

# 河川における汚濁負荷量の常時測定に関する研究(その1)

梶山正三 伊東戡弘 宮川正孝  
川原 浩 (公害局水質保全部)

## 1 はじめに

公害行政を進めるためには現状の適確な把握が常に必要である。しかし、問題を公共用水域における水質汚濁の把握という場合に限ってみても、その手段としては何通りかの段階があり得る。第一の段階は公共用水域に測定点を設定し、各測定点について月に1度とか2度にわたり試料の採取と水質分析を行い、その結果から公共用水域の水質を知ろうとするものである。この方法は過去、現在を通じて水質を把握する手法としては主要なものとなっている。第二の段階は各測定点において水質の自動監視室を設置し、常時、水質の連続測定を行う方法である。現在、都内29ヶ所で行われている水質常時監視事業がこれに相当する。第三の段階は、水質の把握を濃度としてではなく、物質の積算量、すなわち負荷量として把握しようとするものであり、各測定点における特定物質の負荷量を常時測定しようとするものである。言うまでもなく、これらの段階の中間的な手法があり得るのであり、又、すべての水質測定項目について第二、第三の段階に進む事が必要とされるわけではない。例えば pH や水温については負荷量の測定ということは考えられないし、有害重金属については第二の段階で充分であろう。ところで、このように第一の段階を第二、第三の段階へ進めようとする方向に対しては、主として、その必要性和経済性ないし経済的效果という二点において強い批判がある。しかし、このような批判は多くは水質変動の実態を充分に認識しないために成されたものである。

河川の水質や流量は人為的、自然的要因によって、常にダイナミックに変動する。この変動は規則的な変動と不規則な変動との合成されたものであり、その変動の振幅は中小河川において特に大きい。このような河川においては、第一の段階におけるように、月に一度か二度のサンプリングで水質変化を論ずる事は場合によっては無

意味であり有害的とさえも言い得るのである。すなわち時間的変動や負荷量変動を無視しては水質の適確な把握は困難な場合が多いのである。

本研究は河川における汚濁負荷量の常時測定の技術的手法の開拓とその実用化を目的とし、その必要性の最も高いものとして有機物を考え、その濃度測定手段として TOC (総有機性炭素) を採用した。本研究は昭和53年度から3ヶ年を目途とし、初年度は河川流量の連続測定法の検討を建設電気技術協会に委託して行った。本稿はその研究結果をもとにまとめたものである。

## 2 問題の所在

### (1) 汚濁負荷量の測定

ある時刻(t)における TOC 濃度を  $C(t)$  ( $g/m^3$ )、流量を  $V(t)$  ( $m^3/sec$ )、その時の瞬時の TOC 負荷量を  $Q(t)$  ( $g/sec$ ) とすると  $Q(t) = C(t) \cdot V(t)$  なる関係が成立する。時刻  $t_1$  から  $t_2$  までの負荷量(積算値)は  $Q(t)$  を  $t$  について積分して得られる、すなわち、

負荷量(積算値) =

$$\int_{t_1}^{t_2} Q(t) dt = \int_{t_1}^{t_2} C(t) \cdot V(t) dt \quad (g/t_2 - t_1)$$

$t_1$  と  $t_2$  を任意に選択できれば、一年を分、時、日、週、月等に区切ってそれぞれの汚濁負荷量を算出する事が可能になる。これを可能にするためには TOC を常時測定する機能と流量を常時測定する機能の他に、プログラムされた積算機能を有し、かつ、測定器のトラブルを一定の限度において処理し、記録する演算機構が必要である。いずれも実用化するには多くの問題点の検討を経なければならぬ。ここでは、まず河川流量の連続測定を問題とする。

