

殿ダムの異高同時取水に関する数値解析的検討

鈴木 伴征¹・矢島 啓²・泉谷 隆志³

¹正会員 博(工) 八千代エンジニアリング株式会社 (〒111-8648 東京都台東区浅草橋 5-20-8)

E-mail:tmy-suzuki@yachiyo-eng.co.jp

²正会員 博(工) 島根大学教授 エスチュアリー研究センター (〒690-8504 島根県松江市西川津町 1060)

E-mail:yajima@soc.shimane-u.ac.jp

³正会員 修(工) 八千代エンジニアリング株式会社 (〒111-8648 東京都台東区浅草橋 5-20-8)

E-mail:izumiya@yachiyo-eng.co.jp

ダム貯水池における選択取水設備を用いた異高同時取水は、国内で事例がほとんど報告されていない。本研究では殿ダム貯水池を対象とし、CFDに基づく熱流体解析によって異高同時取水の水理現象及び取水特性を明らかにした。まず、取水塔内を計算対象領域として異高同時取水時の取水塔内の水温分布や取水塔前面の流速分布、放流水温を再現可能なモデルを構築し、取水塔内の水温に着目した水質の混合機構を推定した。次に感度分析によって、異高同時取水時の取水率への影響因子を定量的に比較し、取水率と取水条件から算出される密度フルード数との関係性を明らかにした。以上から、異高同時取水時によって、ダムの放流水質を制御できる可能性が示された。

Key Words: selective withdrawal system, multi-gate intake, reservoir, density stratification, intake characteristics, CFD

1. はじめに

ダム貯水池における選択取水設備を用いた異高同時取水（深度の異なる複数の取水口から同時に取水し、異なる水質の水を取水塔内で混合して放流する手法）は、国内で事例がほとんど報告されていない。これは、既存の選択取水設備の大半が単一の取水口を昇降させて取水する機能面での制約も大きい、異高同時取水の水理現象が明らかにされていないことも主な要因と考えられる。

近年、新しいタイプの選択取水設備として連続サイフォン式取水設備が複数のダム貯水池に設置されているが、当該設備は複数の取水口を同時に開口可能な機能を有しているにも関わらず、従来の運用がなされている。しかし、既存施設の有効活用の観点から、異高同時取水を新たな水環境保全手法の1つとして導入することが望ましいと考えられる。単一取水口を前提とした選択取水に関してはこれまで多数の研究者（例えば、日野・大西¹⁾、大西ら²⁾など）によって研究がなされているが、異高同時取水の取水特性に関しては比較的少ない。E.Howington³⁾は単純化した条件下で密度成層を考慮した取水率の理論式を導出し、観測や実験で精度を検証している、柏井ら⁴⁾は運動量保存則を基に取水量式を導出し水理模型実験によって、その精度を検証している。泉谷

ら⁵⁾は異高同時取水の実現象を現地観測によって把握し、改良取水量式の有効性を検証している。しかし、いずれの研究も、取水塔内での水塊の混合機構は十分考慮せず、単純化した水理条件を前提条件としている。そこで本研究では、実際のダム貯水池を対象として、詳細な取水条件を考慮した Computational fluid dynamics (CFD)による熱流体解析によって異高同時取水の水理現象及び取水特性を明らかにする。

2. 殿ダムにおける現地観測の概要

(1) 殿ダムの概要

本研究で対象とした殿ダムの概要について述べる。殿ダムは流域面積 38.1km²、湛水面積 0.64km²、総貯水容量 1,240 万 m³の治水、利水、環境保全を目的としたロックフィルダムである。選択取水設備として連続サイフォン式取水設備を有しており、本業務で対象とする異高同時取水が可能な機能を有する。当該取水設備の構造図を図-1に示す。当該設備は、逆V字形状のサイフォン管を水深方向に連続して15段配置し、底部取水管2段と併せて、計17段の取水管から構成されている。連続して配置された逆V字管の頂部に空気を出し入れすること

