

環境水理計測の組み立て方と留意点

Planning and Management of Field Experiments in Environmental Hydraulics

石川 忠晴

Tadaharu ISHIKAWA

1. はじめに

現地観測にもとづく研究には二つの効能がある。一つは「新しい問題の発見」を容易にすることだ。文献ばかりに埋没して研究していると、学問体系は一見精緻化するけれども、重箱の隅をつつくようなことになりがちで、面白味がなくなる。またステレオタイプの思考しかできなくなって「神学化」してしまう。一方、現地観測を続けていると、犬も歩けば棒に当たるで、何かしら新しい事柄に出会う。と同時に、社会における“自分の学問の生かし所”に気付くことも多い。そこから新しい問題を設定できる。人間が困難に直面して成長するように、学問は新しい問題に直面して発展するものである。

現地観測の第二の効能は自己を「学際化」できることだ。ファイマン物理学¹⁾の中に次のような記述がある。“If our small minds, for some convenience, divide this universe into parts — physics, biology, geology, astronomy, psychology, and so on —, remember that nature does not know it!” 環境に関する学問を行う者は、このことを肝に銘ずべきだと思う。例えば水理学の研究者(私もそうだが)は、湖の流れの研究をしているだけで「私は湖の研究をしています」などと気軽に言ってしまうが、湖の現象は水の流ればかりではない。水質現象もあれば、生物現象もあれば、地質・地形学の問題もあれば、気象学に類する問題もあれば、社会学の問題もあれば、水産やレジャーや景観の話もある。それら様々の事柄が絡み合って一つの湖が存在する。つまり環境現象の実態は常に複合的であり、それらを正しく理解するには、学際的視野が必要なのだ。現地観測をしていると、様々な現象に同時に出くわすから、「環境は学問区分と無関係に存在する」ことを嫌でもわかるようになる。このような認識こそ環境研究の第一歩である。

近年、水理学の分野でも現地観測にもとづく研究が盛んになっており、これは水理学が新たな発展段階に至る兆しであると筆者は喜んでいる。しかし中には「ただ現地で計測した」という現地観測もあるように見受けられる。現地観測には、コツというかノー・ハウというかワザというかセオリーというか、呼び方はともかくとして、一定の組み立て方がある。昔、実験作業を体系的に取り扱うための「実験計画法」という科目があった。現地観測は室内実験と違って自然条件まかせのところがあるので、実験計画法ほどきれいな体系化はできないのだが、ある程度同様の体系的思考が存在する。

本稿は、水理学の現地研究を行おうとする方達の参考に共することを目的として、現地観測の組み立て方について、筆者が体験から得たところをまとめたものである。と同時に筆者は、本稿が水環境調査を業務とする技術者の役に立つことをも願っている。業務としての現地調査は、定められた期間に定められた事項を必ず成し遂げねばならないという意味で、大学等で行われる現地研究より厳しいと言える。また、環境アセスメント法の施行に伴い、以前は建設行為の付属物であった調査業務が、それ自体として大きな社会的意味を持つようになってきた。それゆえ、この機会に、水環境に関わる現地調査業務を高度化していくことが望まれる。筆者は、業務としての現地調査の基本は現地観測の充実にあると考えている。意味のある良質のデータをいかにして得るか。そのための工夫と努力の積み重ねが優れた調査報告書を生み出す。その意味で、調査業務の発展に本稿が多少でも役立てば、幸いに思う。

2. 計測の基本

2-1 相関性の追求

現地計測を企画するに際してまず心すべきは、「知りたいこと」と「測れること」は同じでないということだ。人間は欲張りだから、あれも知りたいこれも知りたいと考える。しかし、世の中には簡単に測れないことがたくさんある。むしろ、知りたいことをそのまま測れる場合はまずないと考えた方がよい。したがって、「測れること」と「知りたいこと」をいかに結び付けるかに知恵を絞らねばならない。

例えば、寒暖計は気温を直接計測するのではなく、水銀の体積を計測している。気温の変化と水銀の体積の変化には高い“相関”があるので、水銀の体積から気温を知ることができるのである。この例からわかるように「相関性」こそ計測の基本である。そこで、いろいろな事項の相関性を普段から調べておけば、計測の可能性が広がることになる。

(例-1) 水位流量曲線(H-Qカーブ)

水理学の分野での典型例は、水位と流量の相関をもとにした流量計測であろう。厳密に言うと流量と水位は一価関係にはない。特に緩流河川のH-Q関係は、洪水の非定常性や河床形態の影響を受けることが知られている。しかしそんなことを言ってみても、データが得られなければどうにもならない。一価関係でなくともある程度の“相関”があれば“推定”できるはずである。実際、適切な観測地点(つまり両者の相関性の高い地点)を選べば、かなりの精度で流量を推定できる。

以下に示す例は、都市の小河川で実施したものである。²⁾ 写真-1に示すように、鉄製のレールを落差工上部に敷設して流速計を水平に移動させ流速横断分布を計測し、またその時の水位を河床に埋設した圧力計(写真では見えない)でモニターする。種々の水位に対しての計測結果をプロットすると、低水・平水について図-1に○で示すデータを得た。また大流量の場合については写真-2に示す水理模型実験を行い、△で示すデータを得た。両方のデータを近似するようにH-Qカーブを求めれば、以後は、落差工上部に埋設した圧力計の出力から流量の時系列を求められる。

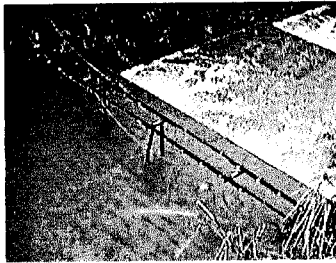


写真-1 H-Q関係の現地観測

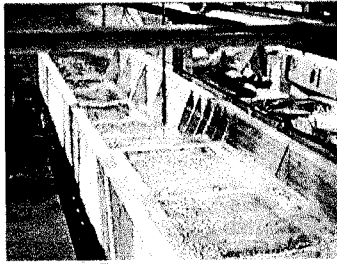


写真-2 H-Q関係の模型実験

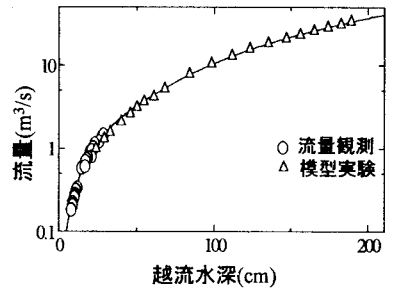


図-1 H-Qカーブの例

(例-2) 音で雨を計測する

もうひとつの例を紹介しよう。トタン屋根や窓ガラスにあたる雨の音は、降雨強度や雨粒の大小によって微妙に変化する。つまり降雨特性と雨音には相関がある。したがって雨音の解析から降雨特性を推定できる可能性がある。図-2は、金属缶の中にマイクノズルを入れ、缶面で発する雨音を記録してスペクトル解析した結果である。信号の塊の一つ一つが個々の雨粒に対応している。したがって、音響信号の強弱から雨粒一つ一つの大きさを推定できるであろう。また、それを累積すれば短時間降雨強度を推定できると考えられる。

そこで雨音と雨滴径の関係を種々の基礎実験から定式化し、図-3のような計測装置(音響雨量計)³⁾を製作したところ、図-4に示す結果を得た。上の図の実線が雨音から推定された降雨強度、棒グラフは検証用に別途製作した雨量計の出力で、両者はよく一致している。下の図は各時刻の代表雨滴径の推定値である。このように、ものごとの相関性を追求することにより、計測の可能性は飛躍的に増大するのである。

