

熱線流速計による乱流測定法とその問題点

河 村 三 郎*
久 保 田 稔**

1. ま え が き

本論文は、近年、流水中における乱流構造の解析にしばしば使用されるようになってきた熱線流速計の測定法を説明し、さらに熱線プローブのもつ種々の問題点を考察したものである。

流水乱流を測定しようという試みは、A.A. Kalinske¹⁾の写真技術による方法などによって古くから試みられてきたが、その取扱いが非常に煩雑なため、流水の乱流測定を可能にする測定機器の開発が強く要望されてきた。

熱線流速計以外の機器による流水の乱流測定については、Ippen-Raichlen²⁾、Grossman-Li-Einstein³⁾、Eagleson Perkins⁴⁾、Lumly⁵⁾、Chuang-Cermak⁶⁾らの研究者により種々の方法で行われてきたが、これらの方法は応答周波数特性が低かったり、乱流強度に含まれる誤差が大きかったりして実用に至らなかった。

流体の乱流測定に使用されている熱線流速計の測定原理は、1909年に、加熱した抵抗線（熱線）の温度変化から、流速測定を提案した Kennelly にさかのぼることができる⁷⁾。後に、1914年には、King⁷⁾によって、流体中におかれた細長い円柱からの熱伝達の実験的および理論的研究が行われた。

空気流における乱流測定は、空気流中では熱線流速計が安定に動作するため、現在まで多数の研究者によって行われてきた。一方、熱線流速計を流水の乱れ測定に用いる試みも行われたが、熱線に付着する汚れや、熱線による水の電気分解、水の電導率などのために、安定に動作させるには困難があった。

そこで、Ling⁸⁾は、ガラスまたはセラミック上にプラチナ薄膜を蒸着させ、石英コーティングすることにより電導率による不安定性を減少させた。しかしながら、水の汚れや電気分解による不安定性を減少させるには至ら

なかった。なお、現在、流水測定に使用されているプローブは、一般に、Hot-Film プローブであるが、以下の記述において混乱がないかぎり『熱線』という言葉を使用する。

2. 測定原理

乱流測定において乱流測定検出部と測定装置が満たさねばならない条件は⁹⁾

- ① 流水に入れられる検出部は、流れのパターンに与える擾乱が許容最小限となる形状と大きさでなければならない。
- ② 瞬間的な流速分布は、検出部を通過する間、一定でなければならない。換言すれば、検出部は乱れの最小スケールよりも小さくなければならない。
- ③ 測定装置の慣性は、小さくなければならない。
- ④ 測定装置は平均値の2~3%程度の差をも記録するくらい感度が十分よくなければならない。
- ⑤ 測定装置は安定でなければならない。
- ⑥ 測定装置は、乱流によってひき起こされる振動や運動を排除するくらい十分強く、堅牢でなければならない。

熱線流速計以外の流水乱流測定機器は、おもに

- ① 回転式流速計
- ② 総圧管式流速計
- ③ 超音波式流速計
- ④ 電位差式流速計

などであるが¹⁰⁾、大きさ、周波数応答性、圧力変動に基づく誤差などを考慮すると、前述したような多数の条件を満たす室内用乱流測定機器は現在のところ熱線流速計以外にないと考えられる。

熱線流速計の基本回路には、以下のような2種類がある。

- ① 熱線への供給電流が一定に保たれ、熱線抵抗が流速変動とともに変動する一定電流法。

* 正会員 工博 岐阜大学助教授 工学部土木工学科

** 正会員 工修 岐阜大学助手 工学部土木工学科

② 電気フィードバックシステムにより、流速変動により低下した熱線温度を一定に保つためにフィードバックによって電流が供給される一定温度（一定抵抗）法。

安定に動作するフィードバックシステムが開発されるまでは、一般に一定電流法が用いられてきたが、この方法では測定周波数領域が数千 Hz 程度であり、一方、一定温度法では測定周波数領域が数十 kHz に広がり、また、比較的振幅の大きな乱流値の測定が可能である。

