

貯水池の成層

(財)電力中央研究所 白砂 孝夫

1. まえがき

貯水池の築造による下流河川の水質変化が問題になることがある。これは河川水が貯水池に長期に滞留する結果生じるものであり、貯水池本来の機能として避けがたい側面でもある。貯水池による濁水長期化現象もそのひとつであり、当所においても電力各社の協力のもとに多くの貯水池において現象の調査を実施してきた。その結果、貯水池水の流動と外圍との熱収支の結果貯水池には特有の水溫成層が形成され、それがまた貯水池水の流動に支配的な影響を与えることがわかった。本報告は貯水池に形成される水溫成層の特性によって流動形態を分類しその特性を述べるとともに、貯水池の流動形態の数理モデルによるシミュレーション解析の1計算例を述べるものである。

2. 貯水池水溫成層の特性

貯水池の流動形態は受熱期の水溫分布特性によって成層型と混合型の二種に大別される。

成層型の流動形態は流入、流出による擾乱の規模に比較して貯水池の規模が大きい場合に認められる。大気圏との熱収支、流入、流出による熱の移流によって鉛直方向に安定した水溫分布が形成される。この水溫による密度分布の重力効果のために貯水池水は上水の混合が生じにくく、貯水池内は流入、流出水による層状の流動部分とその他の停滞部分とに区分される。鉛直方向の強い安定度のため貯水池深部に流動が及びことはまれであり、深層水溫が年間を通してほとんど変化しないことも成層型貯水池の特徴である。

一方、混合型の流動形態は流入、流出による擾乱の規模が貯水池の規模に比べて大きい場合に認められる。流入、流出による流動が貯水池水深の広範囲に及び、上下の混合、熱の移流がよく行なわれる。この結果貯水池は鉛直方向にほぼ均質となり、したがって、深層水溫の年変化も顕著である。図-1および図-2はそれぞれ成層型および混合型の貯水池の鉛直水溫分布の年変化の1例を示したものである。

図-3は混合型の1変型である大規模混合槽水発電所貯水池の水溫分布を示したものである。この場合自然流入量のみを考えれば流入による擾乱の規模は貯水池規模に比較して小さく、安定した成層型にならば

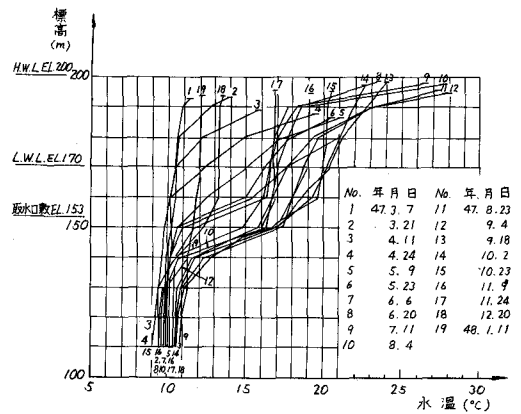


図-1 成層型貯水池の水溫分布

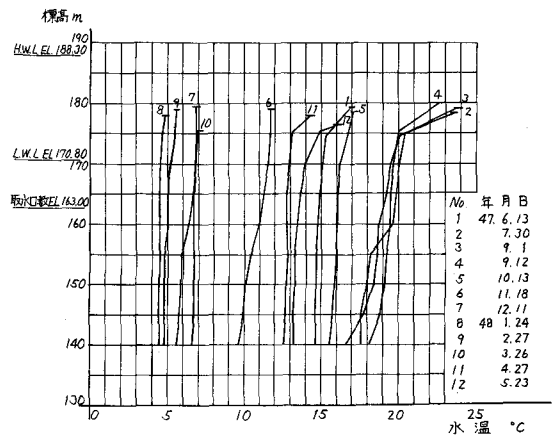


図-2 混合型貯水池の水溫分布

ずである。しかし、貯水池の中間標高に設けられて取り放水口から大流量の取水放水がくり返し行なわれ貯水池深層水が混合され取水放水の影響の及ぶ範囲の水温分布は鉛直方向には一様となつてゐる。深層水温の年変化は顕著であるが取水放水による混合の及ばない表層付近には安定した水温成層が形成されてゐる。この場合、揚水発電の機会が少ないかあるいは流量が少なければ流動形態は成層型となることが予想される。

