

湖沼・貯水池における ADCP 観測の問題点と誤差補正に関する研究

The characteristics of ADCP data obtained in lakes and reservoirs
and a data processing method for its correction

若岡圭子*・横山勝英**・石川忠晴***

by Keiko WAKAOKA, Katsuhide Yokoyama and Tadaharu ISHIKAWA

Acoustic Doppler Current Profiler (ADCP) was used for the observation of flood flow intruding into a reservoir. The data had a lot of error which was generated by rolling and pitching of a carrying boat. We investigated the characteristics of the error in order to develop a data correction method. In this paper, a least square method with non-linear weight function is shown to be useful for the determination of a series of trial functions which interpolate the very fluctuating original data properly. The corrected velocity field is consistent with the profile of the turbidity layer which was measured with a sonar and a turbidity meter.

Keywords : ADCP, field experiment, a data correction method, non-linear least square method

1. はじめに

近年、鉛直流速分布を短時間で計測する機器(Acoustic Doppler Current Profiler : 通称 ADCP)が実用化され、その利用が注目されている。ADCP は、水中に超音波を発射し、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で求める装置である。したがって、従来の流速計では不可能な面的ないし三次元的連続計測が可能であり、野外流体計測の様態を一変させるものと期待されている。

海洋や内湾及び琵琶湖のような広い水域においては ADCP の観測事例が集積されてきており、その利用方法や誤差補正の検討も進められている。^{1) 2)} しかし一般の湖沼・河川など比較的狭い陸水域ではまだ試験的利用にとどまっている。^{3) 4) 5)} そのひとつの理由は、次章に述べるように、陸水観測には海洋観測と異なる固有の問題があることである。

筆者らは、湖沼・貯水池・河川などにおける観測で ADCP を積極的に利用するための検討を行っているが、本論文では、筆者らの観測方法と観測事例を紹介するとともに、陸水域の観測で発生しやすい“船の動揺に伴う測定誤差”の補正方法について検討した結果を述べる。

* 学生員 東京工業大学大学院総合理工学研究科環境物理工学専攻
(〒226 横浜市緑区長津田町 4259)

** 学生員 工修 東京工業大学大学院総合理工学研究科環境物理工学専攻 日本学術振興会特別研究員

*** 正会員 工博 東京工業大学教授 大学院総合理工学研究科環境物理工学専攻

2. 陸水域における ADCP 使用上の問題点

本研究で使用した ADCP は、船の対地速度を求める機能 (Bottom Tracking 機能) を持っているタイプであり、流れの絶対速度を直接計測できる。Bottom Tracking 機能がない場合には、GPS などにより求めた航行速度を別途引き算する必要がある。湖沼・貯水池・河川などの陸水域は海洋や内湾に比べて狭小であるため、後者のタイプでは GPS による位置測定 of 誤差が問題となる。最近 is 固定局 GPS との差を利用して精度を高める DGPS も普及し始めているが、貯水池など山間にある陸水域では電波受信の関係で利用できないことが多い。そこで、Bottom Tracking 機能を有する ADCP が必要とされる。

Bottom Tracking 機能を有する ADCP では、同一の送受波器を用いて、Bottom を感知するためのピンと流速測定用のピンを適当な間隔で交互に発射する。船の走行が安定している場合にはこれで問題ないが、船の運動や姿勢が短時間に变化する場合には、Bottom Tracking による船速測定と ADCP による流速測定の間ズレが生じることになる。陸水域での観測においては、以下の理由によって、このことによる観測誤差が無視できないほど大きくなる。

まず、陸水域の観測に用いる船は、海洋の場合と違って、観測専用船ではない。海洋であれば、1 艘の観測船を回遊して多数の水域での観測に用いることが可能だが、陸水域は多くの場合閉鎖水域であるから、現地で調達できる漁船や巡視船を利用することとなる。観測専用船であれば船底に ADCP センサーを取り付けることができるが、現地調達の船では舷側に横付けすることになり、船の走行性や安定性が著しく悪くなる。陸水域では一般に船が小型であり、また海洋に比べて波の勾配が大きく短周期であるため、船の動揺による観測誤差が大きな問題となる。

