

ダム貯水池の「不動水域」に着目した流動と  
水質・底質の現地観測

鹿児島大学学術研究院・理工学域・工学系  
安達 貴浩

鹿児島大学大学院・理工学研究科  
小橋 乃子

# ダム貯水池の「不動水域」に着目した流動と水質・底質の現地観測

鹿児島大学学術研究院・理工学域・工学系 安達貴浩

鹿児島大学大学院・理工学研究科 小橋乃子

## 1. 本研究の背景と目的

鶴田ダム貯水池(大鶴湖)のようにダム堤体から、中層・底層のダム湖水を取水・放流する場合、平水時における水温躍層の位置は、主に取水・放流の位置によって決定されることが知られている<sup>1)</sup>(図1)。また、成層期においてダム貯水池における水温躍層よりも下の水塊は、一般に無視できるほど流動や乱流混合が小さい層(ここでは「不動水域」と呼ぶ)と見なされている<sup>2)</sup>。水温躍層の位置が水路床に近ければ、比較的規模の小さい出水で水温躍層は解消し、底層の貧酸素水塊も消失することになるが、さらに流動が大きくなると、水路床近傍の流動によって、底質の巻き上げや移動が生じることになる。この結果、それ以前に溶出した底泥からのリン等の栄養塩が、有光層に輸送され、状況によってはアオコ大増殖の要因にもなる。

このように、水温躍層は、ダム貯水池の水質・底質に対し、決定的な役割を果たしている。さらに選択取水の設計法を確立することを目的として、これまでに、水理実験や理論的検討を中心に取水と水温躍層の高さの関係を明らかにする研究が精力的に実施され、所定の成果が得られている<sup>1), 2)</sup>。しかしながら、理想的な定常場を対象とした既往の知見を大鶴湖にそのまま適用することはできない。このため、本研究は、ADCP(超音波流速分布計)を用いた定点連続観測、水温、各種水質、底質の観測を実施することにより、ダム堤体からの取水と放流が水温成層(特に水温躍層)、水質、底質に及ぼす影響を明らかにすることを目的とする。

## 2. 大鶴湖を対象とした流動・水質シミュレーション

ダム堤体から上流側10kmの区間のダム貯水池を対象に、幅平均した鉛直2次元モデルを適用し、流動の数値シミュレーションを行った。鉛直座標にはデカルト座標系を用い、水平格子間隔は200mとし、鉛直格子間隔は0.5mとした。

流動モデルの基礎式は、静水圧近似を適用した運動方程式、連続の式、水温の移流拡散方程式、状態方程式である。上流の境界条件としては、国土交通省が推

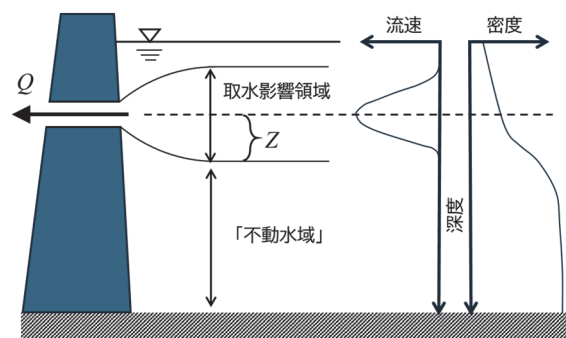


図1 不動水域のイメージ図  
(Davis et al.(1987)<sup>1)</sup>を基に作成)

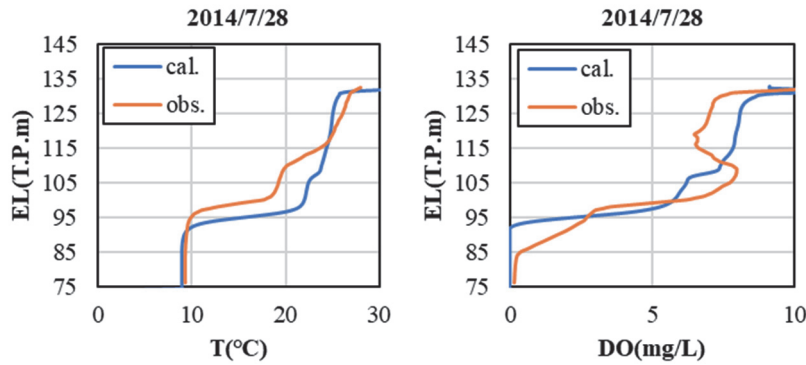


図2 シミュレーション結果と実測の比較 (Stn.B)

