

◆ 水環境特集 ◆

ダム湖における ADCP 等を用いた深層曝気流動の現地観測

福渡 隆* 天野邦彦** 寺川 陽***

1. はじめに

ダム湖のような水深の大きい湖について、冷渦水問題や富栄養化対策の検討のために多くのシミュレーションモデルが開発されてきている。

しかし、実際の湖内流動(流向、流速)のプロファイル(水深方向の流動状況)を経時的に測定することは非常に困難であり、シミュレーションの検証等にこれらの測定結果を用いることは精度的にも難しかった。これまで実際に湖内流動のプロファイルを測定する場合、1測点の経時変化または1時点の流速プロファイルと、時間と空間を分割し測定するほかはなく、ある程度の空間的な状況を把握するためには、多大な労働力または機材購入等の資金が必要であった。

近年実用化された流速に関する計測機器に、ADCP(超音波ドップラー流速プロファイル:一台で水深方向の流向・流速分布が一度に長期間にわたり記録し続けることが可能)、SACM(高性能超音波流速計:一点のみの測定だが、精度が向上した)等がある。

土木研究所が開発した深層曝気施設は、施設設計及び対策効果の把握に必要となる流速等の詳細については未だ明らかになっていない。そこで、当該施設近傍の流動状況の把握に、これら上記の計測機器による計測を試みることとした。

本報文では、実際のダム湖に設置した深層曝気施設について、ADCP 等を用いて流速等の現地観測を試みた結果について報告する。

2. 深層曝気施設の概要

成層したダム湖では、深層は表層からの DO 供給が絶たれ嫌気化していく。嫌気状態となった深層は、化学的及び生物的な作用により溶存態の栄養塩(特に問題となるのがリン)が底泥から溶けだし、非常に栄養塩の濃い水塊となる。この水塊は、風等の外力による湖内振動により湖岸帶に浮上し、表層の植物プランクトンの生産を支えることがある。この様に、深層の嫌気化は富栄養化現象を

Field observation on a deep layer current caused by the facility to provide oxygen

さらに促進する可能性がある。

また、さらに嫌気化が進むと、湖底から Fe や Mn の溶出、H₂S の発生などが生じ、深層放流水が着色したり異臭がする場合があり障害となることがある。

深層曝気施設は、富栄養化対策技術の一つとして開発された流動制御システムの一部で、特に深層部の嫌気化防止対策を目的としている。

本施設は全層曝気施設と異なり、栄養塩が多量に含まれている深層の水塊を表層に供給することがなく、また浅層曝気循環施設によってダム湖中層以深に導かれた流入河川水の濁質等を再浮上させることなく、深層のみ DO の供給ができるという特徴を有している。

図-1に、施設の概略図を示す。湖底に設置された散気方式の曝気装置から多量の空気を吐出し、その気泡を上方で空気室を持った構造体で受け、溜まった空気は圧力追随式の排気口で湖面から排出する。空気室の水面は、補助排気管により常に一定に保たれるように工夫されている。

原理は、深層水が曝気による連行によって上昇し、空気室で DO の供給を受ける。その後深層水は、曝気による微細気泡と共に空気室にそって四方に拡散していく。深層水の上昇水量及び DO 供給量は、曝気量、空気室までの距離、空気室の大きさによって規定されると考えられる。

本深層曝気施設は、ある程度深層においても水温差がある場合、浅層曝気と同様の流況が生じると想定され、ダム湖全域に DO の供給ができるも

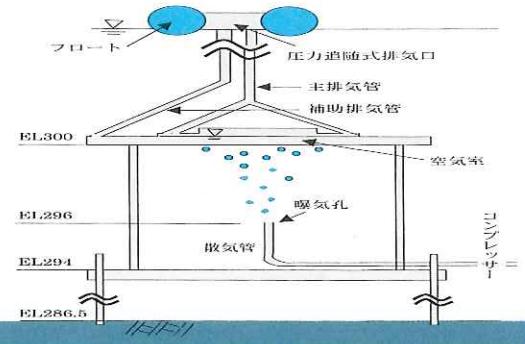


図-1 深層曝気施設の概略図

のと期待される。

3. 現地観測の概要

阿武隈川水系大滝根川に建設された多目的ダムである三春ダム(福島県田村郡三春町:さくら湖)では、富栄養化対策の一環として流動制御システム(浅層曝気施設が4基及び深層曝気施設が2基)が設置されている¹⁾。

