

樹木群のある河道の流れの水平混合とその卓越波数

Periodical horizontal mixing in river flows with vegetation

渡辺明英*・福岡捷二**・津森貴行***

By Akihide WATANABE, Shoji FUKUOKA and Takayuki TSUMORI

Horizontal large-scale eddies are observed at the flood flow in river with vegetation. Velocity and water level fluctuate periodically by these eddies. In this study the experiment is conducted to clear the characteristics of periodical low fluctuation modes in flow. Non-linear stability analysis using a simple 2D-numerical model is performed, providing a good explanation for experimental results of distribution of velocity and dominant wave length of horizontal eddy in flow with vegetation.

Keywords: vegetation, lateral mixing by horizontal large eddies, dominant wave length, non-linear stability analysis

1. 序論

樹木群のある河川では、洪水時には樹木群の近くに大規模な平面渦が現れ、平面渦の流下に伴って流速、および水位が周期的に変動することが明らかにされている¹⁾²⁾。写真-1、図-1はそれぞれ低水路河岸沿いに樹木が連続的に繁茂した利根川の新川通りで写された洪水時の航空写真と、それを解析して求めた流速分布を示す。写真-1では、樹木群に起因する水平混合による平面的な流れの様子が浮遊土砂の濃淡としてとらえられている。特徴的な髭状の筋が樹木群から高水敷上にかけて伸びているのが見える。この筋は、図-1に示すような流れの速度差に起因して樹木群近傍に生じた平面渦により浮遊砂が連行されている状況を示している。このような混合形態を持つことが樹木群のある複断面河道での大きな特徴である。この水平混合は高水敷肩への浮遊砂の堆積などを引き起こすとともに、河岸樹木の生育環境にも影響を与える。したがって、治水的にも環境的にも望ましい形で樹木管理を行っていくためには、平面渦を伴う流

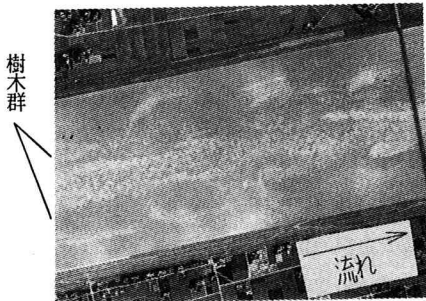


写真-1 樹木群のある河道における洪水時の表面流況（利根川）

*	正会員	工博	東京工業大学助手	工学部土木工学科
			(〒152 東京都目黒区大岡山 2-12-1)	
**	正会員	Ph. D、工博	東京工業大学助教授	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)

れ場を見積もれることが重要となる。平面渦に関する解析として、池田らは植生境界において発生する周期渦の発生機構について線形不安定解析を行い、与えられた流速分布に対する微小擾乱の卓越波長を得ている²⁾。しかし、このような平面渦を伴う水平混合の発達、および流速分布の変化は非線形性の強い現象であり、与えられた流速分布について線形的に取り扱い卓越波長を求めても現象を正しく捉えたことにはならない。一方、灘岡・八木は水深スケール以下の乱れエネルギーの生成・散逸機構について論じ、これに基づき SDS-2DH モデルを提案している。このモデルを植生のある河川の流れに適用して平面渦の非線形発達過程を計算し、平面流況を求めている³⁾。しかし、平面 2 次元的な河川の流れでは、流速分布は底面摩擦と樹木による流体抵抗に起因する大規模な水平混合によりほとんど定まるため、平衡に達した段階では高周波の乱れに強くは依存しておらず、卓越している大規模平面渦の波長に対応した変動成分を適切に考慮することで流れ場を平面 2 次元流として求められると考えられる。また、計算領域を設定し、その上下流境界に周期境界条件を適用するモデルでは与えた計算領域のスケールに応じた流れ場が定まるだけであり、このような計算領域の大きさは一般に実験結果に基づいて与えられることが多い。しかし、水路長が短い場合には発達過程にある波長を用いることになり、かなり大きな領域を設定しないと安定な流れ場を得ることはできない。また、計算領域を長くすれば膨大な計算量を必要とする。