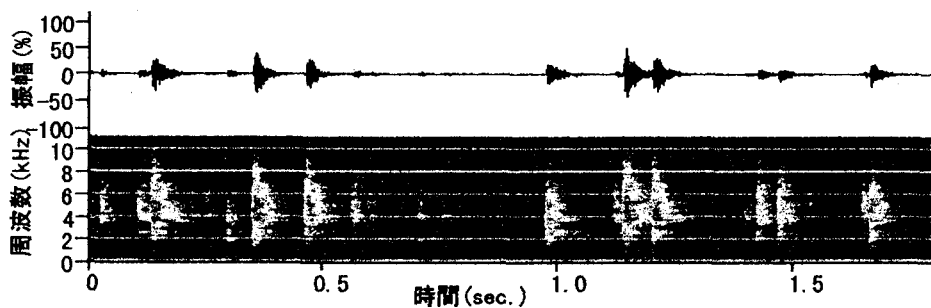


図-2 雨音のスペクトル

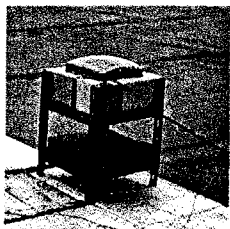


図-3(a) 音響雨量計センサー

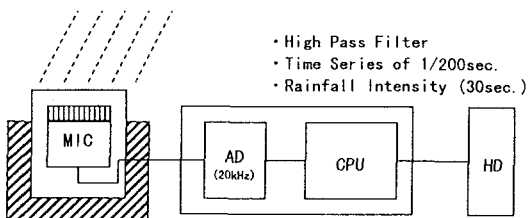


図-3(b) 音響雨量計のシステム図

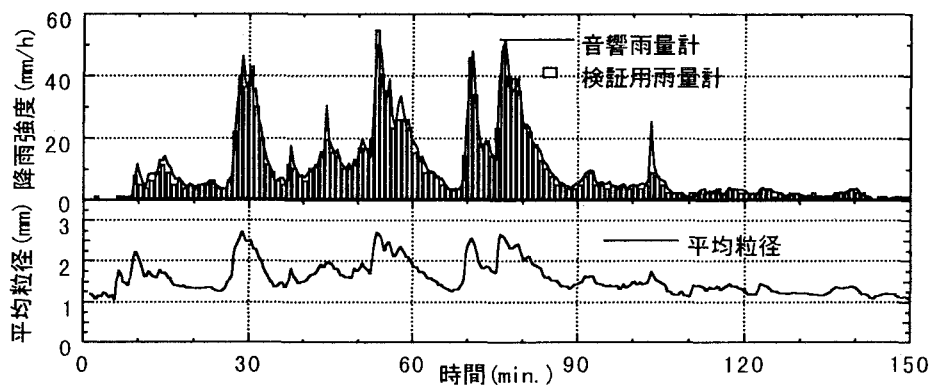


図-4 音響雨量計による降雨観測結果

2-2 化学分析と物理計測

水環境計測の内容は、化学分析と物理計測に大別できる。化学分析は物質の組成や含有量を計測するもので、通常は、採取した検体を実験室に持ち帰り、然るべき分析装置にかけて計測する。一方物理計測は、光とか音波とか力などの含む情報を電気信号に変換して(何かを)計測するもので、通常は、その場で結果を得ることができる。したがって、両者には「オンサイト」か「オフサイト」かという違いがある。このことは自然現象を観測する上で決定的な差となる場合が多い。

例えば、湖などで、ある項目を深さ方向に順次計測する場合を考えよう。最初は5m間隔で計測を開始し、ある深度で値が急変したとする。その付近では測定間隔を1m程度に縮めて計測した方がよいわけで、オンサイトの計測であれば当然そうする。しかしオフサイトの計測だと、一旦実験室に戻らなければこのようなことはわからない。次の日になって気付いてやりなおそうと思っても、現象は変化してしまっていることもあり、極端な場合、千載一遇のチャンスを逃すこともある。したがって、特に動的な自然現象を観測する場合には、できるだけオンサイトの計測手法を用意した方がよいことになる。

そこで、前節で述べた「相関性の追求」において、化学分析を物理計測に置き換えることを考えるのがよい。

(例-3) *Chl-a*をオンサイトで計測する

写真-3は、光を水中に発射して戻ってくる光量から *Chl-a* を計測する市販の機器である。少し細かく言うと、波長400～480nmの光を水中に発射し、励起されたクロロフィル色素が発する波長630～720nmの蛍光強度を計測する。その出力は蛍光物質であるウラニンで検定されており $\mu\text{g}\cdot\text{l}^{-1}$ で表示される。水圧計も内蔵されているので、センサーユニットを沈めながらデータをパソコンに取り込んでプロットすることにより、鉛直方向の分布をその場で知ることができる。ただし、ここで得られる値は「ウラニン換算値」であり、*Chl-a* そのものではない。両者の関係は植物プランクトンの種類や活性度により異なるので、貯水池ごと、あるいは季節ごとにキャリブレーションする必要がある。⁴⁾

図-5は、宮城県の七ヶ宿貯水池で *Asterionella* が繁殖している時のキャリブレーションデータの一例で、実線が上述の計測器の出力、●は採水をアセトン抽出吸光度法で分析した結果を示している。また図-6は、他のデータも加えて両者の相関を調べた結果である。2割程度の誤差はあるが、オンサイトでしかも高速で計測できるメリットの方が遥かに大きい。

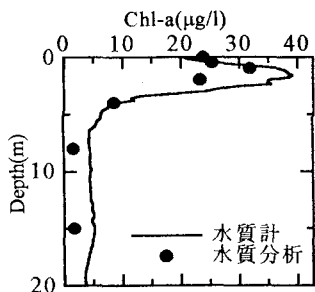


図-5 *Chl-a* の計測例

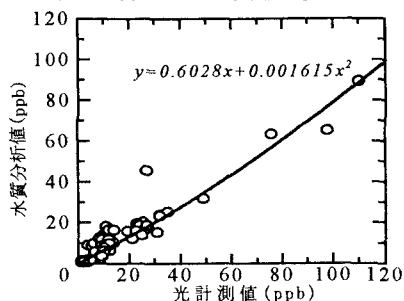


図-6 光計測と化学分析の相関

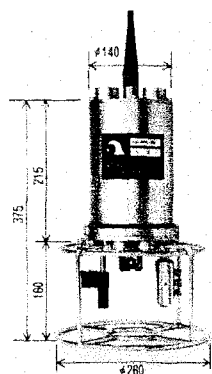


写真-3 *Chl-a* 計測装置

同貯水池で一ヶ月にわたって連続観測した結果を図-7に示す。水温と気象データも一緒に示しているが、*Chl-a* の空間分布の変動がこれらの影響を強く受けていることが明瞭に現れている。このような計測データを従来の「採水→分析」という手法で得ることは到底不可能である。

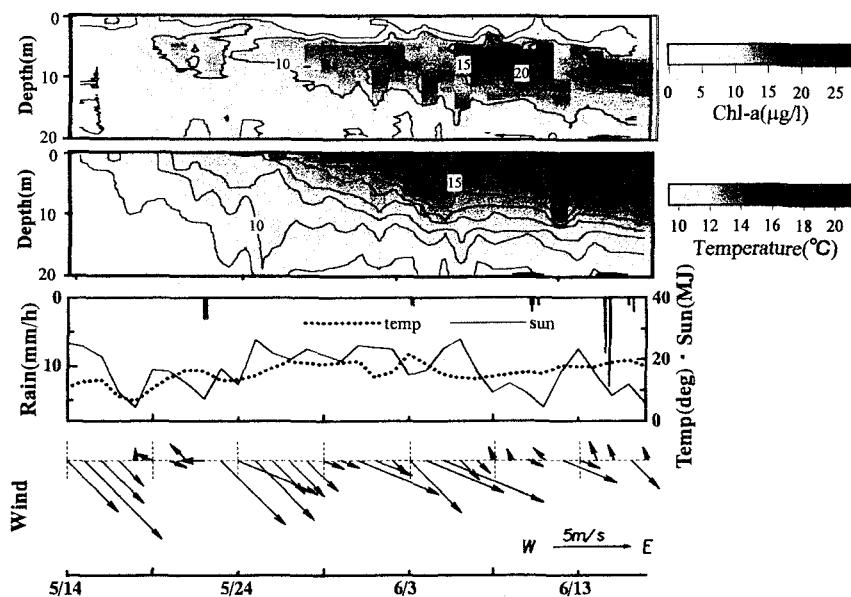


図-7 *Asterionella*の発達と減衰(七ヶ宿貯水池)

