

1. 緒言

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難い側面でもある。貯水池による濁水長期化現象もそのひとつであり、その水理的軽減対策のひとつとして貯水池の水温分布特性を利用した選択取水がある。本報告は濁水軽減対策の効果の評価のための貯水池内の水温、濁度の予測手法の概念およびその2、3の適用例を示すものである。本解析手法は米国MITで開発された水温予測手法を基礎に、当所における著者らの実験結果および濁度収支解析を加えたものであり、水温、濁度は水平方向に一樣で、鉛直方向にのみ変化する鉛直一次元モデルである。

2. 貯水池水温、濁度予測手法

本報告で用いられている現象の数理化モデルおよび計算手法に関しては成層型貯水池を対象に詳しく報告されているのでここでは図-1に示す揚水式発電所上下部貯水池を例に概念を述べるにとどめる。

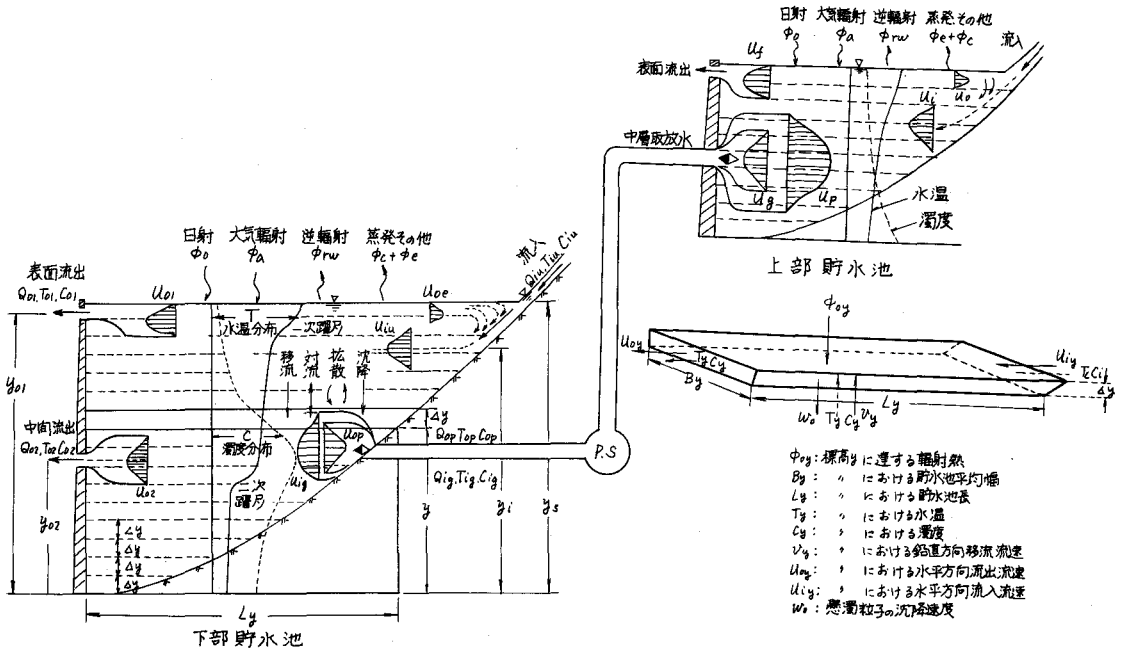


図-1 揚水式発電所貯水池水の流動と熱、濁度収支

貯水池への流入水および貯水池からの流出水によって貯水池内には複雑な流れが生起される。すなわち貯水池への流入水は上流からの自然流入量 Q_{iu} および上部池からの発電放流量 Q_{ig} である。一方、貯水池の外への流出水はダムから下流への放流量および上部池への揚水流量 Q_{op} である。放流量のうち Q_{01} は表層取水設備からの放流であり、 Q_{02} は中層取水設備からの放流である。

