

超音波流速計による二、三の河川の連続流量観測と超音波相関式流速計の研究
Continuous Measurement of Water Discharge by Ultrasonic
Flowmeter and Correlation-Type Ultrasonic Flowmeter

東京工業大学精密工学研究所 正員 ○奥島基良
国立防災科学技術センター 正員 木下武雄
東京大学海洋研究所 寺本俊彦
沖電気工業株式会社 宮沢 久*

1. まえがき

建設省土木研究所において昭和39年頃から超音波による河川流速測定方法の開発が着手された。その後、超音波流速計が全国数か所に設置されたが、それらの稼動状況¹⁾は必ずしも満足できる状態ではなかった。そこで著者らは、数年来その原因の究明のために河川の水構造と超音波伝搬特性との関係を調査し、また装置の改善をはかり、川幅250m以下の程度の河川で充分実用できる超音波流速計を完成した²⁾。

新たに開発した超音波流速計は利根川布川流量観測所、常陸利根川日川流量観測所及び潮来流量観測所に設置され、現在長期連続流量観測に使用されている。また、これらの河川はいずれも感潮河川であるので、自然河川への適用試験のために北上川登米河川水質自動監視所の付近において超音波流速計を仮設し連続測定を行った。

この報告では、これらの装置の稼動状況、ブライス流速計による測定結果との比較、連続測定された流量とH-Q曲線からの流量推定値との比較について述べる。

この超音波流速計では、短い超音波パルスを送受波して超音波の伝搬時間を計測し、それから河川の平均流速を算出している。そのため、パルス性の中雑音の大きい環境では誤動作をすることがある。このような水中雑音による妨害を避け、さらに広い川幅、高水時、あるいは船舶の運航の頻繁な場合などにおいても精度の高い測定ができるように、現在、M系列信号音波を送受波し相関信号処理することによって超音波伝搬時間を計測する超音波相関式流速計を開発中である。この方法の概要についても述べる。

2. 超音波流速計の原理

図1のように、3個の超音波送受波器 T_1 、 T_2 、 T_3 を川の兩岸の近くの適当な水深のところに設置する。まず、 T_1 から超音波パルスを送波し T_2 で受波し、ただちに T_2 から超音波パルスを送波し、 T_3 で受波する。この間の時間(超音波伝搬時間) t_1 を計測する。次に、 T_3 から超音波パルスを送波し T_2 で受波し、 T_2 から送波し T_1 で受波し、その間の時間 t_2 を計測する。このとき

$$\frac{1}{t_1} - \frac{1}{t_2} = \frac{C+V\cos\theta}{2\ell} - \frac{C-V\cos\theta}{2\ell} = \frac{d}{2\ell^2} V$$

となり、
$$V = \frac{2\ell^2}{d} \left(\frac{1}{t_1} - \frac{1}{t_2} \right)$$

として川幅内の平均流速 V が算出される。ここに、 ℓ は T_1 から T_2 までの距離、及び T_2 から T_3 までの距離であり、 d は T_1 と T_3 の間の距離、 θ は流軸と超音波伝搬径路との間の角、 C は水中の音速である。

実際の装置では、音速 C の時間変動によって生ずる誤差を消去する演算方法がとられている²⁾。また、超音波パルスは共振周波数100kHzの電気ひずみ振動子にインパルス電圧を印加して発生させている。

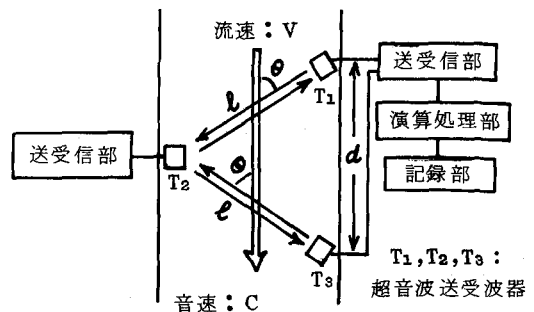


図1 超音波流速計ブロック図

* 現在は株式会社東和製作所

3. 観測河川と流速計の設置状況及び稼動状況

図2に観測河川の横断面図と超音波流速計による観測測線及びブライス流速計での観測測点を示す。測定川幅 l 及び d は、日川250m、100m、潮来200m、80m、布川150m、50mで超音波式による観測測線は上下2層である。登米では仮設置のため T_1 と T_2 とだけで、その間を超音波を往復させて計測した。川幅 l は165mで、観測測線は1層だけである。

