

細長い水生植物による流れと乱れに及ぼす影響について Effects of aquatic weeds with long leaves on flow and turbulence in open channels

新潟大学工学部 正員 ○大川 秀雄
同 正員 大熊 孝

1. まえがき

都市内の中小河川や農業用水路などで、流れにゆらゆらと水草が漂う情景を見ることがよくある。あまりに汚染された河川では、魚が住めぬと同様に水草も生えない。また逆に、あまりに清浄ならば、諺にもあるように、住まないし生えない。生活污水などの流入による汚れが水草の繁茂に大きく作用していることは良く知られているし、また、河川の自浄作用に水草が一役買っていることも事実である。いかなるメカニズムによってその役割を担っているかはともかくとしても、水草の存在によって流れは少なからぬ影響を受けていると考えられる。なお、ここでいう水草は、葦などのような直立するものを指すのではなく、いわゆる藻と呼ばれている、流れに対して水平に位置するようなものを指す。

日野らの研究によれば、^{1), 2)}水草の存在によって流速分布が一様化され、また、流れに対しては抵抗として作用するために平均流速は減少する。さらに、葉の乱舞による乱れの助長と、流れに直角方向の大きな渦運動の抑制による乱れの低下の相反する作用があることを指摘している。それらは、実験室内でのビニールによる模擬水草を使った測定によるものであるので、実河川での測定を試み、比較検討を加えることを目的として行われたものである。

2. 測定河川について

当初、長岡市内を流れる福島江（人工の農業用水路で、幅約11m、水深約1.3m、平均流速1.1～1.2m/s、信濃川より取水されている）で測定する予定で、水草のまだ生えない春から流速分布等を測定して水草の生えるのを待っていたが、前年までとは打って変わってほとんど生えず、ここでの測定を断念した。生態系では、ちょっとした何かの原因で大きく変化することがあると言われている。まさにこのような実例に接して、驚くと同時に環境問題の重要さの一端を見た思いがした。

それはさておき、こんなわけで急ぎょ、新潟県水原町の大通川（白鳥飛来地で知られている瓢湖の横を流れ、湖はこれから取水しているが、幅2m弱のありふれた小川）で測定をした。流量を求めた代表断面（断面Aとする）の形状と流速分布を図-1に示す。水路の側壁は骨材が露出したコンクリートで、底は砂利と細かい砂である。この断面Aの上下流とも50m以上に渡って直線である。断面Aの約1.8m上流より上方約10mの区間は、右側に細かい砂の堆積があって少し浅くなっている、その影響で流心が左の側壁より30cmのところにある。この区間では、断面Aとほぼ同じ位置に流心がある。水草の分布状態は図-2のようである。

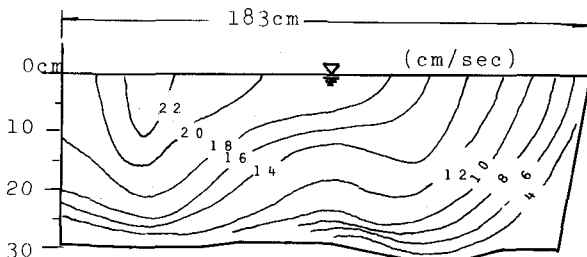


図-1 横断面流速分布（断面A）

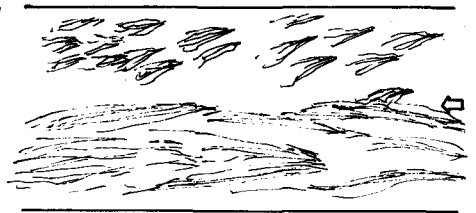


図-2 水草の分布状態

あり、平面的に見て、水路内の面積の%程度が水草に覆われていた。このときの水面勾配は 0.000557 であり、流量は普通 200ℓ/s 程度であるが、このときは約 1/3 の 67.2 ℓ/s であった。

