

# 水流の速度変動測定およびそのデータ解析について\*

白 樫 正 高\*\* 富 田 幸 雄\*\*\* 渡 辺 浩 史\*\*\*\*

Masataka SHIRAKASHI, Yukio TOMITA, Hiroshi WATANABE

Hot wire anemometry is generally used to measure the velocity fluctuation of turbulent gas flow. However, for liquid flow application of hot wire method is not always convenient because of several difficulties of measuring technique. Therefore, reports on experimental results are few for turbulent liquid flow. We measured the velocity fluctuation of turbulent water flow behind a grid using constant temperature hot film anemometer and investigated the influence of water temperature, sticking of bubble or other contaminants and the direction of flow. The results are treated digitally to obtain properties concerning to the structure of turbulence, and several remarks are made about their calculation.

## 1. 結 言

乱流場における乱れの構造を知る事は流体中の物質拡散や反応流体の混合状態を予測する上で極めて重要である。気体に対しては種々の流れについて定温度型熱線流速計により 0~100kHz の周波数領域にわたる速度変動の測定がなされ、その結果から相関係数、積分尺度、エネルギースペクトル等の乱れの構造を表す統計的な量が求められている<sup>1)2)3)</sup>。熱線流速計は金属の電気抵抗が温度により変化する現象を利用したもので、その検出部はいわゆる熱線 (Hot Wire) とよばれる電流により加熱された直径 5 $\mu$  長さ 3 mm 程度の白金あるいはタングステン線である。熱線の流れに浸すと周囲の流体の速度に対応する熱量が熱線から奪われるが、定温度型熱線流速計は、各瞬間の流速に応じて放熱量に見合う電流を熱線に供給して一定の設定温度 (気流の場合 150~170°C) に保つと同時にこの電流を流速に比例する電圧に変換して出力するものである。液体の流れに対する熱線流速計の使用における問題として、気流の場合と同様に流体中の異物が検出部に付着して出力が変化する事に加えて、液体に特有のものとして下記のようなものがある。

- (1) 検出部の熱線に作用する流体抵抗が大きいので、機械的強度が要求される。
- (2) 水のような導電性流体の場合、検出部を流体から

絶縁しなければならない。

- (3) 検出部の温度を液体の沸点以上に設定できないため、液温の変化の影響が大である。
- (4) 検出部に気泡が発生する、あるいは流体中の気泡が付着する。

検出部の熱線の替りに石英ガラス表面上の白金薄膜 (例えば、厚さ 50~100Å, 幅 0.1~0.2 mm) を用いたプローブは熱膜 (Hot Film) プローブとよばれ、用途に応じて種々の形状のものが市販されている。水流に使用されているものは絶縁のため白金膜上にさらに石英膜がコーティングされている。このような熱膜プローブを用いた場合、応答性は低下するが上記(1)(2)の問題は除かれる。しかしなお(3)(4)の問題は、特に水流の場合必要とされる事が多い 50 cm/s 以下の低流速において影響が大きいので、気流に比べ水流の速度変動の測定は困難であり、その測定結果の報告は少ない。熱線流速計以外の方法として電極反応を利用したもの<sup>4)</sup>、あるいはレーザードップラ流速計によるもの<sup>5)</sup> 等があるが、いずれも開発されてからの日が浅く、使用条件が限られており、速度変動の測定法として未だ一般的ではない。

そこで本研究においては、比較的低速 (約 20 cm/s) の水流における乱流格子下流の速度変動を、熱膜プローブを用いた定温度型熱線流速計により測定し上述の問題点について調べるとともに、その測定結果を統計的に処理して乱れの構造を表す諸量を求める際に注意すべき事項について検討したのでここに報告する。

## 2. 記 号

\* 原稿受付昭和54年1月17日。昭和52年6月4日日本機械学会関西支部第237回講演会にて講演。

\*\* 長岡技術科学大学 (長岡市上富岡町長峰1603-1)

\*\*\* 東京工業大学 (東京都目黒区大岡山2-12-1)

\*\*\*\* 富士通 (東京都稲城市大丸1405)