## (2) 河川流量の測定

わが国における河川流量の測定の歴史は大正初期にさかのぼり、主として水利利用の観点から行われた水文関係の調査であった。水文関係の調査はその後建設省を中心に行われ、測定計器の開発、流量計算やデータ処理などの面で技術的改良が進められてきた。これらの水文観測は水そのものを利用し、あるいは洪水時に備えるための基礎的な測定として成されてきたものであって、汚濁負荷量を測定する手段として検討されてきたものではない。汚濁負荷量の測定を目的とした流量測定のためには従来行われてきた水文観測の技術が多くの点で応用できると考えられるが、その目的の相違にもなつて別個の考慮を必要とする。第一に測定精度の問題がある。流量の測定精度は高水時と低水時で、更に対象となる河川によってその要求が異なるであろうが、測定目的によつても当然に異なる。第二に測定対象となる河川が中小都市河川にその重点が置かれる事になる。第三に原則として流量測定に連続性が要求される。このうち第三の問題、すなわち流量測定の連続性という事がもっとも重要であり、今回の実験でもその点に重点をおいて検討した。

現在、河川流量の連続測定手法としてはH~Q法といわれる方法がとられる事が多い。H~Q法は水位(H)と河川流量(Q)の関係を示す曲線を浮子や流速計を使った流量観測によつて求めて置き、その曲線を求めた後は水位を常時観測する事により流量を求めるのである。この方法には次のような問題がある。

- ① H~Q曲線を求めるには多くの労力と時間を要する。特に、高水時における水位の上昇、下降時間の短い中小河川においては高水時のデータは得がたい。
- ② 河床変動によりH~Q曲線は異なってくる。
- ③ H~Q曲線は水位の上昇時と下降時では一般に異なる。すなわち、同一水位では上昇時の方が流量が大であり下降時では小となる。したがつて一回の出水時におけるH~Q曲線は上昇時と下降時ではループを描く事になる。このループは出水規模が大きいほど大きなループとなり、同一水位に対する上昇時、下降時の流量の差は大きくなる。出水規模や上昇時、下降時に対応してH~Q曲線を使いわけるとは実際上困難であるから、H~Q法ではループによる誤差は無視するのが通常である。
- ④ 更に水温により同一水位に対する流量が異なる。これは水の流体としての物理的性質(粘性等)が異なつて

くるためである、すなわちH~Q曲線には季節的変動もあり得る。

H~Q法には上記のような問題が存在するのであるがこのうち、③及び④の問題は流水断面の平均流速が求められれば解決される。すなわち同一水位に対し、流量が種々に異なってくるのは平均流速が異なってくるためであり、平均流速そのものは流量の変化に対し一義的に追隨しているはずである。しかし、河川の平均流速を常時測定する事は困難な事であり、現在のところ確立した方法はない。しかし平均流速と一定の関数関係を有すると思われる河川内の一点(水中又は水面)の流速を常時測定する事は容易ではないが不可能ではない。したがつてこのような方法を検討する事によりH~Q法の欠点を補える可能性がある。本研究においてはH~Q法と共に上記のような点にも着目して現地試験を行ったのである。

## 3 現地試験方法

### (1) 概要

河川流量の連続測定手法を検討するため現地試験を行った。まずH~Q法を検討するため水位の連続測定器として、フロートレス(触針式)水位計(中浅測器K.K.以下N社とする)と超音波レベル計(東京計器K.K.以下T社とする)を設置し、水位の連続測定を行うと共に、併行して現地において流量観測を行い、水位と流量の関係を求めた。次に、H~Q法を補正する手段に成り得るものとして、水中あるいは水面の流速測定器を設置した。すなわち水中流速計としてT社の超音波流速計、表面流速計としてT社及び池上通信機K.K.(以下、I社とする)の2機種により、それぞれ水中及び水面の流速を連続測定した。更に、データの記録にはアナログによる記録とデジタルによるプリンター打出記録を併用し、その目的のためにN社のデータ収録装置を使用した。データの解析に必要とされる雨量のデータは調布観測所のものを借用した。

試験期間は河川管理上、出水期における河川敷内の工事時期に制約があり、1978年10月16日からの2ヶ月間を予定期間とした。

### (2) 実験場所の設定

現地試験を行う場所は第一に中小の都市河川を対象とする、第二に流量変動が大きいこと、第三に河床変動が少ないこと、第四に電源、建物、交通の便などの試験実施上の便宜等の条件を考慮し、多摩川支川である野川の東