上流からの自然流入水は流量 Q_{iu} 、水温 T_{iu} 、濁度 C_{iu} であるが流入部で表層水を連行し、それぞれ Q_i' 、 T_i' 、 C_i' となり貯水池に流入する。 T_i' は一般に表面水温より低いので混合後の流れは密度流として貯水池底に沿って流下し、自身と等密度層に達した後に貯水池密度こう配と流量で規制される水深および流速分布で水平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 U_{oe} が生じるが、解析では流出水として取扱われる。発電放流による流入水は上部池の水温、濁度分布および取水条件によって決まる流量 Q_{ig} 、水温 T_{ig} 、濁度 C_{ig} を持つが放水口で貯水池水を連行し、 Q_{ig}' 、 T_{ig}' 、 C_{ig}' 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水深および流速分布 U_{ig} をもって流入する。この場合の連行水は流出水として取扱われる。

一方、流出水は表層取水による流れ U_{01} 、中層取水による流れ U_{02} 、 U_{0p} に分けられ、それぞれ、貯水池内密度こう配、取水口位置、取水口形状、取水流量などによって規制される水深および流速分布を持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水深および流速分布によって定まる。この他、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 V が生じ、その向きおよび大きさは連続の条件によって定められる。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、分子拡散や貯水池内の流れとの関連のもとで渦動拡散が生じる。上述の流れに追従して熱や濁りが移動するが、濁りの原因である懸濁粒子には粒径、比重に応じた沈降速度が加わる。

以上に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 φ_0 および大気輻射 φ_a である。一方、大気圏への熱の流出は逆輻射 φ_{rw} 、蒸発 φ_e 、熱伝導 φ_c である。このうち、短波輻射である日射 φ_0 は比較的貯水池の深部に達するが、他の熱収支は水面付近のみで行われるといわれる。この他、地熱、地下水などによる熱収支が考えられるが、貯水池水温に与える影響は微弱とされている。

以上のような貯水池内の流動、熱、濁度収支によって貯水池にはそれぞれの特性に応じた水温および濁度分布が形成される。本解析手法は、貯水池内の水温、濁度の分布が水平方向に一様であると仮定し、図-1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、貯水池水の流入、流出による熱、濁度の保存式および大気圏との熱収支による熱の保存式を適用し、各層の水温、濁度を逐次計算するものである。

3. 適用例

表-1に示す各貯水池への適用例について述べる。

表-1 予測計算適用貯水池

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表層には洪水吐が設置されている。A貯水池を下部池とする揚水式発電所の建設が計画されていて、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、水温、濁度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

貯水池名	A	H	O	N	M
種類	多目的	発電専用	発電専用	混合揚水池	混合揚水池
ダム高 (m)	100	130	74	155	96
総貯水容量($\times 10^6 m^3$)	80	258	20	123	15
有効容量($\times 10^6 m^3$)	65	156	12	94	4
湛水面積 (km^2)	2.5	6.86	0.85	2.74	0.57
貯水池長 (km)	9	22	7	7	4
流域面積 (km^2)	506	415	190	381	431
年総流入量/総貯水量	13.5	4.1	13.2	7.7	71.5
最大使用水量(m^3/sec)	95	137	140	540	360
取水口位置	中層	表層・中層	中層	中層	中層

例は予測手法の適正を検証するために行った予測モデルによる計算の結果とA貯水池の既往の実測値を比較したものである。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し、計算期間を1日区間に分割し逐次計算を行なった。水文、気象資料は実測値から1日の平均値

