

柔軟な水草を有する流れの乱れ特性について
Turbulent Characteristics of Flow with Flexible Water Plants

大阪大学工学部 正員 室 田 明
大阪大学工学部 正員 ○ 福 原 輝 幸

1 緒 論

自然河川の高水敷でよく目につく水辺植物群落や小河川の水底に繁茂する藻類が河川の流水抵抗、生態系あるいは河床の安定にいかなる影響を及ぼしているかは、河川工学や生態学の面から興味深い問題である。粗面乱流の見地から現在までの研究動向を振り返ると、土木の分野では砂・礫を想定した粒状粗度要素上の乱流研究は盛んであるが、水辺・水生植物を扱った研究は極めて少ない。むしろこの種の研究は気象学の分野で盛んであり、穀物群落を対象としてその内外における空気流の挙動が現地観測も含めて議論されている。¹⁾ 我国では井上の一連の研究²⁾が有名であり、彼は穀物群落内の風速分布を理論的に誘導している。また穂波現象を穀物群落上の支配的な渦の移動と穀物群の共振現象として説明している。土木工学の分野では、植物を有する開水路流れを想定して流れ構造を調べたKouwenら³⁾や日野ら⁴⁾の研究がある。

Kouwenは主に背の高い植物群落上の流速分布や相対水深と植物の曲げ剛性との関連を検討している。日野は揺動する水性植物の葉にのみ注目して理論的流速・剪断応力分布を誘導し、水生植物の水理学的機能の一端を論じている。しかしながら水辺・水生植物の水理学的機能は植生状態・植物自身の物理的性質（柔軟性、表面のなめらかさ等）により変わるものであろうから、なるべく実際に近い植生状態をシミュレートしたもとして上述の問題を検討する方が現実的であり望ましい。

そこで本研究は乱流制御の観点から水生植物の水理学的機能を検討するための第一段階として、水路床近くに水生植物が繁茂している状態を想定し、そこにおける乱れ特性を実験的に明らかにしようとするものである。

2 実験装置および実験方法

水路は長さ20m、幅0.5m、高さ0.32mのアクリル樹脂製の可変勾配水路であり、模擬植物としての絹糸は水路上流端の下流4mの位置から9m区間にわたり水路床に設置された。（写真1～3参照。）模擬植物は水流中で揺動するが、その揺動状態を具体的に説明することを目的として模擬植物先端の経時変化を水路上方から16mmシネカメラにより追跡した結果を図-1に示す。図中の実験条件からわかるように、ほぼ同程度の水深ではあるが揺動周期は流速の増大とともに減少する。また予備実験での目視観察より、低流速場では微弱かつ緩慢な揺動が高流速場になると活発に揺動することがわかる。そこで水生植物の揺動状態の違いに

表-1 水 理 諸 元

CASE	h(cm)	U _{max} (cm/s)	U _m (cm/s)	U _Δ (cm/s)	U _k (cm/s)	Re	S(×10 ³)	C	Q(l/s)	T _w (°C)	f(×10 ²)
S-1	4.46	30.53	23.32	1.30	20.82	8760	0.34	0.00	5.20	20.0	2.51
D-1	2.11	17.70	13.27	1.41	9.75	2120	1.15	1.44	1.40	12.2	9.01
D-2	2.00	16.42	12.00	1.39	8.62	1820	1.26	1.44	1.20	12.4	10.69
D-3	3.40	11.22	8.12	0.86	4.28	1990	0.93	1.44	1.38	12.5	8.90
E-1	2.81	34.36	25.84	2.31	19.86	5560	2.12	1.44	3.63	13.9	6.41
E-2	2.46	27.65	20.98	2.00	14.39	4000	1.73	1.44	2.58	13.9	7.26
E-3	2.86	24.73	17.48	1.75	14.00	3820	1.69	1.44	2.50	13.9	8.03
F-1	4.29	26.97	20.05	1.72	12.45	6280	0.85	1.44	4.30	14.1	5.86
F-2	3.98	20.21	14.97	1.43	11.30	4370	0.99	1.44	2.98	13.9	7.33
G-1	4.50	28.57	23.56	1.68	17.81	10360	0.76	0.72	5.30	26.6	4.09
G-2	2.46	31.25	26.83	2.11	21.25	7000	2.04	0.72	3.30	27.0	4.95
G-3	6.06	26.52	22.28	1.54	15.09	12580	0.53	0.72	6.75	26.7	3.85
G-4	6.64	33.33	26.20	1.74	17.75	15290	0.56	0.72	8.70	24.9	3.54
G-5	3.22	12.60	11.18	0.90	7.92	3650	0.39	0.72	1.80	26.2	5.19
G-6	8.72	21.86	18.46	1.26	12.95	13580	0.19	0.72	8.05	25.9	3.72