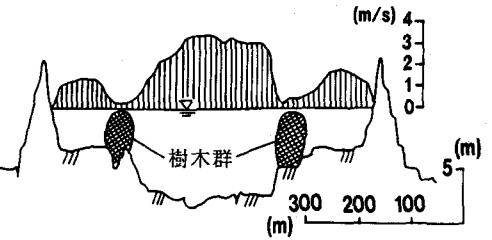


図-1 表面流速分布

本研究では、樹木群を有する流れ場の水平混合の周期性に着目し、平面渦を簡潔にモデル化した解析手法⁴⁾を用い、上述の解析法に含まれる問題点を明確にするとともに、写真-1 に示すような実河川の水平混合場の状況を理論的に求めることを目的としている。ここでは、以下の検討を行っている。樹木群の代表的な 2 つの繁茂形態について水理模型実験を行い、髭状の筋構造を含む流れ場の変動の特性を明らかにする。次に、2 次元平面流方程式を用いた非線形安定解析により平面渦の卓越波長を求め、この卓越波長の場合について計算した平面的な流速場、およびせん断力を実験値と比較し、解析の妥当性を検討する。

2. 水理量の変動特性に関する実験

代表的な樹木群繁茂形態として、河道中央部に一様で連続的に繁茂した場合と複断面河道の低水路河岸沿いに一様で連続的に繁茂した場合を選び、水理実験を行い、流れの周期的変動特性について検討した。

実験に用いた水路は、長さ15m、幅1.2m、勾配1/1000の直線水路である。水路底面の粗度係数は $n=0.011$ である。複断面の場合には、幅40cm、高さ2cmの合板を水路の全長にわたって両端に設置し、(低水路幅/高水敷高さ)=20、(低水路幅/全幅)=1/3の諸元をもつ水路を作成した。高水敷には粗度係数 $n_{r0}=0.019$ のジオテキスタイルシートを張り、低水路よりも粗度を大きくしている。実験に用いる樹木群模型は以下のように選定した。図-1の流速分布において、樹木の存在する領域の流速を求め、樹木の透過性を表す指標である透過係数 K ¹⁾に関して $K=12\sim 24$ (m/s)を得た。この値に対しフルードの相似則を適用し、樹木群の透過係数にほぼ相当する $K=0.38$ (m/s)の値を持つプラスチック製の多孔質体を樹木模型として用いている。

(a) 単断面水路の中央に一様で連続的に樹木が繁茂した場合

幅10cm、高さ4cmの樹木模型を水路の中央に設置し、水深4.5cmの等流状態において流速と水位変動の測定を行った。これらは2成分(流下方向、横断方向)の電磁流速計、および容量式波高計を用い、横断方向に5cm間隔で測定した。図-2に水路床から2cm

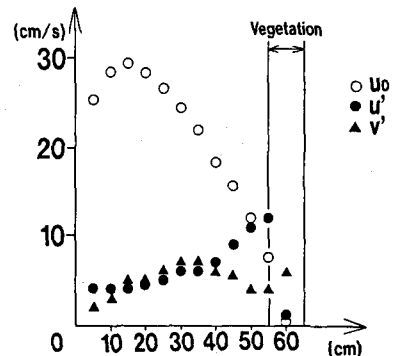


図-2 平均流速および流速変動の横断分布

の位置で測定された平均流速 u と、流速変動 u' 、 v' の振幅の横断分布を示す。また、図-3 は水位変動の振幅の横断分布を示す。 u' は樹木境界で最大となり平均流速に匹敵する値を示すことから、この付近では主流流速がゼロになるほど激しい加速・減速を繰り返していることがわかる。樹木の内部では流下方向に対しては流れがないが、横断方向には流れが生じている。 v' 及び η' は主流の中央付近で最大値をとり、この付近に平面渦の回転中心がある。レイノルズ応力の横断分布を図-4 に示す。レイノルズ応力は時間に対し周期的な変動を繰り返すため、ここではその平均値を示している。レイノルズ応力は樹木境界から主流中央にかけて値を持ち、この領域で水平混合が盛んになっている。レイノルズ応力は樹木境界で最大となり、この樹木境界面でのせん断力の見積りが樹木による流れの抵抗を評価する場合に重要となる。このように、本実験では樹木の存在に起因する水量の変動が水路全体にわたって観測され、樹木幅が水路幅に対して1割にも満たないにもかかわらずその影響は広範に及ぶことが明らかとなった。