京都野川第一水質汚濁常時監視室の設置されている地点付近とし、同時に上記監視室を試験実施上、種々の目的に利用させてもらう事にした。

水位計や流速計の設置方法としては、今回は出水期を避けた短期の試験であり、かつ試験終了後はただちに撤去、現状復帰を前提にしていたので、図1に示すように河川内に杉杭を打ち、架台を組んで、その足場及び架台上に測定機器を設置した。フロートレス水位計および超音波レベル計はそれぞれ架台脚に垂直に保護管を取付けて、その内部で測定し、I社及びT社の電波流速計は架台上に送受波器を置いた。T社の超音波流速計は架台脚の水中部分に図2に示すように送受信器を取付け、架台上にはフロートレス水位計の現場記録用の記録装置を入れる収納小屋を置いた。各測定器からの信号はケーブルによって監視室内に導びき、室内のデータ収録装置及び記録計への入力とした。

端とする。検出端はそれが空中にあるか水中にあるかを判別する機能を有し、その識別信号に応じて巻き取りの駆動モーターを動かし、常に検出端を水面位置に追従させる。この位置の上下に応じて記録プーリーを回転させ収納箱中の記録計で現場記録させると共にポテンショメータを連動させ監視室内での隔測記録を可能とした。この場合、検出端の上下は水中に鉛直に設置された保護管内で行われるが、鉛直方向に対してある角度を有する斜管内で検出端の上下動を行き事も可能である。

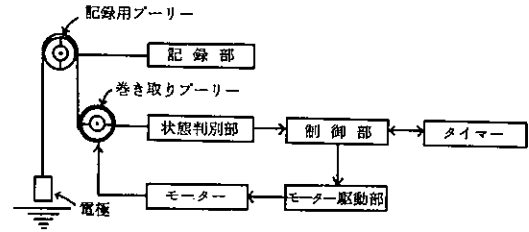


図3 フロートレス水位計の原理

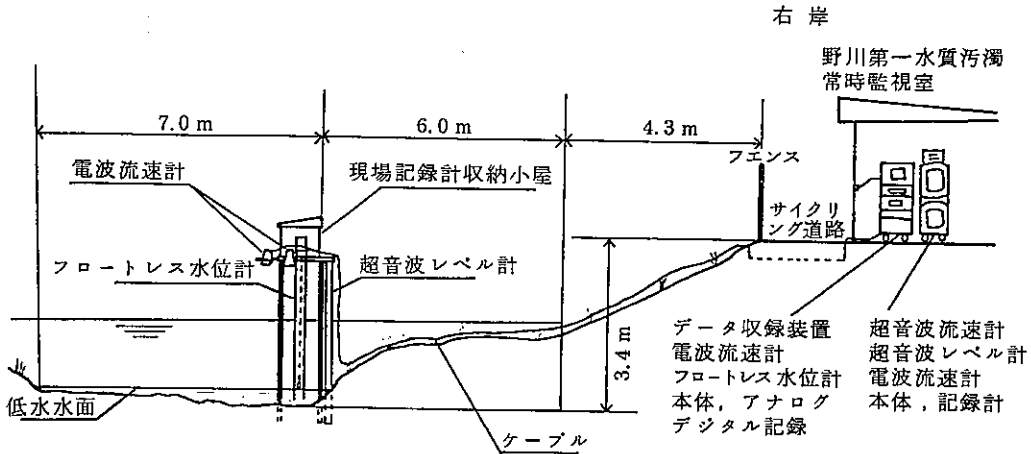


図1 現地の概要

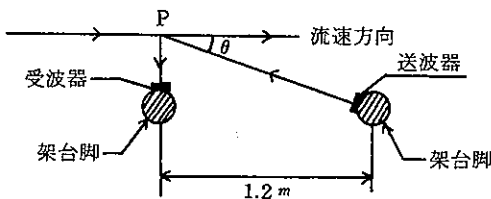


図2 超音波流速計の取付

(3) 測定装置の機能及び原理

ア フロートレス(触針式)水位計

フロートレス水位計は図3に示すように、電極を検出

イ 超音波レベル計

超音波レベル計は水中に垂直に設置された保護管の上部に検出端を固定したものである。検出端には超音波の送波器とそれから発せられる超音波が水面で反射してもどってきた時の検出器として受波器が組込まれている。超音波レベル計は山彦現象を利用した水位計であって、超音波の発信から受信までの時間差を測定し、図4に示すような機構によって水位信号を得るものである。又、検出端には音速の温度変化による誤差の発生を防止するため温度補償機構が組込まれている。

