



岐阜大学機関リポジトリ

Gifu University Institutional Repository

| | |
|------------|---|
| Title | 真桑用水路における乱れの計測に関する実験的研究 |
| Author(s) | 板垣, 博 |
| Citation | [岐阜大学農学部研究報告 = Research bulletin of the Faculty College of Agriculture Gifu University] no.[53] p.[83]-[93] |
| Issue Date | 1988-12-25 |
| Rights | |
| Version | 岐阜大学農学部生物生産システム学科 (FACULTY OF AGRICULTURE GIFU UNIVERSITY, Department of Land and Water Engineering) |
| URL | http://hdl.handle.net/20.500.12099/5768 |

この資料の著作権は、各資料の著者・学協会・出版社等に帰属します。

真桑用水路における乱れの計測に関する実験的研究

板 垣 博

生産環境整備学講座

(1988年8月1日受理)

Experimental Studies on Turbulence Measurements in Makuwa Irrigation Channel

Hiroshi ITAGAKI

Department of Land and Water Engineering

(Received August 1, 1988)

SUMMARY

Turbulent velocity measurements of two components were undertaken in an agricultural irrigation channel with a small propeller current meter. Results obtained from an outdoor experiment were as follows.

- (1) There was a higher correlation with time in downstream turbulence (u') than in vertical one (w'), and in the turbulence of a lower layer of an open channel than in that of an upper one.
- (2) The shape of a spectral density function showed a curve of right-lowering and did not have any special peak. The energy of turbulence decreased according to the increase of the corresponding frequency.
- (3) It was recognized that there was a large scale turbulence of 10~20 seconds by a moving average method of 2.5 and 5.0 seconds, and a turbulence of 30~60 seconds by a method of 10 seconds.
- (4) Some conditional sampling method was applied to the analysis of the Reynolds stress and its internal mechanism was investigated.

Res. Bull. Fac. Agr. Gifu Univ. (53) : 83—93, 1988.

要 約

岐阜県真桑用水路において乱れの計測を行った。実験の計測システムは流下方向の乱れ u' と鉛直方向の乱れ w' の2成分を計測することが出来る。野外の計測結果より以下の結果が得られた。

- (1) 流下方向の乱れ u' は鉛直方向の乱れ w' よりも、また開水路の下層の乱れは上層の乱れよりも時間的な相関性が高く、連続性があった。
- (2) 乱れのスペクトル密度関数の形状には、特別なピークは見られず、全体的に右下がりの曲線を示した。なお、スペクトルの勾配は開水路の上層のものより下層の方が急傾斜であった。
- (3) 原系列データに2.5秒と5.0秒の移動平均化操作を行ったところ10秒から20秒の、10秒の移動平均化操作をした場合には30秒から1分の乱れの大規模スケールが認められた。
- (4) レイノルズ応力の内部機構については条件付き抽出法を適応して、流下方向の乱れ u' と鉛直方向の乱れ w' を5象限に分けて、その構造について検討した。

緒 論

近年、開水路流れにおける乱流構造についての実験的研究が各分野で行われており、乱流モデルが多く提唱される状況にある。しかしながら、これらの実験的研究の大多数は、主として室内実験水路において研究されているものであり、この乱流場については、レイノルズ数が小さいという欠点がある。すなわち、野外における農業用の開水路流れのような、大きなレイノルズ数の乱流場において、室内実験と同じコロログラムやスペクトル形状になるか、又は乱流構造上の相違が存在しているかを、水流の乱れ(変動流速)の特性の立場から研究し、開水路流れにおける乱流構造を解明することが本研究の目的である。したがって、本研究において対象とする開水路は、農業用の幹線用水路であり、人工的に整形された均一な断面形状を有しており、比較的長い時間スケールにわたって、定常等流に近い状態で流れていることが多い。また、流れの水力条件としては開水路のアスペクト比が $10^0 \sim 10^1$ 、レイノルズ数が $10^5 \sim 10^6$ のオーダーであり、流れは完全な乱流領域にある。そしてまた、開水路流れにおけるレイノルズ応力の解明は、乱流運動中の物質の移流・拡散現象と密接に関係しており、乱流運動の解明の内の一つの重要な課題であると考えられるので、これについても検討した。

ここで、本研究における解析手法は、乱れを計測するシステムによって得られた時系列データを、数字的手法によって統計的な処理をすることであり、ダイナミックな解析方法として、移動平均法、相関解析法、スペクトル解析法、条件付抽出法等を使用する。

乱れの計測システム及び方法

乱れを計測するための流速計としては、出来るかぎり計器の寸法が小さくて、応答特性の良好なものが望まれる。このために、室内実験水路においては、ホットフィルム流速計、レーザー流速計等により乱れ成分が計測され、レイノルズ応力等が算定されるのが一般的である。しかしながら、本研究においては、乱れの計測が野外であること、計器の取り扱いと設置が比較的容易であること、また比較的長時間にわたって安定した出力機構を持つこと等を考慮して、小型プロペラ式流速計¹⁾を使用した。この流速計は4枚のプロペラの先端に接着した小型磁石の回転を、支持棒上部に取り付けたICにより検出するものであり、その出力パルスは4 Vp-p である。

この出力パルスを周波数・電圧変換器に入力して、アナログ量としての電圧量に変換し、この電圧量をデータレコーダにより連続的に記録する。なお、乱れの計測中はデータレコーダの再生側にペンレコーダを接続して、記録データをモニターする。また、周波数・電圧変換器の校正実験に際しては、発振器を使用して、0 Hz から20 Hz ぎざみに100 Hz までの周波数の基準波形を入力して、これに対応する電圧量を得る。続いて、データレコーダ中のアナログ量は、岐阜大学情報処理センターの電子計算機 U1200により、時系列パッケージを使用して、デジタル量に変換し、さらに電子計算機への入力媒体としてのフロッピー化する。

