

開水路電磁流量計の現地における観測性能

Performance of Open-channel Electromagnetic Flow Meter
in Concrete-lined and Natural Channels

益倉克成*・ 深見和彦**・ 新行内利隆***

By Katsusige MASUKURA, Kazuhiko FUKAMI and Toshitaka SHINGYOUTI

The performance of an open-channel electromagnetic flow meter in concrete-lined and natural channels was investigated. It was found that a good correlation between the induced potential and observed discharge can be derived for the concrete-lined channel, without considering the effect of electric conductivity of water (ECW). However, the effect of ECW is important in the natural river. To significantly improve the accuracy of measurement, a parameter functionally-related to water stage was used. Pollution of the electrodes over a period of time seems to alter the system characteristics. Hence, periodic calibration of the parameters is required to maintain a constant performance-level.

Keywords: Hydrological observation, electromagnetic flow meter,
open channel, non-insulated river, electric conductivity

1. まえがき

正確な河川流量の把握は、適切な河川・水資源管理運用のために重要である。しかし、流量の変動幅が大きく測定すべき断面も大きいため、河川の流量観測は容易でない。このことから、河川流量のリアルタイムでの自動連続観測と観測精度の向上と同時に、観測の省力化を可能にする技術を開発・提供することを目的として、Faradayの電磁誘導の法則を河川に適用した開水路電磁流量計の開発研究を昭和58年以来、継続して実施してきた。その結果、すでに室内実験水路規模では実用レベルに達していることを確認した^{1), 2), 3)}。

本報では、まず開水路電磁流量計の概要を解説した上で、前報以後実施した2地点における現地観測成果、すなわち、沖浦ダム、および綾瀬川の2ヶ所における観測成果を示す。前者の設置地点は、コンクリート3面張りの矩形水路であり、計測特性からみて河床が電気的に絶縁されている（絶縁水路）と見なせるのに対し、後者の設置地点は自然河床からなり、絶縁されているとは見なせない水路（通電水路）にある。これらの観測成果より、絶縁とみなせる水路、および通電水路のそれぞれにおける開水路電磁流量計の計測特性を

* 正会員 建設省土木研究所河川部 水文研究室長
(〒305 茨城県つくば市大字旭1番地)

** 正会員 建設省土木研究所河川部 水文研究室 研究員
(同上)

*** 建設省土木研究所河川部 水文研究室
(同上)

示し、その現地河川における観測性能・実用性を明らかにする。

2. 開水路電磁流量計の概要

2・1 測定原理

開水路電磁流量計の測定原理はファラデーの電磁誘導の法則である。磁界中を導体（本システムでは流水に相当）がある速度で動いているとき、磁界・速度の両者と垂直な方向（磁界を鉛直方向にかければ、川幅方向）に誘導起電圧が発生する。このとき、幅方向の導体両端に生じる電位差は、導体速度（流速）、磁束密度、導体幅（川幅）に比例する、という原理である。この基本原理自体は管路における電磁流量計や、可搬型電磁流速計において既に広く応用されているものである。しかし、開水路にこれを応用する際には、計測断面が水位とともに変動すること、スケールが大きいこと、電極・コイル設置の精度に限界があること、水路外部ノイズの遮断が困難であること等、管路流量計や可搬型流速計と異なる前提のもとでシステムを構築する必要があり、当初数多くの未知の課題を抱えていた。

さて、非磁性体かつ絶縁材質の幅 b (m)の矩形断面において、均一な磁束密度 B (T, テスラ)の中を水が流速 V (m/s)で断面内を一様に流れる最も単純な場合を考えると、水路両岸間で計測される電位差 E_t (V)は、次式で与えられる。

$$E_t = V \cdot B \cdot b \quad \dots\dots\dots (1)$$

一方、このときの流量 Q (m^3/s)は、

$$Q = V \cdot b \cdot h \quad (h: \text{水深, m}) \quad \dots\dots\dots (2)$$

で与えられるので、両式から、次式が得られる。

$$Q = E_t \cdot h / B \quad \dots\dots\dots (3)$$

ここで、磁束密度 B はコイルによって人工的に与えられるシステムの特性値で既知であるので、起電圧 E および水深 h を計測することにより流量 Q を測定できることになる。