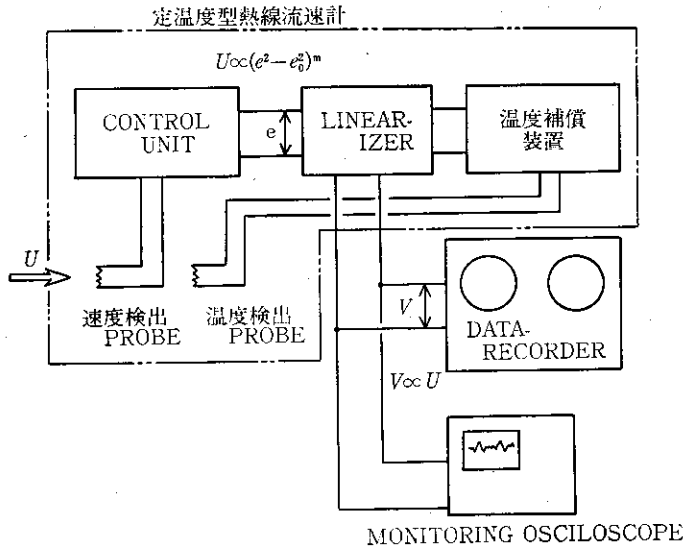


図1 速度測定装置

$C_D$ ; 格子の抗力係数.  $d_0$ ; 格子丸棒直径, 7mm.  
 $E(n)$ ; 乱れのエネルギスペクトル.  $e$ ; コントロールユニット出力電圧.  $e_0$ ;  $U=0$ における $e$ の値.  $i$ ; ある測定点についてのデータ番号.  $j$ ; あるデータ内のサンプル番号.  $L, T_1, T_2$ ; 流路各領域, 図3.  $l_0$ ; 格子中心間距離, 20mm.  $M$ ; 1測定点当りのデータ数.  $N$ ; 1データ当りのサンプル数.  $n$ ; 乱れの周波数.  $q$ ; 検定用ノズル流量.  $R_E$ ; オイラー時間相関係数.  $Re$ ; レイノルズ数,  $=l_0 \bar{U} / \nu$  ( $\nu$ は流体の動粘度).  $t$ ; 時間.  $U$ ;  $x_1$ 方向流速.  $U_{i,j}$ ; AD変換により得た $i$ 番目のデータの $j$ 番目の流速.  $u, u_{i,j}$ ;  $U, U_{i,j}$ の変動成分, 式(1), (2).  $V$ ; 測定系出力電圧.  $V_0$ ; 流速計調整時出力.  $x_0$ ; 乱流格子取付位置, 図3.  $\alpha$ ; プロブ軸と流れの方向のなす角, 図9.  $\beta$ ; 格子の開孔比,  $=(l_0 - d_0)^2 / l_0^2$ .  $\theta$ ; 流水温度.  $\theta_0$ ; 熱線流速計調整時水温.  $A_E$ ; 乱れの空間的積分尺度.  $\tau$ ; 時間々隔.  $\tau_S$ ; サンプル間隔.  
 [座標系]  $O-x_1, x_2$ ; 図3  
 [添字等] 一; 時間的平均.  $\wedge$ ; 多数のデータについての平均

### 3. 実験装置および実験方法

3.1 速度測定装置 使用した流速計は図1に示されるように, 検出部を一定温度に保つのに必要な電流を流速の変化に応じて供給するとともにこの電流に対応する電圧 $e$ を出力するコントロールユニット,  $e$ を流速 $U$ に比例する電圧 $V$ に変換するリニアライザおよび流体温度

のゆるやかな変化に対する温度補償装置より構成されている. 測定においては, 出力 $V$ をデータレコーダにより磁気テープに記録すると同時にブラウン管オシロスコープで常時監視し, 後述のような異常発生の場合は測定を中止してプローブ洗浄等の処置を行った. 使用した熱膜プローブは図2のような石英棒先端の円錐部分の側面に白金膜を蒸着した上を石英被覆により絶縁したもので, カタログによる周波数応答性は3kHzである. 水温変化の影響を補償するための温度検出探子は熱膜プローブの

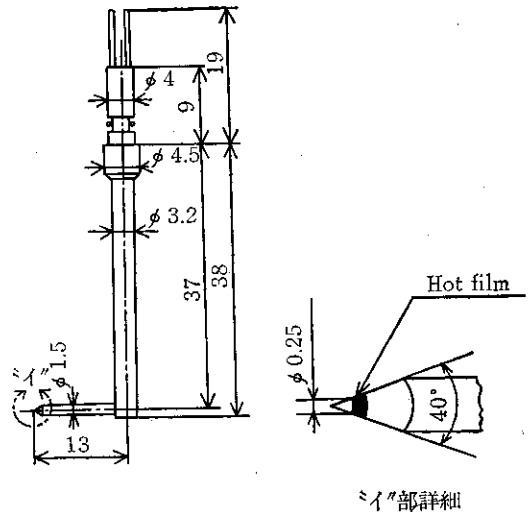


図2 熱膜プローブ (日本科学工業1231W)

