開水路流れへ与える柔軟な植生の影響について

佐　藤　　悟

Influence of the Flexible Water Plants to the Water Flow in Open Channel

Satoru SATO

（平成20年11月28日受理）

Studies treating the roughness elements with the characteristic which it is flexible and is rocked such as water plants with low length which grows thick in a riverbed has many unknown points and there are few they, in a small-scale stream with usually sufficient submergence. The turbulent properties with stable organized structure is explained by formulating the organized fluctuation and velocity averaging, while those in the riverbed, in which the organized motion is unstable, is explained by further spatial averaging of the properties brought about by organized motion.

1. はじめに

自然河川の高水敷に繁茂する丈の高い葦などの水辺群生植物や，河川公園に敷き詰められた芝などは，その周辺の親水機能を高めるとともに，河川水中の窒素・リン成分を吸着・分解するなど，河川水質浄化にも大きく寄与するといわれている。またこれら水辺群生植物は，水辺の景観と環境を良好に保ち，近隣住民や河川公園を利用する人々に安らぎを与える場合も多い。しかしこれら水辺群落植物は洪水時にしばしば冠水し，流れに少なからず影響を与えるとされ，ある意味での洪水調整機能を持つ要素・構造物として多くの河川水理研究者が興味を引く存在でもあった。

ところで灌漑用水路や小規模な都市河川では，その路床が水辺群落植物と比較して極端に柔軟で丈の低い植物に覆われている場合が一般的である。ここで，流れに伴い生じる水生植物の変形・揺動といった物理的変化が，流れ特性に及ぼす影響については不明な点が多く，また興味のある問題である。また開水路滑面乱流においては，古くから多くの研究により，その流速分布特性や乱れ特性などがほぼ明らかにされているが，粗面乱流と，特に冠水時の水生植物のように不規則に揺動する粗度要素を有する開水路流れについては未だ不明な点が多いとされる。

従来よりこの種の研究には，流出解析時に適用する実用的な抵抗係数を評価することを主な目的とし，主に薄層流に対して実験・検討されたものがある。[1) 2)] あるいは水辺群生植物の葦などのように水深に対し比較的丈の高さがあり，剛性部としての茎としなやかな葉部を有する植物が繁茂した状態を再現し，密生度や冠水状況を種々に変化させ，その場の抵抗則等を詳細に調べたものもある。[3) 4) 5)] また，水草のような柔軟性に富んだ植物に関する研究は少なく，その流れの中の構造に主眼をおいたものが多い。[6) 7)] ここで多くの河川・用水路に日常的とも言える十分な水深のもと，路床に繁茂する丈の低い水草のような極めて柔軟，かつ揺動する特性を持つ粗度要素を扱った研究例は少なくまた不明な点も多い。

以上のような背景を鑑み，ここでは直線開水路において自然砂粒による固定床粗度を敷設したものと，剛性部である茎の抵抗を無視できる構造を持つ，沈水性の水草を模擬した揺動する粗度要素を敷設した２種の流路形態を実験対象に極力多くの実験条件下において両者の基本的な流れ特性の特徴について比較検討するとともに，水草の存在とその長さ変化が流れの乱れ特性に及ぼす影響について基本的な面から考察を試みた。

2. 実験装置と方法

実際の河川や多くの用水路等に繁茂する水草は，

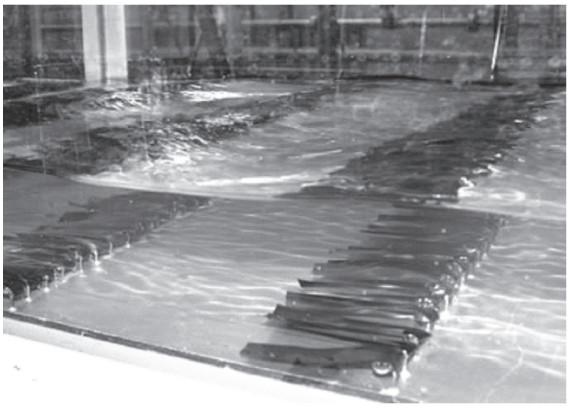
その大きさや形状などの物理・形状的特性の違い，しなやかさに代表される剛性の程度，さらには葉の表層状態や密生度の違いなど，様々な状態が予想される。そのため，実験水路で水草の存在を想定した流れ状況を理想的に再現するには，あらかじめ想定すべき水草の種類を特定し，極力単純にモデル化する必要があるものと思われる。ここでは北東北の身近な水辺や用水路などに自生する「ケヤリソウ」を選択し，検討対象とした。この水草「ケヤリソウ」は剛性を示す茎部を特に持たず，繊細で細長い菖蒲の葉のような極めて柔軟性のある葉部だけを持つ沈水性の宿根植物である。このような流れのままに漂う性質を再現するために，これに最も適した素材として厚さ0.03mmのポリエステルフィルムを粗度要素として利用した。粗度要素は幅を12.5mm，長さを当初140mmとした短冊状であり，実験の進行に伴い，長さを順次90mm，45mmへと短くして検討した。