ここで、レイノルズ応力を算定するためには、乱れについての2成分を同時に計測しなければならない。本研究においては、流体の密度 ρ 、流下方向の乱れ成分 u' と垂直方向の乱れ成分 w' の積によって求められるレイノルズ応力 $-\rho \overline{u' w'}$ (以下においては $\overline{u' w'}$ をレイノルズ応力という。)を計測することとして、2台のプロペラ式流速計を、流下方向に45度向きをそれぞれ逆に傾斜させて、X型に配置した。これより、2台のプロペラ式流速計の出力の和より u' 、差より w' 、そしてこれらの積の時間平均値より $\overline{u' w'}$ が求められる。これらの一連の計測システムを Fig. 1 に示す。なお、この計測システムにおいて周波数100 Hz が、電圧1 V、流速で約1 m/s に対応している。

乱れの計測時間は河川乱流における研究の成果^{2,3)}を参考にして、1ケースについて10分から20分を目標として行った。しかしながら、流水中の浮遊物質が流速計に掛かり、このため流速計が停止することがしばしばあり、長時間の計測は容易なことではなかった。

データレコーダ中の時系列データをデジタル変換するにあたっては、サンプリング時間間隔を0.01秒とし、さらに本実験において使用したプロペラ式流速計の時定数を考慮して、5個のデータの平均化操作

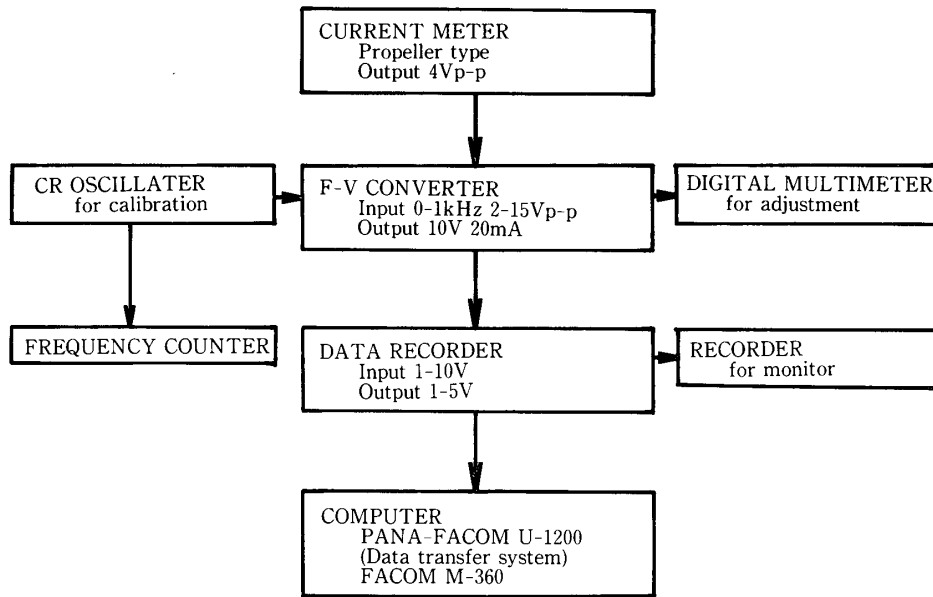


Fig. 1. Instrumental system

をした。したがって、統計的な時系列解析をする場合の原系列データの時間間隔は0.05秒である。

乱れの計測場所及び水理条件

多くの農業用水路においては、用水と排水の分離が完全に行われておらず、家庭排水や工場排水等の地域の排水が直接用水路へ流入しており、排水路を兼用している場合がしばしば見受けられる。したがって、河川より取水している頭首工の近くにおいて乱れを計測することが望ましいと考えられる。しかしながら、最近では、河川水自体が水質悪化の状況を示しており、プロペラ式流速計による最適な計測場所は少なくなっている。本研究においては、野外の農業用水路において乱れの計測を行ったが、この場合には、乱れ以外の攪乱が計測システムに入らないように注意しなければならない。すなわち、より計測に適した開水路を選択する必要がある。

ここで、乱れを計測した用水路は、岐阜県本巣郡を流れる根尾川の山口頭首工から取水されて、糸貫町・真正町等をカンガイしている真桑用水である。真桑用水は古い歴史的経緯を持つ用水であり、根尾川が藪川と呼ばれていたころの、その一派川であると考えられる。根尾川の山口頭首工から取水されたカンガイ用水は、糸貫川の廃川敷に設けられた扇形の分水池に導かれ、糸貫川方用水と真桑方用水とに配分されており、真桑用水の最大流量は $12.8\text{m}^3/\text{s}$ である。その計測場所は Fig. 2 に示すように、分水地点より下流約900mのところである。流水中の浮遊物質は比較的少なく、計測地点より上流約250mは直線的であった。水路床はコンクリートライニングされているが、多少の凹凸があり、側壁は玉石積で、水路の断面形状は一様であった。

真桑用水において乱れを計測した時の水理条件を Table 1 に示す。なお、表中の流量は水路幅10.0mを2.0m間隔に5分割し、各区分断面において1点法によりプライス式流速計により平均流速を求め、それらの和より算定した。また、フルード数とレイノルズ数は水深より計算した。

乱れの計測位置は、側壁の影響を無視できるように、用水路の中央部であって、測点は水路床から測点までの垂直高さを z 、水深を H として、水面近傍の上層 ($z/H=0.8$)、中層 ($z/H=0.5$) と水路床近傍の下層 ($z/H=0.1$) の3箇所である。