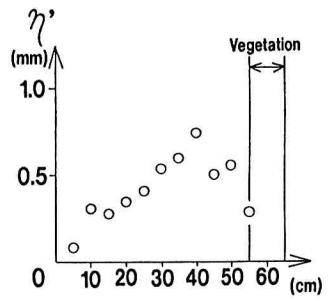


図-3 水位変動の横断分布

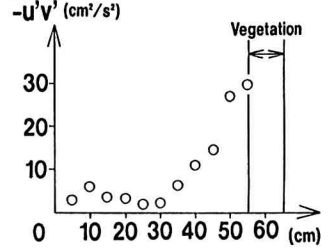


図-4 レイノルズ応力の横断分布

(b) 複断面水路の低水路河岸沿いに一様で連続的に樹木が繁茂した場合

低水路河岸沿いに幅3.5cm、高さ6.5cmの樹木模型を設置し、アルミ粉による流れの可視化、及び流速変動の測定を行った。写真-2、写真-3^{*)}は、樹木高さに対する低水路水深の比がそれぞれ0.57、0.90の条件においてアルミ粉により流れを可視化したものである。アルミ粉は水路幅全体に一様に偏りなく投入した。写真-2をみると低水路内でアルミ粉が筋となって蛇行しており、平面渦が左右交互に生じていることがわかる。また、高水敷上にも平面渦が明瞭に現れ、左右の高水敷上で互い違いの配置になっている。水深が小さい場合には、高水敷上と低水路内の流速の差が大きいためそれぞれの領域で生じた平面渦の流下速度が異なる。その結果、高水敷上の平面渦は、速い流下速度を持つ低水路内の平面渦に引きずられるような形で拡大・縮小を繰り返し安定な大きさを維持できない様子が観察された。写真-3をみると写真-2の状況よりもアルミ粉の動きが激しくなっている。特に低水路内ではアルミ粉が低水路幅全体にわたって蛇行している。高水敷上の樹木付近には平面渦の配置に従い流れが集中する部分にアルミ粉の特徴的な鬚状の筋がみられる。これは写真-1に示されたものと同じものと考えられる。樹木が深く水没した状態では高水敷上及び低水路内に明瞭な平面渦は認められなかった。このように樹木が深く水没する状態を除いては、樹木の存在により流れに大きな流速差が生じるため、安定な渦列が形成され、水平混合が活発になっていると考えられる。また、水深が樹木の

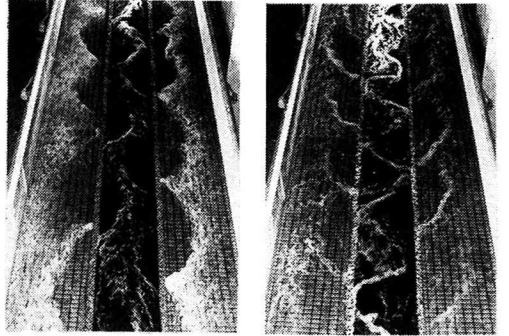


写真-2 $h/H=0.57$ 写真-3 $h/H=0.90$
流況可視化写真

の高さとほぼ等しくなる付近では水平混合が最も活発となることがわかる。

樹木高さと同水深がほぼ等しい水深6.8cmの条件で低水路内の樹木境界付近で測定された流速変動に関する、周波数 f に対するパワースペクトル密度 $S(\omega)$ 、及び線スペクトルを図-5 に示す。 $S(\omega)$ が低周波領域で明瞭なピークを持ち、流れの変動が卓越した周波数成分をもっていることがわかる。流速変動図中の細線は実測波形、太線は線スペクトルに分解した成分のみで表した波形であり、線スペクトル図に示した周波数成分により実測波形を概ね表現している。しかし、単断面の場合^{*)}に比べて数モードの重ね合わせで表現し得

るほど単純な変動ではない。これは樹木が2列で存在し、縦断的な平面渦の列が4列現れ、さらに断面形状が複断面になっているために低水路と高水敷上の強さの異なる渦列が相互に干渉しあっていることに起因していると考えられる。このように、樹木のある河道の流れは、基本的に周期性を持つ変動が生じるものの、樹木の群落の位置や状態によって異なる構造を有している。

3. 非線形安定解析による卓越波数の計算

実験結果から、樹木の存在する河道内では平面渦に対応して変動する流れ場が形成されていることが明らかとなった。ここでは卓越して現れる平面渦の波長、すなわち周期変動の卓越波数の見積もりを行う。前述のように線形不安定解析では与えられた速度分布に対して、その場に応じた発達しやすい波数が定まるだけであり、速度分布そのものが定まる過程は論じられない。本研究では波長と流速分布は非線形関係として同時に求められるべきものであると考え、以下に示す解析法²⁾により、波数を種々変えて流速分布形とレイノルズ応力を計算する非線形安定解析を行い、卓越波数を求める。