断面 A の上流 1.5 m の断面 B との間は橋に覆われていて、底は小砂利で水草はない。断面 B より上流は底が細かな砂で、小砂利が露出しているところは少なく、水草が生えている。この断面 A と B のそれぞれで、左側壁より 30 cm の流心の位置で、水深方向に 5 cm 間隔で流速の連続記録を取った。流速は直径 20 mm のプロペラ式の流速計で、2 sec 毎の表示を 5 分以上連続して記録した。図-3 は、その読み N をそのままグラフで示した例である。流速 V は

$$V = 1.23N + 1.7 \quad (\text{cm/sec})$$

である。断面 B での測定に際し、水草の先端が測定位置に漂うため、B 断面の 5 cm 上流で切り揃えた。また、水草の有無による差異を明らかにするために、B 断面の上流 10 m 以上に渡って水草を取り除いて、同様の測定を B 断面の同じ位置で行なった。

3. 測定結果

断面 A と、断面 B での水草のある場合（断面 B1 とする）、ない場合（断面 B2）の流心での流速分布を図-4 に示す。断面 B1 では明らかに水草の影響を受けていることがわかる。この B1 断面での水草は、底より 3 cm と底より約 20 cm との間にあって、水面直下の約 10 cm の間には存在しない。しかし、水草のある約 17 cm の区間内での葉の密度分布については、一様なのかそうでないのかは判断できなかった。それで、便宜上一様分布として、この区間内の葉密度 $b\varphi$ を、後述するような方法で 0.166 と定め、 $C_F = 8.04 \times 10^{-3}$ として、 $C_F b\varphi = 1.33 \times 10^{-3}$ を用いて、流速分布とせん断応力分布を理論計算した結果を図-5 に示す。ただし、このとき的水草の葉密度 b 、 φ は小さいと見なして、混合距離 ℓ は底からの距離に比例して

$$\ell = \kappa Z$$

とした。図-5 で見える限り良い一致とは言えない。この理由として考えられるのは、混合距離 ℓ を上述のごとくおいたためと思われる。むしろ、水草の中では ℓ はほぼ一定で、その上方の水草のない領域では、水草の上端を仮の底と考えればよいのではないかと考えられる。それにしても、 ℓ の値をどのようにとればよいかについては問題のあるところである。

次に、B1 と B2 断面での流速分布の違いに注目してみる。この場合、水位の変化はほとんどなかったにもかかわらず、平均流速で見積っても、B2 は B1 より 30 % 以上も大きくなっている。この大きな違いは

① 水草は流速の大きな位置で葉の密度も大きかった。

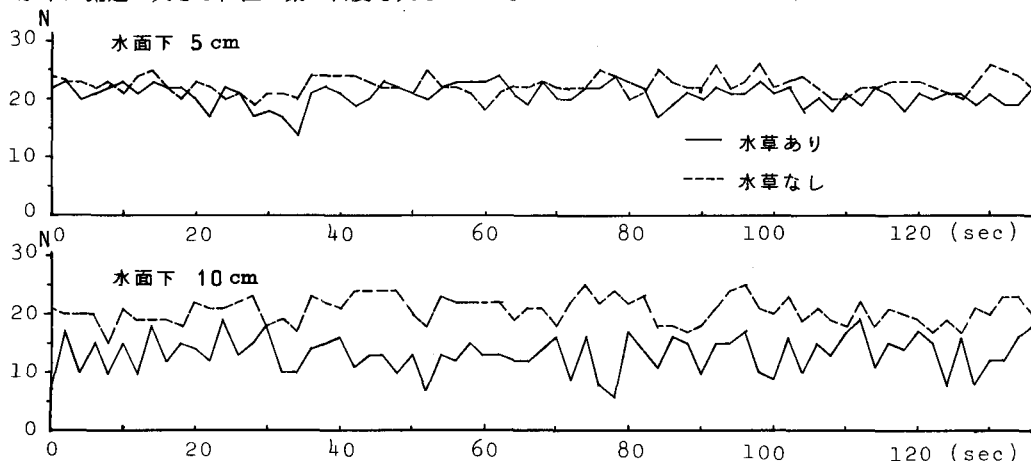


図-3 流速の連続記録

② 水草は葉密度が一樣ならば、水深方向に流速を一樣化すると同時に、横断方向の流速も一樣にする。の二つの理由によると考えられる。①は後述するとして、②であるが、実河川では実験室内の水路と違って、底面の凹凸や障害物などによって、A断面の流速分布（図-1）のように、流速分布に偏りが生ずる。この場合は、上流側の右側が浅いためであるが、そこに水草が生えると、その偏りをおさえて流速分布を一樣化するように作用していると解釈される。