この誤差を取り除くひとつの方法は、多数の観測値を平均してひとつの観測値にすることである。ドップラーシフトは線形の現象であるから観測値の単純平均が許される。実際、ADCP には平均操作の回路が内装されており、平均時間を長く取れば安定した流速ベクトル列が得られる。

ところが、陸水域は一般に海洋に比べて遥かに狭小であるから、平均時間をあまり長く取ると、流速ベクトルをいくらか得られないうちに対岸に着いてしまい、流れの構造を把握できなくなる。この問題を避けるためには航行速度を小さくすればよいのだが、それはまた別の問題を引き起こす。第一に船の安定性が悪くなり誤差が倍増する。第二に観測に要する時間が長くなり現象の全体をとらえにくくなる。湖沼や貯水池の流動観測は、時間継続性の比較的短い現象を相手にするから、第二の問題は深刻である。また、陸水域では夜間走行の危険な場合が多く、陽のあるうちに作業を終了しなければならないという事情もある。

以上述べてきたことを要約すると次のとおりである。すなわち、陸水域での ADCP 観測では、よほど平穏な気象条件の場合を除いて、船の動揺による計測誤差は不可避であり、またそれを取り除くための平均操作にも限界がある。したがって、誤差を含んだ短時間平均量の時系列から流れの構造を推定するためのデータ処理が不可欠となる。

3. 七が宿貯水池における濁水流動観測

3-1 観測サイトと観測方法

本論文で使用する ADCP データは、宮城県白石川水系七が宿貯水池で得られたものである。七が宿貯水池は、延長約 4 km、幅約 1 km、総貯水容量 1 億 m^3 の多目的貯水池である。

観測は平成 8 年 9 月 23 日 (台風 17 号通過直後) に行った。観測測線は図-1 中に示すとおりである。

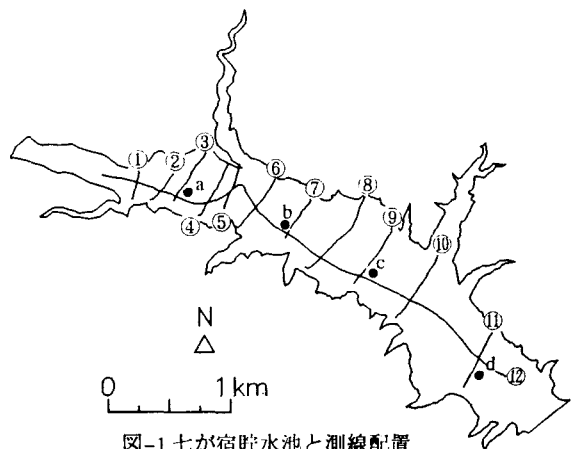


図-1.七が宿貯水池と測線配置

観測装置のセットアップを図-2に示す。主な装置は、ADCPの他に、音響測深器と水質計である。本研究で使用したADCPは、RD-Instrument社製の1200kHzのタイプで、通常の使用方法では鉛直分解能50cm、測定深度25m、Bottom Tracking機能は水深35mまで有効である。

写真-1にADCPの取り付け状況を示す。測定時にはADCPを舷側にしっかり固定する必要があるが、測線を変更する際に船速を上げられるよう、ウィンチによって水面すれすれまで引き上げることができるようになっている。また、長時間走行する際にはレールごとはずすことも可能な構造にしている。