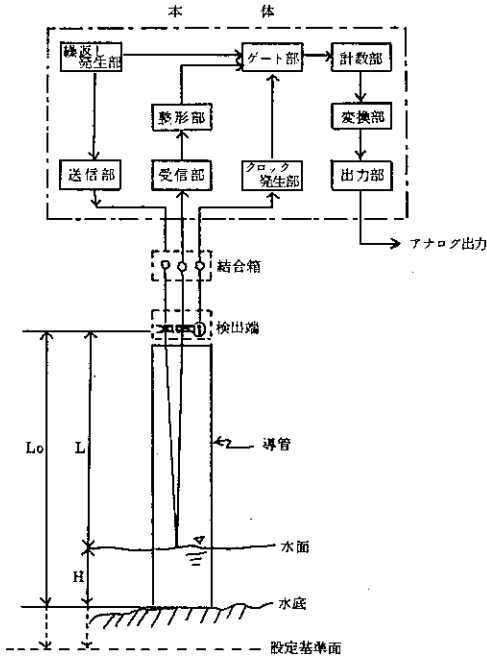


図4 超音波レベル計の原理

ウ 超音波流速計

超音波流速計は水中を伝播する超音波のドップラー効果を利用して流速を測定するものである。図5に示すように流速 $v$ で流れる流水中に送波器と受波器を設置し、送波器から流れに対して $\theta_1$ の角度で周波数 $f_t$ の超音波を放射する。放射された超音波は水流と同一の速度を持つ水中の微粒子にあたって散乱しながら直進し、点P（通常は直進した超音波が河床の浅い所で水平方向にぶつかる点）において、その全部が各方向に散乱する。この時流速方向と $\theta_2$ の角度をなす方向に受波器を設置しておけば、散乱された超音波の一部はこれに受信される。音速を $C$ 、受信された超音波の周波数を $f_r$ とすると、

$$f_r = \frac{C + v \cos \theta_1}{C - v \cos \theta_2} f_t \quad \text{ここで } C \gg v \text{ を考慮すると}$$

$$v = \frac{C}{\cos \theta_1 + \cos \theta_2} \cdot \frac{f_r - f_t}{f_t} \text{ となる。}$$

ここで $C$ 、 $\theta_1$ 、 $\theta_2$ 、 $f_t$ は既知であるから $f_r$ を計測す事により流速 $v$ を知る事が可能になる。 $v$ は点Pのレベルにおける水中流速を表わす。点Pは固定された点であり、

変動する水深に対して一定の割合をもって追従する点ではない、したがって平均流速と $v$ との比は一定ではなく水位の関数である。

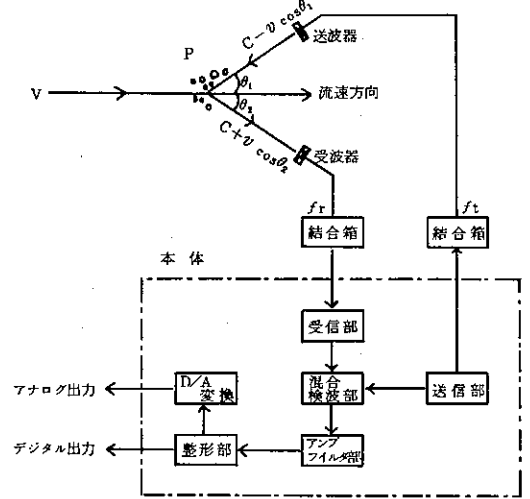


図5 超音波流速計の原理

エ 電波流速計

電波流速計は電波のドップラー効果を応用するものであるが、超音波流速計のように送受波器を分離して水中に設置するのではなく、送受波器を一体とし、空中に設置する、したがって測定されるのは水中流速ではなく表面流速である。これと同様の原理によるものとして、交通取締りに利用されているスピードメータ等があるが、表面流速計として使用するためには、受信電波が極めて微弱なものになる事と測定範囲として時速2km以下の流速をも測りうるものが要求される点で技術的に問題が多いのである。本研究に使用した装置（I社及びT社）も開発後まもない装置であり、実用化試験もまだ充分とは言いがたいが、非接触により流速を測定し得ると言う事は無人連続の測定システムを考える場合、大きなメリットであり、本研究に採用した意味もそこにある。