超音波流速計の稼動状況は、日川では1年6か月の間で、常陸川水門の操作により放流を行った時間のうちの観測可能時間率は95%であった。潮来でも同様で、5か月の間で95%であった。布川では低水時でも10cm/s程度の流速があるため、3か月の間で観測不能となることはなかった。また、登米では仮設期間約50日の間、順調に観測できた。

なお、同様な超音波流速計が信濃川帝石橋流量観測所にも設置されたが、3か月間まだ欠測はない。

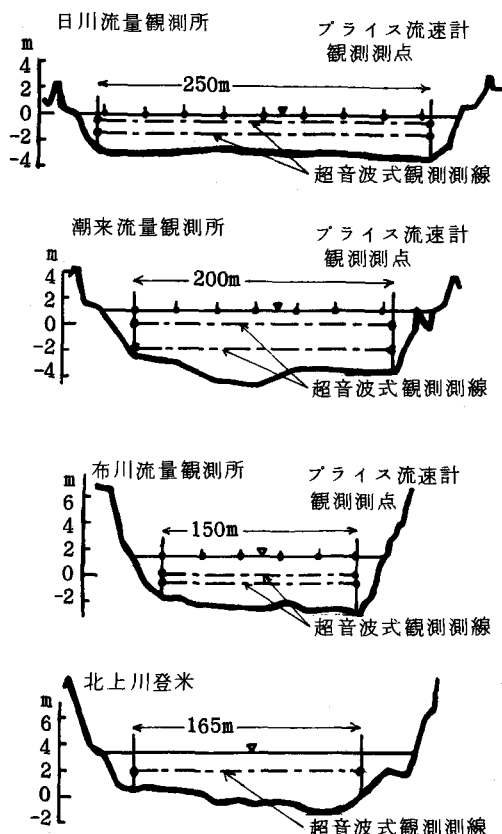


図2 河川横断面図

4. ブライス流速計との比較

図2の各測点でブライス流速計で流速測定を行った。図3は、日川と潮来における流速の鉛直方向の分布の測定値の横断方向各測点の平均値である。

(第1回: 53年1月23日~24日。第2回: 53年2月26日)

図4は、ブライス流速計による平均流速測定値と超音波流速計による測定値の相関図の1例である。ブライス流速計による流速値は、日川と潮来では、超音波流速計の観測測線の深度で横断方向の各測点における同時測定値の平均値である。布川では、横断方向6測点で水深の2割、8割の深度について移動観測して、区分断面から総流量を算出し、これを総断面積で除した平均流速値である。布川の場合、超音波式の下層の観測測線は水深の約6割であり、図3からみられるように河川全体の平均流速が測定できると考えられるので、超音波式下層測定値との比較を行った。

流速測定値の相関式は、超音波式による値 S 、ブライスによる値 P として下記のようになった。

$$\text{日川上層 } S = 0.990P + 0.015 \text{ [m/s]}$$

$$\text{下層 } S = 0.986P + 0.01$$

$$\text{潮来上層 } S = 1.10P + 0.006$$

$$\text{下層 } S = 1.10P + 0.012$$

$$\text{布川下層 } S = 1.047P - 0.036$$

また、流量についての相関式は下記のようになった。

$$\text{日川 } S = 1.038P - 18.6 \text{ [m}^3/\text{s]}$$

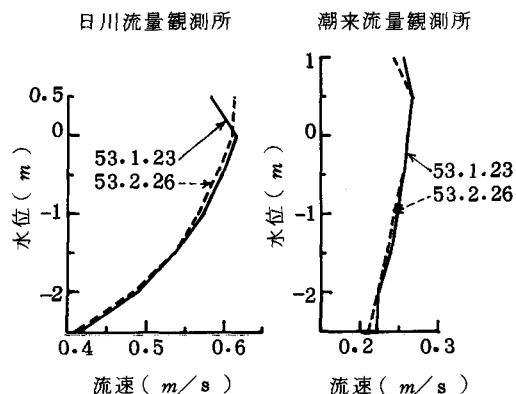


図3 流速の鉛直分布(横断方向平均値)

