

水面勾配による河川流量の自動観測
Automatic River Discharge Measurement by Surface Slope

水管理工学研究所 正員 木村俊晃

1. 水面勾配測定の必要性

河川の水面勾配、とくに短区間のそれは、水位のように、工事計画に直接必要な測定量ではなく、流量観測とのかかわりにおいて必要とされるものである。

ところで、河川など開水路の継続的な流量測定法としては、大別して、

- (1) H-Q曲線方式
- (2) 測水施設方式
- (3) 水面勾配方式
- (4) 流速方式

の4方法があるが、今日では、水位を継続測定量とする(1)および(2)が多用されており、(2)の中でも水面勾配によるものや(3)の水面勾配方式はまったく使用されていない。(4)は最近研究開発中のものである。

平均流速公式の構成から考えて有効であると考えられる水面勾配方式が余り用いられなくなっているのは、方法論的にメリットがないためではなく、主な理由は水面勾配測定の困難性にあるのではないかと考えられる。

そもそも、Chezy (1769)、Manning (1889) などにより提案された平均流速公式の工学的目的は、流れの抵抗則の解明にあったのではなく、簡単な流速ひいては流量の測定法の開発にあったのではないかと考えられる。

昭和10年頃に制定された旧内務省土木局の「河川¹⁾測量規定」は、河川測量を①平面測量、②高低測量、③流量測量に分けて、全文63条から成っているが、第3章流量測量に10条をさき、その中のもっとも長い1条で水面勾配測定についてのべている。

すなわち、

「第38条 流量測量は上下流を通じて河状整正にして、其の両岸の地形測量設備をなすに適し、且つ水流の纏りたる所に於て施行すべし。

第39条 流量測量は成るべく各種の水位につきて之を施行すべし。而して洪水の場合には特に実測の時期を失せざる様に留意すべし。

第40条 流量測量には流速器又は浮子を使用すべし。

第41条 流速器を使用する場合に在りては、河流を横切り約10m毎に鉛直線に於ける平均流速を求むべし。

第42条 流速器は使用の前後又は手入をなせし都度必ず試験をなし、係数の更正をなすべし。

第43条 流量を測定するに浮子を使用する場合には、随時流速を測定し得る如く予め相当の準備をなし置くべし。

第44条 浮子は水深の許す限り成るべく長き竹竿を用ふべし。但し止むを得ざる場合にありては表面浮子又は其の他の浮子を使用することを得。

第45条 浮子を使用する場合に、其の流下距離は成るべく河幅の1倍以上たるべし。

第46条 流量測量個所の上下流には量水標を設置し、其の距離長大なときは中間にも之を設け、測量中は其の終始の水位を観測するは勿論、其の中間にありても適宜観測すべし。

第47条 流量測量個所にありては、必要なる位置に於て特に精密なる横断並に深淺測量をなすべし。出水期の前後並に断面に變動を來たしたる處ある時は改測すべし。」

第46条には、水面勾配という語は現われていないが、この条文が水面勾配測定のためであることは間違いない。建設省では、筆者が入省した昭和26年当時もそうであったが、流量観測地点の上下流断面に基準量水標の外に設ける量水標を勾配置量水標といっている。

石原藤次郎²⁾は水面勾配 (Surface Slope) の測定法について記述しているだけでなく、流速の測定法として、

- ① 浮子・流速計による直接法
- ② 平均流速公式による公式測法 (Analytical method)

をあげ、後者をとくに勾配法 (Slope Method) ともいうとし、洪水時等で直接法が用いにくい場合や計

画・設計時における利用について述べている。

³⁾
安芸峽一も、水面勾配による流量測定には強い関心を示し、つぎのように述べるとともに、水位を精密に測定するためにSchaffernak の水位計を紹介している。すなわち、「我々は先に斉正な水路では一般に流量は水面勾配で決定されると言うことを述べた。流量に殆んど変化を見ない定常的な流れの場合のみでなく、洪水或いは潮汐の影響を受けている場合でも、或る瞬間的な流量は大体に於て水面勾配に支配されると言うことを知ったのである。そうするとすれば、我々は流量観測の場合には水面勾配を測定して置くことが必要であり、これによって大体の粗度係数の値を求めることが出来ると、其の後は我々は水面勾配の測定のみによって大体の流量を知ることができる。此のためには精確に水位を知ると言うことが必要である。

