

超音波流速計による河川乱流の測定

京都大学防災研究所 正会員 石 原 安 雄
同 正会員 余 越 正一郎

1. ま え が き

河川の流れが乱れた流れであることはよく知られているが、その乱流構造に関する知識は非常に乏しいといわざるをえない。その理由は、従来の河川水理学においてはこれに対する切実な要求がなかったことも考えられるが、河川流れの乱れを精確に測定することができる計測器、とくに流速計の開発が遅れていたことがもっとも大きな原因であろう。

現在、河川の乱流速度場の測器としてまず考えられるものにプロベラ式流速計がある。これは構造が比較的簡単であるうえに取扱いが便利であるという長所をもっているが、追従性がよくないという短所がある。したがって、プロベラ式流速計を用いて河川乱流をはかるときには、測定方法や操作について十分に注意しなければならない。¹⁾ しかしながら、主流方向の大きなスケールの乱れの測定には非常に有利であって、われわれもこうした目的に対して利用している。²⁾ 微細構造の測定に対しては、空気乱流の分野において古くから威力を発揮してきた熱線風速計の原理を用いることが考えられ、いろいろと試みられている。中でも hot film 流速計による研究が有名であるが、³⁾ 実際に水中で使用するには安定性その他に多くの問題があって、あまり使い易い測器とはいえないようである。また、電磁流速計も使用されているが受感部の大きさなど問題がある。⁴⁾ 受感部の大きさ、追従性、安定度、感度などに対する条件を十分に備え、しかも精度が高く取扱い易い測器となると、従来の原理による測器の改良にたよっていたのでは、飛躍的な発展は期待できないように思われる。

このような点を解決するために、最近全く新しい原理による測定が 2, 3 試みられているが、そのうちの一つに超音波流速計がある。これは急速に発達した超音波技術を応用したものであって、風速測定の分野ですでに実用の段階に至っている。超音波流速計は 2 点間を超音波が伝播するに要する時間が媒質の流速によって変化することを利用するものであって、精度や周波数特性がよいばかりでなく、流速の 3 成分を同時に測定することさえ可能である。超音波による流速測定にもいろいろの方式があって、⁵⁾ 超音波パルスの伝播時間が流れ方向に進む場合と逆方向の場合とで異なるので、両方向の伝播時間の差を検出して流速を知る時間差法、連続波を使用して両方向の伝播時間の差を位相差として検出する位相差法、超音波パルスの伝播時間の逆数である周波数の差を検出する周波数法などが使用されている。各方式ともそれぞれ長所短所があることはいうまでもない。

われわれは、今回周波数法の一つである sing around 法による超音波流速計で、流速の 2 成分を同時に測定することができる測器を製作し、河川乱流に関して若干の測定を行なったので、これらについて報告する。

2. Sing Around 法による超音波流速計

(1) 原理: sing around 法は、1 対の送受波器と 1 つのトランスミッターを組とし、それを 2 組使

用して媒質の流速を測定するものである。まず、図-1において、送波器Sから発射された超音波パルスは媒質中を伝播して受波器Mで受信される。受信された信号はトランシーバーの中で増巾され、それが起振源となって直ちに送波器Sから新しい超音波パルスが発射される。すなわちパルス信号が（超音波の場合と電気の場合がある）送波器 → 媒質 → 受波器 → トランシーバー → 送波器とぐるぐるまわっているのでsing aroundと呼ばれる。このとき、パルスが上述のsing around系を一巡するに要する時間はほぼ超音波パルスが媒質中を伝播する時間に等しいが、この時間の逆数をsing aroundの周波数と名づけると、周波数を f 、送受波器間の距離を ℓ 、静止した媒質中の音波の伝播速度を c 、媒質の流速を u とすると、 $f = (c \pm u) / \ell$ が成立する。ここに、パルスの伝播方向と流速が同方向のときが正、逆方向のときが負である。

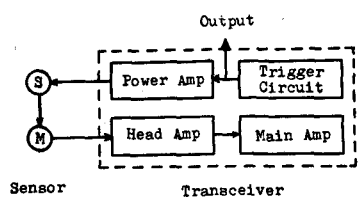


図-1 Sing around 系

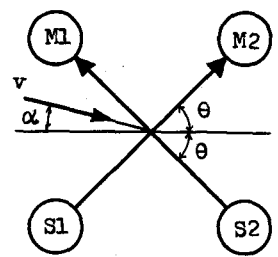


図-2 送受波器の配置

1成分の流速を測定するためには、上述のsing around系を図-2のように2組配置しなければならない。すなわち、図示のように流速を v 、その軸方向の成分を u とし、S1 → M1のsing around周波数を f_1 、S2 → M2の場合を f_2 とすると、それぞれ $f_1 = \{c - v \cos(\theta - \alpha)\} / \ell$ 、 $f_2 = \{c + v \cos(\theta + \alpha)\} / \ell$ である。したがってその差は次式のようにになる。