貯水池の水温分布は流入、流出による流れと大気圏との熱収支によつて決まつてくるが、流入、流出による流れは洪水条件、貯水池運用方法によつて大きな影響を受けるので、ある貯水池の流動形態が成層型となるか混合型になるかは単純には予想されない。現在のところ、熱収支も含めて貯水池の流動を数値モデルで表わし、各種の条件のせとにかけた流動形態をシミュレーション解析する手法が考えられる。以下には貯水池の流動形態シミュレーションの概要とその計算例を示すことにする。

3. 貯水池流動形態シミュレーション

3-1 貯水池の流動と熱、濁度収支

貯水池への流入水および貯水池からの流出水によつて貯水池内には複雑な流れが生起される。〇揚水発電所貯水池の下部池である〇貯水池を例にとると図-4に示すようになる。すなわち、貯水池への流入水は上流からの自然流入量 Q_{in} および上部池からの発電放流量 Q_{up} である。一方、貯水池の外部への流出水はダムからの放流量および揚水流量 Q_{op} であり、放流量のうち Q_{o1} は表層取水放流管、 Q_{o2} は中層取水放流管から放流されるもの、 Q_{of} は表層の洪水吐から放流されるものである。

上流からの自然流入水は流量 Q_{in} 、水温 T_{in} 、濁度 C_{in} であるが、流入部で表層水と連行し Q_{i1} 、 T_{i1} 、 C_{i1} となり貯水池内に流入する。 T_{i1} は一般に表面水温より低いため混合後の流れは密度流として貯水池底に沿つて流下し、自身と等密度層に達した後、貯水池密度勾配と流量で規制される水深およびある流速分布で水平方向に貯水池に進入していく。この場合、表層水の連行により表層には上流への流れが生じる。発電放流による流入水は

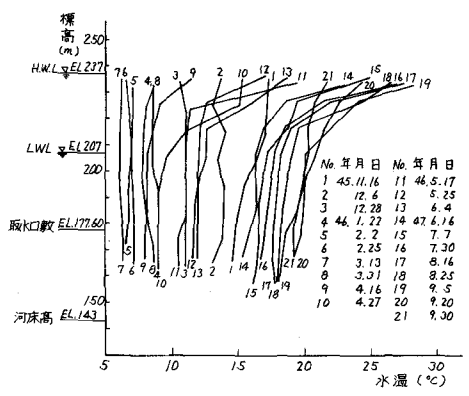
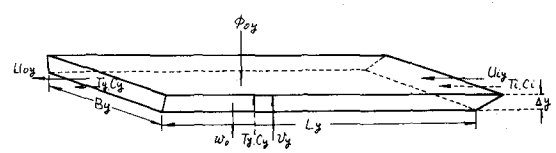
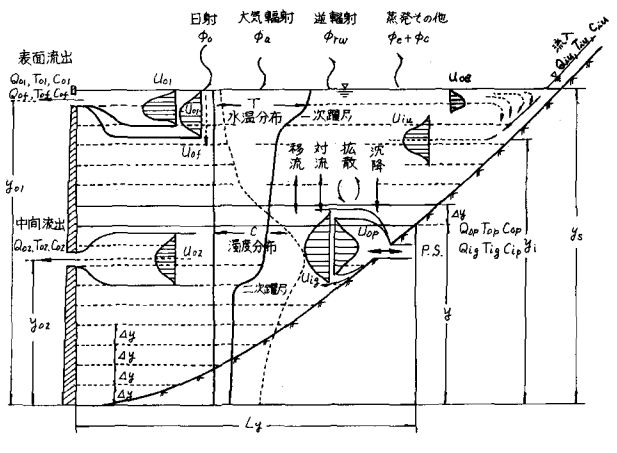


