

# 流量観測の過去と未来

## PAST PROGRESS AND FUTURE DEVELOPMENT OF DISCHARGE OBSERVATION

木下 武雄  
KINOSITA, TAKEO

正会員 理博 株式会社水文環境代表取締役 (〒103-0005 東京都中央区日本橋久松町10番6号)  
Member of JSCE, Dr. of Science, JSCE Corp.

Hydrological observation has been intensively carried out for water resources management system in Japan since the modernization era, the late 19 Century. The technical standards were formally promulgated in 1954 for water surveys, especially discharge observation. Hydrometry engineers still stick to the standards for half a century. But many problems were found when the author recently investigated field works and data processing of discharge. It is advised that advanced technology should be introduced to discharge observation to solve the problems, such as a radio velocimetry, an ultrasonic flowmeter, ADCP and of course computers for future development.

**Key Words :** *Observation, Discharge, Drift Rod, Stage-Discharge Relation, Advanced Technology, Ultrasonic Flowmeter*

### 1. はじめに

これまで流量とは、〇〇川の××における流量というように限定された地点でのみ役に立つ情報と考えられて来た。それは勿論、〇〇川の治水・利水に役立つものであるから、国がその観測に努力してきたのは当然である。さらに全国スケールで見ると、こうして判明した水の量は国民の財産であるので、流量を観測することは、財産を明らかにする国の仕事であって、人口統計や国民総生産の調査と並べられる行為である。

水の惑星と言われる地球規模に視野を広げると、〇〇川の××における流量は地球上を循環する水の動態を知る上での一つのチェックポイントである。特に気候変動の行方を予測するためには欠かすことの出来ないものである。

日本でも明治時代になり、近代化の流れの中で、19世紀から試験的に流量観測を行っていた。発電水力の需要に対応して、1937年の河川統制で流量観測が広まり、1938年分からの流量データが公刊されている。1951年戦後の復興のため、水文データの向上の必要性は内閣総理大臣に報告され、観測に関する諸法、規程などが整備された。しかし問題はそれからで、半世紀にわたって、現在その規程などがあまり変更されないで、そのままであり、その適用についてはレベルが却って落ちているという懸念もある。事実、1951年の内閣総理大臣への報告で欠陥とされた点は今でも欠陥である。新技術の導入でそれを補う努力もなされている。世界は著しく進展してい

る。治水・利水のみならず、気候変動のモニターなど、人類の安定的発展に役立つ流量観測の充実を願ってこの小文をまとめた次第である。

### 2. 河川流量は全球水循環のチェックポイント

全球的水循環過程で、どこにチェックポイントを置くか。海水位は測っても波浪・海流・水温(熱膨脹)、風による吹送などで変動が大きく、チェックポイントになりえない。大気中の水蒸気フラックスを測れるだけの全球ネットワークはない。降水量は国内でさえも、特に冬期降水量について、精度が悪い。水が集まって動いているのは河川しかない。河川の流量は全球水循環の唯一のチェックポイントである。

21世紀はバラ色の世紀ではなく、水問題の世紀になることをユネスコは指摘し、1965年からInternational Hydrological Decade (IHD—国際水文学十年計画)を始めた。今後の水文要素の変動を把握するため日本でも研究所、大学などで活発な活動が展開された。もちろん、流量も重要なキーワードであった。

### 3. 各種の流量

河川の流量となった流出は我々の社会に重大な影響を持つ。すなわち多すぎれば洪水となり、少なすぎれば渇水となり、いずれも災害の原因である。広義の水資源の



流観値の精査にはHV図を用いることをすすめたい。  
Vとは流量÷断面積で平均流速と呼ばれる。これを見  
ると様々な問題が発見できる。学生の演習例題に好例  
である。