図6に示すように速度 $v$ で移動する水面に一定の入射角で電波が投射されると、その一部は屈折波として水中に入り、他は反射波として水面で反射する。この時、ベクトル $v$ に対する入射波ベクトルの横方向（水平方向）への偏角を $\theta$ 、縦方向（鉛直方向）への偏角（俯角）を $\phi$ とし、電波速度を $C$ 、投射波と反射波の周波数をそれぞれ $f_t$ 、 $f_r$ とすれば、ドップラー効果により、

$$v = \frac{C}{2 \cos \theta \cos \phi} \cdot \frac{f_r - f_t}{f_t} \text{ となる。}$$

従って、 $\theta$ ,  $\phi$ ,  $C$ ,  $f_t$  を既知とすれば  $f_t$  を計測する事により  $v$  の測定が可能である。ところで実際の水面が図6のように平面であるとすると、反射波は送波器側にもどるとい事はあり得ず、送波器と受波器を分離して反対方向に設置しない限り測定は不可能になる。しかし、実際の水面は波や隆起を生じ、あるいは飛沫をあげ、種々の乱れを生じている。この水面の乱れは流速方向へのベクトルのみを有するものではなく、上下前後さらに左右のあらゆる方向への動きを含むものであるが流速方向以外のベクトルはいずれは逆方向へのベクトルを生じるものであり、これらの動きをすべて合成したベクトルは流速のベクトルと一致すると考えられる。この水面の乱れに投射波があたると、反射波はさまざまな方向に生じる。その結果として、送波器方向に反射する電波も極く一部であるが生ずる事となり、送受波器を一体として形成された装置での測定が可能になる。しかし注意すべき事は、反射波の強度が最も強いのは一般的には送波器と反対方向であり、水面の乱れが少ない程、送波器方向への反射波は微弱となる、従って、測定感度がある程度以上に要求される場合には、送波器と受波器を分離して測定するという事も考慮すべき事となる。

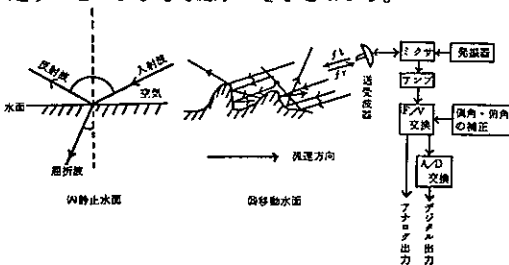


図6 電波流速計の原理

オ データ収録装置

本装置は水位計及び電波流速計からのアナログ信号又はデジタル信号を受け、内蔵された変換器により変換したのちアナログ記録、デジタル表示あるいはプリンターによる打出記録を行うものである。更にマイクロプロセッサにより一定限度の演算機構を有し、バッテリー内蔵により、2〜3時間は停電による機能の停止をカバーできるようにしている。本研究においては水位及び表面流速をアナログ記録すると共に、10分毎に表面流速と

水位をプリントアウトし、更にこれらの日最大、日最小、日平均の値をも同時にプリントアウトした。

4 現地試験結果及び考察

(1) 概要

現地試験は10月初旬に架台の組立や装置の設置を終了し、予定通り10月16日から全装置の稼働が開始され昭和53年の12月11日10時に試験を終え、同日装置を撤去した。この間、雨量15〜20mmに達する小規模な出水が4回あったが、大規模な出水は見られなかった。ブライス流速計及び電磁流速計を使用しての現地流量観測はこの間4回行なったが出水時のデータは出水時間が短かいたためあつてとるのが難しく、全体として流観データは不足である。

降雨がない時の現地における水位、流量の変動は極めて規則的であり、一日を周期として変動する。水位については午前8〜9時ごろが最低であり、午後2時ごろにピークに達するが、それぞれ水位は約15cm及び22cmである。表面流速や流量も同様のパターンである。流量についていえば水位15cmから22cmの変動にもなつて流量は約2倍になる。今回のような小規模な出水(雨量20mm以下)時でも水位は約65cmになり、表面流速は1.6m/sec程度に達した。