潮来 $S = 0.978P + 17.2 \text{ [m}^3/\text{s]}$

布川 $S = 0.977P - 14.8$

流量の算出方法は、ブライスでは、各測点での深度についての平均流速に区分断面積を乗じて算出した流量の総和である。超音波式では次式によった。

日川及び潮来

$$S = a_1 \cdot v_1 \cdot \alpha_1 + a_2 \cdot v_2 \cdot \alpha_2$$

$$a_1 = a'_1 + K_1 H \quad \text{： 上層区分断面積}$$

$$a_2 \quad \text{： 下層区分断面積}$$

$$v_1, v_2 \quad \text{： 上層, 下層流速測定値}$$

$$\alpha_1, \alpha_2 \quad \text{： 器深補正值 (流速鉛直分布の平均値)}$$

と器深における流速値との比)

H : 水位

K_1 : 定数

布川

$$S = a_H \cdot v \cdot \alpha_H$$

$$a_H = \sum_{i=1}^n \{ a_n + K_n (H - H_{n-1}) \} \quad \text{： 断面積}$$

v : 下層流速測定値

α_H : 器深補正值 (流速鉛直分布の補正值)

n : 断面 (深度) 区分数

H : 水位

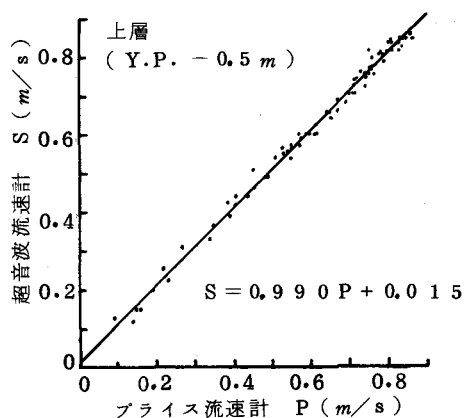


図4 (a) 流速測定値相関図 (日川)

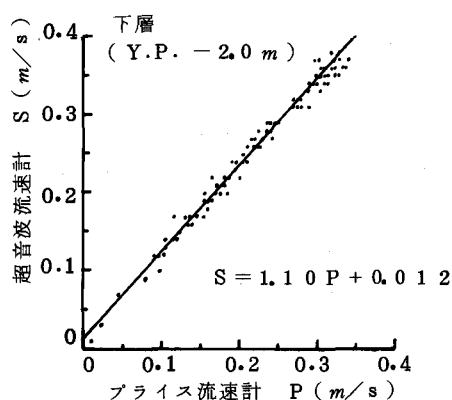


図4 (b) 流速測定値相関図 (潮来)