### (3) 等流HQ式<sup>1)</sup>

観測水位流量プロット図において、ある実測点からそ  
の付近のHQ関係を推定するのに、等流HQ式がある。最小  
自乗法によるHQ式は、関係するすべての点を利用するが、  
等流HQ式は、ある実測点において、マニング式とHQ式

$$\text{マニング式 } Q=(1/n)i^{1/2}AR^p \quad p=2/3 \cdots (3)$$

$$\text{HQ式 } Q=a(H+b)^2 \cdots \cdots \cdots (4)$$

において、HとQとの値とその勾配(図上の)とが一致す  
ると仮定することで次の関係になる。

$$a=(Q/A)(1+p)^2 B^2/(4A) \cdots \cdots \cdots (5)$$

$$H+b=2R/(1+p) \cdots \cdots \cdots (6)$$

こうして、a, bが求められ、HQ式が作成される。上式で  
Q: 流量、n: 粗度係数、i: 水面勾配、A: 流水断面積、  
R=A/B: 経深、B: 水面幅、H: 水位である。粗度係数  
や、水面勾配は消去される。

これは流観流量一つ一つが持つ妥当性を検討するのに  
有効である。

### (4) 電子計測を信じるな

HQ式作成時に用いる水位は基準断面における量水標  
(水位標)の水位である。HQ式に代入して流量を求める  
ための水位は自記水位計による水位である。この相違は  
一口で解消される。自記水位計目盛は基準(断面)量水  
標に常に一致させてある筈だから。とは言っても、最近  
のエレクトロニクスを利用した水位計にはドリフトとス  
パイクノイズその他の欠点がある。ドリフトとはある時  
点で基準(断面)量水標に合わせておいても、0点がず  
れたり、高い水位でズレが生じたりすることである。ス  
パイクノイズとはある時に急に何cm又は何mも異った値  
を示し、次の時点で元へ戻る場合である。いずれも不適  
切な電子部品の利用によるもので、適切な部品で組み立  
てられた水位計を適切な価格で購入すべきである。さら  
に保守点検を怠ってはならない。水位が適切でないと、  
HQ式も、それによる流量もバラツクことになる。保守点  
検が重要である。

### (5) 観測高度化への期待

今まで見たように、水位からリアルタイムに連続流量  
を求めようとすると、過去のHQ式を用いて近似的にしか  
流量が求められないとか、中水観測は空白とか、年間の  
観測回数を満たす観測所は少ないとか、年界の断層とか

の諸課題があることが、読者にはわかっていただけで  
思うが、さらに重要な諸課題があり、流量観測は在来の  
方法に頼らず、高度化が望まれるわけである。

## 5. 流量観測の経緯

ここで在来から行われて来た流観の経緯を一瞥してみ  
る。<sup>2)</sup> 可搬式流速計は1873年にデレーケが日本へ持参し  
たと言われている。流量観測は、はじめて明治24年  
(1891年)に瀬田川で流量観測が行われたと言う。明治  
27年(1894年)には九頭竜川でタコメートルを使ったと  
のことであるが、実態はわからない。浮子を使って石狩  
川、雄物川など、また九州の河川でも流量観測がなされ  
たようである。

可搬式流速計はプライス流速計が多かったようである。  
昭和12年(1937年)に河水統制令ができて、流量観測も  
体系化された。昭和13年(1938年)分より内務省(国土  
交通省の前身)は流量年表を公刊した。第一回の目次を  
みると、37水系の111ヶ所の日流量が記載されている。

昭和26年(1951年)9月25日、日本の復興を図る経済  
安定本部資源調査会は「水文学資料の欠陥に関する報  
告」<sup>3)</sup>をまとめ、経済安定本部総裁総理大臣 吉田茂に  
対し報告した。これは資源調査会議長安芸皎一が同会長  
周東英雄を経て、総理大臣吉田茂に提出したという形に  
なっている。道筋を作っておいて総理大臣にまで水文学  
資料の欠陥を報告したという手際の良さは抜群であるし、  
無論、空前絶後である。