算した流量と、気温から推定される河川水温を与えた。水表面の熱フラックスは、ダム近傍に設置された気象観測装置から得られた全天日射量、気温、湿度、風ならびに鹿児島管区気象台によって得られた雲量の特別データを用い、モデルから推定した。下流端では、実測の取水・放流流量の日平均値を境界条件として与えた。また、下流端の水平流速と水温の鉛直分布は、Smith *et al.*(1987)<sup>2)</sup>のモデルに基づいて計算されている。乱流モデルには  $k-\varepsilon$  乱流モデルを採用した。

計算開始時刻を2014年3月28日とし、2014年を対象に数値シミュレーションを行った。適用したモデルにより、10月まで強い躍層が存在する様子や、1月に完全に成層が消失する様子やそれに伴う貧酸素水塊の形成と消失の様子

が比較的良好に再現できた。結果の一例として、堤体近傍の測点での水温TとDO(溶存酸素)の計算結果を観測結果(図3, Stn.B)と併せて図2に示す。ただし、成層期の水温やDOの詳細に着目すると、特にDOについて明瞭であるが、計算結果の躍層はシャープで、躍層下の水温やDOは完全に一樣なのに対し、観測結果の躍層は一定の厚みを有し、躍層下の水温やDOにも勾配が存在することから、躍層下でも乱流混合が存在する可能性が示唆される。

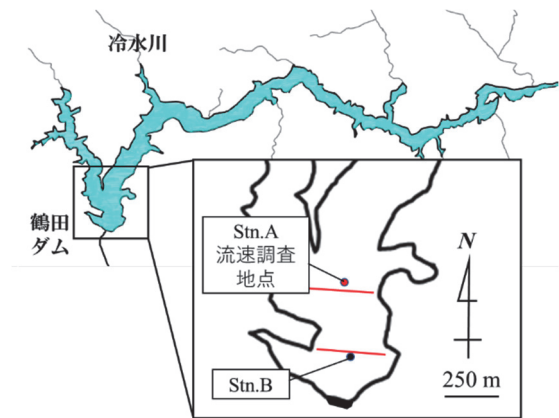


図3 調査地点の概要

表1 ADCPの計測期間

| No. | 計測期間                           |
|-----|--------------------------------|
| 1   | 2024/9/24～9/25                 |
| 2   | 2024/10/9～10/11                |
| 3   | 2024/11/21～11/27 (11/24: 点検放流) |

### 3. 流動と水質・底質の現地調査

#### 3-1. 観測概要

大鶴湖において、流動と水質・底質調査を実施した。水質・底質調査は、2024年5/14(水質のみ)、7/8、8/21、9/4、9/17、10/9に、Stn.Bにおいて実施した(図3)。また、流況調査について

は、ADCP(超音波流速分布計, RDI社製Workhorse, 600kHz)を、Stn.Aの水表面に係留し、表1の期間を対象に連続観測を実施した。また、2025/3/17には図3のライン上で曳航調査を実施した。

### 3-2. 観測結果

観測期間の成層とDOの結果を図4に示す。大鶴湖では、例年安定した季節躍層が10月まで形成されるが、2024年は大きな出水が度々あったことから、9/4の観測において水温躍層は消失し、貧酸素水塊も解消されている。その後、9/17には水温成層が再形成されるが、上下層の水温差も小さく、貧酸素水塊は形成されていない。10/9になると、水温は、水面近傍を除き水深方向にほぼ一様となっている。

ADCP調査は、9/24から開始されたが、9/17に形成されていた水温成層が、9/24では消失し、貧酸素水塊も解消されていた。また、上記のように2024年は、水温成層が発達しにくい条件にあったことから、いずれの観測日においても、取水口高さの近傍に形成される季節躍層は確認できなかった。このため、得られる流速分布は「不動水域」が見られる条件とは異なることに留意して結果を解釈する必要がある。9, 10, 11月の観測期間における平均的な水平流速の鉛直分布を図5に示す。流速の南北成分に着目すると、9, 10, 11月の観測結果は、いずれもT.P.110mより下の層でダム堤体側の流れが卓越し、それ以外の流速はほぼ0となるという同一パターンを示すことが分かった。この結果から、取得された流速分布はランダムな誤差とは考えにくく、流速の南北成分の最大値は5cm/s程度と比較的小さいにも拘わらず、適用した観測方法により、流速の鉛直構造を精度良く計測できていると判断できる。上記の流動観測結果から、以下を指摘することができる。