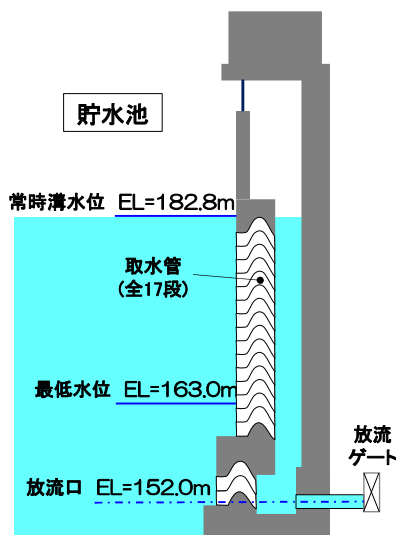


図-1 殿ダムの連続サイフォン式選択取水設備の概要

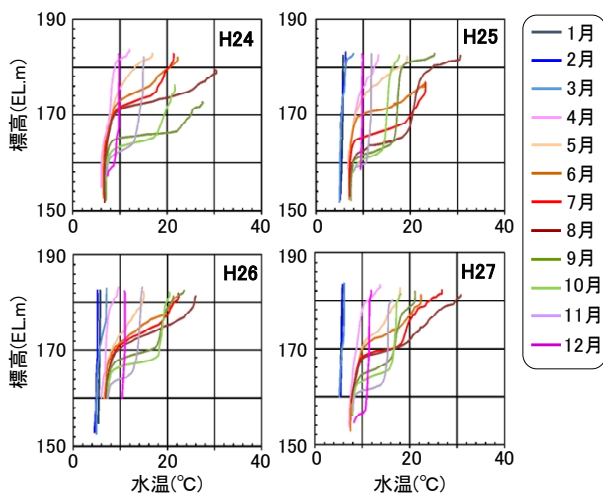


図-2 殿ダムの貯水池水温の鉛直分布 (2012～2015) ⑨

で開閉を行い、任意の取水管から取水することが可能である。当初は流入水温に近い水深の水を取水してダム直下に放流していたが、近年は複数の取水口を同時に開口する弾力的な運用も積極的に実施している。

近年の貯水池の水温鉛直分布を図-2 に示す。当該ダムでは通常 5 月頃から水温躍層が形成され、8 月頃に最も発達する。最大時で表層は約 30℃に達し、底層との水温差は約 22℃となる。躍層の位置は年によって変化するが概ね EL.170m 付近に形成される。

(2) 現地観測データの概要

異高同時取水の現地観測は 2014 年、2015 年の 2 ヶ年において実施されている⁷⁾。観測項目は、取水塔前面における流速の鉛直分布、取水塔側面の水温の鉛直分布、取水塔内の水温の鉛直分布、放流口の水温である。

取水塔前面の流速鉛直分布は 0.5m～1.0m の間隔で超音波ドップラー式 3 次元精密流速計 VECTOR(Nortec 社)

表-1 現地観測時の異高同時取水の実施状況

実施年	観測日	貯水位 (EL.m)	貯水池 状況	取水位置※		取水量 (m ³ /s)
				上段	下段	
2014	9月26日	182.6	成層形成時	N6	N9	0.9
	10月17日	183.0	成層が弱い時期	N6	N9	2.6
	12月22日	182.9	循環期	N10	N13	2.7
2015	6月12日	181.2	成層形成時	N3	N7	2.0
	9月29日	182.1	成層形成時	N6	N9	2.0
	9月30日 (1回目)	181.9		N6	N12	2.0
	9月30日 (2回目)	181.9		N6	N12	1.0

※取水位置は図-1 に示す取水口の番号を意味する。例えば「N6」は上から 6 番目の取水口を指す。

を用いて測定された。取水塔側面の水温の鉛直分布は殿ダムの管理者である国土交通省が 0.5m 間隔で 2 時間おきに自動観測を実施している。観測には多項目水質計 DataSonde5x (Hydrolab 社) が使用されている。取水塔内の水温分布は取水塔縦断方向 (取水口から放流口に向かう方向) に 4 地点 (0m, 1m, 2m, 3.2m) で実施された。水面から多項目水質計 (DataSonde5x) を取水塔内底部まで一定速度で沈降させ、データを 1Hz でロガーに取り込んだ後、水深 0.05m 間隔で補間されたものを使用した。放流水温については、ダム直下の発電所放流口に自記水温計 (DEFLT : JFE アドバンテック社) を設置し計測されたデータを使用した。

本研究で再現計算の対象とした現地観測時の概要 (貯水池成層状況、取水条件等) を表-1 に示す。

3. 異高同時取水の再現計算

異高同時取水時の水温と水理現象を再現することを目的として、殿ダムの選択取水設備を対象とした CFD による熱流体解析を実施した。

(1) 解析モデルの概要

本研究では、取水塔内の流入水の混合現象の把握に着目して、英国インペリアルカレッジで開発された汎用流体解析ソフトウェア PHOENICS (CHAM 社 : <http://www.phoenics.co.jp>) を利用した鉛直 2 次元熱流体解析を行った。基礎式には、ブシネクス近似した質量、運動量、エネルギーの保存式を用い、定常計算を実施した。乱流モデルには $k-\epsilon$ モデルを採用した。空間の離散化は有限体積法が用いられている。

