

底部に逆転水温層を有する部分循環貯水池の水質構成に関する研究

道奥康治¹・神田 徹²・伊藤達平³・西川孝晴⁴・石川勝久⁵・東野 誠⁵

¹正会員 工博 神戸大学助教授 工学部建設学科 (〒657 神戸市灘区六甲台町1-1)

²正会員 工博 神戸大学教授 工学部建設学科 (同上)

³正会員 修(工) (株)アイ・エヌ・エー (〒162 東京都新宿区水道町3-1)

⁴正会員 兵庫県土木部河川開発課 (〒650 神戸市中央区下山手通5-10-1)

⁵学生会員 神戸大学大学院自然科学研究科 (〒657 神戸市灘区六甲台町1-1)

対象とする貯水池は、底層で物質濃度が高く、水温勾配が逆転しており、また年間を通じて貧酸素水塊が安定に維持される部分循環貯水池である。この特徴的な水温・水質構造の形成要因と水域の富栄養化現象との関連性を明らかにするために、多項目の水質指標を計測・分析した。底層付近では鉛直下方に水温が増加し不安定な水温勾配を呈するにもかかわらず、底層水塊が通年的に滞留している。水質観測より、貯水池底層から下層には逆転水温勾配の密度欠損量を補償するに十分な高濃度の溶解性物質・浮遊物質が含まれることが明らかになった。鉄・マンガンなど金属成分は底層が貧酸素化した他の水域でも観測されるように高濃度を呈するが、その重量百分率は比較的小さく、底層水の密度構成に寄与する主成分はカルシウム、強熱減量から推定される有機物質濃度、などであった。貯水池水の水質分析に基づいて水質輸送過程を考察し、水質構造の形成要因、富栄養化と水質分布との関連性を実証的に明らかにした。

Key Words : reservoir water quality, field measurement, thermal stratification, eutrophication, nutrient, double-density structure

1. 序論

(1) 研究の背景

貯水池の水域環境は、流域の気象・水文条件、地理特性、社会環境、貯水池の利用形態、湛水後の経過年数、など種々の条件に支配される。水質に問題を限定しても、多くの水域で共通に見られる事象と各水域固有の現象があり、汎用性の高い水質予測モデルを確立するためには多くの課題がある。現在、水域環境を良好に保全し改善方策を講ずることが強く求められており、適切な水域環境評価が必要となっている。多岐にわたる水質収支則を定式化しこれに基づいて環境監視システムを構築するためには、現地観測による実証研究の推進がより一層重要である。

(2) 既往の研究

本研究で対象とする A ダム貯水池は、表層におけるプランクトン・有機物質の集積と過飽和状態、底層における貧酸素化・栄養塩の溶出など¹⁾、一般に言われ

る富栄養化現象に加え、以下のように特徴的な水質特性を有する。

①底層付近で水温が鉛直下方に増加する「逆転水温層」が通年的に維持されており、底層水はその直上の層より常に高温である。

②1986年6月に開始され、1991年6月より約1ヶ月毎の頻度で定期的に行われた水質観測に基づけば、少なくとも現在に至るまでの全ての観測日において常に底層水は滞留しており、寒冷期においても大循環が生じない「部分循環湖」である。

海水侵入をともしなう汽水湖や河口堰においては、これに類似した水質構成の観測例がある。八木²⁾は汽水湖である深見池において水質観測を行った。水温成層化した夏期において底層が貧酸素化しその酸化還元境界面において全マンガン T-Mn (以後、T-Mn と称する) の濃度が極大値を示すのに対し、全鉄 T-Fe (以後、T-Fe と称する) は水深とともに単調増加することを報告している。両者の分布性状が異なる原因として、酸化還元電位の差異、H₂S と Mn, Fe との硫化物生成

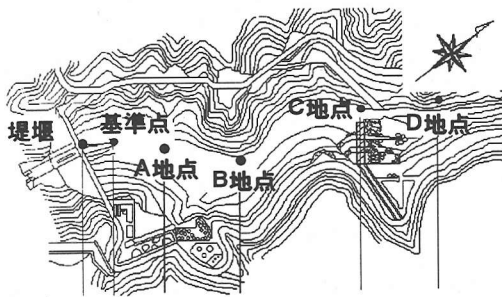


図-1 Aダム貯水池の平面図と水質観測地点

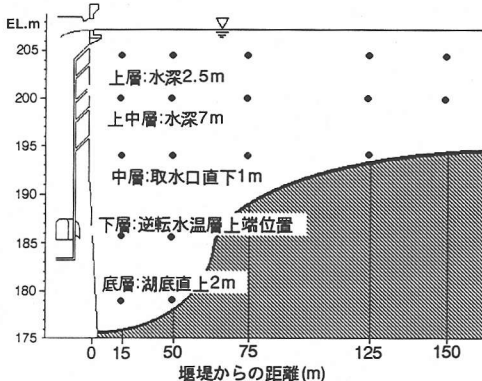


図-2 Aダム貯水池の縦断面図と採水位置

機構の違いなどが考えられることが明らかにされた。由佐³⁾は高濃度物質の流入負荷をともなう汽水湖である水月湖において全潜型フロートによる密度の直接計測を行い、逆転水温層においても高い電気伝導度の層によって密度成層が安定に維持されていることを実証した。自然湖沼における水温逆転層の観測とその要因に関する議論については、吉村^{4),5)}によりなされている。その報告では、湖により密度の大きな地下水成分の湖底からの溶出の可能性などを指摘しているが、明らかな原因がわからない場合も多い。

一方、山間部の貯水池や湖沼において、このように水質と水温からなる多重成層構造が観測された例は少ない。大久保ら⁶⁾は琵琶湖の水温・濁度の観測を実施し、河川流入部付近において出水後に高濁度で低温の水塊が局所的に存在し、熱・物質から成る二重拡散成層の存在を示唆した。

以上の報告例ではいずれも塩水や濁度など高密度をもたらす原因物質の外域からの顕著な流入負荷を伴っており、高濃度層は池内の物質収支のみに起因するものではない。他方、松本ら⁷⁾は底層に逆転水温層と高い物質濃度が検出される貯水池の水質観測を実施し、本研究で対象とする貯水池と類似の水質構成が見られることを報告している。しかし、この貯水池では冬季において全層が循環しており、本文で対象とするダム貯

水池のような部分循環湖ではない。

(3) 研究目的

力学的に不安定な逆転水温勾配を有するにもかかわらず、数ヶ年以上にわたり密度成層が安定に維持され、その間底層水がほとんど交換されないことは、これまでに報告されてきた富栄養化現象に見られない特徴である。また、冬季に全層の大循環が生ずる通常の湖沼・貯水池では予想されないような部分循環水域特有の水質障害が将来発現する可能性もある。さらに、例えば、深水層循環曝気による貧酸素水塊の解消などの水質制御を施した場合、その効果を事前評価する上で、溶存酸素量と各水質項目との相互関係、底層水質の形成・維持機構と溶存酸素量との関連性、などの情報が不可欠となる。

以上の点を勘案して、筆者らは底層水塊の挙動特性に重点をおいて、多項目水質成分の総合観測を実施した。本文では、観測資料に基づいて貯水池内の物質収支や水温構造が底層水塊の挙動・富栄養化現象に及ぼす諸要因を考察し、水質特性に関する実証的知見を得ることを研究目的としている。

2. 観測対象とした貯水池の概要

(1) 貯水池の諸元

観測対象としたAダム貯水池は、兵庫県内の瀬戸内海気候の地域に立地し、洪水調節と既得用水（灌漑用水・上水道など）の供給を行うために建設されたダム貯水池である。貯水池の平面図を図-1に、縦断面図を図-2に示す。図-1中には水質の観測点を、図-2中には採水位置を示す。本観測期間におけるダム放流は、堤体に設置された5門の放水口のうち最下段(EL.195m)の放水口から、また水位が常時満水位を越える場合にはEL.207mのオリフィスから行われていた。ダム貯水池の計画諸元は、集水面積8.73km²、計画洪水流量100m³/sec、総貯水容量1.95×10⁶m³、有効容量1.70×10⁶m³、である。また、湛水面積0.134km²、最大水深32mで、湛水面積に対して比較的水深の大きい貯水池である。貯水池水の年間交換率 α (=一年間の総流入量/総貯水容量)は2~5と小さく、受熱期には安定な水温躍層が放水口近傍の水深で発達し、かなり大きな出水によっても底層水は上層水と交換されずに滞留する。

(2) 水文特性

観測期間における水文諸量の時系列を図-3に示す。年平均流入量は9.25×10⁶m³、平水流量は0.09m³/secである。一方、'94年は記録的な渇水年であり、7月以降の降水量が少なく貯水量は急速に減少し、12月には常時満水面(EL.207m)より10m近く水位が低下した。年間交換率は渇水年の'94年で $\alpha=1.93$ 、'95年では $\alpha=4.04$ で

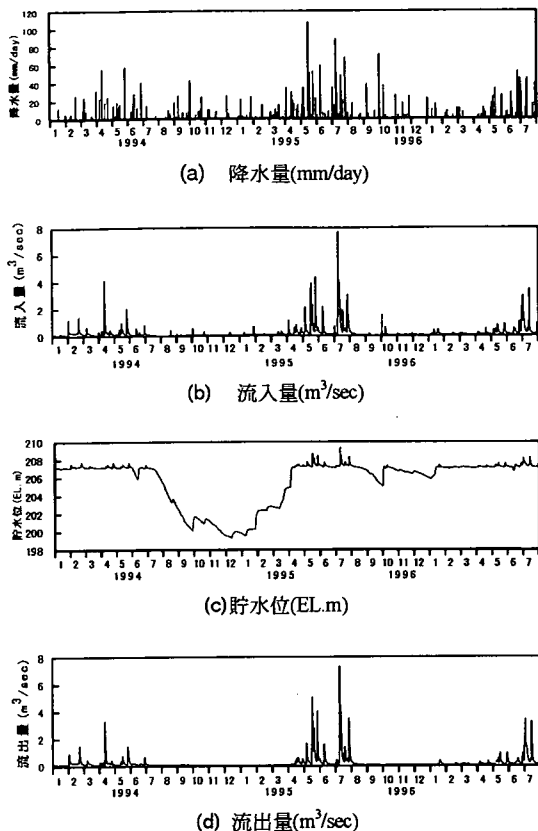


図-3 観測期間中の水文諸量の時系列

あった。また、'95年の5月中旬および7月初旬の出水時における交換率 β (=一洪水の総流入量/総貯水容量)は、それぞれ $\beta=0.59, 0.86$ であった。