ADCPデータの整理結果の妥当性を確認する目的で、音響測深器と水質計による濁水分布の観測を同時に行った。音響測深器は千本電気製の発信周波数200kHzのタイプで、水中からの反射波の強度変化より濁水塊の輪郭をとらえる。この装置は標準ではチャート出力のみだが、本研究ではアナログ出力を高速AD変換して信号実効値をハードディスクに格納できるように改造している。したがって鮮明な音響画像を事後に再構成できる。また、濁度分布を定量化するために、時々船を停止して水質計(アレック電子製コロテック)を降ろし、濁度の鉛直分布を計測して音響測深器の画像と対応関係を調べた。

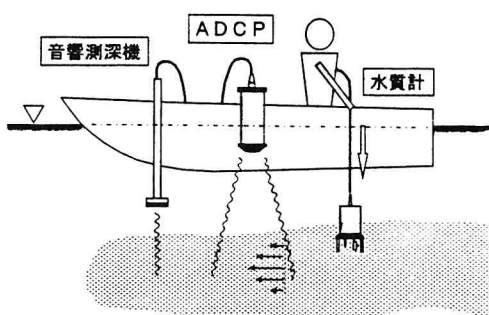


図-2. 現地観測のセットアップ

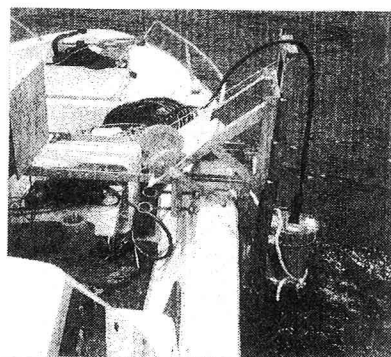


写真-1. ADCPの取り付け状況

3-2 濁水の分布状況と ADCP データの特徴

縦断観測(測線⑫)の音響測深機データを図-3に、水質計の濁度・水温データを図-4に示す。横軸は時間で貯水池の縦断方向距離に相当し、左が流入部側、右が堤体側に対応している。水質計測の位置は図-3の中に縦線で示している。音響測深器のエコーには濁水層の輪郭が濃く見えている。これによれば、濁水は水質計測点 a のあたりまでは湖底に沿って流下し、そこから水温躍層に沿って水平に流れている。この様子は濁度データとよく対応している。なお、途中で湖底が盛り上がっている部分があるのは以下の事情による。貯水池の底は最近まで陸地であったために、自然の湖に比べて湖底地形の凹凸が激しい。特に旧河道が蛇行したり狭窄部になっている地点では、最深部の直上を走行することが極めて難しい。このために、旧地表の峰筋を横切った際に凸凹の湖底形状が画像上に現れるのである。

同じ縦断測線上で得られた ADCP データを図-5に示す。縦軸が水深、細かい横線が貯水池縦断方向に投影した速度ベクトルを表している。速度ベクトルはかなりばらついているが、よく見ると、左(上流)側では湖底に沿った速い流れがあり、右(下流)側では水深15m付近を中心として水平の流れが右に向かっている。この運動は図-3、図-4に示した濁水層の分布とよく対応している。また水平な流れの上には上流側に向かう流れ(補償流)が存在し、水面付近には堤体側に向かう吹送流が見て取れる。(観測時には上流から下流に向けて5～8m/secの風が吹いていた。)

以上のように ADCP のデータから流れの構造は概ね把握できるものの、値のバラツキはかなり大きく、このままでは定量的解析に使用することは困難である。そこで、データを補正することを検討するわけだが、そのためには「誤差の性質」を把握しておく必要がある。

