域ほど極端には落ちてはいない。これは、コカナダモは河床に根をはやしており、かつ密度が高いが、ヤナギモのほうは全体として単体的で非常に細長く密度が低いためである。水面にまで浮遊するヤナギモは鉛直方向よりも水平方向に末広りの特徴をもっている。このため、ヤナギモのあるところとないところの流速は異なり、ヤナギモは水平方向の流速分布に影響を与える。一方、コカナダモは主に鉛直方向の分布に影響を与えていることがわかる。また、ヤナギモとヤナギモの間からはところどころ水の湧き上がりがみられ、そこでは水面が盛り上がり、ヤナギモが左右に揺動する。河道中央に水没植生を有する流れ場では、規則的な水面変動が生じることが明らかにされている<sup>(3)(4)(5)</sup>。しかし、水草のある流れ場は全体的に横断的な流速差が小さいためにこのような水面変動はほとんど認められない。

## 2.2 平成4年11月の調査結果

11月は9月よりさらに詳細な調査を行った。水草の平面分布を図-6に示す。コカナダモは9月同様、水路中央に1m強の幅で帯状に密生している。高さは9月よりも伸びて約30cmほどあり、コカナダモの総量は増加している。ヤナギモは9月に比較して著しく減少しており、帯状のコカナダモの端部、または中央付近にまばらに生えている。ヤナギモの全長は9月同様ほぼ1.8mであるが、終端が水面まで達しているものはなく、すべて水中に没していた。これは太陽エネルギーの水中への入射が弱くなったためヤナギモが少なくなったことと、ヤナギモが少なくなったためにヤナギモに作用する流速が大きくなったことの相乗作用でヤナギモが減少したものと思われる。二子南橋をはさんで約140mにわたり横断面内の水草占有率を調査した結果、いずれの断面においても水草が水路断面積の3割から4割を占めていることがわかった。

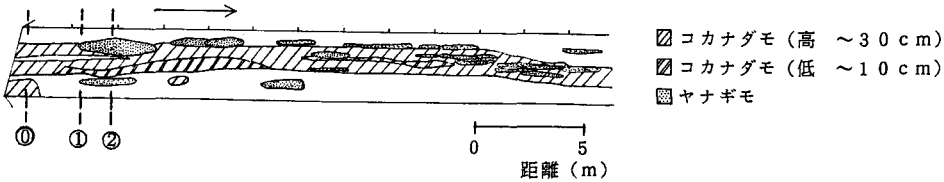


図-6 水草の平面分布(11月)

図-7は断面0(位置は図-6参照)での流速コンターである。コンターの間隔は3cm/sピッチである。図-8は断面0における流速の鉛直分布である。この図からも、コカナダモの繁茂している領域がほとんど死水域であることがよくわかる。そしてコカナダモの上面では流速勾配が急になっている。

ヤナギモのあるところでは流速の減少は明確にはみられない。これは測定断面にあるヤナギモが単体であり、9月の場合ほど前後左右に密生していないためである。また、9月同様、認め得るほどの水面変動はない。

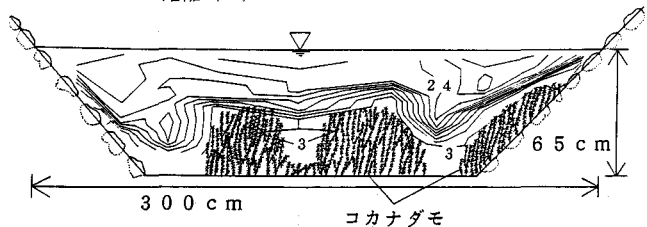


図-7 流速コンター(断面0)

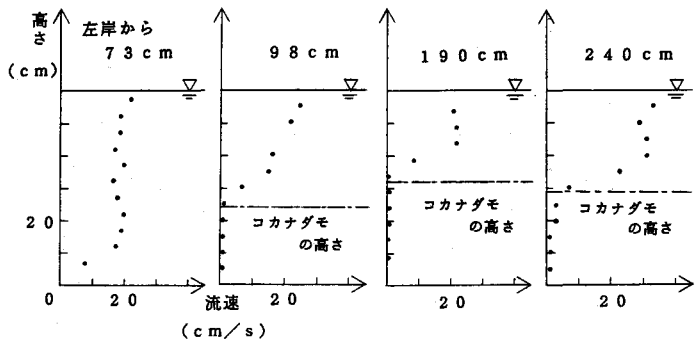


図-8 流速の鉛直分布(断面0)