S-1 : smooth surface C : density of vegetation

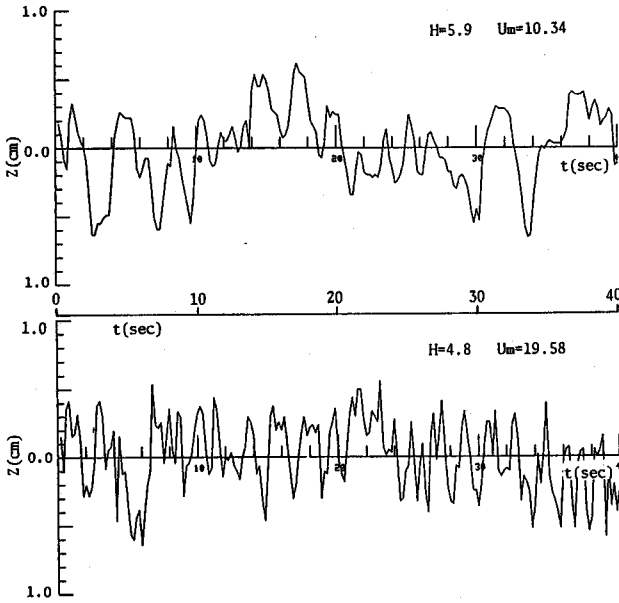


図-1 揺動の経時変化

表-2 基準面の上昇高さ

CASE	δd (mm)	k(mm)	$\delta d/k$
D-1	0.7	3	0.233
D-2	0.8	3	0.267
D-3	1.0	3	0.333
E-1	0.4	3	0.133
E-2	0.6	3	0.200
E-3	0.1	3	0.033
F-1	0.6	3	0.200
F-2	0.4	3	0.133

よる乱れへの影響を系統的に調べるために、水理条件は表-1に示すように3つのグループ(I)

低水深・低流速; case D, (II)低水深・高流速; case E (III)高水深・高流速; case Fに分類した。計測は模擬水生植物群落の下端より1.5m上流側の水路中央で2成分熱膜流速計を用いて行うとともに、水素気泡法・コンデンスミルク法による可視化実験も試みた。

なお、表中の記号Cは密度を表わしており、次式で定義される。

$$C = NA_r / (BL) \quad (1)$$

ここに、 A_r は模擬植物の表面積、 N および L はその本数、敷設長を、 B は水路幅をそれぞれ示す。

3 点計測法による結果およびその考察

(1) 平均流速分布とすべり速度

図-2は壁法則に従って整理した流速分布であり、次式を満たす。

$$U/u_* = 5.75 \log(yu_*/\nu) + C_k \quad u_* = \sqrt{gSeR} \quad (2)$$

ただし、路床を水深の基点とした場合、 $C=0.72$ のケースでは勾配が5.75となるのに対して、 $C=1.44$ のケースでは5.75よりも急な勾配となった。筆者らはこの原因が水生植物群落の遮水効果にあると考え、 $C=1.44$ のケースには仮想水深の概念を導入して、5.75の勾配になるように、基準面の上昇高さ δd を決定した。結果は、表-2に示すごとく、 $\delta d/k$ (k :平均たなびき高さ)のオーダーは0.2程度となる。

