

港湾技研資料

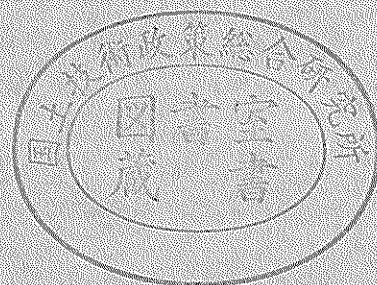
TECHNICAL NOTE OF
THE PORT AND HARBOUR RESEARCH INSTITUTE
MINISTRY OF TRANSPORT, JAPAN

No. 157 Mar. 1973

水中の乱流測定のためのHot-film 流速計の特性

加	藤	始
佐	野	喜久雄
高	松	恭文

運輸省港湾技術研究所



水中の乱流測定のためのHot-film流速計の特性

目 次

要 旨	3
1. まえがき	3
2. Hot-film流速計の一般的性質.....	4
2.1 測定原理	4
2.2 流速と出力電圧との関係	4
2.3 水中と空気中の測定の比較	5
3. 検定試験の装置及び方法	5
3.1 Hot-film流速計	5
3.2 検定装置と検定方法	6
4. 試験結果と考察	8
4.1 設定条件による電圧の変化と温度ドリフト	8
4.2 汚れによるドリフトとその補正	10
4.3 流速計出力の直線化について	12
5. 測定例（格子の下流の乱れ）	17
6. ま と め	19
参考文献	20

Characteristics of a Hot-Film Anemometer for the Measurement
of Turbulence in Water

Hajime KATO *
Kikuo SANO **
Kiyofumi TAKAMATSU **

Synopsis

Static calibrations of a small hot-film probe (DISA, 55F20) have been conducted for the velocity range $1 \lesssim U \lesssim 40$ cm/sec using an annular tank and a constant-temperature anemometer system.

It was observed that a considerable drift in the out-put voltage was caused by the change of the water temperature in the course of the measurement. This drift could be eliminated by readjusting the operating resistance of the probe to keep the overheating ratio at the initial value.

A contamination drift was found serious in the flowing water in our wave-channel, and the correcting procedure proposed by Richardson & McQuivey was re-examined.

Calibrated data of the velocity U and anemometer out-put voltage E_A for the whole velocity range mentioned above were applied to the usual relation $E_A^2 = B + \alpha U^n$, and the most suitable value of B was found to be negative. Since, however, a linearizer is usually designed only for $B \geq 0$, E_A cannot perfectly be linearized for the whole velocity range. It was also found that a partial linearity was obtained with the linearizer by using the above relation with a positive value of B for approximately $U \lesssim 6$ cm/sec, and that putting $B = 0$ gave a good linearity for $1 \lesssim U \lesssim 12$ cm/sec.

Lastly, the results of the measurements of turbulence behind a grid in the channel flow are presented.

* Chief of Hydrodynamics Laboratory, Marine Hydrodynamics Division
** Member of Hydrodynamics Laboratory, Marine Hydrodynamics Division

水中の乱流測定のための Hot - film 流速計の特性

加藤 始 *
佐野 喜久雄 **
高松 恭文 **

要 旨

市販の定温度型流速計と環状検定タンクを使い、1～40cm/secの流速範囲について、小型のHot - filmプローブ(DISA, 55F20)のくわしい静的特定試験を行なった。

測定中の水温の変化は大きなドリフトを生じることが認められたが、over heating ratio a を一定に保つように設定抵抗を必要により修正すれば除去できた。また、水温が5～6℃程度異なる場合でも a を一定にとっておけば、流速と出力電圧の関係はよく一致することが確認された。

このHot - film を水循環装置のついた風洞水路の流れの中で使用してみると、水中の汚れがプローブに付着することにより生じる電圧のドリフトが著しく、実用上大きな支障のあることがわかった。このドリフトの補正については、これまでに研究されている方法の適用性を検討した。

流速 U と本体出力電圧 E_A との検定データをもとに、リニアライザーの有効性とその最適な設定方法について多少くわしい検討を行なった。リニアライザーで設定すべき定数を最小2乗法で求めてみたところ、市販のリニアライザーでは今回対象とした1～40cm/secの全流速範囲をまとめて直線化することはできないことがわかった。しかし、部分的な流速範囲を直線化することは可能であり、最適な設定方法とらえられる精度についても検討した。

最後に、面倒な補正をすることによりえられた、流れの中におかれた格子の下流における乱れの測定例を示す。

1. まえがき

波と流れの相互作用や流れの中での風波の発達に関する問題、湾内汚染に関連した拡散の基礎研究あるいは模型実験、潮流の乱れを対象とした模型実験、その他いろいろの水力実験において、水中の流速変動(乱れ)の測定が必要とされる場合は多いが、従来適当な流速計がないためにこの方面の実験的研究はおくれている。

空気流の測定には Hot - wire 風速計がかなり前から使われて、乱流理論の発展に大きな貢献をして来た。この Hot - wire を水中に使うことが1940年代の終りごろにはすでに試みられていたが、wire の contamination や水の電気分解あるいは気泡の発生などのため安定な測定は行なえなかった。

約10年ほど前に Hot - wire の代りに Hot - film が開発され、その後コーティングの技術も進歩してくるにともない、Hot - film (あるいは Hot - wire) を使った水中の乱れの測定がだんだん試みられるようになって来た。まず Raichlen(1967)¹⁾ は Hot - film 流速計とデジタルのデータ処理方式を使い、よく処理された水による開水路の乱れを(筆者の知るところ)初めて比較的

ちんと測定した。

その後 Richardson & McQuivey²⁾, Liu & Morris³⁾, Resch et Coantic⁴⁾, Resch⁵⁾ などが水中で使用する Hot - film (あるいは Hot - wire) 流速計の特性や測定法を主とした研究を行なっており、McQuivey & Richardson⁶⁾, 石井・板倉・岸⁷⁾, 日野・大西⁸⁾などはこれを使って開水路の乱れの測定を行なっている。上記2), 4), 5)などに、水中での Hot - film の特性がある程度明らかにされているが、リニアライザーによる電圧の直線化についてはほとんどふれられておらず、検定曲線の精度やその安定性はあまり明らかにされていない。

最近われわれも Hot - film 流速計を購入し、いろいろ検定試験を行なってみた。その結果、設定条件による Anemometer 出力電圧の変化、水温変化や汚れによるドリフトの性質とその補正法について認識を深めるとともに、リニアライザーを使った出力電圧の直線化を効果的に行なう方法についていろいろ検討した。以下の本文においては、Hot - film 流速計の水中での使用に関連した簡単な説明を行ない、小型の Fiber Probe について

* 海洋水理部 水理研究室長

** 海洋水理部 水理研究室

の検定試験の結果を述べる。最後に比較的汚れた水中での格子の後方の乱れの測定例を示す。

2. Hot-film 流速計の一般的性質

2.1 測定原理

Hot-film 流速計の測定原理は、空気流の測定に使われている熱線流速計と同じで、流体の流れの中におかれ、電氣的に加熱されたセンサー (wire または film) の冷却量を電氣的に取り出し、それによって流体の速度 (特に乱流成分) を測定するものである。センサーを加熱する回路方式に定電流型と定温度型とがある。

定電流方式

定電流方式はセンサーに一定流を流しておき、ブリッジのアンバランス成分を取り出す。その DC 成分は平均流速に対応するが、ブリッジのアンバランス電圧の AC 成分は変動速度成分の低周波数成分のみしか正しくは表わさない。限界周波数以上の成分に対しては、アンバランス信号の振幅は周波数に比例して減衰してゆき、位相のおくれも生じる。Hot-wire に対しては、これらの信号の歪みは電氣的に補償することが可能で、非線型増幅器により周波数応答性を改善できる。ただ平均流速が変わると、Hot-wire の時定数が変わるので、それに応じて補償回路の時定数を再調整する必要がある。また、Hot-film 下層 (土台) の影響のため時定数が単純でなく、補償回路の設計が非常にむづかしい。したがって、Hot-film による乱流成分の測定は、定電流方式では実質上行なえない。この方式の Anemometer は電子回路が定温度方式のものとはかなり簡単で、数 10 年前から風の乱流測定のために使われていた。

定温度方式

定温度方式は、フィードバック機構を使ってセンサーの低抗 (したがって温度) を一定に保つもので、図-1 にその概略の構成を示す。ブリッジがバランスした状態

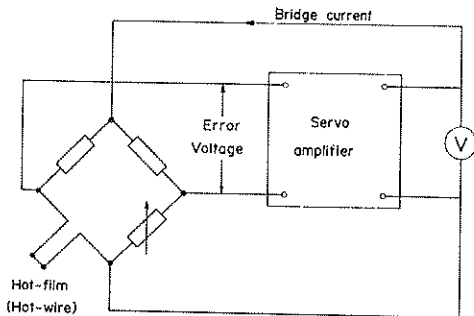


図-1 定温度方式構成図

では、ブリッジのたての対角線にサーボ増幅器から (セ

ンサーの抵抗値が設定された値になるように) ある電圧が加えられている。センサーの冷却作用 (convective cooling) の変化により抵抗値がわずかに変わると、ブリッジの横の対角線に小さな電圧 (Error voltage) が生じ、サーボ増幅器の入力側に加わる。この電圧はかなり増幅された後、ブリッジ電圧したがってセンサーを流れる電流を変化させてブリッジのバランスを回復させるために使われる。このようにしてセンサーの温度変化はごく小さな範囲内に保たれ、このフィードバック方式の採用により流速計の周波数応答性は大幅に (ほぼサーボ増幅器の closed-loop gain 相当分だけ) 増大せられる。Anemometer の出力としてはサーボ増幅器の出力電圧 (ブリッジ電圧) がとり出される。

この定温度方式は Hot-wire プロープにも Hot-film プロープにも使用でき、大きな速度変動成分の測定にも適しており、精度の上からも取扱いやすさの上からも定電流方式より優れている。また流速計の感度を上げるために大きな overheating を用いた場合にも、流速の急激な減少によってセンサーを焼いてしまうおそれがないという利点ももっている。

この定温度方式は、1909年にすでに Kennelly によって提案されていたが、電子回路の設計・製作に困難があったため、実際に使われるようになったのはほぼ 10 年くらい前からのようである。現在、市販されている Anemometer はほとんど定温度方式で、温度測定用に定電流方式としても使えるようになっているものもある。筆者らの使っているものももちろん定温度方式の Anemometer で、以下ではこの方式を対象として述べることにする。

センサーとしての Hot-film とは、ガラス、石英、Fiber などで作られた円筒形 (または線状)、くさび形 (V 形)、円錐形などの基台の表面または先端 (付近) に、白金またはニッケルなどの厚さ 0.1μ 程度のフィルムをはりつけ、その上に石英の薄い膜を真空蒸着させて、フィルムの (水中での) 絶縁や腐食防止などの働きをさせる構造となっている。このような Hot-film は、Hot-wire では物理的な強度が不足することから考え出されたものであるが、形状寸法が Hot-wire にくらべて 10 倍以上大きいため、周波数応答性はそれだけ劣る。しかし水中での測定の対象となる乱れの周波数は、通常、せいぜい数 100 Hz までと空気中の乱れにくらべて 1 桁以上小さいので、十分 Hot-film の応答性でカバーできる。