(2) 計算条件

a) 計算領域

計算領域を図-3 に示す。計算領域は取水塔の中心を通る鉛直(Y 方向)–水平(X 方向)の縦断面において取水塔

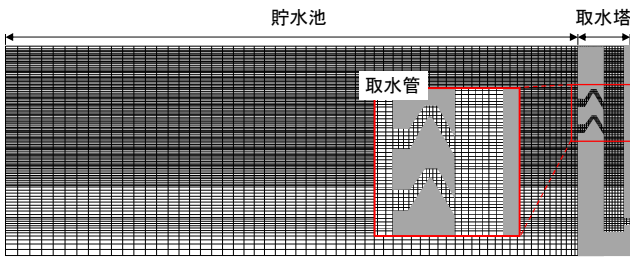


図-3 計算領域の概要 (計算格子)

内部 (取水管, 取水塔内, 放流管) 及び貯水池を対象とした. 計算領域は X 方向 109m, Y 方向約 37m, 格子分割数は X 方向 85, Y 方向 118, 格子サイズは X 方向が 0.25~1m, Y 方向が 0.25~0.5m である.

取水塔内は奥行き(X 方向)3.5m, 幅 3.0m の矩形断面であり, 底部から 2m 上方に放流管 (φ1.5m) が設置されている. 鉛直方向は底部から水面までを計算領域として設定しており, 水面は摩擦のない水平面とした. 取水管は冒頭でも述べたが逆 V 字のサイフォン管が設置され, 各管の断面形は高さ 1.5m×幅 3m の矩形である. 逆 V 字管内の流れを適切に計算するため, 逆 V 字形状の部分にはカットセル法⁸⁾を採用した.

貯水池は奥行き(X 方向)99.7m とし, 取水に伴う取水塔前面の流速分布を再現するために設定した. また, 貯水池と取水塔内の水面は同水位とした. なお, 実際は取水管での圧力損失によって取水塔内外で水位差が生じるが, この影響については後述する.

b) 境界条件

貯水池上流端と取水塔放流口 (下流端) で水平流速を与えた. 流速は観測時の取水量を取水塔内の幅 3m で除した単位幅流量を上流端水深と取水塔放流口の高さでそれぞれ除した流速を水深方向一様に設定した. 水温は取水塔側面で自動観測された鉛直分布を取水塔の貯水池に面する計算メッシュに境界条件として設定した. そのため, 貯水池内は水温による密度変化を考慮せずに流速分布を計算し, 取水塔の上流面に設定した水温分布に従った温度の水塊が上段と下段の取水口から取水塔内に流入

する. なお, 取水管を含む取水塔内の解析については水温による密度差を考慮した. 水面は断熱条件として大気との熱のやり取りは考慮していない.

(3) 再現計算結果

異高同時取水時の水理現象の再現性を以下検証した.

a) 取水塔内の水温分布

貯水池の成層状況及び取水量が異なる 2014 年 9 月 26 日, 10 月 17 日, 2015 年 6 月 12 日の観測結果について取水塔内の水温分布の比較を図-4 に示す. 観測結果は, いずれの取水量, 成層条件下でも取水塔内の水温分布に類似の傾向が認められた. すなわち, 下段取水管の上部では多少の水温差は認められるものの, ほぼ一様の温水が分布している. 一方, その下部では取水塔の取水口側に冷水域, 放流口側に温水域が分布する様子が認められる. 計算値と観測値では温度分布に多少の差異はあるが, 観測値は取水によって計測器が取水口側に引き込まれている影響を考慮するとよく再現されていると考えられる.

b) 取水口周辺の流速分布

次に, 取水口前面の流速分布として 2014 年 9 月 26 日, 2015 年 9 月 30 日(1 回目)の比較結果を図-5 に示す. 計算結果は取水塔前面から 1m と 2m の離れた位置の水平流速である. 一方, 観測は取水塔前面から 0.5~1m 離れた位置での結果である. いずれも流速の分布形状は概ね再現されているものの, 観測値に近い取水口から 1m の計算結果において水平流速値が 1.5~2 倍程大きく計算された. これは本解析が鉛直 2 次元解析であり, 流れの 3 次元性を考慮していないことが原因と考えられ, 実際の流速分布は取水塔の幅よりも広い範囲まで流速が発生すると推察される. 流動層については, 3 次元密度成層場を対象とした理論解¹⁾に白砂・安芸ら⁹⁾の実験定数を適用した推定値と比較して最大 2 倍程度大きい結果となった. しかし, 殿ダムの場合, 取水塔内および放流の水温は, 複数の観測結果と本解析結果において比較的良好一致しており, 流動層に対する流れの 3 次元性の影響は比較的小さいと考えられる.