これによると、流量及び水位の観測については、流量観  
測所数は建設省121、資源庁電力局水力課の所掌のもの  
約500という。水位観測所(水位のみ)数は建設省837、  
他に都府県が多数という。流量観測の精度について、平  
水・低水については、上下流で整合しない例をあげ、地  
下水・伏流水の出入、水位観測の不正確、水位流量曲線  
の不正確が問題であるとしている。そのため、断面の  
整った所を観測所とすること、水位流量曲線の精度向上  
のため精密法の流観を行うこと、他の測定との比較に考  
慮を払いたいとしている。これらは今なお有用な指摘と  
言うことができる。

水文学研究上の諸問題として十数項目あげてあるが、  
その中で、時計の改良、洪水流量測定の精度向上、洪水  
追跡の実地応用開発、自記水位計の改良、特に縮尺を変  
えて測る方法、河川流出の因子の分析手法の発展等が指  
摘されている。これを契機に次々に観測の法律などが整  
備されて行った。

気象業務法(昭和27年(1952年)6月2日)が公布され  
た。国土調査法第三条第一項の規定に基づき、水基本調  
査作業規程準則(昭和28年(1953年)7月18日総理府  
令)、水位及び流量調査作業規程準則(昭和29年(1954  
年)10月9日、総理府令)が出された。これらにより戦

後の水文分野の発展を支える法的体制はできた。

この後、気象庁では地上気象観測法（後に指針）、建設省では河川砂防技術基準（案）、水文観測（マニュアル）、通商産業省公益事業局では流量調査基準が作成された。実作業においてもこのような形で統一化と精度向上が図られて行った。

昭和53年（1978年）10月31日 科学技術庁資源調査会（小委員会長 木下武雄）は「水情報システムの現状とその改善に関する報告」を科学技術庁長官熊谷太三郎に提出した。これは国際連合アジア太平洋経済社会理事会で取り上げられ、アジア太平洋の国々において類似の調査をして、水情報システムの改善がなされた。

水位流量観測所は合計で約2,400ヶ所で、内訳は次の通りである。

表1 1978年における流量観測所数

	建設省	通商産業省	農林水産省	水資源開発公団	合計
観測所数	1,460	735	168	23	2,386

問題点としては①水位計零点高の確認、②水位観測資料の時間的連続性、③結氷河川の水位及び流量観測、④水位の読取単位、⑤観測の確実性の向上、⑥流量測定精度、⑦流速計の使用と検定が指摘されている。

## 6. 流観作業

流観作業には色々の指針すなわち基準・規程等がある。年間の回数については5.（1）で述べた。その他の2,3について述べる。

### （1）測線数

前記の水位および流量調査作業規程準則によれば、水面幅に対する測線数（横断面上、可搬式流速計を入れる位置、浮子を投入する位置を測線と言ひ、その数）は可搬式流速計、浮子ともに同数である。同準則にはさらに、高水時には水面幅に対する浮子の測線数を約半数に減らして行うように示している。いわゆる緊急法である。高水時には水位の上昇・下降が速いので時間をかけて測った場合、観測中の断面積、流速の変化から発生する誤差と、測線数を少くしたことによる誤差とどちらが大きいのか、それを避けるためにどちらを選ぶかの問題である。横断方向の流速分布についての水理学的な法則はあまり定説がないから、慎重に決めなければならない。準則の測線数も大胆に決めているが、運用する側も、もっと大胆に、水面幅を河川幅と読みかえて、測線位置を固定し、実質的にはこの緊急法の半分くらいの測線数しかない例もある。

低水流観について前記の準則によれば、精密測定を随時行うことになっている。その時は、2倍の測線数で密に測定して精度検証をするよう示している。果たして精度検証しているのだろうか。

表2 測線数

水面幅	20m未満	20～100m未満	100～200m未満	200m以上
測線数	5 (10)	10 (20)	15 (30)	20 (40)

（ ）は低水流観の場合の測線数  
流速計、浮子共通

### （2）測線内の流速測定点（可搬式流速計）

通常、可搬式流速計を鉛直方向に水中に固定する位置は、一点法では水深の6割、二点法では水深の2割、8割とされている。流速の分布を2次曲線と仮定しているからで、今後検証すべきである。精密法では水深20cmごとに行う。最近、精密法を実施した例を聞かない。この点の実施については、精密法を除いて、準則通り行われているようである。