解析結果及び考察

1. 乱れの原系列データ

乱れの計測は上層で2ケース、中層で2ケース、下層で3ケースの合計7ケース行った。最初に、アナ

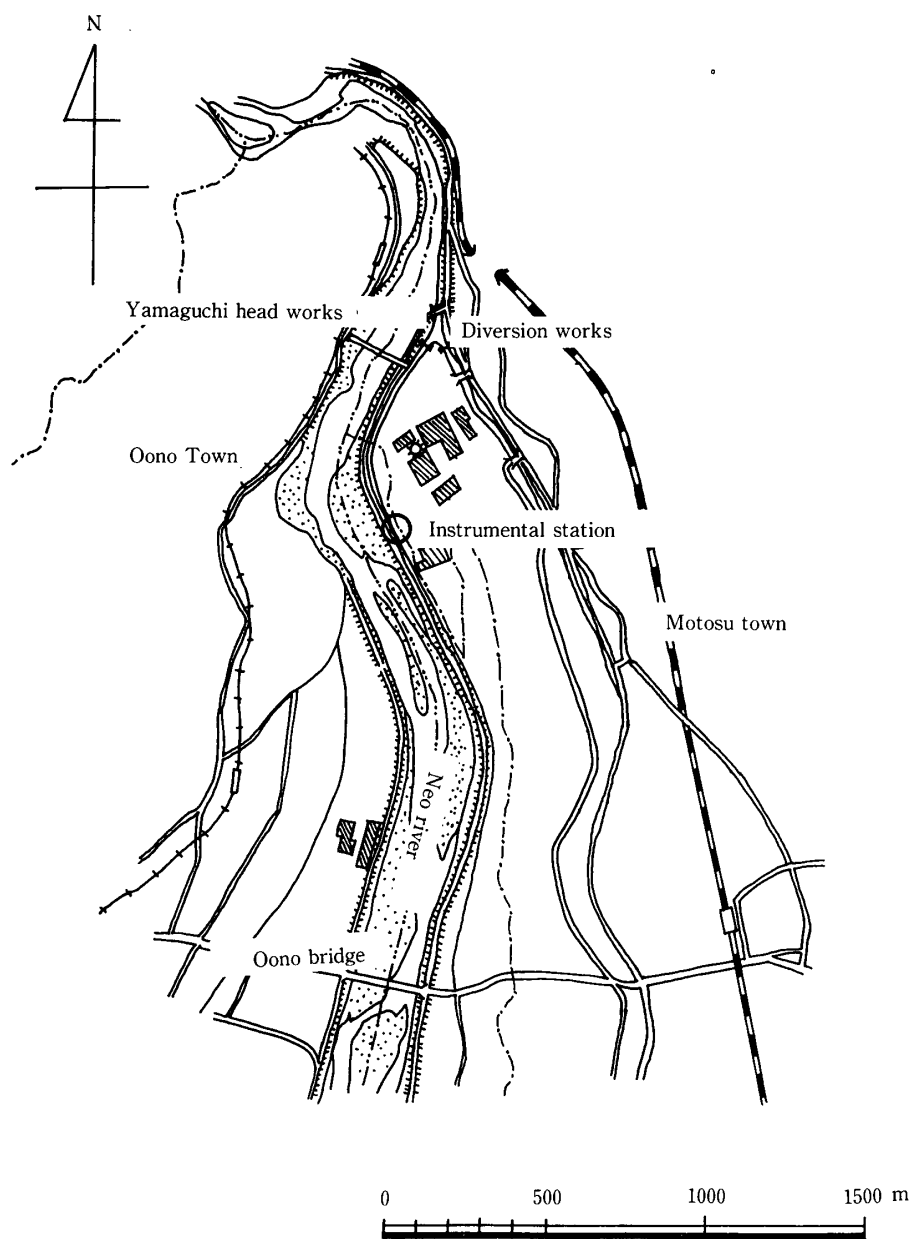


Fig. 2. Instrumental station in Makuwa irrigation channel.

Table 1. Hydraulic condition

| | | |
|-------------------|-------------------|-------------------------|
| Channel width | (B) | 10.0m |
| Channel depth | (H) | 0.31m |
| Aspect ratio | (B/H) | 32.2 |
| Discharge | (Q) | 4.15m ³ /s |
| Mean velocity | (U) | 1.37m/s |
| Froude number | (Fr) | 0.78 |
| Reynolds number | (Re) | 4.19 × 10 ⁵ |
| Channel slope | (I) | 0.40 × 10 ⁻² |
| Friction velocity | (u _*) | 0.11m/s |

ログ・デジタル変換によって得た全てのデータを使い、基本的な統計諸量の計算を行った。この計算結果を実験番号、計測時間、流下方向の平均流速 (\bar{U}) と垂直方向の平均流速 (\bar{W}) と共に Table 2 に示す。

流下方向の乱れ強度 (変動流速の二次モーメントを平均流速で無次元化した値) Iu' は下層で14~18%、中層で8~10%、上層で6~7%であって、下層ほど乱れ強度は大きい。垂直方向の乱れ強度 Iw' も値は小さいが、同様に下層ほど大きく、下層で5~8%、中層で4~5%、上層で2~3%であった。

流下方向の歪み係数 (変動流速の三次モーメントを平均流速で無次元化した値) Su' は下層で正、上層で負の値を示している。しかしながら、垂直方向の歪み係数 Sw' については Su' と同じ結果は得られなかった。

流下方向の尖り係数 (変動流速の四次モーメントを平均流速で無次元化した値) Fu' は一つの実験を除いて、3以下であり、乱れは鈍峰分布側にある。垂直方向の尖り係数 Fw' は3以下の場合も3以上の場合もあり、定性的に述べることはできない。

2. 移動平均法による乱流の大規模スケール

移動平均法⁴⁾は移動傾向線を推定する方法であるが、乱流の大規模スケールの抽出にも適応できると考えられる。これは平均値の計算区間を一部分重複させながら、それぞれの区間の平均値を連結する方法が採用される。この移動平均法によれば、

- (1) 時系列を細かく分け各移動平均区間を短くするほど傾向線は原時系列に接近する。
- (2) 時系列に明瞭な波形の周期がみられる場合、その周期またはその周期の倍数を移動平均区間にとれば、時系列の波形を完全に除去した傾向線を推定することができる。
- (3) 波形の周期が変化するときには、移動平均の区間もそれに応じて変化させて、波形を除去した傾向線を求めることが出来る。