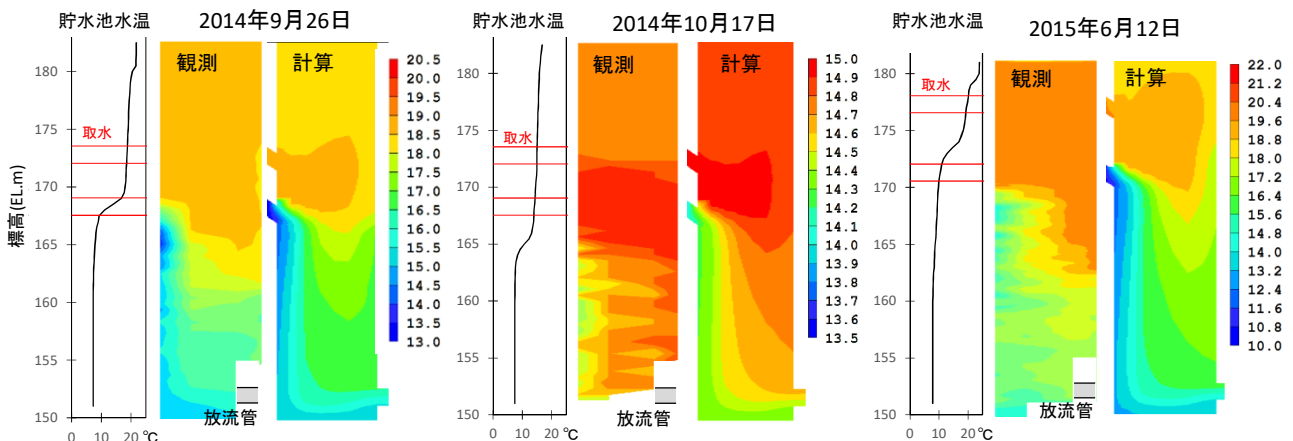


図-4 計算値と観測値の比較 (取水塔内の水温分布) 及び貯水池観測水温と取水位置

c) 放流水温

放流水温は対象とした全ての観測結果と計算結果の比較を図-6に示す。観測値は各観測日の平均値であり、計算値は放流口出口部の平均水温である。本研究の計算値はいずれの観測日の放流水温とも比較的良好に再現している。本モデルによる取水口周辺の流速は観測値との誤差が認められたものの、流動層の厚さや流速分布の対称性は再現されており、流動層全体の平均水温としては実現象に近い水温の水が取水される結果となっていると考えられる。また、同図には泉谷⁹⁾が連続サイフォン式取水設備の特性を考慮した改良取水量式による推定値も示したが、2014年9月26日、2015年6月12日、9月30日2回目に関しては改良取水量式による推定値よりも再現性の向上が認められる。

d) 異高同時取水における取水塔内外水位差の影響

本解析では取水塔内外で生じる水位差を無視しているため取水特性に影響を及ぼす可能性がある。そこで、再現計算を行った取水量 0.3~3m³/s の異高同時取水の数値解析結果を用い、取水管の流入口(貯水池)から流出口(取水塔内)までの区間における損失エネルギーを算定した。その結果、その値は水理公式^{10) 11)}による損失水頭(取水管のスクリーン・流入・摩擦・曲がり・流出等に伴う損失水頭の合計)から得られた結果と概ね一致していた(3m³/s 時で約 10cm 水頭)。よって、本モデルでは取水塔内外で生じる実際の水位差と同程度のエネルギー損失が取水管内で再現されており、後述する感度分析結果への影響は小さいと考えられる。

e) 取水塔内での混合機構

再現計算によって得られた取水塔内の水温分布と流速ベクトルをもとに、異高同時取水による取水塔内の混合機構について考察した。計算結果の一例として 2014 年 9 月 26 日の再現結果を図-7に示す。