3. 水質観測と分析の方法

水質観測は、'94年度より1回/月の頻度で水温ならびに以下の項目に関して実施した。

('94年8月～)

溶存酸素飽和度(DO), 電気伝導度(EC), 濁度

('94年9月～)

浮遊物質濃度(SS), 全蒸発残留物質濃度(TR),
化学的酸素要求量(COD), 強熱減量(IL)

('94年10月～)

pH

('94年11月～)

金属成分濃度: T-Fe, T-Mn, Na

('95年6月～)

全窒素濃度(T-N), 全リン濃度(T-P)

イオン成分濃度: Na^+ , NH_4^+ , K^+ , Mg^{2+} , Ca^{2+} ,

Cl^- , NO_3^- , SO_4^{2-} , F

('95年8月～)

酸化還元電位(ORP)

水温, DO, EC, 濁度については, 図-1の基準点とA~D地点において水深方向0.5~1.0mの間隔で計器により現地観測を行った。DOについては, DOメーターの校正を兼ね必要に応じて採水分析も行った。本文中のECは温度補正をした値である。

その他の水質項目については, 図-2に示す観測点でバンドーン採水器により試料水を採取し, 定量分析を行った。図における「上層」は水深2.5m, 「上中層」は水深7m, 「中層」は放水口近傍のEL.194m, 「下層」は後述の逆転水温層上端付近の高さ, また, 「底層」は池底上方2mにそれぞれ位置する採水点である。TR, COD, T-N, T-P, ILについては下水試験方法(1984年版)⁸⁾に, その他の水質項目については上水試験方法(1993年版)⁹⁾に準拠して分析した。ただし, ILについて, 下水試験方法によれば通常原水より強熱減量分を求めるが, ここでは後述のようにSSとの二重カウントをさけるため, 1 μm のグラスファイバー濾紙で吸引濾過してSS成分を除いた濾過液に対して強熱減量を定量した。金属成分の濃度は原子吸光度法(フレーム法)によって, 各イオン成分の濃度はイオンクロマトグラフ法によって測定した。イオン成分を計測する試料に関しては, 酸化還元電位ORPとpHも併せて計測した。

流入河川水と貯水池流出水についても, 同様の項目に関する水質分析を行った。

加えて, 1日スケールで生起する池内水の変動事象を捉えるために, サーミスターチェーンを用いて多点(水深方向32点)水温周日連続計測を別途実施した。

4. 計器観測に基づく水質指標の池内分布特性

(1) 水温構造

図-4は水温の季節変化を, 図-5は水温の鉛直勾配($\partial T / \partial z$) (単位は $[\text{C}/\text{m}]$, z は鉛直下向きの座標)の季節変化を示す。'94年, '95年ともに5~10月の受熱期において安定な水温躍層が放水口付近に形成されている。また, 流入量の少ない'94年に比べ, '95年の方が躍層部での水温勾配は小さい。放熱期においては自然対流の擾乱効果によって水温躍層が11月頃まで徐々に低下し, その後消失する。

本貯水池における水温構造の特徴は, EL.185mより下層で($\partial T / \partial z > 0$)の「逆転水温層」が見られる点である。貯水池水を純水とみなした場合, 水温が $T > 3.98\text{C}$ の範囲では, これは不安定な密度成層である。しかし, 図-5のように冬季においても貯水池の循環は底層まで及ばず, 逆転水温層が安定に維持されていることから, 底層においては水温による不安定密度勾配を補償するに十分な高濃度の密度構成物質が含有されていると推

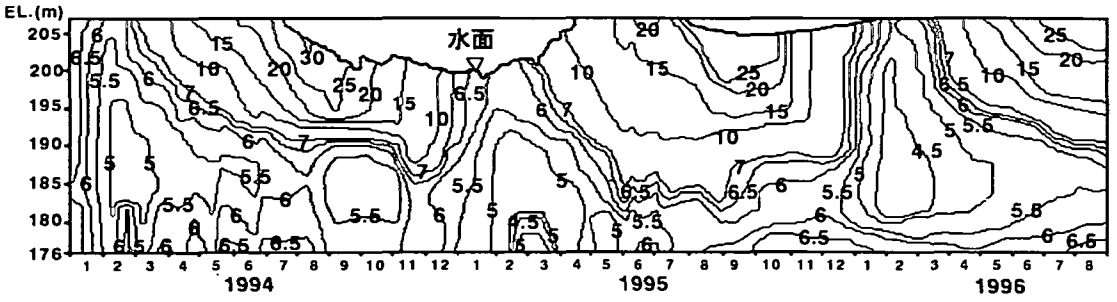


図-4 水温の季節変化(基準点, 単位は [°C])

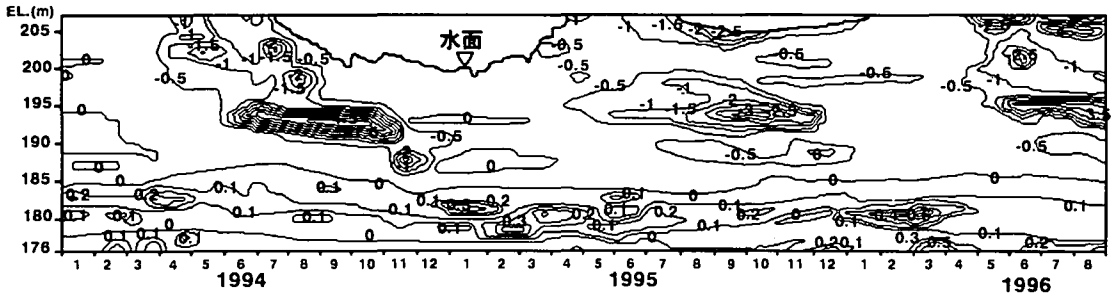


図-5 水温の鉛直勾配 ($\partial T / \partial z$) (ここに, z は鉛直下向きの座標)の季節変化(基準点, 単位は [°C/m])

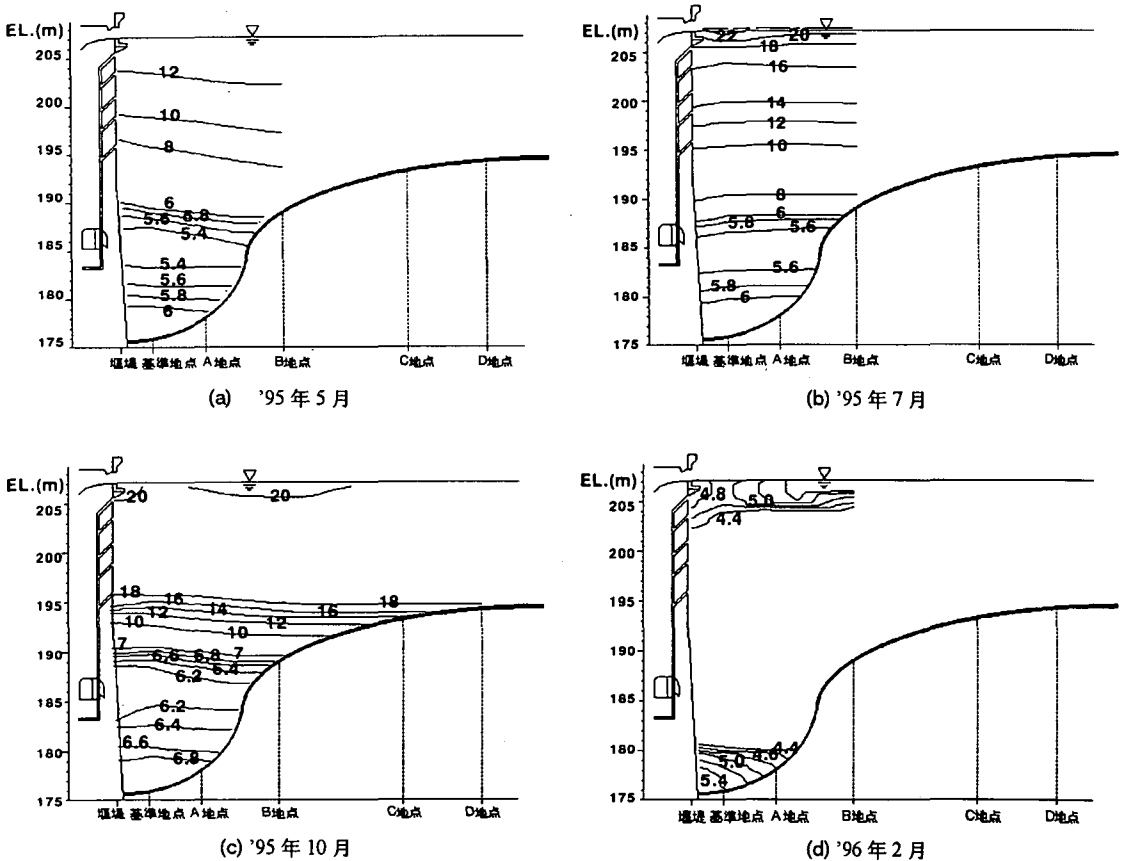


図-6 水温の縦断分布(°C)