### 3. 水草のある流れの水利

#### 3.1 水草のある流れの合成粗度係数

抵抗特性を表す指標として合成粗度係数を求める。実測した水利諸量を表-1に示す。流量は断面0で実測した流速分布を積分して求めた。合成粗度係数Nは式(1)で表される。

	流量 (l/s)	水路床勾配	エネルギー勾配
9月	252	1/2000	1/1240
11月	193	1/2000	1/870

表-1 水利諸量

$$N = (A/Q) R^{2/3} I_e^{1/2} \dots\dots (1)$$

(Q:流量, A:河積, R:径深, I<sub>e</sub>:エネルギー勾配)

2. で示したようにコカナダモの領域を死水域としてこれを流路断面から除外し、これを河積としてNを求めると9月、11月ともにN=0.077となる。一方、水草の領域を死水域としないでNを計算すると9月、11月ともN=0.15となる。後者の場合は過大なNを見積ることになり物理的に意味のある正しい合成粗度係数を与えていない。

#### 3.2 境界混合係数fと水路床粗度係数n<sub>o</sub>の評価

ここでは、主流とコカナダモの上面の間の混合について考察する。11月測定断面0、1、2について、コカナダモの繁茂領域を図-9のように矩形化し、横断面を4つの領域に分割する。コカナダモ上の水深は約30cmで、コカナダモの高さとコカナダモ上の水深の比はほぼ1.0である。流れを等流と見なしこれらの各分割断面の境界に作用するせん断力を考慮し、①②③断面で運動方程式(2)、(3)をたてる。ここでせん断力は、式(4)、(5)で表現する<sup>(6)(7)</sup>。

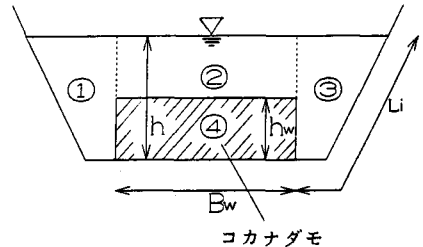


図-9 断面分割図(4領域)

$$\rho g A_i I_e = \frac{\rho g n_o^2 u_i^2 L_i}{R_i^{1/3}} - \tau_1 (h - h_w) + \tau_3 h_w \dots\dots (2) \quad (\text{①, ③領域})$$

$$\rho g A_i I_e = \Sigma \tau_1 (h - h_w) + \tau_2 B_w \dots\dots (3) \quad (\text{②領域})$$

$$\tau_1 = \rho f_1 (\Delta u)^2 \dots\dots (4) \quad (j=1: \text{主流境界})$$

$$\tau_j = \rho f_j u_i^2 \dots\dots (5) \quad (j=2: \text{水草群上面}, j=3: \text{水草群側面})$$

(g:重力加速度, I<sub>e</sub>:エネルギー勾配, u<sub>i</sub>:流下方向流速, L<sub>i</sub>:壁面の潤辺長, B<sub>w</sub>:水草幅, f<sub>j</sub>:境界混合係数, h:水深, R<sub>i</sub>:径深, h<sub>w</sub>:水草高さ, 添字i:分割断面番号, 添字j:分割断面境界の分類)

ここで、Δuは各分割断面の平均流速の差である。境界混合

係数f<sub>j</sub>の値については、福岡、藤田らにより検討されており<sup>(3)(4)(5)(6)(7)</sup>、本研究ではこの検討結果を用いる。水草群上②と主流①③との境界にはf<sub>1</sub>=0.17、水草群④と主流①③との境界にはf<sub>3</sub>=0.10を与え、水草群上②と水草群④との境界の境界混合係数f<sub>2</sub>を求める。各領域の平均流速には実測値

