

底部に不安定水温成層を有する貯水池の水温・水質観測

*Field Survey on Temperature and Quality of Reservoir Water
with Unstable Thermal Stratification in Bottom Layer*

神田 徹*・道奥康治**・西川孝晴***

東野 誠****・伊藤達平*****・石川勝久*****

*By Tohru KANDA, Kohji MICHIOKU, Takaharu NISHIKAWA
Makoto HIGASHINO, Tatsuhei ITOH and Katsuhisa ISHIKAWA*

A field survey is carried out in order to examine water quality behaviors and thermal structure in a eutrophic reservoir, where very distinctive features are found in water quality profiles. Although temperature gradient is dynamically unstable in the bottom layer, thermal stratification has never been overturned even in a severe cold winter. On the other hand, electric conductivity is extraordinarily high in bottom layer to compensate density defect due to inverse thermal stratification. This suggests that there might be high concentration of dissolved materials and nutrients which are supposed to be originated from the reservoir bottom. In addition, dissolved oxygen is very poor in bottom layer. Based on the field survey it is investigated what kind of mechanism works to construct such a characteristic profiles of water qualities.

Keyword; reservoir water quality, multi-density stratification, eutrophication

1. はしがき

水深の大きな湖沼や貯水池では、有機物質が下層に沈降・分解する過程において酸素を消費し、下層水が貧酸素状態に至る。その結果、栄養塩や金属成分の溶出、硫化水素の発生など、様々な水質障害をもたらす。水温成層の安定効果により鉛直循環が抑制される受熱期において下層水は停滞するが、冬季寒冷期には全水深にわたる大循環が下層水を浮上・拡散させ滞留水が消失することは通常の貯水池で観測される。本報で観測調査が行われた貯水池は、1) 冬季においても下層水が残留し、下層は通年にわたり電気伝導度が高く貧酸素状態である、2) 湖底付近の水温は常にその直上層より高温で、4℃以上にもかかわらず逆列成層が形成されている、3) 逆列成層は冬季においても消滅することがなく、1年を通じて形成されている、などの特異な水質構造を有している。類似の水質構成は海水が侵入して水温と濃度の多重成層を成す汽水湖や河口堰付近でしばしば見られるが、内陸部の貯水池においてこのような水質構造が観測された例は僅かである¹⁾。長期にわたり下層水が滞留しても底部に封じ込められ、これが放流されない限り特に水質問題は生じないが、気象・水文条件によっては乱流拡散や対流混合によって滞留水塊が浮上し深刻なトラブルをもたらす恐れがある。本研究では、当該貯水池において水温・水質の定期観測を行い、このように特異な水質特性を呈する下層水の形成・維持機構を検討した。

*	正会員	工博	神戸大学教授	工学部建設学科（〒657 神戸市灘区六甲台町1-1）
**	正会員	工博	神戸大学助教授	工学部建設学科
***	正会員		兵庫県土木部	（〒650 神戸市中央区下山手通5-10-1）
****	学生会員	工修	神戸大学大学院自然科学研究科後期課程	
*****	学生会員		神戸大学大学院自然科学研究科前期課程	

2. 観測概要

本研究で対象としたA貯水池の平面図を図-1に、ダム縦断面を図-2に示す。本貯水池は洪水調節と既得用水(灌漑用水等)の補給を目的とした治水ダムである。図-1中には水質の定期観測を行っている基準点を、図-2中に採水水深(上層、中層、下層)を示す。観測期間中はEL.195mの高さに位置する取水口より放流されていた。湛水面積は 0.134 km^2 、最大水深は32mであり、湛水面積の割に水深の大きいことが特徴である。1年間の水の交換率(1年間の総流入量/総貯水容量)は1994年で1.93と非常に小さく、受熱期に安定な水温躍層が取水口近傍の水深に発達し、相当大きな出水によっても底層水は放流されずに滞留する。このダム貯水池において、水温、溶存酸素(DO)飽和度、電気伝導度(EC)、全蒸発残留物質質量(TR)、金属成分濃度(Fe,Mn,Na)の定期観測を行った。水温、DO飽和度、ECは現地観測を行い、TR、金属成分濃度は採水試料を上水試験法に従い分析した。観測データをもとに、水温、DO飽和度、ECの季節変化特性を調べ、特に下層水の水質挙動を明らかにした。また、1年間を通して消滅することのない底部の逆列水温層の維持機構に関連して、水質と密度構成との関係を明らかにした。この他の観測項目として、風速、気温、貯水池流入量・流出量をダム管理事務所が観測している。