図-5に示した流速分布には、2種類の誤差が含まれていると考えられる。ひとつは各カラム(縦系列)の平

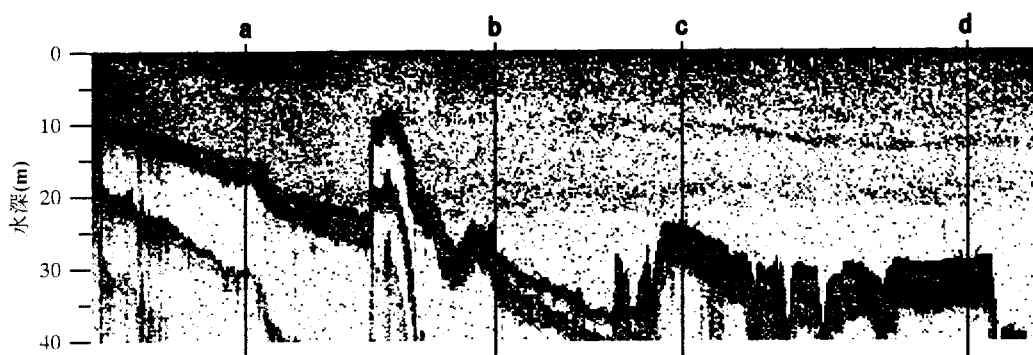


図-3.音響測深機による観測結果

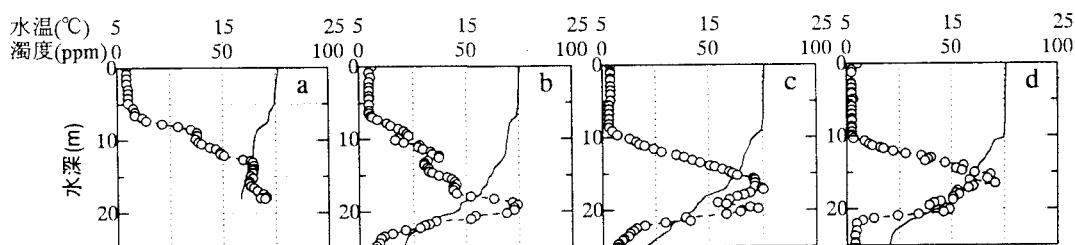


図-4.水質計によ濁度・水温の観測結果

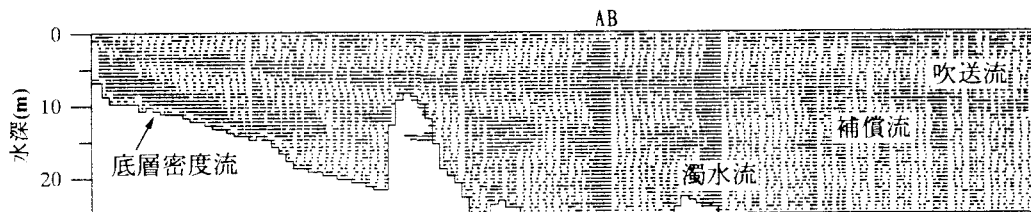


図-5.ADCPによる観測結果

均的な誤差である。例えば、カラム-A とカラム-B を比較すると、図-6に示すように、平均値はだいぶ異なっているが分布形は良く似ている。これは、前述したように Bottom Tracking とのミスマッチによる誤差である。もうひとつはランダムな細かい誤差である。これは全領域に分布しているが、その分布は必ずしも均一ではなく、突発的な異常値として現れることがある。

4. データ補正方法

誤差を減少させる簡単な方法として移動平均が考えられる。しかし移動平均では異常な値を周りに分散することになるので、正しい計測値まで変更してしまう

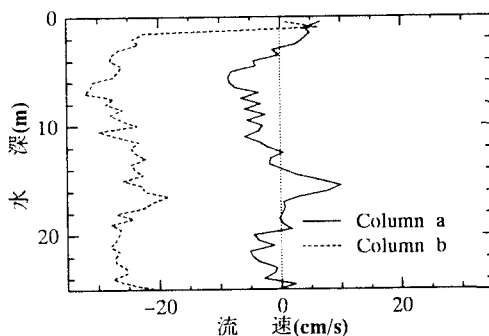


図-6.カラム毎の流速分布の類似性

恐れがある。また、貯水池は一般に水温成層しているから、平均化しすぎると流れの成層構造を“塗りつぶしてしまう”恐れがある。そこで、本研究では、水平、鉛直各方向に補完関数を設定し、非線形重み付き最小自乗法によって係数を求めることにより誤差を取り除くこととした。

