開水路横断面内流速分布測定の自動化と X型Hot-filmによる2次流測定値の補正

An automatic velocity measurements system operated by P.C.
: Velocity measurements for open channel flows

鬼束幸樹*・浦 勝**・秋山壽一郎***・政徳克志****

By Koki ONITSUKA, Masaru URA, Juichiro AKIYAMA and Katsushi SEITOKU

A P.C.-controlled automatic measuring system is developed for quantifying three-dimensional structure of open channel flows. Manual-controlled measuring systems require a great deal of time and labor as well as cause error in measurements. The proposed system allows us to obtain the velocity field of the considering flow with little manpower and high accuracy. In addition, an error inherent to spacing of two sensors, which usually occurs in measurements of velocity components by X-type Hot-film anemometer, is rectified on the basis of logarithmic velocity profile.

Keywords: open channel flow, velocity measuring system, secondary flow, Hot-film anemometer

1. はじめに

開水路流れの3次元構造を明らかにしたいという要求が、近年特に強まってきた。その理由は、従来の河道安定という治水的観点のみならず、河道の持つ多様性が生態系保全に大きな寄与をもつ事を水理学的に評価したいという環境的観点にあるといえよう。3次元構造を明らかにするためには、複雑な縦・横断面形状をもつ水路内において、(1)測定器の検出部を正確に所定の位置と方向に移動し設置すること、及び(2)移動・設置・計測の自動化を行い、操作労力を軽減化すると共に、誤操作の阻止を図る事が要求される。

開水路流の流速測定に関しては、従来よりPitot管、プロベラ流速計、Hot-film流速計、電磁流速計、さらに、1980年代より台頭してきたレーザードップラー流速計などによって行われてきた。この内、3次元性を直接あるいは間接的に測定できるものはレーザードップラー流速計、Hot-film流速計、電磁流速計である。しかし、レーザードップラー流速計は非常に高価であり、電磁流速計は検出部の寸法が大きいため、小型の実験水路では不向きである。Hot-film流速計は、一般に流速の2成分しか直接測定する事はできないが、プローブを90°回転させて2回測定することにより3次元性が推定でき、その上に比較的安価で取り扱いが

*	学生員	九州工業大学工学研究科博士前期課程	(〒804 北九州市戸畑区仙水町 1-1)
**	正会員 工博	九州工業大学工学部設計生産工学科	
***	正会員 Ph.D.	九州工業大学工学部設計生産工学科	
****	学生員	九州工業大学工学研究科博士前期課程	

容易であるため、今後も重要な測定法の一つであると言えよう。

いずれの流速計を用いる場合も、従来は、測点間移動は人力に頼っているケースが多く、非常に人的労力を要する上、流速計の位置・方向設定誤差や個人誤差、そして誤操作の危険性もあり精度は良くない。測定誤差は特に2次流速に多大な影響を及ぼすが、流れの三次元構造を明らかにするためには高精度な2次流の検出が必要である。そこで、著者らはステッピングモータを用いた検出部移動装置による流速の横断面内測定の自動化を図った。ステッピングモータを用いた自動測定法は既に報告されている¹⁾。しかし、従来から報告されている自動化に際しては非常に高度な、しかも専門的な電子工学の知識を要する。一般にそのような高度で専門的な知識を取得する事は容易ではなく、従って自動計測の普及は立遅れているのが現状である。

本報告では電子工学の知識をあまり要しない具体的方法を示し、さらに自動測定装置を用いた開水路流測定およびX型Hot-filmによって得られる2次流速の補正についても示す。これにより、自動測定法が普及し、労力の軽減、精度向上により水工学における研究がよりいっそう進展すれば幸いと考えている。

2. 自動化の形態

著者らは以前より、X型Hot-film流速計による開水路流測定を行ってきた²⁾。横断面内測定は数百に上る測定点を有する。実験は計測と移動の繰り返しであり、従来は測定点間移動を人力に頼っていたため非常に多大な労力と時間を必要とした。人力による測定では長時間測定が不可能なことや、誤差を生じやすいなどの理由により、特に2次流速の測定結果の精度は余り良くなかった。

完全自動測定を完成させるためには、計測系の自動化、検出部移動系の自動化、そしてこの両者を管理する制御系の自動化を行わなければならない。図-1にシステムの模式図を、表-1に器具の名称を示す。システムの概略と