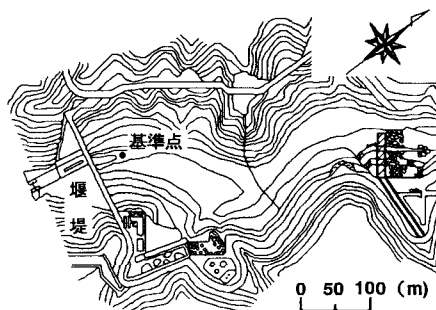


図-1 平面図

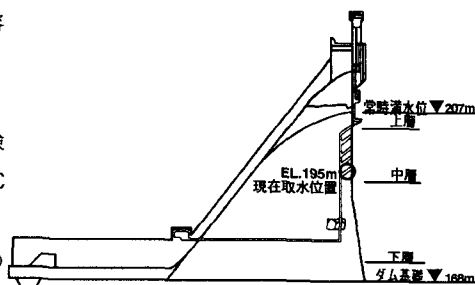


図-2 ダムの縦断面図

3. 水温、水質諸量の季節変化

水温、ECの季節変化を図-3、図-4に示す。図中の網掛け部は、DO飽和度<5%の貧酸素領域である。

3. 1 水温の季節変化

5月から10月にかけては強い水温躍層が形成されている。流入量の少なかった'94年の8月から9月には水温差が 18°C である躍層がEL.195m付近に形成され、時間とともに低下しながら11月頃まで維持されていた。これに対し、流入量の多かった'95年は'94年ほど水温変化の大きい躍層は形成されていない。

また、この貯水池の底部には湖底に近づくほど水温が高くなる逆列水温層が形成されている。この層は、'94年は5月から8月にかけてEL.186m付近の高さにまで及ぶ。逆列水温層が循環期においても消滅しないことから、本貯水池では全水深にわたる大循環が1年間を通して生じないと推測される。逆列水温層内の水温は $5.5^{\circ}\text{C} \sim 6.5^{\circ}\text{C}$ の範囲で季節的に変化している。純水の密度は 3.98°C で最大 1 kg/l であり、 3.98°C 以上の密度は水温の単調減少関数である。したがって、鉛直下方向に水温が上昇する成層は、密度を水温のみの関数と考えた場合、力学的に不安定である。

3. 2 貧酸素領域の季節変化

本貯水池には周年にわたり中層から下層にかけて貧酸素領域が存在している。貧酸素領域は水温躍層が取水口付近に形成される5月から10月にかけてEL.184m付近にまで拡大し、躍層界面で水温差が 18°C となった'94年8月にはEL.197mにまで上昇した。流入量が多かった'95年では貧酸素領域の増大は'94年ほどではなく、8月の時点でEL.191m付近までにとどまっている。'94年の放熱期には自然対流による成層浸食作用により貧酸素領域が縮小している。1月、2月の寒冷期においては、底部の逆列水温層にほぼ対応するように貧酸素領域がEL.182mまで低下するが消滅することではなく、1年間を通して維持されている。