2.2 流速と出力電圧との関係

センサーに対する冷却作用は、流体速度、温度、熱伝

導率、粘性、密度等とセンサーの温度、形状・寸法、プローブの材質等によって決まるが、線または円柱の冷却については、これまでにいろいろ研究されている。ある特定のセンサーと流体について、流体とセンサーの温度が一定（抵抗一定）の場合には、一般に次のような関係がある。

$$\frac{I^2 R_w}{R_w - R_0} = C + DU^n \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここに R_w はエレメントの設定温度における抵抗値、 R_0 はエレメントの周囲流体温度における抵抗値、 I は供給電流、 C 、 D は定数、 n は流体の種類、overheating ratio、センサー、平均流速などに依存する定数である。(1)式で $n = 1/2$ とおいたものは、よく知られる King の法則に対応するが、 n は上に述べたようにいろいろな要素によって異なる値をもつものである。ただ風洞実験などで、Hot-wire により風速を測定する場合には、 $n \approx 1/2$ とおいてよい近似がえられる。ちなみに、Bruun (1971) によると、Hot-wire (2mm, 15Ω) を風 (温度 18°C) に適用した場合の平均風速 U と n の関係は、 U が大きくなるほど n は小さくなっており、 $U = 3m/sec$ で $n = 0.505$ 、 $U = 4 \sim 5m/sec$ で $n = 0.500$ 、 $U = 7 \sim 8m/sec$ で $n = 0.49$ 、 $U = 12 \sim 14m/sec$ で $n = 0.48$ などとなっている。

一般に流体と動作中のエレメントの温度差を表すパラメーターとして、つぎのような overheating ratio (a) を用いる。すなわち

$$a = (R_w - R_0) / R_0 \quad \dots\dots\dots (2)$$

(1)式と(2)式から、ブリッジ電圧 E_A と U との関係は $E_A^2 = R_0^2 a (1 + a) (C + DU^n)$ $\dots\dots\dots (3)$

あるいは簡単にして

$$E_A^2 = B + \alpha U^n \quad \dots\dots\dots (4)$$

となる。通常 $B > 0$ で、 B は $U = 0$ のときの電圧 E_0 に近い値 (free convection のために少し小さい値) をとるところから、 $B = E_0^2$ とおいて(4)式を

$$E_A^2 = E_0^2 + \alpha U^n \quad \dots\dots\dots (5)$$

と書くことが多い。

2.3 水中と空気中の測定の比較

水中での測定に使用するためのエレメントは、まず電気分解を防ぐために水と絶縁しなければならぬ。空気流測定用の Hot-wire でも絶縁 (コーティング) に工夫すれば、水中の測定においても使用しうる場合のあることがいくつか報告されている (日野・大西⁸⁾)。しかし、コーティングが厚いと周波数応答性が著しく低下し、感度も悪くなる。また全面にわたり均一でなければならぬ。Hot-film は周波数特性の多少の低下さえ気にしなければ空気流の測定にも使えるのであるが、水中用の

film としては石英被膜の厚さを比較的厚くしたものをを用いる方が有利な場合が多い。DISA の Fiber-film の場合、コーティングの厚さは約 2.0μ のものと約 0.5μ のものがあり、今回の実験では前者を使用している。

また、流体が水の場合には、エレメントの温度をあまり高くすると気泡を発生してエレメントの表面に付着し、流れによる冷却作用を低下させる。このため、エレメントの温度は 70°~80°C 以上にはできず、通常 over-heating ratio は $a = 0.05 \sim 0.10$ にとる方がよいといわれている。一方、Hot-wire で風を測定する場合、ワイヤーの温度は通常でも 200°C、最大 300°C まで上げることができ、overheating ratio も $a \approx 0.6 \sim 1.0$ が常用範囲である。Anemometer の出力電圧はエレメントの温度と周囲流体の温度との差に比例するので、水中での測定の方が著しく流体の温度変化の影響を受けやすく、それに対する補正 (後述) に注意せねばならない。また、水は (空気と違って) 温度によって物理的性質がかなり変化するので、プローブの検定は、なるべく使用状態と同程度の水温で行なうことが望ましい。

つぎに水中の測定の場合には、水中の溶存ガス、ごみ、化学物質等がエレメントの表面に附着することにより、動作が不安定になったり、出力の時間的な低下が起ったりする。これは、Hot-film を通常の水路や水槽での流れの測定に使用しようとする場合にきわめて大きな問題である。この場合、エレメントをアルコールで洗ったり、やわらかいハケでふいたりすることにより出力はもとの状態に戻ることが多いし、後で述べるように、出力低下に対する補正法も Richardson & McQuivey²⁾ により提案されているが、水質によって変化があまり急激に起こるならば、実際の使用は非常に困難になる。

なお、水の熱伝導度は空気にくらべて 2 倍以上大きい (20°C で水: 5.9×10^{-3} , 空気: 2.5×10^{-4} joule/cm sec deg C) ので、水中では 10cm/sec 以下の流速に対しても、通常の実験室の風の測定ではなかなか経験できないくらい大きな出力がえられる。このため水中用に使用する Anemometer のアンプは、空気用に使用するものにくらべてはるかに大電流を供給できるものでなければならぬ。

3. 検定試験の装置及び方法

3.1 Hot-film 流速形

使用したのは DISA の流速計本体 (Anemometer) 55D01, リニアライザー 55D10, デジタル電圧計 55D30 などと Hot-film としては DISA の Fiber probe

55F20である。

流速計本体

流速計本体(55D01)は定温度型Anemometerとして設計されたものであるが、温度変化の測定などのためには定電流型としても使えるように作られている。プローブの種類としてはHot-wire, Hot-film, サーミスタ及び負の温度係数をもったものでも使える。主なTechnical dataを列挙すると次の通りである。

ブリッジ比:1:1及び1:20

プローブ電流(定温度方式の場合):

ブリッジ比1:1にてMax. 300mA, ブリッジ比1:20にてMax. 500mA, 外部電源を使用するとMax. 2アンペア。

プローブ抵抗測定:0~61Ω, 分解能0.01Ω

System周波数レンジ(測定条件により):

ブリッジ比1:20にて DC~150kHz

ブリッジ比1:1にて DC~400kHz

出力電圧:Max. 30ボルト

出力インピーダンス:

Closed loop:事実上0(ゼロ)

Open loop:100Ω, 負荷約1Ω

温度測定:

大変動に対して定電流方式, 小変動に対して定温度方式。

感度:約1 volt/°C

リアライザー

リアライザー(55D10)は, 所要の関数形をうるのに折線近似の方法をとるのではなく, 対数ダイオードを使って真の対数関数を発生させ, 指数 m を連続的に設定できるようになっている。すなわち, (5)式のようなAnemometer出力に対応して, リアライザー入力 E_A とすると

$$E_L = K_1 (E_A^2 - E_0^2)^m \dots\dots\dots (6)$$

で表わされる出力 E_L がえられるように作られている。ここに K_1 は増幅率で決まる係数で, 指数 m は1.8~5.1の範囲で任意に設定できる。なお, $E_0^2 = 0$ として

$$E_L = K_2 E_A^{2m} \dots\dots\dots (7)$$

のような出力もえられるようになっている($m = 0.9 \sim 5.1$)。この(7)式の形のリアライザー特性は, 後で述べるように低流速($U \lesssim 12 \text{ cm/sec}$)でのAnemometer出力 E_A の直線化に有効である。

なお, リアライザーの入力インピーダンスは6.8kΩ~28kΩ(可変), 出力インピーダンスは180Ω, 出力電圧範囲は0~10ボルトである。

Hot-filmプローブ

今回対象としたHot-filmはDISAのFiber probe(55F20)である。この検出部は径70μ, 長さ3mmの石英センイの中央部分にニッケルfilmをはりつけ, 両端に銅に金メッキのtipをつけて中央の受感部(film)の長さを1.25mmにしてある。ニッケルfilmの上には厚さ約2μの石英層を蒸着してある。この検出部は金メッキしてエナメル塗装した2本のprongにより支持されているが, prongは90°曲ってStembody(プローブ軸)に埋め込まれており, その形状は水平な流れに上からプローブをおろして測定するのに適している。

このプローブは, DISAのプローブ・マニュアルによると, 水中の中程度の温度における測定用に設計されたものであるが, 特に速度勾配の大きな流れあるいは乱れの大きい流れの測定に適している。ただし, 約50cm/secの上の流速に対し, vortex sheddingのために多少ノイズがで, また水中のゴミなどによるcontaminationの影響は円錐形プローブより受けやすいようである。メーカーの規格による20°Cにおける抵抗値と温度係数は近似的に $R_{20} \cong 5 \Omega$, $\alpha_{20} \cong 0.5 \%/^{\circ}\text{C}$ となっているが, 使用したプローブの抵抗は図-3のように5割くらい大きく, 温度係数も $\alpha \cong 0.33 \%/^{\circ}\text{C}$ となっていた。なお水中でのoverheating ratioの推奨値は $a = 0.10$ と指示してあるが, $a = 0.15$ で使用しても何ら支障なきようであった。

3.2 検定装置と検定方法

Hot-film プローブの検定方法はいろいろあるが, 筆者らはプローブを環状タンクの水中で, 一定半径の同一円周上等速運動させる方式の検定装置を用いて検定を行なった。