図-1 システムの模式図

表-1 器具の名称

計 測 系		移 動 系	
⑤ Hot-filmプローブ	2方向X型Hot-film	②③鉛直モータ、ドライバ	ステッピングモータ UPD569-AM
⑥ CTA	MODEL 1011	②③水平モータ、ドライバ	ステッピングモータ UPD596-A
⑦ Linearizer	MODEL 1014	パルス発生器	2ch用AD型 PMC-7198BPC
⑧ Temperature	MODEL 1020	④リミッタ	ナマルクス型 TL-W3MC2
⑩ A/D変換器	DRA-10A		
GP-IBボード	IEEE Std.488-1978規格		
制 御 系			
① パーソナルコンピュータ	拡張スロット4つ付 PC-286V		
ハードディスク	外付け240Mbyte		

しては、水路上面に設置されたレールの上に台車⑪があり、その台車上に鉛直及び水平方向の移動用レールがあり検出部⑤が平面的に動くようになっている。水路周辺にはCTA⑥、AD変換器⑩、コンピュータ①などの測定機器が置かれている。検出部をのせた台車は、マニュアル操作で走行速度を変化させることが可能であるため、流速計のキャリブレーションができるようになっている。

2.1 計測系の自動化

計測はHot-film流速計を用いた。計測の概要及びデータの流れは以下のようである。2方向Hot-filmプローブ⑤による流速の2成分の信号がCTA⑥より得られる。一方、水温計⑨による水温変化を温度補償器⑦により補正して、CTAから得られた出力がリニアライザ⑧に送られる。リニアライザにより線形化された2成分のアナログデータはAD変換器⑩に送られる。今回用いたAD変換器は、パソコン①よりRS-232CまたはGPIBを介し制御が非常に簡単なT社製DRA-10A⑩である。このAD変換器の性能はサンプリング速度0.0005~32.767sec、許容電圧は0~16Vで、同時に10チャンネルまでの制御が可能であり、各チャンネルは15360のデータをメモリに記憶することができる。サンプリング間隔を0.002~0.02sec、データ数を8192個とする計測ならば、このAD変換器の性能は十分である。パソコン制御により、このAD変換器からパソコンに送られてくるデジタルデータは外部記憶装置（ハードディスク）に保管される。

2.2 検出部移動系の自動化

開水路流の3次元性を明らかにするためには、流速の水路横断面内分布を測定し、その流下方向変化を調べなければならない。そのため、プローブを鉛直方向及び横断方向に移動させる必要がある。そこで、図-1に示す台車⑪上に鉛直方向及び水平方向のプローブ移動用レールとなるLMガイドを設け、その軸とステッピングモータ③を連結させ、さらにドライバ②に接続した。ステッピングモータは通常のDCサーボモータと異なり、小刻みな階段状の回転をするが回転角度が非常に正確であり、またパソコンによる制御が容易である。図-2に示すように、パソコンの拡張スロットに挿入されたパルス発生器からドライバに命令が伝えられ、ステッピングモータを動かす仕組みになっている。

図-2 移動システム

何らかの原因でステッピングモータが誤動作をし、プローブが水路の壁面に衝突するなどへの安全対策として、水面近傍、底面近傍、及び右岸・左岸近傍の移動端部の四カ所にリミッタ（図-1の④）を取り付けた。モータが移動端部以上に回転しようとする場合、リミッタがそれを感知しパルス発生器に電気信号として伝えるので、パルス発生器はパソコンから送られてくる命令よりも優先的にモータを停止させる。再び逆方向の回転命令がくればモータは逆方向の回転を開始するようになっている。リミッタにはノーマルオープン型（NO型）とノーマルクローズ型（NC型）があり、NO型は通常回路がオープンで電流が流れておらず、リミッタが反応すると回路が閉じて電流が流れる。NC型はその逆である。どちらのリミッタを選ぶかは、リミッタを接続するパルス発生器に依存するので、あらかじめリミッタを購入する前にチェックすると良い。今回用いたパルス発生器はNC用であった。

プローブの位置の確認には、モータの回転数により位置の確認が可能なエンコーダを用いるとよい。

以上の装置により所定の横断面内の測定点間移動が可能となり、移動部分の先端にHot-filmプローブを装着すれば、横断面内流速測定が可能となる。

2.3 制御系の自動化

計測系はAD変換器をGPIBを介して行い、移動系はステッピングモータをパルス発生器を介して行うが、それにはコントローラが必要となる。近年のパーソナルコンピュータは実験室のような劣悪な環境にも耐え、しかも高性能で低価格であり、コントローラとして最適である。