### （3）測線における浮子の適用

河川の鉛直断面内の流速分布は、等流と思われる流れでも水理学的に未だ解明されているとは言い難い。そのため、水深に対して、どのような吃水長の浮子を投入し、測られた流下速度にどのような係数を適用するかは未定と言える。しかし準則で、未定とは書けない。安芸皎一が、水理学資料の欠陥を内閣総理大臣に報告したのが1951年で、多くの関係法規とともに準則ができたのが1954年であるので、可成り急いで準則がまとめられたのであろう。

それまで安芸（皎一）の式と呼ばれる式が有力であった。

その他にもFrancisの式とかあるが、当時の話しを仄聞するに、流観担当者はこれらの係数を任意に選ぶため浮子の吃水長、更正係数のとり方が混乱していた。そのため、当時の主たる河川技術者が集まって、準則のような吃水長、更正係数をひとまず決めた。そして、その後、妥当な係数が判明したら、計算し直して、妥当な流量にすればよいとした。技術の進歩のステップとしては当然であった。

安芸だけでなく、物部、春日屋なども流速分布を2次式と仮定して流体抗力を1次式的に取扱っている。流速分布を1次式と仮定すれば流体抗力を2次式的に考えても容易に浮子更正係数が計算上求められる。<sup>4)</sup> 木下武雄は浮子の吃水比と、河床流速／表面流速との2次元座標で更正係数を表示し、準則の更正係数と世界気象機構WMOの更正係数（吃水比で決められている）とも比較した。これによるとWMOの更正係数は吃水比で決められていて河床流速／表面流速が凡そ0.7のあたり、つまりあまり

流速の鉛直勾配のない状態を仮定している、さきの準則と比較すると、浅い河川（例：0.5m浮子）では上の流速比が小さい場合に対応する。深い河川（例：4m浮子）では上の流速比が大きい場合に対応する。

#### (4) 流観作業のまとめ

流観作業については、この他にもとても書ききれないぐらい多くの課題がある。これをやさしく、いただいた説明書に「絵で見る水文観測」<sup>5)</sup>がある。

1954年という50年以上前の制定の準則を今も守っているのはおかしい。河川技術の大先輩の言う通り、今後妥当な係数が判明したら改訂すべきである。技術基準というのは本来そういうものである。改訂するにはそれを立証する高度技術が必要で、今こそ、そのような技術を駆使できる時に来たのである。

## 7. 流量を測る高度技術

### (1) いろいろな方法

流量を測るには色々な方法がある。小流量から大流量まで色々考えられる。現在の技術では不可能でも、将来、高度技術として可能になるかも知れない。そのような方法を列挙したもの<sup>6)</sup>に水文環境技術レポートNo.2 [改訂]「河川流量観測手法のいろいろ」がある。そこでは、①体積を測る、②水位等の測りやすい要素から流量を求める、③流速を測る、④熱放散を利用する、⑤超音波を流れの中に伝搬させて流速を測る、⑥電波を流水の表面に当てて流速を測る、⑦トレーサ移動追跡、⑧管路における流量測定手法について、原理・実用例を含め、詳細に述べている。あえて馬鹿だと言われそうな方法も含めてある。この他の方法もあるであろうが、とにかく高度技術を開発するなら、まずあらゆる方法を組上りにのせるべきである。

### (2) 対象河川の特性

高度技術の導入にはまず、目的を明確にして、対象河川の特性、つまり河道条件、流量と流速の変動幅、要求精度等を考慮すべきである。電波流速計がある。河川表面の形状移動速度が測れる。通常、表面浮子の更正係数0.85を掛けてその測線の平均流速としている。この仮定が成立つ（浅い）河川であれば連続流量観測が可能であるので極めて有効な方法である。しかし、深い河川で係数0.85が疑問ならば別途に更正係数を考えねばならない。それにはADCPなどで流速の鉛直分布を測って、それに応じた更正係数を利用しなければならない。適用流速についても考えておくべきである。