検定装置

検定用タンクの外観は写真-1に示す通りで, その外側壁と内側壁の半径はそれぞれ60cmと30cm(したが

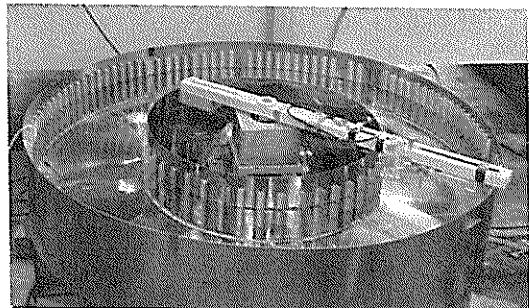


写真-1 検定タンク

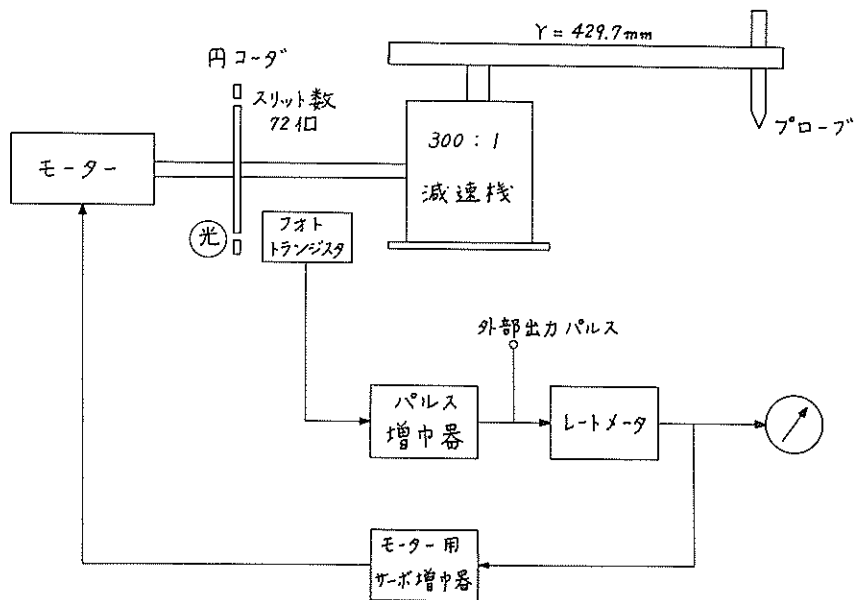


図-2 検定装置制御・構成図

って環状の水路幅は30cm)、深さは25cmでステンレス製である。装置の制御系統と構成は図-2に示す通りで、サーボ増幅器でコントロールされたモーターの回転を1/300に減速し、タンクの円の中心を支点とした回転アームを等速で回転させ、アームに取付けたプローブと水との相対速度を流速としてプローブの検定を行なうものである。モーターの回転数はモーター軸につけた円コーダとフォトトランジスタによりパルスとして取出すが、スリット数(72個)と減速比に合せて回転アームの半径を $r = 429.7 \text{ mm}$ に調整することにより、1秒間のパルス数80が円周速度 $U = 1.0 \text{ cm/sec}$ に対応するように作られている。したがって、1秒ごとのパルス数 N をカウンタで読みとることにより、

$$U = N / 80 \text{ (cm/sec)}$$

として簡単に速度を求めることができる。設定しうる U の範囲は3~50cm/secに設計してあるが、電源電圧を下げて使用すると1cm/sec弱までサーボがよく働いた。1秒ごとのパルス数のバラツキは、 $U = 40 \text{ cm/sec}$ の $N = 3,200$ に対して最大値と最小値との差が2~3パルス以下であり、 N の小さいところではバラツキもほぼ比例して小さくなって、回転の等速性は非常によい。また減

速機にはウォームギヤが用いられているが、アーム先端までの間でスリップを起こす部分はなく、パルスから求めた U をそのままプローブの円周速度とすることができる。

ただこの種の環状タンクでは、プローブを走らせることにより水もまわり始めるので、寸法の大きなプローブの使用や、長時間かなりの速度で走らせ続けるのは適当でない。われわれの使用したDISAのFiber probeは前述のようにかなり寸法は小さいが、それでも速度が大きくなると水がまわり始めるので、実験の後期になって、写真-1でもわかるように、側壁に粗度として $15 \times 15 \text{ mm}$ の耐食アルミのアンクルを45mmごとに取りつけた。これによりプローブ走行中の水の動きも少なくなるとともに、走行停止後に水が静止するまでの時間もかなり短縮された。この粗度をつけた状態でプローブを40cm/sec程度の速さで1~2周まわして停止させた直後の水表面の流れは、最大2~3mm/sec程度であった。

検定方法

検定に使用した水は普通の水道水で、時に水温を高めるため湯を多少加えたことはあるが、他には特別の配慮はしていない。プローブはその先端が1.5~2cm程度水

中に入り、エレメントがタンクの半径方向に一致するように(サポートを通して)アームに固定する。あらかじめ、タンクの水はよくかき混ぜて水温を均一しておき、水が十分静止した後で検定を開始する。アームの回転速度は、サーボ増幅器についた微動式ポテンシオメータ・ダイヤルで連続的にこまかく変えられる。このダイヤルの検定値を参考に、通常速度の小さい方から順に希望の速度に合わせてモーターをスタートさせた。1つの速度についての走行時間は、電圧の測定が十分できる範囲なるべく短くした。所定の半径における円周長は270cmなので、 $U = 10 \sim 15 \text{ cm/sec}$ 以下の検定はつぎつぎに簡単に行なえ、 $U = 30 \text{ cm/sec}$ 程度の検定でもプローブがタンクを一周しないうちに終了した。停止時の出力電圧E。はたえず監視した。これはごくわずかでも水が動いていると(1mm/sec以下でも)E。が変化して水の動きがわかるし、また水温が変化した場合にもE。は変化するからである。またエレメントに気泡がついた場合にもE。はだんだんと減少していく(このようなケースはこのプローブを始めて使用した時に一度だけ経験した)。

検定におけるAnemometer本体あるいはリアライザーからの電圧測定はデジボルを使って行なった。DISAの55D30は回転式で、所定の値を指すまでに2~3秒を要し、また本体出力が10V以上になる場合の測定では、0.01Vの桁がかなり不安定で不正確になっているようであった。通常の数字管表示式のデジボル(YEW)も使ってみたが、1秒ごとの値がかなりバラつくので、これは主としてE。の監視用に使った。

検定中に大切なことは、水がまわっていないことを確認することと、overheating ratio (α)を一定に保つことであった。粗度をつける前には、高速で走行させた後にしばしば水の動き(2~3mm/secから最大5mm/secくらいまで)がみられたが、その影響の大きい低速では特に注意して水が静止した状態でプローブを走らせるようにした。 α を一定に保つためにもかなりの注意が必要であった。これは水温が多少とも変化すると図-3からもわかるようにR。が変化し、設定抵抗 R_w を最初のままにしておくと α が変わってしまうからである。そのため、たえず水温は監視し、多少水温が変わったらR。を測り直してその変化分だけ(0.01Ωステップではあるが)R_wを修正せねばならなかった。しかし計測状態からスタンドバイに変えた直後には、R。は0.02~0.04Ωほど大きな値を示すことが多く、通常2~3分以上経たないと真の値を指示しない。このため、水温が変化するときの検定はかなり面倒で、またoverheating ratioが多少変化したことによる誤差の入る余地があった。水温が途中で

変化するのは気温(室温)が水温と2℃以上ぐらいい違う場合で、実験の終りごろには、室温に合わせて水温を(湯を加えて)高めて検定を行なったものもある。

4. 試験結果と考察

4.1 設定条件による電圧の変化と温度ドリフト overheating ratio

Hot-film による水中の測定の場合、前述のように水温が変化することにより本体の出力電圧 E_A は著しく影響を受ける。これは水温とHot-filmの温度差があまり大きくないため、水温のわずかな変化でも(2)式のoverheating ratio α の変化としてあらわれ、それにもなつて(3)式のように E_A が変化するわけである。このような水温変化が出力におよぼす影響を定量的に知るためには、水温変化に対応した水中でのHot-filmの冷抵抗R。の変化を知らねばならない。そのため、ポリバケツの中の水の温度を湯を加えてだんだん変えながら、今回主として使用したプローブ(55F20-1)について調べた温度tとR。との関係の測定結果を図-3に示す。

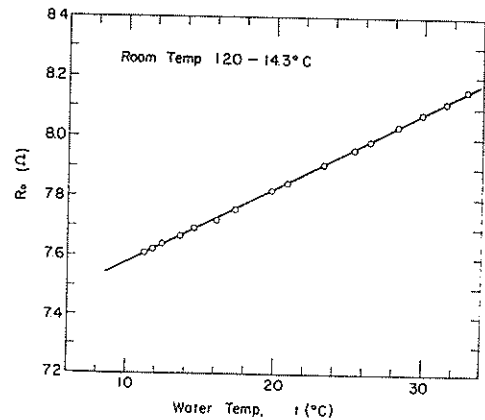


図-3 水温と零抵抗R。の関係

一般にHot-filmまたはHot-wireエレメントの温度 t_1 と t_2 における抵抗値を R_1, R_2 とすると、よく知られるように次のような関係がある。

$$R_2 = R_1 [1 + \alpha_t (t_2 - t_1)] \dots\dots\dots (8)$$

ここで α_t は温度係数である。図-3の結果はR。がtに比例して直線的に増大することを示しており、これは(8)式の関係に一致している。図-3の結果から温度係数 α_t を求めると $\alpha_t = 3.26 \times 10^{-3} / ^\circ\text{C}$ となる。

いま、(8)式で t_1 を周囲の水の温度(= t_0)、 t_2 をHot-filmの温度(= t_w)とすると

$$R_w = R_0 [1 + \alpha_r (t_w - t_0)] \quad \dots\dots\dots (9)$$

したがって overheating ratio a は次のように表わせる。

$$a = \alpha_r (t_w - t_0) \quad \dots\dots\dots (10)$$

すなわち、overheating ratio とは文字通り水温と Hot-film エレメントとの温度差に正比例するパラメータである。(10)式からさらに

$$t_w = t_0 + (a/\alpha_r) \quad \dots\dots\dots (11)$$

となり、 α_r がわかっていればこの式からエレメントの温度が計算できる。図-3のプロープで $t_0 = 20^\circ\text{C}$ の場合、 $a = 0.10$ ならば $t_w = 50.7^\circ\text{C}$ 、 $a = 0.15$ ならば $t_w = 66.0^\circ\text{C}$ ということになる。

比較的低流速の測定の場合、overheating ratio の限界値は、あまりエレメントの温度を高くすると気泡を発生することから規制される。上の例で見ると overheating

ratio の 0.05 の増加が、エレメントの温度で約 15°C の増大に対応している。気泡の発生には水温そのものの大小も多少は関係しているのであろうが、上の例からもわかるように、一般に水温が低いときの方が高いときよりも、使用する overheating ratio の限界値は高くなるものと考えられる。今回試験したプロープでは、水温が 9.3°C のとき overheating ratio $a = 0.18$ とした検定を試みてみたが、気泡も出ず安定であった。

温度ドリフトとその補正

つぎに overheating ratio を $a = 0.05 \sim 0.14$ と変化させたときのプロープの速度 U と本体出力電圧 E_A との実験結果を図-4に示す。この図から、ある流速 U に対して a が Δa だけ変化したとき、その a のずれをそのまま見過ごしていた場合に生じる U の誤差 ΔU がかなり大

