

わが国多目的貯水池の水理、水文的特徴とその評価

Hydraulic and Hydrological Characters of Multi-purpose Reservoirs in View of Thermal Aspect

○ 京都大学大学院 学生員 小林正典
京都大学工学部 正員 岩佐義朗
京都大学工学部 正員 松尾直規

1. はじめに

水の高度利用に伴ない、貯水池管理の技術的目標が単目的から多目的へ、また水量制御から水量・水質制御へと変化してきた今日、貯水池の形態、貯留水の挙動及び外的環境条件との関連にもとづいた貯水池の水理・水文的特徴を把握し、それらを技術的に評価しておくことは、貯水池管理に対してばかりでなく、今後の貯水池計画への指針としても重要であろう。

本研究は、わが国多目的貯水池における水理・水文情報を調査・解析し、その実態と特徴を明らかにするとともに、それらの分類と評価について考察したものである。まず、貯水池の水理・水文的特徴を水温成層の形成とその形態の面から説明し、それらの分類法及びその水理・水文学的指標との関連について述べる。ついで、わが国多目的貯水池の長期間にわたる水理・水文的特徴を分類し、その結果と貯水池の規模・幾何形状・地形等を含む貯水池の形態、外的環境条件としての気候及び地理的要素などとの関連を、水理・水文学的指標と結びつけて考察する。

2. 多目的貯水池の水理・水文的特徴とその分類法

貯水池におけるもっとも重要な水文情報は流出入量であり、水理情報は貯水位ならびに水温及び濁度の影響による密度である。これらの諸量と貯水池の形態要素及び環境条件等との関連に基いた水理・水文的特徴の表示法はいまだ明かではない。しかし、これらの諸量の変化が洪水時を除いて比較的時間スケールが大きく、むしろ季節的なものであり、かつ密度を支配する要素がほとんど水温であることから、年間を通じての流出入量及び水温分布の変化を調べ、それらの特徴を抽出することはすでに行われている。

岩佐、野口らは¹⁾、わが国多目的貯水池における流入流量、等水温線図を作成し、それらの特徴を成層特性の面から次のように分類して述べている。

- 1) 成層Ⅰ型：水温分布は人工的な取・放水施設を通過する流れの影響を受けることが少なく、受熱期に太陽エネルギーに関係する気象要素が主要因となって右下がりの等水温線をもつ水温成層が形成される。
 - 2) 成層Ⅱ型：1)と同じく受熱期に水温成層が発達するが、その等水温線はほぼ水平で、いわゆる変水層は取水口が位置する標高付近に形成される。すなわち、流出入流量に伴う移動熱量が成層形成の一つの要因となるものである。
 - 3) 中間型：盛夏期において弱い水温成層が発生するが、循環期になれば直ちに消滅する。水温分布は盛夏期を除けば一様に近い。
 - 4) 混合型：年間を通じて水温成層は形成されことなく、水温分布はほぼ一様である。
- 1), 2)に属する貯水池の中には、どちらかに明確に分類できない中間的なものもあり、また成層の強弱は個々の貯水池により異なるのが普通である。

上述の分類は、1年間の水理・水文資料より得られたものであるが、同一の貯水池でも長年にわたる資料よりその特徴を調べると、上述のいずれにも変化しうることがある。たとえば、図-1は矢作貯水池の1973年5月～1975年9月の間における等水温線、流入流量図であるが、これから貯水池の特徴もその水理・水文環境条件によりいろいろ変化することがわかる。すなわち、1973年は洪水もなく水温は水平成層をなし成層Ⅱ型の特徴を示しているが、1974年には、洪水の影響により成層Ⅰ型に近い水温分布となっており、1975年には、8月下旬の洪水により成層が破壊され、中間型あるいは混合型に変わっていることがみられる。

以上に述べた貯水池の水理・水文的特徴を何らかのパラメータで表示し、貯水池をそれによって分類しておくことは実用上有効である。従来より、貯水池の水文的特徴は、年間総流入(出)量 Q_0 と総貯水容量 V_0 との比、すなわち平均年回転率 β

$$\beta = Q_0 / V_0 \quad (1)$$

によって示されており、この値の大小により、それぞれ河川型、貯水型貯水池が分類されている。安芸・白砂は²⁾、この値を貯水池の水温成層の発達との関連パラメータとし、

10以下であれば成層型、20以上では混合型であると述べている。一方、水温成層の安定性指標たる平均的内部フルード数(あるいはリチャードソン数)を水理的特徴のパラメータとし、貯水池の成層状態を論じた研究もある³⁾。この場合、貯水池の平均的な内部フルード数をW.R.E.モデルに従って、³⁾

$$F_D = \frac{L}{H} \cdot \frac{Q}{V_0} \sqrt{\left(\frac{\rho_0}{g}\right) / \left(-\frac{d\rho}{dz}\right)} \quad (2)$$