図-3 揚水式発電所貯水池水温分布



- ϕ_{eq} : 標高 y に達する輻射熱
- B_y : y における貯水池平均幅
- L_y : y における貯水池長
- T_y : y における水温
- C_y : y における濁度
- v_y : y における鉛直方向移流流速
- u_{oy} : y における水平方向流出流速
- u_{iy} : y における水平方向流入流速
- w_o : 懸濁粒子の沈降速度

図-4 貯水池の流動と熱、濁度収支

上部池の水温、濁度分布および取水条件によって決まる流量 Q_{ag} 、水温 T_{ag} 、濁度 C_{ag} をもつが、放水口で貯水池水を連行し、 Q_{ag} 、 T_{ag} 、 C_{ag} となり、自身と等密度層に貯水池密度こう配と流量で規制される鉛直方向の流入幅およびある流速分布をもって流入する。

流出水は Q_{01} 、 Q_{02} の表層取水による流れおよび Q_{02} 、 Q_{03} の中層取水による流れに分けられ、それぞれ、貯水池内密度こう配、取水口高さ、取水口形状、取水流量などによって規制される鉛直方向の水深およびある流速分布をもって貯水池から流出する。流出水の温度、濁度はそれぞれ貯水池内の水温、濁度分布と流出による流れの流動厚および流速分布との関係によって定まる。

さらに、貯水池内には流入流出による流れに伴って鉛直方向の移流流速が生じ、その向きおよび大きさは連続の条件から定められる。また、貯水池内の密度分布が表層からの冷却その他によって鉛直方向に不安定になると対流が生じる。さらに、分子拡散および貯水池内の流れとの関連のもとで渦動拡散が生じる。また、濁質である懸濁粒子は粒径、比重に依って沈降速度で沈降する。

以上述べた貯水池内の流動に伴う熱および濁質の移動の他に熱に関しては大気圏と貯水池水との熱収支がある。大気圏からの熱の流入は日射 Q_s および大気輻射 Q_a である。一方、大気圏への熱の流出は逆輻射 Q_r 、蒸発 Q_e 、熱伝導 Q_c である。こうして、短波輻射である日射 Q_s は貯水池の比較的深部に到達するが、他の熱収支は水面付近のみで行われる。その他、地熱、地下水などによる熱収支が考えられるが、その貯水池水温に対する影響は一般に微弱とされている。

以上述べたように、大気圏との熱収支、流入、流出に伴う移流、対流、拡散などによる熱および濁質の移動により、濁質の場合にはさらに沈降現象も加わり、貯水池にはそれぞれ特性に依った水温および濁度分布が形成される。これらの現象を数理モデルによって模擬し貯水池の水温の鉛直分布を予測する手法は既に開発されていてかなりの成果が得られており¹⁾、この手法に濁度収支を導入した数理計算も試みられて²⁾いる。本報の1計算例は後者のものであり、貯水池内の水温、濁度の分布が水平方向に一樣であることと仮定し、図-4に示すように貯水池を鉛直一次元モデルで表わし貯水池の熱および濁度収支を考へるものである。すなわち、図-4に示すように貯水池を厚さ Δy の長方形の水平層の積み重ねによって近似し、それぞれの層について熱および濁度の保存式を適用し各層の水温、濁度を計算するものである。数理モデルおよび計算手法については既に詳しく報告されて^{1), 2), 3)}いるのでここでは重複を避け、計算例のみを述べることとする。