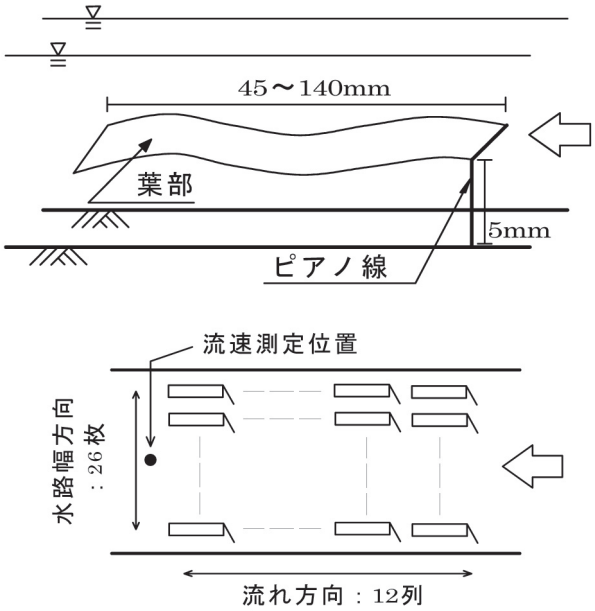
粗度要素の固定には，流れにより揺動しないまま水路底部に張り付く状態を防ぐため，直接水路底部へ接着固定することは避け，図－1に示すような，流れ抵抗をほぼ無視できると思われるステンレス製のピアノ細線（直径0.1mm）を用い，底面より5mmの高さで支持する構造とした。

実験には幅0.4m，高さ0.4m，長さ10mの可傾斜型実験水路を使用し，水路勾配はすべての条件で$i=7.5\times10^{-4}$で一定とした。さらに水路下流端にはゲートを設け，種々の深さの等流が得られるようにした。また，粗度要素は支持部（ピアノ細線）により水路幅に合わせた厚さ2mm，長さ2mのアルミ板を利用して接着固定し，水路幅方向に26枚を，流れ方向へは12列の総数312枚を密に配置した。

揺動しない一般的な粗度要素についてその特性を比較検討するため，固定粗度要素を準備し，併行して同様な実験を行った。この固定粗度要素には，あらかじめフルイにて粒径をそろえた2種類の自然砂粒（代表粒径3.36mm・粗面Aと8.03mm・粗面B）を使用し，接着剤と刷毛を用いアルミ板へはなるべく均等，かつ密に貼り付けた。

これら粗度要素は，十分な等流区間に設置することを前提とし，流れがほぼ安定する水路上流端より約5m下流の位置に固定した。 また，流速測定には超小型の電磁流速計を用い，粗度要素の流下方向末端部中央付近において所定の水深箇所に設置後，A/D変換器を介しサンプリング周波数8Hzで5分間に2400個の流速データを自動計測し，これを1単位とした。水深方向の測定点は粗度要素設置面を原点とし，水面方向へ5mm間隔で変化させ原則として水面付近まで測定した。





図－1　模擬植物の設置状態

なお，実験では実際の流れに多く見られる十分な水深状態を再現するため，原則として水深は20mm以上，流量は最大で毎秒0.02m^{3}までを対象とし，極力多くの組み合わせについて実験を行い，揺動する粗度要素においてはレイノルズ数が2000～38000の範囲で700ケースを観測した。

3.　結果及び考察

3.1　流速分布とその特徴

粘性のある流体の流れではその平板表面上の流速は零であり，表面から離れるに従い流速は徐々に大きくなる。しかし水のように比較的粘性が小さな流体では，その流速（レイノルズ数）の程度により2つの層に分かれることが知られ，第一の層を特