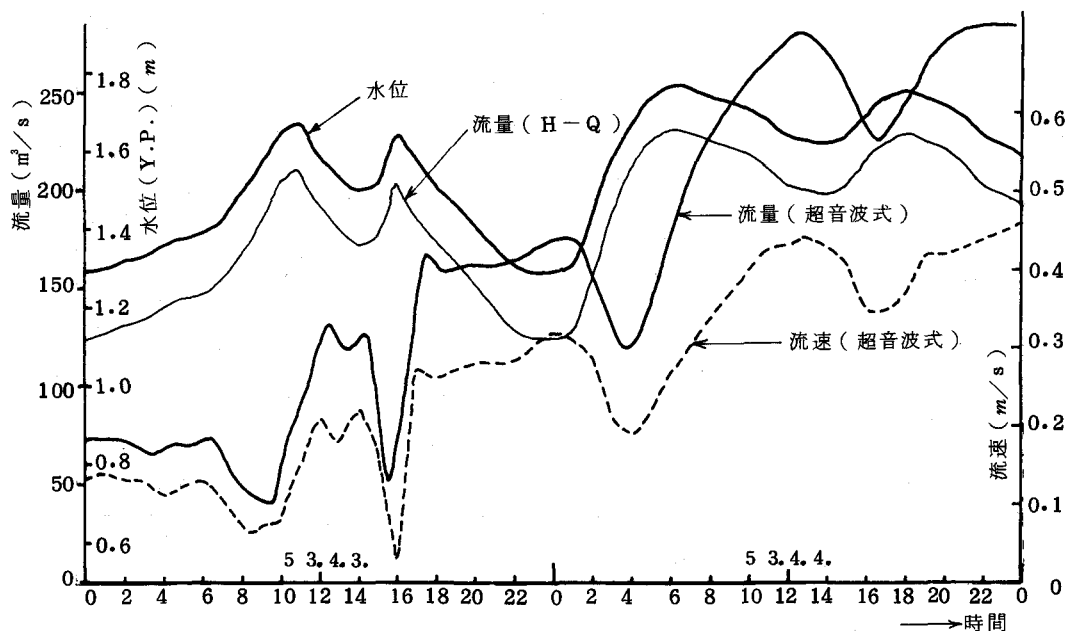


図5 時間一水位・流速・流量関係図 (布川 5 3.4.3 ~ 5 3.4.4)

5. 布川における水位，流速，流量の観測例

水位，流速，流量の観測は日川，潮来においても行われたが，ここでは53年4月3日から4日にかけて行われた布川における観測例を図5に示す。

水位、流量は約 5.8.5 km 下流の利根河口堰の水門操作の影響を受けて変化していると思われる。そのため、 $H-Q$ 曲線から算出した流量推定値は超音波流速計から得られた流量測定値と大幅に相異しており、このような感潮河川では $H-Q$ 曲線によっては流量の推定ができないことを示している。

6. 北上川登米における観測例

自然河川における超音波流速計の設置ならびに運用上の問題点を検討するために、53年7月13日から8月31日まで北上川登米(32.4 Km付近)に超音波流速計を仮設して試験を行った。この試験ではT₁の送受波器を省略し2個の送受波器だけで測定を行ったので、測定値の誤差はやや大きいと考えられるが、それでもブライス流速計による測定値とかなりよく一致していた。

水位は，超音波流速計の設置場所から約 300 m 下流の登米自記水位観測所のデータである。

実験期間中の流速値は最大 0.59 m/s ，最小 0.03 m/s で，水位は最高 TP 4.53 m ，最低

TP 2.66 m (平水位は約 TP 3.5 m) であった。

超音波送受波器の器深は TP 1.6 m とした。

超音波流速計による流速測定値からの流量の算出は次式によって行った。

$$Q = (A_1 + A_2/2) \bar{V}$$

$$A_1 = 1\ 8\ 0\ (H - 2.5\ 0) + 3\ 6\ 2.0\ 5$$

(流速計測範囲内の断面積)