時系列の傾向変動が直線的な場合には、単純移動平均によって、傾向線を得ることができる。これは時系列の移動平均区間を $1 \sim n$, $2 \sim (n+1)$, $3 \sim (n+2)$, ……のように順次移動させて、各区間ごとの平均値を連結して傾向線を推定する。

本研究においては、これまでの乱流現象に関する予備的な計算の結果を参考にして、単純移動平均法を採用し、さらに時系列の移動平均区間を重複させずに $1 \sim n$, $n+1 \sim 2n$, $2n+1 \sim 3n$, ……のように順次移動させて、各区間ごとの平均値を連結して乱流の大規模スケールを推定する。

垂直方向の乱流の大規模スケールは水深によって規定され、水深以上の大規模スケールは存在しないので、ここでは流下方向の乱れ u' の原系列データに0.25秒 (データ数5個)、0.50秒 (10個)、2.5秒 (50個)、5.0秒 (100個)、10.0秒 (200個) の5種類の移動平均化操作をした。計算に使用したデータは、各実験において異常なところを取り除き300秒間について計算した。計算結果の一例を Fig. 3 に示す。

図のように、0.05秒間隔の原系列データに対して、0.25秒と0.50秒の移動平均化操作をした場合には明瞭でないが、2.5秒と5.0秒の移動平均化操作をした場合には10~20秒の、また10.0秒の移動平均化操作をした場合には30秒~1分の乱流の大規模スケールが認められる。これを凍結乱流の仮設によって長さのスケール

Table 2. Statistical parameter

| Run No. | Measuring time s | z/H | \bar{U} cm/s | Iu' | Su' | Fu' | \bar{W} cm/s | Iw' | Sw' | Fw' |
|---------|------------------|-------|----------------|-------|-------|-------|----------------|-------|-------|-------|
| TU8601 | 1,200 | 0.1 | 79.0 | 0.18 | 0.00 | 2.8 | -8.6 | 0.08 | -0.24 | 3.1 |
| TU8602 | 900 | 0.1 | 92.0 | 0.14 | 0.00 | 2.7 | -4.3 | 0.05 | 0.14 | 2.8 |
| TU8603 | 600 | 0.1 | 93.0 | 0.13 | 0.10 | 2.8 | -5.0 | 0.05 | 1.32 | 17.0 |
| TU8604 | 1,140 | 0.5 | 126.0 | 0.09 | -0.17 | 2.8 | -4.6 | 0.04 | 0.21 | 2.9 |
| TU8605 | 780 | 0.5 | 121.0 | 0.10 | -0.23 | 2.8 | -10.0 | 0.04 | 0.21 | 3.5 |
| TU8606 | 660 | 0.8 | 137.0 | 0.07 | -0.31 | 2.8 | -0.1 | 0.03 | 0.07 | 3.1 |
| TU8607 | 1,200 | 0.8 | 138.0 | 0.07 | -0.39 | 3.2 | 0.2 | 0.03 | -0.15 | 3.4 |