- 1) 流速の鉛直分布から判断すると、観測期間中の流動は、上流からの河川水の流入と貯水池の上下流の水温差によってもたらされる密度流ではないかと推察される。
- 2) 1)のような水温の水平構造が、河川水と貯水池の水温差によってもたらされるのか、貯水池上下流の水深の違いに起因する熱容量の違いによってもたらされるのかは今のところ不明であり、今後検討する必要がある。

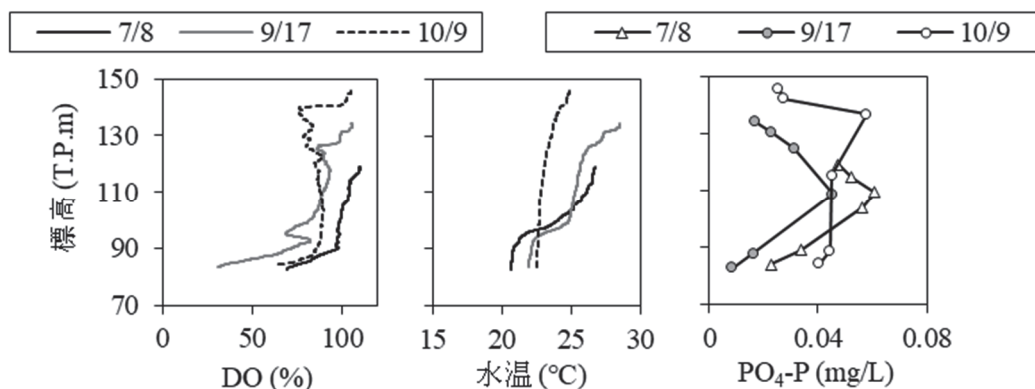


図4 DOと水温、PO<sub>4</sub>-Pの鉛直分布 (Stn.B)

- 3) 成層期において大きな出水があると、一時的に水温成層が消失することもあるが、上記の観測結果は、そのような条件における流動を推定するための重要なヒントになり得る。
- 4) 安定した季節躍層が形成されていないので、上記の観測結果では、不動水域の流動や乱流の影響について情報は得られない。このため、安定した季節躍層が形成された時の、流動を別途観測する必要がある。

次に、水質の観測結果として、図4に併記した $\text{PO}_4\text{-P}$ (リン酸)の鉛直分布に着目する。既往の研究(安達・小橋, 2025)により、大鶴湖では、水温成層が形成され底層が貧酸素化しても、中層から底層に向けて $\text{PO}_4\text{-P}$ が減少するという特徴的な $\text{PO}_4\text{-P}$ の鉛直分布の存在が指摘されているが、躍層はシャープではないものの水温成層が形成され、貧酸素化の生じた9/17には、同様の鉛直構造が出現していることが分かる。

さらに、底質の観測結果として、底泥間隙水中の溶存態鉄(DFe)および $\text{PO}_4\text{-P}$ の鉛直分布を調べた。安達・小橋(2025)では、底泥からの $\text{PO}_4\text{-P}$ 溶出時のみにおいて、底泥中のDFeは固液境界面で最大値を取ること報告されているが、2024年の観測では $\text{PO}_4\text{-P}$ の溶出は確認されなかった(図示省略)。この結果、いずれの観測日においても、そのようなDFeの鉛直分布は得られなかった(図示省略)。

