

流入水温を近似した貯水池放流水温制御の可能性と地域・貯水池特性

POSSIBILITY, LOCALITY AND RESERVOIR CHARACTERISTICS OF WATER TEMPERATURE CONTROL FOR RESERVOIR DISCHARGE CONSIDERING INFLOW WATER TEMPERATURE

櫻井 寿之¹・鎌田 昌行²・杉谷 圭一³・柏井 条介⁴

Toshiyuki SAKURAI, Masayuki KAMADA, Keiichi SUGITANI, Josuke KASHIWAI

¹正会員 工修 独立行政法人土木研究所 主任研究員 (〒305-8516 茨城県つくば市南原1番地6)

²正会員 独立行政法人土木研究所 交流研究員 (〒305-8516 茨城県つくば市南原1番地6)

³石川島播磨重工業株式会社 航空宇宙事業本部 (〒188-8555 東京都西東京市向台町3-5-1)

⁴正会員 独立行政法人土木研究所 上席研究員 (〒305-8516 茨城県つくば市南原1番地6)

From the viewpoint of river ecosystem and environment, it is important that water temperature of the effluent water from dam reservoir is close to inflow water temperature. In this study, we collected and analyzed the inflow discharge data, meteorological data and inflow water temperature data of dam reservoirs managed by Ministry of Land, Infrastructure and Transport and Japan Water Agency. Using those data as input, we conducted a numerical simulation of flow and heat transport in the simple shape reservoirs using vertical two-dimensional model. From the simulated results, we recognized that thermal stratification plays an important role in controlling discharge water temperature. We also examined the influence of locality and reservoir characteristics on the effects of the control.

Key Words: water temperature control, reservoir, heat transport, numerical simulation, thermal stratification

1. はじめに

ダム貯水池では、流水を貯留することにより、放流量および放流水温・水質が流入河川水のそれから変化する傾向をもつ。このうち貯水池放流水の水温については、従来、冷水放流が問題視されてきた。冷水放流とは、春から夏にかけて水温成層の形成された貯水池で、低標高の放流設備から流入河川水より低温の水が放流されることにより下流域での稲作や下流河川の水棲生物への影響が懸念されるものである。冷水放流については、表層取水設備・選択取水設備によって、技術的に解決することが可能となっている。しかしながら最近では、河川環境への意識の高まりから、冷水放流を避けるだけでなく、放流水温を流入水温に近づけることが求められるようになってきている。最近の環境アセスメントでは、10年程度の期間をとり、1年を通しての10年間最大値と最小値との範囲内に放流水温が入るような運用が可能となることを目安に環境保全対策が策定されている¹⁾。これらの状況に鑑み、本研究では、国土交通省および水資源機構

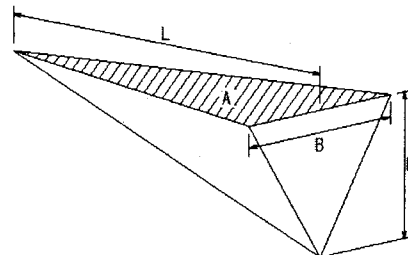


図-1 解析に用いた貯水池形状

の管理ダムについて、流入量、気象、ダムの流入水温と平均気温の関係についてデータを収集・整理し、数値計算によって10年間の放流水温を解析することにより、流入水温を近似した水温での貯水池放流の実現可能性について地域及び貯水池特性に着目して検討した。

2. 解析条件

(1) 貯水池形状

解析に用いる貯水池形状としては単純なV字谷を堰き止めた場合に形成される三角錐形状(図-1)を採用する。この場合、貯水池形状のパラメータとしては、 h :