$$f_1 - f_2 = -2v \cos \theta \cos \alpha / \ell = -2u \cos \theta / \ell$$

ℓ および θ は測定部の形状で定まる定数であるから、 $f_1 - f_2$ を測定することによって流速の軸方向成分 u が求まるわけである。上式をみてわかるように、音速 c には無関係である。すなわち、測定中に温度が変化しても影響なく、また直線性も保持されているので、河川乱流などの現地測定用として非常に便利であると考えられる。

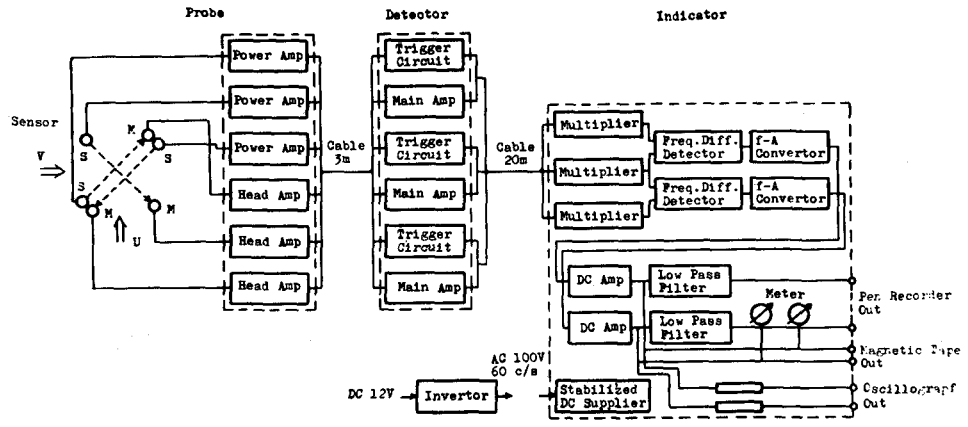


図-3. 超音波流速計ブロック図

(2) 超音波流速計の構成：本装置はsing around系を3組用いて、互に直交する2成分の流速を同時に測定できるようになっている。そのブロック図は図-3に示されているが、大きくわけて受感部(Probe)、検出部(Detector)、処理部(Indicator)、記録部からなっている。受感部および検出部によって上述のsing around系が構成されているが、両者とも水密性の円筒形容器に収納され、長さ3mのケーブルでつながれている。なお送受波器はチタン酸バリウムが用いられている。処理部では各sing around系の周波数 f_1, f_2, f_3 をもつ電気信号を受けて、 $f_1 - f_2, f_2 - f_3$ を計算するとともに、それを電圧に変換する。最後に記録部は4チャンネルのFM磁気テープレコーダーである。なお、モニター用としてペン書き記録計も同時に接続できるようになっている。

本器の主要特性を示すと次のとおりである。

- 1) 流速測定範囲は2成分とも同じで、 $0 \sim \pm 4 \text{ m/sec}, 0 \sim \pm 2 \text{ m/sec}, 0 \sim \pm 1 \text{ m/sec}$ の3段切換え。
 - 2) sing around 周波数は約 10 Mc である。
 - 3) 送受波器間隔は $\ell = 30 \text{ mm}$ である。
 - 4) アナログ信号の上限周波数は現在のところ 100 cps にしている。
 - 5) 使用電源は $\text{AC } 100 \text{ V}, \text{DC } 12 \text{ V}$ のいずれでも使用できるようにインバーターも付属している。
- つぎに、受感部の先端を示したものが図-4であり、必ずしも満足すべきものともいえないが、第1号器であるところから仕方ないだろう。図-5は2成分の流速の検定結果を示したものである(水

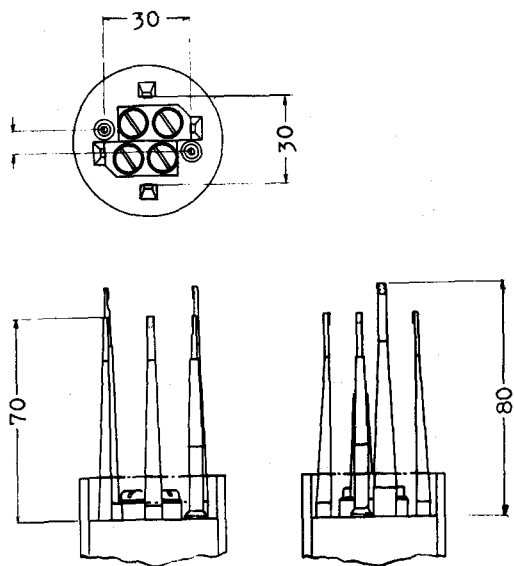


図-4 受感部先端(mm)