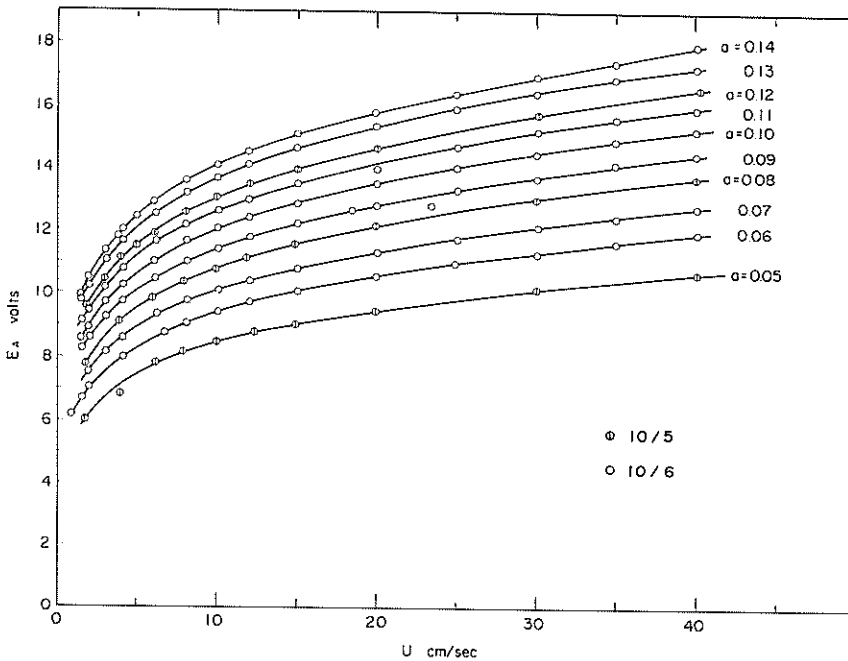


図-4 overheating ratio による流速-電圧曲線の変化

きいことがわかる。たとえば水温が $t_0 = 15^\circ\text{C}$ のとき、 $a = 0.10$ として $R_w = 1.10R_0$ 。によりエレメントの温度を設定して測定を開始したとき、もし水温が $t'_0 = 16^\circ\text{C}$ まで上ったとすると、設定抵抗を修正しないでいれば、(10)式を使うと $\Delta a = -0.0033$ で

$$a' = a + \Delta a = 0.0967$$

と変化したことになる。この状態で測定すると、実際には $a = 0.0967$ のカーブ上にある点を $a = 0.10$ のカーブ上の点として(通常、リニアライザーを使って)処理するため、測定すべき流速が 30 cm/sec の場合には 3 cm

/sec 以上小さな値として測定することになり、誤差は10%以上にもなる。

このように水温が変化して R_w が変化しても設定抵抗 R_w を修正しないしていると大きな誤差が生じるが、これは注意して同じ overheating ratio になるように R_w を補正しながら測定を行えば除去できるものと期待される。出力 E_A は(3)式のようにも表わされるから、厳密には、水温が変化したとき a を同じに合わせても R_w が変化するから E_A は同じにはならないことになる。しかし水温の変化に対する R_w の変化の割合はあまり大きくなく、たとえば 17°C と 15°C に対応する R_w の値の比は、図-3の結果から

$$\frac{(R_w)_{17^\circ\text{C}}}{(R_w)_{15^\circ\text{C}}} = \frac{7.762}{7.714} \doteq 1.006$$

程度にしかない。すなわち(3)式に

おいて、他の係数は a が同じならば水温の多少の変化によってあまり変わらないものとする、 15°C のときと 17°C のときの E_A の差は約0.6%となるが、この程度のあるいはその2~3倍の差は無視してもさしつかえないであろう。すなわち、5~6°C程度水温が変わっても、overheating ratio さえ同じに合わせれば、実用上同じ検定カーブを使ってさしつかえないものと考えられる。このことを実験的に確かめるために、短期日のうちに異なる水温において、同じ overheating ratio $a = 0.10$ で行なった検定結果を示したのが図-5である。11/23 PMの検定ではUの大きいところで a がやや小さ目であったこと、前のような10ボルト以上の電圧測定(DISAのデジボルト55D30による)の精度を考慮すると、検定結果の一致は満足すべきものであるといえる。

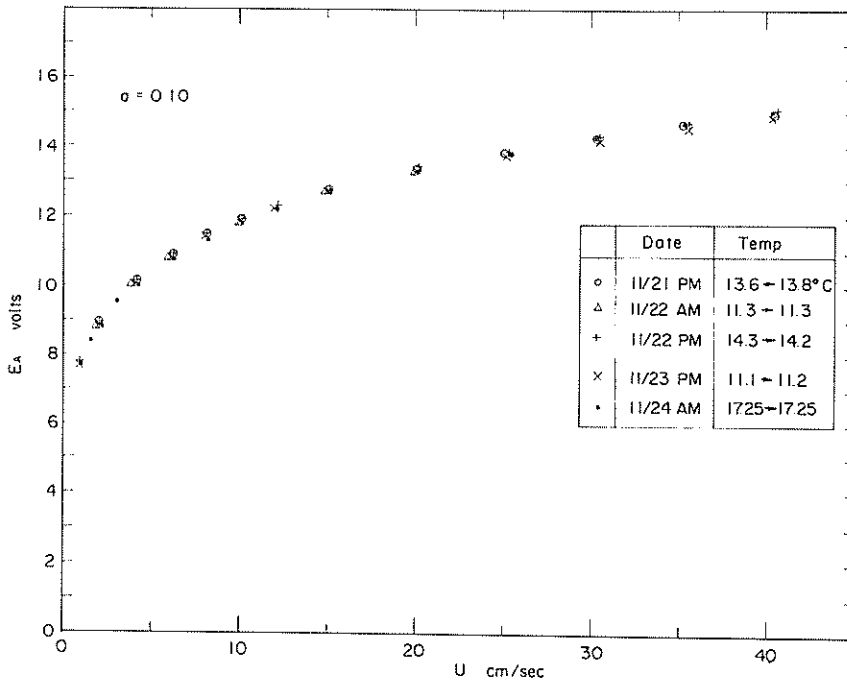


図-5 overheating ratio を一定とした時の流速電圧曲線

4.2 汚れによるドリフトとその補正

水中での測定におけるもう一つの大きなドリフトの原因として、水中におけるゴミや化学物質、気泡などがエレメントの表面に付着して出力電圧を低下させる、いわゆる Contamination (汚染) の問題がある。これはプロ

ーブの形状によっても多少の差があるが、これを支配するのはもちろん水質で、流速も速いほど Contamination の進行が速いようである。

水質といっても千差万別であるが、検定用に特別に製作された水用循環トンネルとか、規模のかなり小さな装

置以外では、蒸留水のような純度の高いきれいな水について測定を行なうということとはほとんどなく、水を循環させて流れを生じさせるかぎり大なり小なり Contamination によるドリフトは生じるものと考えられる。

Hot-film を使って開水路の乱れを(筆者の知るところ)初めて比較的きちんと測定した Raichlen(1967)¹⁾ の場合には、水路で循環させる水としては、水中の異物を除去し空気含有量も減らすためにフィルターを通した熱湯を用い、それを一日以上一部フィルターでこしながら循環させて温度調節された実験室の室温とバランスさせた後で測定を行なっている。

Richardson & McQuivey(1968)²⁾ は実験室の水路などにおける(フィルターでこしたりしない)普通の水、あるいは浮遊物すら含んだ水における測定法を提案した。彼等はプローブのよごれ(Contamination)によって出力が低下した場合、その各段階における流速 U と Anemometer 出力 E_A との関係は、よごされないプローブで overheating ratio がある量だけ低下した場合に等しいことを見出し、次のような仮説を立てた。すなわち、「プローブに付着したゴミや気泡は与えられた流速に対する平均電圧を減少させるが、速度変動に対するプローブの周波数応答性には小さな影響しか持たない。ある与えられたセンサーに対しては流速と電圧の関係の固有の族(a unique family)があり、それは異なる overheating ratio での検定によって決定される。」というものである。これにより、前もって overheating ratio をいろいろにとって図-4のようなカーブを書いておけば、実際の測定では Hot-film の出力電圧 E_A と同時に、他の方法でその場の平均流速 U を求めれば、(E_A , U) の点をカーブ群の中におとすことにより対応した overheating ratio が決まり、電圧変動と流速変動との対応もつくというものである。この方法の妥当性は Resch et Coatic(1969)⁴⁾ Resch(1970)⁵⁾ によって実験的に証明された。Richardson & McQuivey²⁾ は汚れた水についての乱流強度の測定例を示しているが、彼等の場合リアライザーを用いてないので、各流速ごとに電圧と流速の換算係数を求めねばならず、それに上のような手順をふむのでかなりめんどうなようである。

一方、Liu & Morris(1968)³⁾ はポリウレタンでコーティングした径 0.018 mm の Hot-wire を用いて水中の測定を行ない、汚れによるドリフトの時間的変化と、やわらかいラグダの毛でエレメントをブラッシングすることにより出力が元の値に戻ることを示している。彼等は水の汚れがあまりひどくない場合には各測定の直前にブラッシングすることにより、汚れていないときの(ある

overheating ratio だけについての)検定カーブが使えるとし、開水路において格子の後方での乱流強度の減衰の測定例を示している。また Resch(1970)⁵⁾ はくさび型のプローブについて、きれいなときの流速-電圧曲線とよごれにより出力が低下したあとで同様にブラッシングして再び検定してえられた流速-電圧曲線とがよく一致することを示している。これらのエレメントをブラッシングした直後に測定を行なう方法は、開水路などでエレメントのそうじのしやすい場合には、Richardson & McQuivey²⁾ の方法よりはるかに簡単であるが、問題はエレメントのそうじをした直後のデータをとる時間(例えば 1~2分)内に電圧変化があまり生じないかどうかで、実際にはかなりきれいな水でない和使用出来ないのではないと思われる。

当所の大型風洞水路にも水の循環装置(参考文献 10 参照)がついているが、最近、水循環用パイプが錆びてきたため、流れの実験では水質をあまりきれいには保てなくなっていた(現在改修工作中)。そのため、水路で流れを起こして Hot-film で平均流速をはかると、出力電圧は時間と共に著しく変化した。30分とか1時間とか経過した後でプローブを水中から出し、エレメントの部分をアルコールの中でよく振り動かして洗ってからまた水中に入ると、水温さえ変てなければ出力はほぼ最初の値に戻った。上記風洞水路の流れ ($U = 27.6$ cm/sec) につき、アルコールで洗った直後からの出力電圧(平均値)の時間的変化の測定例 ($a = 0.10$) を図-6に示す。各測定値は後に述べるようなリアライザー

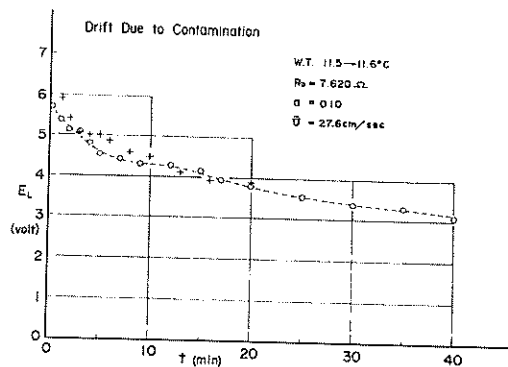


図-6 汚れによるドリフトの例

からの出力 E_L で、これは図-17の $a = 0.10$ の検定カーブとほぼ同じ関係で流速 U に比例している。測定値はデジタルレコーダーで $\Delta t = 1/90$ でサンプルした値を平均したものであるが、各データの長さが約 2.3秒間のものであるため、流れそのものの変動分が入って

バラツキが大きい。図-6から、水中に入れた直後に一番大きな出力低下が起こり（このため図の $t=0$ の位置は多少誤差を含む）、その後少しずつ低下の割合がゆるくなっていることがわかる。しかし、もっと長い時間が経過したとき、変化の割合はもっとゆるやかになっても、実用上一定と見なせるような値に落ちつくことはなく、3時間くらいまでの範囲ではどこまでも出力は低下して行くようであった。