実験を無人化するにはそれぞれの系でプログラムを組み、バッチ処理すればよいことになる。計測系及び移動系プログラムは、GP-IBボード及び拡張スロット用パルス発生器を購入するとサンプルプログラムが添付されてくるので、それらを参考にすれば比較的容易に組む事ができる。言語は今回、MS-DOS版コンパイラBASICを用いた。コンパイラBASICはインタープリタBASICより高速に動作するので制御に適しているといえる。

一般に長時間の計測では、データ量も膨大になるが、これを保管するパソコンの外部記憶装置として、現在、比較的安価で大容量のハードディスクが適している。また、プログラム作業領域としてRAMDISKがあると非常に便利である。このために、パソコンの拡張スロットを4つ用いる事となった。つまり、パルス発生器、RAMボード、ハードディスクインターフェースボード、GP-IBボードである。パソコンは拡張スロットの数の面から、ノート型よりデスクトップ型の方が良いと思われる。

3. X型Hot-film流速計による自動測定

前述した自動測定装置を用いて、X型Hot-film流速計による横断面内流速測定を行った。実験方法及び実験結果について述べ、従来X型Hot-filmでは測定が非常に困難な2次流^{3) 4)}及びその補正についても述べる。

3.1 実験方法

実験に用いた水路は、水路幅60.0cm、長さ2050cmの変可勾配水路である²⁾。実験条件は流量9300cc/s、下流端水深13.5cm、水路床勾配1/10000で測定位置は水路入口より流下方向にx軸をとり、X=1300cmとした。ただし、文献2)で見られるように、400<X<600cmは水路幅は19.6cmで、600<X<1100cmは緩やかにかつ直線的に水路幅の広がる漸拡部となっている³⁾。実験断面の水深はh=13.3cmで水路幅はB=60.0cmであった。

主流流下方向にx軸を、水路床を原点として鉛直上向きにy軸を、x、y軸に直角に側壁を原点としてz軸をとる。測定位置はy-z平面の、主に右岸側の23×22個のそれぞれの格子点においてX型Hot-film流速計を2度使用する事により、U-V及びU-W流速値が得られる。但し、x、y、z方向の流速をそれぞれU、V、Wとし、サンプリング間隔は0.01sec、サンプリング時間は81.92secとした。また、X型Hot-filmプローブの概略図を図-3に示し、今回用いたKanomax 1241-60Wの寸法を表-2に示した。ただし、2本のセンサ間隔をsとしている。図-3には括弧無し記述と、括弧付きの記述があるが、括弧無しは測定中にプローブを水路上面からみるとX型をしているU-W測定で、括弧付きはプローブを水路側面からみるとX型をしているU-V測定を示している。X型Hot-filmプローブは互いに直行する2本のセンサがx軸と±45°をなすようにブロング間に張られていて、受感部はその中央部分であり、図-3ではそれを明示する為に太く示している。

図-3 X型Hot-filmの概略図

表-2 Kanomax 1241-60Wの仕様

センサ 直径 mm d	センサ 長さ mm l	ブロング 間隔 mm t	センサ 間隔 mm s
152	2.0	3.5	1.0

3.2 実験結果及び補正

2次流すなわち、主流に直角方向の流速成分V、Wの大きさはX型の各々のセンサからの出力の差として得られる。図-3において、座標軸が括弧無しの場合のようにプローブを設置した場合を考えれば、各々のセンサから得られる出力値を e_1 、 e_2 とすると、z方向すなわち水路横断方向の流速成分Wの値は、一般に

$$W = \frac{e_1 - e_2}{2} \quad (1)$$

となる。しかし、図-4(a)に示ように、U-W測定においては、プローブのセンサ間隔のため e_1 、 e_2 は主流速分布による偏差を含んでいる。この偏差は、速度勾配の急な底面近傍及び側壁近傍で非常に大きくなる。

図-4(a) U-W測定状況

(b) U-V測定状況

図-4(b)に示すU-V測定は2本のセンサーの受感部が底面から等距離にあるため、そのような偏差は含まれない。従って主流速Uの鉛直分布は、図-4(a)に示すU-W測定より、図-4(b)に示すU-V測定の方が信憑性が高いため、U-V測定より得られる流速値を用い、次式の数値則より摩擦速度 U_* を決定した。

$$\frac{U}{U_*} = \frac{1}{\kappa} \ln \left(\frac{y U_*}{\nu} \right) + A \quad (2)$$