次に、前述のごとく測定された連続記録より、乱れの $r.m.s.$ の分布（変動係数の分布）を求め、図-6に示した。B1断面（水草がある場合）とB2断面（水草がない場合）を比較すると、B1がほぼ2倍の大きさを示している。それも、水草のない水面近くよりは、水草のある水面下10 cmより深い位置で著しい差をみせ、水草の乱舞が乱れを助長していることを示している。しかし、乱れの自己相関係数を調べてみたが、B1とB2とに顕著な差は見い出せなかった（図-7）。

また、最大エントロピー法（MEM）⁴⁾によってスペクトルを求めた（図-8）。しかし、測定値が2 sec毎で非常に粗いためと、測定値そのものが2 sec毎の瞬間値ではなく、各2 sec間毎の平均値であるために、分解能・安定性が悪いと思われる。そんなわけで、約0.2 Hz以下の低周波数領域でしかスペクトルが得られていない。ともあれ、B1断面とB2断面でのスペクトルを比較すると、B1（水草がある）の方が全体に大きい。そして、測定点が水草の存在する範囲内である、 $z/h = 0.67, 0.5, 0.33$ についてのものは $f = 0.1$ 付近より増加しはじめていて、図にはもはやない範囲ではあるが、0.2~0.3付近でピークを持ちそうである。この点を明確にするために、時間間隔の密な測定値がほしいところである。

4. 水草について

今までの議論で前提としてきた水草植物は、沈水性植物と呼ばれているものであり、“も”と名のつくことが多く、その種類は数多い。今回の測定水路では、“いとやなぎも”と“せきしょうも”の二種がほとんどで、他の一種がわずかにあった。前述の福島江で生えていた“ふさも”とともに、図-9にそのスケッチを示す。

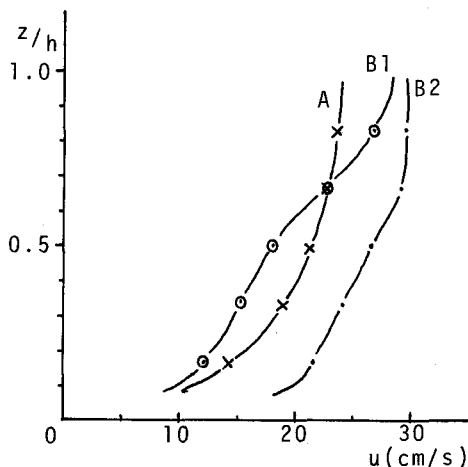


図-4 流心での流速分布

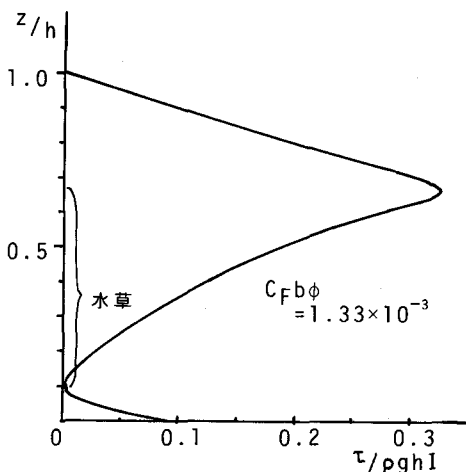
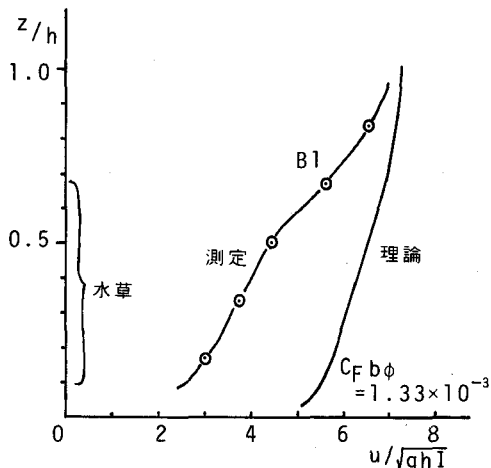