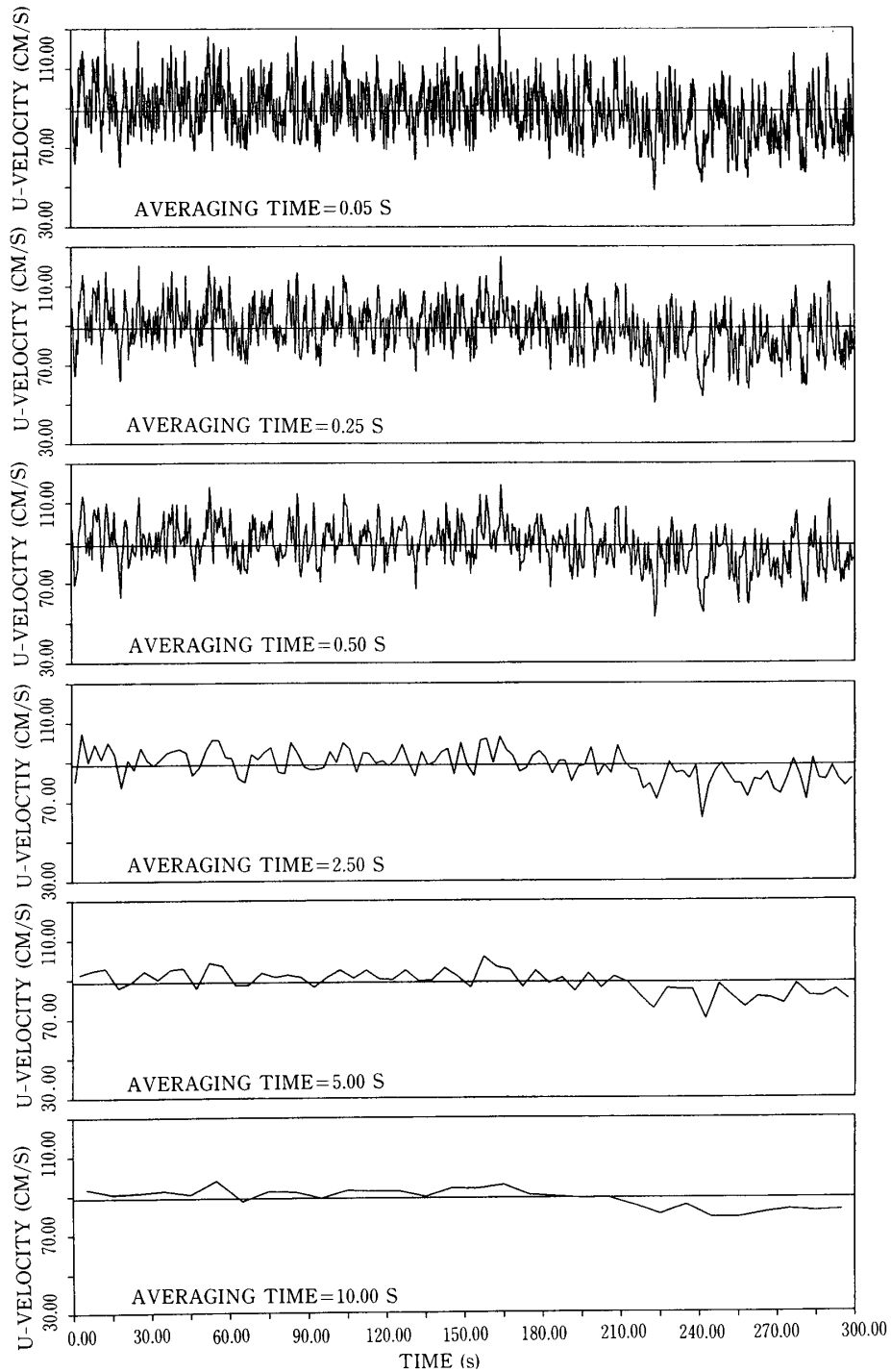


Fig. 3. Wave pattern of moving average in lower layer.
 $(z/H=0.1, H=0.31\text{m}, B=10.0\text{m}, Re=4.19 \times 10^5)$

ケールに変換すると、水路幅の2倍から10倍のスケールの渦が存在することになり、これが水平方向の最大スケールの渦⁵⁾に相当するものと考えられる。

3. 相関解析法によるコレログラムと時間積分スケール

真桑用水におけるコレログラムの一例を Fig. 4-1と Fig. 4-2 に示す。自己相関係数の計算においては各データを100秒(2,000個)間隔に分割して行った。図はそれぞれ水路の上層と下層におけるものである。コレログラムはずらし時間によって、どれほどの相関性があるかを検討するものであり、さらに、自己相関係数の値が最初に0になるまでの積分時間スケールを求める。

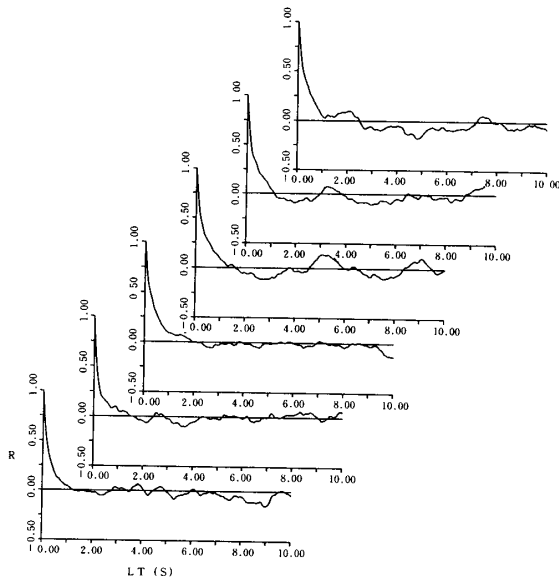


Fig. 4-1 Auto-correlogram in lower layer.
($z/H=0.1$)

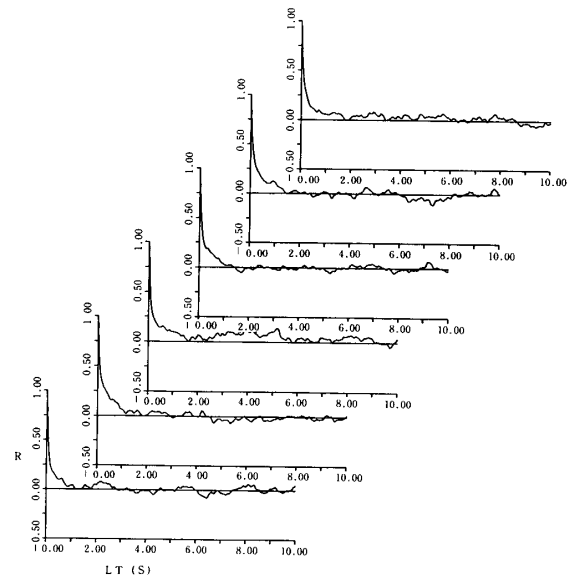


Fig. 4-2 Auto-correlogram in upper layer.
($z/H=0.8$)

各種の実験データについて自己相関係数を計算したところ、流下方向では下層が上層よりもゆるやかな曲線で減少しており、自己相関係数が0になるラグタイムが長い。一方、上層では短いラグタイムで自己相関係数が0になっている。

また、垂直方向については上層、下層共に短いラグタイムで自己相関係数の値が0になってしまうが、上層と下層におけるコレログラムを比較すると、流下方向におけるものと同様に、下層の方が上層よりも自己相関係数が0になるラグタイムが長いということが得られた。

自己相関係数が0になるラグタイムをおおよその数値で示すと、流下方向については、下層で約2秒、上層で約1秒であり、下層は上層の2倍であった。垂直方向については、下層で約1秒、上層で約0.1秒であって、下層は上層の約10倍となった。

また、自己相関係数の値が最初に0になるまでの積分時間スケールを求めると、流下方向においては、下層で約0.4秒、上層で約0.1秒であり、下層は上層の4倍であった。垂直方向については、下層で約0.1秒、上層で約0.05秒であって、下層は上層の2倍の値が得られた。

これらの解析結果より、流下方向の乱れ u' は垂直方向の乱れ w' よりも、また、下層の乱れ u' と w' は共に上層のものよりも時間的な相関性が高く、連続性があると考えられる。

なお、流下方向の下層のコレログラムにおいて、ラグタイムが約1秒のところでは僅かなピークがみられた。これを凍結乱流の仮設によって長さのスケールに変換すると、水深の数倍になり、これが、いわゆるバースト現象に相当する垂直方向の間欠的な突き上げ現象であると考えられる。