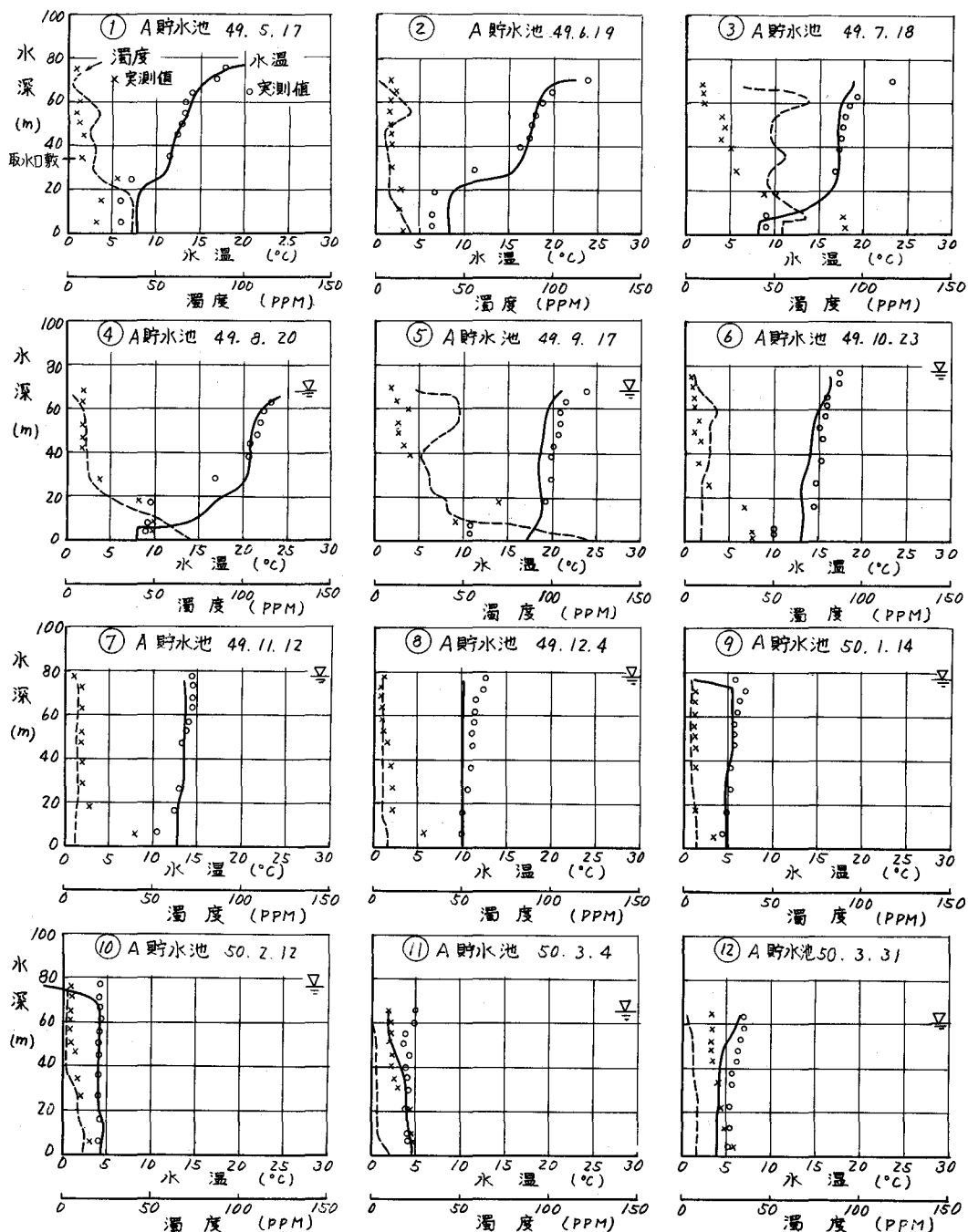


図-2 A貯水池水温、濁度の鉛直分布の計算値と予測値の比較

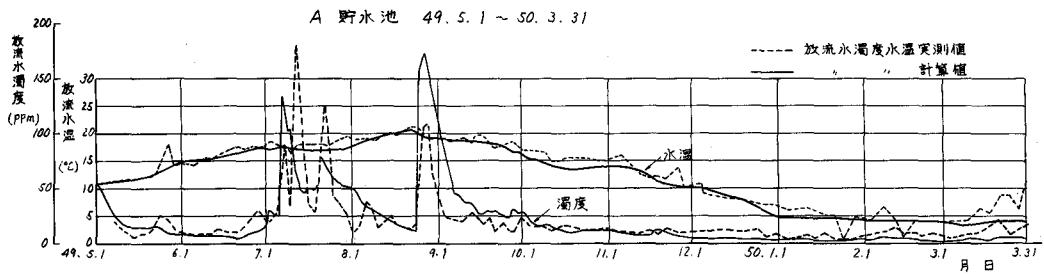


図-3 A貯水池放水口水温、濁度の計算値と実測値の比較

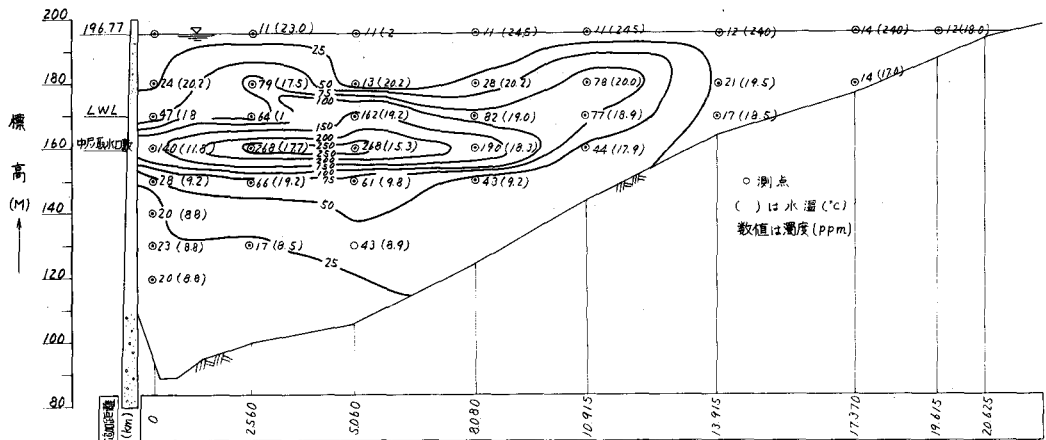


図-4 H貯水池洪水直後の貯水池内水温、濁度分布

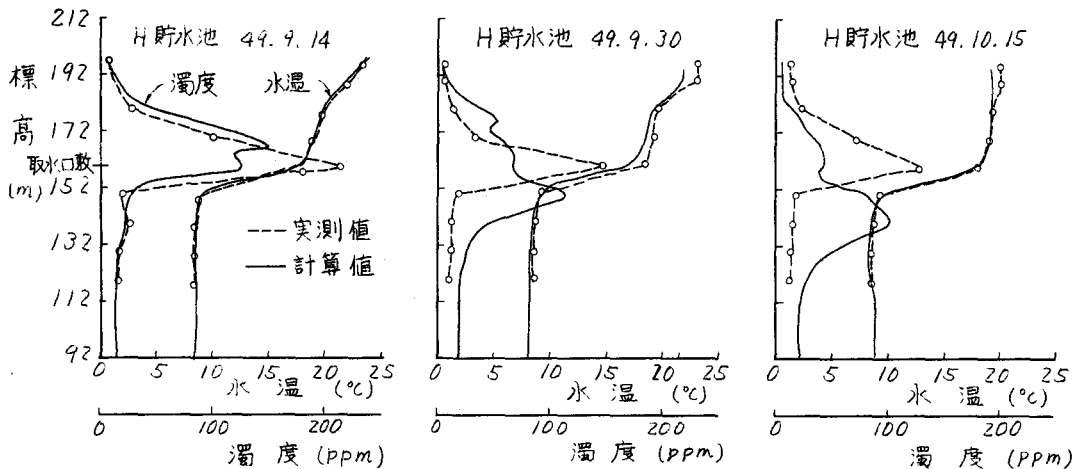


図-5 H貯水池洪水後の水温、濁度鉛直分布の経時変化、計算値と実測値の比較

を求め、1日平均流量と濁度との関係式を実測資料をもとに求めて与えた。図-2は同期間内の水温、濁度の鉛直分布の計算値と実測値（取水口前）を比較したものであり、図-3は同じく放水口の水温、濁度の実測値を比較したものである。水温に関しては2次躍層の位置が計算値の方が実測値より多少低めになる

ことを除けば鉛直分布、放水口とも両者の適合性は比較的良好である。しかし、濁度に関しては、計算値は実測値の傾向をかなりよく表わしてはいるが両者の適合性は必ずしも良好とは言えない。これは流入水濁度および懸濁粒子の沈降速度（ 0.7 m/日 ）の推定が必ずしも十分な精度で行なわれなかったことおよび濁度分布の水平方向一様性の仮定が満足されなかったことによるものと考えられる。