流速ベクトルに着目すると、取水塔内の取水口側の壁面に沿って強い下方向の流れが存在する。この水温は上段・下段の間となっており、当該領域で強い混合が生じていると推察される。一方、放流口側では比較的弱い下向きの流れが形成されている。水温はやや高く、鉛直下方に進む過程で取水口側を流れる水との混合が進む。また、上段取水管の吐口付近に渦流れが形成されており、混合水の一部が取水塔内の上部に流れ込んでいる。そのため、取水塔上部では上段から取水される水温よりもやや低い状況が形成されている。

4. 取水特性に関する感度分析

3章で構築した解析モデルを用いて取水特性に関する感度分析を行った。

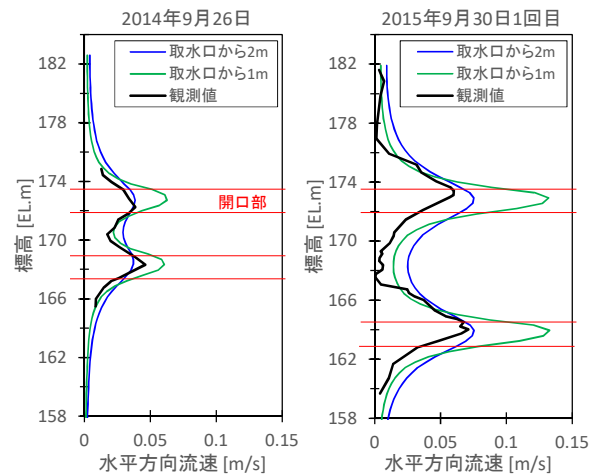


図-5 観測値と計算値の比較 (取水塔前面の水平流速)

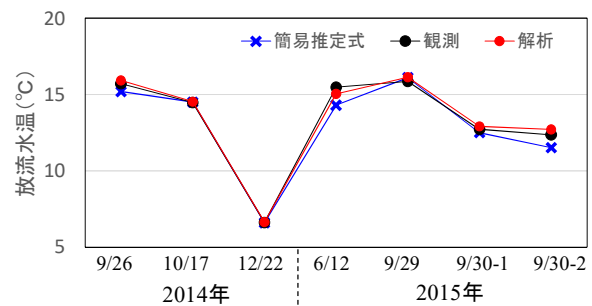


図-6 観測値と計算値の比較 (放流水温)

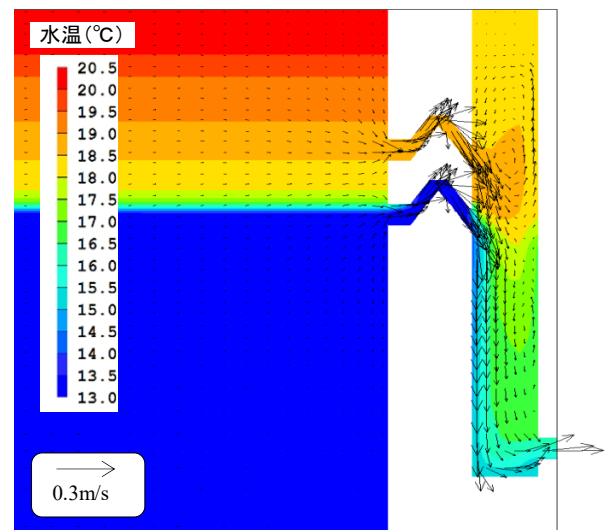


図-7 貯水池及び取水塔内の水温分布及び流速ベクトルの計算結果 (観測日:2014年9月26日)

(1) 感度分析の計算条件

計算条件を表-2に示す。感度分析では、取水量、貯水池水温分布、取水位置を分析対象として、殿ダムの運用実績を踏まえて計算ケースを設定した。ケース1のシリーズでは取水位置を固定し、取水量と水温分布を変化させた。水温分布に関しては図-2の観測結果を参考に成層時を仮定した2層分布を設定した(図-8)。また、成層の存在による影響を確認するため、成層が形成されていない条件も対象とした。