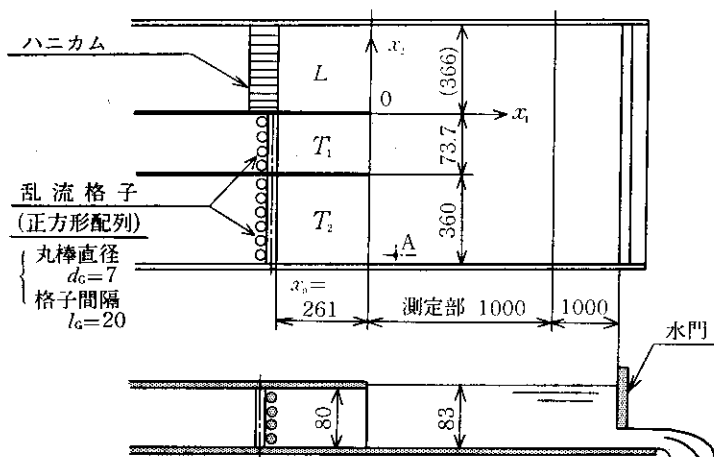


図3 実験流路概略

ベンチュリ流量計より

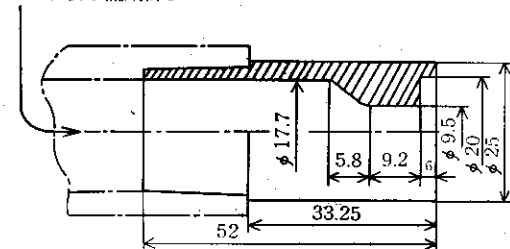


図4 検定用ノズル

下流に取り付けた。この補償は流れの場合全体に一樣で、時間的に緩かな温度変化を対象とするものであり、温度についても速度変動同様の非正常性あるいは空間的非一樣性がある場合にこれを補償する事はできない。

3・2 測定流路および検定用ノズル 図3に示した長方形断面の流路に取り付けられた正方形配列の乱流格子下流の  $x_1$  方向速度  $U(t)$  を測定した。測定はすべて流路底面から 4.1cm の面内で行った。同じ流路内の測定点に影響しない位置 (図3点A) に検定用ノズル (図4) を取り付け、測定流路の水を循環する管路から分流した水を流して熱線流速計の調整および測定中の検定を行った。検定用ノズル流速  $U_N$  と流量  $q$  の関係を図5に示す。流速計検定用の流れは、流速および方向が安定している事が必要であるのは当然であるが、さらに検定用の流速が一樣の部分 (この実験では、図5の  $U=U_N$  の領域) がプローブに比十分に大きい事、流水の諸性状および温度が測定しようとしている流れと同一である事が重要である。

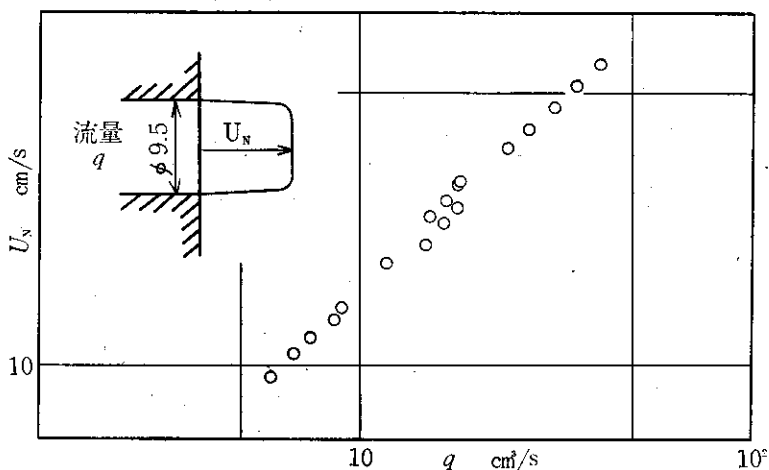


図5 検定用ノズルの流量と流速の関係

## 4. 測定上の問題点

4.1 水温変化の影響 流体の温度変化に対する補償を行わない場合, 流体の温度が上昇すると熱線流速計出力は低下し, その程度は検出部の設定温度と流体温度の差に依存する。液体に対してはその沸点温度により設定温度の上限が抑えられるが, 流速が小さい程熱膜上に気