と定義し、この値が $1/\pi$ (≈ 0.318)を越えると、不安定な混合型貯水池になるといわれている。ここに、 L :貯水池長、 H :貯水池平均水深、 Q :平均流入流量、 ρ_0 :基準密度、 g :重力加速度、 $-d\rho/dz$:受熱期(7月)の密度勾配である。ところが、現実の貯水池の実態を明らかにするには、 β と F_D のいずれによっても不十分であることから、岩佐、野口¹⁾は、両要素の値を用いて先に述べたわが国多目的貯水池の分類結果を整理し、 F_D がほぼ0.01以下、 β が10以下で成層型となることを示すとともに、 F_D と β の関係を考察した。さらに、著者らは、水温成層形成に最も支配的な太陽エネルギー活動の活発な7月を基準にとって、水理・水文要素を取り扱う方がより实际的であると考え、 β に代えて

$$\beta' = Q_M / V_0 \quad (3)$$

を定義し、この値と、(2)式の Q に7月の平均流入流量を用いて得られる F_D とによって成層状態を整理した⁴⁾。ここに Q_M :7月の総流入量である。図-2はその一例であって、長安口貯水池の昭和34年~50年の成層状態と β' 、 F_D との関係を示したものである。この図より、成層型及び中間型の各年には、 β' と F_D は一次的な関係をもち、この関係より外れた年が混合型となる傾向がみられる。こうした傾向は、先に述べた成層様式を問わず、わが国の多目的貯水池において同様に見られるものであるが、 β' と F_D との関係を示す直線の傾きは、各貯水池によって異なるようである。⁵⁾