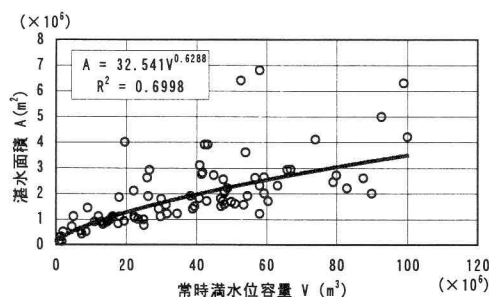


図-2 常時満水位容量と湛水面積の関係

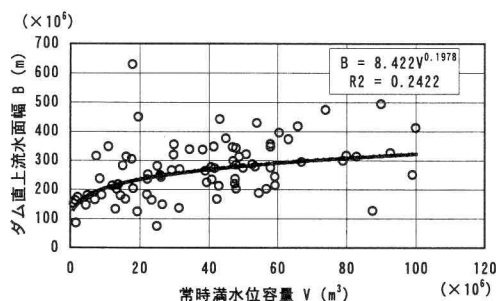


図-3 常時満水位容量と水面幅の関係

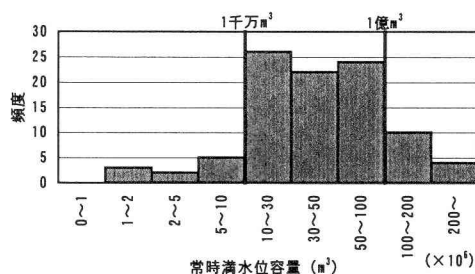


図-4 常時満水位容量の頻度分布

表-1 解析に用いる貯水池形状

貯水容量 $V(m^3)$	湛水面積 $A(km^2)$	水深 $h(m)$	貯水池長 $L(km)$	貯水池幅 $b(m)$
1千万	0.82	37	8.0	202.7
1億	3.49	86	21.6	323.1

水深(m), B: ダム直上流水面幅(m)および L: 貯水池延長(m)の三つである。これらのパラメータを設定するために、国土交通省直轄ダム、内閣府沖縄総合事務局管轄及び水資源開発機構管理ダムの97ダムについてダム貯水池諸元の整理を行った。諸元の整理に当たっては、年間を通して現れる頻度の高い常時満水位時の値を用いている。図-2は常時満水位容量が1億 m^3 以下の83ダム(1億 m^3 を超えるダムは傾向が異なり、また数が少ないので省略した)について常時満水位容量と湛水面積の関係を示したものである。図中の実線は式(1)を表している。

$$A = 32.541V^{0.6288} \quad (1)$$

ここで、A: 湛水面積(m^2), V: 常時満水位容量(m^3)を表す。相関係数は0.7程度とやや小さいが、Vの指数は三角錐を仮定した場合の2/3に近い値となっており、ここでは、式(1)から計算条件を決定した。図-3は常時満水位容量とダム直上流水面幅の関係を表したもので、ダム直上流水面幅はダム位置の横断面を三角形と仮定してダム高、堤頂長、常時満水位時水深から算出した。これより図中に示した下記の関係式を用いることとした。

$$B = 8.422V^{0.1978} \quad (2)$$

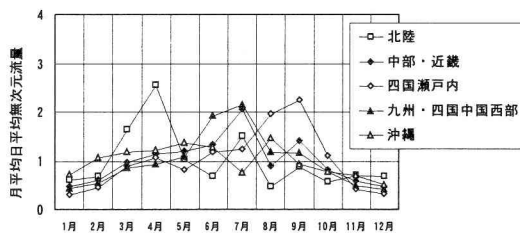
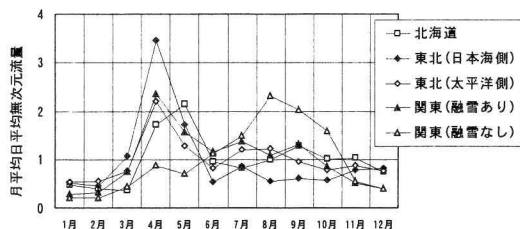


図-5 流入量の年変動

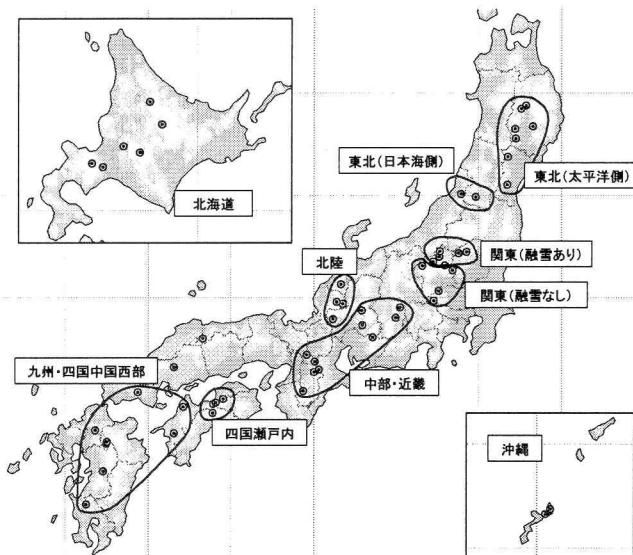


図-6 流入量データを収集したダム位置

図-4は常時満水位容量の頻度分布を示したものである。この分布を考慮して、解析に用いる貯水容量として1千万 m^3 と1億 m^3 を採用した。次に式(1)及び式(2)を用いて各パラメータを計算し値を丸めて、表-1に示すような解析に用いる貯水池形状を決定した。