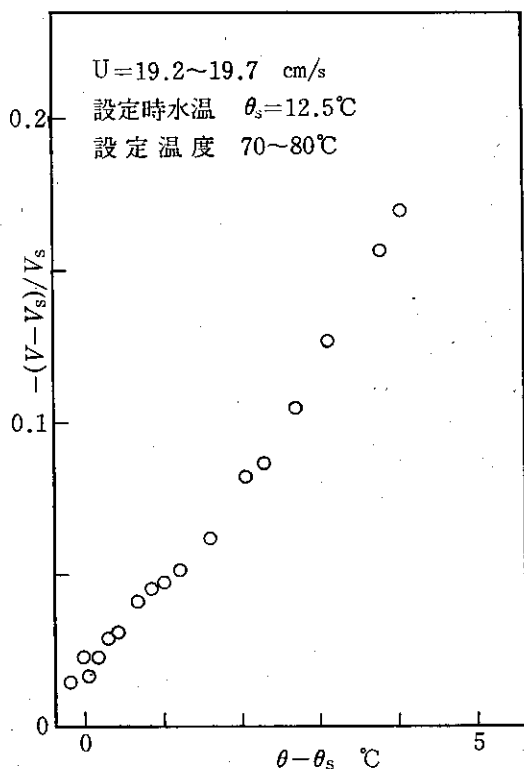


図6 水温変化の影響

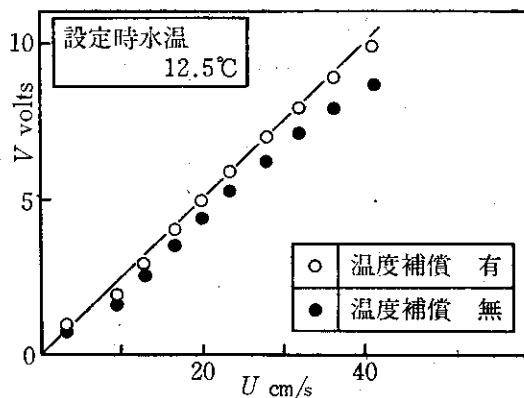
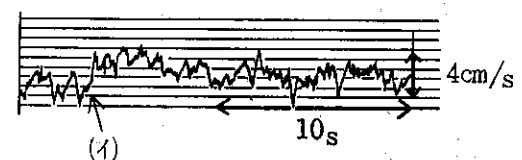
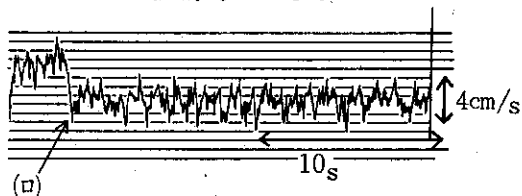
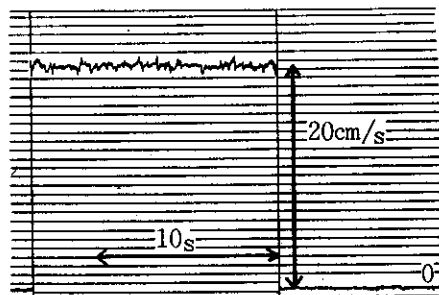


図7 測定系出力と流速の関係

泡が発生しやすいので, 本実験の場合の設定温度は70~80°Cとした。このとき,  $U=20\text{cm/s}$ , 水温の上昇範囲4°C以下なる条件下における水温1°Cの上昇についての出力の低下は調整時出力の約4%である(図6)。温度補償を行った場合の流速  $U$  と  $V$  の関係を, 補償しない場合と比較して図7に示す。 $U < 14\text{cm/s}$  で直線的関係からずれているのは自然対流の影響によるものと考えられる。前述のようにこの温度補償は空間的に一様かつ時間的に緩やかな流体温度の変化を対象とするものであり, 例えば熱噴流のような速度変動と同等の温度変動があるような場合は, 速度測定値に図6から類推されるような誤差が含まれる事になる。

4.2 気泡あるいは異物の付着について 図8は測定系出力  $V$  を電磁オシログラフで記録したものである。 $a$  は図3の  $I$  領域内の点における速度,  $b$  は乱流格子下流の  $T_1$  領域,  $c$  は検定用ノズルにおける速度を表し, いずれも平均流速は20 cm/s である。プローブ検出部に気泡が付着した場合(流水中の気泡が付着する場合と, 熱膜の加熱により気泡が発生する場合とがある)は図8b—(ロ)のように出力が増加する。このときプローブ検出部

← 時間

a  $x_1=8\text{cm}$   $x_2=5\text{cm}$ b  $x_1=60\text{cm}$   $x_2=-3.6\text{cm}$ 

c 検定用ノズルにおける標準流速

図8 速度変動

を注意深く観察すれば容易に気泡を見る事ができる。流水中の異物が付着すると a-(i) のように出力は低下するが異物の付着を直接肉眼で見る事はできない場合が多い。いずれもやわらかい毛筆で拭く事により復元したが、異物の付着の場合は速度変動との区別が難しく、検定用ノズルで出力が正常に回復した事を確認する事が必要である。気泡や異物の付着は偶発的に起るので、信頼性の高いデータを得るためには、出力を記録すると同時に常時監視し、異常発生とともに測定を中止して復元のための処置をとらねばならない。この操作により最後尾に図 8 a-(i) や b-(ii) のような異常部分を持つ種々の長さの信号が磁気テープに記録される。後述のように乱れの構造を調べるためには、対象とする周波数の範囲に応じて必要な信号の長さが定まり、また安定した統計的平