いずれにしても、強固な安定成層ならびに貧酸素水塊が形成された際に、このような水

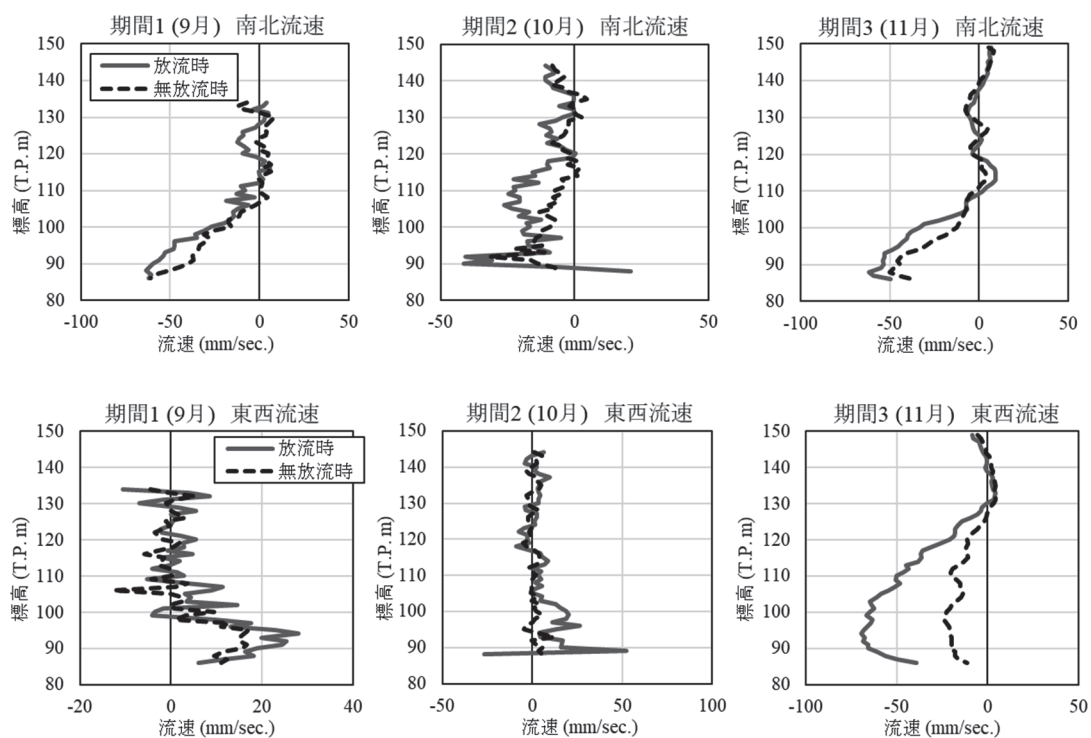


図5 放流時と無放流時の平均流速分布（上図：南北成分，下図：東西成分）

質、底質ならびに底層流速の観測データが取得できれば、底泥からのリンの溶出過程を含む、大鶴湖での水質・底質形成メカニズムがより明確になると期待される。

### 3. まとめ

本報告の要点をまとめると以下のようになる。

- 1) 成層期において、取水と放流が流動と成層に与える影響に関し、既往の知見をまとめた。この結果を踏まえ、流動と水質の数値シミュレーションを行い、大鶴湖において、水温躍層形成時に、躍層近傍や底層で微弱な乱流混合が存在する可能性を示した。
- 2) 大鶴湖において、ADCPを用いた流動観測、ならびに水質・底質の観測を実施した。8月末の出水の影響により、2024年の9月以降は、水温成層が形成されにくい条件になっていたが、ADCPにより流動パターンを正確に観測できていることが確認された。また、成層期において大きな出水があると、一時的に水温成層が消失することもあり、そのような状況に対し、重要なデータが取得できた。

### 謝 辞

本研究を遂行するにあたり、研究助成をしていただいた一般社団法人 九州地方計画協会に深甚なる謝意を表します。また、国土交通省九州地方整備局・鶴田ダム管理所の皆様、鹿児島大学工学部の学生諸氏、技能補佐員の仮屋崎潮氏に、多大なるご協力をいただきました。ここに深甚なる謝意を表します。

### 参考文献

- 1) Davis, J. E., Holland, J. P., Schneider, M. L., and Wilhelms, S. C. (1987), “SELECT: A numerical one-dimensional model for selective withdrawal”, Instruction Report E-87-2, U. S. Army Engineer Waterways Experiment Station, Vicksburg, MS.
- 2) Smith, D. R., Wilhelms, S. C., Holland, J. P., Dortch, M. S. (1987), “Improved Description of Selective Withdrawal through Point Sinks”. Technical Report E-87-2, U. S. Army Engineer Waterways Experiment Station, Vicksburg, MS.
- 3) K.W. Thornton, Bruce L. Kimmel, Forrest E. Payne (1990) : Reservoir Limnology: Ecological Perspectives, Wiley-Interscience.
- 4) 安達貴浩・小橋乃子(2025), ダム貯水池におけるリンの鉛直分特性に関する一考察, 土木学会論文集, 81 巻 16 号, 24-16028. 2025年, DOI : 10.2208/jscej.24-16028.