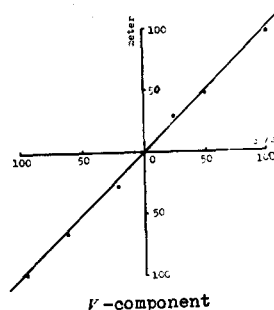
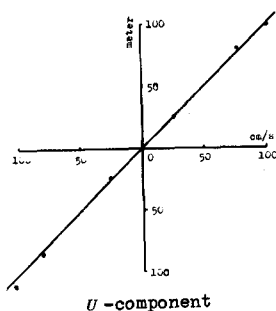


図-5 流速の検定結果

温 $20.3^{\circ}\text{C} \pm 0.1^{\circ}\text{C}$)。理論値からの若干のズレが認められるが、これは検定の基準となる流速の測定誤差か、あるいは流速ゼロを設定するときの誤差であろう。

3. 測定結果

観測は宇治川水理実験所の前を流れている宇治川において行なったが、観測時の河巾は 80m、水深は 2.2m であった。兩岸から張ったワイヤーによって河床まで打込んだ支持パイプ(5 cm ϕ)を鉛直に固定し、この支持パイプに受感部を取付けて水面下 20 cm, 40 cm, 80 cm, の 3 点で測定を行なった。記録はすべてモーターボートの上で行なったが、ゴミなどがひっかかると記録をとりなおさねばならないので、磁気テープによる記録とともにモニター用 2 ペンレコーダーによって監視を行なった。また記録の長さは 3 分間とした。

図-6 に磁気テープに記録されたものを 60 cps のフィルターにかけたのち、ブラウン管オシログラフに描かせた流速変動の波形記録の 1 例である。横軸の 1 目盛は 0.16 sec で、上が流れ方向 u' 、下が鉛直方向の変動 w' であって、かなりの高周波までの速度変動を忠実に記録しているようにみえる。なお、 $\ell = 3$ cm であり、いまの場合平均流速が約 80 cm/sec であったので、30 cps 程度より高い周波数のものが含まれていてもこれは無意味であることに注意しなければならない。なぜなら、直径 3 cm 程度より小さい寸法の乱れは原理的に測定することができないからである。

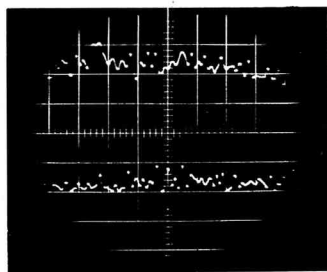


図-6 波形記録

測定した記録を整理計算した 2, 3 の結果を示したものが図-7, 8, 9, 10 である。これらはアナログ型相関器によって計算した自己相関および相互相関である。計算の都合上、図-7, 8 の自

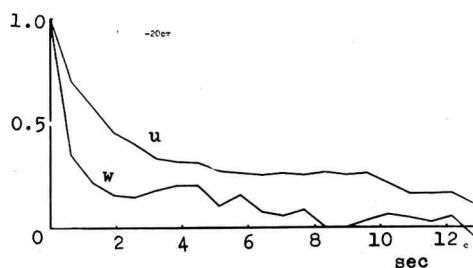


図-7 自己相関(水面下 20 cm)

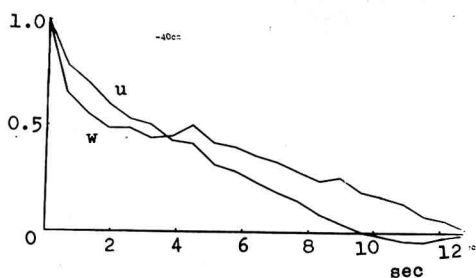


図-8 自己相関(水面下 40 cm)