(2) 流入量

解析に用いる流入量を設定するために、10年以上の日平均流入量の時系列データを入手できた52ダムについて流入量の解析を行った。図-5は地域毎の流入量の年変動を示したものであり、1983~1992年の10年間平均の月平均日平均流量を10年間全体の平均日平均流量により無次元化して示した。図-6にデータ整理を行ったダム位置と地域区分を示す。図-5では同じ地域内のダムの平均値を示している。地域区分は各ダムの変動状況を把握の上実施しており、図-5より、北海道、東北(日本海側、太平洋側)、関東(融雪有り)、北陸の地域では、融雪出水の影響により、4月、5月の流量が他の月より多くなっており、中でも東北で顕著なことがわかる。また、中部・近畿と九州・四国中国西部では、梅雨にあたる6月、7月の流量が多く、関東(融雪なし)と四国瀬戸内では台風の上陸が多い8月、9月の流量が多くなっ

表-2 流入量波形採用ダム

No.	地域区分名	流入量波形採用ダム
1	北海道	金山
2	東北(日本海側)	白川
3	東北(太平洋側)	鳴子
4	関東(融雪あり)	相模
5	関東(融雪なし)	下久保
6	北陸	真名川
7	中部・近畿	丸山
8	四国瀬戸内	柳瀬
9	九州・四国中国西部	鶴田
10	沖縄	安波

ている。沖縄は年間の変動が小さく、台風時期の8月の流量がやや大きい。解析に用いる流入量データは、気象条件と合わせて用いる必要があり、地域の平均的な流入量変動に近い変動を示すダムを選定した。選定したダム(10ダム)を表-2に示す。

(3) 気象条件

後述する数値計算では、大気と水塊の熱交換のモデル化において、気温・日射量・湿度・風速・雲量の5つの気象条件を用いており、流入量データを用いたダム近傍で観測されたデータを使用した。日射・湿度・雲量についてはダム近傍の気象官署、気温・風速についてはダム近傍で設置標高の近い気象官署もしくはアメダス観測所における1983～1992年の10年間のデータを収集した。

(4) 流入水温

ダム貯水池流入地点の水温については、通常月1回の定期水質調査によって観測が行われているが、水温の変動を表現するには不十分である。このため環境影響評価のための水温予測等では、水温との相関が高い気温を用いた線形の推定式を用いて推定される場合が多い。この推定式を全国の53地点について収集した。推定式は次式のように表される。

$$T_w = aT_a + b \quad (3)$$

ここで、 T_w ：水温、 T_a ：気温(日平均値等)、 a, b ：定数を表す。気温は、水温の形成にある程度の期間がかかることを想定して、日平均気温、2日平均気温(前日と当日)、3日平均気温(前々日、前日と当日)等がよく用いられる。今回収集した推定式についてもこの三つの気温の何れかが用いられている。今回収集した推定式のダム位置を図-7に、相関係数の頻度分布を図-8に示す。これより気温と水温の相関が高いことが確認できる。推定式の傾向について調査した結果、北海道の推定式は傾きが小さく、沖縄は大きくっており、地域毎に推定式の傾向が似ているが、本州・四国・九州に関しては、地域をより細分化しても地域毎の傾向が明確ではなかった。そこで、解析に用いる推定式としては、「北海道」、「本州・四国・九州」、「沖縄」の3地域に分類し、推定式の定数を平均して求めることとした。図-9に収集した推定式を地域別に分けて示す。なお、波線は推定式の包絡線を表し、実線は各地点の推定式を示しており線の始端と終端は推定式作成に用いられたデータの気温の最低値と最大値に合わせている。求めた地域別の定数を