安定なフィードバック機構が開発された現在、ほとんどの熱線流速計は一定温度法であり、また、われわれの使用した流速計も一定温度法であるので、以下には一定温度法での熱線流速計について述べる。

熱線流速計の検出部は、写真-1 のように、プローブ、プローブサポート、ケーブルから構成されており、また、プローブは図-1 のように、いろいろの形状のものがある。これらのプローブは、すべて流水乱流測定のため前述のようにプラチナ薄膜をガラスまたは石英上に蒸着させ、石英コーティングしてある。

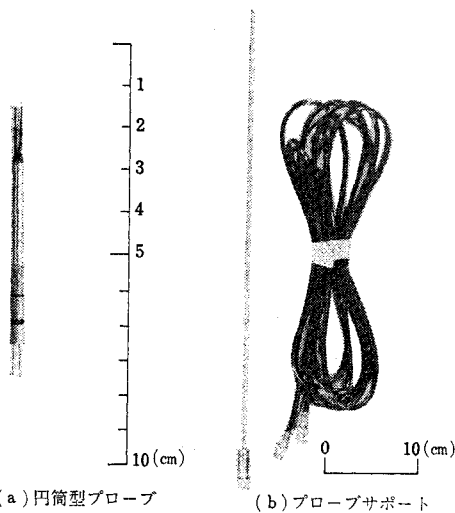


写真-1 熱線流速計の検出部

これらプローブの流水乱流測定における長所短所は、以下のようである⁹⁾。

① 円筒型プローブ：方向応答性は熱線（Hot-wire）の場合と同じであり、前面のよどみ点での高い熱輸送のため、汚れや空気泡に敏感である。糸くず状のゴミなどが付着しやすく、また、簡単に除去できない。

② 刃型プローブ：構造的な強度が強くて高速流測定に適している。レイノルズ応力を測定することができる。円筒型プローブよりも汚れや糸くず状のゴミの影響を受けにくい。

③ 円錐型プローブ：糸くず状のゴミの影響を最も受けにくい。方向応答性は一方向のみである。

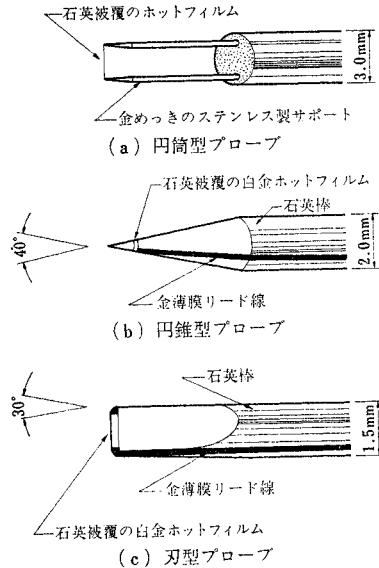


図-1 プローブの形状

一般に、これらのプローブは、長さ 12.7 mm、直径 2 mm くらいである。

電氣的に熱せられているこれらの熱線は、流水で冷却され温度低下をひき起こし、この温度低下を補うために使用される電流によって流速を換算する。

流水によって熱線から輸送される合計熱量¹¹⁾は

- ① 流速
- ② 熱線と流水との温度差
- ③ 流水の物理的特性
- ④ 熱線の大きさや物理的特性

に依存する。したがって、②と④が既知であり、③が一定に保たれれば、①を知ることができる。

流体中の熱線は、熱伝導、自由対流、強制対流および放射によって冷却されるが、一般に、自由対流と放射の影響は無視される。しかし固定水路床近傍では、熱線から水路床への熱損失の割合は無視できないであろう¹²⁾。