このダム湖において湖心に近い深層曝気施設(深層曝気2号機:図-2参照)の周辺で現地観測を行った。

深層曝気2号機の諸元を、表-1に示す。ただし、値は通常稼働時であり、空気室は円筒形であるため、直径を示す。

本観測で、曝気施設稼働時に、ADCP(Acoustic Doppler Current Profiler:超音波ドップラーフロープロファイラー)を平成9年度に、SACM(Smart Acoustic Current Meter:超音波流速計)を10年度に用い、深層曝気施設近傍の流速を測定した。使用したADCP及びSACMは水平面のみの2次元の測定となり、測定原理等の詳細については文末に示す。

● ADCPによる観測

ADCPは、曝気孔から5.5m離れた位置の湖底に、上向きに設置した。

使用したADCPは、超音波周波数2,400kHzのタイプであり、超音波発信間隔3.1sec、測定層厚50cmで全14層(7m)、出力データの時間平均を5分に設定した。この条件下でのメーカーによる公称測定誤差は±0.3cm/secである。観測期間は、平成9年8月1~19日で、期間中に曝気量を2.0m³/min(7日間)、2.5m³/min(5日間)、3.0m³/min(7日間)と変化させた。

また、観測期間中ダム湖内の縦断的な水温及び

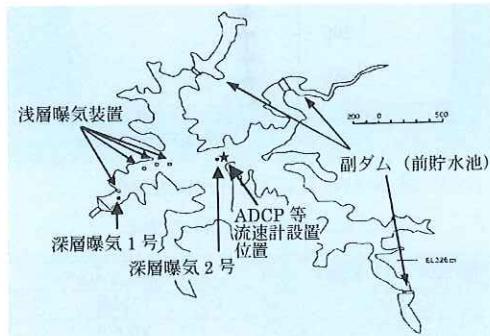


図-2 三春ダムの平面図

DOの鉛直分布を測定した。

● SACMによる観測

SACMは、曝気孔から5.66m離れた位置にガイドロープを張り、それに這わせるようにEL294.5~301mを0.5mピッチで上下させ流速の鉛直分布を測定した。使用したSACMは、メーカーの公称測定誤差は±1.0cm/secであり、1.0secごとの流速を測定した。

観測期間は平成10年9月8~10日で、曝気孔の位置(空気室までの距離が3.0m、4.0m、5.5m)及び曝気量(3.0m³/min、3.7m³/min)を変化させた。また、直径50μmの微細気泡が発生できる多孔質素材を曝気孔に接続した場合の調査も行った。

その他、深層曝気施設近傍の水温及びDOの鉛直分布を測定した。

4. 現地観測結果

● ADCPでの観測結果

ADCPの観測結果(観測結果を10分平均に直したもの)の一部を図-3に示す。

8月3日16時30分から約2時間深層曝気施設は停止していたが、この間ADCPは非常に小さな流速を観測しており、ADCPの測定している流速は主に深層曝気施設によるものといえる。