一方、同じ水路で前日から水を少しずつオーバーフローさせて表面をきれいにし、水循環装置によるのではなく 3 m/sec 程度の風を起こして吹送流を生じさせた場合についても、小さな波の粒子速度と吹送流との合成されたやや不規則に変動する水の速度を同じ方法でホットフィルムで測定してみた。この場合のフィルターでハイカットしたリニアライザー出力電圧 (E_L) をペンレコーダーに書かせた結果では、30~40分間測定し続けても目立った電圧低下はなく、念のために約40分後にアルコールで洗ってみたが、その前後で目立った差は見られなかった。すなわちこのような場合には汚れによるドリフトは（少なくとも）あまり目立つほどには生じてなく、これは水質がきれいであったためと思われる。

4.3 流速計出力の直線化について

前述のように Anemometer 本体から出力 E_A と流速 U との間には、一般に(4)式のような関係がある。 $m = \frac{1}{n}$ において改めて書くと、

$$E_A^2 = B + \alpha U^{1/m} \dots\dots\dots (12)$$

このままでは図-4、5からわかるように E_A と U の関係は非線型の度合いが強すぎて測定が困難であるので、一般にリニアライザーを使って流速に正比例する形の電圧をとり出す。

Hot-wire の場合、通常使う流速に対しては前述のように $m \approx 2.0$ でよい直線化が得られるが、Hot-film の場合（とくに今回の Fiber probe について） m をどんな値にしたら最適か、 B はどの程度の値にすればよいかは最初はわからなかった。 B は Hot-wire による空気流の測定の場合には E_0 より多少小さな値 E'_0 をとり (DISA の 55A20 Hot-wire probe については $E'_0 = 0.925 E_0$ と指示してある)、 $B = E_0^2$ ととれば良好な結果がえられる。Richardson & McQuivey (1968) は直径 50μ のフィルムについて指数 $n (= \frac{1}{m})$ が流速によって異なり、水中では $U = 6 \sim 18\text{ cm/sec}$ で $n = 0.31$ ($m = 3.23$)、 $U = 18 \sim 45\text{ cm/sec}$ で $n = 0.35$ ($m = 2.86$)、 $U = 45 \sim 90\text{ cm/sec}$ で $n = 0.45$ ($m = 2.22$) であることを述べ

ている。

われわれの場合、実験で使う流速は $30 \sim 35\text{ cm/sec}$ 以下であるので、上はその程度の流速まで、下はなるべく $U=0$ の近くまでの流速に対して出力を直線化する必要がある。今回の検定試験の初期のころには前述のリニアライザーを使って m の値を $2.3 \sim 3.5$ くらいで適当にとり、 E_L も E_0 より少し小さ目や等しくとかいろいろとって試行錯誤的に検定を行なってみたところ、 m の値が $m = 2.5 \sim 3.0$ でさえあれば $8 \leq U \leq 30\text{ cm/sec}$ 程度の流速については非常に良い直線性がえられることがわかった。それらの例のうち4つを図-7・a~図-7・dに示す。これらの図からもわかるように、流速がもっと

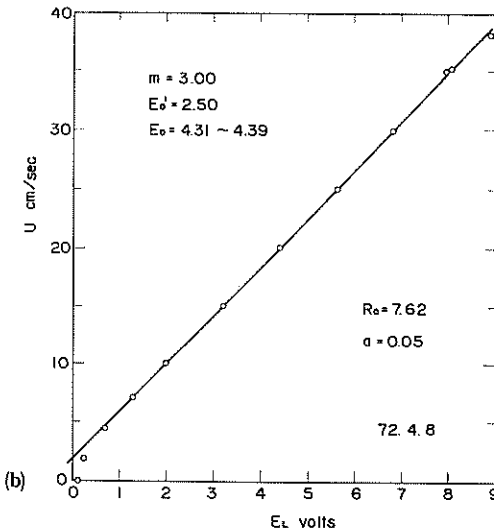
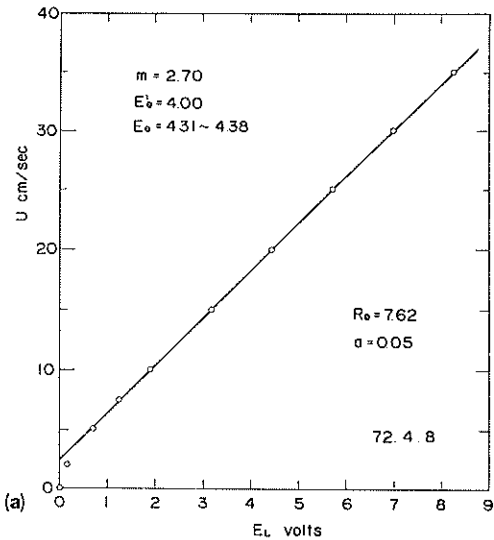
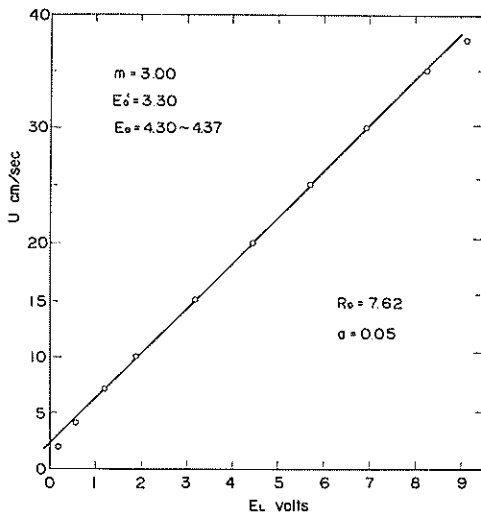
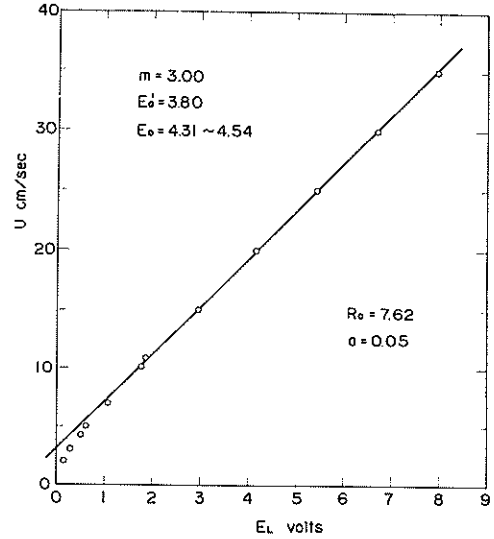


図-7 リニアライザー出力電圧と流速との関係



(c)



(d)

図-7 リニアライザ-出力電圧と流速との関係

小さい部分の直線性は m と E_0' のとり方で多少異なるが、 m と E_0' のとり方によってほぼ $U \approx 5 \text{ cm/sec}$ くらいまでは上からの直線の延長と一致するようである。

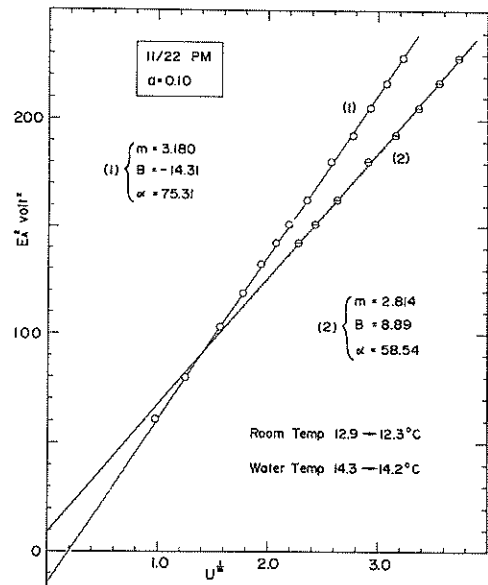
以上はリニアライザ-出力につき係数を調べてみたわけであるが、もっと流速 = 0 の近くまで一本の直線に表わす方法はないかと考え、検定でえられた (U, E_A) のデータにつき最小 2 乗法 (デミングの方法; 本間・春日屋) で (12) 式の B, α, m を求めてみた。やり方は B, α, m の近似値 B', α', m' を仮定し、補正量を $\delta_B, \delta_\alpha, \delta_m$ とすれば

$$\left. \begin{aligned} B &= B' + \delta_B \\ \alpha &= \alpha' + \delta_\alpha \\ m &= m' + \delta_m \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (13)$$

であるが、これと測定値 (N ケ) を残差で表わしたものを (12) 式に代入し、テーラー展開して残差と $\delta_B, \delta_\alpha, \delta_m$ について 1 次までをとると N ケの条件式ができる。この条件のもとで残差の 2 乗和が最小になるよう補正量 $\delta_B, \delta_\alpha, \delta_m$ を決定するわけである。実際にはくり返し計算で、毎回の計算値 B, α, m を改めて B', α', m' とおき、次の補正量 $\delta_B, \delta_\alpha, \delta_m$ を求めるというやり方で、補正量がある限界値以下に収斂するまで計算を行なった。

データ数 N は 12 ~ 15 とあまり多くはないし、また約 1 cm/sec から約 40 cm/sec までをひとまとめにして定数を求めるのには多少問題はあったが、とに角図-7・a ~ 図-7・d のように U の小さいところで検定カーブが曲るのではなく、 $1 \leq U \leq 40 \text{ cm/sec}$ の全体を (12) 式

で表わすのに最適の係数 B, α, m を求めようとしたわけである。この全体の点について計算した最小 2 乗法の結果では、(12) 式の m は予想通りほぼ 3.0 に近い値をとったが、 B は意外にもマイナスの値をとった。図-8・a 中の (1) の点と図-8・b の各点は、図-5 に示した測定例の 2 つの場合について、最小 2 乗法で求めた m により横軸に $U^{\frac{1}{m}}$ 、タテ軸に E_A^2 をとって各測定値を P

図-8・a 最小 2 乗法で求めた定数によるプロット, (1) は $1 \leq U \leq 40 \text{ cm/sec}$, (2) は $10 \leq U \leq 40 \text{ cm/sec}$

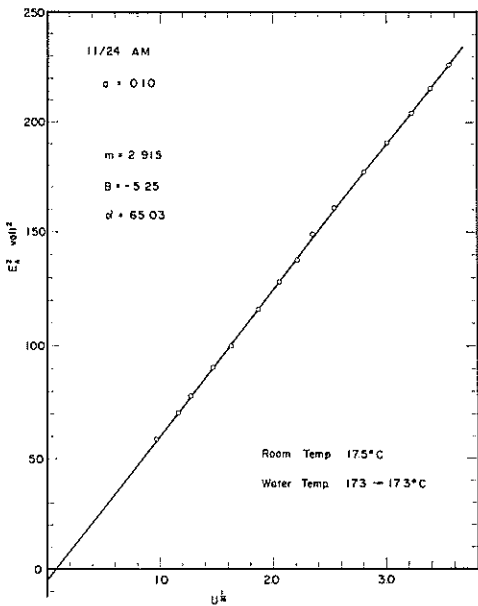


図-8・b 最小2乗法で求めた定数によるプロット

ロットしたもので、それぞれの直線はB, α , mの計算値を使って(12)式の関係を書き入れたものである。このような表わし方により、最小2乗法であてはめた係数についての各測点の一致の仕方は一応よくわかるが、ただ横座標の値がUの小さいところが非常に強調されていて、実際のスケールでの一致性がわかりにくい。そこで実際のリニアライザーで行なうアナログの計算(変換)と同じことを、上の2ケースの測定電圧 E_A について行ない、それぞれ対応するUと組合せて(図-7・a~dと同様の形に)プロットしたのが図-9・aの白丸の点と図-9・bの点である。すなわちこれらの図の横座標の値は

$$\tilde{E}_L = \left(\frac{E_A^2 - B}{\alpha} \right)^m \dots\dots\dots (13)$$

により計算したもので、B, α , mの値はそれぞれ最小2乗法で求められた値を使っている。なお両図の中の直線は、目視によりそれぞれ図中の点に最も適した線を引いたものであるが、2つの図の直線は完全に一致しており、注目すべきことである。