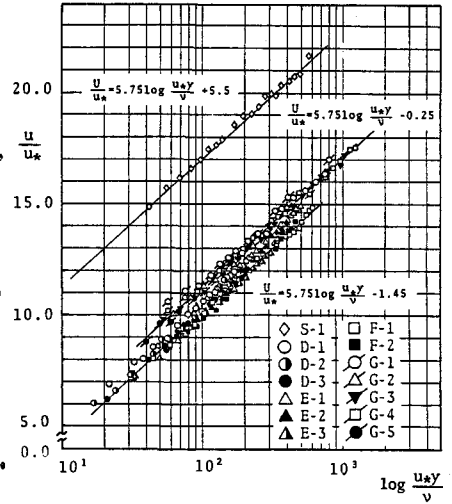


図-2 流速分布

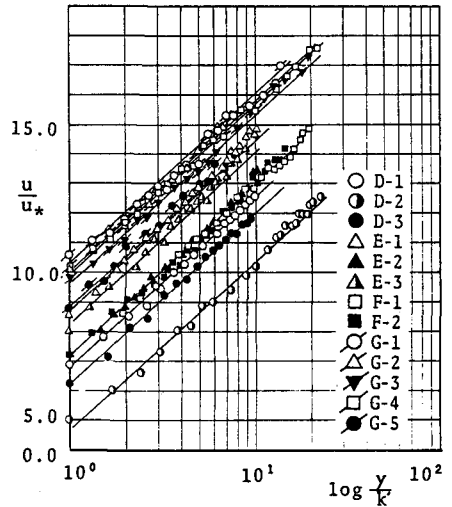


図-3 流速分布

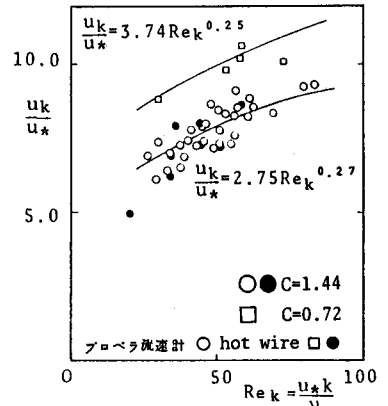


図-4 すべり速度

次に、より実用的な流速分布の予測を目的として、 $y = k$ での流速“すべり速度” U_k を用いて表現した流速分布が図-3であり、次式が成立する。

$$U/u_* = 5.75 \log(y/k') + U_k/u_* \quad (3)$$

ここに、 $y' = y_n - k, k' = k - \delta_d, y_n$: 路床から鉛直上向きの距離

一方、 U_k は k と摩擦速度 u_* を用いた粗度レイノルズ数 $Re_k (\equiv u_* k' / \nu)$ と密接な関係にあることが図-4よりわかる。すなわち、

$$U_k/u_* = a \cdot Re_k^b \quad (a, b \text{ は定数})$$

(2) 滑面との比較

乱れ強度の水深方向変化を図5(a), (b), (c)に示す。なお、(a), (b)の横軸には $y'/h' \equiv (y_n - k)/(h_n - k)$ を採用している。この理由は、実測ではこの表示方法がもっとも整理しやすく、 k の大小に関係なくケース間での比較が可能なためである。他方、滑面との比較に際しては $y/h \equiv (y_n - \delta_d)/(h_n - \delta_d)$ を用いる。

同図より結果を系統的に整理すると次のようになる。

〔レイノルズ数との関係〕

(A) $u_{rms}/u_* = u'$: 模擬植物近傍($y' \approx 0$)では u' の値に有意な差異はないが、 Re の小さなcase Dのグループでは $y'/h' < 0.5$ の範囲まで y' の増大に伴う u' の減衰が相対的に大きい。

(B) $v_{rms}/u_* = v'$: $0.2 < y'/h' < 0.6$ の範囲では Re が大きいほど v' は増大するが、それ以外では有意な差異はない。また v' のピークは揺動の上限である $y'/h' \approx 0.1 \sim 0.2$ に対応する。

〔密度との関係〕

(A) u' : $y' \approx 0$ の近傍では密度の小さい($C = 0.72$)の方が相対的に u' は大きい、水面に向うにつれて差異はなくなる。

(B) v' : u' ほどの密度による系統的差異はない。

〔滑面との関係〕

乱れ強度に関しては滑面値との比較がもっとも重要であり、図

-5(c)に示すとおり、 u', v' とも滑面値より小さくなる。この乱れ特性の原因を明らかにすることが乱流構造解明の糸口と考えられるので、後でさらに検討を加える。なお、図中の曲線で示すように乱れ強度の水深方向変化は大略次式に従う。