実験開始直後(8月7日)と実験終了時(8月22日)のダム湖内の水温及びDO分布を図-4に示す。

深層曝気施設の空気室の位置はEL300mで、曝気孔の位置はEL296mである。

表-1 曝気施設(2号機)の諸元

曝気孔水深	EL 296
空気室の大きさ	φ6000mm
曝気量	3.0m ³ /min
コンプレッサー容量	22KW
空気室までの距離	4000mm

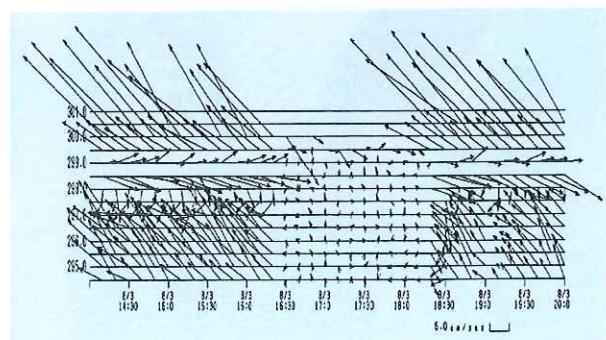


図-3 ADCPの観測結果の一部

図-4-1 より、浅層曝気施設が EL309m で稼働しているため、厚い循環混合層が形成されていることが分かる。深層はほとんど水温に変化が無く、EL300~294m の水温差は 0.66 °C であった。

DO は、8月 7 日に曝気施設近傍で 2.6mg/l あつたが、22 日には最下層では 0、曝気施設近傍でも 0.1mg/l となつた。これは、深層の水温が上昇し、

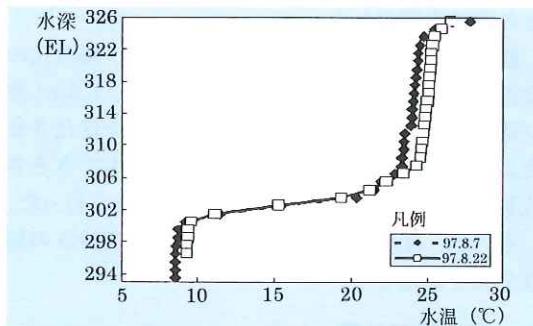


図-4-1 湖内水温分布

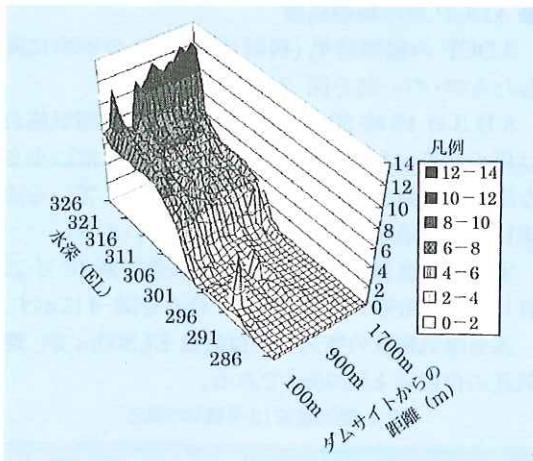


図-4-2 8月 7日の DO 分布

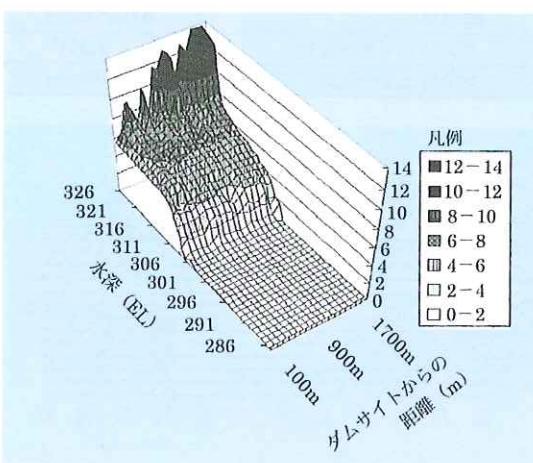


図-4-3 8月 22日の DO 分布

DO の消費が供給を上回ったことによると考えられる。しかし、ブイを係留しているロープを回収すると、深層曝気施設が設置してある層とそれ以深の層では色が異なっていた(最下層は黒色に変化していた)ため、DO は無くなっていたものの硫化水素が発生するほどの嫌気状態ではなかったといえる。

次に、ADCP の観測結果を図-5 及び 6 に示す。ADCP で観測した流速の実測値は時間的に大きく変動する。これは電磁流速計による観測でも同様に生データに見られることである。この変動を平滑化するために、曝気量を変化させてから 2 日後より 4 日間 ($2.5\text{m}^3/\text{min}$ は 2 日間) の観測データを東西・南北方向それぞれに算術平均した。