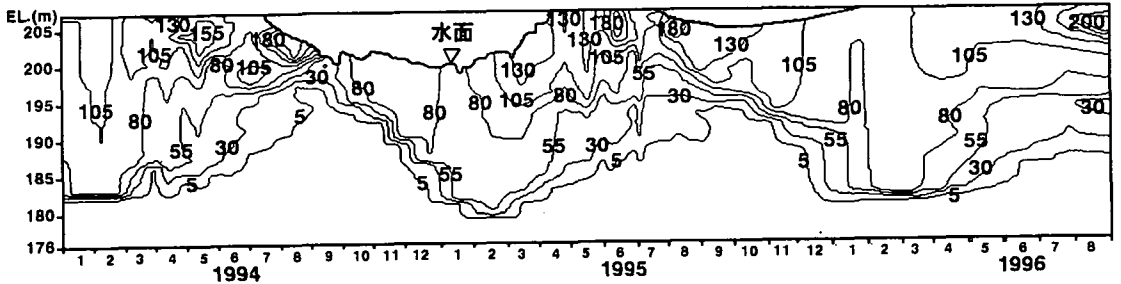
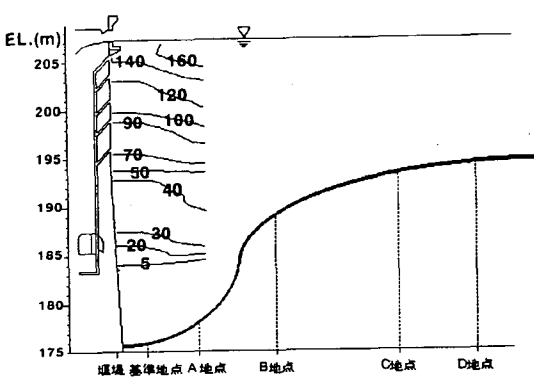
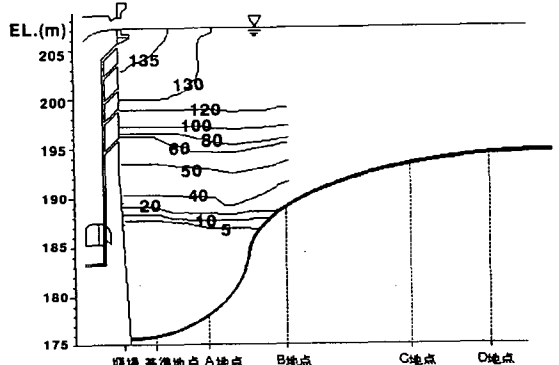


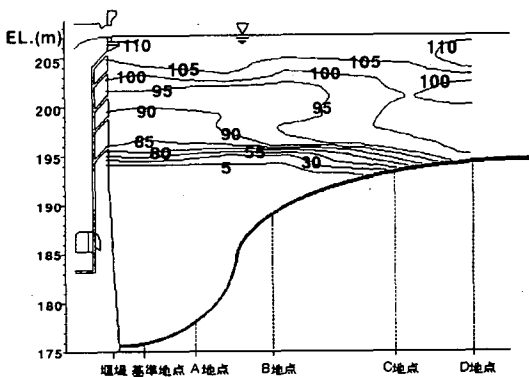
図-7 溶存酸素飽和度 DO の季節変化(基準点, 単位は [%])



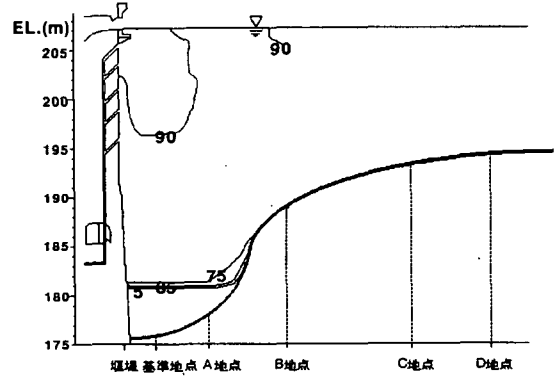
(a) '95年5月



(b) '95年6月



(c) '95年10月



(d) '96年2月

図-8 DOの縦断分布(%)

察される。逆転水温層の厚さは時間的に大きく変化しないが、その水温は5.5~6.5℃の範囲で季節的に変動している。

図-6は各月に観測された水温の縦断分布を示す。水温は縦断方向にほぼ一様に分布し、逆転水温層は1年を通して貯水池最深部にほぼ水平に滞留していることが確認される。

(2) 溶存酸素飽和度: DO

図-7は基準点で観測された溶存酸素飽和度DO(%)の

季節変化を示す。季節によって中層あるいは下層が深が貧酸素化している。貧酸素領域の厚さは8~9月頃が最大となっており、1~2月の寒冷期に最も縮小している。受熱期における貧酸素領域の拡大は、生産層から沈降する有機物質の分解に伴う酸素消費に起因すると考えられ、これは他の貯水池や深い湖沼でもしばしば観測される現象である¹⁰⁾。特に、水温躍層が非常に安定となる受熱最盛期には、成層の浮力安定効果で上下層間の水質交換が抑制されるために貧酸素層が最も厚くなる。躍層面での水温勾配が大きな'94年の方

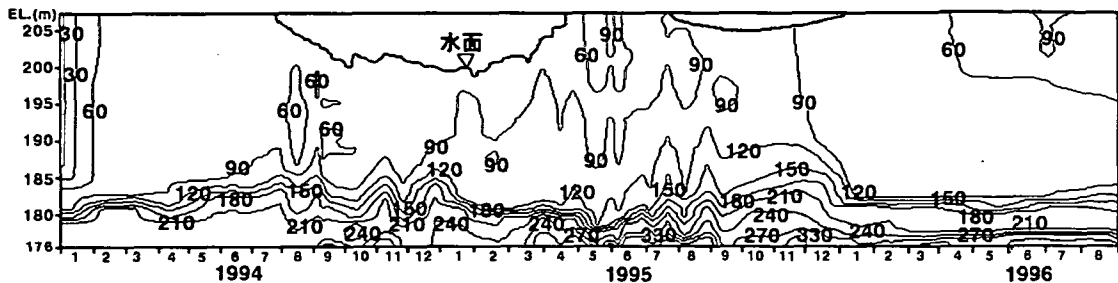
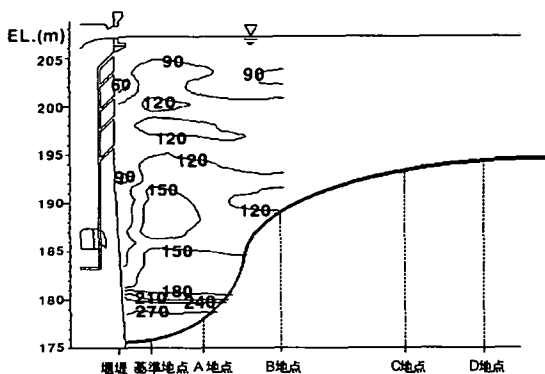
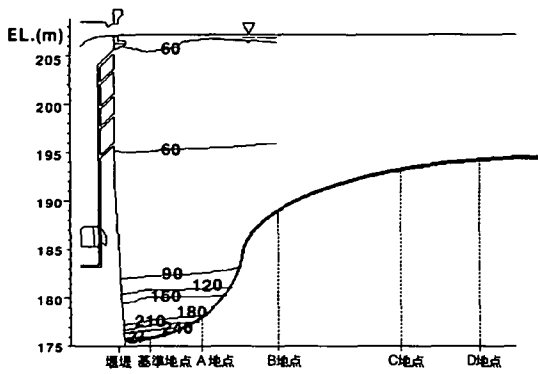


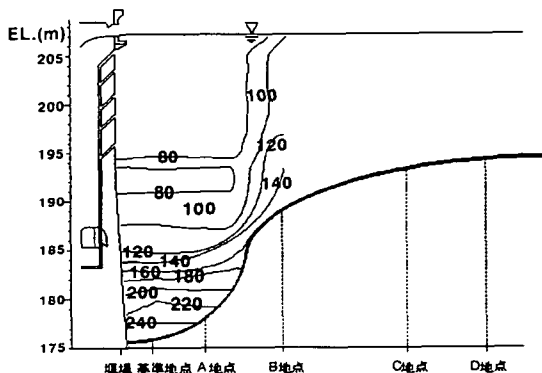
図-9 電気伝導度 EC の季節変化(基準点, 単位は $[\mu\text{S}/\text{cm}]$)



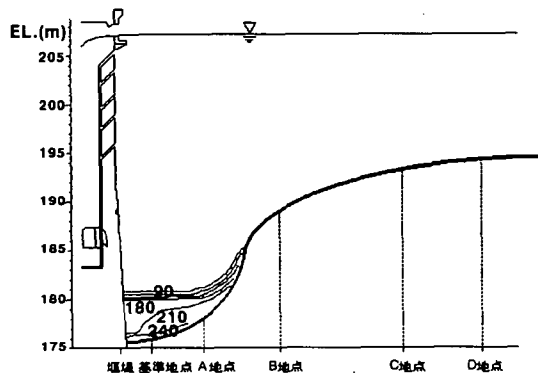
(a) '95年5月



(b) '95年7月



(c) '95年10月



(d) '96年2月

図-10 電気伝導度 EC の縦断分布($\mu\text{S}/\text{cm}$)

が'95年、'96年よりも貧酸素領域は厚く、このことから貧酸素領域の形成と水温成層の混合抑制効果との関連性が高いことが確認できる。放熱期に至ると自然対流の成層浸食作用により、躍層低下とともに貧酸素領域が縮小する。しかし、逆転水温層と同じく、EL.180~185mより下層の貧酸素水塊は1年を通して滞留しており、1986年以来開始されたこれまでの水質観測結果と同様に、本観測からも大循環が生じることのない部分循環湖であることが確認される。

図-8は各月におけるDOの縦断分布を示す。全ての

季節で観測されているわけではないが、水平方向のDOの変化は少ない。

(3) 電気伝導度:EC

図-9は電気伝導度EC($\mu\text{S}/\text{cm}$)の季節変化を示す。周年にわたってEL.180~185m以深では電気伝導度が高く、容存物質が底層内に含有されていることを示唆している。ECの高い層の厚さは経時的に変動しているが、逆転水温層(図-5参照)とも異なる挙動を呈している。また貧酸素層や水温構造のような季節的な変化を示さ