現実には、一般河川においては計測すべき流水断面内において磁束密度を一定にすることは困難であるため、その効果を補正する磁界分布補正関数が必要となる。また、断面も一般河川では矩形とは限らないので川幅の変化を補正する必要がある。一般に両者とも水深の関数となるので、一つにまとめて磁界・川幅補正関数 f_1 として定義する。また、電極・コイルの設置誤差等の原因によって流量計の0点がシフトしていることが多い。したがって、計測起電圧に重畳している0点シフト値 E_0 を差し引いて補正する必要がある。すなわち、絶縁水路において現実に計測される起電圧 E は、

$$E = f_1 \cdot (E_t + E_0) \quad \dots\dots\dots (4)$$

で近似的に表現でき、式(3)と(4)により流量が求められる。

2・2 システム構成

開水路電磁流量計は、人工磁界発生部、起電圧検出部、記録部に大きく分けられる。

人工磁界発生部は、交流の低周波励磁波形を発生させる周波数発振器、その信号をコイルに流す励磁電流として増幅する励磁出力増幅器、水路において実際に鉛直方向の人工磁界を発生させる励磁コイルからなる。交流の励磁波形は、室内実験および綾瀬川電磁流量計による現地観測において当初正弦波を採用していたが、ゼロ点の安定性を改善するため、現在では一貫して台形波を採用している。励磁周波数としては、計測起電圧波形に重畳してくる商用電源からの誘導ノイズの除去や、低周波ノイズの除去と早い応答性の両立、等を考慮して、50Hz地域においては2.5Hzまたは1.25Hzを現在採用している。励磁コイルは、施工性、景観等を考慮して「コの字型コイル」を採用している（図-1）。なお、地球上には既に自然磁界が存在しており、その鉛直成分は関東地方では約0.36ガウス（※1ガウス= 10^{-4} T）程度（理科年表による）である。それにもかかわ

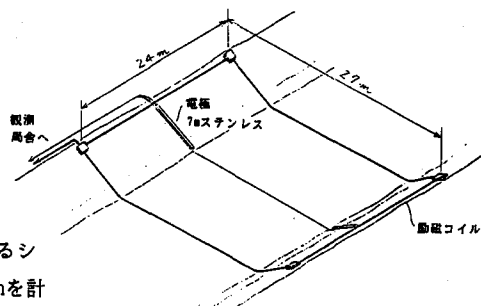


図-1 開水路電磁流量計における励磁コイル・電極の配置（綾瀬川の例）

らず人工交流磁界を用いるのは、電極と流水との間に生じる分極電圧や迷走電流の影響を除くためである。

起電圧検出部は、水路内に発生している起電圧を兩岸において取り出す電極部、取り出された μV のオーダーの微小な起電圧信号をmVオーダーまで増幅するとともに、微分ノイズの影響が最小となる部分で位相検波を行って流速に対応した信号を取り出す起電圧増幅器からなる。

記録部は、後述の2ヶ所の現地観測施設においてはパーソナルコンピュータを利用しており、その場で流量・流速の計算処理と記録を行っている。

2・3 開水路電磁流量計の特徴

開水路電磁流量計は以上の原理・構造を持っていることから、1)逆流も測定できる、2)流量計の設置による水位の変化はない、3)航行、魚の通行の支障とならない、4)景観上の問題がない、等の特色を有している。但し、河床変動が激しい箇所や流速分布の変動の激しい箇所の設置は避けるべきである。また、コイルに励磁電流を流す励磁出力増幅器の条件により、開水路電磁流量計が設置できるのは川幅30m程度が限度であろうと考えられる。