（例－４） 濁度計測で貯水池へ流入するリン量を知る

化学分析を物理計測に置き換えるもう一つの例として、河川から貯水池に流入する懸濁態リン(PP)の計測を示す。貯水池の富栄養化は窒素やリンなどの栄養塩の流入・蓄積によっているが、リンの総量のうち洪水時の PP の占める割合が大きい。そこで流入河川水が含む PP の時系列を知りたくなる。しかし観測者を常時張り付けて採水分析を繰り返すことはできない。また自動水質監視装置を設置するには途方もない費用がかかる。

そこで次のように考える。PP 濃度が高くなる時には SS 濃度も高くなるから濁度も高くなる。したがって、これらの相関関係を明らかにしておけば、濁度計測から PP 濃度の時系列を求められる可能性がある。

写真-4は、それらの相関関係を調べるために、出水時に貯水池直上流の橋からバケツで採水しているところである。採水の濁度をその場で計測した後、検体を冷蔵して実験室に持ち帰り、SS と PP を分析する。図-8に観測結果の一例を示す。（図中の濁度は、50 μ カオリンの SS に換算した値となっている。）また、いくつかの出水で得られた結果をまとめて図-9に示す。SS も PP も濁度と高い相関関係のあることがわかる。このような相関関係を予め作成しておけば、以降は自記式濁度計の記録から SS と PP の時系列を推定できるわけである。⁵⁾



写真-4 洪水時の採水

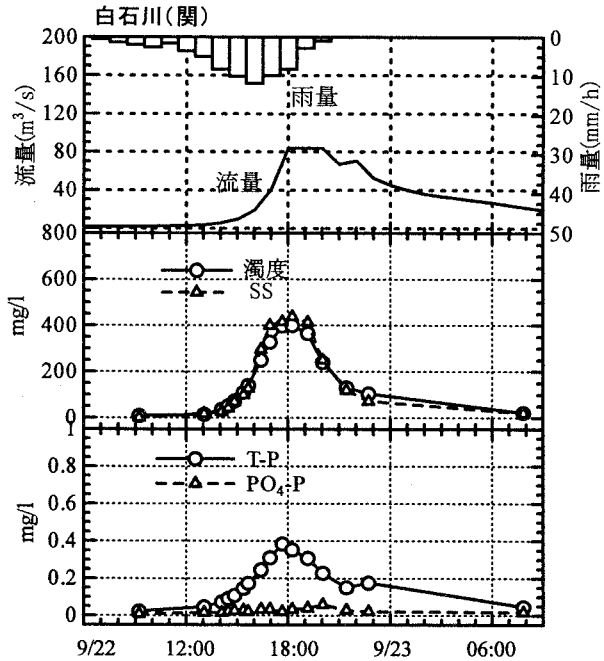


図-8 洪水採水分析結果の例

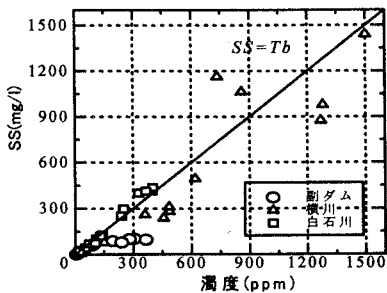


図-9(a) 濁度とSSの相関

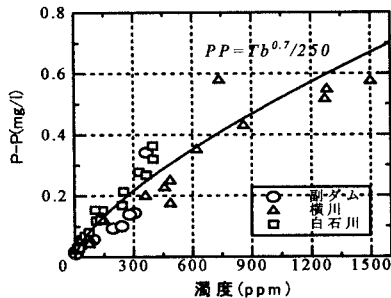


図-9(b) 濁度とPPの相関

ところで、このような相関関係は実は河川ごとに異なる。一般に濁度は土粒子の色や大きさの影響を受けるので、厳密に言えば、濁度がSSやPPと一価関係を持つことはない。しかし、“ある特定の流域”を調査する場合には、地質条件などが変わらないから、ある程度の相関関係を期待できる。もちろん、その推定値は図-7に現れている程度のバラツキないし誤差を含んでいるが、なにもわからないより遥かによいであろう。

3. 現地観測の組み立て方

3-1 モニタリング観測と集中観測

環境現象は時間的・空間的に変動する。また様々の因子が絡み合って現象全体を構成していることが多い。それゆえ、その全貌を詳細に把握するには途方もない労力と時間と費用がかかり、理想的（往々にして人間の勝手な夢想だが）な現地観測は不可能と考えた方がよい。そこで、現地観測の作業を組み立てるにあたり、観測のスタイルを二つに大別する。「モニタリング観測」と「集中観測」である。

モニタリング観測とは、ある地点のある項目の時間的変動を連続的に観測するもので、通常は自動計測装置を常設して行う。集中観測では、対象とする現象が特に顕著な時期に、多数の地点において多数の項目を計測する。イメージ的には、図-10に示すように、モニタリング観測を横糸、集中観測を縦糸として時空間をカバーし、運動の全体を推定することになる。

3-2 モニタリング観測

モニタリング観測では、ある地点のある項目の時間変動を常設の機器で連続的に計測する。普通は自動計測だが、データ回収とメンテナンスは人力によることも多い。モニタリング観測の“命”はデータの時間的連続性である。そのため、物理計測が主体で、壊れにくい計器を選ぶことが必要となる。また、観測地点は、対象とする現象の特性を知る上で有効な場所であると同時に、安全性の高い場所でなければならない。対象項目としては、水温、雨量、水位、濁度、流速などが考えられる。

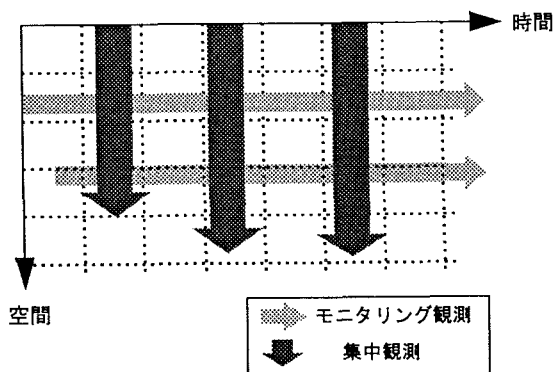


図-10 モニタリング観測と集中観測

（例-5）水温成層のモニタリング

写真-5は筆者が愛用している自記式水温計で、小型軽量のうえメモリー容量も大きく、計測時間間隔が1時間の場合でも1年近くにわたって連続計測可能である。1本1本独立にも使えるし、数珠つなぎにしてサーミスターチェーンとして使うこともできる。図-11は、サーミスターチェーン（2 m おき）として使用して貯水池水温分布を長期間計測した結果（計測時間間隔は10分）を、空間内挿して2℃ごとのコンターマップにしたものである。貯水池に生じる現象は（水理現象だけでなく水質や生物現象も）水温成層の影響を強くうけるので、どのような研究を行うにしても水温状態をモニタリングする必要がある。この図からは、水温成層の季節変化だけでなく、嵐による急激な鉛直混合や静振の様子まで見て取れる。