一般に水位を正しく観測すると言うことは容易ではない。特に洪水のような場合には水面は甚しく脈動するし、又波のために動揺して正しい値を読みとることは困難である。此のような目的のためには水面勾配は成るべく短い区間から求めたいのであるが、区間が短くなると水位差が小さくなるから、水位観測の誤差の影響は大きくなる。我々は十分注意して平均水位を読みとらなければならない。」

2. 水面勾配の測定法

水面勾配の測定法について述べている著作は非常に少ない。

⁴⁾
石原藤次郎は、河川の両岸における多くの量水標又は杭による縦断的な水位の同時測定によるとして、このような方法は多人数を必要とするためか、建設省河川砂防技術基準（案）調査編⁵⁾は痕跡水位の測定による方法を採用している。ただし、技術基準の場合は背水計算による粗度係数の検討を考えているのであって、勾配法による流量観測を考えているのではない。そのことは、水位調査の章に勾配量水標の記載がないことから推定できる。

そもそも水面勾配は上下流2地点間の水位の差から求められるが、測定法として2地点で水位を測定し、計算によってそれらの差を求めたのではなく、安芸峽一が指摘しているように水位差の相対誤差がいちじるしく大きくなって、ほとんど有効な測定値は得られない。洪水時には動水圧の変動や波の影響

が大きい、不等沈下などによる量水標零点高のずれや測定時刻の誤差なども不利に作用する。

R.K.Linsley⁶⁾は1 ft、安芸峽一⁷⁾は30cmが水面勾配測定のために必要な最小水位差としているが、従来用いられている1 cm単位の水時計では、これだけの水位差をとっても少なくとも $1/30 \approx 3\%$ の誤差となるわけである。この場合、 $I = 1/1,000$ でも、上下流地点間の距離は300 mが必要であり、水面勾配がさらに緩いともっと長い区間をとらなければならないから、実行は中々困難であり、河川砂防技術基準のように10cm程度とせざるをえなくなる。そうすると少なくとも $1/10 = 10\%$ の誤差が生じることになり、他の誤差要因まで考えると、測定不能に近くなって、結局は勾配法による流量測定そのものが放棄されることになったのが実態ではないかと考えられる。今日、河川技術において、水面勾配⁸⁾の測定が事実上放棄されていることは、竹内俊雄のあげる水文観測用測器は雨量計・降雪計・蒸発計・水位計・水深計・流速計および流量計であることに認められる。往々にして、流量の自動測定法として、勾配法と流速法が比較されることがあるが、本来水面勾配は水位と同じ一次変量であるのに対して、流速は二次変量であって、同等に比較するのは適当でないと考えられる。

ところで、測定論的には、水面勾配すなわち上下流2地点の水位差を物理量として直接測定する方法が水位を測定してその差を計算するよりも有利であることは明らかであり、筆者らは図-1のように導水管で上下流地点から中央地点に水を導水して1カ所に測定すべき水位差を作り、差圧計で検知する方法を採用した。

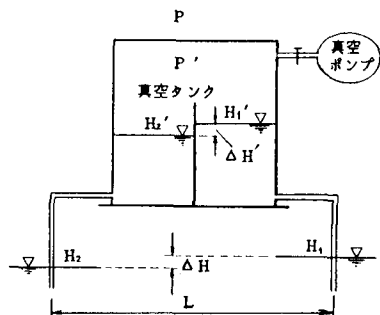


図-1 吸上方式の水位差測定
(特許出願中)