4. スペクトル解析法によるスペクトル形状

真桑用水におけるスペクトル形状の計算結果の一例を Fig. 5-1 と Fig. 5-2 に示す。図の縦軸はエネルギースペクトル密度、横軸は周波数であり、両対数表示であって、それぞれ水路の上層と下層におけるものである。スペクトルの計算は、自己相関係数の計算の場合と同様に、1ケースについてデータを100秒(2,000個)間隔のデータに分割して、Blackman and Turkey 法⁶⁾により求めた。なお、ここでは流下方向の乱れ u' についての計算結果について述べる。

下層におけるスペクトル形状には、特別なエネルギーのピークはみられないが、全体的に右下がりの曲線を示しており、およそ0.2Hzと1.0Hz付近で波形の変曲点が存在するように思われる。その後高周波数側に移行するにつれて、急速にエネルギーが減少する。スペクトルの勾配は0.2Hzから1.0Hzの周波数の領域においては、平均値で約-1.3であって、1.0Hzよりも高周波数の領域においては急勾配となり、平均値で約-2.7である。このことより1.0Hz付近の周波数に乱流構造の変化点があると考えられる。また、周

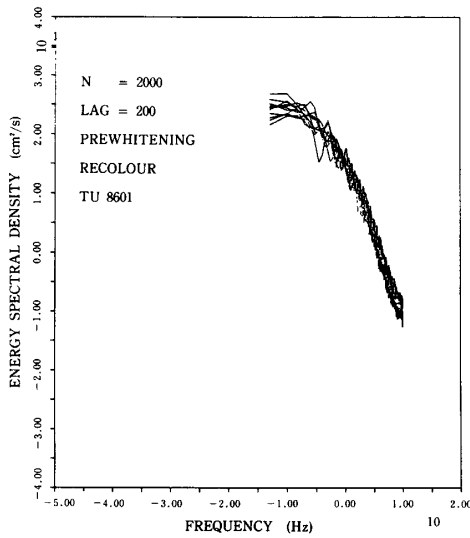


Fig. 5-1 Energy spectral density in lower layer. (z/H=0.1)

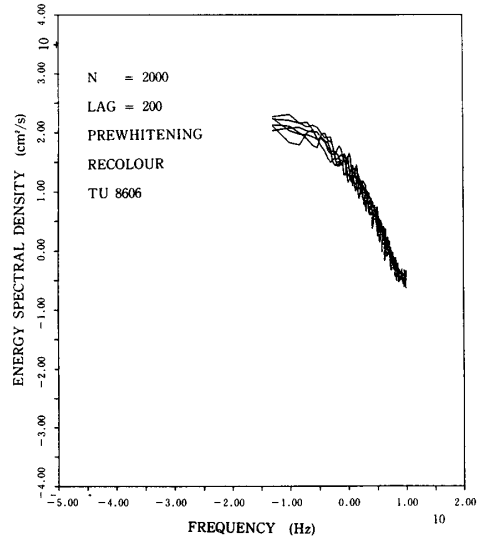


Fig. 5-2 Energy spectral density in upper layer. (z/H=0.8)

波数1.0Hz は自己相関係数が最初に 0 になるラグタイムに近い値であり、興味深い。

上層におけるスペクトル形状も、下層における形状と同様であって、特別なエネルギーのピークは見られず、全体的に右下がりの曲線を示しており、この場合もおよそ0.2Hzと1.0Hz付近で波形の変曲点が存在すると考えられる。スペクトルの勾配は0.2Hz から1.0Hzの周波数の領域においては、平均値で約-0.9、また、1.0Hz よりも高周波数の領域においては、平均値で約-2.0であった。上層におけるスペクトル形状は下層におけるものよりも、ゆっくりと減衰している。また、一般的に言われているように乱流のエネルギーは、周波数の小さい乱れから大きい乱れに順次移行されてゆく機構、すなわちエネルギーのカスケード過程が認められた。

5. レイノルズ応力の原系列データと条件付抽出法

レイノルズ応力とは乱流中で流体層間の速度差を縮めようとして、層間におこるせん断抵抗のことであり、例えば、流下方向の乱れ成分 u' と垂直方向の乱れ成分 w' の積の時間平均値 $-\overline{\rho u' w'}$ で表される。

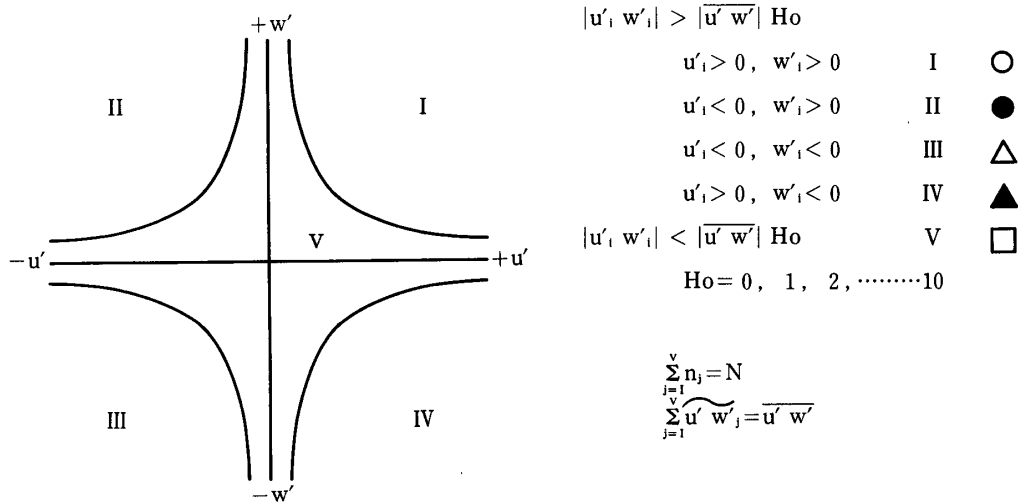


Fig. 6. Explanation of conditional sampling method of Reynolds stress.