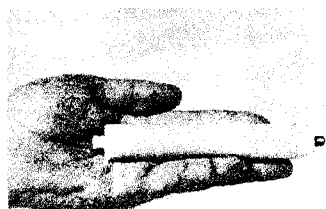


写真-5 自記式水温計

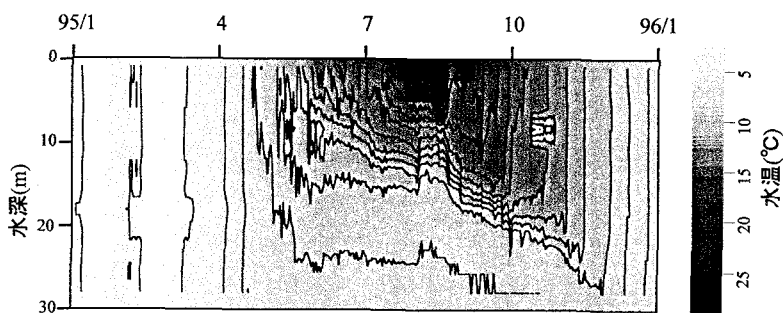


図-11 貯水池水温の年周変動

(例-6) 濁度のモニタリング

写真-6は自記式濁度計である。こちらは光を発するためにはバッテリーが大型になり、水温計ほど手軽には扱えないが、1時間ごとの計測で約160日の連続計測が可能である。ただし、発光・受光部が汚れると誤差を生じる。特に夏期には藻が付着しやすいので、10日に1回程度の割で”掃除”しなければならない。

図-12は、貯水池に流入する河川水の濁度を計測した例であり、出水時の濁度変化の波形が捉えられている。2-2の後段で述べたように、濁度をモニタリングすることによりSSやPPも推定できるので、このような計測の意義は大きい。

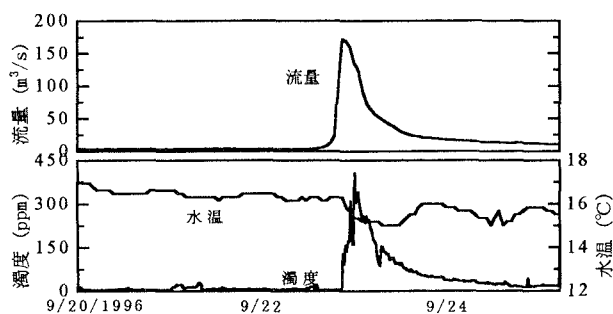


図-12 濁度モニタリングの例

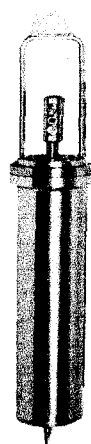


写真-6 自記式濁度計

(例-7) 地下水のモニタリング

写真-7と図-13は、横浜市内の関東ローム台地における地下水モニタリング観測の様子を示している。²⁾ 台地に降った雨はローム層にしみこんだ後、台地を開析してできた谷地の段丘崖に向かって流動し、崖下に湧水としてしみ出す。この現象を研究するにあたり、崖線にほぼ直交する測線上の井戸に水圧計を設置させていただき、地下水位をモニタリングしている。また崖下にある横井戸からの湧水を量水堰に導き、湧水量をモニタリングしている。図-14は、これらから得られた時系列データの一部である。

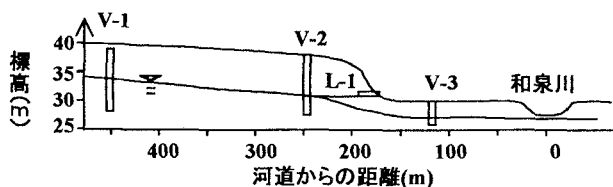


図-13 地下水モニタリング概念図

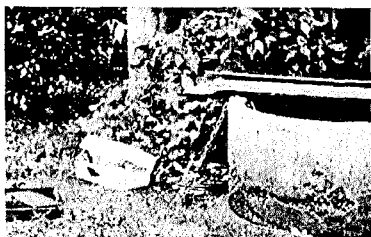


写真-7(a) 地下水位モニタリング

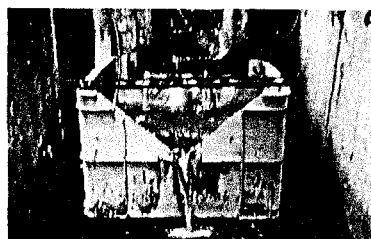


写真-7(b) 湧水量モニタリング

(例-8) 流速分布のモニタリング

写真-8に、筆者らが使用している超音波ドップラー流速計(ADCP: Acoustic Doppler Current Profiler)の外観を示す。この装置は、水中に超音波パルスを発射し、反射波の到達時間と周波数のズレから、流速ベクトルの鉛直プロファイル短時間を求めるものである。従来よく使われた電磁流速計やプロペラ式流速計が一つの深度の計測しかできないのに対し、ADCPは全層のプロファイルが一挙に求められる点に特長がある。

以下に示すデータは、浅い湖沼の湖底にADCPを設置して、水温成層の形成と流速分布の関係を連続的に観測した結果である。写真-9は、ADCPを橋梁上から湖底に設置しようとしているところである。コントロール用のパソコンは橋脚と橋桁の間の空間に置き、データはパソコンを経由して光ディスクに貯蔵される。3週間に1回の頻度でデータ回収とメンテを行った。設置場所の水深は6m、鉛直セルサイズは50cm、セル数は10とした。また計測時間間隔は5secで、これを10minごとに平均して1データとした。

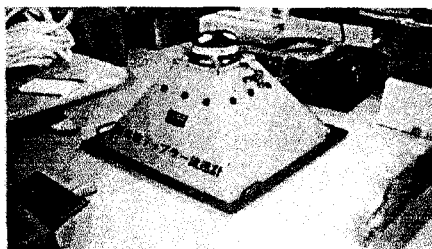


写真-8 設置型ADCP

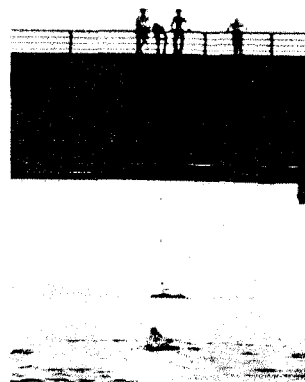


写真-9 ADCP設置の様子

図-15は、3日間における水温と流向・流速の時間変化を示している。⁶⁾ 毎日昼頃に表層水温が上昇して水温躍層が形成され、午後には躍層が徐々に下方へ移動し、夜間から翌日の午前中までは一様な水温になっている。流向・流速は、この水温躍層に対応した変化を示している。すなわち、水温躍層が発達している時間帯には、躍層より上部で風方向の流れが、躍層より下部で逆方向の流れが発生する。また水温躍層が見られない時間帯には、流れは微弱になる。