樹木群を有する流れ場の基礎方程式として式(1)に示す浅水流方程式を用いた。樹木の存在は、右辺第4項で表している。式(2)は連続式である。

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_k \frac{\partial u_i}{\partial x_k} = g I_i - g \frac{\partial \eta}{\partial x_i} - \frac{c_i u_i \sqrt{u_k^2}}{h_0} - g \frac{u_i \sqrt{u_k^2}}{K^2} + \nu_i \frac{\partial}{\partial x_k} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_k} + \frac{\partial u_k}{\partial x_i} \right) \dots (1)$$

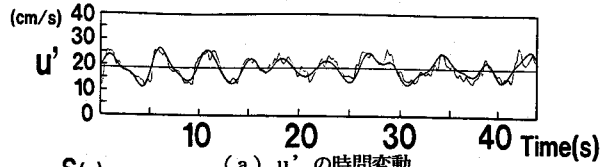
$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial (\eta u_k)}{\partial x_k} = 0 \dots (2) \quad (i=1, 2, k=1, 2)$$

ここで、 u_1 : 流下方向の水深平均流速、 u_2 : 横断方向の水深平均流速、 η : 水深、 g : 重力加速度、 C_i : 摩擦抵抗係数、 h_0 : 平均水深、 K : 透過係数、 ν_i : 渦動粘性係数である。 ν_i には底面の抵抗による乱れについて等方性を仮定し、対数則を満足するラウスの拡散係数を水深平均した $\nu_i = \kappa u_* h_0 / 6$ (κ : カルマン定数、 u_* : 摩擦速度)を用いた。これは大規模水平混合そのものが求められるべき解であるからである。

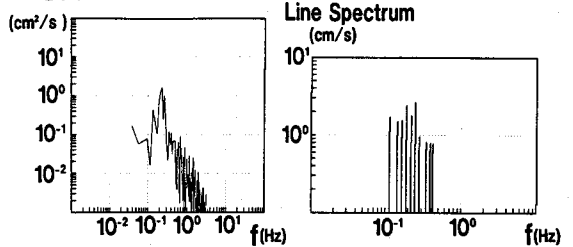
実験より流れの水平混合は低周波成分が卓越していることから、流速および水深を式(3)、(4)に示すように平均値とそれからの低周波の変動成分に分離する。ここで、 α 、 γ は位相差である。

$$u_i(x, y, t) = u_{i0}(y, t) + \sum_{m=1}^2 u_{im}(y, t) \cos \frac{2m\pi}{L} (x-ct + \alpha_{im}(y)) \dots (3)$$

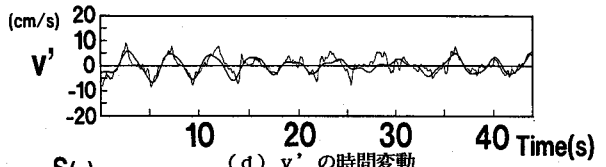
$$\eta(x, y, t) = h_0(y, t) + \sum_{m=1}^2 \eta_m(y, t) \cos \frac{2m\pi}{L} (x-ct + \gamma_m(y)) \dots (4)$$



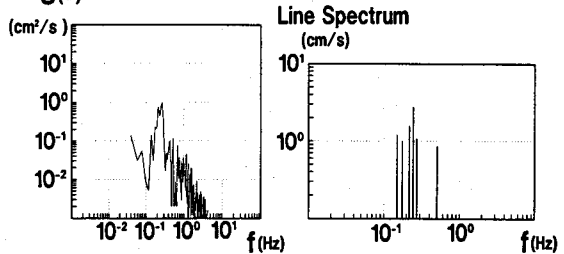
(a) u' の時間変動



(b) u' のパワースペクトル密度 (c) u' の線スペクトル



(d) v' の時間変動



(e) v' のパワースペクトル密度 (f) v' の線スペクトル

図-5 流速変動のスペクトル

式(3)、(4)を基礎式(1)、(2)に代入し、 u_1 、 u_2 、 η の平均値、変動振幅、位相差を計算する。拘束条件として流量一定の条件を課し、初期水位に微小な擾乱を与えた。