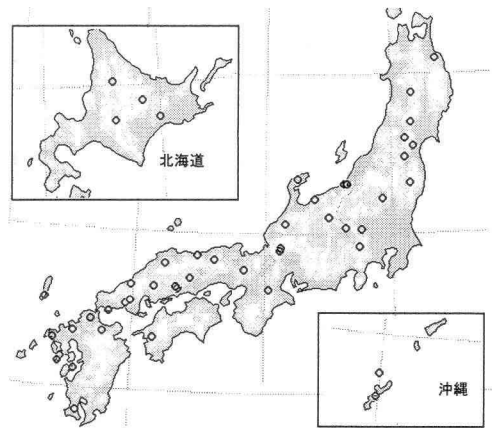


図-7 水温データを収集したダム位置

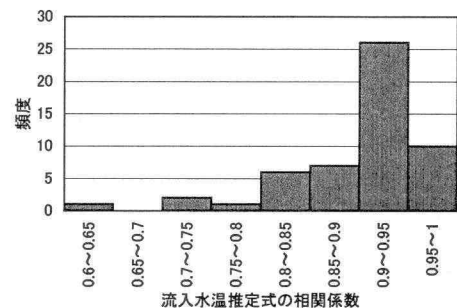


図-8 気温と流入水温の相関係数

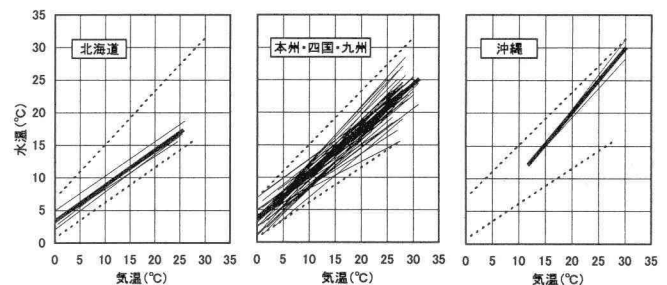


図-9 水温推定式

表-3 流入水温推定式の定数

地域	a	b
北海道	0.543	3.261
本州・四国・九州	0.698	3.288
沖縄	0.976	0.496

表-3に、この定数を用いた推定式を図-9の太実線で示す。

3. 計算方法

(1) 数値計算法

解析には静水圧を仮定した鉛直二次元貯水池流動モデルを用いた。基礎方程式としては、幅方向に積分した連続式、流下方向の運動方程式、静水圧の式、熱の輸送方程式を用いており、渦動粘性係数の評価には標準型 $k-\epsilon$ モデルを用いている。式の詳細は参考文献²⁾を参照されたい。基礎式の各変数をスタッガード格子に配置し、有限体積法により離散化を行い、移流項の離散化には1次精度風上差分を用いている。なお、水表面の格子の離

散化には自由水面の運動学的条件を用いた。

(2) 熱収支のモデル

上述の熱の輸送方程式において、大気と水塊の熱交換を考慮する必要がある、安芸ら³⁾のとりまとめた経験式を参考に水塊中の熱フラックスを後述のようにモデル化した。なお、熱フラックスは、大気から水塊へ伝達する方向を正とした。

1) 輻射による熱フラックス

$$\phi_0 = (1 - \alpha)\phi_i \quad (4)$$

ここで、 ϕ_0 ：水面反射を差し引いた輻射熱フラックス (cal/(m²・sec))、 α ：水面反射率、 ϕ_i ：日射量 (cal/(m²・sec))を表す。

2) 熱伝導による熱フラックス

$$\phi_k = -\frac{269.1}{86400} (0.000308 + 0.000185V_{wind}) \rho_0 (T_s - T_a) \quad (5)$$

ここで、 ϕ_k ：熱伝導による熱フラックス (cal/(m²・sec))、 V_{wind} ：水面上15cmの位置の風速 (m/sec)、 ρ_0 ：水の基準密度 (1,000,000g/m³とした)、 T_s ：表面水温 (°C)、 T_a ：気温 (°C)を表す。

3) 蒸発による熱フラックス

$$\phi_e = -\frac{1}{86400} (0.000308 + 0.000185V_{wind}) \rho_0 (e_s - E e_a) (L + C_w T_s) \quad (6)$$