$$u_{rms}/u_* = D_0 \exp[-\lambda_0 (y'/h')] \quad (4)$$

$$v_{rms}/u_* = D_1 [1 - (\lambda_1 y'/h')^m] \quad (5)$$

次に、相対乱れ強度の水深方向変化を図-6に示す。

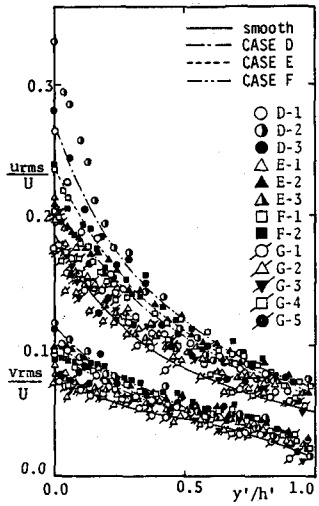


図-6 相対乱れ強度

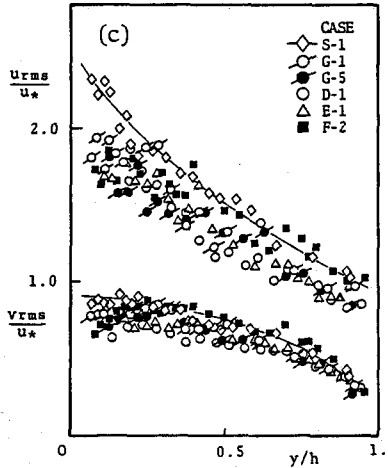
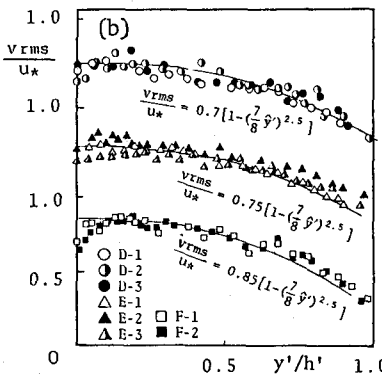
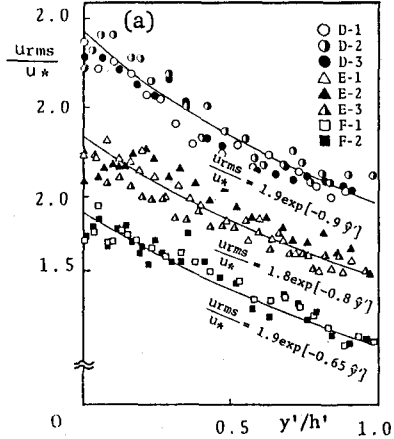


図-5 乱れ強度分布

〔レイノルズ数との関係〕

両相対乱れ強度とも、 $y'=0$ で最大となり、その後は水面に向うにつれ単調減少する。また $y'=0$ 付近では、両相対乱れ強度とも Re が大きいほど小さくなっているが、 $y'/h' > 0.5$ になると差異がなくなる。

〔密生度との関係〕

$u_{rms}/\bar{U}$ はほぼ全水深にわたり、また $v_{rms}/\bar{U}$ は $y'/h' \lesssim 0.6$ において、密生度の大きなグループの方が大きい。

〔滑面との関係〕

本論文には示していないが、全水深およびすべてのケースにわたり両相対乱れ強度とも滑面値より大きい。

(3) レイノルズ応力

レイノルズ応力 $-\overline{u'v'}$ の水深方向変化をグループ別に示したものが図-7(a),(b),(c)である。 $-\overline{u'v'}$ に関しては密生度による違いがないので case G については省略する。全ケースとも $y/h \approx 0.2$ すなわち k よりも若干上側の揺動の上限位置で $-\overline{u'v'}$ は最大値をとる。 Re による比較では Re の小さな case D ほど水面から路床に向うにつれて、理論分布 $(-\overline{u'v'}/u_*'^2 \approx 1 - y/h)$ からの離脱が大きい。この結果に対しては植物の揺動に起因する付加応力のような項： φ を基礎式（運動方程式）

$$\bar{U} \frac{d\bar{U}}{dx} + \bar{V} \frac{d\bar{U}}{dy} = -\frac{1}{\rho} \frac{d\bar{p}}{dx} + \nu \frac{d^2 \bar{U}}{dy^2} + \frac{d}{dy} (-\overline{u'v'}) + \varphi \quad (6)$$

の中に持ち込まなければ説明し難く、しかもこの付加応力は $y' \approx 0$ から水面に向うに従って減少すると推察できる。⁵⁾ ちなみに乱れに及ぼす揺動の影響範囲は図-8 の $-\overline{u'v'}/U^2$ の分布でわかるように水面付近まで達している。