に境界層と呼ぶ。これはさらに遷移領域を経て乱流境界層へと移行し，その臨界のレイノルズ数は5×10^5～3×10^6である。

図－2は，最大流速がほぼ等しい2種の実験例（最大流速はそれぞれ約70cm/sec，40cm/sec）の，揺動する粗度要素の長さをそれぞれ4.5cm，9.0cm，14.0cmに変えたものについて，その流速分布を深さ方向に比較したものの一例である。また図中には砂粒により構成された固定粗度要素・粗面Bについても同時に示した。

これによると，粗度要素の長さは境界層の厚さとその流速分布に影響を与え，特に長さの増加に伴い最大・最小流速の偏差が大きくなる傾向が認められる。これはまた境界層内部でのいわゆる速度勾配が大きく，それに伴い内部で生じるせん断応力も大きくなることを意味する。また，同時に示した固定粗度要素による比較では，固定粗度要素にも揺動する粗度要素と同様な傾向が認められたが，しかしながら境界層の厚さや，その流速分布への影響の程度は水草模型の場合と比べ著しく小さなものであった。これらの傾向は今回対象としたほぼすべての流速条件において同様であり，粗度要素の長さが，特に境界層内の流速分布等に大きく影響を与え，その長さが長いほど最大・最小流速の差が大きくなる傾向があることが考察できた。ここで水草模型が持つ固有な特徴として，流れに伴いながら揺れる，いわゆる揺動現象があげられる。長さの変化は流れに及ぼす物理的な抵抗力の大きさに線形的に影響することは予測されるが，このような揺れが流れへ及ぼす他の要因への影響については興味深いものがある。

図－3は，揺動する粗度要素の長さ毎に乱流時の平均流速分布を3種類のレイノルズ数群についてまとめ，Plandtle-Karmanの壁法則（logarithmic law）に従って整理したものである。