ADCP データは、図-7に示すマトリックス構造をしている。そこで、 (I, J) を絶対座標として記述する。前節に述べた2種類の誤差を補正するために、本研究では次の評価関数を最小にするように補正を加えることとした。

$$Z_1 = \sum_I \sum_J \{u(I, J) - u'(I) - u_o(I, J)\}^2 \quad (1)$$

ここに $u(I, J)$ は観測された流速ベクトル、 $u'(I)$ は鉛直平均値の補正ベクトル、 $u_o(I, J)$ は鉛直平均値補正後のデータに対する補完関数である。

先に述べたように、貯水池は成層構造を持っているから、補完関数を設定する場合に水平と鉛直の取り扱いを分けて考える必要がある。そこで次のようにおく。

$$u_o(I, J) = \sum_j U_j \cdot F_k(I) \cdot G_m(J) \quad (2)$$

ここに、 $F_k(I)$ と $G_m(J)$ は水平及び鉛直方向の展開関数で、複数の既知関数を用意する。 k と m は各々の関数番号である。また U_j は関数 $\{F_k(I) \cdot G_m(J)\}$ の未定係数ベクトルであり、 j は全ての展開関数の通し番号である。

さて、流れの鉛直構造は水温成層に規定されているから、全領域である程度共通の構造を持っているはずである。そこで $G_m(J)$ として水面を原点とした cosine 関数列を全領域に適用する。しかし水平方向の関数特性は水域によって変化する可能性がある。そこで本研究では、水平座標をいくつかの要素に分割し、有限要素法における一次元適合要素の補完関数⁶⁾(すなわちエルミート多項式)を用いる。適合要素を用いるのは、要素接合部で一次微係数の連続性を確保するためである。

したがって、各要素節点には2個の関数 $F_1(I)$ 、 $F_2(I)$ を配置することになる。図-8に示す局所座標系においては、これらの関数は以下のように表示される。すなわち図の中央の節点に配置される関数は、

$$\text{左側の要素}(E_1)\text{内において： } F_1(\xi_1) = 3 \cdot \xi_1^2 - 2 \cdot \xi_1^3 \quad (3)$$

$$F_2(\xi_1) = -\xi_1^2 + \xi_1^3 \quad (4)$$

$$\text{左側の要素}(E_2)\text{内において： } F_1(\xi_2) = 1 - 3 \cdot \xi_2^2 + 2 \cdot \xi_2^3 \quad (5)$$

$$F_2(\xi_2) = \xi_2 - 2 \cdot \xi_2^2 + \xi_2^3 \quad (6)$$

ここに、 ξ_1 、 ξ_2 は、左右の要素における局所座標であり、左側節点で0、右側節点で1の値をとる。なお、関数 F_1 に関わる係数は「節点値」に対応し、関数 F_2 に関わる係数は「節点における導関数値」に対応する。

各節点に配置される関数 $\{F_k(I) \cdot G_m(J)\}$ の項数は、鉛直展開関数を M とすると $2M$ 個である。また、関数番号 j 、 k 、 m の間の関係は L 番目に位置する節点の局所座標番号 i を介して、以下のように表される。