静水状態においては、図-1の水面勾配計の両タンク間の水位差 ΔH は勾配測定距離 L をへだてた上下流2地点間の水位差 ΔH に等しい。すなわち、圧力の釣り合いから、

$$P + H_1 = P' + H_1' \dots\dots\dots (1)$$

$$-) P + H_2 = P' + H_2' \dots\dots\dots (2)$$

$$H_1 - H_2 = H_1' - H_2' \dots\dots\dots (3)$$

$$\therefore \Delta H = \Delta H' \dots\dots\dots (4)$$

タンクへの導水およびその吸上げという方式を採用した理由は、

- (1) 導水管の先端の高さが測定すべき水位差と全く関係がなく、測定精度が確保し易いこと、
- (2) 装置を水面上に設置すればよいので施設の工事および保守が容易になること、
- (3) 導水管内への土砂の流入が防止し易いことなどであるが、一方、
- (1) 導水パイプの粗度係数の経年的な増大が変動する水面勾配に対して測定誤差を生じないよう注意する必要があること、
- (2) タンクおよび導水管の空気もれは完全に防止する必要があること、
- (3) 導水管の両端には常時水があるようにしなければならないこと、
- (4) 結氷を防止する必要があること

など装置の製作および施設の施工について十分な配慮をしなければならない。なお、動水圧の変動や波については、導水管の消波効果が大きいので、全く問題はなく、高精度の安定した測定が可能である。

差圧センサーとしては、ダブルフロート方式と半導体センサー方式の2種を開発した。両者は①安定性、②精度、③価格、④規模などについてそれぞれ得失があるが、水位差の測定精度はいずれも0.1 ~ 0.2mmに達する。図-2は半導体センサーを用いた小型の装置であり、水位差のみでなく、水位も検知することができる。

3. 水面勾配の性状

近時、感潮河川や合流点を除けば、水面勾配はあまり変化しないものと考えられ、河床勾配をもって代用できると考えられている場合が多いが、それは必ずしも適当ではない。

石原藤次郎⁹⁾によれば、「水面勾配は河川調査の最大目的たる流量を直接左右するものであり、且河床

勾配に比し測定し易い^{**}から、一般に広く用いられる。之は同一点に於ても水位従って流量の如何によって常に変化するから、水位に応じて高水勾配、低水勾配及び平均勾配等の区別がある。

実際河川にては流量従って水面勾配は時々刻々に変化する、殊に洪水時等は其の変動が著しい。従って其の測定には多くの量水標の読みを同時刻にとるか、又は沢山の点を使って水際100m位の間隔に打った杭上に合図にて同時刻の水位を印しづけ、之等の高さを後から水準測量によって求める様にする。尚測定は兩岸にて行ふを常とし、彎曲その他の原因で兩岸の水位が同一でない時は、其の平均を以て流心に於ける水面と見做す。」

Manning の平均流速公式

$$V = \frac{1}{n} R^{2/3} I^{1/2} \dots\dots\dots (5)$$

ここに、

V : 平均流速

n : 粗度係数

R : 径深

I : 水面勾配

を整理すると、

$$\frac{V}{R^{2/3}} = \frac{1}{n} I^{1/2} \dots\dots\dots (6)$$

(6)式左辺の V および R は測定できる量であるから、測定値から $\frac{V}{R^{2/3}}$ すなわち $\frac{1}{n} I^{1/2}$ の値を計算することができ、それと水位 H との関係を求めることができる。

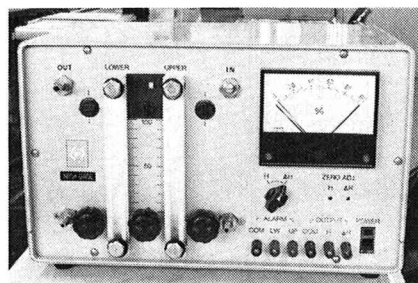


図-2 小型水位・水面勾配計

図-3は大河川(筑後川)と小河川(富士川)について $H - \frac{1}{n} I^{1/2}$ 関係を求めた結果を図示したものであるが、いずれの場合も

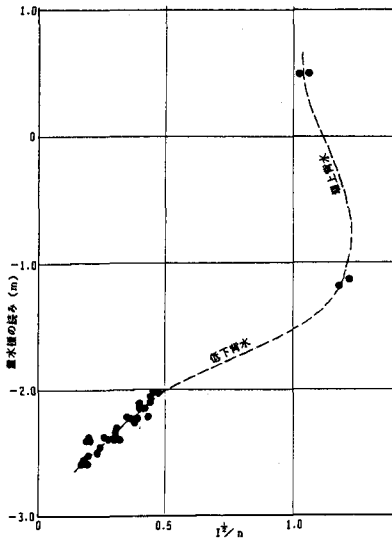
低水時: 低下背水 ($H \rightarrow$ 増の場合、 $\frac{1}{n} I^{1/2} \rightarrow$ 増)