3. 成層特性と水理・水文パラメータとの関連

以上で述べたように、貯水池の成層特性は水理的・

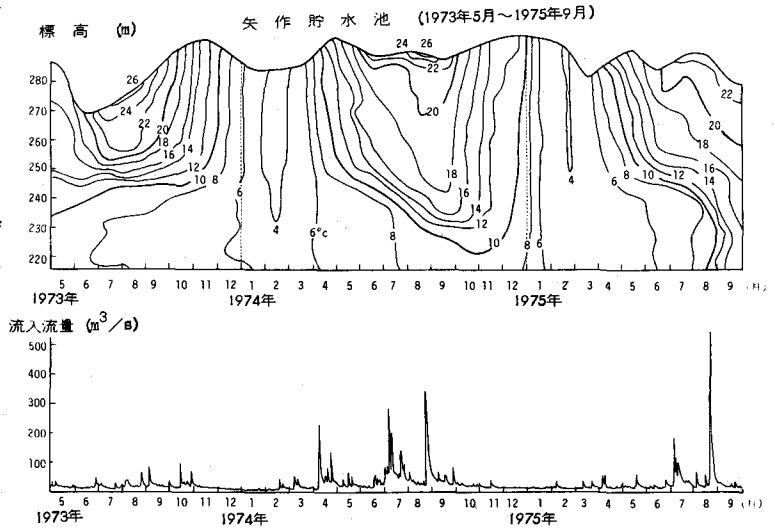


図-1 貯水池水温分布の経年変化

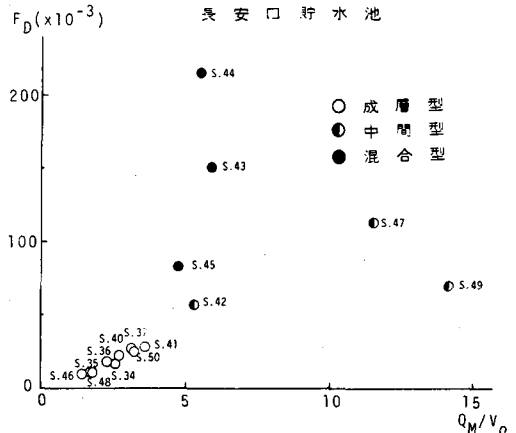


図-2 7月における F_D と β' との関係

徴としての F_D ならびに水文的特徴としての β 、 β' で分類、評価しようである。そこで、これらの関連をより詳細に調べてみよう。

図-3～8は、長年にわたり資料が整っている建設省関連の全国38ヶ所の貯水池を対象に、昭和38年～50年（中には数年の資料のみによる貯水池もある。）の各年の成層特性と、 F_D 及び β 、 β' の値を調べ、各貯水池を先に述べた成層Ⅰ型、成層Ⅱ型、中間型及び混合型に分類して各様式ごとにそれらの関係を図示したものである。図-3、4は通常成層Ⅰ型を形成する19の貯水池、図-5、6は成層Ⅱ型となることが多い13の貯水池、図-7、8は中間型あるいは混合型となることが多い6貯水池についてそれぞれまとめている。これらの図より、各成層様式にみられる特徴を挙げると次のようである。

1) 成層Ⅰ型

- ・成層状態は年によって変化することがほとんどなく、わずかに3ケースの中間型がみられるにすぎない。
- ・ β の値はすべて18以下、 β' は5以下であり、その変動は比較的小さい。
- ・ F_D の値はほとんど0.01