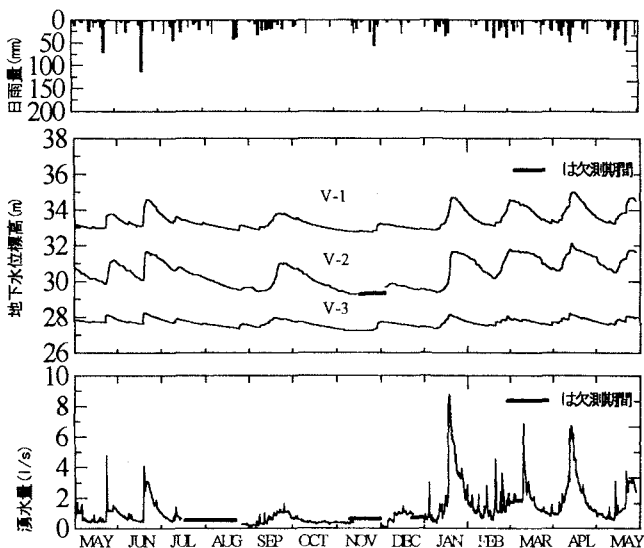


図-14 地下水モニタリングデータの例

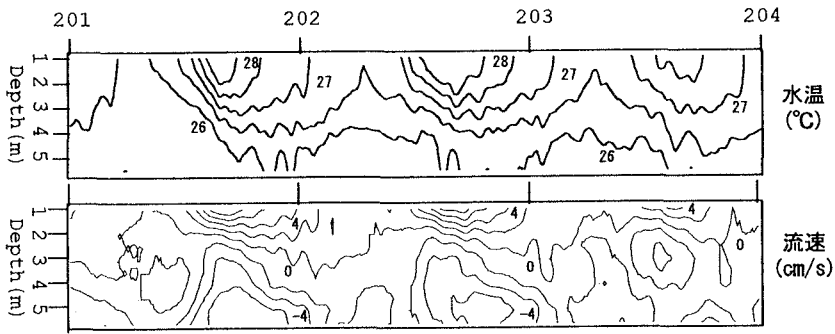


図-15 水温・流速の時間変化

3-3 集中観測

集中観測では、対象とする現象が特に顕著な時期(またはそうなると予想される時期)に、多数の地点において多数の項目のデータを集中的に取得する。人員や機材を一挙に投入するので、うまくいけば万々歳だが、失敗すると痛手が大きい。したがって、“軍隊の作戦”のように、ある程度の現象予測のもとに周到な準備と演習が必要とされる。一般には“段取り”が予め定められ、それに従って観測員が行動する。その意味では実験に近いところがあり、英語では *Field Experiment* と言われることもある。しかし自然現象は必ずしも予測通りにいかないから(だからこそ観測が必要なのだが)、現場の人間が臨機応変に判断しながら有効にデータ収集を進める必要がある。このため自動計測ではなくマニュアル操作で計測することが多い。

(例-9) 貯水池での濁水流動観測

写真-10は、河川から貯水池に流入した濁水の挙動を観測しようとしているところである。(筆者の研究室では博士課程学生に操船免許を取らせ、自分達で観測できるようにしている。) 掲載している機器は ADCP、音響測深器、多項目水質計である。

図-16に計測結果の一例を示す。⁷⁾ 上段は最深部に沿って音響探査した結果で、右側がダム、左側が河川流入部になっている。途中で湖底地形が盛り上がっている所は旧河道の狭窄部に当たっており、渚筋があまりに狭いため、その直上を操船するのが難しく、旧山裾の上を通過してしまった結果である。さ

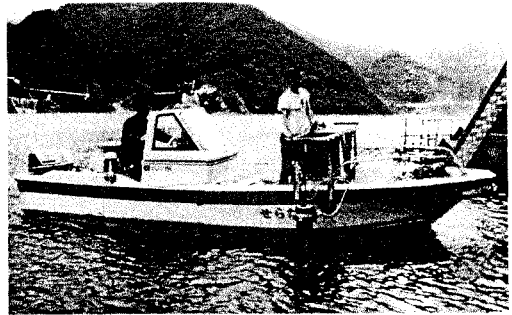


写真-10 貯水池観測の様子

てこの図には、湖底地形に加えて、水深12m付近と18m付近に薄い暗線が見える。後のデータからわかるように、これが濁水層の輪郭を示している。音響探査によって濁水の輪郭が見える理由は今のところ定かでないが、筆者は次のように推測している。すなわち、濁水が含んでいる濁質は球形ではなく鱗片上をしているから、せん断層内では濁質粒子の向きがせん断面に揃うためにエコーが強まるのではないかと考えられる。中段の図は水質計を①～④の地点で降ろして得られた濁度分布で、上段の音響データとよく対応していることがわかる。これによれば、①地点では湖底に沿った“傾斜ブルーム”として流下し、②の地点を過ぎたあたりで湖底から離れ、以降は水深16m付近を中心として水平に貫入している。下段は ADCP で測定した流速分布で、濁水に対応する層が左から右に向かって流れている様子がわかる。

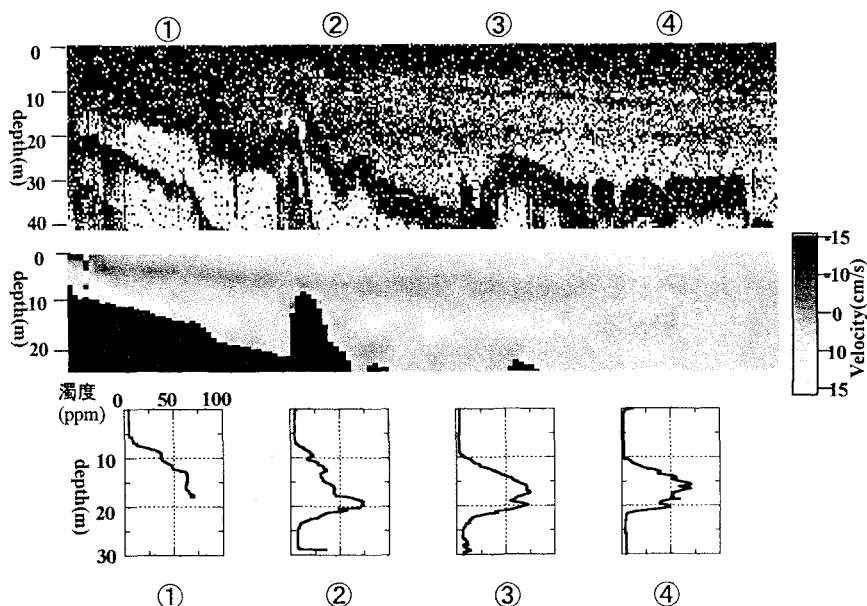


図-16 貯水池に侵入する濁質の観測例
(上段:音響データ、中段:ADCPデータ、下段:濁度鉛直分布)

(例-10) 貯水池堆積物の調査

このようにして貯水池に侵入した濁質の大部分は2週間ぐらいのうちに湖底に堆積する。その堆積状況を調べるために、出水の少し前に沈降物採取ビンを貯水池の各所に設置しておき、出水の2週間後に引き上げて、堆積量、粒度組成、リン含有量などを分析している。また、湖底堆積物をコアサンプラーで採取し、貯水池が完成してからの全堆積量と一洪水堆積量を比較している。写真-11、12に沈降物採取ビンとコアサンプラーを示す。また図-17に沈降物採取ビンによる一洪水での堆積量分布を、図-18にコアサンプラーによる貯水池完成からの堆積量分布を示す。⁶⁾ 図-17では、濁水が浸入する滞筋沿いの堆積量が多く、また流下距離にしたがって減少している様子がわかる。一方図-18に示した堆積量は、上流の浅い部分で少なくなっており、非洪水時の巻き上げによって堆積物が移動していることがわかる。