$$U/u_* = 5.75\log\left(yu_*/\nu\right) + 5.5 \qquad \cdots\cdots\cdots (1)$$

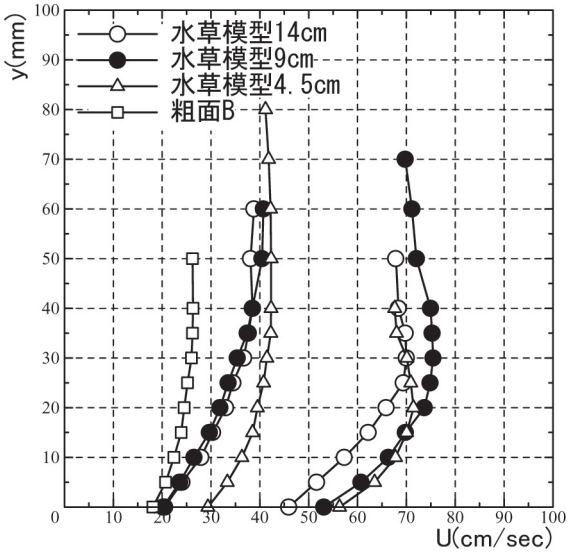
where　$u_* = \sqrt{gIR}$：摩擦速度（cm/sec）

U：平均流速（cm/sec）

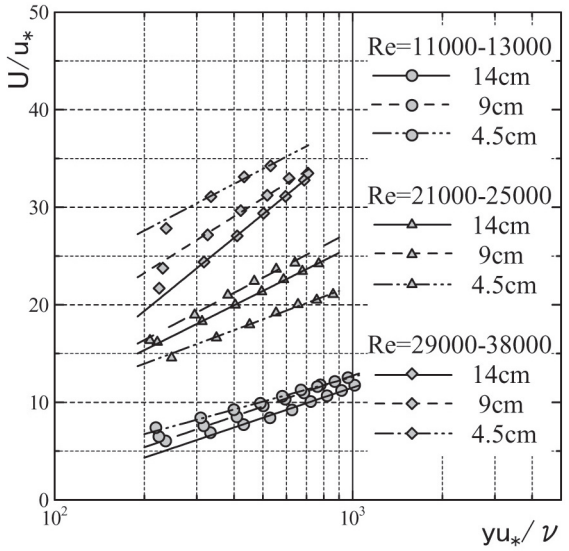
Y：測定座標（cm）

ν：動粘性係数（cm^2/sec）

(1)式は壁法則を用いたNikuradseの実験式で，なめらかな円管の乱流時の流速分布を示したものである。図から分かるように，いずれの条件下においても比較的良好な直線回帰が可能であった。得られた直線の傾きは，レイノルズ数が11000～13000の範囲の場合は3.6～4.6で，同じく21000～25000の場合は4.9～7.0，さらに29000～38000では6.9～10.8となり，また切片値も大きく変化した。これらよりレイノルズ数が高くなるにつれ，その傾きはNikuradseの実験式の傾き5.75よりも大きくなること，またレイノルズ数が同程度の場合，一般に粗度要素が長い程その傾きは大きくなり切片値も共に変化することがわかる。一般にレイノルズ数が変化すると粗度要素が長くなるにつれ切片値は減少する傾向も認められた。傾きが大きいということは水深による流速の差が大きくなることを示しており，このことは図－2での傾向とよく似ていると言える。乱流時の流速



図－2　流速分布曲線



図－3　壁法則による平均流速分布

分布形成に，粗度要素の長さの変化が与える要因にはさまざまなものがあるが，これには主に粗度要素の長さに比例した摩擦抵抗量の増減と，水草固有の揺動の影響，さらには水草そのものによる遮水効果が考えられる。

3.2　抵抗係数に及ぼすレイノルズ数の影響

図－4 は路床勾配 $i=7.5\times10^{-4}$ における摩擦抵抗係数 f とレイノルズ数Reの関係を示している。ここで，摩擦抵抗係数とレイノルズ数は次式で求めたものである。

$$f=8\left(\frac{u_*}{U_m}\right)^2 \quad , \quad \mathrm{Re}=\frac{U_m R}{\nu}$$

where　U_m：断面平均流速（cm/sec）
R：動水半径（cm）

これによると，全体の傾向としてレイノルズ数の増加に伴い摩擦抵抗係数が減少する右下がりの傾向が見られる。また，層流域と乱流域を分ける変曲点は固定粗度要素である粗面A，Bにおいて明瞭に現れ，その値は約3000～4000程度と推定できた。揺動する粗度要素では層流域での実験例が相対的に少ないためと思われるが，固定粗度要素ほど明瞭な判断はできなかった。

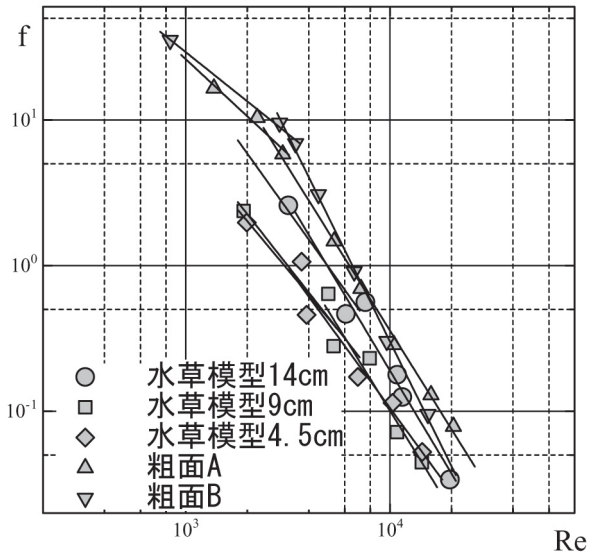
層流域の抵抗係数の挙動では粗度要素に左右されることなく $f=Const\times Re^{-1}$ であることが知られており今回の直線回帰でも当初－1 の傾きを予想していた。実際には固定粗度要素の場合は予想に近い傾きを示したが，揺動する粗度要素の場合はそのような傾向を離れ乱流域の傾きとほぼ同等であった。層流域での実験例が少なく，種々の誤差が入り込んだ影響とも考えられたがその原因については不明である。

図より，粗度要素の長さの増加は流れ抵抗の増加をもたらすといえる。また，揺動する粗度要素と固定粗度要素の摩擦抵抗係数を比較してみると，その値は大きく異なりその差は一桁にも及んでいる。これは水草の存在が流れに与える抵抗には，葉の表面に生じる摩擦力に加え，水草固有の物理現象である揺動がさらに流れ抵抗に影響を及ぼしたためと考えられる。