図-5 は、曝気量 $3.0\text{m}^3/\text{min}$ 時のすべての水深について、流向・流速をプロットしたものである。ほぼ一定方向での分布状況にあると言えるので、

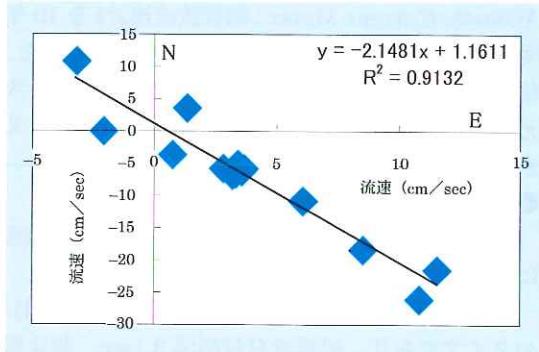


図-5 水平方向の流向・流速の散布

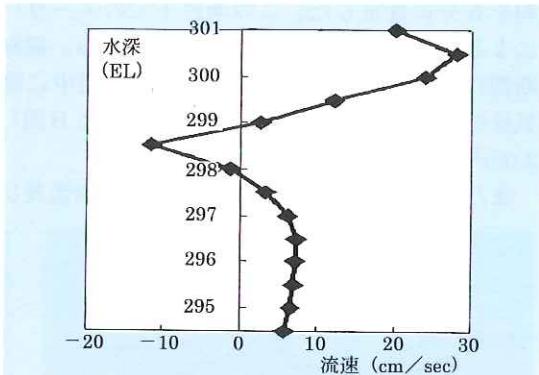


図-6 ADCP による平均流速分布

表-2 曝気施設(2号機)の諸元

曝気量 (m^3/min)	最大流速 (cm/sec)
2.0	21.44
2.5	20.67
3.0	27.94

この平面に各平均流速を投影させて流速を求ることとした。曝気中心から外に向かう流れを正として流速分布を図化したものが図-6である。

空気室(EL300m)の近傍で外向きの流速が最大になり、曝気孔上方で中心に向かう流れが観測された。これは、曝気量を変化させてもすべて同様な形状であった。表-2に、各曝気量条件下で観測された最大流速を示す。

● SACM での観測結果

平成 10 年度は、8, 9 月に出水(最大 $250\text{m}^3/\text{sec}$ 程度)が頻繁に生じたため、湖内の状況は平成 9 年度とは全く異なっていた。

観測開始時(平成 10 年 9 月 8 日)の深層曝気施設近傍の水温分布と DO 分布の状況を図-7 に示す。平成 9 年度は深層での水温が 8°C 程度であったのに対して、10 年度は 18°C を示し、DO は下層でも 6mg/l あった。

次に、ADCP と同様な時間平均処理をした SACM の観測結果を示す。SACM の観測データも激しく変動していたため、東西・南北方向それぞれを 3 分間の算術平均し平均流速として求めた。

図-8 は、曝気孔から空気室までの距離が 4m、

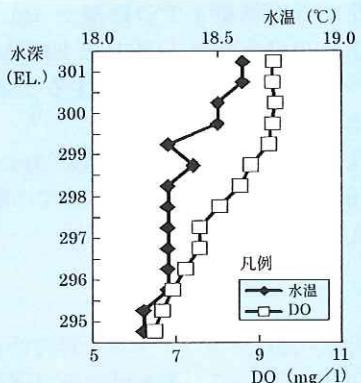


図-7 平成 10 年度の湖内状況

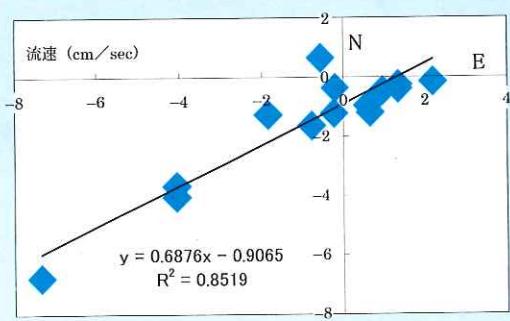


図-8 水平方向の流向・流速の散分布

曝気量 $3.0\text{m}^3/\text{min}$ の場合の、全水深の流向、流速をプロットしたものである。先の ADCP と同様、一定方向で流況が変化していることが分かる。