本研究では、レイノルズ応力が開水路乱流場でどのような分布状態をしているかを検討した。そして、ここでのレイノルズ応力 $\overline{u'w'}$ の内部構造については、平均的なレイノルズ応力の値に各時系列の瞬間値が寄与する割合を考えた。すなわち、流下方向の乱れ成分 u' と垂直方向の乱れ成分 w' が、平均的なレイノルズ応力値にそれぞれどのように寄与しているかを検討するため Fig. 6 のような条件付抽出法を考慮した方法を考える。図は横軸に u' 、縦軸に w' をとって、 u' と w' が共に正值の場合を第I象限、 u' が負値で w' が正值の場合を第II象限、 u' と w' が共に負値の場合を第III象限、 u' が正值で w' が負値の場合を第IV象限と、象限別の分類をした。さらに Fig. 6 中に示すように、 $Ho |\overline{u'w'}|$ なる Ho を考えて、平均的なレイノルズ応力値の整数倍 ($Ho = 0 \sim 10$) の双曲線の範囲以下を第V象限と考える。そして、全データ個数 (N) に対する各象限に存在する個数 (n_j) の割合 (n_j/N) と平均的なレイノルズ応力値 ($\overline{u'w'}$) に対する各象限における値 ($\overline{u'w'_j}$) の寄与率 ($\overline{u'w'_j}/\overline{u'w'}$) を求めた。レイノルズ応力についての一般的な性質からして、第Iと第III象限よりも第IIと第IV象限に存在する確率が当然高いと考えられる。

次に、真桑用水におけるレイノルズ応力 $\overline{u'w'}$ についての原系列データの一部を Fig. 7 に示す。図の縦軸はレイノルズ応力値、横軸は時間であり、図中の横線は Ho を 0 から 10 まで増加させた時の値である。さらに、レイノルズ応力の条件付抽出法による下層についての計算結果を Fig. 8-1 に、上層の結果を Fig. 8-2 に示す。なお、図中の印は Fig. 6 中の印と同じである。

これらの図より、全データに対する各象限に存在する個数の割合 (n_j/N) について考察すると、第I象限と第III象限の同符号同士が存在する確率、また、第II象限と第IV象限の異符号同士が存在する確率はほぼ等しいが、常に、異符号の積が存在する確率は同符号の積が存在する確率のおよそ倍である。しかし、 Ho が 3 ~ 4 でこれらの存在確率はほぼ 0 になることより、レイノルズ応力はかなり原点に集中していると考えられる。

次に、平均的なレイノルズ応力値に対する値の寄与率 ($\overline{u'w'_j}/\overline{u'w'}$) を考察すると、第I象限と第III象

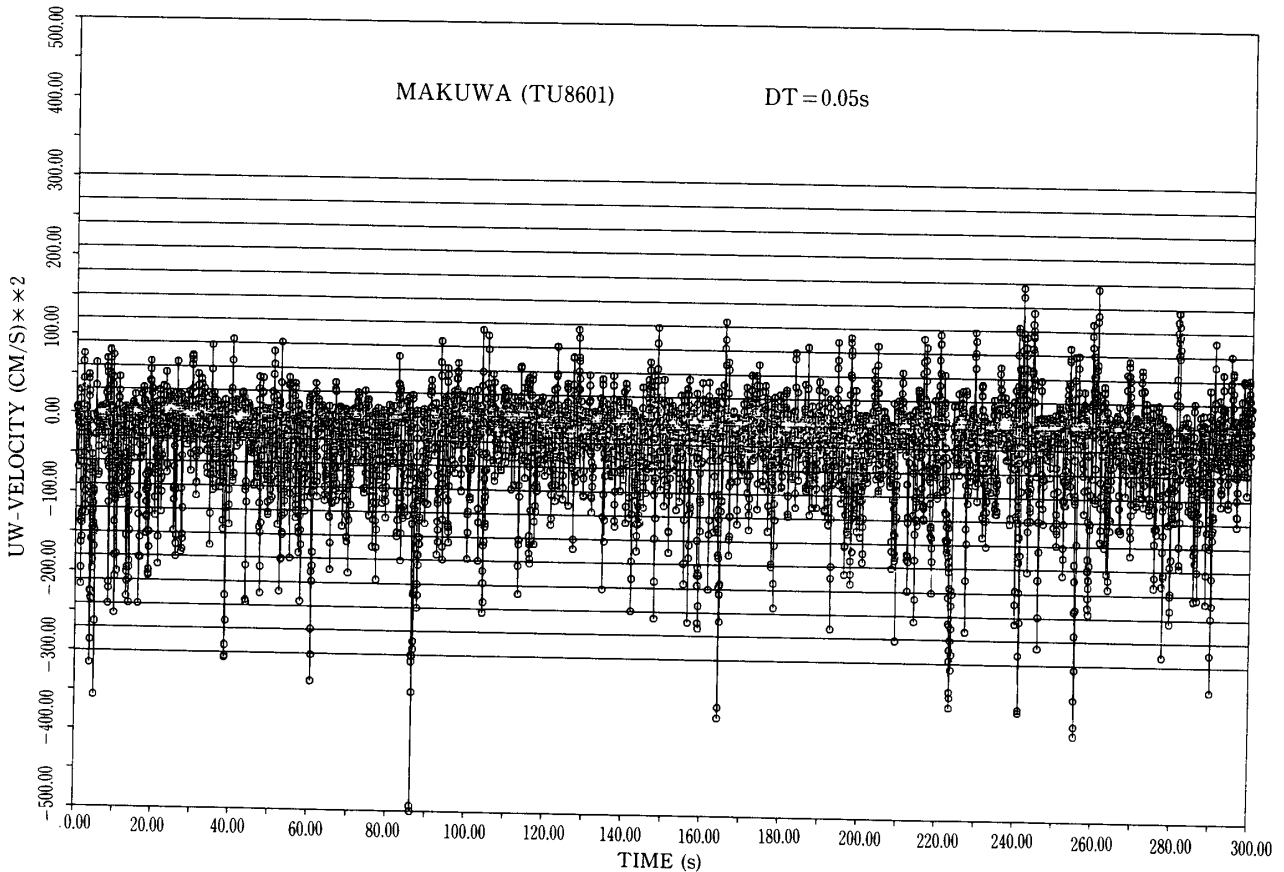


Fig. 7. Wave pattern of Reynolds stress in lower layer.
 ($z/H = 0.1, \overline{u'w'} = -30.0 \text{ cm}^2/\text{s}^2, Fr = 0.78, Re = 4.19 \times 10^5$)