均量を得るにはこのような信号が多数必要とされる。したがって実験においては 1 つの測定点について正常な部分が所定の時間連続する信号—健全なデータ—が所定の個数だけ記録されるまで測定を続ける事が必要であり、データ処理の際にいろいろな長さの多くの信号の中から健全なデータを選択せねばならない。本実験では 1 測定点について正常な部分が 12 秒以上連続する信号が 20 個記録されるまで測定を行った。これは記録された信号の数の  $1/4$  乃至  $1/3$  程度である。

**4.3 プローブの方向特性** プローブ検出部の伝熱面が Hot wire のように円筒面である場合、測定される流速は円筒軸に垂直な面内の速度成分であるとされるが、本実験で用いたプローブのように伝熱面が円錐面である場合このような方向特性とはならない。検定用ノズルで調べた、一定流速に対する出力  $V$  と、プローブ軸と流れ方向のなす角  $\alpha$  との関係を図 9 に示す。この図からわかるように円錐形プローブによりプローブ軸方向の速度を測定する場合、プローブ軸を流れに平行にする事が重要であるとともに、これと直角方向の乱れが大となる程出力  $V$  は正しい値よりも大きくなる点に注意せねばならない。

## 5. 乱れの構造解析について

磁気テープに記録されたアナログ電圧信号のうち、気泡や異物の付着によって妨げられない正常部分が 12 秒以上連続するものを、HITAC 10-II AD 変換システムにより 1 ms の間隔で 12000 個の整数値に変換した。整数化された信号は大型電算機 HITAC-8700 に入力され、検定用ノズルによる標準流速信号との比較から流速に換算され種々の統計的処理が行われた。以下、AD 変換の時

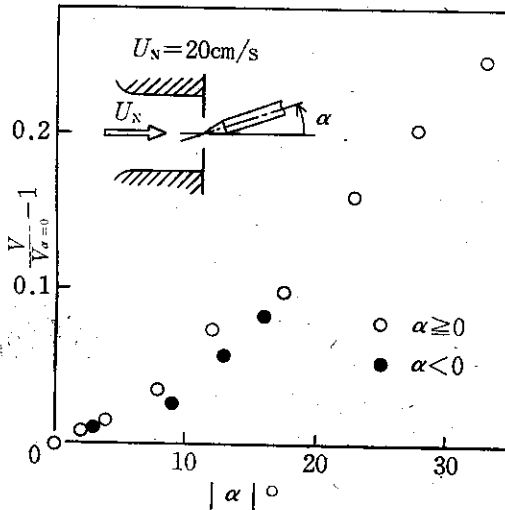


図9 円錐形プローブの方向特性

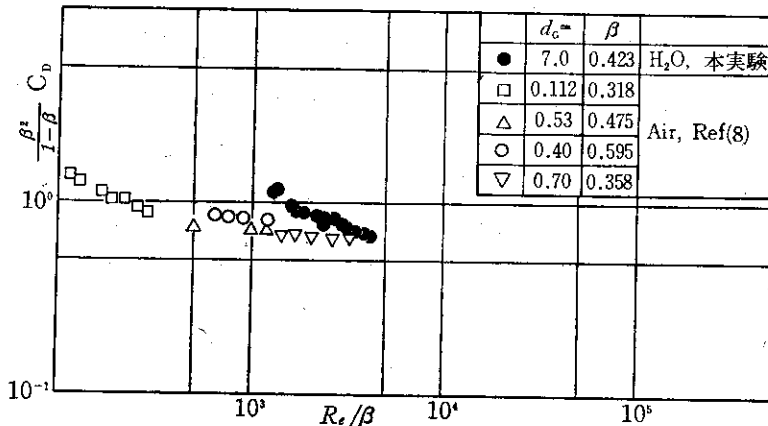


図10 格子の抗力係数

間々隔を「サンプリング間隔」とよび  $\tau_s$  で表す。またある測定点について  $AD$  変換により得た、 $i$  番目の信号の  $j$  番目の流速を  $U_{i,j}$  で表しこれを1個の「サンプル」とよび、 $N$ 個の連続するサンプルより成る一連の信号を1個の「データ」とよぶ事にする。

**5.1 平均流速および乱れのエネルギー** 乱流格子下流の乱れのエネルギーは、格子において流体がなす仕事により与えられ、格子での圧力損失で表される。実験に用いた格子の抗力係数  $C_D$  とレイノルズ数  $Re$  の関係を、格子の開口比  $\beta$  を考慮して気体についての実験結果と比較して図10に示す。格子における圧力損失は気体の場合と同様の傾向を示し、この乱流場の乱れの構造が気体系の場合と相似である事が予想される。以下の速度測定における平均流速 (20 cm/s) に対する抗力係数は  $C_D=2.39$  である。