3. 熱輸送方程式

円柱に対して垂直に流れている流体への円柱からの熱輸送の Kramers の関係式は、ヌッセルト数 (Nu)、プラントル数 (Pr)、レイノルズ数 (Re) を用いて

$$Nu = 0.42(Pr)^{0.2} + 0.57(Pr)^{0.33}(Re)^{0.50} \dots (1)$$

と表わされる。長さ l の一様温度の円柱から回りの流体へ輸送される単位時間あたりの熱量は、熱的平衡条件のもとで、円柱への単位時間あたりの電流による熱発生量に等しくなければならないという条件から、一般に次のような関係が導かれる。

$$I^2 R_w / (R_w - R_g) = A + B \bar{U}^{1/2} \dots \dots \dots (2)$$

ここに、 I は電流、 R_g は周囲の流体温度における抵抗値、 R_w は設定抵抗値、 A と B は実験から決定される定数である。しかし、式 (2) のかわりに

$$I^2 R_w / (R_w - R_g) = A + B \bar{U}^n \dots\dots\dots (3)$$

と表わした方が一般的である。ここに、指数 n は、流体の種類、オーバーヒート比 ($K = R_w / R_g$)、プローブ形状、平均流速等の関数である^{13), 14)}。

式 (3) をオーバーヒート比 K を用いて書きなおすと

$$\bar{E}^2 = R_g^2 K (K - 1) (A + B \bar{U}^n) \dots\dots\dots (4)$$

または

$$\bar{E}^2 = A' + B' \bar{U}^n \dots\dots\dots (5)$$

となり、平均流速と平均出力電圧 (\bar{E}) の関係式が得られる。

熱線流速計の出力電圧を流速に変換するために必要な仮定は、以下のようである¹⁵⁾。

① 速度ベクトル U は平均流速 \bar{U} と変動成分 u, v, w で表わされる。

② 流れに対し垂直におかれた検出部は、熱線に対して垂直な流速の平均値と、その変動成分に対して敏感である。

③ 平均出力電圧と平均流速との関係は、変動出力電圧を変動流速に変換するのに使用できる。

④ 平均出力電圧と平均流速との関係式の勾配 $d\bar{E}/d\bar{U}$ の変化は、測定速度の範囲内では小さい。

前述の仮定に関連した問題点としては「熱線流速計の出力電圧は熱線に沿った速度成分にも部分的に依存する^{16), 17)}」という報告があり、また「流水中に傾けて挿入された熱線からの熱損失は、同じ垂直な流速成分をもった流水に垂直に入れられた熱線の熱損失よりも大きい」という事実^{18), 19)} も報告されている。これらの問題は、今後明らかにされるべき問題であろう。

4. 乱流強度の測定

(1) 乱流強度の式

全流速 U は

$$U^2 = (\bar{U} + u)^2 + v^2 + w^2 \dots\dots\dots (6)$$

であるから

$$dU = \frac{\bar{U} + u}{U} du + \frac{v}{U} dv + \frac{w}{U} dw \dots\dots\dots (7)$$

乱流強度があまり大きくないときには

$$|\bar{U}| \gg |u|, |v|, |w|$$

の仮定を受け入れることができるから、式 (7) は

$$dU = du \dots\dots\dots (8)$$

となる。熱線流速計からの出力電圧の微分は

$$dE_{out} = \frac{\partial E}{\partial U} dU \dots\dots\dots (9)$$

と表わされるから、式 (8) を使用し、また、微分は変動分に等しいとすると

$$e = \frac{dE}{dU} u \dots\dots\dots (10)$$

となる。式 (10) より、変動電圧と変動流速との R.M.S. は

$$e' = \frac{d\bar{E}}{d\bar{U}} u' \dots\dots\dots (11)$$

となる。式 (5) より $d\bar{E}/d\bar{U}$ を求め、式 (11) を使用して、乱流強度 u' を求めることができる^{14), 20)}。

(2) オーバーヒート比 K と温度との関係

熱線の温度 θ_w における抵抗値 (設定抵抗値) を R_w 、周囲の水の温度 θ_g における抵抗値を R_g とすると、 φ を熱線の抵抗の温度係数として、一般に R_w は

$$R_w = R_g [1 + \varphi(\theta_w - \theta_g)] \dots\dots\dots (12)$$

と表わすことができる。式 (12) よりオーバーヒート比 $K (= R_w / R_g)$ は

$$K = 1 + \varphi(\theta_w - \theta_g) \dots\dots\dots (13)$$

となり、オーバーヒート比 K は水温と熱線との温度差に比例する値であることが知られる。したがって、水に温度変化が存在すると K と R_g が変化したが、一般に温度変化が $5 \sim 6^\circ\text{C}$ 程度の場合には、 R_g の変化は小さいので、 R_g の変化は無視して K のみを一定に保つように設定抵抗 R_w を修正すれば、出力電圧と平均流速との関係が一定に保たれる²¹⁾。