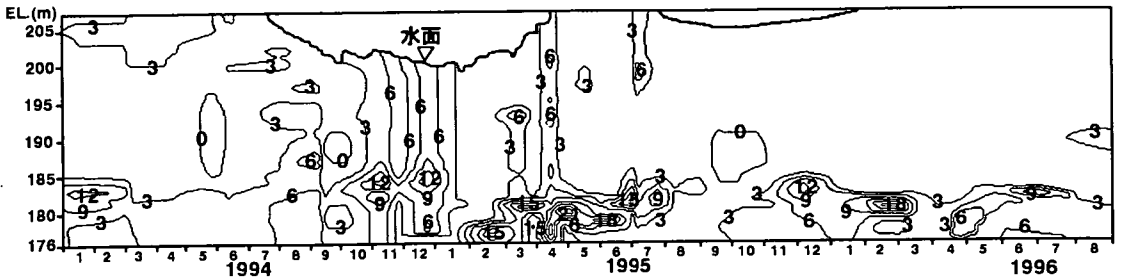


図-11 濁度の季節変化(基準点, 単位は [mg/l])

ない。底層がこのような高いECを呈することは、前述の逆転水温勾配による密度欠損量を補償し得る多量の物質が底層に含まれていることを裏付けている。

図-10は各月におけるECの縦断分布を示す。貯水池上流部の観測点で一部欠測しているが、図-8に見られるように貧酸素層の拡大期である'95年10月などでは、水深の浅い上流点においても池底付近のECが高い値をとることがわかる。

(4) 濁度

図-11は濁度分布の季節変化である。全ての観測日が出水直後ではないが、検出された濁度は最高でも20mg/l程度であり、各出水後(図-3(b)参照)に水質障害をもたらすような1月以上の長期にわたる高濁度水の滞留は見られない。しかし、'94年1~2月、11~12月、'95年2~6月、'96年2~3月の各期間において、ECの急変層とほぼ一致するEL.177~186mの位置に相対的に高い濁度が観測されている点が特徴的である。これに対し、貧酸素領域が拡大している'94年2~10月、'95年7~10月の期間においてはこの位置においてもほとんど濁度が検出されていない。

以上のことより、今回観測された濁度は、ECやDOなどの水質指標と関連する何らかの溶解性物質・浮遊物質に起因していると推察される。濁度が貯水池の底層で局所的に分布する原因として次のことが考えられる。
①表層から沈降してきたデトリタスや無機セストンなどが密度成層の浮力安定効果によってECの急変層に捕捉され浮遊する、②嫌気条件下で池底より溶出したFe、Mnなどの金属イオン成分が底層内に拡散し、好気層に接することにより酸化され、溶存態から懸濁態に変化して池水が着色される。

まず、①の原因の場合、生産活動が活発な夏期においても濁度が検出されるはずであり、また濁度が検出された層に加えて密度勾配の大きな主躍層においても沈降物質が集積する可能性が高い。しかし、観測からこのような事象は認められず、①の現象が主要因とは考えにくい。一方、濁度が検出された時期が貧酸素層の縮小期であり、検出された場所は高いECを呈する底層と溶存酸素を含む中層水とが近接する水深である

ことから、②が主な原因となって高い濁度が検出されたと考えられる。

なお、後述のようにECの急変層とほぼ一致する下層(逆転水温層の上端付近)と底層(池底上2m)で採水された試料の水質分析によれば、Fe、Mnともに底層の試料の方が高濃度であったが、採水直後の色合いは下層の試料の方が黒ずんでいることが多く、上述の濁度観測結果と一致している。以上のことは、SSの計測によって、より確実に検証し得るが、図-11に示す高濃度水が観測された期間においてはSSの定量分析を行っていない。

前述のように、本貯水池の流域面積は小さく、河川からの濁質負荷の影響は少ない。濁度分布の観測結果を考慮すれば、本観測で検出されたECの急変層における高濁度水は流入河川水に起源を持つ浮遊土粒子ではなく、EC、DOの作用下で土砂成分以外の物質が浮遊態を形成することにより生じたものと推察される。

5. COD, 栄養塩, pH, 透明度

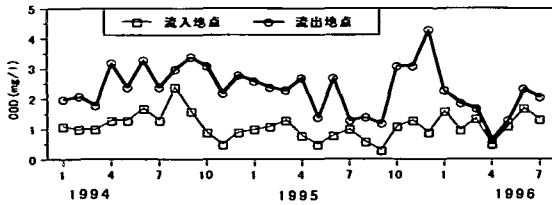
(1) 化学的酸素要求量: COD

図-12は流入・流出水および貯水池内各層で観測された化学的酸素要求量CODの季節変化を示す。図-12(a)において、流出水は流入水よりも常に高いCODを示している。また、図-12(b)より、1年間を通して貯水池底層のCODが上層、中層に比べ3倍程度の高い濃度に保たれ、底質から溶出した酸素消費物質は上層水と交換されることなく底層に滞留していることが確認できる。

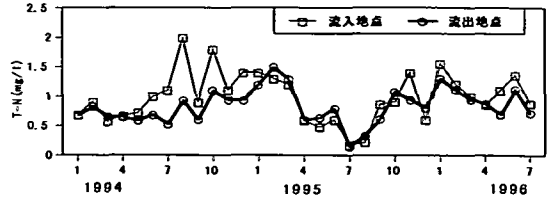
なお、縦断方向には、いずれの水深においてもCODはほぼ一様に分布していた。

(2) 全窒素・全リン濃度: T-N, T-P

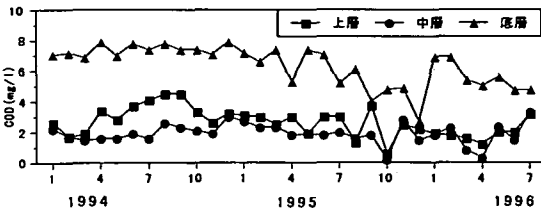
同様に、図-13,14に全窒素(T-N)・全リン濃度(T-P)の観測結果を各々示す。T-Nに関しては、池内の上・中・底層間の濃度差に比べて流入水と流出水の濃度差は非常に小さい。検出された1mg/l程度のT-Nは自然水としては高い濃度である。T-Pに関しては、流入水の方が流出水より濃度がやや高く、貯水池へ供給されたリンが池内に貯留されている可能性がある。貯水



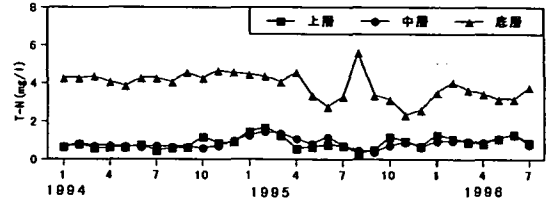
(a) 流入・流出水のCODの季節変化



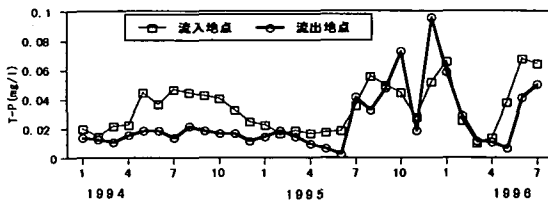
(a) 流入・流出水のT-Nの季節変化



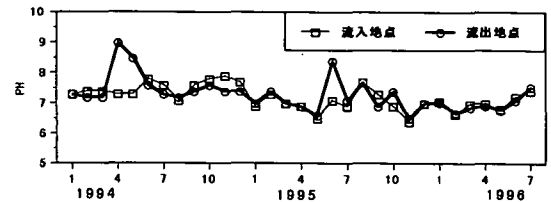
(b) 貯水池基準観測点の各層におけるCODの季節変化
図-12 CODの季節変化



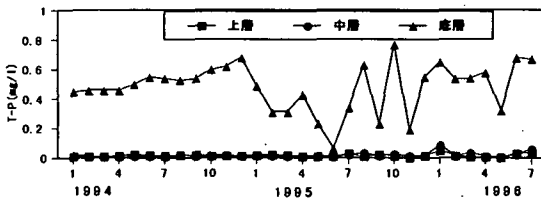
(b) 貯水池基準観測点の各層におけるT-Nの季節変化
図-13 T-Nの季節変化



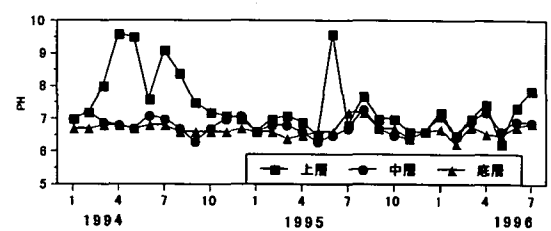
(a) 流入・流出水のT-Pの季節変化



(a) 流入・流出水のpHの季節変化



(b) 貯水池基準観測点の各層におけるT-Pの季節変化
図-14 T-Pの季節変化



(b) 貯水池基準観測点の各層におけるpHの季節変化
図-15 pHの季節変化

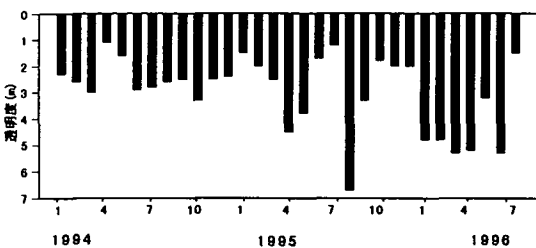
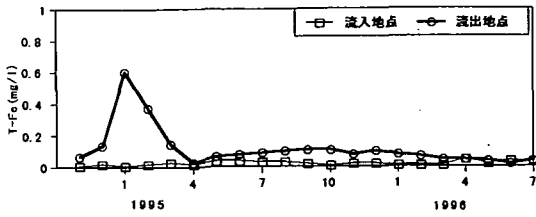