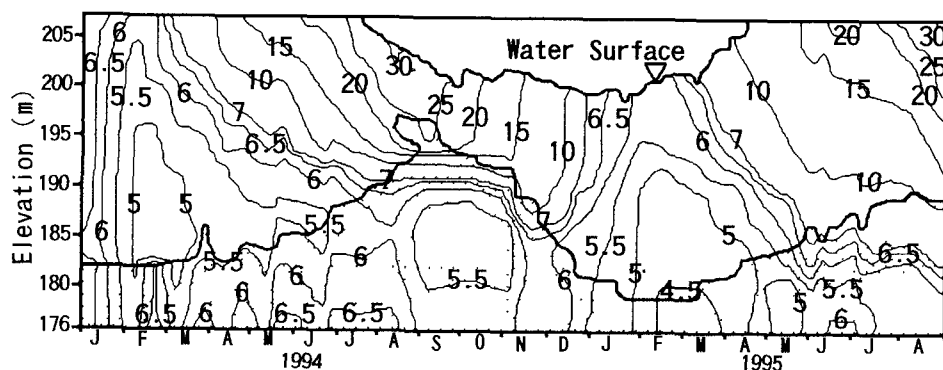


図-3 水温の季節変化（図中の数字は水温(°C)）

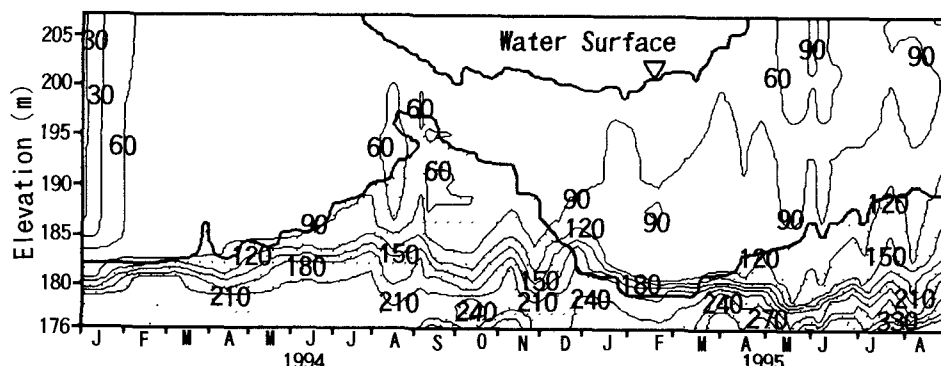


図-4 ECの季節変化（図中の数字はEC(μS/cm)）

3. 3 電気伝導度の季節変化

周年にわたって、EL.180～185m付近より下方では電気伝導度の高い層が存在している。1月から3月にかけて、このECの急変層は貧酸素領域の上端の位置とほぼ一致しているが、その他の期間では両者は必ずしも対応していない。すなわち、4月から12月にかけては水温勾配が逆転している水深と貧酸素領域の上端位置がほぼ一致しているのに対し、ECの急変層はこれらより下方に位置している。貧酸素領域の拡大が見られた'94年の8月から10月にかけてはこのような傾向がより顕著に見られ、ECは貧酸素領域と異なる季節変化を示している。湖底より2～3mの層では周年にわたり $EC > 220 \mu S/cm$ とECが著しく高く、これは密度構成に密接に関与する物質が高濃度に含まれている可能性を示唆する。

3. 4 Fe, Mn, Naの濃度の季節変化

ECは水中の含有物質と正の相関関係があることから、底部の逆列水温層での密度欠損量は何らかの物質濃度によって補償されているものと考えられる。そこで、基準点において貯水池の上層（水深2.5m）、中層（取水口直下1m）、下層（湖底直上2m）の水、および流入水、流出水を採取し、全鉄濃度（T-Fe）、全マンガン濃度（T-Mn）、全ナトリウム濃度（T-Na）を分析した。分析結果を図-5～図-10に示す。また、底泥に含まれるT-Fe、T-Mn、T-Naの濃度を表-1に示す。

(a) Fe

図-5によれば、流入水に含まれるT-Feは $0.01 \sim 0.04 mg/l$ であるのに対し、流出水には $0.03 \sim 0.61 mg/l$ とより高濃度のFeが含有されている。貯水池内のT-Feの濃度については、図-6に示すように上層で $0.05 \sim 0.54 mg/l$ 、中層で $0.04 \sim 0.54 mg/l$ でほぼ同程度であるのに対し、下層では $0.21 \sim 13.8 mg/l$ と大きな値を示している。また、表-1のように本貯水池の底泥中にはT-Feが $34,000 \sim 39,000 mg/kg$ と高濃度に含まれている。流入水のT-Feの濃度に比べて流出水のそれは常に高いこと、また下層水および底泥ではT-Feの濃度

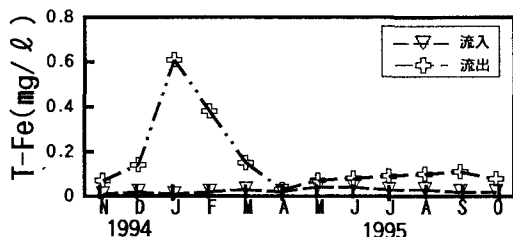


図-5 流入水，流出水中のT-Feの濃度(mg/ℓ)