3-2 シミュレーション計算例

A貯水池への適用例について述べる。Aダムは高さ100mのアーチ式多目的ダムである。流域面積504.6 km²、湛水面積2.7 km²、総貯水量8,000万m³、有効貯水量6,500万m³、発電最大取水流量94.7 m³/sec、最大発電量60,000 KWの規模を有している。A貯水池は既設の貯水池であり、貯水池の中間標高に発電用取水口および中規模洪水用の放流管が、表層には大規模洪水用の洪水吐が設置されている。A貯水池を下部池とし、同じく既設のB貯水池を上部池とする揚水式水力発電所の建設が計画されていて、揚水式発電所建設後のA貯水池下流河川の濁水現象の長期化を防止するための対策が望まれ、種々の揚水式発電所運転条件およびA貯水池の運用条件のもとにおけるA貯水池の流動形態の予測および下流河川への放流水の濁度に及ぼす影響の検討がなされた。以下の例は予測手法の適正を検証するために行なった流動形態予測モデルによる計算の結果とA貯水池の既設の流動形態の実測値とを比較検討したものである。

計算期間は昭和49年5月1日から昭和50年3月31日とし、5月1日の貯水池の状態を初期値と同期間を1日区間に分割して逐次計算を行なった。したがって、水文、気象資料は実測値から1日の平均値を求め、また濁度は1日平均流量と濁度との関係を実測資料から求め与えた。図-5は同期間の貯水池内の水温、濁度分布の計算値と実測値と比較したもので、実測値は取水口近くのものを採用している。また、図-6は同期間内の放水口における水温、濁度の計算値と実測値と比較したものである。いずれの図においても、水温、濁度