本研究では卓越波数の判断基準として樹木境界付近に生じるレイノルズ応力の最大値を用いる。この理由は以下の通りである。樹木のある河道における流れ場では樹木の近傍で流速分布の欠損が生じ、この欠損の大きさは樹木境界でのせん断力で決まる。まず波長が短く発達速度の速い渦が形成され、この渦の成長に伴って生じるレイノルズ応力により流速分布の欠損幅がさらに拡大する。次に、拡大した欠損幅に応じて、より波長の長い渦へと成長していく。このプロセスを繰り返しながら渦は波長の短いものから長いものへと変わっていく。ここで、もしレイノルズ応力の増大と波長の拡大という相互発達プロセスがどこまでも続かならば安定な卓越波長というものとは存在しないことになる。しかし、実験から底面抵抗がある河道内の流れでは平板境界層のように欠損幅は流下とともに増大しないことが示されている¹⁾²⁾。したがって、波数が小さくなくてもレイノルズ応力が増大しなくなるような状態が存在し、このような波数のうち最も発達の早い波数を卓越波数と考える。

ここでは、福岡・藤田の実験¹⁾²⁾および前述した複断面の実験に対して、各波数に対するレイノルズ応力の最大値を計算する。計算条件を表-1に示す。福岡・藤田の実験に対する計算結果を図-6に示す。レイノルズ応力が発達を始めてから安定した値をとるまでに要する計算の時間ステップを T_g として図中に示している。1次モードの流速場についてのレイノルズ応力についてみると、波数 k_1 が小さくなると一度増大してから減少へ転じている。これは、水平混合が最も活発になる波数領域、すなわち卓越波数が存在することを示している。ただし、このレイノルズ応力がピークをとる波数には、ある幅があるように見える。図-7はレイノルズ応力の時間発達過程を各波長に対して示したものである。波長が短いほど早く発達し、安定に至るまでの時間も短い。しかし、計算条件で与えた波長が流れ場の卓越波長よりも短い場合にはレイノルズ応力が時間的に大きく変動している。これは、

表-1 計算条件

	流量 (Q/s)	水路床 勾配	等流水深 (cm)	水路幅 (cm)	樹木幅 (cm)	底面粗度係数	透過係数 (m/s)
福岡・藤田の実験 ¹⁾²⁾	37	1/1000	4.5	300	30	0.011	0.38
複断面水路の実験	9	1/1000	6.8(低水路) 4.5(高水路)	120	3.5 $\times 2$ 列	0.011(低水路) 0.019(高水路)	0.38

成長とともに欠損幅が大きくなり次の長い波長に移行しようとするが、元の成分の変動の大きさを維持できなくなって一旦小さくなり、その後再び欠損幅が大きくなる過程を繰り返すためである。このような現象は本モデルに限らず周期境界条件を用いる解析でも生じると考えられる。実際の流れの中ではこのような振動を示す短い波長のものは次々に波長の長いものへ移行していると考えられる。ここでは、波長が3.5m以上のものが平衡状態に達し得ることがわかる。レイノルズ応力が平衡状態に達しピークをとり得るこれらの波数群の中でも、発達が速く、より高周波である波長3.5mの渦が発達した段階で安定な場が形成される。これ以降波数の小さいものは発達速度が遅いため、実際の現象では現れにくいと考えられる。福岡・藤田の実験水路で確認された波長は約3.5m²⁾であり、これは図-5の緩やかなピーク上で波数が最も大きい領域に位置している。福岡・藤田の実験では全長50mの水路を用いており、この場合の波速と T_g から判断して、水路の範囲内でこの状態に達しているものと思われる。このように、各波数の初期擾乱が発達し、平衡

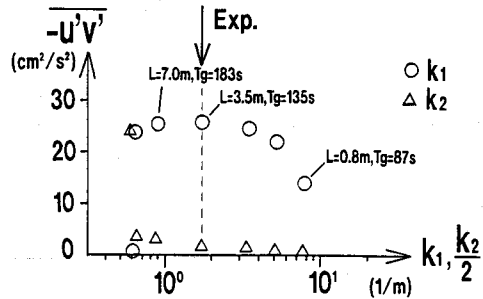


図-6 レイノルズ応力と波数の関係(福岡・藤田¹⁾²⁾の実験

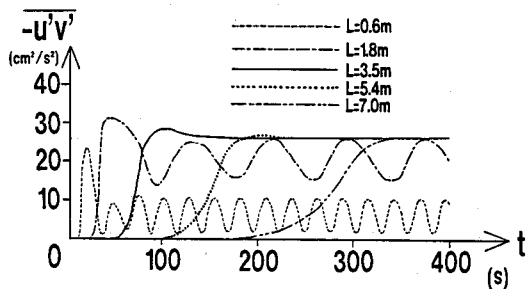


図-7 レイノルズ応力の時間発達過程

に至る過程は流れの非線形性により定まるものであり線形解析では求めることができない。すなわち、微小擾乱の初期発達速度の極大値で卓越波数を判断する線形解析では、非線形発達過程における卓越波数の変化の可能性を考慮しておらず不十分であるといえる。