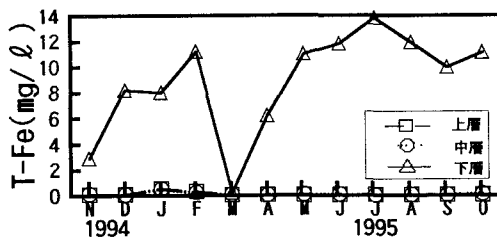


図-6 貯水池水中のT-Feの濃度(mg/ℓ)

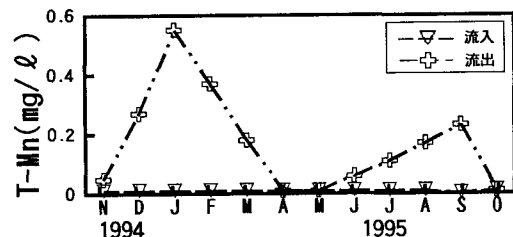


図-7 流入水，流出水中のT-Mnの濃度(mg/ℓ)

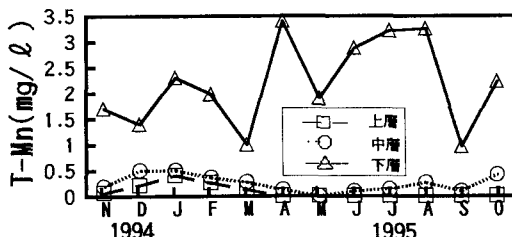


図-8 貯水池水中のT-Mnの濃度(mg/ℓ)

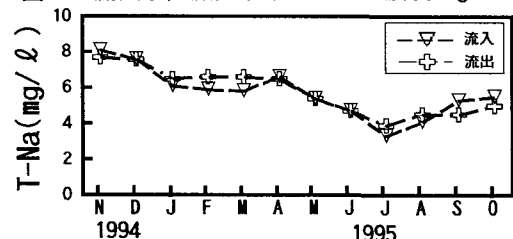


図-9 流入水，流出水中のT-Naの濃度(mg/ℓ)

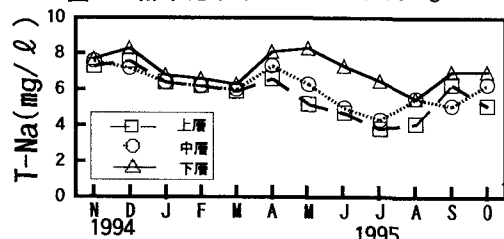


図-10 貯水池水中のT-Naの濃度(mg/ℓ)

表-1 底泥中に含まれるT-Fe,T-Mn,T-Na濃度(mg/kg)

観測日	1994年		1995年					
	11/17	12/15	1/12	3/15	4/13	5/17	6/15	7/14
T-Fe	36.000	35.000	39.000	34.000	34.000	39.000	33.000	36.000
T-Mn	870	780	910	780	780	880	860	850
T-Na	10.000	10.000	11.000	9.800	8.500	12.000	14.000	15.000

が非常に高いことから，貯水池に流入した水が貯水池内で還元状態にある下層水との化学作用によって底泥からFeの供給を受け，その結果流出水のT-Feの濃度が増加すると推測される。

(b) Mn

図-7に示すとおり，Feと同様に流入水のT-Mnの濃度が0.01mg/ℓであるのに対し，流出水は0.01～0.55mg/ℓと高い濃度を呈している。また，図-8より貯水池水中の濃度に関しても下層ほど高濃度のT-Mnを含む。T-Feと異なる特徴として，上層より中層での濃度が高いこと，中層と下層との濃度差がT-Feほど大きくないことが挙げられる。ここで鉄イオン Fe^{2+} および Fe^{3+} とマンガンイオン Mn^{2+} の物理化学的性質の違いに着目すれば，前者の方が後者より酸化されるときの酸化還元電位が高く，好気性状態では $\text{Fe}(\text{OH})_3$ などの形態で底層に沈降する可能性が高いことが推察できる。すなわち，中層のように少しでもDOが存在する層においては，Mnの方がFeよりイオンとして溶存する可能性が高く，その結果，下層水と中層水で検出される相対的な濃度差はT-Feの方がT-Mnより大きくなるものと推定される。下層においてT-Mnが高い濃度を示す原因は，T-Feの場合と同様に，嫌気性状態のもとで底泥から水中へMnが溶出されるためと考えられる。