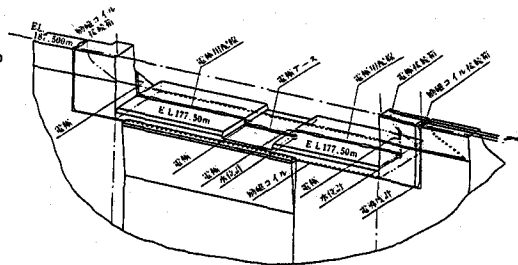


図-2 沖浦ダム電磁流量計概要図

3. 沖浦ダム電磁流量計の観測成果

3・1 システムの概要

青森県岩木川水系の浅瀬石川ダム完成により水没する沖浦ダムを活用し、絶縁水路における開水路電磁流量計の実用化技術の完成とダム流入量の正確な

把握（特に洪水時）を目的として、建設省東北地方建設局浅瀬石川ダム工事事務所（当時）および（財）ダム技術センターの協力を得て、昭和63年3月に沖浦ダムの切り欠き部分に開水路電磁流量計は設置された。

切り欠き部は、幅53m高さ10mの大切り欠き部と、そのほぼ中央部に設けられた幅10m高さ1mの小切り欠き部からなり、その両者にそれぞれ1対の棒電極を設置して起電圧を検出できるように設計された（図-2）。

励磁コイルは、鉛直方向からみて70.4m×10.5mの大きさを持ち、45回巻きとなっている。しかしながら、図-2に示されるようにダム堤体に沿わせる方式としたため、理想的な線対称点対称の条件と大きく異なっており、コイル・電極の設置誤差に起因した大きな微分ノイズの発生が見られた。このため、励磁周波数について、2.5Hzでは微分ノイズが波形全般に影響し計測起電圧を大きくシフトさせたため、励磁周波数は、1.25Hzに設定した。逆に、0.625Hzの場合、低周波ノイズの影響を比較的大きく受けるようになる。なお、励磁波形は先に設置された綾瀬川電磁流量計の観測成果に基づき、当初から台形波励磁を採用した。励磁電流は±7.0Aであり、磁束密度は小切り欠き部で約0.11ガウスである。

3・2 観測成果

昭和63年度に実用化試験を実施したので、ここではその時の観測成果を主に述べる。その際、大切り欠き部では大きな流速が生じにくく流量観測も困難であることから、対照流量を正確に把握することを考慮して、小切り欠き部の完全越流時のデータのみを利用して、システム校正を実施した。なお、小切り欠き部の越流公式としては、あらかじめ実施した室内での模型実験により決定したH-Q式を用いている。この式の適合性は、現場における流量観測との比較で確認されている。

まず、河床が絶縁されているとみなせるかどうかについて確認を行った。一般に、河床が電気的に絶縁されていない水路における計測起電圧 E は、次式で表される簡易的な等価回路モデルによって近似できる。

$$E = f_1 \cdot f_2 \cdot (E_t + E_o) \quad (f_2: \text{河床・流水電導度補正関数}) \quad \dots\dots\dots (5)$$

$$f_2 = r_2 / (r_1 + r_2), \quad r_1 = (1 / \sigma_1) \cdot (b / h) \quad (r_1: \text{流水抵抗}, r_2: \text{河床抵抗}, \sigma_1: \text{流水電導度 (実測)}) \quad \dots\dots\dots (6)$$

なお、従来は r_2 についても、 r_1 と同様の定義式が存在し、結局 $r_2 = 1 / \sigma_2 = \text{一定} (\sigma_2: \text{河床電導度})$ と表すことができたとされていたが、筆者らは通電水路においては一般に河床抵抗が水位の関数となっていることを明

らかにしている（後述）ため、式に含めていない。ここで $1/r_2 (\mu S/cm)$

は、設置断面の河床が、開水路電磁流量計の計測特性からみて実質的に絶縁と見なせるかどうかを判断することが目的なので、式(5)、(6)によって r_2 を逆算するだけで十分である。図-3に、 $1/r_2$ の逆算値（見かけの河床抵抗の逆数）と水位との関係を示す。この図より、 $1/r_2$ は $0 \sim 1 \mu S/cm$ でばらついており、水位との間に有意な傾向が認められないことが確認された。

次に、システムの安定した10～11月の完全越流データを用いて越流公式による断面平均流速と測定起電圧の比較検討を行い、0点シフト量 $-110 \mu V$ を得た。これに基づき0点補正と磁界補正を施した補正起電圧と水位から求めた電磁流量計による流量と越流公式流量との比較を行い図-4に示す良好な関係を得た(rms誤差 $\pm 0.6 m^3/s$)。