図-9 は、ADCP と同様に各実験条件ごとに流向を含む平面を求めこれに流速分布(曝気中心から外向きを正)を投影させたものの一例である。

全ての場合で、空気室がある EL300m の近傍で流速が最大になっていることがわかる。

本観測では、曝気孔の位置及び曝気量を順次変更しているが、流速の最大値や曝気中心に向かう流れの位置が若干変化するものの、どの実験条件でも、流速分布の形状はほぼ同様であった。すべての観測結果について、最大流速を指標として表-3 にまとめる。

5. 考察

ADCP と SACM とでは、観測された流速分布形状が異なっていた。これは、深層の水温分布が全く異なっていることに起因すると考えられる。

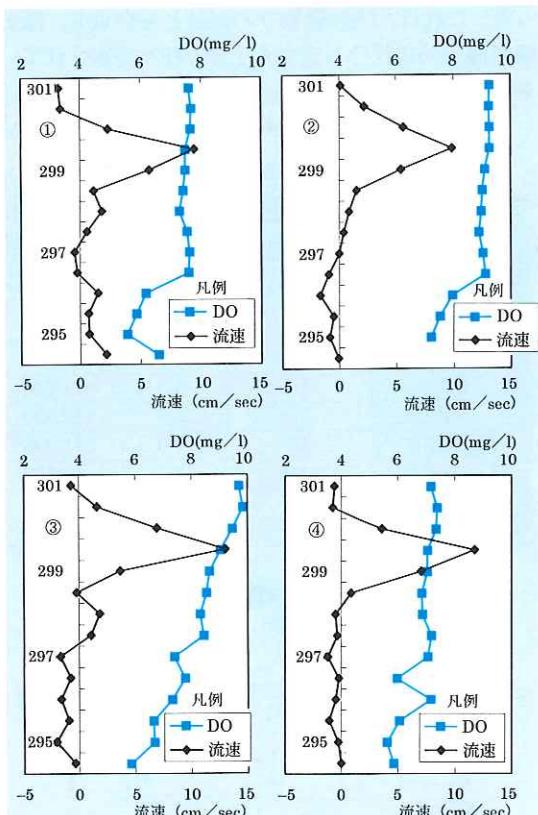


図-9 SACM 計測した流速分布と DO 分布

(全て曝気量は $3.0\text{m}^3/\text{min}$ 。曝気孔の形状:④のみ多孔質素材。空気室までの距離:①;3m, ②;4m, ③;5.5m, ④;4m。縦軸は水深(EL)を表している。)

曝気による流動は、密度流的に生じていると考えられている。SACM 測定時は、図-6 にあるように空気室の位置と曝気孔の位置とで 0.4°C の温度差があるのに対し、ADCP 測定時は、図-11 に示すように、EL298 以深では 1m で 0.05°C 程度の差しかなかった。このため、曝気の周辺では小さな渦が多数生じていると推測され、この場合 ADCP の計測する場が一様な流れであるという前提条件（※文末にある ADCP の観測原理の仮定）を満たさず、正確な流向・流速を測定していない可能性がある。（図-10 参照）

図-8 は曝気量が $3.0\text{m}^3/\text{min}$ で空気室までの距離及び曝気孔形状を変化させたときのものであるが、最大流速は空気室までの距離が大きいほど大きくなっていることが分かる。また、多孔質素材を用い微細気泡（直径 $50\mu\text{m}$ ）で曝気した場合も、単管で曝気した場合に比べ最大流速は大きかった。

のことより最大流速は、曝気量、空気室までの距離及び気泡の総表面積によって決まることが分かった。これは、浅層曝気での知見とも合致し、深層曝気施設の規模等算定する上で、種々提案されている曝気モデルの適用可能性を示唆するものである。