図-5 理論計算による流速分布とせん断応力分布（断面B1）

いとやなぎもは、直径約 0.5 mm の円断面の茎に葉が互生する。葉は幅 $1 \sim 1.3\text{ mm}$ 、長さ $5 \sim 8\text{ cm}$ 、平行脈で、節の間隔は $2 \sim 5\text{ cm}$ である。全長は 1.5 m 以上のものもある。生えているときの密度は、おおむね上から見て、水路幅 20 cm 当り、茎の本数が 100 本である。茎 1 本当り、その断面で葉が $2 \sim 6$ 枚、平均で 4 枚程度であるので、水路幅 20 cm 当り葉が約 400 枚である。せきしょうもは、単純な形状で茎がなく、葉は約 5 mm 幅、長さ 50 cm ほどで平行脈である。葉の密度は、水路幅 30 cm 当り約 25 枚である。

水路面積の約 $\frac{1}{2}$ に、上記の水草 2 種とわずかにあった他の 1 種の合計 3 種が生育していた。いとやなぎもの占める面積が、そのうちの 70% を占めると思われる。水草の生育しているところでは、上記の密度で繁茂していて、各々の密度のばらつきは小さいと観察された。なお、砂が堆積して少し浅いところに、せきしょうもが繁茂していた。

水深方向の葉の分布は、いとやなぎもについては、底の方の $\frac{1}{2}$ の範囲内にあって、水面近くの $\frac{1}{2}$ にはほとんど存在しない。せきしょうもについては、おおむね底の方の $\frac{1}{2}$ の範囲内と観察された。この 2 種とも、底面のごく近傍には、葉はなかった。水面付近に水草がないのは、ある意味では当然である。すなわち、水草自身はほとんど剛性を有さないわけであり、それも根元よりは先端に行くほどそうであろう。根は水底に張っていて、そこから茎なり葉なりが出ているのであるから、流速がある程度あれば、なびいてしまてなかなか水面近くまでは届かない。上向きの速度が卓越しているか、葉の構造が揚力や浮力を受けるようになっていれば容易かもしれないが。また、水草は流れ方向になびくわけで、流れの集まる方向、すなわち流心に向って水草も集まるわけで、速度の大きな所で葉の密度も大きくなる。そのため、流れ自身は葉の抵抗によって流れにくくなって、全体的には流速分布の一樣化に水草が作用していると言える。なお、水草のあるときのマニングの n は、 0.0698 であった。

B1 断面での流速を測定した位置では、いとやなぎもが生育していたところなので、横断方向の幅 10 cm 当りの数値を用い、底面から 3 cm より 20 cm の 17 cm の間に一樣分布として、葉の密度を計算すると、