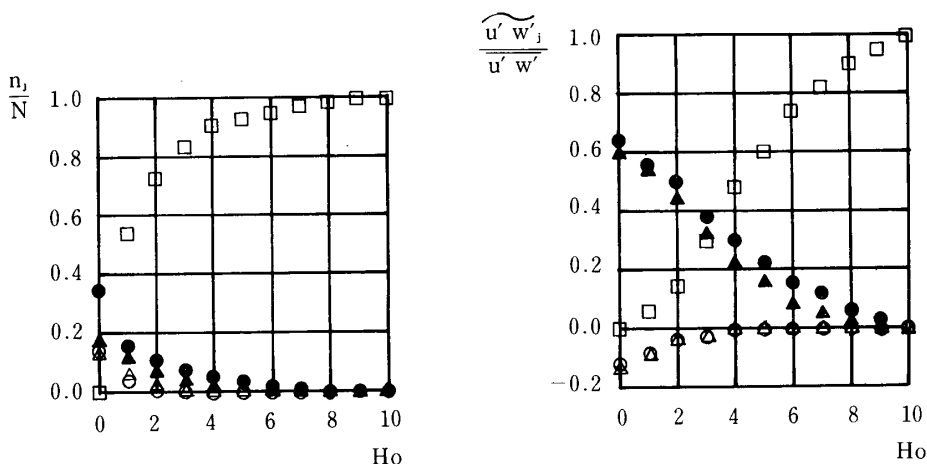


Fig. 8-1 Distribution of Reynolds stress in lower layer. ($z/H=0.1$)

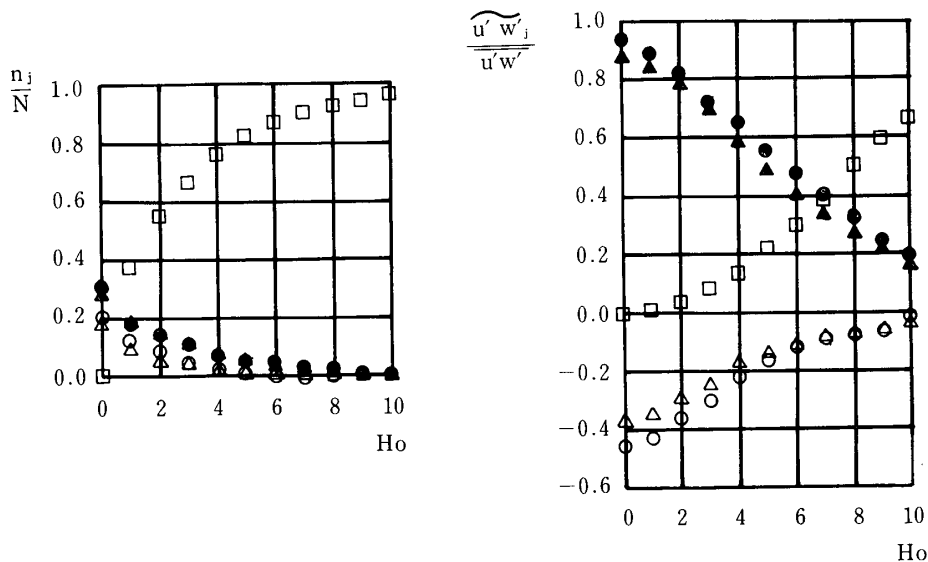


Fig. 8-2 Distribution of Reynolds stress in upper layer. ($z/H=0.8$)

限の同符号同士は、値は正でもレイノルズ応力値を小さくする作用をするが、その影響は小さい。一方、第II象限と第IV象限の異符号同士は、その反対にレイノルズ応力に対するその値の寄与率は大きいことが得られた。すなわち、 $Ho=0$ の時、レイノルズ応力に対する値の寄与率は60から80%であって、強くレイノルズ応力に寄与していることが得られた。

なお、第V象限に存在する個数の割合は、下層においては $Ho=2\sim3$ で80%を占めるが、上層では $Ho=4\sim5$ において80%を占めている。また、第V象限のレイノルズ値への寄与率は、下層では $Ho=6\sim7$ でおおよそ80%を占めるが、上層においては $Ho=10$ になっても40~60%である。

謝 辞

本研究を行うにあたり、席田用土地改良区並びに岐阜大学農学部農業工学科農業水工学研究室、昭和60年度専攻生石黒比利君、岡木典男君、川口厚君、昭和61年度専攻生奥谷幸晴君、長谷川貴織君と日比野剛司君に実験の協力を得た。また昭和62年度科学研究費（研究課題番号60560243）の交付を受けた。ここに厚く謝意を表します。

文 献

- 1) 板垣 博・古田 力：流速計の特性と開水路流れの乱流現象。岐阜大農研報(48)：159-171, 1983.
- 2) 余越正一郎：びわ湖疎水における乱れの観測。京大防災研年報(9)-B：513-523, 1966.
- 3) 田中雅史：小型回転式流速計による乱流解析について。三重大農学報(40)：25-41, 1974.
- 4) 岸根卓郎：“理論・応用統計学”東京：養賢堂, 182-185, 1975.
- 5) 余越正一郎：河川の大規模乱れ。京大防災研年報(10)-B：199-206, 1967.
- 6) 日野幹雄：“スペクトル解析”東京：朝倉書店, 210-236, 1977.