ここで、 ϕ_e ：蒸発による熱フラックス (cal/(m²・sec))、 e_s ：表面水温に対する飽和水蒸気圧 (mmHg)、 E ：相対湿度 (0~1)、 e_a ：気温に対する飽和水蒸気圧 (mmHg)、 L ：蒸発に伴う潜熱量 (585cal/gとした)、 C_w ：水の比熱 (1.0cal/(g・°C)とした)を表す。なお、飽和水蒸気圧は下記に示す温度による近似式を用いた。

$$e = 0.00045T^3 + 0.00363T^2 + 0.39626T + 4.47110 \quad (7)$$

4) 有効逆輻射による熱フラックス

$$\phi_R = 0.97K \left\{ 0.937 \times 10^{-5} K_a^6 (1.0 + 0.17n_c)^2 - K_s^4 \right\} \quad (8)$$

ここで、 ϕ_R ：有効逆輻射による熱フラックス (cal/(m²・sec))、 K ：Stefan Boltzman 定数 (1.3546 × 10⁻⁸cal/(sec・m²・K⁴))、 K_s ：表面水温の絶対温度 (K)、 K_a ：気温の絶対温度 (K)、 n_c ：雲量 (0~1)を表す。

以上より水面での熱フラックスは次式で求められる。

$$\phi_s = \beta \phi_0 + \phi_k + \phi_e + \phi_R \quad (9)$$

ここで、 ϕ_s ：水面の熱フラックス (cal/(m²・sec))、 β ：水面吸収率を表す。

水中に伝わる熱フラックスは次式を用いた。

$$\phi_y = (1 - \beta)\phi_0 \exp\{-\eta(y_s - y)\} \quad (10)$$

ここで、 ϕ_y ：水中の標高yでの熱フラックス (cal/(m²・sec))、 η ：減衰係数 (m⁻¹)、 y_s ：水位 (m)、 y ：標高 (m)を表す。

パラメータの値は、既往文献³⁾を参考にして、 α ：0.06、 β ：0.5、 η ：0.3m⁻¹を設定した。

表-4 計算ケース

ケース名	貯水容量(m ³)	年回転率
A-1	1千万	2
A-2		10
B-1	1億	2
B-2		10

(3) 計算条件

計算は1983~1992年の10年間について行った。計算格子は、長期の計算であることを考慮して、流下方向は10分割とし、鉛直方向の格子間隔は1m、計算時間ステップは4秒とした。初期条件としては、流速分布は全領域でゼロとし、初期水温分布には計算開始時 (1月1日) の流入水温を全領域に与えた。

時系列として与える境界条件については、気象条件は2. (3) で示した日平均データを、流入水温は2. (4) で示した推定式で求めた日平均データを用いた。また、流入量は、当該ダムの日平均流量データをもとに、年回転率が設定した条件となるように一定率を掛けて与えた。

2. (1) でデータ収集したダム貯水池の内2/3は回転率 (総流入量/常時満水位容量) が10以下となっており、回転率の影響を検討するために、回転率の値として2と10を設定した。計算ケースを表-4に示す。なお、助走計算として最初の1年間で2回計算して11年分の計算を行い最初の1年を除いたデータを結果として採用した。

基本的な特性を検討するために、放流条件を単純化して放流設備を一つとし、放流量については流入量と等しいと仮定した。放流口位置の設定については、流入水温を近似した放流可能性を検討するため、貯水池内において流入水温に近い水温標高位置に放流口が追従する選択放流操作とした。放流口呑口高さは3m、流速分布は一樣とし、標高設定は1m単位で行い標高の移動は実際の選択取水設備等のゲート操作速度を考慮して3分に1回とした。

なお、今回用いた計算モデルでは水の凍結は扱えないため、水温が0.01℃以下になった場合は0.01℃を与えた。

4. 計算結果

(1) 年間の放流水温特性

図-10に計算結果の一例として、中部・近畿のケースA-2 (貯水量 1千万m³、回転率 α =10) の1984年の1年間について、水温鉛直分布 (ダム直上流)、取水標高、流入・放流水温、水温差 (放流-流入) を示す。

水温成層のない10月後半から3月中旬までは、鉛直方向の水温変化が小さいため、流入水温の変動に対応して取水標高が大きく移動している。また、水温成層が形成される上記以外の期間は、流入水温が上層水温より低く下層水温より高いため、水温躍層位置周辺の標高で取水されることがわかる。この躍層付近の取水により、7月から10月までの躍層の低下が促進され、取水位置は徐々に下がっていく。