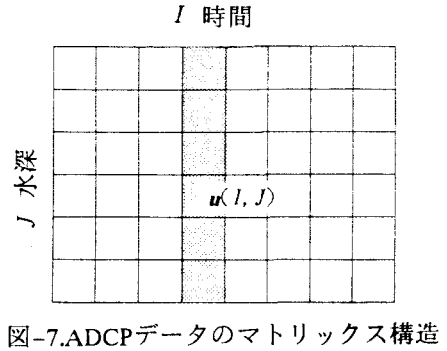


図-7.ADCPデータのマトリックス構造

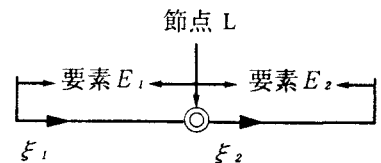


図-8.局所座標系

$$k = \text{INT}\{(i-1)/2M\} + 1 \quad (7)$$

$$m = i - \text{INT}\{(i-1)/2M\} \cdot M \quad (8)$$

$$j = (L-1) \cdot 2M + 1 \quad (9)$$

さて、 Z_1 を最小化するように、 $u'(I)$ と U_i を決定するのだが、そのまま最小自乗法を適用すると不定形(すなわち行列式がゼロのマトリックス)の方程式が得られる。この原因は、全ての $u'(I)$ に一定値を加えても同一の Z_1 を得ることが可能だからである。そこで評価関数に以下の値を加えて最小化する。

$$Z_2 = \lambda \sum_i u'(I)^2 \quad (10)$$

すなわち Z_1 を最小とする等価な解の中で鉛直平均値の補正ベクトルの自乗和が最小となる解を選択できるようにする。ここに λ は“ゼロでない微小数値”であり、計算機の有効桁数を考慮して定める。

ところで、前章で述べたように、ADCP データは少数の異常な誤差を含んでいる。したがって Z_1 を通常の(つまり重みが1の)最小自乗法で最小化すると、異常データの値が全体に影響を及ぼす恐れがある。そこで、以下のような重みを付加した最小自乗法を行う。

$$Z_1 = \sum_i \sum_j [\{u(I, J) - u'(I) - u_0(I, J)\}^2 \cdot W_p(I, J)] + \lambda \sum_j [u'(I)^2 \cdot W_r(I)] \quad (11)$$

ここに $W_r(I)$ と $W_p(I, J)$ は、前節で分類した2種類の誤差(すなわち鉛直方向に共通の誤差と各点毎の誤差)に対する重みであり、本研究では以下のように設定した。

$$W_r(I) = \exp\{-\varepsilon_r(I)/2\varepsilon_r'\} \quad \varepsilon_r(I) = \{u'(I)\}^2 \quad (12)$$

$$\varepsilon_r' : \varepsilon_r(I) \text{の平均値}$$

$$W_p(I, J) = \exp\{-\varepsilon_p(I, J)/2\varepsilon_p'\} \quad \varepsilon_p(I, J) = \{u(I, J) - u'(I) - u_0(I, J)\}^2 \quad (13)$$

$$\varepsilon_p' : \varepsilon_p(I, J) \text{の平均値}$$

このような重みを付加することにより、平均より大きくはずれたデータの重みを減らして補完関数の係数を求めることができる。なお、式(11)を未知数で微分して得られる連立方程式は非線形となるので、iterationで収束させる必要があるが、本研究では前ステップの $W_r(I)$ と $W_p(I, J)$ を逐次代入することによって収束させた。

5. 補正後のデータからわかる濁水の流況

前述の方法で求めた縦断流速分布図を図-9に示す。全体が滑らかに連続するとともに、流れの構造のディテールが鮮明になっている。すなわち、上流部では濁水が底層密度流を形成した後、途中から水平に侵入していく様子や、表層に吹送流が生じている様子、中層の補償流(逆流)が上流側で水面に達する様子が明確化されている。なお、湖底が盛り上がっている部分では流れの連続性が失われているが、前述したようにこの部分は旧河道の蛇行・狭窄部に当たっており、観測船が滞筋の真上を通過できなかったためである。ところで、図-9の測線⑨と⑩の間あたりで濁水流の流速が急減し、下流側では逆流が生じている。しかし図-3、図-4に示した濁水分布は下流堤体付近まで連続している。これは恐らく、濁水が堤体に達した後に生じた反射波の影響で、濁水流が横方向(旧河岸段丘上)に広がるからである。図-10は、全データを同様に整理した後に作成した水深16mの流速ベクトル図である。縦断観測と横断観測に時差があるため、交点では必ずしも整合していないこともあるが、平面流況がかなり明確に見て取れる。前述の流速反転の部分では北側入江に向かう強い流れがあり、さらに東と西に分かれて環状流を形成していることがわかる。