(2) 測定装置の稼働状況と問題点

ア フロートレス水位計

今回の測定上は特に問題はなかったようである。保守管理も簡単なもので、記録紙の交換、量水標による測定値のチェックを定期的に行うのみですんだ。ただ一般的に言えばワイヤーの伸びやスリップが生じる可能性があり、傾斜管を使用した場合にはそういう現象が生じやすいかも知れない。

イ 超音波レベル計

これも①と同様に余り問題はなかったといえる。フロートレス水位計の測定値ともほぼ一致している(両者はその基準水位に若干のズレがあり、それを考慮する)、ただ低水位(15cm程度)の場合、導管内の水面に河床にはえている植物の先端が表われ、それが水面に影響を与えるためと思われるデータの乱れがあり、更に出水時における水位データには両者に相当のくい違いがある(たとえば67cmと61cmのごとし)これらの点は検討すべき問題であろう。保守管理上の問題は特になく①の場合と同

じである。

ウ 超音波流速計

今回の超音波流速計による流速測定には2つの問題があった。第一に送受波器の設置位置が高すぎた(量水標で、その中心が14cm)ために低水時(午前8~10時すぎ)において送受波器が水面上に露出して測定が不能になり、それによって約12%の欠測を生じた事である。第二に送受波器の取付けられていた架台脚のまわりに多量の残材やゴミが集積し、そのため送受波器の表面がおおわれて測定不能になり、約19%の欠測を生じた事である。前者については事前に十分な現場調査が行われていれば恐らく解決できたであろうが、後者は単に保守管理の頻度を増加するだけで片付く問題ではない。設置方法について更に検討が必要である。今回の実験では上述のようなトラブルがあったためH~Q法を補正する手段としての水中流速の測定という本来の目的は果たせなかったが、可動部なしで水中流速がはかれるという超音波流速計の大きな長所を考えると、問題の早急な解決が望まれる。

エ 電波流速計

電波流速計は前述のように非接触型の表面流速計であり、非接触型であるが故に保守管理上の問題はまったく生じなかった。しかし、測定値の妥当性あるいは信頼性という事に関しては若干の問題がある。

① 調査に参加した2種の電波流速計のうち、I社のも

のは偏角、俯角の補正を行っていないが、これは当然補正すべきである。

② 図7に示すように一般的にデータのバラツキが大きい。これは秒速50~70cm程度の低流速を測定対象にしている事と受波器にもどる電波が極く弱いため測定感度としてはかなり無理をしている結果であろう。

③ I社及びT社の両測定器による測定値は図8のように相当の差がある。これは①、②の両者が原因していると思われる。

④ 降雨時にはデータの乱れが大きくなり、しかも値が高くなる傾向が見られる(図7参照)、降雨による水面の乱れによるものか、あるいは降雨の空中での動きを直接に検知するものかは、はっきりしない。

これらの問題のうち①についてはあまり問題がない、

②~④については問題が拡大する恐れがある。と言うのは今回の実験では前述のような事情もあって、電波流速計は水面から約2.5mの位置に送受波器を設置する事ができ、しかも水平方向への偏角はほとんどない、という恵まれた条件で測定できたのであるが、長期にわたる設置を考えた場合にはこのような設置方法をとる事は通常は無理であると考えられる。例えば水面までの距離を20m以上にとらざるを得なかった場合、データのバラツキは更に大きくなり、降雨による影響は拡大される。このような場合、単に電波の強度をあげ、アンテナを大