$$b\phi = 0.12 \times 235 / (10 \times 17) \approx 0.166$$

ただし、葉の平均幅を 1.2 mm 、茎の 50 本分を葉の枚

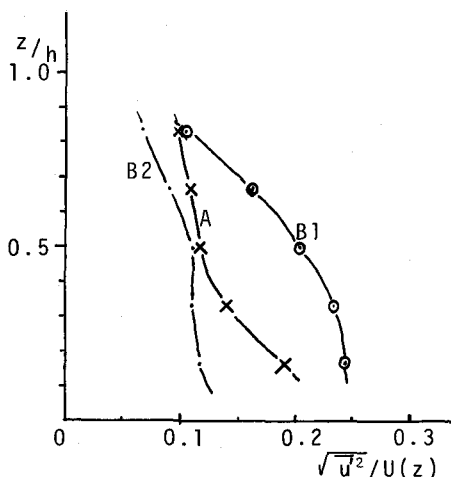


図-6 乱れ強度

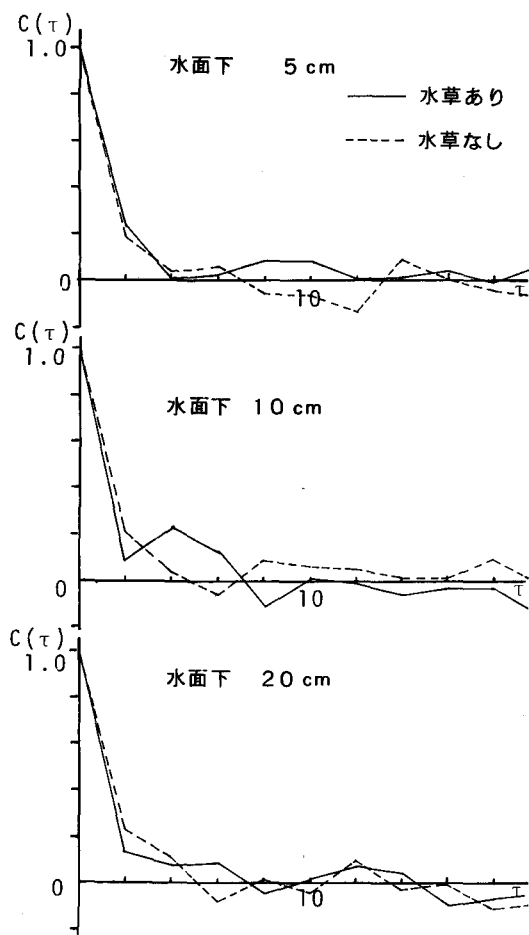


図-7 乱れの自己相関係数

数に換算して35枚を加えている。その結果、前記のごとく、 $C_F b \phi = 1.33 \times 10^{-3}$ とした。

ところで、葉は、せん断抵抗要素として考えているので、その表面積の大きさが現象を支配する取り扱いになっているので、いとやなぎもとせきしょうもの例にみるように、一枚一枚の葉が短い数多くある場合と、逆に、長い数は少ない場合とは、全表面積が同じならば解析上は同じになってしまう。境界層の発達をどのように考えればよいか、あるいは、渦の大きさすなわち、混合距離等を考えれば、決して等価ではないはずである。このような未解決な問題点がまだ多く残っていて、今後の課題としたい。

5. 水草の生える位置について

水草の生育条件は、①光 ②栄養分 ③底質 の3点があげられる。このうち、流水中の水草については③の底質が特に重要である。なぜなら、根が定着できる条件がなければならないからである。そのため、ヘドロのように軟弱な底質ではだめだし、底質の移動が激しくても不合格である(流量変動が少ない農業用水路などに水草が多くあるのは、このためと思われる)。このようなことから、水草は流速の小さいところに生えるのではないかと考えていたのであるが、どうもそうではないらしい。大通川では、流心にいとやなぎもが密に生育していた。測定を断念した福島江を、どこか水草が生えていないかと、何回か見て回ったが、意外な事実があった。前年までと違って、水草がほとんど姿を消したことも、この観察には幸した。直線部分では全くと言ってよいほどないが、彎曲部に少し生育していた。それも、最も流速の大きいと思われる外側である。栄養補給が良いのか、根とか種子が流れて来るのか、侵食されて安定した底質が露出しているのか、理由はいろいろ考えられるが定かではない。

6. あとがき

以上、結論を述べると

- ① 日野が示したように、水草によって、水深方向の流速分布が変化し、水草のある位置では流速の低下が見られることが、実河川でも検証された。
- ② 測定位置での水深方向の流速の平均値は減少するにもかかわらず、乱れの強度は逆に著しい増加を示す。変動係数で示すと約2倍となる。