以下であり、これを越えると中間型があらわれるようである。

・ F_D と β 及び β' の間には正の相関がみられ、とくに後者では顕著である。

2) 成層Ⅱ型

・中間型が5ケース、混合型が1ケースみられ、1)のタイプと比べると、成層状態の変化は多いが、全体の割合からみればわずかである。

・ β は3.3～77まで、 β' は0.1～12.1まで変化し

ており、それらの変動が大きく、また β が20以上のものがかなりある。中間型、混合型があらわれるのは β が20以上、 β' が5以上となるときである。

・ F_D の値が0.01を越えるものがかなりあるが、それでも成層型を形成しており、中間型あるいは混合型となるのは F_D が0.03以上となる場合に多い。

・ F_D と β' の間に、弱い相関がみられるが、 F_D と β との関係ではばらつきが

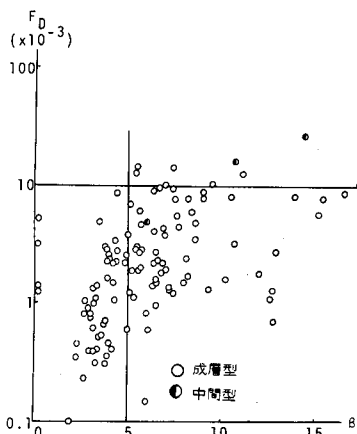


図-3 成層Ⅰ型貯水池における F_D と β の関係

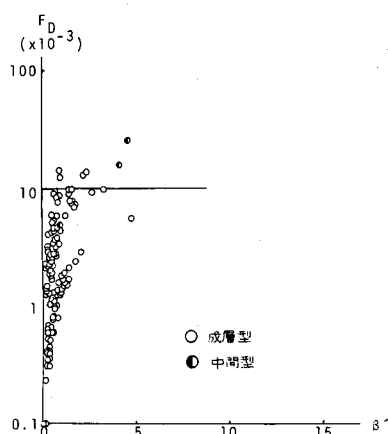


図-4 成層Ⅰ型貯水池における F_D と β' の関係

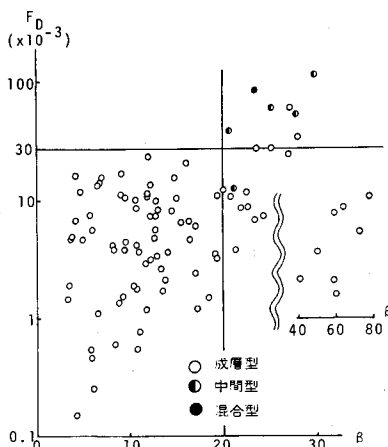


図-5 成層Ⅱ型貯水池における F_D と β の関係

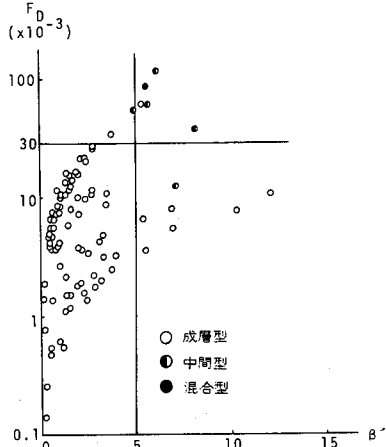


図-6 成層Ⅱ型貯水池における F_D と β' の関係

大きく相関はうすい。す

なわち、 β あるいは β' が大きくなっても F_D はそれほど大きくなり、比較的安定した成層が形成される場合がかなりある。

3) 中間型及び混合型

・ F_D が0.006～0.03あたりで中間型、0.03以上で混合型となり、0.006以下では成層型を形成するようである。

・ β はすべて8以上で、10を越えるあたりから中間型あるいは混合型があらわれる。

β' は図-6の成層Ⅱ型と比べてそれほど大きくなく、その値が1以下のときには成層型を形成している。

さらに、これらをまとめれば、次のようにいえよう。成層Ⅰ型に分類される貯水池は、一般に貯水容量に比して流入量が少なく、かつその変動も小さいため、成層形成が流入量に影響されることはほとんどなく、太陽エネルギーの活動により一義的に決定される比較的安定した状態になる傾向がある。ところが、成層が不安定となり、中間型へ移行する場合の F_D 及び $\beta \cdot \beta'$ の値は、成層Ⅱ型に比べるとやや低いようである。一方、成層Ⅱ型の貯水池は、一般に貯水容量に比して流入量が大きく、 F_D の値も成層Ⅰ型よりやや大きい傾向があり、またそれらの変動も顕著であるが、それによって成層が不安定となることは余りない。これは、このタイプの成層形成が、成層Ⅰ型のように一義的ではなく取(放)水口を通過する流れの影響を強く受けるため、 F_D と β 及び β' との関係が、貯水池操作条件や貯水池の形態要素などと密接に関連して各貯水池によりかなり異なる結果と考えられる。中間型あるいは混合型の貯水池は、水文的には成層Ⅰ型と同様の特徴をもっているが、非常に不安定で、 β が10以上、 β' が1以上といった比較的小さな値からそうした状態となる。 F_D が0.03以上では、ほとんどが混合型となるようである。また全体を総合してみると、 F_D が0.01以下では成層型、0.03以上では混合型、0.01～0.03では成層型と中間型が混在するような傾向があるが、0.01以上でも成層型となるのは、成層Ⅱ型の貯水池に多いといえよう。 β 及び β' については、上述したように各成層様式で異なり、一概には言えないようである。

以上の結果は、先に述べた安芸・白砂、ならびに岩佐・野口らの調査結果をある面において裏付けるものであると同時に、わが国多目的貯水池の水利・水文の特徴とそれらのパラメータとの関連をより詳細に明らかにしたといえよう。もちろん、すべての貯水池を対象としたわけではなく、また中間型、混合型のケースが少ないことから、これらの結果は、さらに多くの資料により、検討されなければならないことはいうまでもない。

4. 水利・水文の特徴と貯水池の形態及び気候・風土との関連

これまでに述べた貯水池の水利・水文の特徴が、貯水池の形態及び外的環境条件としての気候・風土などといかに関連するかは、貯水池と環境との関わりを考える上で重要である。

図-9は、先に調べた各貯水池の長年にわたる F_D の平均値と総貯水容量との関係を示したものであり、図-10はその平均値と形態要素としての L/H の関係を示している。図-9より、総貯水容量と $\overline{F_D}$ とは余り関係がなく、容量が大きい程、安定した成層が形成されるとは言えないようである。対象とした貯水池につい