平成元年度は落雷による機器の損傷などにより対照流量と比較できる小切り欠き部完全越流時のデータは得られなかったが、平成2年度には修理が完了しておりデータ記録を再開している。それによると、沖浦ダムが完全に水没して小切り欠き部の流速がほぼゼロとみなせる条件時に、電磁流量計表示値も流速ゼロを表示しており、後述するような綾瀬川電磁流量計で観測されている0点のシフトが生じていないことを確認している。

以上より、河床を絶縁と見なせる水路においては、開水路電磁流量計は既に実用レベルに達したと考えられる。

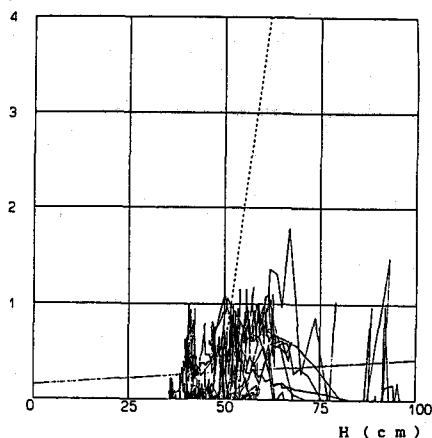


図-3 見かけ河床抵抗の逆数と水位との関係（沖浦ダム小切り欠き部）

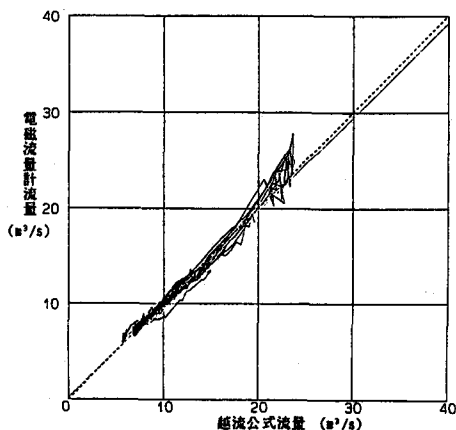


図-4 電磁流量計による流量と越流公式による流量との関係（沖浦ダム小切り欠き部）

4. 綾瀬川電磁流量計の観測成果

4・1 システムの概要

開水路電磁流量計の日本で最初の現地観測実験施設であり、実河川における問題点の把握と機器の改良および確立を図ることを目的として、建設省関東地方建設局江戸川工事事務所の協力を得て、昭和62年2月に綾瀬川谷古字基準点直上流部に設置された。その平面図を図-5に示す。観測地点は感潮区間内にあり、しばしば逆流が見られる。電極設置断面の左岸の一部はコンクリートブロックに覆われているが、残りの部分は自然河床であり、非絶縁（通電）状態となっている。川幅は平水時約20m程度である。励磁コイルは、105回巻きで、

鉛直方向から見て $27.3m \times 24m$ のほぼ正方形であり、河床に沿わせて配置する「コの字型コイル」を採用している。励磁波形は $2.5Hz$ の台形波であり、磁束密度は電極断面において約 0.13 ガウス（励磁電流 $= \pm 2.5A$ 時）である。電極は、長さ $7m$ のステンレス製円管であるが、電極ピットを新たに設けるのが困難であったため、波よけ、かつゴミよけとして発泡セラミックにより電極を覆って保護し、河川側面に沿わせて設置している。

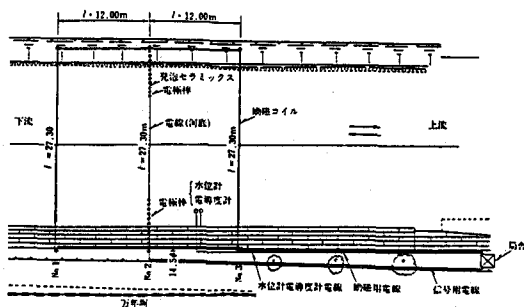


図-5 綾瀬川電磁流量計概要図

表-1 綾瀬川における連続流量観測対照事例

ケース名	観測日時	データ数	流速範囲	励磁電流値
880926	S63/9/26,13:40 ~9/27,14:00	74	87cm/s ~7cm/s	±3.70A
890206	H1/2/6,11:20 ~2/7,12:00	75	38cm/s ~22cm/s	±3.38A
890308	H1/3/8,12:00 ~3/9,13:00	76	55cm/s ~0cm/s	±3.23A
890918	H1/9/18,14:00 ~9/19,16:00	79	38cm/s ~18cm/s	±2.46A
900709	H2/7/9,14:40 ~7/10,16:00	71	58cm/s ~3cm/s	±2.50A
900723	H2/7/23,12:40 ~7/24,16:00	83	61cm/s ~0cm/s	±2.50A