高水時: 堰上背水 ($H \rightarrow$ 増の場合、 $\frac{1}{n} I^{1/2} \rightarrow$ 減)

の傾向を示しており、この傾向は河川において一般

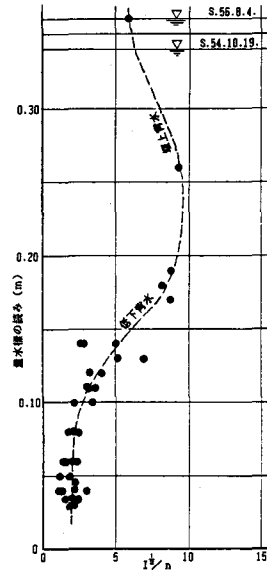
* 差圧は空気パイプでも実現できる。

** 人手の得にくい今日では事情が変っている。

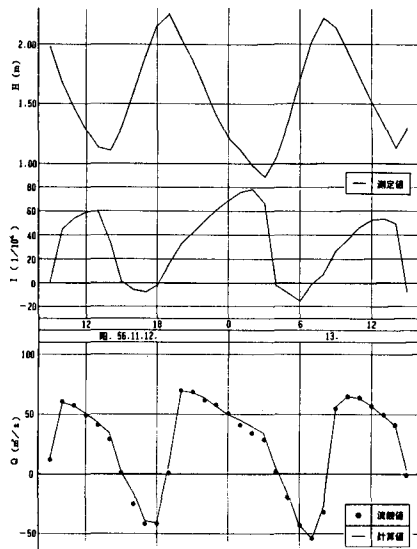


(a) 筑後川片の潮

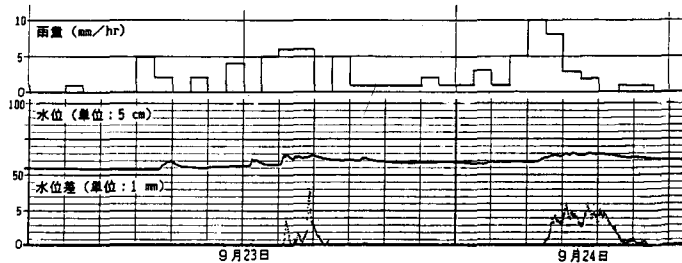
図-3 $H - \frac{1}{n}$ 関係図



(b) 富士戸川



(a) 中川 1981.11.、 $L=200\text{m}$ 、 $I=-20/10^6 \sim 80/10^6$



(b) 鮎沢川 1985.9.、 $L=5\text{m}$ 、 $I=0 \sim 1.6/1,000$

図-4 水面勾配の時間変化の記録

的傾向であると考えられる。ここで、粗度係数 n はほぼ一定であることを考慮すると、 $\frac{1}{n}$ の変化傾向はほぼ水面勾配 I の変化傾向とみることができるのであって、筑後川のような改修済の大河川においても、このように水面勾配が大幅に変化することに注意する必要がある。

M.C.Boyer¹⁰⁾ は $\frac{1}{n}$ を Slope-Roughness Factor と称し、 $H-Q$ 曲線の延長のために $H - \frac{1}{n}$ の関係を用いることについて述べているが、 $\frac{1}{n}$ の変化が大きいため適正な延長はそれほど容易ではない。水面勾配 I の測定が行なわれ、粗度係数 n が分離されることがもっとも望ましい。

水面勾配の時間変化が記録された例は少ないが、図-4 は筆者らの測定結果のうちの2例を示したものである。中川の場合は感潮河川であるから、潮汐による変動は当然であるが、比較的上流部の小河川