オーバーヒート比 K の変化による平均出力電圧 \bar{E} と平均流速 \bar{U} との関係は、図式的に、図-2 に示してある。

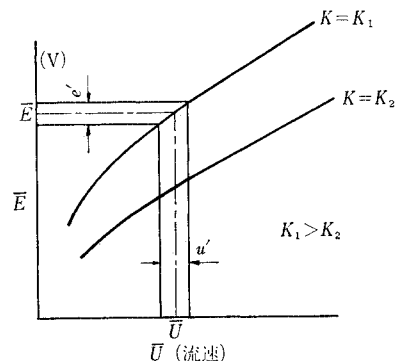


図-2 オーバーヒート比 K の変化図

一般に、オーバーヒート比 K は、流水測定では $1.02 \sim 1.10$ くらいであるが、 K の値をあまり大きくすると気泡が発生するから注意しなければならない。

5. 汚れの問題

流水の乱流測定に際して、水中に存在するゴミや化学

物質等が、プローブ表面に付着して出力電圧を低下させる。この問題が流水乱流測定を困難にしている大きな原因の一つであると考えられる。

この汚れの度合は、前述したようにプローブの形状によっても異なり、円錐型プローブが最も汚れの影響を受けにくいようである。

この汚れの影響を簡単に除去する方法は、測定ごとにプローブ表面をやわらかいブラシで注意深く掃除する方法があるが、無論この方法はある程度きれいな流水に対してのみ使用可能である。ほかに、Richardson-Mcquivey¹⁴⁾が提案した以下のような方法がある。

彼らは「汚れによる出力電圧と流速との関係の変化は水が汚れていない場合のオーバーヒート比の減少による変化と同等であり、汚れによるプローブの周波数応答性に対しては、あまり影響しない。また、あるプローブに対しては、固有の流速と電圧の関係群があり、それは異なるオーバーヒート比での検定によって決定される」としている。この仮定により、汚れていない場合の流水に対して、種々のオーバーヒート比 K による出力電圧と流速との関係を前もって調べておき、汚れている流水での出力電圧とその点についてのピート管などによって求められた平均流速との関係をプロットすることにより、見かけのオーバーヒート比を決定し、変動電圧と変動流速との関係を求める。Resch²²⁾は、Richardsonらの方法を検討し、その方法の妥当性について実験により証明している。しかし、この方法では前もっているいろいろのオーバーヒート比での出力電圧と流速との関係群を求めておかなければならず、かなり煩雑である。

6. 測定手順

測定前に、水路内の水に汚れや微小なゴミなどがないようにし、できれば水路内にフィルター装置を取り付ける。

なお、温度変化には十分注意し、温度が変化するようならば水路内に恒温装置を取り付け、流水温度を一定に保つようにするか、前述のように設定抵抗値 R_w を温度変化に合わせて変化させ、オーバーヒート比を一定に保つ。

次に、水温 θ_g での熱線抵抗値 R_g を測定し、適当なオーバーヒート比 K を選定し、熱線設定抵抗値 $R_w (=K \cdot R_g)$ を設定する。

熱線流速計からの平均出力電圧 \bar{E} とその点の平均流速 \bar{U} をピート管等で求め、多数のこの (\bar{E}, \bar{U}) の値から式 (5) の A', B', n を決