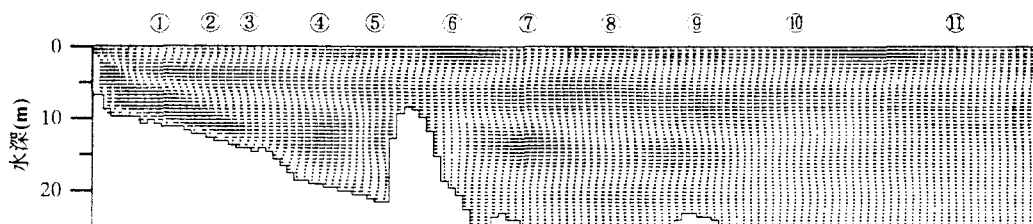


図-9.補正後のデータ

6. おわりに

ADCPを用いた陸水観測は、使用できる船が一般に小型であり、また、波浪が短周期であることから、船の動揺による観測誤差を避けられない。本研究では、貯水池において観測された濁水流のデータを用い、誤差の特性をとらえて、それに応じた補正方法の検討を行った。補正後の結果は、同一の観測で得られた音響測深機、水質計のデータともよく対応するものであった。

本研究では、測線毎に独立に補正を行ったが、全ての測線のデータを考慮し補正することにより三次元的な解析を行うことも可能である。また連続条件式を考慮することによって湧昇流などの現象を捉えることができると考えられ、今後も検討を続ける予定である。

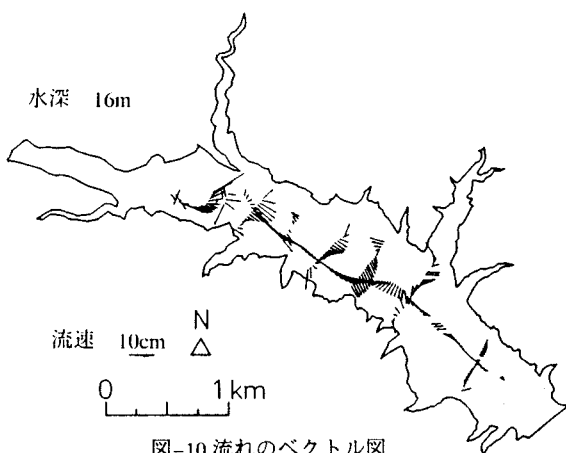


図-10.流れのベクトル図

本研究を行うにあたり、建設省東北地方建設局七ヶ宿ダム管理所及び同関東地方建設局霞ヶ浦工事事務所に多大の便宜をはかっていただいた。記して謝意を表する。

参考文献

- 1) 清水勇吾、安田一郎：わかたか丸 ADCP により得られる流速誤差の評価、東北区水産研究所研究報告、No. 57、pp. 15-24、1995。
- 2) 山田東也：航法船速を用いた ADCP データの補正、日本海区水産研究所研究報告(45):pp. 79-82、1995。
- 3) 藤井智康、吉村亮、三村敬、奥田節夫、横山康二：超音波ドップラー(ADCP)を用いた感潮水域における流動観測、陸水学雑誌、Vol. 55、No. 1、pp. 1-6、1994。
- 4) 福岡捷二、松本直也、溝山勇、山根伸之：汽水湖における閉鎖性水域の流動観測と流動モデルの適合性、水工学論文集、Vol. 39、pp. 243-248、1995。
- 5) 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、No. 1、pp. 139-142、1996。
- 6) J. J. Connor、C. A. Brebbia：流体解析への有限要素法の応用、pp. 98、1978。