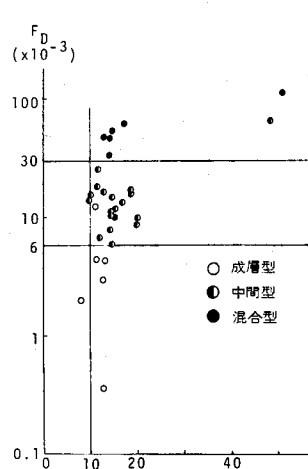


図-7 中間型及び混合型貯水池における F_D と β との関係

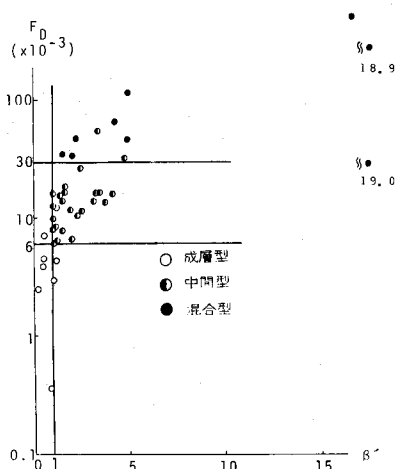


図-7 中間型及び混合型貯水池における F_D と β' との関係

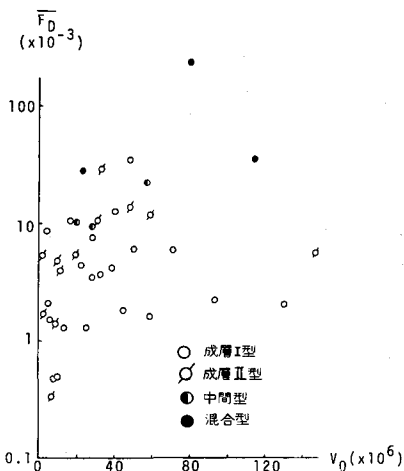


図-9 F_D の平均値と総貯水容量との関係

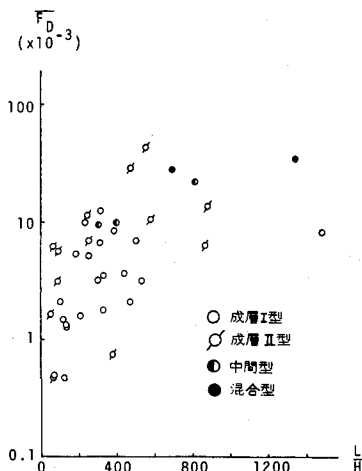


図-10 F_D の平均値と L/H との関係

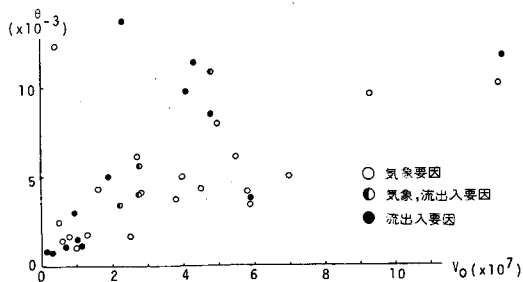


図-11 θ と総貯水容量との関係

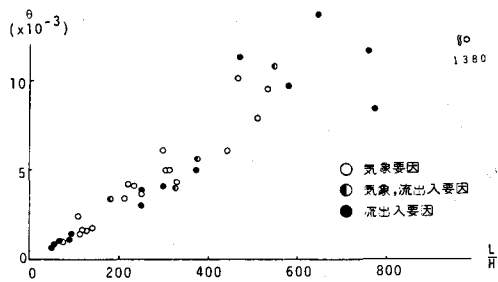


図-12 θ と L/H との関係

てみるならば、成層Ⅰ型は容量が大きく成層Ⅱ型は容量が小さい傾向がみられるが、中間型、混合型でも V_0 が大きいものがある。図-10では、いずれの成層様式においても、 L/H が大きくなると $\overline{F_D}$ が大きくなる傾向がみられ、貯水池の形態容素が成層状態に影響することを示している。すなわち、水深が小さく長い貯水池では安定した成層が形成されにくく、短かくても水深が深い貯水池では形成され易いという傾向がみられる。さらに、水理、水文的特徴と V_0 、 L/H との関連をみるため、図-2にみられるような F_D と β' の一次関係を示す直線の傾き θ を成層型の各貯水池について求め、それらの関係を図示したのが図-11、12である。これらから、 θ と V_0 及び L/H との間には正の相関がみられ、とくに L/H との関係では顕著なことがわかる。水深が小さく長い貯水池では、受熱期における流量の大小が、水理特性としての F_D に敏感に反映するといえよう。

次に、水理、水文的特徴と環境条件としての気候・風土との関連をみるため、各貯水池を4、5月に流入量が多い雪解け型と、それらの月より6、7月に流入量が多い梅雨型の2つに分類し、それらの月の流入量、 $Q_{4,5}$ 及び $Q_{6,7}$ と総貯水容量との比、 $Q_{4,5}/V_0$ 及び $Q_{6,7}/V_0$ と F_D との関係を長年にわたり整理したものが図-13、14である。これらより、 $Q_{4,5}/V_0$ と F_D とはほとんど関係しないが、 $Q_{6,7}/V_0$ と F_D との関係については雪解け型の貯水池で正の相関がみられ、この型のものはとくに受熱期の流量が成層形成に影響することがわかる。同じ目的で各貯水池の θ と、 $Q_{4,5}$ 及び $Q_{6,7}$ と年間総流入量の比の平均値、 $\overline{Q_{4,5}}/Q_0$ 及び $\overline{Q_{6,7}}/Q_0$ との関係を気候区分に準じた地域分類で整理したものが図-15、16である。これらの図から、貯水池の特徴と気候・風土との関連を述べることは容易にできるものではないが、西日本の貯水池は梅雨型で θ が比較的小さく、東北