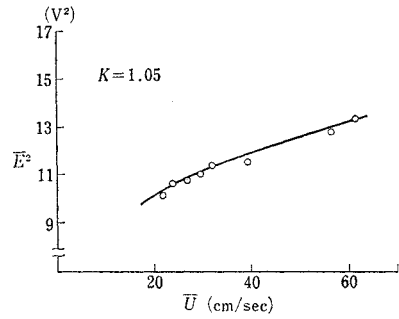


図-3 \bar{E}^2 と \bar{U} との関係

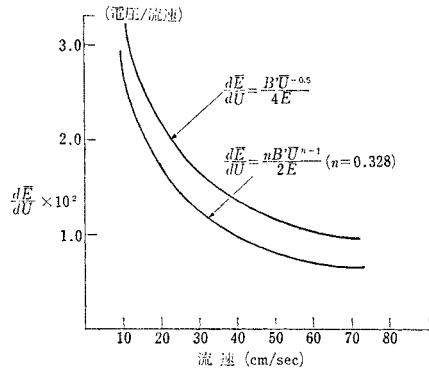


図-4 $\frac{d\bar{E}}{d\bar{U}}$ と \bar{U} との関係

定する。図-3 はこのようにして決定された出力電圧と平均流速との関係曲線であり、また、図-4 は図-3 に示されている曲線の勾配 $d\bar{E}/d\bar{U}$ と、同じ (\bar{E}, \bar{U}) のデータに対し、 $n=0.5$ とした場合に得られた曲線の勾配とが示してある。図-4 と式 (11) より、指数 n の値の差異は乱流強度に大きく影響することが知られる。

実際に乱流強度を求める場合は、式 (11) によるよりも全サンプリングデータの標準偏差として求めた方がよい。

以上のようにして出力電圧と平均流速との関係が決定されたならば、計測点での乱流測定を行い、出力電圧 E を直接に同軸ケーブルで A-D コンバーターに接続し、磁気テープにデジタル量として記憶させ電子計算機で種々の乱流統計量を計算するか、データレコーダーに出

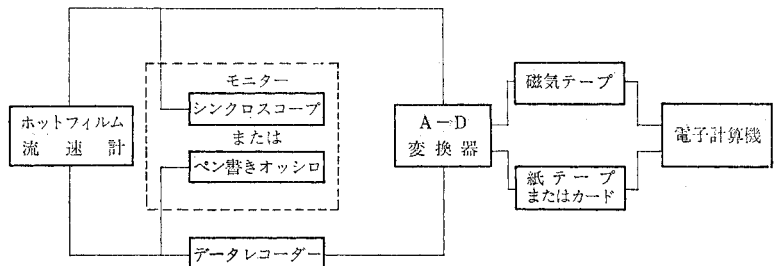


図-5 データ処理システム

力電圧を入力させ、A-D コンバーターによって紙テープ等に出力させた後、電子計算機でデータ処理を行う。図-5 は以上の手順を模式的に示したものである。

7. あとがき

熱線流速計の種々の特徴と流水の乱流測定法について述べてきたが、汚れや気泡の熱線流速計への影響、流水による熱線からの熱損失等の根本的解決はなされておらず、今後の研究に期待されている点が多い。