$$A_2 = 3.0 (H - 2.50) + 1.28$$

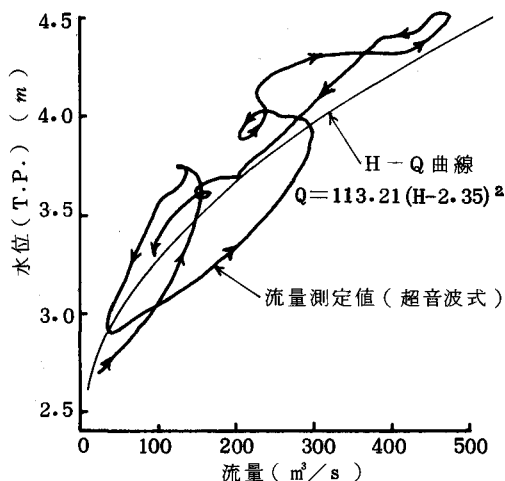


図7 水位—流量相関図 (北上川登米)
昭和53年8月9日～8月21日

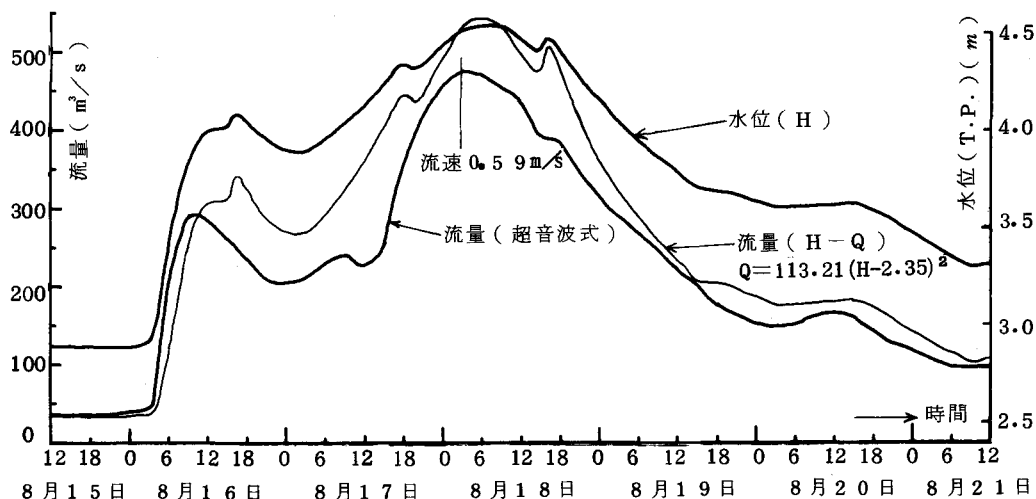


図6 時間-水位・流量関係図(北上川登米 53.8.15~53.8.21.)

(流速計測範囲外の断面積)

H: 水位

$\bar{V} = \alpha_H \cdot V$: 平均流速

α_H : 流速の鉛直分布補正係数(日川および布川における実測値と同じと仮定した)

V: 流速測定値

8月9日から8月20日にかけて2回増水があったが、2回目の増水時の観測記録を図6に示す。また、9日から20日までの流量と水位との相関図を図7に示す。

増水時の水位と流速の変化は、流速の変化の方が水位変化に比べて急峻で流速のピークを過ぎた後に水位のピークが生じている。ピークを過ぎた後に流速が振動的な変化をする。水位と流量の関係は、増水時と減水時とでヒステリシスをえがき、平常時と減水時はH-Q曲線にかなり近い値であるが、増水時および振動時はH-Q曲線からかなり相異している。なお、このような傾向は以前に木曾川笠松地点でも観測されている。

この実験により自然河川においても連続観測に超音波流速計が有効であることが確認された。

7. M系列相関法による超音波流速計

これまでの実験により川幅約250m以下であれば超音波流速計がほぼ満足な連続動作をすることが確かめられた。しかしながら、この超音波流速計ではパルス超音波を送受して超音波伝搬時間を計測しているため、パルス性水中雑音の大きい環境では誤動作することが考えられ、実際エンジン付の舟などが超音波測線を横断したときに妨害を受けた経験がある。

そこで雑音による妨害を受けやすいと考えられる広い川幅の場合、高水時、あるいは船舶の運航の頻繁な場所、海峡や湾口のような海に適用することを考えて、相関法による流速測定法の開発を企画した。

相関法を用いればSN比が格段に改善され、特にパルス性雑音の除去に効果の大きいことが知られている。用いる信号としては種々のものが考えられるが、信号の発生と処理が容易なM系列信号を使用する。

図8(a)は周期 t_c のクロック信号で発生したn次のM系列信号の1周期で、(b)はそれをさら

に周期 $t_c/2$ で極性が反転する信号で変調した信号である。この変調M系列信号を超音波振動子に加えて超音波を送波し、受波器で受信した信号をシフトレジスタで構成した極性相関器をとおして相関信号処理すれば、図9のような鋭いパルス波形が得られることになる。したがって、従来のパルス波を用いた超音波流速計の構成のうち、パルス信号発生装置を変調M系列信号発生装置に置きかえ、受信装置に極性相関器を追加するだけで相関式流速計が構成できることになる。

相関法による超音波の伝搬検出の試験を行うため53年8月に沼津市三津浜で実験を行った。実験システムのブロック図を図10に示す。図11は距離約300mで超音波信号を送受信した場合で、(a)は受信信号波形で、この信号は実時間極性相関器で