図-16 透明度の季節変化

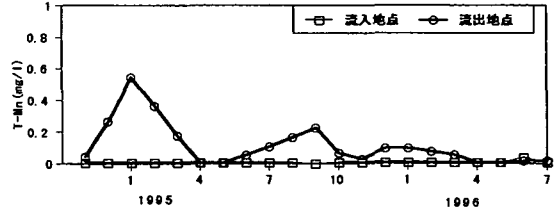
池内では、T-N、T-Pとも上層・中層に比べて底層における濃度が1年を通して高く、嫌気条件下で底質から栄養塩が溶出していることが確認される。なお、CODの場合と同様、T-N、T-Pとも縦断方向にはほぼ一様な

分布を示していた。

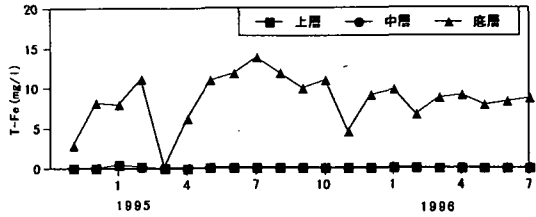
一般に、水域のN/P比がプランクトン体内のそれに等しい10~20程度の場合に一次生産が活性化しやすいと言われている¹⁰⁾。この値に比べて、Aダム貯水池では底層を除き河川と貯水池のいずれにおいてもN/P比が大きい。Aダム貯水池では窒素とリンの濃度が高い割にアオコや水の華などの障害が顕著に発現しないが、その原因として生産活動が最も活性化しやすいN/P=10~20よりN/P比が大きいことが一因であると考えられる。しかし、N/P比以外の要因もプランクトンの増殖・減少に重要な影響を及ぼすこと、受熱期において表層が過飽和状態にあること、後述のように1994年受熱期において大きな出水がなかった場合にも透明度が小さくア



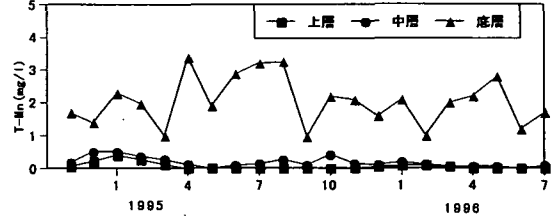
(a) 流入・流出水の T-Fe の季節変化



(a) 流入・流出水の T-Mn の季節変化



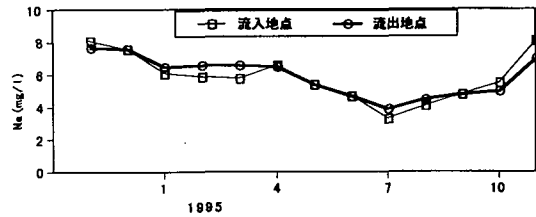
(b) 貯水池基準観測点の各層における T-Fe の季節変化



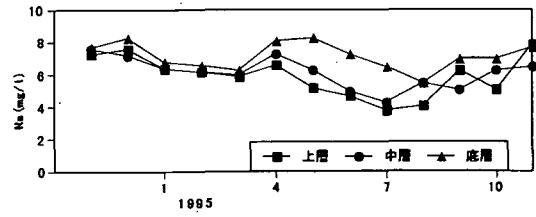
(b) 貯水池基準観測点の各層における T-Mn の季節変化

図-17 T-Fe の季節変化

図-18 T-Mn の季節変化



(a) 流入・流出水の Na の季節変化



(b) 貯水池基準観測点の各層における Na の季節変化

図-19 Na の季節変化

表-1 基準点の底質から検出された T-Fe, T-Mn, Na の季節変化 (単位は [mg/kg])

観測日	1994年		1995年			
	11/17	12/15	1/12	3/15	4/13	5/17
T-Fe	36,000	35,000	39,000	34,000	34,000	39,000
T-Mn	870	780	910	780	780	880
Na	10,000	10,000	11,000	9,800	8,500	12,000

観測日	1995年					
	6/15	7/14	8/9	9/13	10/11	11/13
T-Fe	33,000	36,000	35,000	39,000	36,000	36,000
T-Mn	860	850	970	890	850	840
Na	14,000	15,000	-	-	-	-

(4) 透明度

図-16に透明度の季節変化を示す。'94年、'95年ともに春～梅雨期の出水後に透明度がやや低下している傾向が見られるが、両者の相関関係については明確な結論を得ていない。'95年8月に透明度が非常に大きいのが、この原因も明らかではない。

6. 金属成分: Fe, Mn, Na

図-17～19と表-1に、河川水、貯水池水および底質から検出された金属各成分(全鉄: T-Fe, 全マンガン: T-Mn, ナトリウム: Na)の濃度の季節変化を示す。

(1) 全鉄: T-Fe

図-17(a)によれば、流入水の T-Fe が $0.01 \sim 0.04 \text{ mg/l}$ であるのに比べて流出水のそれは $0.03 \sim 0.6 \text{ mg/l}$ と高濃度の範囲で変動している。また図-17(b)のように、貯水池内では上・中層ともに $0.05 \sim 0.5 \text{ mg/l}$ 程度の低濃度であるのに対し、底層の濃度は $0.2 \sim 14 \text{ mg/l}$ と高い。なお、表-1に示すように底質中の T-Fe は $34,000 \sim 39,000 \text{ mg/kg}$ と地殻中の平均含有量 $50,000 \text{ mg/kg}^{12)}$ に比べむしろ少

オコの発生が部分的に見られたことなどを考えあわせると、必ずしも生産活動が小さいとは断定できない。十分な議論を行うためには、広範な種類の藻類を調査項目に加えた水質観測を行い、他の貯水池の観測事例とも比較しながら、栄養塩濃度と藻類毎の個体数との相関性を定量的に検討しなければならない。

(3) pH

pH に関する同様の観測結果を図-15に示す。河川水ならびに貯水池内の中層・底層において、pH は 7 前後で安定している。これに対し、有光層である上層では、春～夏期にプランクトンの生産活動により pH 値が大きくなっている。

量である。これらのことから、底質に含まれるFeが嫌気条件下で底層内へ溶出して高濃度となり、その一部が放水口へ連行加入されるために流入水より高濃度のT-Feが放流されると考えられる。

(2) 全マンガン: T-Mn

全マンガンについて同様の測定結果を図-18に示す。流入水のT-Mnが0.01mg/lであるのに対し、流出水が0.01~0.55mg/lと高濃度であること、池内の上・中層における濃度よりはるかに高い濃度が底層に含有されること、などはT-Feの場合と同じ特徴である。T-Feと同様に嫌気条件下で底質からマンガン成分が供給され、鉄イオンとともに底層のECを増加させる要因になっていると考えられる。T-Feの池内分布特性と異なる点は、上層より中層でのT-Mnがわずかに高く、中層と底層の濃度差がT-Feの場合ほど大きくないことである。鉄イオン Fe^{2+} 、 Fe^{3+} はマンガンイオン Mn^{2+} に比べ酸化還元電位ORPが低く¹⁾、好気性条件下では $Fe(OH)_3$ などの沈降態として底層へ輸送される可能性が高い。これに対しマンガンは、DOの存在する中層において溶存態として残留する割合が鉄イオンより高い。このように酸化還元電位の差異によって両者の(沈降態/溶存態)構成比に違いが生じ、鉄とマンガンの鉛直分布特性が異なると考えられる。

(3) ナトリウム: Na

図-19に示す通り、流入水、流出水ならびに貯水池内の各層で検出されたNaの濃度は同程度であり、顕著な差は認められない。一般に、Naは地下水-地表水の交換の有無を判定する指標物質と考えられるが¹³⁾、この観測結果によれば池底からの地下水湧出などはほとんど生じていないと判断される。

7. 水質分析に基づく貯水池の水質構成

底層において、①溶存酸素が少ないこと、②電気伝導度が高いこと、③栄養塩や鉄・マンガンの濃度が高いこと、などは富栄養化した成層水域でしばしば見られる特徴である。しかし、冬季においても部分的にしか循環せず、しかも水温勾配が逆転した状態が長期にわたって維持されるという現象は、海水交換を伴う汽水湖や河口堰を除いて通常の貯水池ではあまり見られない。上記のうち、②、③は逆転水温層を密度的に捕償するだけの物質が底層に含まれることを裏付ける事実であるが、Aダム貯水池が部分循環湖であるのは底層の水質構成や水質収支が他の成層水域と異なるためであると思われる。そこで、これを明らかにするために、貯水池の基準観測点の各層および流入・流出水から採取された試料を分析し、貯水池水の水質構成と各指標物質の重量構成比を求める。ここでは、'95年9

月13日(Case-1)、'95年10月11日(Case-2)、'95年11月8日(Case-3)の採水試料について分析を行った。

(1) 各層の水質構成

図-20~22に各ケースの分析結果を示す。鉄とマンガンについては全成分の濃度-T-Fe、T-Mn-が、その他の化学成分についてはイオン態としての濃度が、各々計量されている。図中の「その他」は全蒸発残留物質濃度TRから各成分濃度の合計を差し引いた残差に相当し、分析から同定されなかった物質の合計を表す。ILは強熱減量であり、概ね有機物質質量に対応する。また、各図の左図は濃度(mg/l)を、右図は「その他」を除く物質の重量構成比(%)を表す。

これらの図より以下のことがわかる。

- 本分析は水中に溶解・浮遊する物質全成分を網羅してはいないが、全蒸発残留物質濃度TRのうちの約7割以上が同定されている。
- 流入・流出水と貯水池の上層水とは同程度のTRを含み、水質構成も類似している。
- 貯水池の上層から底層に向かうほど、TRが増加するとともに水質構成比が変化している。下層から底層にかけて全物質質量を増加させる主な成分は、IL、 Ca^{2+} 、Cl⁻、T-Fe、T-Mn、SSなどである。本観測の実施当初において、底層では還元作用により鉄・マンガンのイオン成分が高濃度に溶出し、底層水の密度増加に貢献する主要物質と予想していたが、それ以外の物質の重量百分率の方がかなり大きいことが明らかとなった。
- 各水質成分はその鉛直分布特性より次のようなグループに分類される。