(4) 揺動とアクティブな乱れの関係

アクティブな乱れの性質は全乱れエネルギー $q^2/2 = (u_{rms}^2 + v_{rms}^2)/2$ に対するレイノルズ応力の比、すなわち構造係数 $Sc = -\overline{u'v'}/(q^2/2)$ で表現され、乱流構造の変化を表現するための一指標と判断できる。何故なら、 $-\overline{u'v'}$ 、 $q^2/2$ とも同じ乱流運動により生成される物理量だからである。結果は図-9 に示すとおりであり、高流速グループである case E、F の Sc は低流速グループである case D の Sc に比

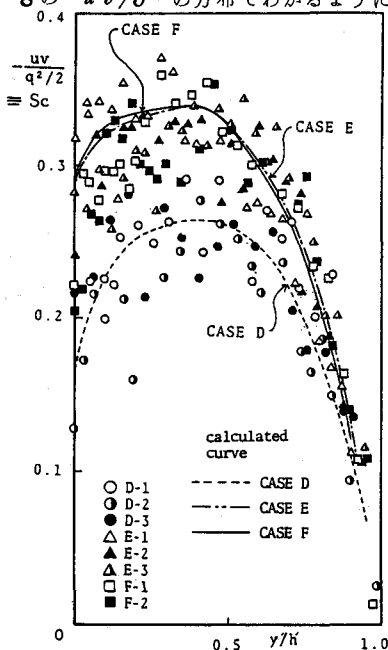


図-9 Sc と y/h の関係

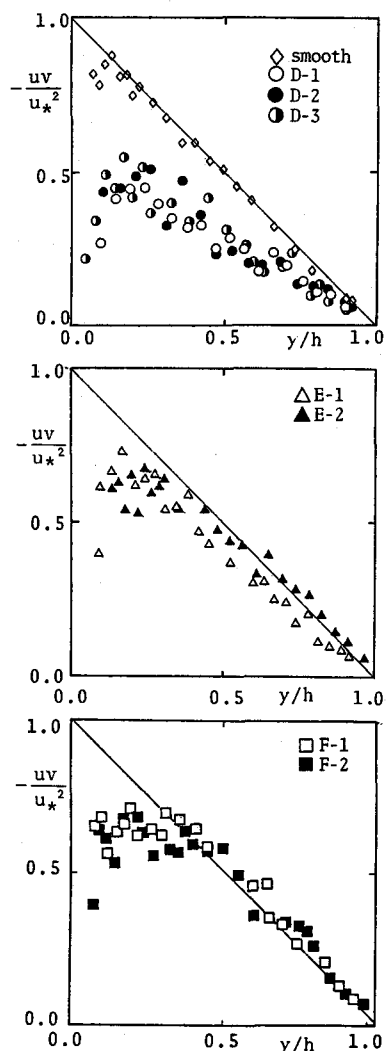


図-7 レイノルズ応力分布

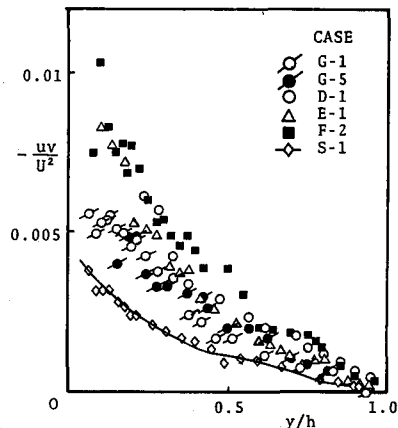


図-8 レイノルズ応力分布

べてほぼ全水深にわたり増大している。これより全乱れエネルギーに
関与する乱れのうちでも運動量交換に貢献するようなアクティ
ブな乱れは、揺動が活発になるにつれて助長されることが知れる。
すなわち、流水の乱れは水生植物により大きく刺激されるものと
考えられる。なお、図中の曲線はcase D, E, Fのグループを代表す
る S_c の水深方向変化を示すものであり、次式より計算される。

$$S_c = 2 u_{rms} \cdot v_{rms} R / (u_{rms}^2 + 2v_{rms}^2) \quad (7)$$

ここに、 R は変動流速 u' と v' の相互相関係数である。

(5) 乱れエネルギーの拡散過程に及ぼす水生植物の影響

乱れエネルギーの拡散率は次式で定義される。

$$q_r = \overline{(u'^2 + 2v'^2)v'} / (2u_*^3) \quad (8)$$

q_r の水深方向変化を図-10に示す。ケース間で分布形状に目
立った差異はないが模擬植物上で q_r の符号に逆転傾向が認められ
る。すなわち時間平均的にみて乱れエネルギーは模擬植物近傍で
は路床側に、それより水面側の領域では水面の方に向かって輸送さ
れている。このような q_r の符号の逆転傾向は滑面では認められ
難く、水生植物群落に起因するものと推察される。