平均的に定常な乱流における平均流速  $\bar{U}$  および変動成分  $u$  は次式

$$\left. \begin{aligned} \bar{U} &= \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T U(t) dt \\ u(t) &= U(t) - \bar{U} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (1)$$

で定義されるが、実際の測定により得られた有限の長さの信号をデジタル化して処理する場合、これらは次式(2)により計算される。すなわち、ある点の測定について  $i$  番目のデータから連続する  $N$  個のサンプルをとれば、

$$\left. \begin{aligned} \bar{U}_i &= \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N U_{i,j} \\ u_{i,j} &= U_{i,j} - \bar{U}_i \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (2)$$

また  $u(t)$  の RMS 値  $\bar{u}^2$  は単位質量の流体の持つ  $\bar{U}$  方向の平均的運動エネルギーの2倍を表し、ここでは次式(3)により計算される。

$$\bar{u}^2_i = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N u_{i,j}^2 \dots\dots\dots (3)$$

これらの計算により得られた  $u_{i,j}$ 、 $\bar{u}^2_i$  は、もとの信号  $U(t)$  から周期が  $(N-1)\tau_s$  より大なる変動成分を除いたものに相当し、式(2)の演算はアナログ処理におけるローカットフィルターと同等の機能を果たすと考えられる。

乱流格子下流の点についての測定結果から計算された  $\bar{U}_i$ 、 $\bar{u}^2_i$  を図11に示す。後述のエネルギースペクトルをフーリエ変換により求めるための便宜上、ここでは1データ当りのサンプル数  $N=4096$  とした。20個のデータについて平均流速  $\bar{U}_i$  はほぼ一定であり、異物の付着等の影響が無い事がこの図から確認される。これに対し乱れのエネルギー  $\bar{u}^2_i$  には極めて大きなばらつきがあり、乱流の性質である不規則性が顕著に現れている。各測定点について  $M=20$  個のデータの  $\bar{u}^2_i$  を式(4)により平均して求めた乱れのエネルギー  $\hat{u}^2$  の  $x_1$  方向の変化のようすを図12に示す。

$$\hat{u}^2 = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M \bar{u}^2_i \dots\dots\dots (4)$$

かくして得られた、水流の格子乱流における乱れの流れ方向の減衰は、気流についての実験式に格子の抗力係数  $C_D=2.39$  を代入した式 (図12A) にほぼ一致する事が