連続流量観測結果との比較を行う観測実験は、平成2年7月までに計6回実施した。それらの観測条件は表-1の通りである。いずれも流量観測は、5台の直読式プロベラ流速計（水深方向は1点）によって行う方法を取り、20分毎に実施した。なお、綾瀬川は水質が悪く、電極付近へのヘドロ堆積や発泡セラミックの汚れのみならず、セラミックの折損による電極への河床ヘドロの混入が発生したため、電極回りの清掃作業とともに電極設置方法の見直しを行い、[電極+発泡セラミック]の木枠への固定により電極設置強度を向上させる電極再設置作業を平成元年2月の流観が終了した直後に実施している。

4・2 観測成果

測定原理と式(4)からわかるように、計測起電圧値に各種補正を行う際には、まずゼロ点シフト値 B_0 を知っておく必要がある。しかしながら、これまでの流観との対比によると、ゼロ点シフト量が表-2に示すように経年的に変化していることが明らかとなった。すなわち、平成元年2月流観直後に実施した電極清掃・再設置作業前後での不安定な時期を除くと、1~2 μ V程度の経年の変化が生じている。これらのゼロ点シフト量の経年変化は、コイルに流す

表-2 綾瀬川における
ゼロ点シフト量の変化

観測ケース	ゼロ点シフト量 (μ V)
880926	-4.0
890206	0.4
890308	7.3
890918	0.2
900709	-2.6
900723	-1.3

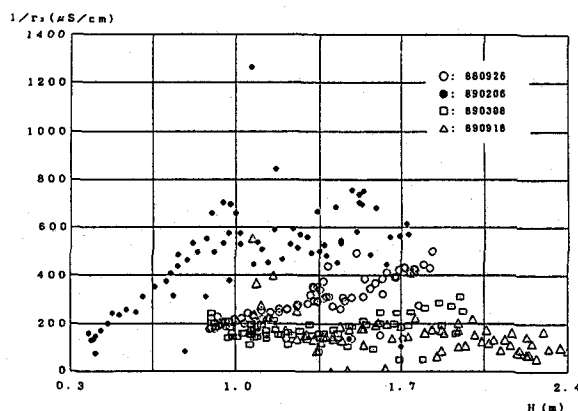


図-6 水深(h)と見かけ河床電導度($1/r_2$)の関係
(綾瀬川, 昭和63年9月~平成元年9月)

電流の励磁周波数2.5Hzに同期した同相ノイズの変化によるものと考えられ、結局は電極回りの汚れ等に原因があると推測されるが、詳細なメカニズムは不明である。

一方、通電水路において、従来は河床抵抗 r_2 は河床材料の平均的な物性値 σ_2 （河床電導度）の逆数で表され、実質的に一定と見なせると考えられていた。しかしながら、880918の観測データにより式(5),(6)を用いて見かけの河床抵抗の逆数 $1/r_2$ を逆算したところ、 $1/r_2$ が水位とともに直線的に変化していることが明らかとなった（図-6。なお、この現象は、室内実験においても確認されている。）。すなわち、一般には流水・河床電導度補正手法として式(5),(6)に次式を加えた手法を利用するのが適切である。

$$1/r_2 = \alpha \cdot h + \beta \quad (\alpha, \beta: \text{定数。流量観測から同定。}) \quad \dots\dots (7)$$

この新たな補正手法により、流量観測誤差は従来の手法による4.5 m^3/s から2.7 m^3/s に低下した。

しかしながら、この $1/r_2$ についても、昭和63年9月以降平成元年2月までに、電極の汚れ・清掃に対応して図-6のように変化していることが判明した。さらに、電極再設置後について見ると、 $1/r_2$ の水深依存性が