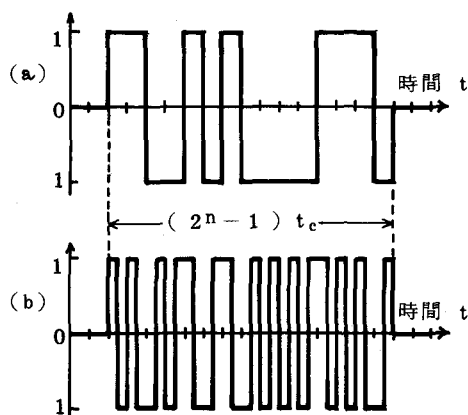


図8 (a) 1周期のM系列信号
(b) 変調M系列信号

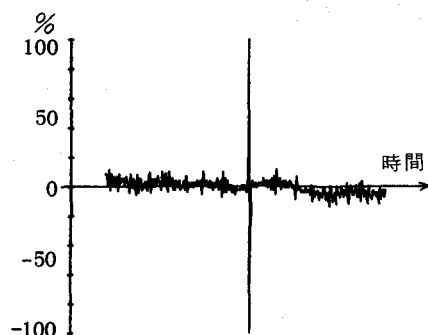


図9 変調M系列信号の相関信号処理後の波形

処理されて (b) のようにパルス波形となる。図12は距離が約600mの場合で、(a) では受信信号の存在がよくわからないが、信号処理後の波形(b)では信号波形が明瞭に読みとれる。約1,000mの距離でも信号の検出は可能であった。

この方式の相関式流速計については、現在、河川における流速測定の実験ができるよう準備中である。

この方法を発展させて東京湾口(距離約10Km)などにおける海流の流速測定も計画しているが、距離が長くなると、水温や圧力の変化による音速の鉛直分布の影響を受けて音波が屈折し、直接波が届きにくくなり、水面や水底で反射しながら伝搬する多重反射波との分離が困難になると考えられる。この場合の対策として、両方向から超音波を同時に送波

し、両岸での受信信号どうしの相互相関をとることにより、多重反射伝搬波を積極的に利用して、横断面内の平均流速を求める方法を考えており、そのための予備実験も行っている。

8. むすび

新たに開発した超音波流速計の稼動状況と長期連続観測の例を述べた。これらの試験により、超音波流速計が連続観測に有効であることが確かめられた。

終りに臨み、御指導御協力をいただいた各工事事務所関係各位に深謝いたします。

- 1) 建設省：超音波流量計の現状に関する調査報告、土研資料1056号(1976)
- 2) 奥島ら：年次学術講演会, II, p 378 (1977)

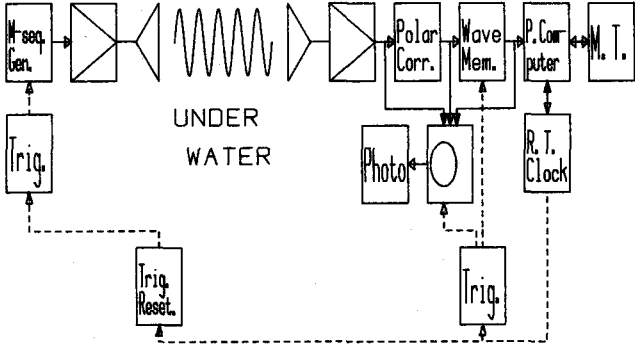


図10 実時間極性相関法による超音波伝搬時間測定システム

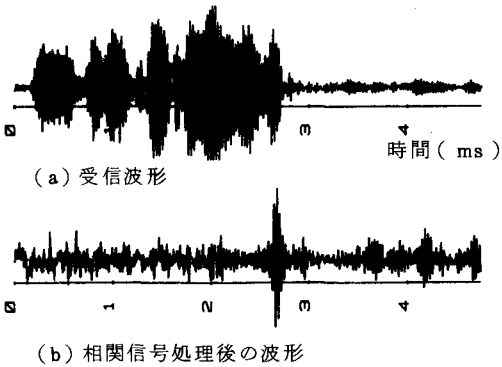


図11 受信波形(距離300m)

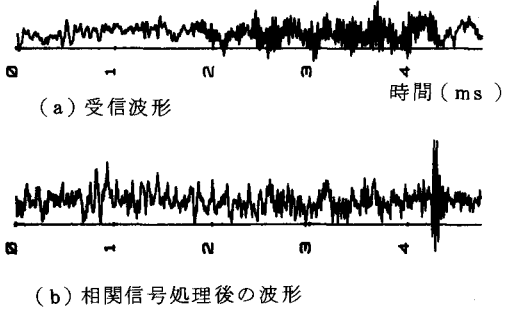


図12 受信波形(距離600m)