断面	f <sub>2</sub>	換算した水草上面のn
0	0.097	0.083
1	0.082	0.083
2	0.124	0.083

表-2 境界混合係数と粗度係数

を用いている。水草群中は前述のとおり死水域とした。式(3)から計算したf<sub>2</sub>の結果を表-2に示す。この場合には、f<sub>2</sub>はf<sub>3</sub>と同程度の値となり、水草と主流との間のf<sub>2</sub>、f<sub>3</sub>が約0.1であることがわかる。またこのf<sub>2</sub>を用いて水草(コカナダモ)上面の粗度係数を換算すると平均して0.083となる。この値は、一般に水

没している植生群上の粗度係数値にはほぼ対応する値であると解釈される。次に、式(2)を解いて河岸に埋め込まれ高さ6cmほど突出している玉石の粗度係数 $n_0$ を逆算する。その値は、0.06~0.07となった。側岸部では水深が高々30~40cmだったことからほぼ妥当な値と思われる。これらの結果を用いて、次節で水草の繁茂している用水路の縦断水位の計算を行う。

### 3.3 水草のある流れの縦断水面形の計算

樹木群の繁茂した河道の水位予測手法は、福岡、藤田らにより検討され、樹木群の繁茂状況に応じた縦断水位の計算手法が確立されてきた<sup>(3)</sup>(6)(7)。ここではそれらの計算手法を用い、水草のある用水路流れに適用する。

水草を有する河道断面において、水草の繁茂状況に従い図-10のように矩形近似し断面分割を行う。3.2同様、それぞれの分割面の境界及び水草境界に作用するせん断力を考慮して、以下のような運動方程式(6)と連続式(7)を立てる。式(8)は運動方程式の差分式である。なお、添字 $i$ は分割断面の番号、 $j$ は分割断面の境界の番号を表す。

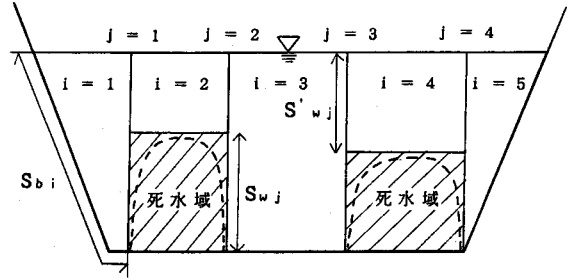


図-10 計算で用いた矩形近似した横断面

運動方程式(6)と連続式(7)を立てる。式(8)は運動方程式の差分式である。なお、添字 $i$ は分割断面の番号、 $j$ は分割断面の境界の番号を表す。

$$\frac{n_i^2 u_i^2 S_{bi}}{R_i^{1/3}} + \frac{\Sigma (\tau_j' S'_{wj})}{\rho g} + \frac{\Sigma (\tau_j S_{wj})}{\rho g} = A_i I_0 \dots \dots (6)$$

$$Q = \Sigma (A_i u_i) \dots \dots (7)$$

$$\left( H + \frac{1}{A} \Sigma \frac{u_i^2 A_i}{2g} \right)_2 - \left( H + \frac{1}{A} \Sigma \frac{u_i^2 A_i}{2g} \right)_1 = \frac{1}{2} \left\{ \left( \frac{1}{A} \Sigma \frac{n_i^2 u_i^2 S_{bi}}{R_i^{1/3}} \right)_1 + \left( \frac{1}{A} \Sigma \frac{n_i^2 u_i^2 S_{bi}}{R_i^{1/3}} \right)_2 + \left( \frac{\Sigma \tau_j S_{wj}}{\rho g A} \right)_1 + \left( \frac{\Sigma \tau_j S_{wj}}{\rho g A} \right)_2 \right\} \Delta X \dots \dots (8)$$

ここで、 $u_i$ は断面平均流速、 $R_i$ 、 $A_i$ は各分割断面の径深、断面積、 $n_i$ は壁面の粗度係数、 $S_{bi}$ は壁面せん断力が働く潤辺長、 $\tau_j$ 、 $\tau_j'$ は水草群境界、分割断面境界に作用するせん断力、 $S_{wj}$ 、 $S'_{wj}$ は $\tau_j$ 、 $\tau_j'$ が働く潤辺長、 $I_0$ はエネルギー勾配、 $H$ は水位で $H = z + h$  ( $z$ は河床位置、 $h$ は水深)、 $A$ は $\Sigma A_i$ を示す。