ほとんど見られなくなると同時に、再設置前と比較してその経年変化が抑制されていることがわかる。これは、室内実験において電極ビット部のみを絶縁するだけでも見かけの河床抵抗の逆数を大幅に低減できた（実験では約 1/10）ことと考え合わせると、〔電極＋発泡セラミック〕の木枠への固定が、結果的に電極と河床との直接的な接触を防止し、見かけ上対接地抵抗が増大したためと考えられる。

このように、綾瀬川電磁流量計においてはシステムの経年変化が生じていることが明らかとなったが、 E_0 や α, β を流量観測との対比により校正した上で、式(5),(6),(7)による新たな流水・河床電導度補正を行ったところ、補正計測起電圧値と流量観測結果との関係は、平成元年9月までのケースについて示すと図-7のようになった。これらの結果により、定期的な流量観測を活用してキャリブレーションを実施し、この等価回路モデルによって補正を行えば流量と計測信号の間に一貫した関係が得られるものと考えられる。

以上のことから、河床が電氣的に絶縁されていない河川における、水位と河床抵抗の関係を明らかにするとともに、その「 $h-1/r_2$ 」関係の経年変化、および零点シフト量の経年変化について、その特性と適切な補正手法を示すことができた。その詳細な物理的メカニズムは未知の部分も残されているが、短期的にはrms誤差 $\pm 2.0\text{m}^3/\text{s}$ 、 $\pm 8\text{cm}/\text{s}$ 以下を達成しており、綾瀬川電磁流量計の特性を見る限り、低水流観等を活用して定期的に計測特性のキャリブレーションを行うことによって、連続的な自動流量観測記録を得ることは可能であると考えられる。

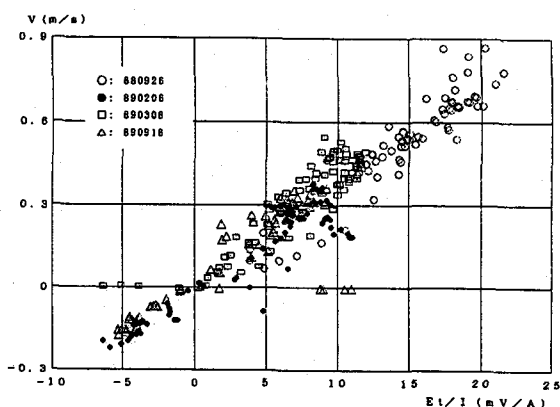


図-7 単位励磁電流あたりの補正起電圧値と断面平均流速観測値との直線関係（綾瀬川、昭和63年9月～平成元年9月）

5. 結論

開水路電磁流量計は、川幅30m程度までの絶縁とみなせる水路においては既に実用レベルに達していることを明らかにした。また、非絶縁水路においても計測起電圧について適切な補正を行うことにより必要な精度を確保できることが示された。計測特性の経年変化が生じている場合でも、定期的なキャリブレーションを実施することにより実用に供することは可能であると考えられる。今後は現地河川における観測実績をさらに蓄積し、電極設置方式の改善・具体的な校正手法の検討を通して、経年変化に強いシステムを構築することが必要であると考えられる。

なお、本研究成果の基礎は、吉野文雄博士と早川信光氏によって築かれたものである。ここに深甚なる敬意を表するものです。

また、本研究を実施するにあたっては、現地実験施設の設置・観測にご協力いただいた東北地方建設局浅瀬石川ダム工事事務所、関東地方建設局江戸川工事事務所、並びに（財）ダム技術センターの方々、および、多くの実験観測・保守業務に携わった大和探査技術（株）の方々大変お世話になりました。ここに厚く感謝の意を表する次第です。

参考文献

- 1) 吉野文雄・早川信光：開水路電磁流量計の開発，水理講演会論文集，第31回，pp.789～794，1987。
- 2) 吉野文雄・早川信光：開水路電磁流量計の開発研究，土木学会年次学術講演会，第43回，pp.16～17，1988。
- 3) Yoshino, F. and Hayakawa, N.: Experimental study on the measurement of open channel flow by the electromagnetic flow meter, FLUCOME'88, pp.357～361, 1988。