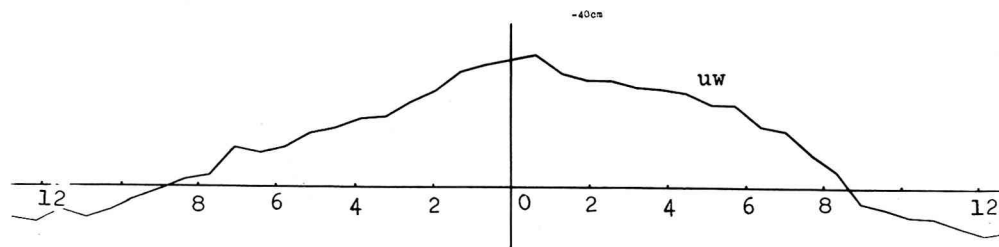


図-9 相互相関(水面下 40 cm)

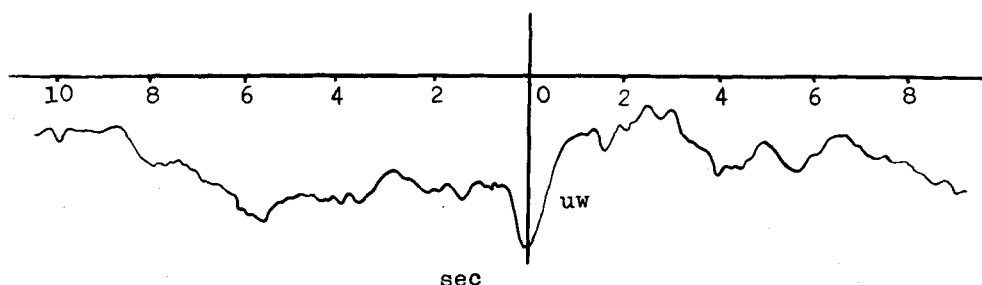


図-10. 相互相関 (水面下80 cm)

己相関および図-9の相互相関は $\Delta t = 0.64 \text{ sec}$ ごとに $m = 20$ 個ずらしをして、 $m \cdot \Delta t = 12.8 \text{ sec}$ までのものを求め、図-10の相互相関は $\Delta t = 0.064 \text{ sec}$ として計算したものである。不幸にして計算の際各成分の増巾度を任意にえらんだので、図-9、10の縦軸の大きさは不明であるが形状は正しいはずである。

さて、図-7は水面下20 cm、図-8は水面下40 cmの点における u' 、 w' の自己相関係数を示したものである。図-7は乱流境界層内で通常みられる様なものと同じように u' の方が w' より相関が大きくなっている。図-8では u' と w' の相関がほぼ同じであるが、その原因は不明である。図-9、10の相互相関をみると、ずらしゼロのときの相関は水深40 cmのものでは正、80 cmのものでは負となっている。すなわち、40 cmの点では運動量が水面に向って輸送され、80 cmでは水底に向うことを示し、平均流速が最大となる点は水面下40 cm～80 cmの間にあることを意味している。水面下80 cmの相互相関は長く尾をひき複雑な形をしていて40 cmのものとかかなり形が異なるがこの理由も不明である。

4. あ と が き

われわれは河川流れの乱流構造を調べるために、さきにプロベラ式流速計によって大スケールの乱れの測定を行なったのであるが、今回は小スケールの乱れを測定するために超音波流速計を製作したわけである。本器がsing around法にもとづいているので、この方法の欠点でもあるが、流れに浮遊物が多いと超音波の正しい伝播が妨げられるので正しい測定ができないこと、固体壁や水面のごく近くではそれらによる反射波の影響がまれに入ってくること、非常に高感度であるために特殊な水槽などを用いないと正しいゼロ点の設定ができにくいことなどの短所がある。これらはそのまま本器の取扱上の注意事項でもある。しかしながら、取扱いが比較的簡単であるうえに、相対的な速度測定をする限りではキャリブレーションも必要がなく、しかも直線性が保たれているので、河川乱流の測器として現在のところもっともすぐれていると考えられ、十分使用にたえることがわかった。

最後に本研究は文部省科学研究費特定研究(2)の交付を受けて行なったものであり、また観測に際しては建設省近畿地建淀川工事事務所の御支援を賜ったことを明記して、関係各位に謝意を表するものである。

参 考 文 献

- 1) 余越正一郎：びわ湖疏水における乱れの観測，京大防災研年報第9号，513～523，1966-3。
- 2) 石原安雄，余越正一郎：河川における乱れの測定，第3回災害科学総合シンポジウム講演論文集，34～36，1966-11。

- 3) Grant, H.L.他: Turbulence spectra from a tidal channel, J.Fluid Mech., 12, 241~268, 1962.
- 4) Bowden, K.F.他: Measurement of turbulent fluctuations and Reynolds stresses in a tidal current, Proc.Roy.Soc. A.237, 422~438, 1956.
- 5) 吉山裕二: 超音波流量計による計測, 計測と制御, 5, 524~531, 1966.