さらに、測定された最大流速が ADCP と SACM

表-3 条件の違いと最大流速

曝気孔の形状	空気室までの高さ (m)	曝気量 (m^3)	最大流速 (cm/sec)
単管	3.0	3.0	9.405
単管	3.0	3.7	9.926
単管	4.0	3.0	9.844
単管	4.0	3.7	10.321
単管	5.5	3.0	12.795
単管	5.5	3.7	12.990
多孔質素材	4.0	3.0	11.698
多孔質素材	4.0	3.7	13.399
多孔質素材	5.5	3.0	14.073
多孔質素材	5.5	3.7	15.346

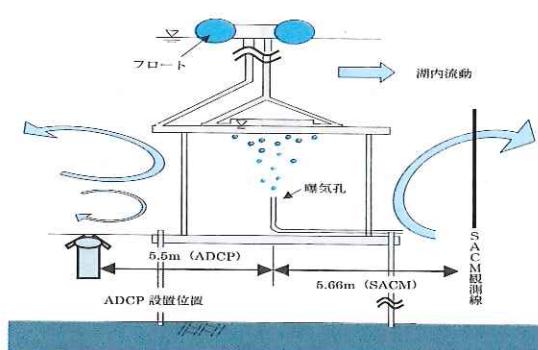


図-10 深層流動の模式図

で異なっており、ADCP の方が 3 倍程度大きな値を示している。

この場合も、深層曝気施設周辺では曝気によって連行された水塊は同心円上に拡散し急激に流速が減少していくため、前提条件（※文末の ADCP の仮定）を満たせなくなったものと推定される。

本観測の場合では、ある程度流動状況が予想できるので補正を試みる。

曝気により連行された水塊は、上下に移動しないと仮定し、ADCP の流速を求める式（※1）（文末参照）に $U = U_1$ 及び式（※2）（同）に $U = U_2 = \frac{r_1}{r_2} U_1 (U_1, U_2 : \text{図-12 を参照})$ を代入すると、

$$U_1 = \frac{r_2 \cdot C}{r_1 \cdot F_0} \{ r_1 \cdot (F_1 - F_0) - (F_2 - F_0) \}$$

となり、大まかな値として ADCP は通常得られる流速の r_2/r_1 倍した値が得られることとなる。

設置した ADCP から空気室までは約 6m である。ADCP は 20 度の角度で超音波を発信しているので（図-13 参照）、6m 上方では ADCP の中心から約 2.2m 離れた 2 点を計測していることになる。曝気中心に近い点を r_1 もう一方を r_2 すると、 $r_2/r_1 = 2.33$ が得られる。

曝気孔から空気室までの距離が 4m、曝気量 $3.0\text{m}^3/\text{min}$ の場合での ADCP と SACM で計測したそれぞれの最大流速を比較すると 2.84 倍であり、ほぼ同程度の値であった。

曝気孔から空気室までの距離が 4m、曝気量 $3.0\text{m}^3/\text{min}$ の場合での空気室近傍での流速の比は、2.84 倍と、ほぼ同等であった。

まとめ

ダム湖内の流速プロファイルを経時的に観測できる ADCP を用いて、土木研究所の開発した深層曝気施設近傍の流速観測を試みた。

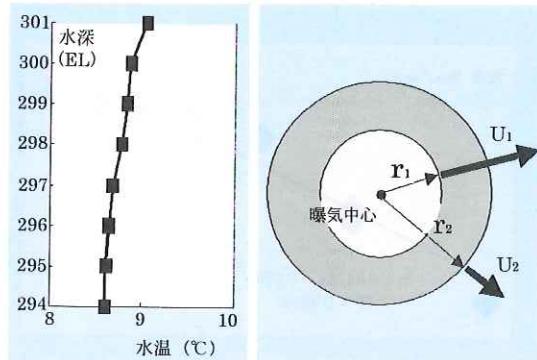


図-11 深層水温分布

図-12 連行水塊の拡散模式図

ダム湖のような内水域においては、ADCPによる流速算出の前提条件である一様な流れが生じる箇所は非常に少ないと思われるが、ある程度湖内の流動状況が予測可能な場合には、適切な手法を用いて補正することで湖内の流動を観測することが可能であることが分かった。