(6) 渦動粘性係数と揺動の関連性

$\epsilon_m = -\overline{u'v'} / (d\bar{U}/dy)$ である渦動粘性係数の水深方向変化 ϵ_m
 $/(u_* h) \sim y/h$ の関係を示したのが図-11である。図中の実線
は滑面における理論曲線である。本実験結果は水面近くを除く断
面内にわたり滑面值より小さくなっているのが特徴である。この
ことおよび平均流速分布が通常対数側に従うという結果の両者
を考え併わせると、レイノルズ応力と平均速度勾配の相互作用に
起因する平均流エネルギーの損失率 $-\overline{u'v'} \cdot d\bar{U}/dy \cdot (u_*^{-3} h)$
は滑面值より減少していると判断でき、水生植物群落を有する流
れ場に対してはエネルギーの考察が有効であると思われる。具体的
には、平均流エネルギー $g S_e \bar{U}$ の一部が水生植物の揺動エネルギーに費やされると考えれば、滑面值と比較
した場合における乱れ強度の低下(図-5(c))も矛盾なく説明できる。

一方、case Eとcase Dを比較すると、揺動の活発な前者の方で ϵ_m は大きくなっており、上述の考察から
鑑みると、平均流エネルギーから揺動エネルギーへの移行率は揺動の活発な方で相対的に小さいと予想される。

4. 可視化法による結果およびその考察

(1) 模擬植物近傍における流れの様相

写真-1は模擬植物が揺動しないような低流速状態(断面平均流速 $u_m = 7.0 \text{ cm/sec}$, $h_n = 4.6 \text{ cm}$)における
模擬植物周辺の流れを水素気泡法によって可視化したものである。流速 U の横方向分布は波状を呈し、低
速稿の無次元間隔 $\lambda^+ \equiv \lambda u_* / \nu$ の平均値は $\lambda^+ = y u_* / \nu = 30$ で140となる。この空間スケールはbursting
のそれにほぼ対応していることより、水生植物の存在に関係なくburstingは発生していると考えられる。

一方、揺動を伴うような高流速では水素気泡法の適用が困難なところから、コンデスミルク法を用いるこ
とにした。写真-2は高流速状態($U_m = 30.2 \text{ cm/sec}$, $h_n = 3.2 \text{ cm}$)におけるミルクの挙動を促えたものである。
水路床をはうようにして下流へ移動するミルクの脈は模擬植物の動きに対してほとんど無関係な挙動をする
が、たなびさ高さと同程度の高さで模擬植物直下流のミルクの脈は揺動に追従して変動する現象が観察され
た。ただし、同方法ではburstingの存在あるいはburstingに及ぼす揺動の影響までは評価できない。

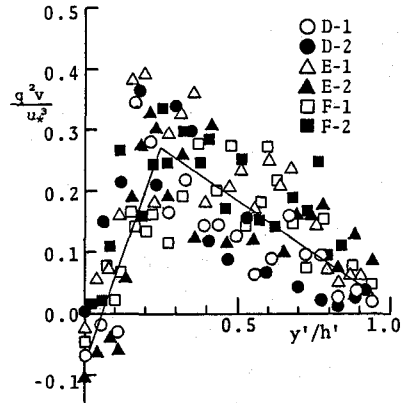


図-10 乱れエネルギーの拡散率

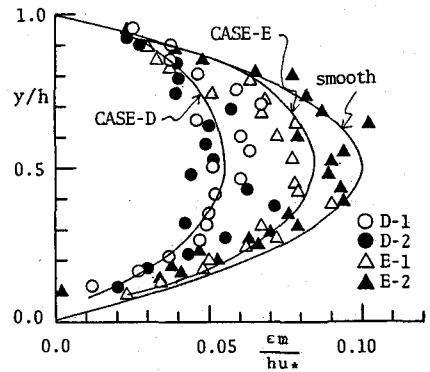


図-11 渦動粘性係数

(2) 2次流に対する考察

水生植物群落上の流れに対してもfingering現象が発生するかどうか調べてみた。fingering現象は写真-3でみられるごとく発生しており、fingerの数 N_f も著者らの以前の結果と同様に水路の形状比(B/h , B :水路幅)で次式のように規定される。⁶⁾ $N_f = (B/h)/2$ (9)