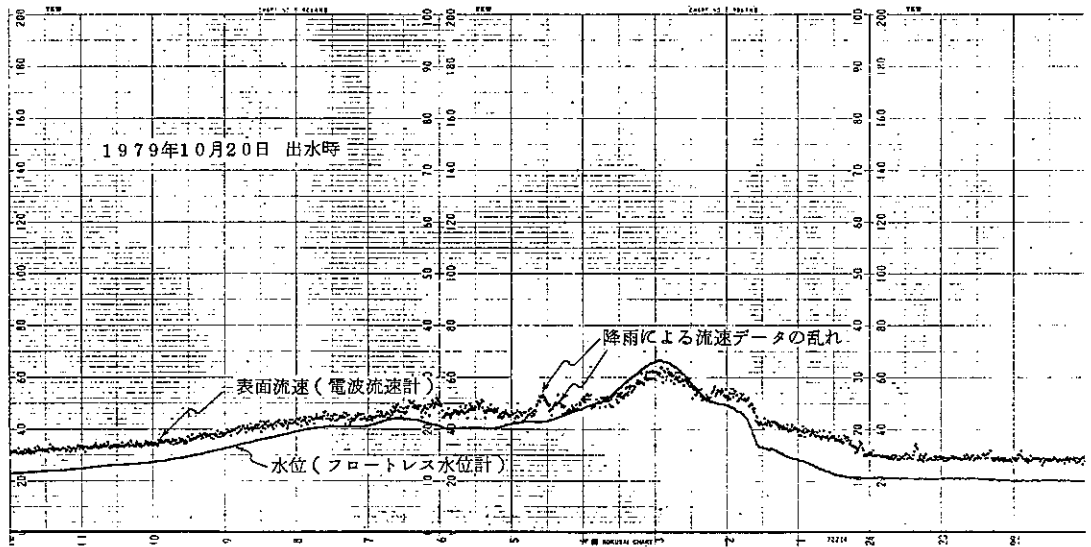


図7 流速及び水位のアナログ記録

大きくして受信する電波の範囲を拡大しても問題は恐らく解決しない、受波器の設置位置、ノイズのカット方法など種々の技術的検討が必要であろう。

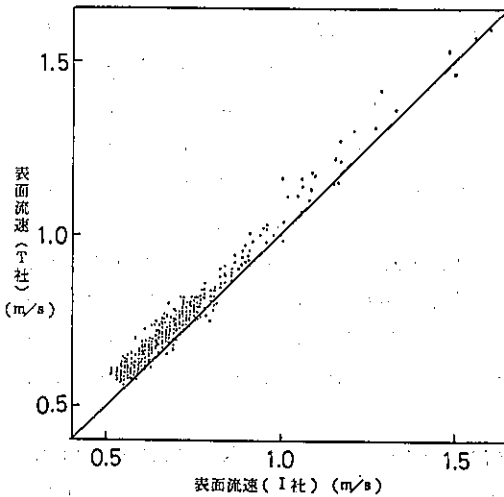


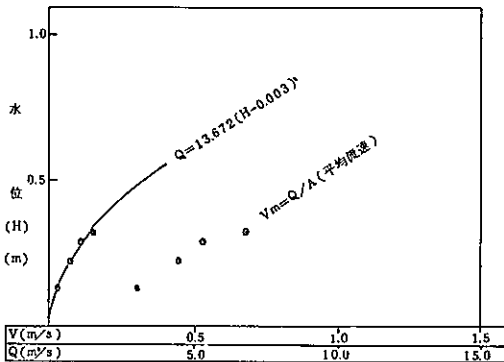
図8 電波流速計による測定値の比較

オ その他

データ収録装置、記録計等には特に問題はなかった。

(3) 水位と流量の関係

測定期間中に行われた4回の流量観測と河床断面の測定をもとにして、水位(H)と流水断面積(A)の関係、及び水位と流量(Q)、更にQとAの関係を図示すると図9が得られる。これからQとHの関係を最小2乗法で2次の回帰式として導くと  $Q = 13.672(H - 0.003)^2$  を得る。ただし、流量観測の結果が4回と少ない事、出水時のデータがほとんどない点で精密さに欠ける点がある。水位を連続測定し、上記の式を用いて流量を連続測定する事



H: 水位,  $V_m$ : 平均流速, Q: 流量, A: 流水断面積

図9 水位と実測流量及び平均流速との関係

は可能である。しかしH~Q法には一般的には前述のような問題がある、そこでH~Qの関係が実際に水位の上昇時と下降時で異なるのか、すなわちH~Q曲線がループを描くのか、ループを描くとすればそれによる誤差はどの程度か、という事が検討されなければならない。