図-9・a(白丸)、図-9・bをみると、§3.2で述べた E_A の測定値の誤差による点のパラッキはあるが、確かに流速Uの全ての範囲に対して \tilde{E}_L とUとの関係は直線化されており、図-7・a~図-7・dとはUの小さいところで大きな差が見られる。これと同様の変換がリニアライザーで行なわれれば、 $1 \lesssim U \lesssim 40 \text{ cm/sec}$ の比較

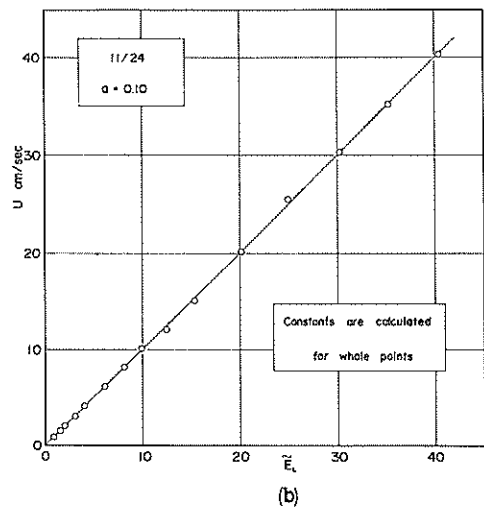
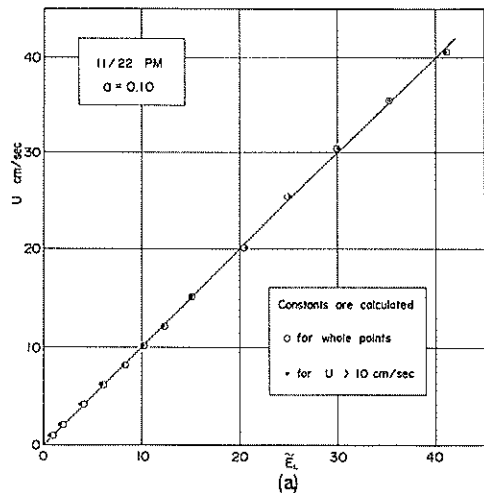


図-9 (13)式による \tilde{E}_L とUとの関係 (定数は最小2乗法による)

的広い流速範囲について電圧 E_L と流速Uの関係が直線化されて非常に便利になるのであるが、実際にはこれは行なえなかった。その理由は、DISAのリニアライザーのtransfer functionは前述のように(6)式または(7)式の形しかなく、(12)式のBがマイナスになった場合の設定はできないからである。おそらく、現在市販されているリニアライザーでマイナスのBに対応した設定のできるものはないのではないと思われるが、実際の測定でA-D変換器とコンピューターによるデータのデジタル処理をする場合には、 E_A さえ正確に記録できれば、各点ごとに(13)式の計算を行なってUに正比例した測定値をうることは大して困難なことではないであろう。なお図-8・aの中の(2)の点と直線は、図中の(1)と同

じデータ (11/22 PM) の $U \geq 10 \text{ cm/sec}$ のものだけを対象にして最小 2 乗法の計算をした結果 ($m = 2.814$, $B = 8.814$, $\alpha = 58.54$) を示したもので、 m の値が全体を対象とした(1)より少し小さくなった上に、 $B > 0$ になっている。この場合の B , α , m の値を使って全ての点につき (13) 式の \tilde{E} を計算してみた結果を図-9・a の黒丸の点で示している。この場合 $U < 9 \text{ cm/sec}$ の点は最小 2 乗法の対象としていないので直線から多少ずれてきているが、一方、 U の大きいところではごくわずかに直線との一致がよくなっている。

図-10 は最小 2 乗法を採用する以前に行なっていた水温の高い時期の検定結果で、トライアルにより $m = 3.3$ をとり、図-8・a、図-8・b と同様のプロットをしたもの (直線は目視) で同時に $U < 1 \text{ cm/sec}$ の部分で free convection の効果が表われて $E_A < E$ となる部分のあることを示そうと試みたものである。なお黒丸で示した $U < 1 \text{ cm/sec}$ の部分の流速は、タンク (粗度なし) 中の水を一樣にゆるい速度でまわしておき、表面の浮遊物がタンク幅中央で 5 cm の距離を流下する時間をストップウォッチで測って出したものである。図-10 の最低の流

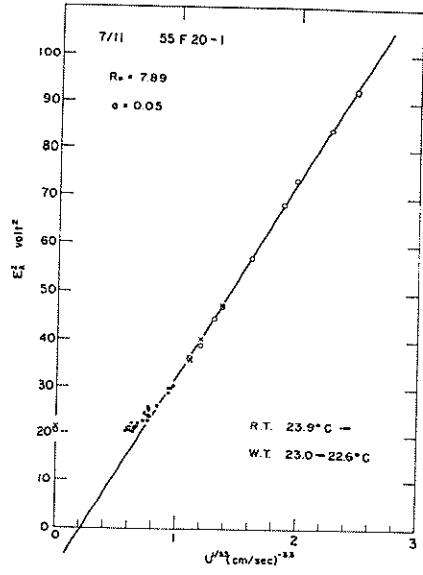
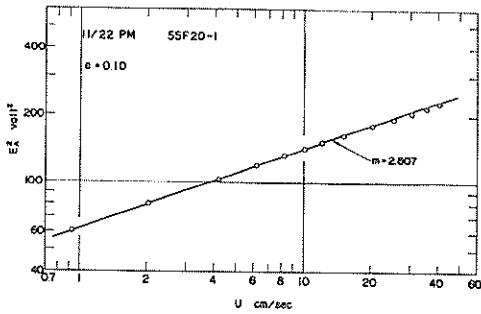
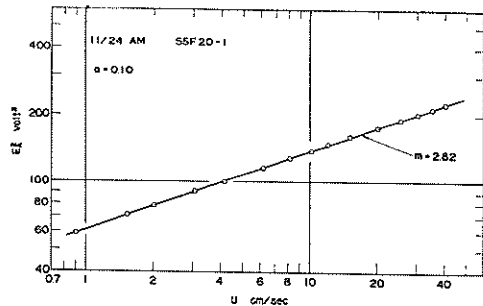


図-10 低流速まで含めた $U^{1/3.3}$ と E_A^2 とのプロット



(a)



(b)

図-11 U と E_A^2 との対数プロット

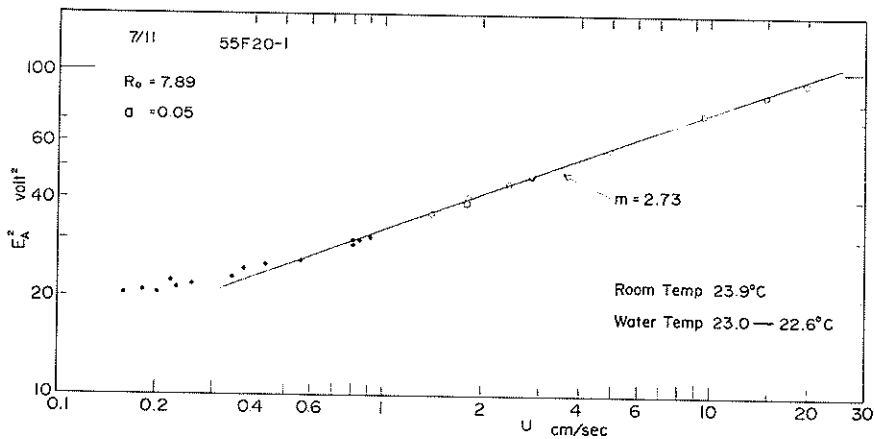


図-12 低流速を含む U と E_A^2 の対数プロット

速は約 1.6 mm/sec までいっているが、この程度では $E_A < E_0$ となる部分がよく示されていない。ただ流速が 1 cm/sec 以下になると、出力 E_A は (12) 式のような関係からはしだいにずれ去ることだけはよくわかる。

つぎに、流速の小さいところまで含めた最小 2 乗法の結果で (12) 式の B の値がマイナスに出るところから、それでは $B=0$ とおいて

$$U = \alpha' E_A^{2.2n} \dots\dots\dots (14)$$

の関係が検定結果にどの程度適合しているかを調べるため、図-8・a、図-8・b と同じデータについて U と E_A^2 を両対数目盛でプロットしたのが図-11・a と図-11・b で、図-10 と同じデータについてこのプロットをしたのが図-12 である。このいずれの場合についても、U が 1 cm/sec 弱から 12 cm/sec あたりまでは 1 本の直線上に点がよく並んでおり、この区間の流速に対しては (14) 式の関係がよく成立していることを示している。したがってこのような低流速を対象とするときには、前述のリニアライザの transfer function のうち、通常の (6) 式ではなく、(7) 式の形のものを使えばよい直線性がえられることがわかる。リニアライザで実際にこの操作を行なってみると、 $U \doteq 1 \sim 12$ cm/sec の範囲の測定点 (E_A , U) は確かに原点を通る直線上に並ぶが、 $U = 12 \sim 15$ cm/sec のあたりで測点は急に曲り、その上の方ではまた別の直線上に並ぶ。 $m = 2.85$ (nominal) とおいてリニアライザを使って検定した例は、後の図-17 に示してある。

図-13 には、図-4 に示したデータの $1 \leq U \leq 40$ cm/sec と $10 \leq U \leq 40$ cm/sec のそれぞれにつき最小 2 乗法で求めた指数 m と overheating ratio との関係を示している。 $10 \leq U \leq 40$ cm/sec の場合はとくに点の

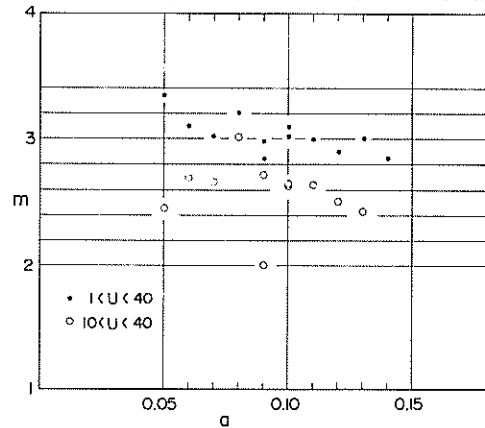


図-13 overheating ratio と指数 m との関係

数が少ないので、わずかな測定誤差の影響で m の値は大きく変わるが、いずれにせよ $1 \leq U \leq 40$ cm/sec を対象に求めた m の方が、 $10 \leq U \leq 40$ cm/sec について求めた m より大きくなっている。全域 ($1 \leq U \leq 40$) を対象とした場合 α の増大とともに m がごくわずかに小さくなる傾向があるようにも見えるが、それもあまり明らかでない。表-1 には、参考のためにこれらのデータについての最小 2 乗法の計算結果を一覧表として示す。