である鮎沢川の例でも水面勾配のいちじるしい時間変化が認められる。この場合は、測定地点が低い堰の上流にあるため、常時は水面勾配が零であり、洪水になり水位がある一定値より上昇すると、急激に水面勾配が増加している。

本論では、水面勾配の変動が無視できないこととその連続的自動測定が可能となったことの提示に止め、性状の詳細な分析については、今後の課題としておきたい。

4. 水面勾配による流量測定

流量Qは、平均流速公式が示すように、粗度係数n、断面積A、水位Hおよび水面勾配Iの関数、すなわち、

$$Q = F(n, A, H, I) \dots\dots\dots (7)$$

であるから、水面勾配Iが補助的でなく、水位Hと同等の精度で継続的に測定できれば、従来、水位の継続測定のみを前提として組立てられてきた開水路の自動流量測定法は全く様相を異にしてくる。

表-1は、河川などの開水路、地下水および水管について自動流量観測のために必要な測定量を施設の種類の別に一覧にまとめたものであるが、とくに、つぎの効果が期待できる。

- (1) 河川では、
 - (a) コントロールの良否を考慮する必要が少なくなるので、流量観測の地点選定が容易になり、
 - (b) 出水の早い中小河川の洪水流量観測が容易になる。
- (2) 短距離間における水面勾配測定が可能となる結果、
 - (a) 従来は流量観測地点としては不適当として全く採用されていなかった水門や樋門・樋管がむしろ有利な施設となり、
 - (b) 従来の水位による測水施設に替って完全潜水オリフィスのような低落差測水施設が実現でき、
 - (c) 地下水や水管の流量測定も容易になる。

なお、水面勾配の自動測定が可能となることによって、流量観測の目的は流量そのものの測定から粗度係数や流量係数の推定に移り、長期的にはその回数を減らすことができるようになるとともに、最終的には河川流量の自動観測に途をひろくことができると考えられる。

表-1 自動流量観測のために必要な測定量

施設	測定量	要 数					備 考
		水位 (H)	水面勾配 (I)	断面積 (A)	粗度係数 (n)	流量係数 (C)	
河 川		○	○	○	○		A: 河床変動のため
水 路		○	○		○		
環 境	完全溢流	○				○	
樋 門	部分開		○	○		○	潜孔
樋 門	全 開	○	○			○	
樋 門	樋 門		○		○		水門型も可
樋 管	樋 管		○		○		"
排水ポンプ			○		○		暗渠型
地 下 水		○	○		○		
下 水		○	○		○		
水 管			○			○	ベンチュリー、オリフィス、ピトー管
開 水 路	完全溢流	○				○	
樋 門	潜 孔	○	○			○	
水 路	完全溢流	○				○	
樋 門	潜 孔	○	○			○	
水 路	完全溢流	○				○	
オリフィス	不完全潜り	○	○			○	
施設	完全潜り		○			○	潜孔

(注) ① 現場施設では、完全溢流を測るには水位は常に必要であり、とくに、水門（部分開）、樋門・樋管、排水ポンプ・水管などでは水位は不要である。
② 従来多用されている排水路測水施設は、要するに、水位のみで流量を測定しようとするものであるが、損失係数が大きいのが欠点である。

参考文献

1) 近藤泰夫・石原藤次郎・米谷栄二「測量学・応用篇」、丸善出版、1946.5. (昭.23.5.)、pp.141~144.
2) 前出1)、p.163、p.176.
3) 安芸成一「河川工学序説」、アルス、1952.5. (昭.27.5.)、pp.245~246.
4) 前出1)、p.151.
5) 建設省河川局「河川砂防技術基準(案)調査編」、1977. (昭.52.)、pp.176~177.
6) Linsley, R.K. "Elements of Hydraulic Engineering", McGraw-Hill, 1955. (昭.30.)、p.18.
7) 安芸成一「流量測定法」、森北出版、1952.7. (昭.27.7.)、p.172.
8) 竹内俊雄「水文観測用測器の歴史と現況」、1981.3. (昭.56.3.)
9) 前出1)、p.151.
10) Chow, V.T. "Handbook of Applied Hydrology", McGraw-Hill, 1964 (昭.39.)、p.15-38.