次に、複断面水路の実験に対する計算結果を図-8に示す。実験で得られた波数付近でレイノルズ応力がピークを示し、これが卓越波数と考えられる。Tgについてみると福岡・藤田の実験と比較して全体的に短い。これは、水路の幅が狭い上に樹木の列数が多いため、短い流下距離で卓越した平面渦が現れるからである。この場合も流速とTgから判断すると、本実験に用いた水路で十分発達した状態が得られているものと思われる。なお、このケースでは、レイノルズ応力の時間発達過程においていずれの波数に対しても値がほぼ一定となるような平衡状態が得られず振動を繰り返したため、振動する最大値を平均化している。これは、展開モードを2次までとした本解析法では精度が不十分であるためと考えられる。

得られた卓越波数に対する平均流速分布とレイノルズ応力分布の計算値をそれぞれ図-9、図-10に示す。計算値は実測値を概ね表現している。以上の結果から、卓越波数と流速分布は一緒に非線形の基礎方程式を解いて決定されるべきものであり、これらについての簡単な計算手法として本解析法は妥当であるといえる。

4. 結論

本研究での主要な結論を以下に示す。

- ① 代表的な樹木繁茂形態を有する流れについて実験を行った結果、樹木群のある現地河川でみられる水平混合現象が実験水路においても再現されることが明らかとなった。また、平面流況はいくつかの卓越した低周波の変動モードの重ね合わせにより表現されることが明らかとなった。
- ② 樹木群を有する流れ場では、卓越する平面渦と流速分布は非線形発達過程を経て定まる。したがって、平面渦の波長を線形不安定解析により考察すると不十分な解を与えることになる。本研究では、非線形解析を行い、レイノルズ応力と波数の関係を直接得ることで、卓越波長の見積りを可能にした。得られた卓越波長に対する流れ場の解析結果は実験結果を適切に説明した。これより、樹木群のある河道において重要な影響を持つ水平混合現象は本解析で用いた2次元平面流解析によって説明できることが示された。本文で示した考えに基づき周期境界条件を用いた解析法によっても同様の結果を得ることが可能である。しかしながら、この場合には計算量が膨大になる。本解析法は変動モードを特定することにより簡潔に解を得ることを可能にしている。

参考文献

- 1) 福岡捷二・藤田光一：土木研究所報告第180号、1990。
- 2) 藤田光一・福岡捷二：土木学会論文集、No. 429/II-15、1991。
- 3) 池田駿介・太田賢一・長谷川 洋：土木学会論文集、No. 443/II-18、1992。
- 4) 灘岡和夫・八木 宏：土木学会論文集、No. 473/II-24、1993。
- 5) 福岡捷二・渡辺明英・津森貴行：樹木群の繁茂した河道の平面流況とその数値解析、土木学会論文集（投稿中）
- 6) 津森貴行・福岡捷二・柿沼孝治：土木学会第48回年次学術講演会概要集II、1993。

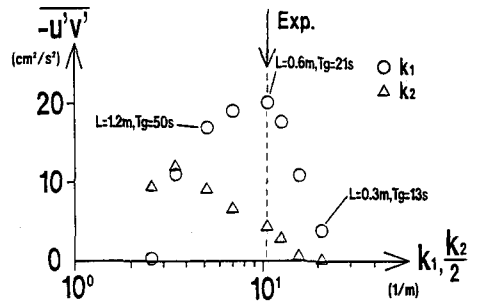


図-8 レイノルズ応力と波数の関係(複断面実験)

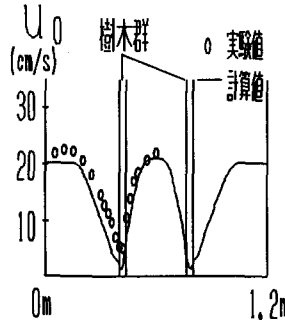


図-9 平均流速分布

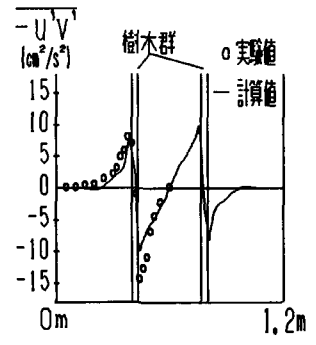


図-10 レイノルズ応力分布