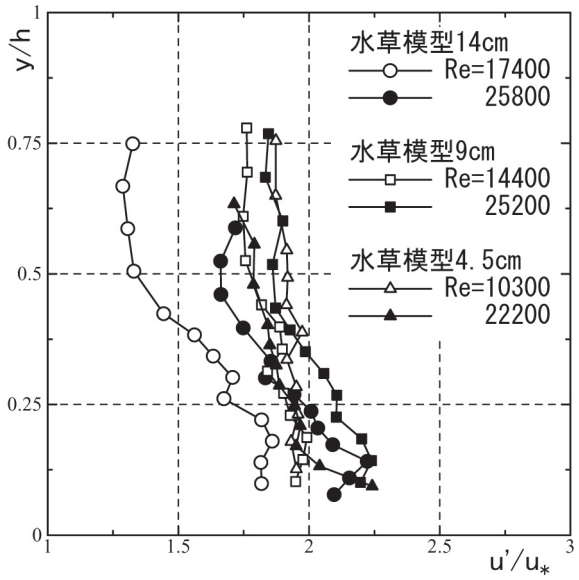
3.3　乱れ強度分布

粗度要素の長さとレイノルズ数 R_e の違いによる乱れ強度分布の変化の一例を，それぞれ図－5 と図－6 に示した。なお前者は摩擦速度 u_* で，後者は断面平均流速 U_m で乱れ強度 u' を無次元化し，さらに縦軸の座標も水深yで無次元化を行っている。

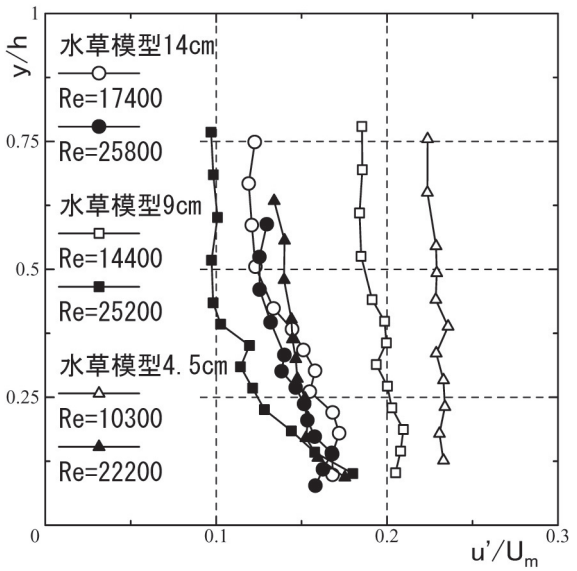
図－5 によると，いずれの場合においても水面から路床に近づくにつれ乱れ強度は増加していくが，ある水深よりその程度は減少し，ついには乱れ強度の減少に転じることが分かる。この傾向は特に粗度要素が長い場合に多く見られるようである。また u'/u_* の値は，ほぼ同じレイノルズ数で比較した場合，粗度要素が長くなるほど小さく傾向を示した。またこの図には明瞭に現れていないが，一般に粗度要素の長さが短くなるにつれ，u'/u_* の最大値が現れる位置は徐々にではあるが，路床側へと移行するようであった。



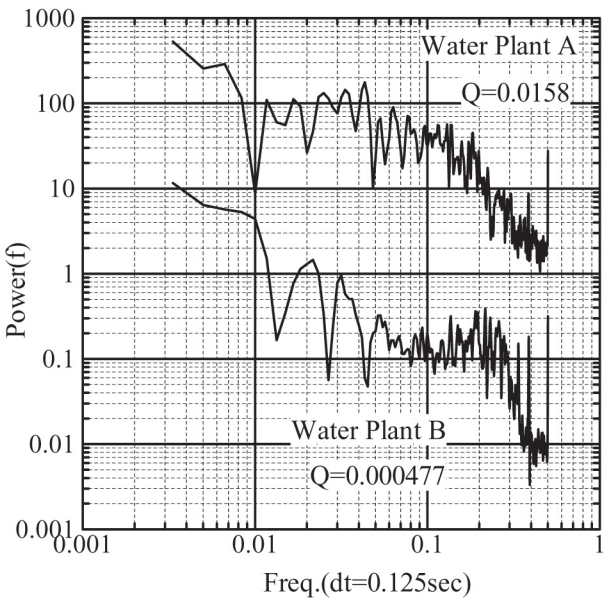
図－4　摩擦抵抗係数とレイノルズ数の関係



図－5　乱れ強度分布



図－6　相対乱れ強度分布



図－7　乱流速度変動のパワースペクトル

図－6に示した相対乱れ強度分布では，u_*で無次元化した乱れ強度分布との大きな違いはなく，ほぼ図－5と同様な傾向であった。ただし低いレイノルズ数の条件時において，全体的に相対乱れ強度の値が大きくなるようである。