(C) Na

図-9より、流入水と流出水は同程度の濃度を示す。図-10に示すように貯水池内での濃度は、T-Fe、T-Mnのように水深による顕著な差は認められない。一般に鉛直方向にイオン物質濃度が成層化する原因としては、①湖底からの地下水の湧出、②高濁度水の下層への潜り込みと貯留、③生化学的過程による酸素の生産、消費によって鉛直方向にDO飽和度が成層化すること、等が考えられる。生化学的過程によって濃度が鉛直方向に成層化し得る物質としては、Fe、Mnが挙げられる。湖底からの湧水によって成層化する原因物質としてはFe、Mnの他にNaが挙げられる。したがって、T-Naの濃度の鉛直方向変化が、湖底からの湧水の有無を確認する目安となる²⁾。上記の観測結果より、本貯水池の下層での逆列水温層、高電気伝導度層の形成に湖底からの湧水は関与してないものと推定される。

4. 貯水池の密度に関する考察

上述のように貯水池の下層にはFe、Mnなどが上・中層に比べて高濃度に含まれていることが明らかになった。そこで、これらの上・中層と下層との物質濃度の差が、逆列水温層での密度欠損分を補償し得るかを検証する。貯水池水を仮に純水と見なして、水温のみから算定した密度分布の季節変化を図-11に示す。逆列水温層が形成されている下層付近で不安定な密度構造が形成される。この層内の密度欠損量はおよそ100～200mg/lである。一方、逆列水温層に相当する水深位置に含まれる水中含有物質の量を採水計測したところ、約150～200mg/l程度の値となり、逆列水温層での密度欠損を十分に補償しうる量であることがわかった。そこで、全蒸発残留物質(TR)を淡水の塩分と定義し、次式で示される海水の状態方程式より密度を算出した³⁾。

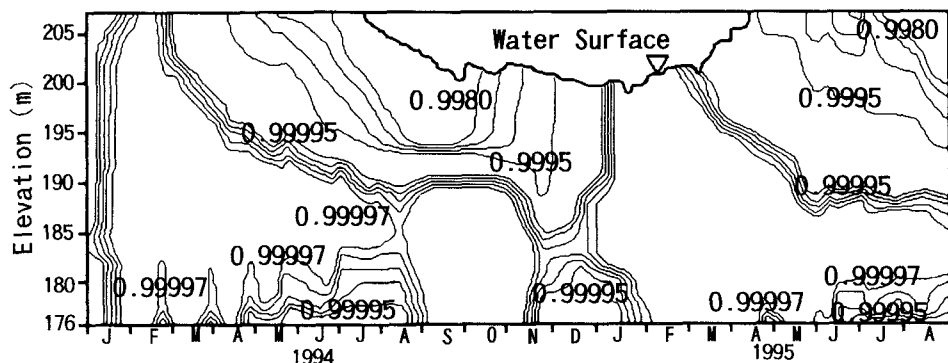


図-11 水温のみから算出した密度の分布(kg/l)

$$\rho(S, t, p) = \rho(S, t, 0) / \{1 - p/K(S, t, p)\}$$

ここに、 ρ : 密度 (kg/m^3)、 t : 水温 ($^{\circ}\text{C}$)、 p : 水圧 (bar) (1気圧のとき0とする)、 S : 塩分 (水1kg中に含まれる固形物質の全重量をg単位で表したもの)、 $K(S, t, p)$: 体積弾性率。この式から算出された密度では下層部での不安定な密度構造は解消されるものの、密度の観測値より小さな値となった⁴⁾。海水の状態方程式から密度を算出する場合、標準海水とサンプル水のECの比から塩分を求めるが、その際標準海水とサンプル水の塩分の成分構造は同一でなければならない。ところが、NaClを主成分とする海水の塩分と貯水池水の塩分ではその成分構造が異なるため、