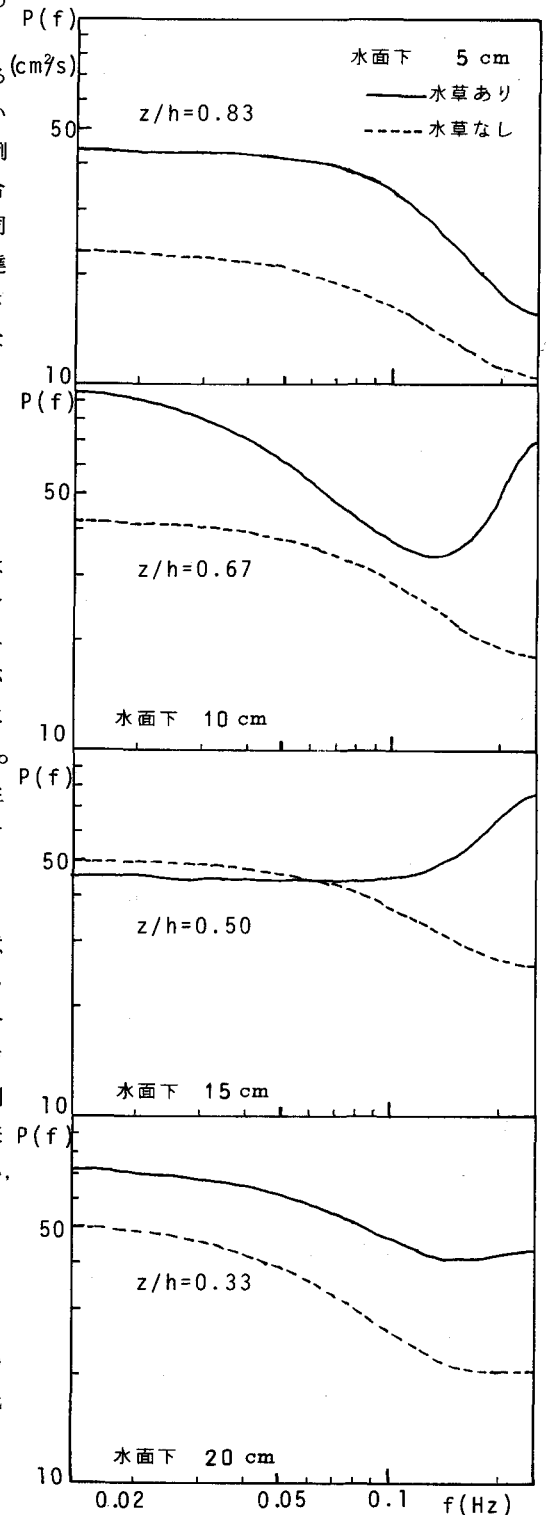


図-8 スペクトルの比較 (MEM)

- ③ 変動係数は、水草なし・水草ありのどちらも底に向って大きくなり、水草ありでは、水草なしの2倍ほどであり、その倍率も水面より底の方が大きい。
- ④ 水路中の障害物や地形による横断方向の流速分布の歪は、水草の存在によって一様化する傾向がある。
- ⑤ 低周波数域でのスペクトルは、水草のあるときのほうが大きい値を示す。

日野教授の環境水理学の試みの一部分である、水草の取り扱いについての実河川での測定を試みたわけであるが、野外での初めての試みであったためと、実験室とは異なった悪い条件の下での測定のため、満足できる結果が得られなかった。例えば、プロペラ流速計に魚が寄って来てつついたり（釣のルアーの原理である）、ちぎれた水草が流れて来てからまったり、トラブルが絶えなかった。今後は精度をあげるため、現場での観察をもとにしての実験室での測定を平行して行いたいと思う。

最後に、測定やデータ整理に協力してくれた院生や4年生諸君に感謝の意を表したいと思います。

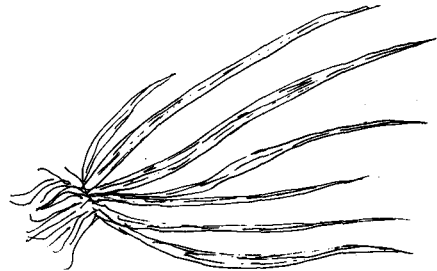
参 考 文 献

- 1) Hino, M. : ECO-HYDRAULICS, An Attempt, XII-th IAHR, Barden-Barden Germany, Aug., 1977
- 2) 日野, 歌原 : 水草のある流れの水理学的研究, 土木学会論文報告集, №266, 10月 1977
- 3) 佐藤貞太郎 : 瓢湖の水, 瓢湖の白鳥を守る会, 12月, 1975
- 4) 日野 幹雄 : スペクトル解析, 朝倉書店, 1977
- 5) 牧野富太郎 : 牧野新日本植物図鑑, 図鑑の北隆館, 1961

いとやなぎも



せきしょうも



ふさも



図-9 水 草 の ス ケ ッ チ