筆者らも昭和 47 年度以来、種々の条件のもとでの乱流測定を行ってきたが、流水乱流の測定の困難さを痛感している。

最後に、この論文は筆者の 1 人である久保田が名古屋大学へ内地留学中にとりまとめたものであり、ご討論をいただいた足立昭平教授に感謝の意を表します。

参考文献

- 1) Kalinske, A.A. : Relation of the statistical theory of turbulence to hydraulics, Trans. ASCE., Vol. 105, pp. 1 547~1 600, 1940.
- 2) Ippen, A.T. and F. Raichlen : Turbulence in civil engineering; Measurements in free surface streams, Jour. of the Hydraulics Division, ASCE., Vol. 83, No. HY 5, pp. 1 392₋₁~1 392₋₂₇, 1957.
- 3) Grossman, M.L., H. Li and H.A. Einstein : Turbulence in civil engineering; Investigations in liquid shear flow by electromagnetic induction, Jour. of the Hydraulics Division, ASCE., Vol. 83, No. HY 5, pp. 1 394₋₁~1 394₋₁₅, 1957.
- 4) Eagleson, P.S. and E.F. Perkins : A total head tube for the broad-band measurement of turbulent velocity fluctuations in water, Proceedings, IXth Congress of Internatl. Assn. for Hydr. Research, London, 1961.
- 5) Lumley, J.L. : The constant temperature hot-thermistor anemometer, Symposium of measurement in unsteady flow, ASME. Hydr. Division Conf., Worcester, Mass., 1962.
- 6) Chuang, H. and M. Cermac : Turbulence measured by electrokinetic transducers, Jour. of the Hydraulics Division, ASCE., Vol. 91, No. HY 6, pp. 1~8, 1965.
- 7) Hinze, O.J. : Turbulence, McGraw-Hill Book Co., Inc., New York, N.Y., 1958.
- 8) Ling, S.C. : Heat-transfer characteristics of heat-film sensing element used in flow measurements, Jour. of Basic Engineering, ASME., Series D, pp. 629~634, 1960.
- 9) 前出文献 7), p. 74.
- 10) 今本博健 : 開水路流れの乱れに関する水理学的研究, 学位論文, 京都大学, pp. 45~53. 1971 年 6 月.
- 11) 前出文献 7), p. 75.
- 12) Wills, J.A.B. : The correction of hot-wire readings for proximity to a solid boundary, Jour. of Fluid Mech., Vol. 12, pp. 388~396, 1962.
- 13) Raichlen, F. : Some turbulence measurements in water, Jour. of the Engineering Mechanics Division, ASCE., Vol. 93, No. EM 2, pp. 73~97, 1967.
- 14) Mcquivey, S.R. and E.V. Richardson : Measurement of turbulence in water, Jour. of the Hydraulics Division, ASCE., Vol. 94, No. HY 2, pp. 411~430, 1968.
- 15) 前出文献 14), p. 414.
- 16) Davies, P.O.A.L., Fisher, M.J. and Barratt, M.J. : The characteristics of the turbulence in the mixing region of a round jet, Jour. of Fluid Mech., Vol. 15, Part 3, pp. 337~367, 1963.
- 17) Sedat, S. : Discussion of measurement of turbulence in water, Jour. of the Hydraulics Division, ASCE., No. HY 1, pp. 518~519, 1969.
- 18) Champagne, F.H., A.C. Sleicher and H.O. Wehrmann : Turbulence measurements with inclined hot-wires, Part 1., "Heat transfer experiments with inclined hot-wire", Jour. of Fluid Mech., Vol. 28, Part 1, pp. 153~175, 1967.
- 19) Champagne, F.H., A.C. Sleicher : Turbulence measurements with inclined hot-wires, Part 2., "Hot wire response equations", Jour. of Fluid Mech., Vol. 28, Part 1, pp. 177~182, 1967.
- 20) Mcquivey, S.R. and E.V. Richardson : Some turbulence measurements in open-channel flow, Jour. of the Hydraulics Division, ASCE., Vol. 95, No. HY 1, pp. 209~223, 1969.
- 21) 加藤始・佐野喜久雄・高松恭文 : 水中の乱流測定のための Hot-Film 流速計の特性, 運輸省港湾技術研究所, 技研資料, No. 157, pp. 1~21, 1973 年 3 月.
- 22) Resch, J.F. : Hot-film turbulence measurements in water flow, Jour. of the Hydraulics Division, ASCE., Vol. 96, No. HY 3, pp. 787~800, 1970.

(1974. 5.22・受付)

土木学会創立 60 周年記念出版
 <49 年 10 月 10 日出版>

日本の土木地理

— 国土への理解と認識のために —

A 5 判 465 ページ 定価 3 200 円

編 集 : 土木学会日本の土木地理編集委員会
 発 行 : 森北出版株式会社
 申込先 : 全国主要書店

『低湿なオランダの地は、かなり昔から世の注目をひいていた。ローマのプリニウスに次のような記述がある』……、で始まる本書は、わが国土の特性を国際的な立場から眺め、その上に営まれつづけてきた土木事業と土木技術を空間的秩序の上から考察した、真に新生面を開いたこれからの土木技術者必読の書である。

主な目次内容 土木地理学の成立/地形と土木構造物/気候との対応/土壌の特性とその対策/土地利用と食糧生産/エネルギー獲得の地理的条件/海岸線と商工業港/国土と交通/都市/災害対策/資料