どのような河川でも、どのような流量でも一つの方法で測れる事はない。他の河川で成功したから、こちらでやって見る、というような考え方ではなく、独自の方針で高度技術を導入することを考えた上で、他の河川の例

を参考にするというのが、正当なシナリオである。

独自の方針を立てる時には目的を明確にして、多分野の専門家の協力が必要なこともある。

話はそれだが、1965年頃筆者がレーダ雨量計の導入に関心を持ったのは、レーダによる雨滴の観測に理論的な欠陥は明らかであっても、利水ダムの出水時の操作に河川の従前の機能の維持を義務づけるには、事前放流をせねばならないので、その補償のために、空中の雨滴の多寡を知ることを目的としたのであった。

### (3) 水中でのドップラー観測

ADCP (Acoustic Doppler Current Profiler の略で、直訳すれば、音響ドップラーによる流速断面測定器となる) では、4個のセンサーを船底に装着する。各センサーは鉛直下方に対し $20^\circ$  傾いた方向に超音波を発射する。超音波は水中の浮遊物に当たって返って来るが浮遊物の動きによって周波数の変化が生じる。それがドップラーと呼ばれる現象である。周波数の変化から伝搬方向の浮遊物の運動がわかり、図2でA, B, C, Dでの運動を合成して流向流速がわかるというのが原理である。但し、ここで注意すべきはAとC、BとDにおける浮遊物の運動が一樣かということである。一樣でなければ流向・流速には大きな誤差を伴う。事実、横断面で、小区画ごとに得られた流速で横断面内の剪断力を求めると、とても大きな値になって、水理学的に理解できない。しかし全断面の流量は、他の方法と比較して、凡そ妥当と推定される。この傾向は筆者の計算（未発表）とも合う。

不感帯の流速推定とか、船速補正とか色々課題はあるが、仮定条件を理解した上での流量観測には有効である。

通常のADCPは船に装着して河川横断方向に船を走らせるので、連続観測はできない。この改良型で、河床にとりつけ上方に超音波を発射して連続観測する方法や、河岸にとりつけ水平方向に超音波を発射して連続観測する方法もある。

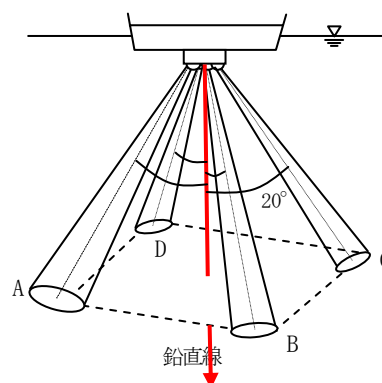


図2 ADCP説明図

### (4) 流水中の超音波パルス伝搬

流水中に超音波パルスを伝搬させると、流れにのれば速く、流れに逆らえば遅く伝搬する。この時間差から流

れの速さを求めることができる。時間差を読むには精度の高い時計が必要である。それが十分でなかった時代には、一方向の伝搬を繰返し、一定時間に何回繰返せるかを測り、逆方向についても同様に繰返し、その繰返し周波数の差から流速を求めた。これをシングアラウンド法と言う。

時間の精度が上ると、パルス伝搬時間差を計時できるので、パルス伝搬時間差法が普及した。これには音速が水温・塩分で変わるための補正が必要であった。

伝搬時間の逆数をとってその差を作ると、流速を求めるのに音速が消去され、その補正がいらなくなった。あるいは2方向の伝搬時間差から音速を求めることが可能で、この音速を用いればあえて、水温・塩分を測らなくてよい。