写真-11 沈降物採取ビン

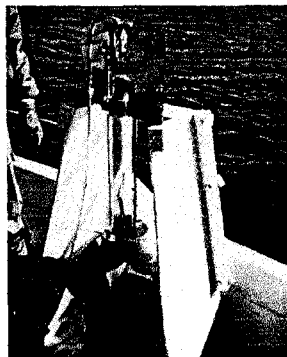


写真-12 底質コアサンプラー

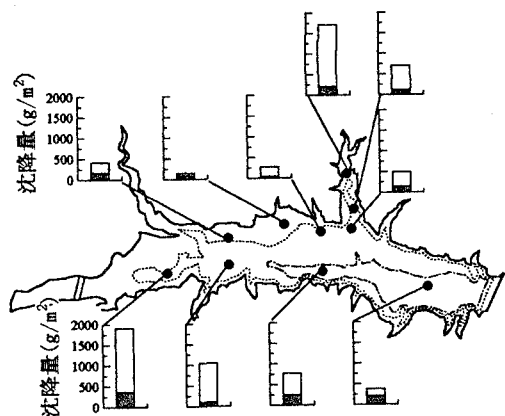


図-17 一洪水での堆積分布

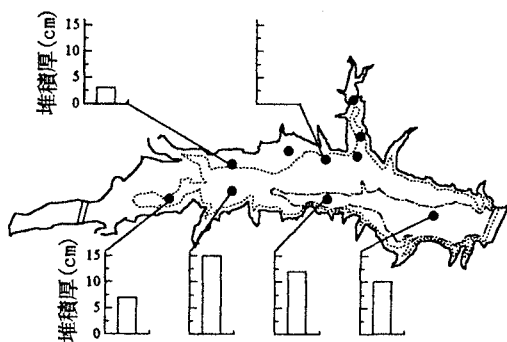


図-18 貯水池完成からの堆積厚さ

(例-11) 河川感潮域での貧酸素水塊の流動の観測

もう一つ別の種類の観測例を示そう。潮止め堰下流部では淡塩二層状態が形成されるので鉛直混合が抑制されやすく、また堆積した泥により酸素消費が進みやすい。このため特に堰直下流の底層塩水が貧酸素化することがある。以下のデータは、利根川河口堰下流部の18 kmの区間において集中観測した結果の一部で、⁸⁾ 使用機材は例-9と同じ3点セット(ADCP、音響測深器、多項目水質計)である。図-19に示すように、滞筋に沿って設置した17の観測地点において、図-20に示す時間帯に、多項目水質計で塩分と溶存酸素の鉛直分布を計測した。続いて、ADCPを船に取り付け、図-20に示す時間帯に、滞筋を遡りながら流速分布を計測した。

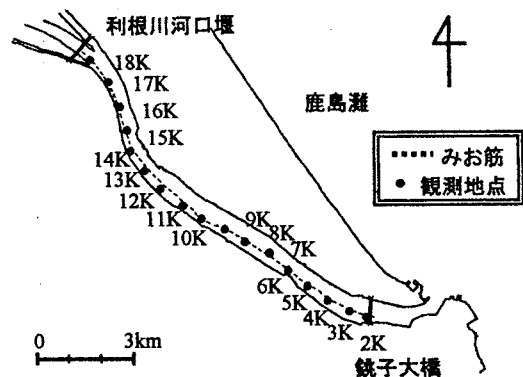


図-19 利根川感潮域観測地点

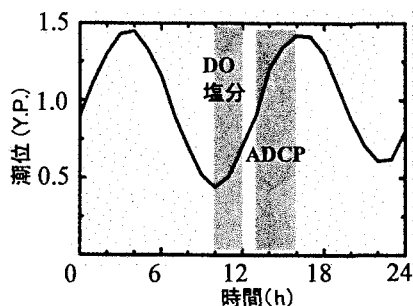


図-20 観測時間帯と潮位変動

観測結果の一例を図-21に示す。図の上段は塩分の空間分布で、横軸は河道からの距離、縦軸が水深、濃淡が塩分濃度を示している。塩水楔が河口堰に達していること、塩水楔先端は純海水と淡水の中間の密度になっていることがわかる。中段は溶存酸素の空間分布で、図の見方は塩分の場合と同様である。塩水楔の先端付近が完全に嫌気化していること、その一部が淡塩境界面に沿って下流に流出していることがわかる。

図の下段は、ADCPによって捉えられた流向分布である。上げ潮時に計測したので下流部は逆流になっている。また河口堰からの放流によって上流部は順流になっている。この図より、嫌気状態になっている塩水楔先端の辺りが複雑な流況を呈していることがわかる。すなわち、上層と底層は逆流になっているが、中間層のみが順流である。この様子は、溶存酸素の図(中段)に現れている中間層に沿った流出に関するものと考えられる。おそらく、上げ潮によって流入したフレッシュな海水が中間密度の水塊を押し上げるためであると思われる。

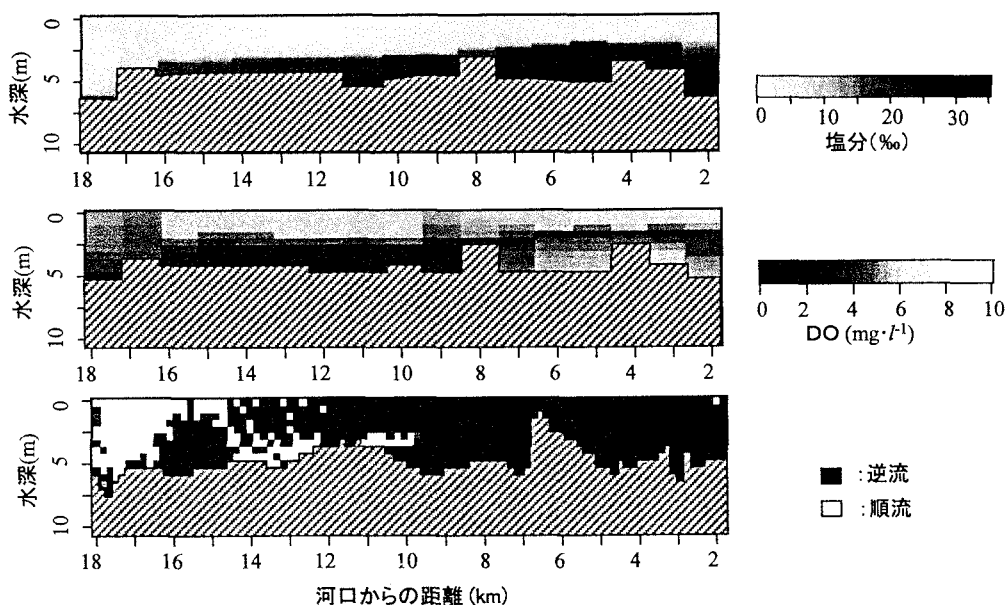


図-21 観測結果(上段:塩分、中段:DO、下段:流向)

3-4 モニタリングデータと集中観測データの照合

さて、図-10に示したように、モニタリングデータと集中観測データは、時空間上で縦糸と横糸を構成するもので、両者を有機的に組み合わせて環境現象の全体像を探ることになる。

例-9で述べた洪水は、例-5と例-6のモニタリングデータにも捉えられている。両者の関係は、例えば次のように考察される。……………図-12によればこの時の洪水の水温は15~16℃程度である。一方、図-11の水温データで同温度の水深は16m付近であり、集中観測で観測された濁水浸入深度と概ね一致する。しかし、より子細に見ると、図-11において出水後に等水温線の間隔が広がっているのは16℃~18℃の間であるから、濁水の平均的な水温は流入水の水温より若干高い。これは流入部で表層水を連行した結果と考えられる。実際、図-12に示されている流入濁度の平均値は貯水池内で計測された値より大きい。それでは濁度の減少率と水温の上昇率から推定される連行量は一致するであろうか？。また図-16の下段に示した水質計のデータによれば侵入濁水は二段に分かれているように見えるが、これは図-12のモニタリング時系列に現れている変動とどのように関係するのであろうか？。また、仮に流入水温が異なり、濁水の浸入深度が異なった場合、図-17の堆積範囲はどのように変化するのであろうか？。……………という具合である。要するに、集中観測は“現象のあるフェイズ”を捉えているに過ぎないから、その結果から普遍的理解を得るためには、モニタリングデータとの関連を考察することが不可欠なのである。そうでなければ、この場合はこうだった、という単なる事例報告に終わってしまう恐れがある。

4. 数値シミュレーションの意義（結語にかえて）

環境現象は時間的にも空間的にも巨大なものであるから、実際に観測できるのはほんの一部でしかない。つまり、現地観測から得られる情報は常に断片的であり、現象全体をそのみから推測するのは「群盲、象をなでる」ようなものであって、相当のイマジネーションが必要とされる。そのイマジネーションをサポートするのが数値シミュレーションである。