表-1 最小 2 乗法により求めた (12) 式の定数

実験日	a	$1 \leq U \leq 40$				$10 \leq U \leq 40$			
		N	m	E_0^2	α	N	m	E_0^2	α
10月5日	0.05	10	3.343	-10.35	41.10	6	2.458	16.58	21.68
	0.08	10	3.195	-15.92	64.20	6	3.017	-6.63	57.27
	0.10	13	3.017	-13.38	72.44	8	2.644	10.94	55.00
	0.12	12	2.898	-3.241	77.81	6	2.512	19.89	49.06
10月6日	0.06	15	3.094	-6.66	45.04	8	2.692	9.46	33.63
	0.07	14	3.016	-4.16	49.11	8	2.663	11.51	37.88
	① 0.09	15	2.986	-4.51	61.96	9	2.721	11.40	50.88
	② 0.09	14	2.843	-0.54	57.26	8	2.054	46.74	27.03
	0.11	13	2.999	-6.403	76.40	7	2.645	18.61	58.65
	0.13	14	3.005	-7.12	89.76	8	2.437	40.67	57.01
	0.10	14	3.089	-10.50	73.48	8	2.633	18.91	52.56
	0.14	14	2.847	-0.83	87.96				
11月22日	0.10	13	3.180	-14.31	75.31	8	2.814	8.887	58.54
11月24日	0.10	15	2.915	-5.249	65.03				

一方図-14には、図-11、図-12のように両対数目盛でプロットした測点の $1 \lesssim U \lesssim 12 \text{ cm/sec}$ を対象にして、目視で引いた直線の勾配から求めた(4)式の表現に

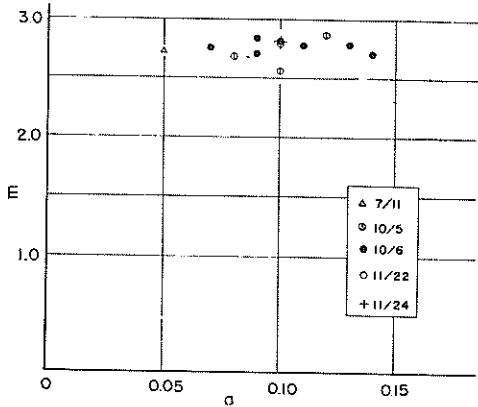


図-14 低流速を対象とした(4)式の m の値

よる指数 m の値をプロットしてある。この場合には m は overheating ratio α にほとんど依存せず、ほぼ $m \approx 2.8$ 程度の値をとるようである。このように m が α にほぼ無関係な値をとるということは、汚れによるドリフトを前述の Richardson & McQuivey²⁾の方法で補正しようとする場合、リニアライザーを使うためには大変都合である。何故ならば、overheating ratio によって m の値が変わるのであれば、汚れによるドリフトの程度に応じてリニアライザーを調整して行かねばならないことになるが、これは実際には行なえず、その分だけ誤差が多くなるからである。

5. 測定例 (格子の下流の乱れ)

以上述べてきた Hot-film 流速計は検定タンク内での検定と平行して、当所の大型風洞水路¹⁰⁾(水循環装置付)における測定にも使用してきているが、ここでは流れの中に図-15に示したような格子をおいたときのその下流での乱れの測定例について述べる。この格子は手近にあったメッキされた径 $d = 5 \text{ mm}$ の鉄棒の棒に真鍮棒 ($\phi 5 \text{ mm}$) をハンダ付して作ったもので、格子間隔は $M = 39 \text{ mm}$ 、 d と M の比は $d/M = 0.128$ と通常の乱流格子よりもやや小さい。また格子の幅も 46.8 cm で水路幅 (150 cm) の約 $1/3$ しかない。このため格子の後方の測定水深 $z = -15 \text{ cm}$ における平均流速分布 (プロベラ流速計で測定) は図-16のように格子の脊後の部分だけ流速が小さくなっていった。

測定は、水深 $z = -15 \text{ cm}$ で水路の中央に Hot-film プローブを固定し、その前方の 24.5 cm 、 40 cm 、 60 cm

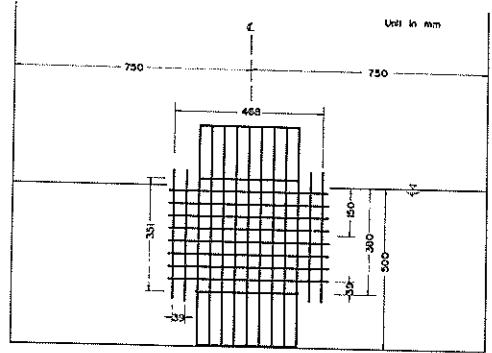


図-15 格子配置図

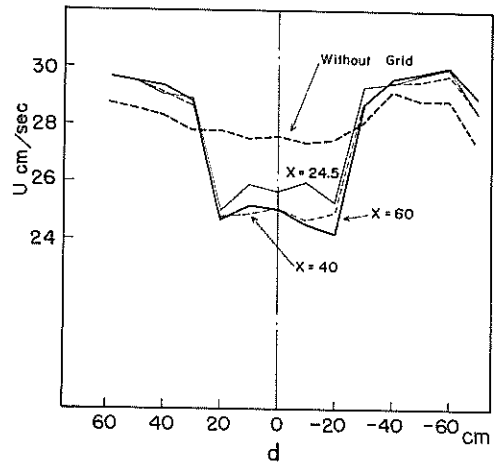


図-16 格子の後方における流速分布 ($z = -15 \text{ cm}$)

の3点に図-15の配置で格子を入れた場合、および格子を入れない場合の4ケースにつき、リニアライザー出力 E_L をデジタルデータレコーダー (DATA-C-2000) に記録した。サンプリング速度は乱れの周波数スペクトルを分割計算することを考えて $\Delta t = 1/90$ と $\Delta t = 1/360$ の2種類とり、後の計算の段階で $\Delta t = 1/90$ のデータから低周波数部分に対しては $\Delta t = 1/15$ に間引きして計算した。また各ケースの Hot-film による測定の前後には、Hot-film プローブの代りに同じ点にプロベラ流速計を入れて平均流速を測定しておいた。

測定における overheating ratio は $\alpha = 0.10$ とし、リニアライザーは $B = 0$ とおいた(7)式の形の transfer function を用いて、 $m = 2.85$ (nominal)^{注)}とおいた。リニアライザーの設定を測定時と変えないで、overheating ratio $\alpha = 0.10$ および $\alpha = 0.08$ について検定タ

注) D I S A のリニアライザー 55D10 の指数 m は連続して変えられるが、パネルダイヤルの指示値はアンプの増幅度によって数%の範囲で増減する。今回使用した増幅度では真の値は $m \doteq 2.81$ 程度であることが前もって検定の結果わかっている。

ソクで測定した流速 U とリニアライザー出力 E_L との関係を図-17に示す。前節で述べたようにほぼ $U \leq 12$ cm/sec の部分は原点を通る直線になっているが、この部分は今述べている測定には関係ない。 $U = 12 \sim 15$

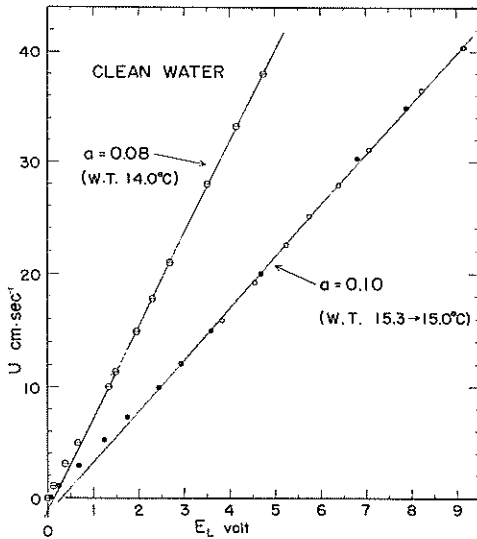


図-17 測定に使った検定曲線

cm/sec でこの検定カーブは折れているが、それより上の部分ではまた直線になっているので、流速の乱れの成分を測定するにはこれで十分である。また、 $a = 0.10$ と 0.08 の2つの直線の交点はほぼ $E_L = 0$ の線上にくる。このことから、 $a = 0.10$ と $a = 0.08$ の間で overheating ratio が変わったときの検定カーブは近似的にすべて上に述べた交点を通ると考えてよいであろう。このことを利用すると、今回の測定例のように汚れによるドリフトで出力がしだいに低下していく場合の感度(すなわち換算係数)の補正は、前に述べた Richardson & McQuivey²⁾の方法にしたがうと、ある時点での E_L と U の値を図-17の中にプロットすることにより図式に簡単に行なえる。今回の測定の場合にも図-6にほぼ等しいドリフトが生じているので、測定はプローブをアルコールで洗った直後の5分以上はさけている。それでも1つのサンプリングごとに電圧の平均値は変化しており、したがってそれぞれのサンプリングごとにまず電圧の平均値を求め、上に述べた方法で電圧から流速への換算係数

を決定してから以下に述べる周波数スペクトルの計算を行なった。

スペクトルの計算は全周波数領域を3つの区間にかけて、holding frequency f_N をそれぞれ 7.5 Hz, 45 Hz, 180 Hz にとり、Blackman-Tukey の方法で計算を行っている。こうして求めた格子の下流 24.5 cm, 60 cm のそれぞれにおける乱れのスペクトルを図-18・a, 図-18・b に示し、格子を入れない時の乱れのスペクトルを図-18・c に示す。また格子の下流 $x = 24.5$ cm, 40 cm, 60 cm のとき、および格子なしのときのスペクトルをまとめたものを図-19に示す。3分割法による上・下のスペクトルのつなぎは、乱れの小さい格子なしの場合を除いて良好である。図-19からみると、今回使った格子の影響は 0.5 ~ 0.6 Hz より上の周波数にあらわれており、また格子からの距離とともに乱れが減衰していく様子もよくわかる。

一方、これらのスペクトルの 0.5 Hz 以下の成分はやや多いように見える。今回のデータは汚れによるドリフトのため linear trend をもつと考えられるので、計算では、自己相関係数に linear trend を除去するための補正をしてある (Bendat & Piersol¹²⁾, p.301 を参照)。