ただし、 κ はKarman定数、 A は積分定数、 ν は動粘性係数であり、 $\kappa=0.412$ 、 $A=5.29$ とした⁵⁾。そこで、U-W測定時もU-V測定時と同様の流速分布であると仮定し、センサ間隔 s による補正を以下の式で行った。

$$W = \frac{e_1 - e_2}{2}$$

$$- \frac{U_*}{2\kappa} \ln \left(\frac{y+s/2}{y-s/2} \right) \quad (3)$$

図-5(a) 連続条件による補正のみによる2次流ベクトル図

また、V成分の補正もW成分と同様に、壁面より水路中央部に向かう流速分布をU-W測定による対数則によって行う。センサ間隔の補正を行った後、従来から行われている次式の連続条件を満たすように補正した⁶⁾。

$$\int_0^{B/2} V dz = 0 \quad (4)$$

$$\int_0^h W dy = 0 \quad (5)$$

図-5(b) センサ間隔及び連続条件による補正後の2次流ベクトル図

連続条件による補正のみを行っ

た2次流ベクトルを図-5(a)に、センサ間隔を考慮した補正及び連続条件による補正後の2次流速ベクトルを図-5(b)に示す。水路中央の $z/B=0.5$ では $W \neq 0$ となるはずだが、図-5(a)を見ると底面近傍でかなり大き

なW成分を持っている。しかし、図-5(b)を見ると $z/B=0.5$ において $W=0$ となっており、壁面近傍におけるX型Hot-film流速計による2次流成分の測定値にはセンサ間隔を考慮した補正が必要ながわかった。

4. おわりに

以上、ステッピングモータを用いたX型Hot-film流速計による開水路流測定の自動化の具体的方法、及び開水路横断面内2次流の補正について述べた。この自動計測装置によってサンプリング間隔0.01sec, サンプリング時間81.92secの流速測定を鉛直, 水平方向にHot-filmプローブを移動させて行い、 $23 \times 22 = 506$ 点の測定をおおよそ16時間で行うことができ能率と精度が飛躍的に向上した。本実験データは合計約68 Mbytesであり、ハードディスクに保存後、流速値に変換する。本システムは流速計の検定を除けば無人のため、昼夜を問わず24時間の測定が可能であり、24時間測定を連続的に行う場合は同様のハードディスクとパソコンをもう一台用意し、それらを交換しながら測定を行えば、測定と流速変換を同時進行できてさらに効率がよくなる。また、X型Hot-filmプローブの形状を考慮し2次流の補正を行ったが、乱れ強度、Reynolds応力等の補正も今後考慮しなければならないと考えている⁷⁾。本文ではHot-film流速計による自動測定について述べたが、その他の流速計や濃度測定器についても同様のことがいえよう。本研究が水工学における自動測定に寄与する事ができれば幸いである。

謝辞

自動化の有効性を示唆していただいた本学工学部、久保喜延助教授及び加藤九州男助手に、また、Hot-filmの特性に関し文献の提供及び貴重な意見をいただいた神戸大学工学部、中山昭彦助教授に感謝の意を表します。最後に本文中の開水路流実験で協力いただいた卒論生、岡本実、松岡定和の両氏に謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) 藤田裕一郎, 澤井健二: 移動床水理実験におけるラボラトリー・オートメーションの試み; 水工学論文集 第34巻, pp.701-706, 1990
- 2) 鬼東幸樹, 浦 勝, 政徳克志: 漸拡開水路流の乱れエネルギー輸送; 第48回年次学術講演会概要集, pp.740-741, 1993
- 3) 浦 勝, 秋山壽一郎, 久保大介, 山本一: 漸拡長方形断面開水路流の乱れについて; 水工学論文集 第34巻, pp.451-456, 1990
- 4) 浦 勝, 秋山壽一郎, 川崎淳一郎, 鬼東幸樹: 漸拡長方形断面開水路流の流況変化について; 水工学論文集 第36巻, pp.379-384, 1992
- 5) Iehisa Nezu and Wolfgang Rodi: Open-Channel Flow Measurements with a Laser Doppler Anemometer, Journal of Hydraulic Engineering, Vol.112, No.5, May, pp.335-355, 1986
- 6) 富永晃宏, 江崎一博: 長方形断面開水路流の三次元乱流構造に関する実験的研究; 土木学会論文集 第357号/II-3, pp.81-88, 1985
- 7) Akihiko Nakayama and Russell V. Westphal: The Effects of Sensor Length and Spacing on X-Wire Measurements in a Boundary Layer, NASA Technical Memorandum 88352, pp.1-10, 1986