(4) 水位と表面流速の関係

H~Q曲線がループを描くのは水位の上昇時と下降時で同一水位に対する平均流速が異なるからである。もし平均流速の測定が可能であれば、平均流速と流量の関係は一義的に定まるからH~Q法に見られるループによる誤差はなくなるであろう、しかし、平均流速を常時測定する事は困難であるからそれに代わるものとして表面流速を考える事ができる。水深方向の速度分布は水位の上昇時と下降時で変化しないと考えられるから平均流速( $V_m$ )と表面流速( $V_s$ )の比、 $V_m/V_s$ は水位のみの関数と考えられる。図10は10月20日出水時における水位と表面流速の関係を上昇時と下降時にわけて示したものである。 $V_m/V_s$ が水位のみの関数で一義的に定まるとすれば  $V_m$ と流量(Q)の関係も水位のみで定まる一義的な関数である。したがって図10における水位に対する  $V_m$ の動きは同時に流量の変化をも示している事になり、相当に大きなループを描いている事がわかる。このループによるH~Q法の誤差は出水規模に応じてさらに拡大すると予想されるから水位のみで流量を算定する事は実用上問題である。そこで  $V_m$ をとり入れた流量の測定手法が考慮されなければならない。 $V_m/V_s$ を水位のみで一義的に決定される関数であると仮定し、 $V_m/V_s = f(H)$ とする、流水断面積をAとするとAも又Hの関数である。

$Q = A \cdot V_m$  であるから  $Q = A \cdot V_s f(H) = K(H) A \cdot f(H) = K(H)$  とおくと  $Q = V_s \cdot K(H)$  となる。

$f(H)$ は前述のように同一水位に対して上昇時と下降時で変わらないHのみの関数と仮定しているので  $K(H)$ も又同様に上昇時と下降時では変化のない関数となる。すなわち表面流速と水位を常時測定する事によりループによる誤差のない流量の常時測定が可能となる。ここで注意すべき事は  $V_m/V_s$ の値が同一の水位に対して上昇時と下降時で変化しないと仮定している事である。これは図10に見られるように  $V_s$ がHに対しループを描いている事から考えて、定性的にはこの仮定は正しいと考えられるが更に検討すべき問題であろう。

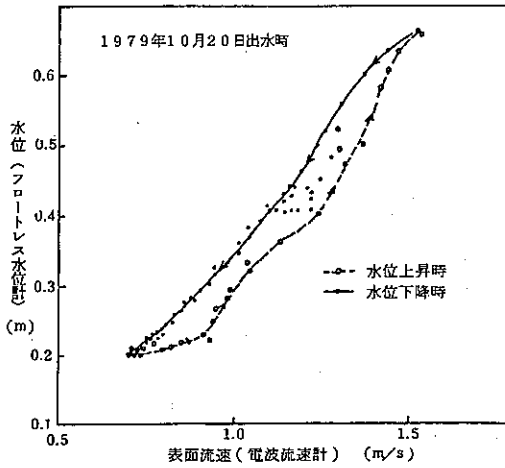


図 10 出水時における水位と表面流速の関係

### 5 まとめ

河川における汚濁負荷量を常時測定する手法を検討する目的でまず第一に河川流量の連続測定手法を検討し、そのための現地試験を行った。主要な結論は次のとおり

である。

- ① 従来の流量観測手法であるH～Q法ではループ現象のため今回のような小規模の出水でも±10～15%の誤差を生じる。
- ② ループ現象による誤差を避けるためには表面流速と水位の測定により流量を観測するのが適当と考えられる。
- ③ 表面流速の測定には電波流速計を使用するのが良いと思われるが、この流速計については更に長期にわたり、より長い測定距離での充分な実用化試験が必要である。
- ④ 水位の測定は既存の技術で充分対応できる。

以上が昭和53年度の検討結果であるが54年度以後は、電波流速計を遠距離に設置した場合の実用化試験とT O Cモニターと演算装置を組み込んだ汚濁負荷量の連続測定システムの検討、試作及び実用化テストを行う予定である。

本研究を行うにあたっては建設省土木研究所の土屋昭彦河川部長、石崎勝義氏、長谷川正氏に全面的に技術的指導をして頂いた。ここに深く感謝する。