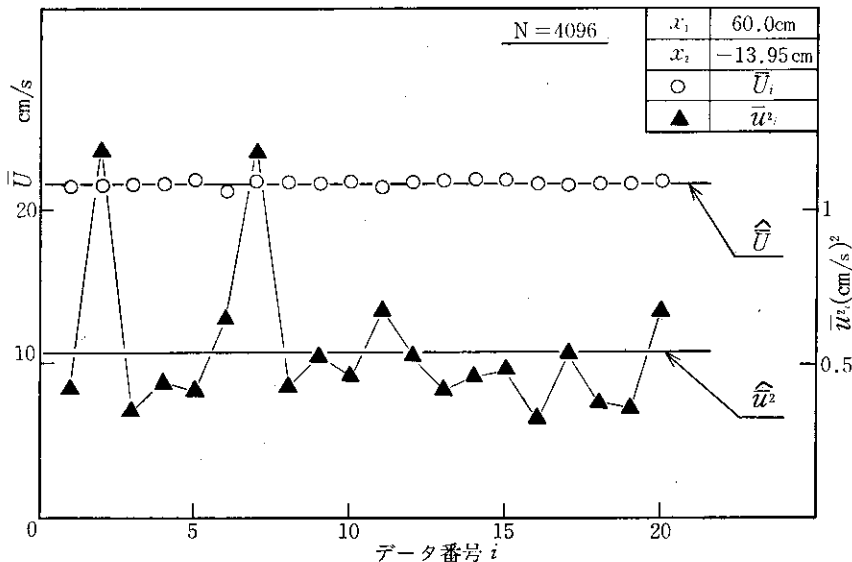


図11 平均流速と乱れのエネルギー

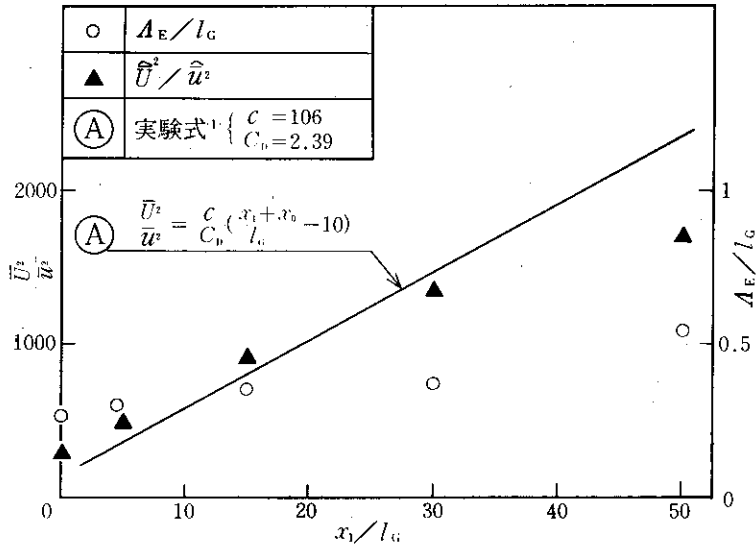


図12 乱れの減衰

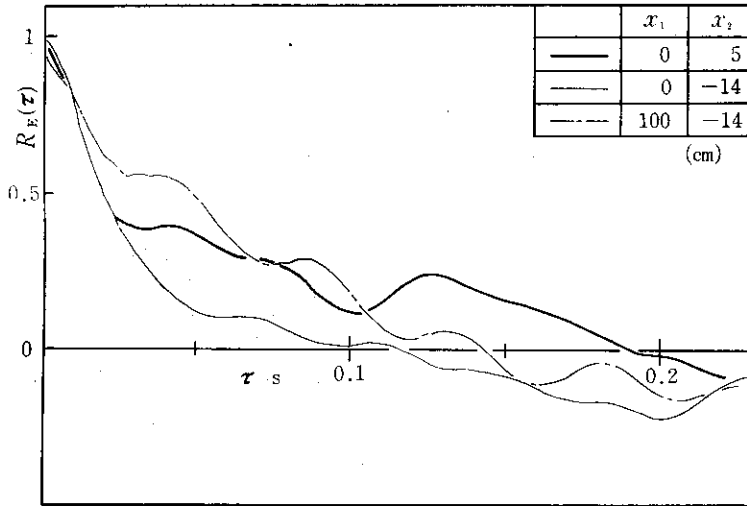


図13 Euler 時間相関係数

わかる。

5・2 相関係数および積分尺度  $u(t)$  の Euler 時間相関係数  $R_E(\tau)$  は、ここでは次式(5)により計算される。

$$R_E(\tau) = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M \left[ \frac{1}{\bar{u}^2} \left\{ \frac{1}{N_1} \sum_{j=1}^{N_1} u_{i,j} u_{i,j+k} \right\} \right] \quad \dots\dots (5)$$

ただし  $\tau = k\tau_s$  ( $k=0, 1, \dots, N_2$ )

ここで相関係数を求めようとする時間々隔が  $\tau=0 \sim N_2\tau_s$  であるとき、式(5)における  $u_{i,j}, \bar{u}^2$  は、式(2)において  $N=N_1+N_2$  として計算したものを用いるのが良い。

図13は  $N_1=N_2=401$ ,  $M=20$  の場合の計算結果であ

る。

$R_E(\tau)$  を  $\tau=0 \sim \infty$  で積分したものは時間の単位を持ち、その測定点においてある特定の変動が続く時間の尺度を表し Euler 的積分時間尺度とよばれる。これと平均流速  $\bar{U}$  の積は測定点を通過する乱れの大きさを表し、乱れの空間的積分尺度とよばれ乱流場の性質を表す重要な量の一つである。ここでは  $\tau=0$  から  $R_E(\tau)=0$  となる最小の  $\tau$  までの範囲について  $R_E(\tau)$  を積分して求めた時間尺度と平均流速  $\bar{U}$  の積で定義される空間尺度  $\Delta_E$  の流れ方向の変化の様子を図12に示した。