数値シミュレーションというと“予測”や“評価”のためにやるものだと考えている人が多いが、数値シミュレーションの最大の意義は、環境現象の因果連鎖を適切に把握するための手段としてである。すなわち、あるメカニズムを想定して数式を設定しコンピュータをガラガラまわしたところ、現地観測で得られた断片的なデータを矛盾無く説明できたとすれば、自分が考えた現象の理解が適切であった（または適切である可能性がある）と言える。その結果として、現地観測では捉えられない部分について、数値シミュレーションで推測することが可能となる。またシミュレーション結果の具合によっては「この場所でこの項目を測っておけば面白い変化が見られるはずだ」というように、次の現地観測のアイデアが生まれることもある。したがって、現地観測と数値シミュレーションをセットとして考えると、環境現象を効率的に解明できる可能性が高まる。

一般に、推論のプロセスは「帰納的」と「演繹的」に大別されるが、これを環境現象の理解に対して当てはめると次のようになるであろう。前者は、観測データを並べてみて「このように運動したのであれば、多分このようなメカニズムが働いているのではないか」と推論することに対応する。後者は「仮にこのようなメカニズムが働いているのであれば、このように運動するはずだ」と推論することに対応する。つまり、現地観測を中心にした調査研究は帰納的推論であり、数値シミュレーションを中心にした調査研究は演繹的推論である。帰納的推論と演繹的推論を反復することにより、確度の高い推論結果を得られるのである。

数値シミュレーションについては、中辻先生が詳述される予定であるので、ここでバトンタッチする。なお、講演時には、筆者も若干の計算事例を示す予定でいる。

謝 辞

本稿に例示した現地観測結果は、筆者の研究室の学生諸君の努力の賜物である。特に、横山勝英君(D3)、入江光輝君(D2)、鈴木伴征君(D1)、梅田信君(D1)、鶴田泰士君(D1)は、現地観測のハウツーを筆者とともに考え実現してくれた。また現地観測の実施にあたっては、建設省東北地方建設局、同関東地方建設局及び横浜市の助力をいただいた。記して謝意を表する。

引用文献

- 1) Feynman, R. P., Leighton R. B. and Sands M.: The Feynman Lectures on Physics, Addison-Wesley, Publishing Company, Vol. 1, p. 3-10.
- 2) 入江光輝、村田大介、東海林光、石川忠晴：和泉川段丘崖下横井戸の湧水に関する現地観測、東工大土木工学科研究報告、No. 56、pp. 39-44、1997。
- 3) 石川忠晴、林尚志、鶴田泰士：雨滴音と雨粒諸元の関係に関する可視化実験、可視化情報、Vol. 18、No. 69、pp. 45-52、1998。
- 4) 横山勝英、石川忠晴、正岡孝治、植木洋：七ヶ宿貯水池における春期フラクタル・カームの時空間分布特性、水環境学会誌、Vol. 21、No. 1、pp. 23-28、1998。
- 5) 梅田信、横山勝英、石川忠晴：七ヶ宿貯水池におけるウォッシュロードの流入・流動・堆積過程に関する観測と考察、水工学論文集、Vol. 41、pp. 777-782、1997。
- 6) 銭新、石川忠晴、西部隆宏：霞ヶ浦高浜入りににおける日成層形成時の湾水交換の数値シミュレーション、海岸工学論文集、Vol. 44、pp. 1051-1055、1997。
- 7) 横山勝英、石川忠晴：貯水池に侵入する濁水流の可視化計測、可視化情報、Vol. 16、Suppl.、No. 1、pp. 139-142、1997。
- 8) 鈴木伴征、若岡圭子、石川忠晴：利根川河口堰下流部における嫌気水塊の運動について、水工学論文集、Vol. 42、pp. 769-774、1998。

- 9) 長尾正之、石川忠晴、長島伸介：小川原湖に発生する傾斜ブルームの現地観測と連行係数の推算、土木学会論文集、No. 579/Ⅱ-41、pp. 105-114、1997。
- 10) 入江光輝、若岡圭子、小澤啓明、石川忠晴：洪水採水用簡易採水装置の試作とテスト、水工学論文集、Vol. 40、p. 1149-1152、1996。
- 11) 鈴木伴征、鶴田泰士、石川忠晴：河川・湖沼等における DO 空間分布の高速計測、水環境学会誌、Vol. 21、No. 7、1998（印刷中）。

付録. 計測方法の工夫

昔は、良い計測をするには研究者自身が計測器を開発しなければならなかった。このことは(楽しみでもあるが)現地研究者の大きな負担になっていた。ところが近年は、使い勝手の良い機器が比較的安価に(といっても結構高いが)市販されており、現地観測が盛んになる一因となっている。

しかし、実際にやってみると、そう簡単でないことがわかる。いくら良い計測器を持っていたとしても、計測のための足場がしっかりしていなければ良いデータは取れないし、いくら良い分析器を持っていたとしても、適切な時期に適切な場所でサンプリングできなければどうにもならない。また、計測器が進歩したとはいっても、研究対象や現地の状況によっては不満足な場合もある。したがって、研究者自身が計測方法を工夫する必要は依然として存在する。そのような工夫の例を以下に示す。例-12と例-13は「観測用器具」の工夫であり、例-14は「計測器の使い方」の工夫である。いずれもささやかなアイデアだが、“ネジ1本のあるなし”が成功・不成功を分けることもある現地観測では、ちょっとしたアイデアが案外貴重なのである。

(例-12) 湖の底層の流れを計測するための架台

青森県の小川原湖という汽水湖では、排水河川を遡上した塩水が、湖内斜面上で傾斜ブルームを形成する。自然界に発生する傾斜ブルームとしては小型の方だが、実験室のそれよりは遥かに大きいので、高レイノルズ数における連行則を調べるのには格好の題材である。

この傾斜ブルームは、水深十数mの湖底斜面に沿って、厚さ1m程度、流速数十cmで流れる。当初は電磁流速計を船から釣り下げて流速分布を計測しようとした。しかし流速が比較的大きいので測定器が下流側に引っ張られるため、測定器の位置と姿勢が不安定でデータがばらついた。

ADCPを使うことも考えたが、船に取り付けて下向きに発信する場合は、1m近いブラインド・ゾーンが湖底付近に生じるため、計測できない。またADCPを湖底に設置すると、水流厚さが1m程度しかないので、送受波器が水流を乱してしまい、やはり計測できない。

そこで学生達が図-22に示す仕掛けを考え出した。⁹⁾ 湖底に設置した鉄製の架台(①)から水中ブイ(②)を付けた電磁流速計(③)を直立させる。流速計の下端に取り付けたワイヤー(④)を架台の滑車(⑤)を経由して上部で引っ張ると、流速計は下方に移動する。ワイヤーには等間隔で結び目が作られており、片側のみに変位するバネ付きストッパー(⑥)に引っかかるようにしてある。予めワイヤーを3mほど伸ばしてから、架台を湖底に降ろし、ワイヤーを船上から引くことにより流速計を徐々に下降させる。測定予定の深度でワイヤーを緩めるとストッパーが作用して流速計は静止する。なお流速計には圧力センサーが付いているので、深度を確認できる。図-23の左側に多項目水質計で捉えた水温・塩分分布、右側に上記の装置で捉えた流速分布の例を示す。塩水層厚に比べて流動層厚が大きくなっているが、これは室内実験でも観察される傾斜ブルームの特長である。