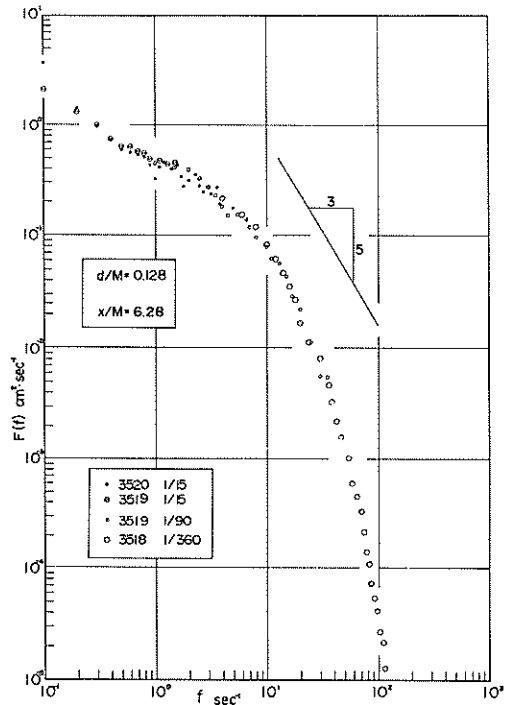


図-18・a 格子後方における乱れのスペクトル ($x = 24.5$ cm)

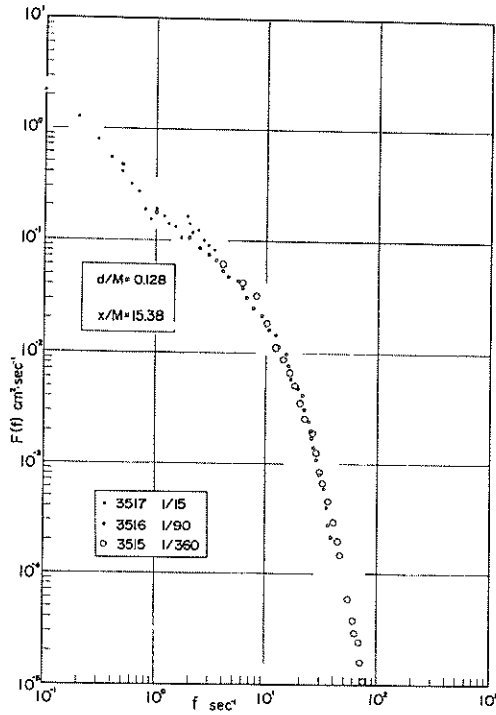


図-18・b 格子後方における乱れのスペクトル ($x = 60\text{cm}$)

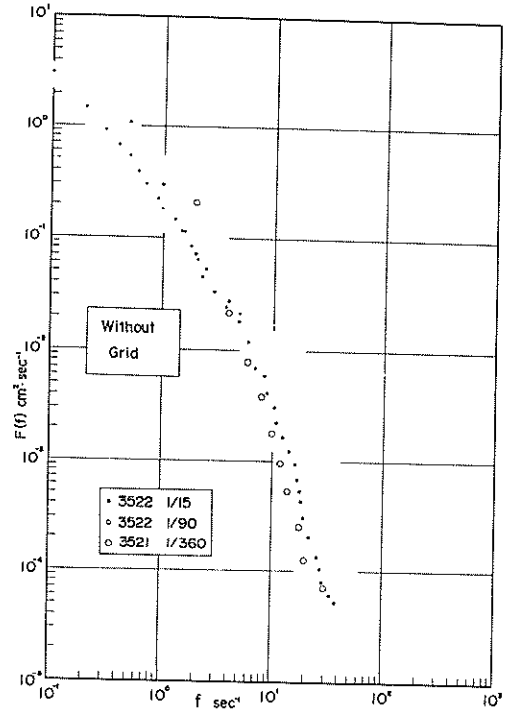


図-18・c 格子なしにおける乱れのスペクトル

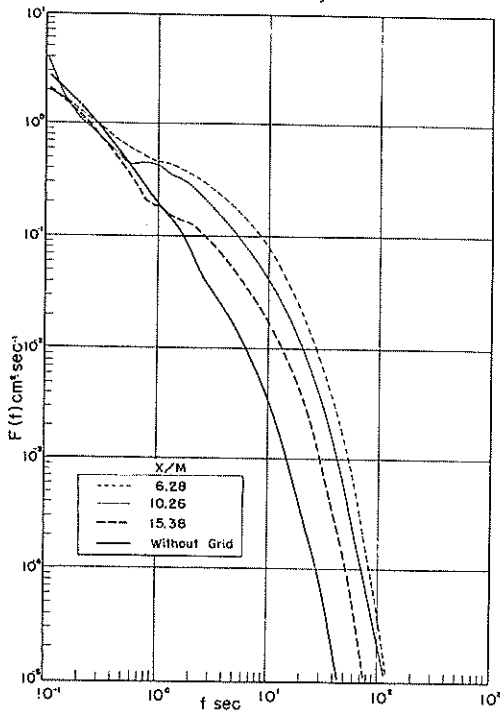


図-19 各ケースのスペクトルの比較

しかし実際には、この補正をしたときとしないときの差は0.1Hzの計算値にしか目立ってはいらわれていなかった。したがって0.5Hz以下の部分にあらわれる比較的大きなスペクトル密度は、Hot-filmのドリフトによるものではなく、流れそのものがこのような低周波数成分をもっているためと考えられる。

6. まとめ

流れの中での風波の研究に関連した必要性から、Hot-film流速計(DISA)によって水中の乱れを測定するため、まず今回製作した検定用の環状タンクを使って、Hot-film(DISA Fiber probe 55F20)の水中での静的動作特性、温度ドリフトなどをいろいろ調べ、特にリアライザーを使った出力の直線化のために最も都合のよいパラメータのとり方を検討した。また水を流した水路で使用した場合のドリフトの性質と対策を検討し、それらを格子の後方での乱れの測定に適用してみた。以上の結果をまとめると、大体つぎのとおりである。

- (1) 測定中の水温の変化は出力電圧に著しい影響をおよぼし大きな誤差を生じるが、これは冷抵抗R.の変化に応じて設定抵抗を変えて同じoverheating

- ratioを保つことにより除去できる。
- (2) 水温が5~6℃程度違う場合でも、overheating ratioを正確に同じに保てば、実用上同じ検定曲線が使えることが実験的にも確認された(図-5参照)。
 - (3) 汚れによるドリフトは水質の程度によって大きく異なり、今回の水路で水を流した場合には、本文の図-6に示したように短時間のうちに大きな電圧変化を生じる。
 - (4) 汚れによるドリフトの補正のためには、汚れによる熱伝導の低下をoverheating ratioの低下と等価なものと思わずRichardson & McQuiveyの方法があるが、それにはHot-filmによる測定とは別の方法で流れの平均流速を測定する必要があり、かなり面倒である。ただ、その補正の操作はリニアライザーを使うことにより多少簡単化される(図-17の例を参照)。
 - (5) $1 \leq U \leq 40$ cm/secを対象とした本体出力 E_A と流速 U の検定データを一般的な関係式(12)にあてはめ、最小2乗法で係数を求めると $B < 0$ になることがわかった。これに対応した設定のできるリニアライザーがあれば上の全範囲について完全な出力の直線化ができることが確認された(図-9・a, b)。
 - (6) 実際に使用したリニアライザーでは $B \geq 0$ にしか設定できないので、流速の小さいところでの直線性の低下を無視するか(図-7・a~b, 図-9・aの黒丸の点)、あるいは $B = 0$ においたときの $U \leq 12$ cm/secでの直線性の良さ(図-17参照)をとるかどちらかにするしかない。
 - (7) 面倒な補正を行なうことにより、汚れによるドリフトの著しい流れの中の格子の下流で乱れの測定を行なった。乱れのスペクトルを計算した結果は比較的良好であるが、今回ほどドリフトの進行が速いと、実用的には上の(4)で述べた方法も使いにくく、また乱れの低周波数成分の測定は不可能に近い。

(1972年12月20日受付)

参 考 文 献

- 1) Raichlen, F. (1967) Some turbulence measurements in water, Proc. of ASCE, Vol. 93, 紙EM2, 73-97.
- 2) Richardson, E. V. & McQuivey, R. S. (1968) Measurement of Turbulence in Water, Proc. ASCE, Vol. 94, 紙HY2, 411-430.
- 3) Liu, H. & Morris, C.D. (1968) 2) の論文に対する Discussion, Proc. ASCE, Vol. 94, 紙HY6, 1601-1605
- 4) Resch, F. et Coantic, M. (1969) Étude sur le fil chaud et le film chaud dans l'eau, La Houille Blanche, Nr. 2, 151-161.
- 5) Resch, F. J. (1970) Hot-Film Turbulence Measurements in Water Flow, Proc. ASCE, Vol. 96, 紙HY3, 787-800.
- 6) McQuivey, R. S. & Richardson, E. V. (1969) Some Turbulence Measurements in Open-Channel Flow, Proc. ASCE, Vol. 95, 紙HY1, 209-223.
- 7) 石井千万太郎・板倉忠興・岸力 (1970) Hot-film 流速計による開水路水流の乱れの測定, 土木学会論文報告集, 第180号, 51-60.
- 8) 日野幹雄・大西亮一 (1971) 浅水表面波の粗底上の乱流構造, 第18回海岸工学講演会論文集, 83-91.
- 9) Bruun, H.H. (1971) Linearization and hot wire anemometry, J. Phys. E: Sci. Instrum., Vol. 4, 815-820.
- 10) 加藤 始・佐野喜久雄 (1970) 流れの中の風波についての実験的研究(1), 湾港技術研究所報告, 第9巻3号, 59-87.
- 11) 本間 仁・春日屋伸昌 (1957) 次元解析・最小2乗法と実験式, 応用数学講座第5巻, コロナ社.
- 12) Bendat, J. S. & Piersol, A.G. (1966) Measurement and Analysis of Random Data, John Wiley & Sons, 390 p.

記 号 表

- a : overheating ratio ($= \frac{R_w - R_0}{R_0}$)
 B : 式(4), (12)の定数
 C, D : 式(1), (3)の定数
 d : 格子の直径
 E_A : 流速計本体の出力電圧
 E_L : リニアライザー出力電圧
 \tilde{E}_L : E_A の直線化を試みた計算値(式(13)を参照)
 E_0 : $U = 0$ における本体出力電圧
 E'_0 : 式(5)における仮定の0点電圧
 I : ブリッジ電流
 M : 格子間隔
 m : リニアライザーで設定する指数($= 1/n$)
 n : 流速と本体出力電圧の関係を支配する指数(式(1), (4)などを参照)

N	: データ数, または検定装置でのパルス数	U	: 流れの平均流速
R。	: 水温における Hot-film エLEMENT の抵抗値	x	: 格子後方の距離
R _w	: 測定時の Hot-film エLEMENT の抵抗値	z	: 水面から上向きにとった座標
t。	: 周囲の水の温度	α	: 式(4), (12) の定数
t _w	: 測定時の Hot-film エLEMENT の温度	α_t	: Hot-film エLEMENT の温度係数

港湾技研資料 No.157

1973・3

編集兼発行人 運輸省港湾技術研究所

発行所 運輸省港湾技術研究所
横須賀市長瀬3丁目1番1号

印刷所 日青工業株式会社

Published by the Port and Harbour Research Institute
Nagase, Yokosuka, Japan.