① 濃度が水深とほぼ無関係に分布している成分

Na^+ 、Cl⁻、K⁺、F⁻、 Mg^{2+}

② 水深方向に徐々に濃度が増加する成分

Ca^{2+} 、 NH_4^+

③ 底層で濃度が急増する成分

T-Fe、T-Mn、IL、SS

④ 底層で濃度が急減する成分

SO_4^{2-} 、 NO_3^-

なお、今回の分析では、リン化合物の検出濃度が低く定量限界以下であったため、その動態を解明することはできなかった。これらは採水後に状態変化し、「その他」あるいはILに算入されている可能性がある。

(2) 水質分布特性に基づく水質挙動に関する考察

上記(c)、(d)のように水質成分ごとに異なる鉛直分布性状を呈する要因としては、化学過程に加えて生物反応も関与している。しかし、生物過程は多岐・多様にわたり複雑な機構を内包しているため、水質収支との関連性を推論することは容易ではない。ここでは、主に「酸化-還元」反応および「酸-塩基」反応との関

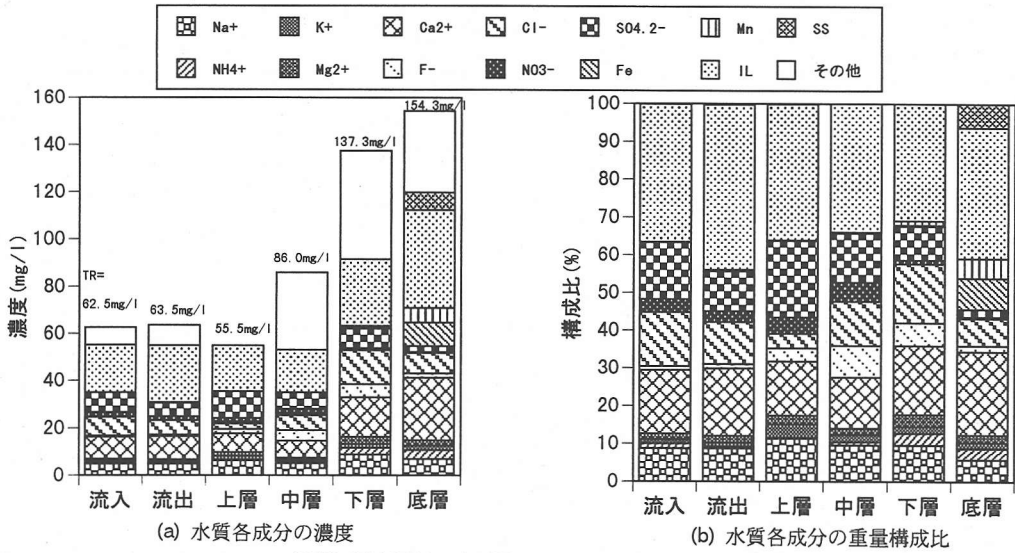


図-20 採水試料の水質構成('95年9月13日, Case-1)

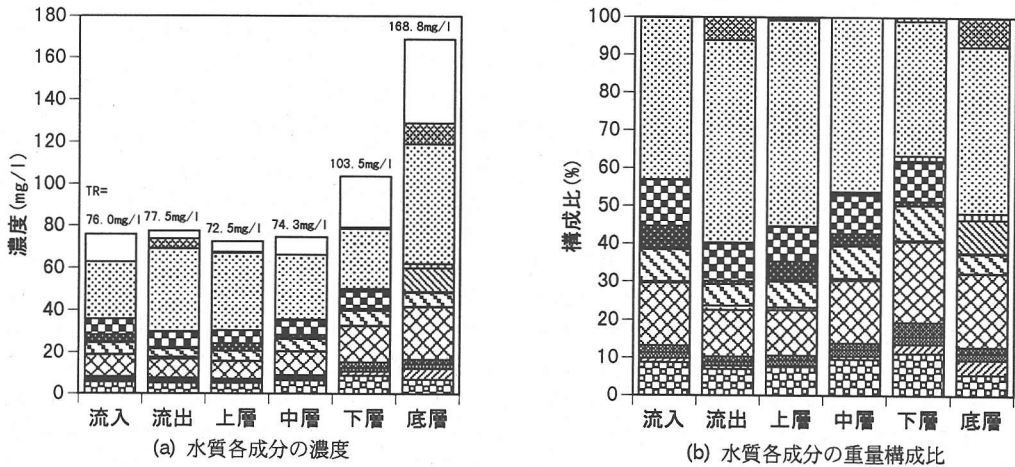


図-21 採水試料の水質構成('95年10月11日, Case-2)

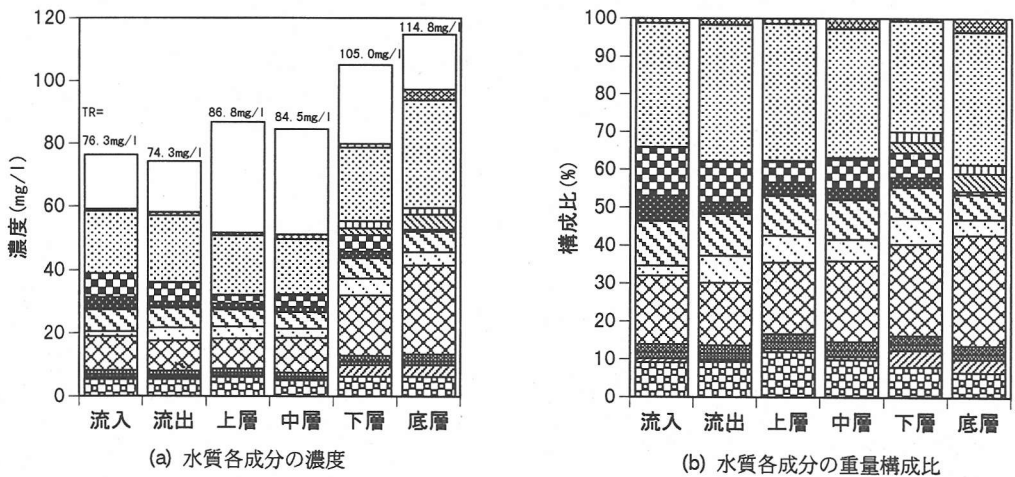


図-22 採水試料の水質構成('95年11月8日, Case-3)

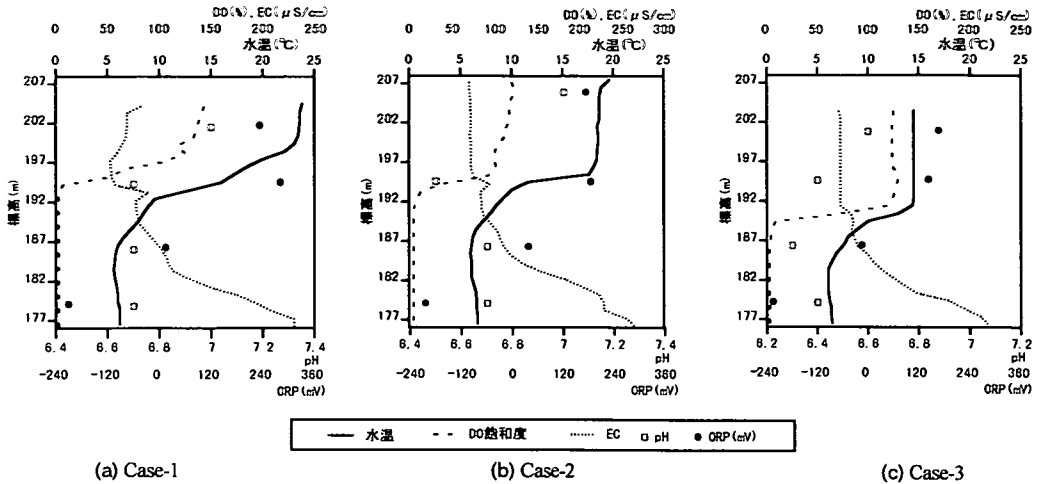


図-23 pHとORPの鉛直分布(水温, DO, ECを併示)

連性に問題を限定して、水質分布特性を考察する。

図-23に、各ケースにおける採水試料のpHとORP(酸化還元電位)を水温・DO・ECの鉛直分布とともに示す。図-20~23から、水質挙動に関し定性的に推論できる事柄は以下のようである。

I. 底層でT-Fe, T-Mnが高濃度となるのは、嫌気状態で底質に含まれる鉄・マンガンの酸化化合物が還元されると同時にそれらのイオン成分が底層へ溶出するためである。

II. 1) 貧酸素水中では、化学反応や脱窒・硫酸還元反応などの生物作用により SO_4^{2-} 、 NO_3^- が減少して H_2S 、 N_2 を生成する、2) 逆に上・中層では、 NH_4^+ や H_2S が酸化されて SO_4^{2-} 、 NO_3^- が増加する一などが、硫酸・硝酸イオンの成層化要因と考えられる。ただし、無機態の窒素・イオウの濃度を定量していないので、1), 2)のいずれがより支配的であるかを断定することはできない。

III. 表層では、光合成により CO_2 が消費されると同時にpHが上昇し、カルシウムは加水分解によって生成された CO_3^{2-} と反応して沈降態の $CaCO_3$ を生成しやすい。逆に底層では、表層に比べて CO_2 が豊富でありpHは低い。このためカルシウムは溶存態 Ca^{2+} として存在しやすく、 Ca^{2+} の濃度は底層に至るほど増加する¹⁴⁾。

IV. EL.187mではDOがほとんどゼロであるにもかかわらず、ORPが正值をとり酸化的環境にある。これはこの付近の層に NO_3^- がある程度含まれていることに起因している。下層に向かうにつれORPが負となり還元的環境に至るとECが急増する。すなわち、ECはDOよりはORPとよく対応しており、EL.187m付近の層は貧酸素状態であるが水中物質量は少ない。