以前は閾値を決めて、波の立ち上がり部分で時間を読んだが、今は波を全体として相関係数により時間差が算出される。

このように超音波パルス伝搬時間差法も、コンピュータの進歩でデータ処理に大幅な向上がみられる。それでも水中における超音波の挙動には手を焼く。水温変化等による音速変化の補正はできるが、水中の音速分布、特に鉛直分布による屈折は大きな障害である。屈折の推定式はあるが、曲げられたものは仕方ない。改善方法として、周波数を下げて、屈折して河床・水面に当たってもエネルギーが対岸まで届くような強力な音波を出すとか、川幅を分割して屈折しても受波できるように短いスパンで測るとかの方法がある。

伝搬方向の主流向との角度  $\theta$  が  $\cos \theta$  という形で計算式にはいっているので河川に偏流があると誤差になるので、送受波器を2台で対向させないで、3台をV字形に配置して偏流の影響の主要部分を消去する方法もある。

洪水観測には濁度が災いするかも知れないが、音響インピーダンスから判断すると、浮遊土砂よりも気泡の方が障害になる。河川環境管理財団の研究助成<sup>7)</sup>による実験でもその傾向が明らかになっている。

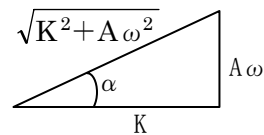
よく知られているように感潮河川の水位流量関係は楕円を描く。

外海潮位を  $H_0 = \sin \omega t$  とし、貯留域の水位を  $H$ 、面積を  $A$ 、河口の順流流量を  $Q$  とする。  $\omega$  は潮汐の角速度である。河口の運動方程式を  $Q = K(H - H_0)$  と線形化して解くと<sup>8)</sup>

$$H = \frac{K}{\sqrt{K^2 + A^2 \omega^2}} \sin(\omega t - \alpha) \dots \dots (7)$$

$$Q = \frac{-A \omega K}{\sqrt{K^2 + A^2 \omega^2}} \cos(\omega t - \alpha) \dots \dots (8)$$

$\alpha$  は位相のズレで、下の三角形より求められる。



このような現象を実測で検証できるのは水中に固定した超音波パルス伝搬時間差及びその改良形しかない。

## 8. むすび

流量観測をここまで組織的に行ってきたのは国、特に国土交通省河川局傘下の機関であった。経済産業省の主として水力発電に係わる分野、農林水産省も実施して来た。ユネスコのIHD-IHP以来、大学・研究機関の貢献も忘れられない。観測とは継続的に行うから意味がある。技術基準を明確にして行うわけであるが、その基準は技術の進歩とともに改訂されるべきである。そうすると精度などあるいは結果の数値さえも変ることがありうる。この矛盾をどうするか。例えば浮子の更正係数の新しい値が求められたとする。かつての大先輩の言葉のように全データを改めるのは良心的ではあるが、混乱も招く。高度技術でははっきりしたところから逐次修正して行くのが現実的であろう。最初に述べたように、〇〇川の××地点で流量を測り、治水・利水に役立てるのではあるが、またそれは地球の流量を測るということにもなるので、地球人の連帯という考えで前進しよう。

## 参考文献

- 1) 木下 武雄：等流IQ式による流量の照査，水文・水資源学会 2001年研究発表会要旨集，pp.30-31，2001.
- 2) 水文環境技術レポートNo.12 水文観測：(株)水文環境，2007.
- 3) 資源調査会報告第9号：水文学資料の欠陥に関する報告，経済安定本部資源調査会 昭和26年9月25日.
- 4) 木下 武雄：浮子更正係数の一考察，水文・水資源学会 2003年研究発表会要旨集，pp.156-157，2003.
- 5) 中部地方建設局：絵で見る水文観測
- 6) 水文観測技術レポートNo.2（改訂）：河川流量観測手法のいろいろ，2005年
- 7) 木下 武雄：超音波流速計の洪水観測への応用，第8回河川整備基金助成事業成果発表会報告書，財団法人河川環境管理財団，平成13年10月
- 8) Kinosita, Takeo: Improvement of ultrasonic flowmeter in rivers in Japan, Advanced in Hydrometry, IAHS Pub. No. 134, 1982.

(2010. 7. 20受付)