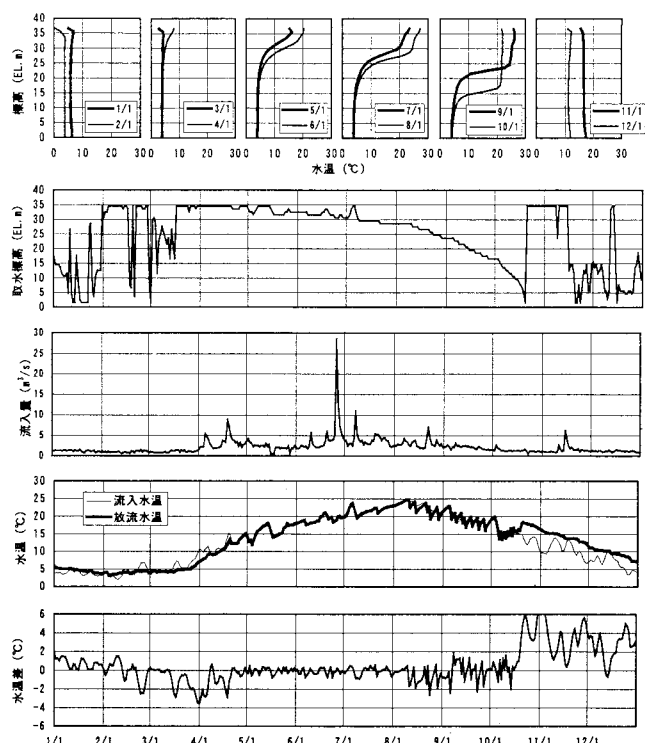


図-10 計算結果（中部・近畿，ケースA-2，1984年）

水温差についてみると、水温成層の発達している5月から10月までは、水温差は0℃付近で変動しており、8月初旬以降は変動幅がやや大きいものの流入水温を近似した放流がなされている。秋から冬にかけては、貯水池内の水温がほぼ一定であり、流入水温よりも高いため、図-10の例では最大で水温差6℃程度の温水放流となっている。冬から春に移る3月、4月においては、流入水温が貯水池水温より高く、最大で水温差3℃程度の冷水放流となっている。

水温差や時期の違いはあるものの、上記に示した基本的な水温変化、取水位置の変化は地域や回転率によらず同様であり、貯水池内に水温成層が形成されている場合には、躍層付近からの取水により流入水温を近似した放

流水温の制御が可能となる。また、水温成層がない場合には貯水池内の水と流入水の水温差が放流水に生じる。成層の形成される期間は春から秋にかけてであるが、成層期であっても取水位置が貯水池底部まで下降し、底層の低水温水塊が消滅すれば流入水温を近似した放流はできなくなる。こうした状況の発生の有無および時期は、気象や回転率等の貯水池特性に影響されるものと思われる。また、成層が消滅する循環期の鉛直混合の発生時期についても、これらパラメータの影響を受けるものであり、以下にこれらの影響について検討する。因みに、図-10に示した計算例の1年間の放流水と流入水の熱量の差は $6.3 \times 10^{12} \text{ cal}$ （貯水量の熱容量で割ると0.63℃）であり、貯水池が存在することによって、大気との熱交換により放流水の熱量が増加している。またこの増加した熱量の放流は冬期に大部分が配分される。

(2) 地域・貯水池特性の影響

図-11は各地域、計算ケースの年間の放流水と流入水の水温差を示したものであり、年間の変動傾向を把握するために計算結果を10年間で平均し、7日間移動平均操作を施して作成した。図中の凡例は表-4に示した計算ケースを表す。これより4. (1)に示した年間の変化状況は地域、計算ケースによらずほぼ同様であり、春の冷水放流期、水温成層形成期である春から秋にかけての水温差が小さい期間、秋から冬の温水放流期という変化を示すことが確認される。地域や計算ケースによる差は状況変化の時期や水温差の値にあるが、水温差が小さい期間の開始時期については地域毎に計算ケースによらずほぼ同じとなっており、回転率と貯水池規模の影響が小さい。