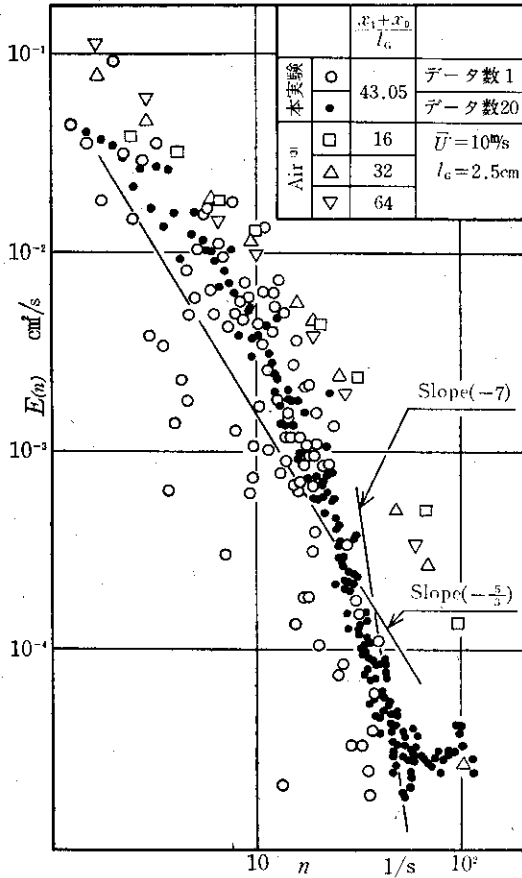


図14 乱れのエネルギースペクトル

5.3 エネルギースペクトル 1個のデータ当りのサンプル数  $N=4096$  に対して, HITAC-8700 の高速フーリエ変換の組み込みサブルーチン

$$\left. \begin{aligned} a_{ni} &= \sum_{j=0}^{N-1} u_{i,j} \cos \frac{2jn\pi}{N} \\ b_{ni} &= \sum_{j=0}^{N-1} u_{i,j} \sin \frac{2jn\pi}{N} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (6)$$

を用いて次式(7)により求めた乱れのエネルギースペクトル  $E(n)$  を図14に示す。

$$E(n) = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M \frac{\tau_s}{N} (a_{ni}^2 + b_{ni}^2) \dots\dots\dots (7)$$

いま, 測定系の応答時間が  $\tau_M$ , 一連のデータの長さが  $\tau_D$  であるとき, 無限個のデータからの値を平均する事により, ほぼ周波数  $n$  が  $10/\tau_D \sim 1/(10\tau_M)$  の範囲のエネルギースペクトルを求める事ができる<sup>9)</sup>。ここでは, データの長さ  $\tau_D = (N-1)\tau_s$ , 測定系応答時間  $\tau_M = \tau_s$  と考えてよいので,  $2.5\text{Hz} < n < 100\text{Hz}$  のスペクトルが式

(7)により求められる。図14において, データ数  $M=1$  の場合エネルギースペクトルは全周波数領域にわたり非常にばらついたものとなっている。この事は, データ長の数分の一の周期を持つ周波数領域については当然であるが, 1つのデータ中に多くの波数が含まれるような周波数領域についても同様にばらついている点は特に注意すべきである。これに対し,  $M=20$ とした場合は, 上述の周波数の範囲ではほぼなめらかな曲線が得られる。

スペクトル分布形の比較のため, 気体の格子乱流の実験結果<sup>9)</sup>を, 本実験の条件に換算して図14に併記した。実験条件の著しい相違にもかかわらず, ここに求められたエネルギースペクトルの分布形は気体のそれとよく一致する事がわかる。

## 6. 結 言

水流に対する熱線流速計の使用において, 検出部 (Hot Film) への異物あるいは気泡の付着を避けるためには, 流路の自由表面をなくして空気やほこりの混入を防ぐとともにフィルタを用いてこれらを除く方法が考えられるが, いかに清水であっても流速が小さい場合気泡の発生は避け難く, このため長時間連続するデータを得る事は困難である。データの信頼性を向上するためには, 出力を常時監視すると同時に, 異常時には測定を中断してプローブの洗浄, 出力の検定を行う事が必要であるので, 操作容易で信頼度の高い検定方法を工夫する事が肝要である。

気泡や異物の付着は偶発的に起るのでデータの ON-LINE 処理は困難であり, 捉えようとしている現象の時間的尺度あるいは周波数領域に対応して定めた時間以上連続するデータが十分な数だけ記録されるまで測定を行い, これを再生する際に不良データを捨てて処理する方法が良いと思われる。本報に示した計算結果は, どの程度のデータ量から乱れの構造に関する安定した統計量を得るかの目安を与えるものである。

## 7. 文 献

- 1) Batchelor, G. K., 乱流理論, (1974), 丸善。
- 2) Townsend, A. A., The Structure of Turbulent Shear Flow, (1976), 45, Camb. Univ. Press.
- 3) Sato, H., J. Phys. Soc. Japan., 16 (1952), 393.
- 4) 田中, ターボ機械, 4-10 (1976-11), 14.
- 5) 小川・伊藤, ターボ機械, 4-9 (1976-10), 22.
- 6) 藤井・ほか5名, 機械学会講演論文集, 770-8 (1977-7), 19.
- 7) Hinze, J. O., Turbulence, (1959), McGraw-Hill.
- 8) Wiegardt, K. E. G., Aeron. Quart., (1953-2), 186.
- 9) Pasquill, F., Atmospheric Diffusion, 14, Nostrand.