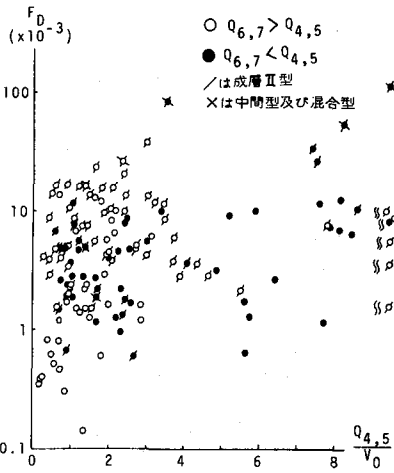


図-13 F_D と $Q_{4,5}/V_0$ との関係

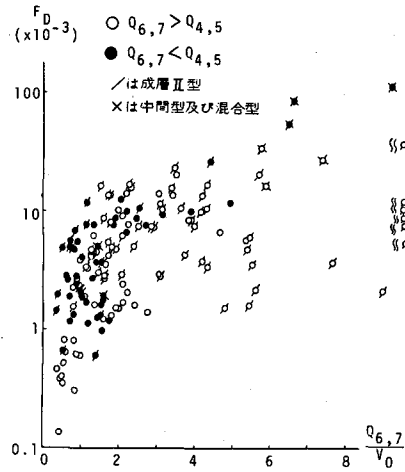


図-14 F_D と $Q_{6,7}/V_0$ との関係

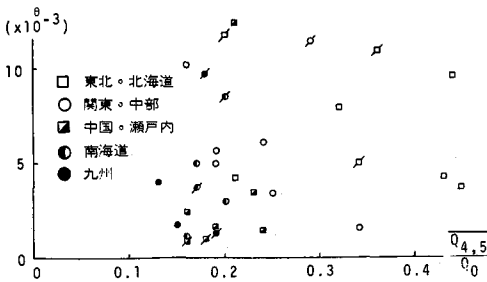


図-15 θ と $Q_{4,5}/Q_0$ との関係

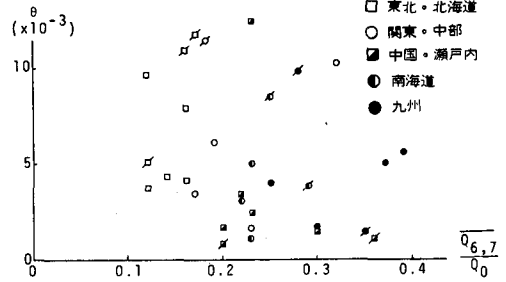


図-16 θ と $Q_{6,7}/Q_0$ との関係

及び北海道の貯水池は雪解け型で、西日本のものに比べると θ が大きい傾向があることが示されるようである。

5. 結 語

本研究では、わが国多目的貯水池における水理・水文的特徴の実態とその分類法、及びそれらと水理・水文パラメータとの関係を明らかにするとともに、それらの特徴が貯水池の形態要素及び気候・風土などといかに関連するかについて考察した。得られた結果は、貯水池管理ならびに今後の貯水池計画にとって有益な示唆を与えるものと信ずる。

最後に、本研究で用いた資料は、建設省河川局編、多目的ダム管理年報によるものであることを記すとともに、資料整理、作図等にご協力いただいた京都大学大学院、柏木雄二君に謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) 岩佐・野口・児島：貯水池内の水温成層予測法について、京都大学防災研究所年報第18号-B, 1975
- 2) 安芸・白砂：貯水池濁水現象の調査と解析（その1）、電力中央研究所報告74505, 1974
- 3) Water Resource Engineers, Inc. Walnut Creek, California: Mathematical Models for the Prediction of Thermal Energy Changes in Impoundments, 1969
- 4) 岩佐義朗：ダム貯水池における水理特性、建設省河川局編日本河川水質年鑑、研究編, 1977
- 5) 建設省四国地方建設局大渡ダム工事事務所、国土開発技術研究センター：ダム放流設備設計資料調査報告書, 1978