回転率の影響についてみると、回転率が大きいケースA-2、B-2の方が、A-1、B-1と比較して水温差が小さい期間が短い。これは回転率が大きいほど放流による水温躍層の低下が速いためである。貯水池規模については、貯

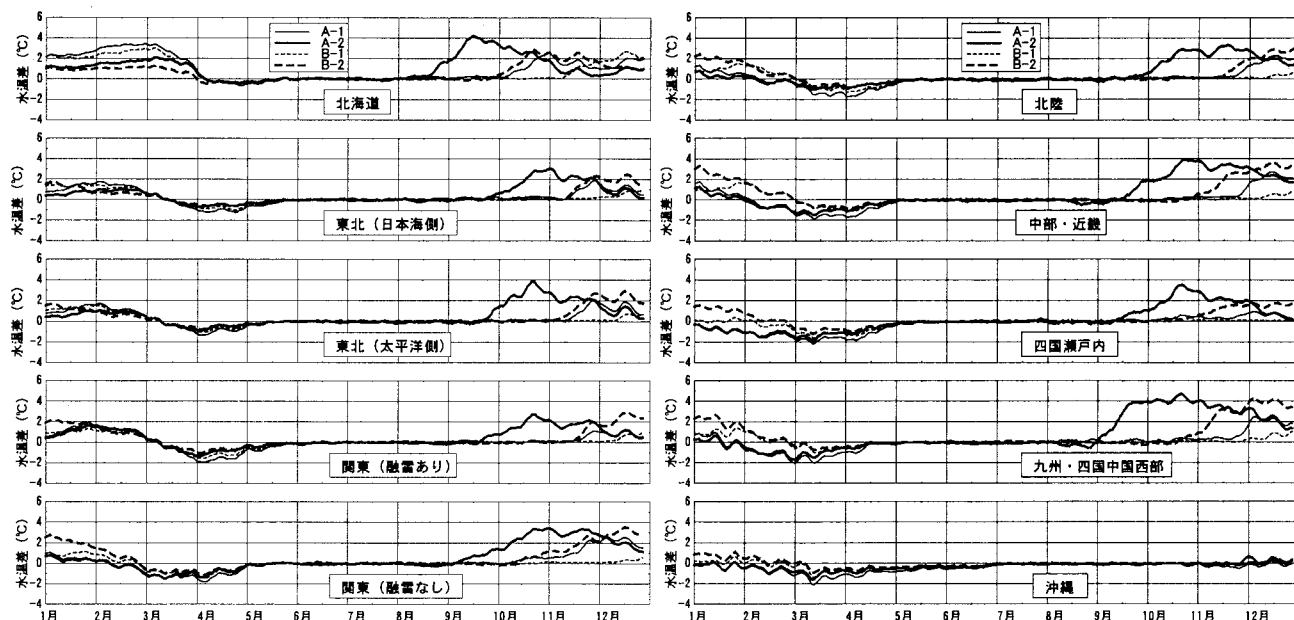


図-11 流入水温と放流水温の水温差の計算結果（10年間平均，7日間移動平均）

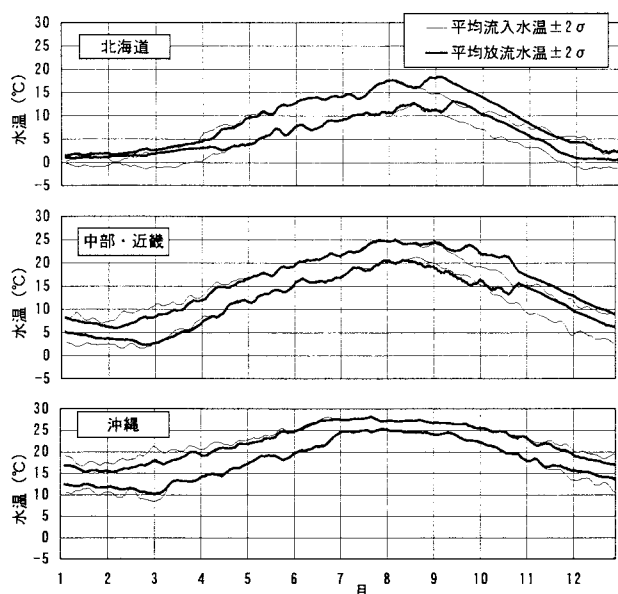


図-12 流入水温と放流水温の10年間の変動特性
(ケースA-2, 7日間移動平均)