これより、2次流のような非常に時間スケールの大きな断面内流動に対してまでは揺動の影響は及んでいないと推察できる。

6. 結 論

以上、点計測実験からは水生植物を有する開水路流れの乱れ構造は固定型粗度要素を有する粗面乱流とは異なり、“揺動”という新たな要素が乱れ構造に重要な影響を及ぼすことが明らかとなった。すなわち揺動により励起される付加的な乱れは揺動状態に依存する。一方、可視化実験からは揺動が活発な状態ほど水生植物とその周辺流体との間の相互作用は明確となるが、2次流のような時間・空間スケールの大きな流れにまで揺動の影響は及ばないことが確認された。

最後に、本研究の遂行にあたり大阪大学大学院学生、村越一也君の熱心な協力を得たことを付記する。

参 考 文 献

- (1) 例えば、Vegetation and the Atmosphere, vol 1, 2 Academic Press Inc (London) LTD
- (2) 例えば、E. Inoue; On the Turbulent Structure of Airflow within Crop Canopies, J. Meteorol. Soc. Japan, vol. 41, 1963
- (3) N. Kouwen ら; Flow Retardance in Vegetated Channels. A. S. C. E., I R. 2, vol. 95, 1969
- (4) 日野幹雄・歌原英明; 水草のある流れの水利学的研究、土木学会論文報告集、第266号、1977
- (5) 関西支部講演集投稿予定
- (6) 室田明・中辻啓二・福原輝幸; 開水路分散実験にみられるfingering現象と2次渦の相関について、第23回水講演文集、1979.

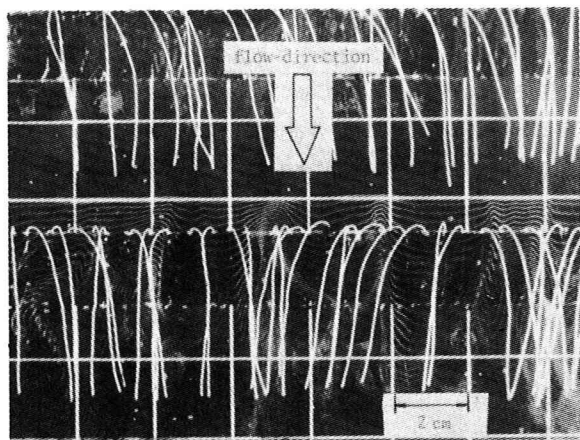


写真-1 水素気泡法による流れの様相

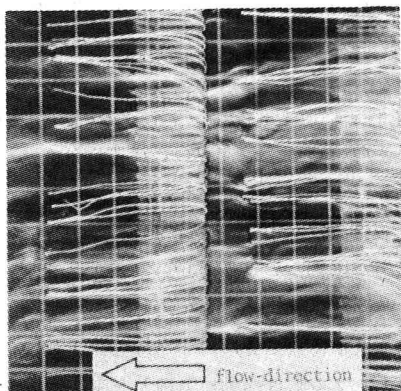


写真-2 コンデンスミルク法による流れの様相

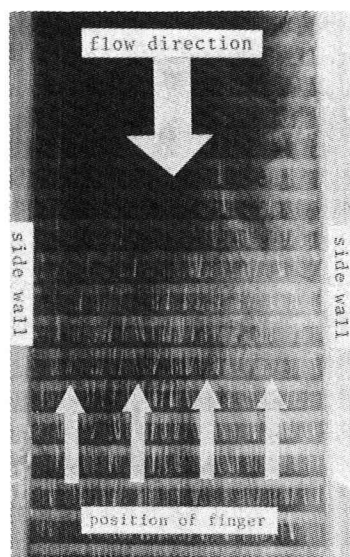


写真-3 fingering現象