V. ORPはECの急変層付近で正から負の間で大きく変化する。ORPとECの境界面を構成している。嫌気的条件

下で底質より溶出したFe, Mn, PO_4^{3-} などの溶存物質が上方へ拡散しORPの境界面に至ると、正のORPを呈する水塊と接して酸化され溶存態から懸濁態に変化する。ECの急変層付近(採水点「下層」)で検出された高濁度水は、ORPが正でかつある程度酸素を含む水塊と底層水が接することにより発生したと推察できる。ORPの急変層で溶存物質が沈降態に変質して、この層より上方へは上浮拡散しにくくなるため、ORPの境界面は水質を底層内に捕捉する効果を有している。

VI. 貧酸素層では上層から沈降してきた有機物の分解が活発でないため、底層でILが相対的に増加する。このILの構成成分について、著者らは主に藻類の死骸などの有機物質であろうと考えている。

以上は、基準点で採取した水質サンプルの分析に基づき、鉛直一次元的な物質分布特性を定性的に考察したものである。物質収支過程をより定量的に議論するためには、全ての化学的・生物的反応過程を定式化し、あらゆる関連要素を変数として連立的に解く必要がある。同時に、鉛直一次元過程のみならず河川水流入や重力循環流による移流輸送成分をも考慮した物質収支の二次元解析を行う必要がある。現時点でこれを行うことは困難である。

8. 貯水池の密度構造

貯水池水を仮に純水と見なして水温から密度分布を算出すれば、図-24のようになる。水温勾配が逆転している下層から底層では、安定な密度成層を構成するためには密度がおおよそ10~20mg/l程度不足しており、不安定な密度分布となっている。図-20~22の結果によれば、逆転水温層における密度欠損量は底層に含まれる物質総量の「下層-底層」間の密度差にほぼ匹

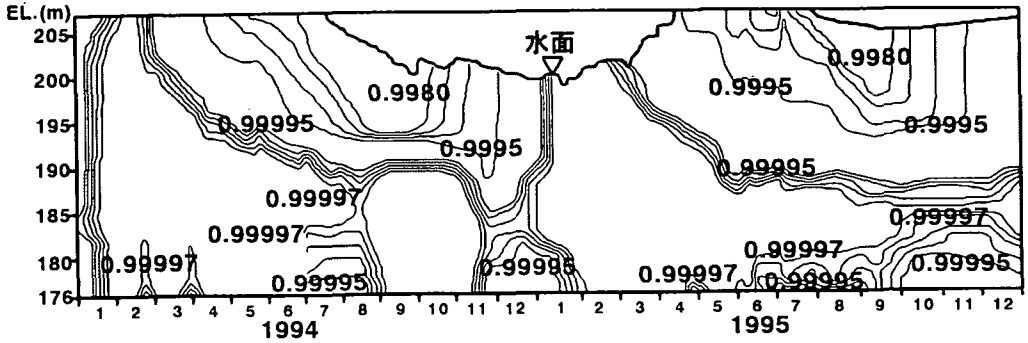


図-24 純水の状態方程式を用いて算出した密度分布

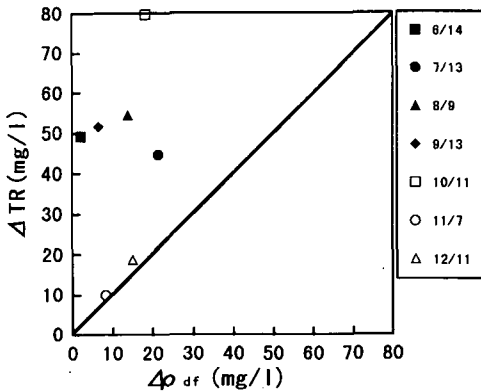


図-25 「下層-底層」間の TR の差 ΔTR と水温差に相当する密度欠損量 $\Delta\rho_{df}$ の関係

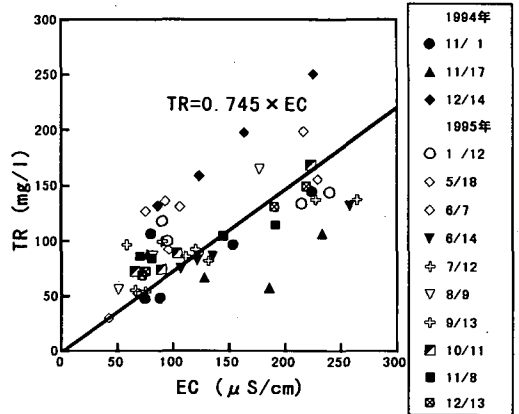


図-27 採水分析より得られた EC と TR の関係

敵しており、密度的に補償されているようである。採水定量された「下層-底層」間の全蒸発残留物質濃度の差 ΔTR と「下層-底層」間の水温差に相当する密度欠損量 $\Delta\rho_{df}$ との比較を図-25に示す。 ΔTR は常に $\Delta\rho_{df}$ を上回っており、下層から底層にかけての領域では様々な物質濃度と水温から構成される「多重成層」が密度的に安定に存在することが推測できる。よって、水質分析結果に基づいて貯水池水の密度を算出すれば、冬季においても全層が密度的に安定で、全層循環状態にないことが証明できるであろう。

電気伝導度 EC には、もともとの溶解性物質と浮遊物質から乖離した溶解成分の影響が含まれているが、水質構成の内訳がわからない限り電気伝導度と水温から密度を算定することはできない。すなわち、水温と EC の関数として密度を理論的に算出するためには、各成分単位濃度あたりの EC への貢献度が既知であること、水質成分の構成比が一定であることなどが必要である。海水のように水域間で水質構成比に大きな差がなければ状態方程式を得ることができるが、水域毎に固有の物質収支が存在する陸水域の場合には普遍的な状態方程式を定式化することが困難である。密度構造を正

確に求めるには全ての水質項目を高い時空間分解能で直接計測する必要があるが、現実的には不可能である。そこで本論では、計器観測された水温と電気伝導度のデータに基づいて貯水池の密度分布を近似的に算定するために、次の二つの方法を試みる。

〔方法-1〕：貯水池水の水質構成を海水と等価と考え、海水に対する「EC-塩分」の関係をそのまま用いて海水の状態方程式から密度を算出する方法。

〔方法-2〕：ECと密度の直接計量に相当するTRとが一意的な関数関係を持つと仮定し、これに純水の状態方程式を重ね合わせて密度を算出する方法。

〔方法-1〕は計器観測が容易なECと海水の「塩分」 S の関係式¹⁵⁾を用い、さらに密度 ρ が S と水温 t の関数で表される次式の海水の状態方程式を用いて密度を算出する方法である。

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

ここに、 ρ : 密度(kg/m^3)、 t : 水温($^{\circ}\text{C}$)、 p : 水圧(bar)(1気圧の時を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、である。ダム貯水池に対して、まず〔方法-1〕を適用し算定した密度を図-26に示す。この図では、'94

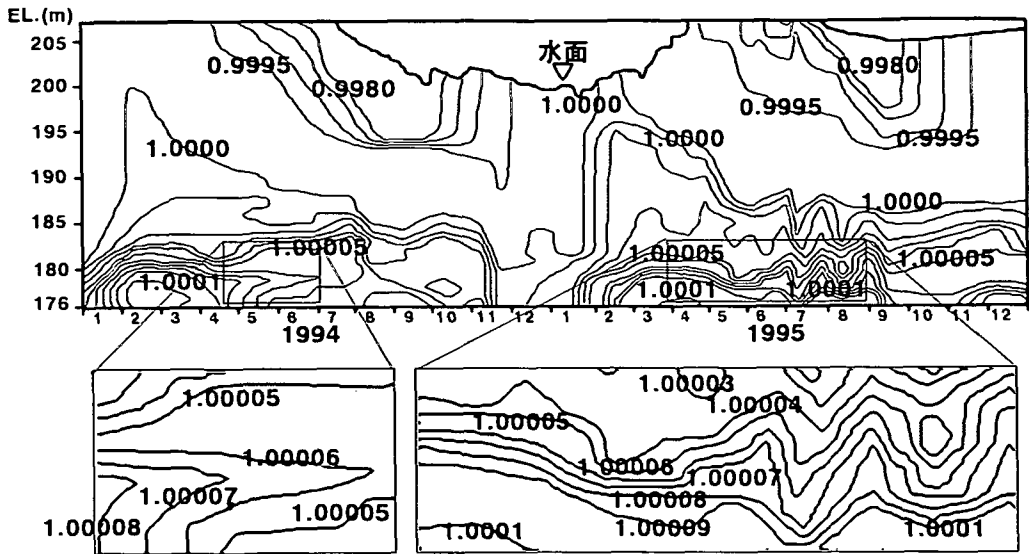


図-26 海水の状態方程式を用いて算出した密度分布(全層の密度分布および底層付近の拡大図)

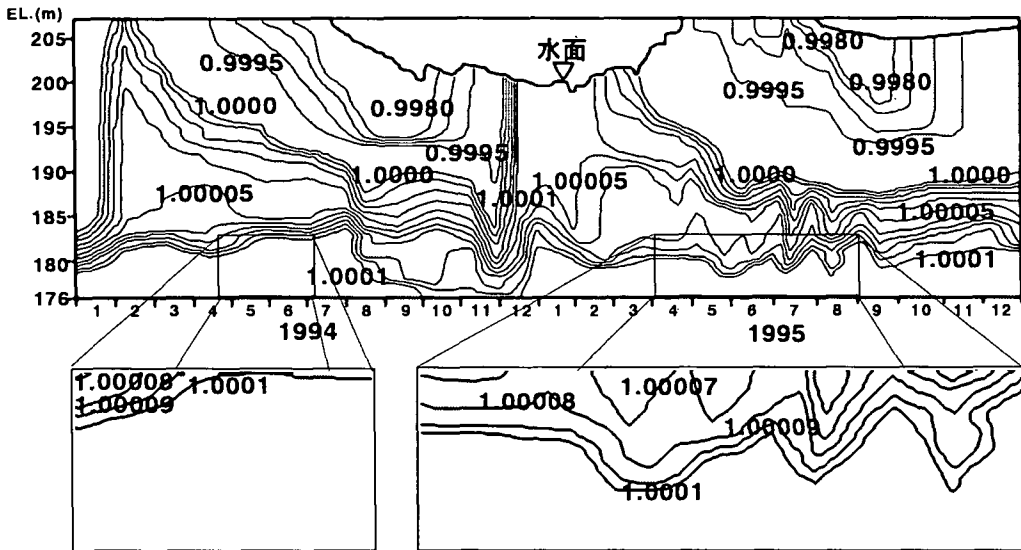


図-28 図-27中の相関式と純水の状態方程式から算出した密度分布(全層の密度分布および底層付近の拡大図)