水量1億 m^3 のケースB-1, B-2の方がA-1, A-2よりも水温差が小さい期間が長く、水深が大きいことや熱容量が大きいことから、貯水池規模が大きい方が成層を維持しやすいと考えられる。

地域の特性をみると、沖縄が他地域と異なる傾向を示しており、年間を通して水温差が0℃に近い。これは、流入水温が高いため夏場でも表層からの取水があり、表層の熱の蓄積が少なく、水温成層が維持されるとともに、冬期間に関しては成層が消滅するものの、貯水池内水温が流入水温にほぼ近い値となっているためである。北海道に関しては、秋の気温及び流入水温の低下時期が早く、底層からの取水となる時期も早いと早期に水温成層が消滅し、秋の温水化が顕著となっている。その他の地域については、顕著な傾向の相違は認められないが、東北、関東（融雪有り）および北陸では、春先に流入水温が他地域より低いため、水温差が正から負に変化する時期が遅い傾向がみられる。また、夏場の流量の多い中部・近畿および九州・四国中国西部において、秋の水温差が若干大きい傾向が認められる。

図-12は10年間の流入水温と放流水温の変動特性を示したものであり、10年分のデータから各日の平均値と標準偏差 σ を算出し、平均値 $\pm 2\sigma$ を7日間移動平均して求めたものである。平均値 $\pm 2\sigma$ の範囲は正規分布に従うサンプルであれば95%のサンプルをカバーする範囲であり、図には、成層形成期間が短いケースA-2の北海道、沖縄およびその他の地域を代表して中部・近畿を示した。他のケースではここで示したケースより、放流水温の変動が流入水温の変動内に収まる傾向にある。図より、沖縄は年間を通して放流水温の変動域は流入水温の変動域に収まっている。北海道と中部・北陸では、成層形成期の5月から8月までは流入水温と放流水温の変動幅はほぼ等しいが、その後の9月、10月は放流水温の変動域が流入

水温の変動域の上限を超えている。また、秋から春にかけては、貯水池内の水温が一定のため、放流水温の変動幅が小さい。ただし、中部・近畿ではその間の放流水温変動幅は流入水温の変動内に収まっているが、北海道では収まっていない。放流水温が流入水温の変動幅の範囲内であれば、ダムがない場合の自然の変動内に収まっていると考えられるが、秋から冬にかけての温水放流が自然の変動幅を超える場合があることが確認された。

5. おわりに

単純な貯水池形状、「流入＝放流」操作、流入水温に近い標高からの取水操作を仮定した数値計算により、流入水温を近似した取水放流の基本的な検討を行った。以下に得られた知見を示す。

- 1) 流入水温を近似した放流は、貯水池内に水温成層が存在する場合に可能である。
- 2) 水温成層が形成される期間の開始時期は貯水池特性に左右されないが、終了時期は気象および貯水池特性によって前後する。
- 3) 回転率が小さいほど、貯水池規模が大きいほど、放流水温の制御可能な期間が長くなる。
- 4) 成層が消滅した後は沖縄以外の地域では温水放流となり、その後、成層が形成される前の期間に冷水放流となる。
- 5) 北海道は放流水の温水化が顕著であり、沖縄は年間を通して流入水温を近似した制御が可能と考えられる。その他の地域では、傾向の顕著な違いは認められなかった。
- 6) 秋から冬にかけての温水放流が流入水温の10年間の変動範囲を超える場合がある。

今後、貯水位の変動を考慮した条件や、年間トータルでみた水温差を小さくするための季節別放流操作方法等の検討を進めたい。また、流入水温を近似した放流操作のためには躍層付近での取水が必要であり、取水設備による水温勾配の大きい領域からの取水特性の研究進展が望まれる。

謝辞：本研究の実施にあたり、データ収集に御協力頂いたダム管理所等の関係各位に感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 天野邦彦：貯水池機能の保全施設 水質保全（富栄養化対策等）、ダム技術、No.212, pp.12-20, 2004.
- 2) 鈴木伴征、櫻井寿之、柏井条介：川治ダム貯水池の洪水時濁水現象、水工学論文集、第48巻, pp.1357-1362, 2004.
- 3) 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、発電水力、No.134, pp.37-50, 1975.

(2004. 9. 30 受付)