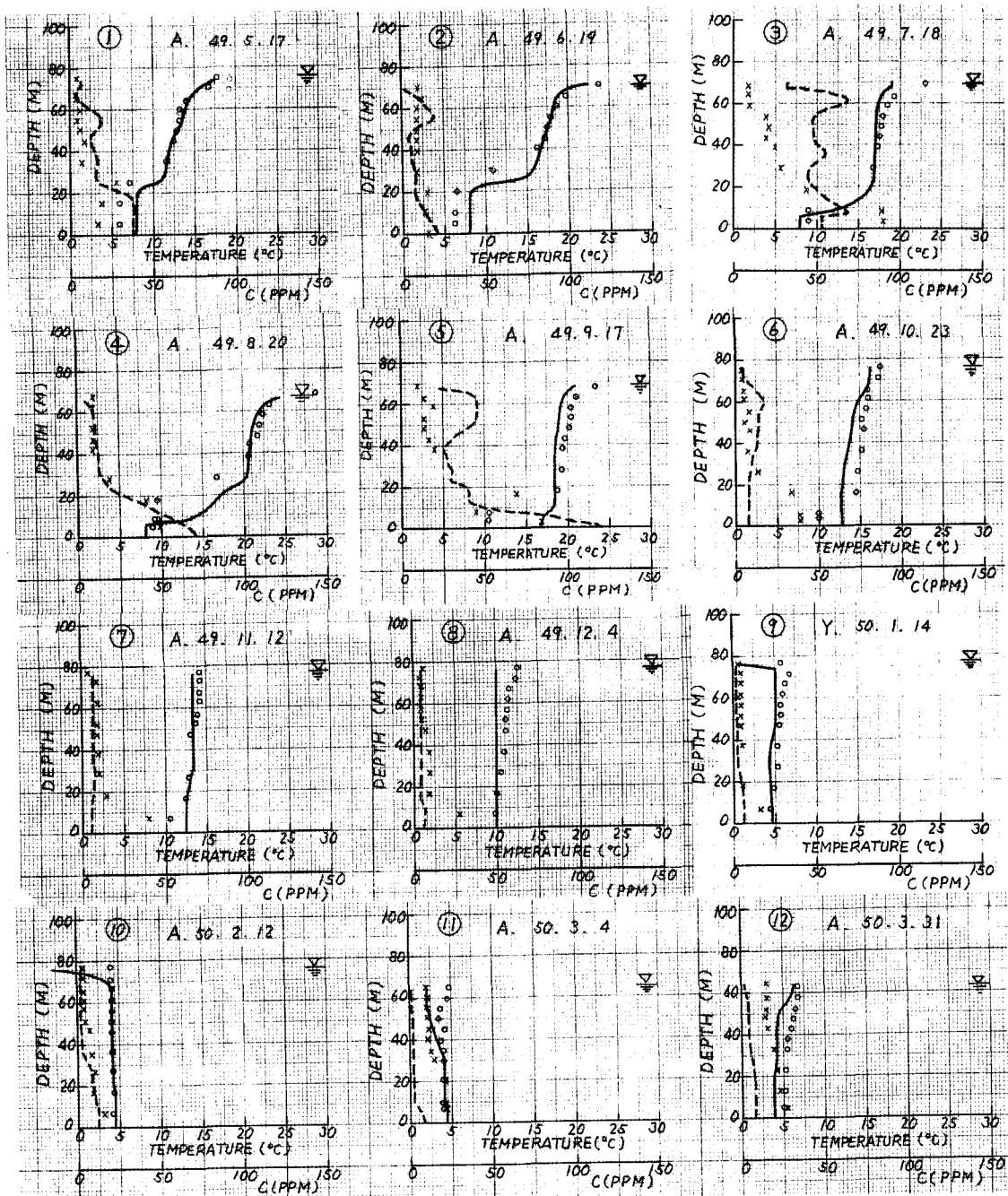


図-5 A貯水池 水温、濁度の鉛直分布の計算値と実測値の比較

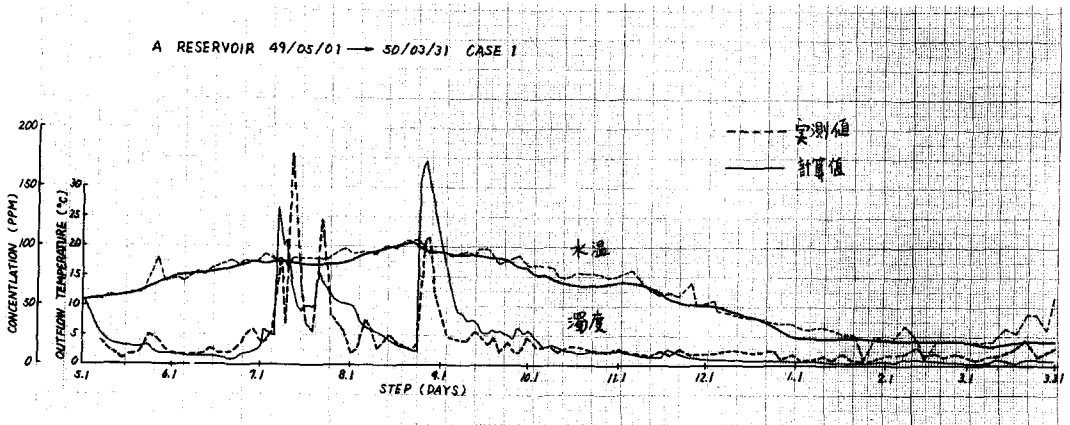


図-6 放水口における水温、濁度の計算値と実測値の比較

とも計算値は実測値と比較的よく適合していると言え、予測手法の適正が検証されたものと判断される。濁度に関しては精度はやや劣るようであるが、これは濁度の実測資料が少く流入濁度の推定が十分な精度で行われまいことおよび濁度に関して水平方向に一様分布すると仮定したことによるものではありかと考えられるがこれらの精度の向上は今後の課題である。

4. あとがき

本報告をまとめるに際しては資料の収集、計算の実施などに関して多くの関係者のお世話になった。記して感謝する次第である。

参考文献

- 1) Ryan, P.J. et al: Prediction of the Annual Cycle of Temperature change in a stratified lake or Reservoir, M.I.T. Report No. 137, 1971. 4.
- 2) 安芸, 白砂: 野水池流動形態のシミュレーション解析, 291, 発電水力 No. 134, 1975. 1.
- 3) 安芸: 野水池濁水現象, 水工学シリーズ 75-A-1, 土木学会水理委員会, 1975. 8.