図-4はH貯水池における洪水後の水温、濁度の分布を表わしたものでいずれも水平方向一様性の仮定がほぼ満たされている状態と見なせる。図-5は図-4を初期状態とし、懸濁粒子の沈降速度を 0.3 m/日 としその後の水温、濁度の鉛直分布の経時変化を示したものである。水温の計算値は実測値とよく追隨しているが、濁度の実測値には沈降が認められない。この間、取水口は中層から表層に切換えられており、中層には取水による流れはないので懸濁粒子の沈降は十分に期待されたが濁度のピークの位置は変わらず、その大きさが流入水によると思われる希釈によって減少している。 0.3 m/日 の沈降速度は本件のように比重 2.7 程度、粒径 $2 \sim 3 \mu$ の懸濁粒子がコロイド状になり沈降するかしないかの限界とも考えられこのような条件では懸濁粒子の沈降は期待できないとも判断される。さらに、濁度のピークの方への移動距離は 0.3 m/日 として単純に計算した場合の 2 倍程度になっていて Δy の大きさと逐次計算の時間間隔 Δt および沈降速度との間の関係を適切に選定する必要があることが示されている。

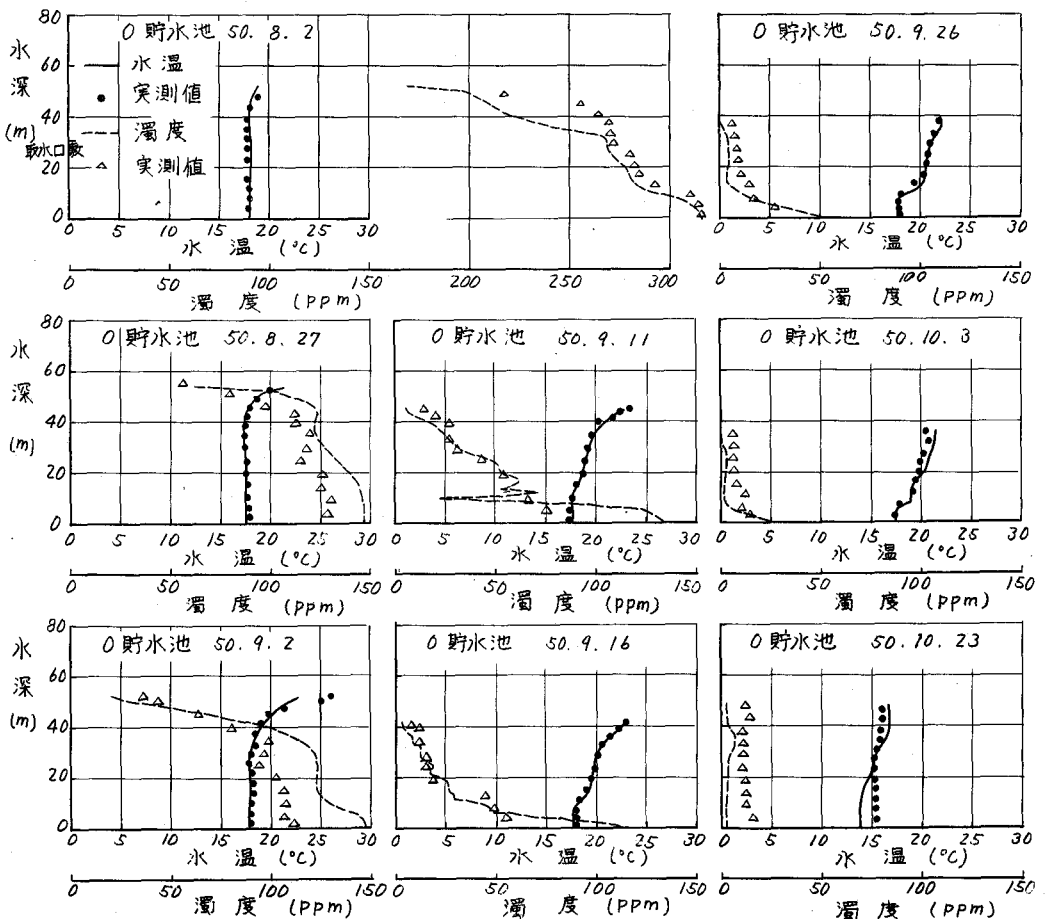


図-6 O貯水池洪水後の水温、濁度の鉛直分布の経時変化、計算値と実測値の比較

○貯水池への適用例ではこれらの間の関係が問題とはならなかったと思われるもので図-6は8月中旬の洪水後の貯水池内の水温、濁度の鉛直分布の経時変化を、図-7は放水口水温、濁度の経時変化の計算値と実測値を比較したものである。いずれの場合も両者の適合性は非常に良好であるが、これは沈降速度(0.7 m/日)の推定の適切さ、貯水池規模が小で濁度の水平方向一様の仮定が満たされ易いことおよび濁度の鉛直分布が一定の傾向で変化し差分の影響が表われなかったことによるとと思われる。