また、観測結果より深層曝気施設をモデル化する場合に、種々浅層曝気で提案されているモデル式を適用できる可能性が確認された。

今後、さらに各種気象条件下での深層曝気施設周辺での観測事例を積み重ねるとともに、本施設の機能評価及び効果の算定を行い、適切な施設の設計手法を確立していきたい。

※ ADCP による観測の原理

ADCP は、パルス状に発射された超音波を用い、一台でその地点の平均流速を層ごとに計測することが可能な装置である。

図-13 にあるように、ADCP は送信機と受信機が一体となった超音波送受信機（トランステューサー）を十字に 4 基搭載しており、各トランステューサーの中心は本体の中心から 20 度外側に傾斜している。各トランステューサーから発射される超音波は、水塊内の音波散乱体（プランクトンや SS）によって反射され再び受信される。各トランステューサーは、この時の往復にかかる時間及びドップラー

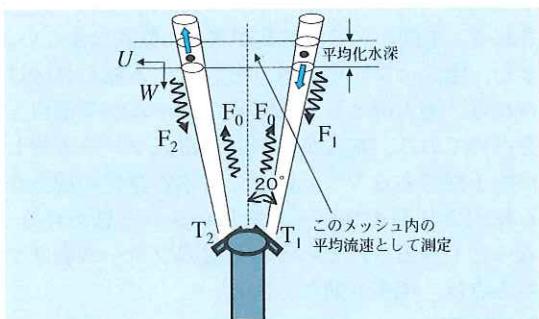


図-13 ADCP の概要図

効果による周波数の変化を計測する。往復にかかる時間より水深を算出し、反対方向を向いた 2 対のトランステューサーの計測結果とともにその水深での水平面上での流向・流速を算出する。

流速の算出方法は、その水深での流れは一様であるとの仮定に基づく。音波散乱体がトランステューサーに近づいてくる速さの水平方向成分 : U 、鉛直方向成分 : W とすると、一方のトランステューサーに反射して戻ってくるときの超音波の周波数 F_1 及び F_2 は以下の通りである。

$$F_1 = F_0 \left(1 + \frac{2(W \cos \theta + U \sin \theta)}{c} \right) \quad (\text{※ } 1)$$

$$F_2 = F_0 \left(1 + \frac{2(W \cos \theta - U \sin \theta)}{c} \right) \quad (\text{※ } 2)$$

ただし、 c : 音速

式 (※ 1) 及び式 (※ 2) より、流速成分 (U, W) が得られる。同様に、十字に搭載されているもう一対のトランステューサーを用いて、 U に直交する水平成分 V を求められる。 U 及び V は ADCP に搭載されたジャイロコンパスにより、それぞれ南北方向と東西方向として記録される

ただし、鉛直成分 W は、水平成分 (U, V) の検定にのみ使用され、精度に関する情報はない。

測定誤差は、超音波発信回数 (pings/sec)、層厚及び平均時間によって決定される。

※ SACM による観測の原理

ADCP と同様に超音波を用いて計測する。4 方向から一点に向けて超音波を発信し、その反射波のドップラー効果による周波数の変化によりその 1 地点の水平面上の流向・流速を算出する。算出原理は ADCP と同様である。

参考文献

- 1) 丹羽 薫：流動制御によるダム湖富栄養化対策、土木技術資料、第 38 卷第 8 号、pp.14-15、平成 8 年
- 2) 建設省水文研究会：水文観測、平成 8 年 11 月

福渡 隆*



建設省土木研究所環境部
環境計画研究室研究員
Takashi FUKUWATARI

天野邦彦**



同 環境計画研究室
主任研究員、工博
Dr. Kunihiko AMANO

寺川 陽***



中部地方建設局中部技術
事務所長
(前 環境計画研究室長)
Akira TERAKAWA