年6月や'94年10月において、EL.176~180mの層で依然として不安定な密度分布となっている。すなわち、貯水池水と水質組成を異にする海水の状態方程式では、底層水の密度を過小に評価する結果となっている。

次に、【方法-2】による密度評価を行うために、本観測より得られたTRとECの相関関係を図-27に示す。厳密には、様々な位置と時期に採水された試料は相互に異なる水質組成を有し各成分のECへの貢献度も異なるが、同図からTRとECの間に強い線形相関が認められ、両者の関係を求めると次式を得る。

$$TR = 0.745EC$$

これに水温で決まる純水の密度を加算し貯水池水の密度分布を求めたものが図-28である。海水の状態方程式では底層の密度分布が不安定であったと推定される期間を含め、通年的に安定な密度構造になっていると判定される。以上の結果ならびに水温差に相当する密度欠損量を補償して余りある程度に高濃度の物質量が底層に含まれている(図-25)ことから、水温逆転層は中立成層よりもさらに安定な密度成層を構成している。毎観測時において底部の高濃度層が消失していないこと(図-9)も併せて考慮すれば、Aダム貯水池は部分循環湖であると考えられる。

9. 水質循環機構の解明と水質改善のための課題

受熱期に限定すれば、Aダム貯水池の水質挙動は逆転水温層が存在する点を除き一般の富栄養化水域の特徴と定性的に類似している。冬季においても全層が循環しないための力学的条件は、貧酸素化した底層への物質集積の速さ—すなわち底層の浮力安定度の増加率—が自然対流の擾乱エネルギーを上回ることであろう。この条件を定量的に評価するために必要な情報は、①池底からの溶出や表層から鉛直下方へ輸送される物質の底層内への捕捉率、②各水質成分の濃度と浮力(重量)との関数関係、③水面での熱交換量、④底層における「濃度躍層」の位置、などである。①と④を評価するためには、水質観測資料に基づいて水質各成分の輸送則を確立する必要がある。しかし、物理・化学過程に従う水質成分に比べ生物活動が関与する水質収支に関しては、多くの検討課題が積み残されている。

現在まで、Aダム貯水池において深刻な水質障害は報告されていない。高濃度の物質を含む底層水が循環期においても再浮上することなく封入されていることもその一因と考えられる。しかし、水域の水文・気象条件如何によっては底層水が上方へ拡散輸送される可能性がある。浅水域では貧酸素水塊が消失後速やかにECが低下することからもわかるように、貧酸素水塊の解消は有力な水質改善策の一つと考えられる。深層曝気などによるDOの補給は、底層への物質集積を抑制する可能性を有する。的確で効率的な水質改善方を講ずるためには、DOと各水質成分の挙動との定量的な相関関係を求める必要がある。

本論では、底層水が相対的に高温に保たれる原因を解明することはできなかった。一つの可能性として、熱エネルギーが底層に封じ込められて滞留し、その後冬季を迎えた際に上方の水が冷却されて逆転水温層が形成されるという機構も想定される。しかし、本観測から明らかのように、ゆるやかにではあるが底層水が昇温する時期もあり、底層への熱供給は存在している。高温地下水の池底からの湧出は確認されなかったことより、系外から底層への移流熱は存在しないと思われる。貯水池内の三次元的な熱塩循環や熱生成をもたらす化学的な物質変化などが作用している可能性がある。循環期における底層水の(滞留/再浮上)の臨界条件は水塊の浮力フラックスの収支に依存するため、底層水の熱収支は水質構造の支配的要因であり、解明されなければならない課題である。

10. 結論

本観測から明らかになった内容は以下の通りである。

1) Aダム貯水池では底層が貧酸素化しており、電気伝

導度ECが高く、様々な溶解性(電解)物質や電解物質の乖離の源となる浮遊物質が高濃度に含有されている。加えて、底層水は直上の層よりも相対的に高温で逆転水温勾配を有している。このような水質特性を有する水塊が1年間を通して底層に滞留しており、冬季においても全層循環は生じない。

2) 貧酸素層は夏期に最も拡大し、冬季に縮小する。これに対し、ECの高い層と水温逆転層の挙動には顕著な季節変化は認められず、池底から10m程度の厚さを保ち変動している。

3) 水温および溶存酸素DOの貯水池縦断方向の変化は小さい。夏期においては、浅水部へと貧酸素層が拡がり、貧酸素領域と接した池底付近のECは増大する。冬季に至り貧酸素層が深層部へと縮小すると、浅水部の底層付近のECは再び減少する。すなわち、ECの増減—あるいは底質からの物質溶出—に対しては底層付近のDOが支配的な影響を与え、DOの増減に短時間に対応して変動する。

4) 貯水池の上層から中層にかけては、流入・流出水と類似の水質構成を呈する。下層から底層にかけては多くの物質が含有され、密度を増加させている。これらの物質は、逆転水温勾配による底層水の密度欠損量を補償するだけの重量を有する。冬季において全層循環しない原因は、底層に高濃度の物質が集積することにある。

5) 全蒸発残留物質TRのうち、かなりの割合の構成成分が水質分析によって同定された。底層で高濃度を呈する水質項目としては、T-Fe、T-Mn、IL、SSなどがある。カルシウムイオンも底層に向かって濃度が徐々に増加する。一方、 SO_4^{2-} 、 NO_3^- などは底層において濃度が急減している。これら各成分の鉛直分布特性は、pHを指標とした「酸-塩基」反応と酸化還元電位ORPを指標とした「酸化-還元」反応によって、おおよそ説明できる。

Aダム貯水池の水質挙動は、富栄養化した成層水域で一般に観測されるものと定性的には相似であるにもかかわらず、底部に逆転水温層が形成された部分循環湖である。この原因を解明するためには、複数の水域における水質特性との比較調査を進め、他の貯水池との水質収支量の差異を定量的に評価する必要がある。

謝辞：本観測調査の実施にあたり、兵庫県土木部河川開発課、同姫路土木事務所の関係各位に多大のご協力を頂いた。水質分析に際しては、大阪大学工学部環境工学科 藤田正憲教授、池道彦講師にご協力・指導を頂いた。(財)ひょうご環境創造協会 環境科学技術センター 藤原正好氏には観測結果に関する討議を通して有益なご助言を頂いた。観測・データ整理において、神戸大学工学部建設学科 前田浩之技官、神戸

大学学生 嶋田健司氏, 金谷恵輔氏のご助力を得た。
以上, 記して謝意を表する。

参考文献

- 1) 岩佐義朗: 湖沼工学, pp.288-295, 山海堂, 1990年.
- 2) 八木明彦: 部分循環湖の酸化還元境界層における鉄, マンガンの挙動, 昭和55年度文部省科学研究費総合研究(A)研究成果報告書(部分循環水域の維持機構と物質代謝, 代表: 新井正), pp.205-221, 1981年.
- 3) 由佐悠紀: 水月湖における混合, 昭和54年度文部省科学研究費総合研究(A)研究成果報告書(部分循環水域の維持機構と物質代謝, 代表: 新井正), pp.18-31, 1980年.
- 4) 吉村信吉: 日本の湖水の深層水温(第2報), 海と空, 第13巻, pp.287-310, 1933年.
- 5) 吉村信吉: 日本の湖水の夏期深層水温(第4報), 海と空, 第17巻, pp.451-473, 1937年.
- 6) 大久保賢治, 村本嘉雄, 森川 浩: 琵琶湖における水温・濁度の変動機構, 京都大学防災研究所年報, 第37号B-2, pp.405-419, 1994年.
- 7) 松本治彦, 城田久岳, 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, 第10号, pp.696-703, 1993年.
- 8) 下水試験方法, 日本下水道協会, 1984年.
- 9) 上水試験方法, 日本水道協会, 1993年.
- 10) 西条八東, 寺井久慈, 八木明彦: 深見池のクロロフィルaとバクテリオクロロフィル量の周年変化, 昭和55年文部省科学研究費総合研究(A)研究成果報告書(部分循環水域の維持機構と物質代謝, 代表: 新井正), pp.183-204, 1981年.
- 11) 坂本 充: 湖沼の富栄養化と植物プランクトンの異常増殖, 門田元編, pp.129-139, 1987年.
- 12) 西村雅義: 環境科学, pp.12-14, 真興社, 1995年.
- 13) 吉村信吉: 湖沼学(増補版), 生産技術センター, p. 439, 1976年.
- 14) Golterman, H.L.: Physiological Limnology, Developments in Water Science; 2, ELSEVIER, 1975年.
- 15) 気象庁編: 海洋観測指針, 日本気象協会, pp.145-153, 1990年.

(1996. 11. 15. 受付)

FIELD MEASUREMENTS OF WATER QUALITY IN A PARTIALLY OVERTURNING RESERVOIR WITH INVERSE TEMPERATURE GRADIENT IN ITS BOTTOM LAYER

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

Reservoir hydrodynamics and water quality behavior are examined by performing field measurements in a reservoir: in its bottom layer, high concentration of materials brings high electric conductivity, and the water mass is stratified with inverse temperature gradient. Through the quality analyses of the reservoir water it is found that ignition losses, calcium, suspended solid, iron, manganese and other materials show high concentration to compensate density defect due to inverse temperature gradient. Based on the observed data, water quality behavior and engineering countermeasures to solve water quality troubles are discussed.