図-6は混合揚水発電所上下部池の鉛直水温分布の経時変化の計算値と実測値を比較したものである。これによれば、より大規模の上部池の水温分布の底層水温の計算値は実測値より小さく揚水による底層の混合が行なわれていることを示しているが2次躍層の位置は比較的良く示されている。また、小規模下部池の水温分布の計算値は実測値の傾向をよく表わしていると言え、総じて水温分布の計算値は信頼性が高いと言えよう。

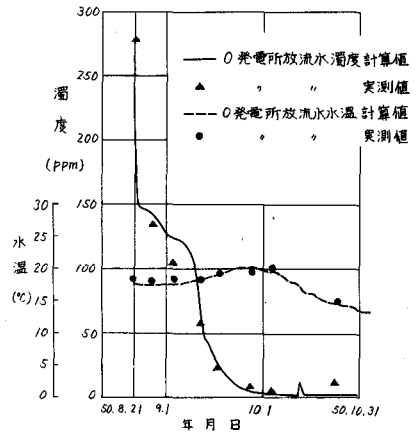


図-7 ○貯水池放水口水温、濁度変化

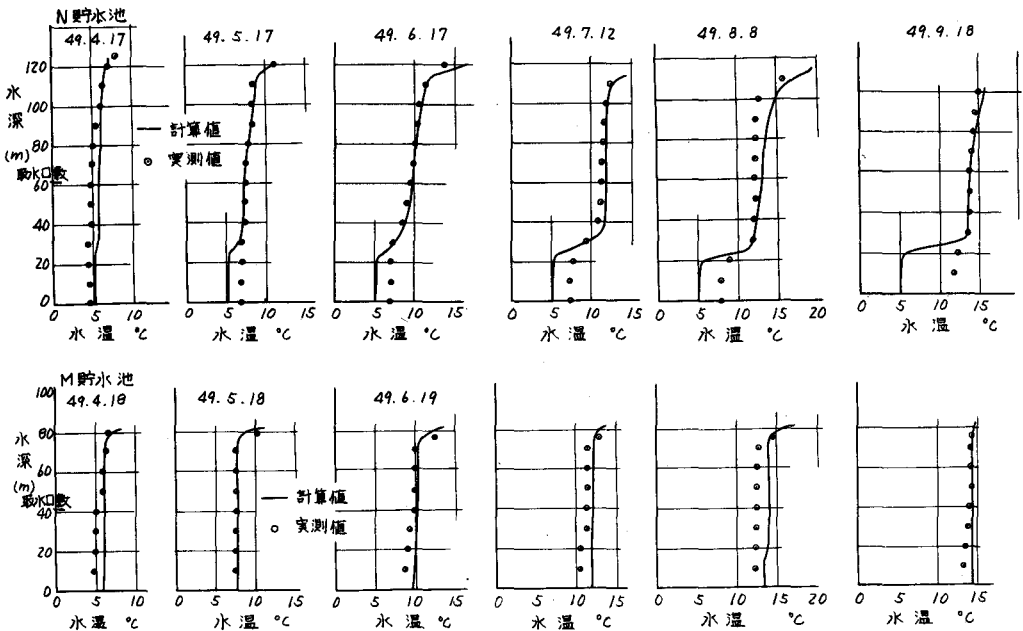


図-8 揚水発電所上下部貯水池の水温鉛直分布の計算値と実測値の比較

結 言

以上、貯水池水温、濁度の予測手法とその適用例について報告した。濁度予測の2次元への拡張など精度の向上は今後の課題である。実測、計算、結果の発表に御協力下さった各位に感謝いたします。

参考文献 1) P. J. Ryan et al : Prediction of the Annual Cycle of Temperature Changes in a Stratified Lake or Reservoir, MIT Rep. № 137. '71.4 .

2) 安芸周一, 白砂孝夫: 貯水池流動形態のシミュレーション解析, その1, 発電水力 № 134, '71.4 .