以上より，粗度要素の長さは流れの乱れ構造に影響を与えること，また流れの乱れは粗度要素の長さが長い場合，粗度要素の上方で発生した乱れであるのに対し，粗度要素の長さが短い場合では，粗度要素の付近で発生した乱れであることも考察できた。

3.4　乱流速度成分のパワースペクトル

乱流の速度変動を時系列データとして扱い，その中に含まれる周波数成分を数理的に分離するものがスペクトル解析である。この手法は現象の特徴を客観的に評価する際に広く用いられ現在の他分野で広く利用されている。ここでは比較的初期に提案されたBlackman-Tuckey法を用いて乱流構造を周波数領域から評価した。

一例として図－7は，粗度要素近傍と水面近傍について，そのスペクトルの形状を比較したものである。これによるとスペクトルの形状は通常緩やかな右下がりの形状となり，いずれの条件下においても徐々に高周波成分が減衰することがわかる。またその減衰の程度は一般にレイノルズ数が大きいほど小さくなり，レイノルズ数の増加に伴いより細かな揺動が増加する様子が認められる。さらに，粗度要素長が短くなる程，特に高周波成分のパワーが他と比べて相対的に増加する傾向は強く，より細かな振動が多くなる様子を示している。これらの結果を要約すると，流れとともに揺動する粗度要素には，その粗度要素長が長い程流れを整流する効果と乱流の速度変動を押さえ込むような働きがあり，また比較的小さなレイノルズ数においては，特に座標値の違いによるパワーの差は明瞭となるが，レイノルズ数の増加に伴い，その違いは徐々に小さくなるものであった。

4.　結論

本研究では多くの実験を通して，基礎的開水路における水草の存在とその長さの変化が流れの乱れ特性に及ぼす影響について，いくつかの面から検討した。

これによると，

①開水路流れの流速分布では，揺動する粗度要素の存在は特にその長さの影響が顕著であり，粗度要素近傍の流速を抑える効果がある。

②壁法則による流速分布において，いずれも良好な直線回帰は可能であり，実験時のレイノルズ数と粗度要素長により，回帰直線の傾きは変化する。

③摩擦抵抗係数とレイノルズ数の関係では，いずれもレイノルズ数の増加に伴い摩擦抵抗係数は減少するが，揺動する粗度要素と固定粗度要素は摩擦抵抗係数の値が大きく異なり，その差は一桁にも及ぶ。

④乱れ強度分布では，揺動する粗度要素の長さは流れの乱れ構造に影響を与え，その長さにより流れの乱れの発生する水深は変化する。

⑤スペクトル解析による乱流の速度変化の特徴では，粗度要素は主に長さが要因となり，流れを整流する効果と速度変動を押さえる効果が認められた。

今回の実験で用いた粗度要素長の長さの範囲やその密度など，現実の流れを十分に評価するのに適切な形状や配置であったかなど，今後更に検討すべき課題も多いと思われるが，基本的な水草のもつ流れへ及ぼす影響について二, 三の知見を得ることができた。未だ不明な詳細については今後の実験にて解決できるものと思われる。

参考文献

1）Ree,W.O. and V.J.Palmer : U.S. Soil Conservation Technical Bulletin, No.967, 1979
2）Phelps,H.O. : Water Resources Research, Vol.6, No.4, 1970
3）Kouwen,N.,T.E. Unny and H.M. Hill : A.S.C.E., Vol.95, IR2, 1969
4）Kouwen,N. and T.E. Unny : A.S.C.E, Vol.99, HY5, 1973
5）室田　明，福原輝幸：水辺植物を有する開水路流れの抵抗特性，第38回年次学術講演会講演概要集 第２部，pp.499-500，1983
6）日野幹夫，歌原英明：水草のある流れの水理学研究，土木学会論文集，第266号，pp.87，1977
7）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，土木学会論文集，第338号，pp.97，1983