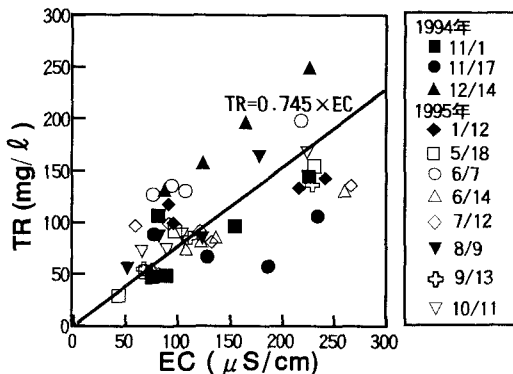


図-12 TRとECの相関

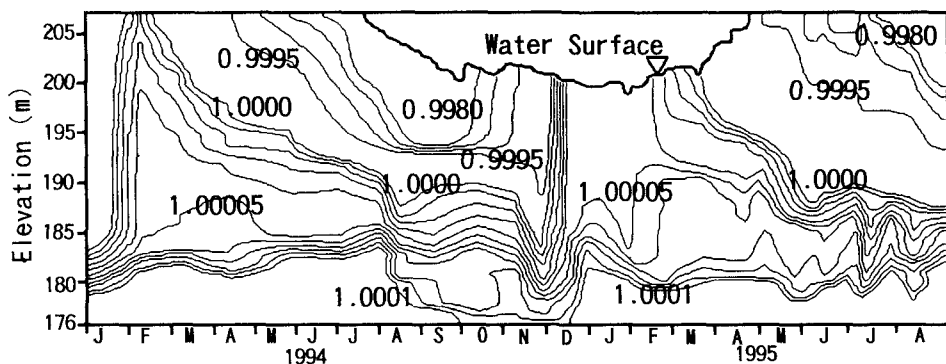


図-13 TRによる密度増分を加算した密度の分布(kg/ℓ)

海水と同じ定義により算出した塩分は観測値よりも小さな値になったと考えられる。そこで、より正確な密度分布を算定するために、採水試料より求めた全蒸発残留物質 (TR) と EC の相関関係を用いることにする。図-12 に示すように、観測日毎に TR の値にばらつきがあるものの、TR-EC 間には有意な相関がある。観測データをもとに、次の回帰式を得る。

$$TR = 0.745 \times EC$$

TR を多点で正確に観測することは実際上は困難であるため、本研究では EC の観測値より上式の関係を介して溶存物質による密度増加量を求め、これを水温から求めた純水の密度に加算して密度を算出する。このようにして補正された密度分布の季節変化を図-13 に示す。逆列水温層において TR による密度偏差が密度欠損部分を補償し、力学的に安定な密度成層が構成されていることがわかる。

5. むすび

本研究で得られた結果を以下にまとめる。

- ① A 貯水池底部には逆列水温層が周年にわたって形成されている。この底部は 1 年を通して EC が高く、貧酸素状態である。また、逆列水温層の水温は僅かながら季節的に変化している。
- ② T-Fe、T-Mn の濃度が鉛直方向に成層化するのに対し、T-Na の濃度は成層化しない。これより、本貯水池では湖底からの湧水は存在しないと考えられる。
- ③ 逆列水温層では、水温上昇に伴う密度の欠損分を水中溶存物質が補償している。TR による密度増分を水温のみから算出した密度に加算すれば、逆列水温層が力学的に安定な構造をもつ。

本研究を開始するに先立ち、宇部短期大学松本治彦教授、山口大学羽田野袈裟義助教授から適切なご助言を頂いた。記して謝意を表する。

参考文献

- 1) 松本治彦・斉藤隆・羽田野袈裟義：異常水温成層を形成するダム貯水池の水の挙動と指標物質，水環境学会誌，第 16 巻，16 号，pp.696-703，1993.
- 2) 吉村信吉：湖沼学（増補版），生活技術センター，1976.
- 3) 気象庁編：海洋観測指針，日本気象協会，pp.696-703，1993.
- 4) 神田・道奥・西川・山田・伊藤・石川：貯水池における逆転水温層の挙動特性，平成 7 年度土木学会関西支部年次学術講演会，1995.