せん断力 $\tau$ 、 $\tau'$ は次のように表現される。

$$\tau = \rho f u^2 \dots \dots (9)$$

$$\tau' = \rho f (\Delta u)^2 \dots \dots (10)$$

計算は橋の上流に対し行い、ここで用いた境界混合係数 $f$ の値は、水草と主流間は0.1、それ以外は0.17である。

図-11に計算水位と実測水位を示す。計算水位は実測水位をよく表している。この結果、コカナダモのような水没した水草に対し、樹木群と同様の扱いが可能であることがわかる。

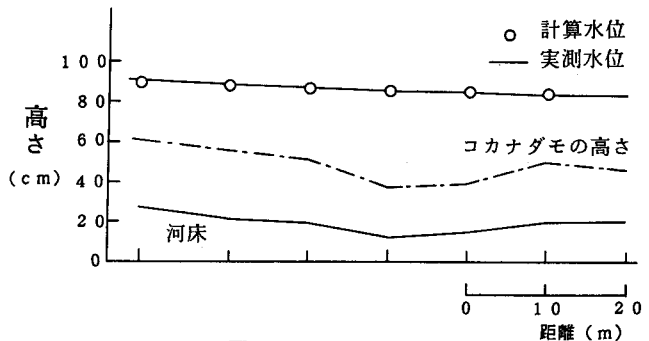


図-11 縦断水位の計算結果

#### 4. 今後の課題—環境機能

今回調査を行った都市内における用水路では年間を通じてほぼ一定の水量を確保している。豊富な水量と緩やかな水の流れは人々にうるおいと安らぎを与えてくれる。そしてこのような流れにおける水生植物の存在は心理的にさらなる良い効果をもたらしてくれる。例えば、流れの中でゆらゆらと揺らぐ水草を眺めていると、心が洗われ安定した心理状態になるのは日頃よく経験するところであろう。また、精神的な清涼感を与えてくれる。さらには、流れが水質的に清らかで透視度が高ければ、視覚的に水草を際立たせ、人々の心の中の自然との感覚的な隔たりをなくしてくれる。このように環境面からみて水草の存在そのものが意義をもっている。しかし、このような良さは別に水草のもつ環境的な機能を明確するには、いくつかの環境指標と水草の関係を知る必要がある。例えば、水質の指標であるBODやDO、そして水温、透視度、臭気といったものと水草の繁茂状況の関連についてはまだはっきりとはつかめていない。さらには、日照時間、日射条件と成長スピードとの相関についても正確なことはわからない。よってこれらの不明な点については今後長期的に調査を行い詳しく検討する必要がある。

#### 5. 結論

本研究での主要な結論を述べる。

- ①現地河川において主要な水草であるコカナダモとヤナギモの繁茂形態を明らかにし、流れに与える影響を把握することができた。
- ②水草が繁茂している河道に対して、水草境界面の境界混合係数、粗度係数を明らかにし、樹木群が繁茂している河道と同様の計算手法が適用可能であることを示した。
- ③水草のもつ環境機能を評価する上で、総合的な生育環境の調査の必要性を示した。

最後に、本研究を進めるにあたり、貴重な資料を提供していただいた川崎市土木局治水課に謝意を表します。

#### 参考文献

- (1) 日野幹雄・歌原英明：水草のある流れの水理学的研究、土木学会論文報告集、第266号、pp. 87～94、1977.
- (2) 室田 明・福原輝幸：水生植物を有する開水路流れの乱流構造に関する実験的研究、土木学会論文報告集、第338号、pp. 97～103、1983.
- (3) 福岡捷二・藤田光一：洪水流に及ぼす河道内樹木群の水理的影響、土木研究所報告第180号、1990.
- (4) 藤田光一・福岡捷二：洪水流における水平乱流混合、土木学会論文集、No. 429/II-15、pp. 27-36、1991.
- (5) 津森貴行・福岡捷二・新井田 浩：水没植生による流れの水平混合と抵抗の評価、土木学会第47回年次学術講演会概要集第2部、pp. 296～297、1992.
- (6) 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、土木学会論文集第411号/II-12、pp. 63～72、1989.
- (7) 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.