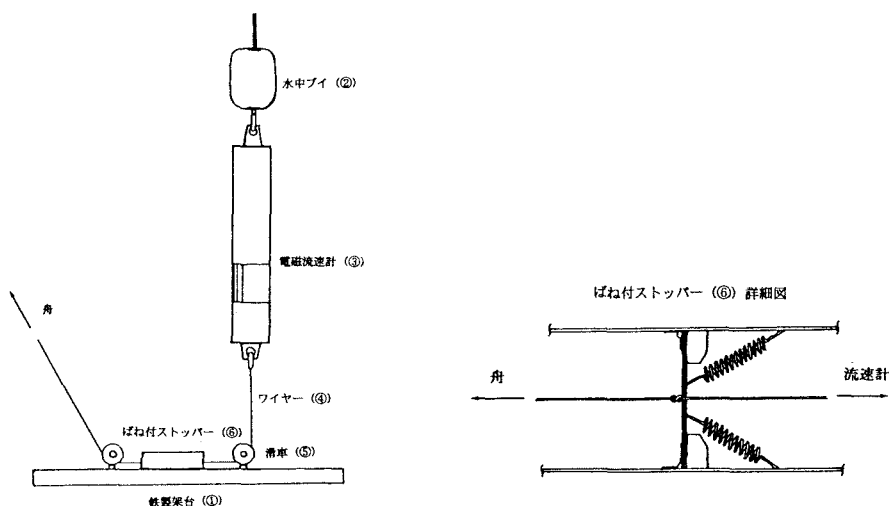


図-22 湖底付近の流れを計測するための流速計架台

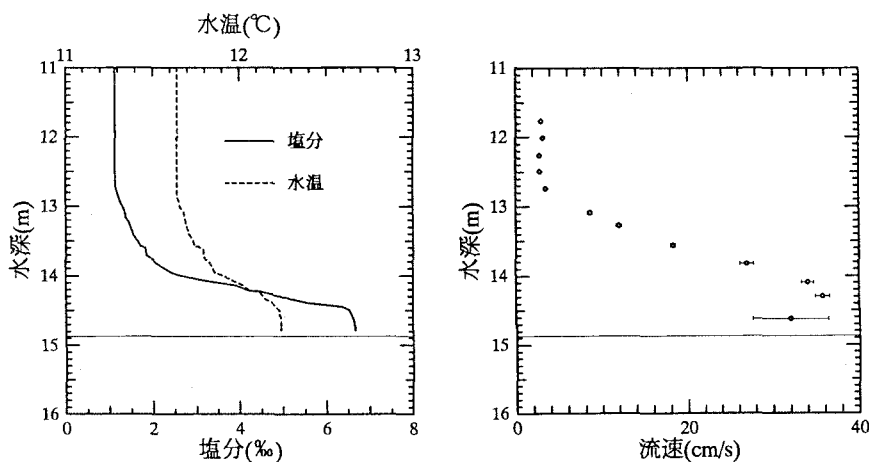


図-23 観測結果(左:塩分と水温、右:流速)

(例-13) 都市河川のファーストフラッシュを捉える採水器

都市河川の汚濁負荷は出水初期に排出される分が多い。しかし出水は不定期であるから、人間が採水を行うとすれば空振りを覚悟で待機していないと適切な時間に採水できない。一方、機械による自動採水は、高価で且つスペースや電源の問題があるので、限られた地点でしか実施できない。

そこで学生達が図-24に示す装置を考え出した。¹⁰⁾ ポリエチレン製の広口ビンに、テーパが付き上端が開いているキャップを取り付ける。このキャップの上に、側面に穴

の開いた蓋をかぶせる。広口ビンの中には発泡スチロ

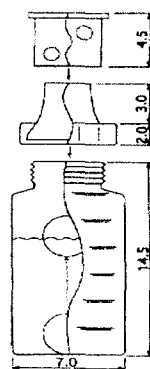


図-24 採水ビン

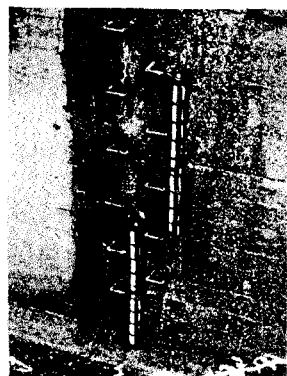


写真-13 現地設置の様子

ールの玉を入れておく。河川水位が上昇して上端の蓋の穴に到達すると、水が広口ビンに流入する。さらに水位が上昇するとビン全体が水没するが、その時には発泡スチロールの玉が上昇し、テーパの部分で口を塞ぐため、一旦流入した水は流出しなくなるという仕掛けである。現地に設置する場合には、写真-13に示すように、鋼製アングルで組んだ枠の中に数珠つなぎにして入れておく。その結果、増水期において、水面が一定量上昇することに採水される。ビンは出水後に回収し、新しいものと取り替えておく。

(例-14) 溶存酸素濃度の高速測定法

現地用の溶存酸素計(以下、DOメータ)はポーラログラフィーやガルバニックセル法などの電気化学的手法によっており、90%応答に要する時間は数十秒である。したがって、例えば鉛直方向に10点計測して鉛直分布を求めようとすれば、約10min(70分)の時間がかかる。一方、塩分や水温や濁度といった項目の計測はこれよりずっと短時間で終了するので、DO計測が計測効率を規定してしまう。また、河川感潮域などのように時間変動の大きな水域の現地観測では、ゆっくり計測していたのでは意味がないこともある。そこで、DOメータを連続的に下降及び上昇させて得られた出力から、“計測器の時間応答特性”を考慮して、真のDO鉛直分布を推定する方法を考案した。¹¹⁾

図-25は、DOメータの時間応答曲線で、左側は通常表示、右側は対数表示である。90%応答の範囲では概ね指数関数に従っていることがわかる。そこでDOメータの応答特性が一階線形微分方程式で近似できるものと仮定する。

$$\frac{d\phi}{dt} = \alpha \{\Psi(t) - \phi(t)\} \quad (1)$$

ここに、 $\Psi(t)$ は入力値(真値)、 $\phi(t)$ は出力値、 α は応答速度定数である。つまりDOメータの応答速度定数 α がわかっているれば、出力値 $\phi(t)$ から真値 $\Psi(t)$ を逆算できる。(実際にはやや複雑なデータ処理を伴うが、原理的にはこういうことである。)

図-26(a)は二層状態を呈する汽水湖で計測した例である。DOメータを一定速度(25cm/sec)で水面から湖底まで下降させ、湖底で30sec静止させた後、同じ速度で水面まで上昇させる。すると図中に点線で示すヒステリシスな出力値を得る。これから逆算された推定値が図中の実線である。一方●は、DOメータを各深度で静止させて取ったデータであり、両者はよく一致している。また図-26(b)は、同様の計測を利根川感潮域で実施した結果を示している。この場合にもかなりよく一致していることがわかる。

この高速計測法の開発により、例-11に述べた利根川観測に要する時間は3時間半から2時間以内に短縮された。満潮から干潮までの時間が約6時間であるから、この時間短縮が大きな意味を持っている。

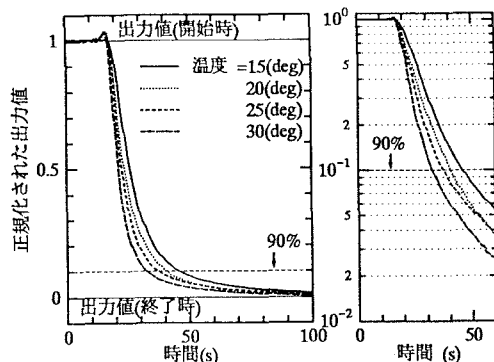


図-25 DOメータの時間応答特性

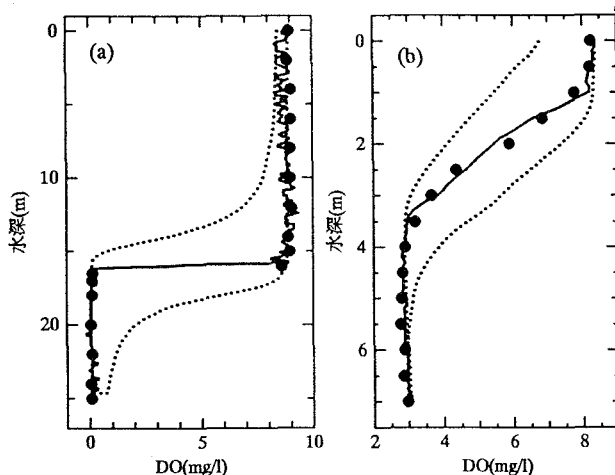


図-26 DOの高速観測例((a):小川原湖、(b):利根川)