表-2 感度分析の主な設定条件と分析結果

ケース	取水量	水温分布		貯水池水温(°C)			取水位置(※)		計算結果	
		成層度	躍層標高	上層	下層	温度差	上段	下段	下段取水率	放流水温
1-1	0.3	なし	170	20	20	0	N4	N11	0.49	20.0
1-2		小		15.5	9.2	6.3			0.81	10.4
1-3		中		21.3	8.8	12.5			0.99	8.9
1-4		大		28.2	7.5	20.7			1.00	7.6
1-5	1.0	なし	170	20	20	0	N4	N11	0.48	20.0
1-6		小		15.5	9.2	6.3			0.51	12.3
1-7		中		21.3	8.8	12.5			0.56	14.3
1-8		大		28.2	7.5	20.7			0.64	15.0
1-9	3.0	小	170	15.5	9.2	6.3	N4	N11	0.49	12.4
1-10		中		21.3	8.8	12.5			0.49	15.1
1-11		大		28.2	7.5	20.7			0.50	17.8
2-1	1.0	大	170	28.2	7.5	20.7	N4	N9	0.53	17.1
2-2							N4	N13	0.74	12.9
2-3							N2	N11	0.64	15.0
2-4							N6	N11	0.64	15.0
2-5							N2	N13	0.74	12.9
2-6							N6	N9	0.53	17.1
2-7							N4	N11	0.64	15.0
2-8							N6	N13	0.64	15.0

※取水位置の見方は表-1と同様。

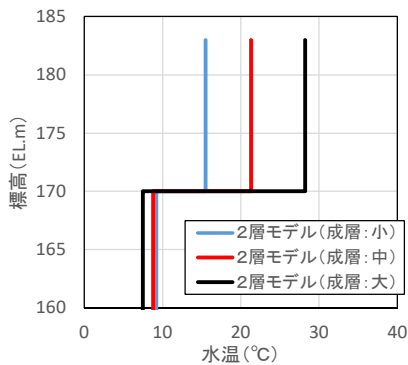


図-8 感度分析に用いた貯水池水温鉛直分布

ケース 2 のシリーズでは取水量と水温分布を固定し、取水位置を変化させた。取水位置は上層と下層から 1 箇所ずつ取水することを基本として、上下層で異なる取水位置の組み合わせを複数設定した。なお、ケース 2-8 では取水位置と躍層標高の相対的な位置関係をケース 2-7 と同様にして鉛直下方にスライドさせ、放流口と取水口の距離による影響を確認した。貯水位はすべて常時満水位 (EL.182.8m) とした。

(2) 感度分析結果

感度分析によって得られた下段取水率及び放流水温の解析結果を表-2 の計算条件に合わせて示した。

a) 取水量・貯水池水温成層による取水率への影響

取水位置を固定し、取水量と水温分布を変化させたケース 1 の結果を図-9 に示す。取水量を 0.3~3m³/s で変化させると下段取水率が 49~99.6% の範囲で比較的大きく変化した。また、同じ取水量でも成層の強弱によって取水率が変化する傾向も認められた。取水量が少なくても成層が存在しなければ下段取水率は約 50% となり、成層の存在が取水率に大きく影響を及ぼしていることが確

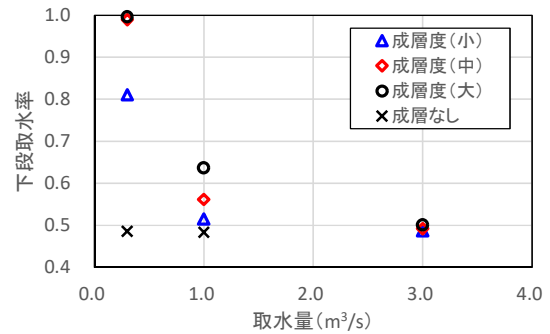


図-9 感度分析結果 (取水量と下段取水率の関係)

認された。なお、成層度が大~中で取水量が 0.3m³/s の場合、下段取水率がほぼ 100% となり、上段取水口からほとんど取水されない状況が認められたが、このような現象は E.Howington³⁾ によっても報告されている。

b) 取水位置による取水率への影響

次に取水量と貯水池の水温分布を固定し、取水位置を変化させた場合における取水率の変化について分析した。上下段の取水口の位置と下段取水率の関係性を調べた結果、下段取水率は上段の開口位置に関係なく、下段の開口位置でほぼ同じ取水率となることが表-2 の 2-1~2-7 の計算結果の比較 (2-1 と 2-6, 2-2 と 2-5, 2-3 と 2-4 と 2-7) より分かる。これらの結果から、取水率の支配因子として「下段取水口と水温躍層の鉛直距離」、 「下段取水口と放流口の鉛直距離」の 2 つが考えられることから、追加ケースとして「下段取水口と水温躍層の鉛直距離」のみを変化させたケース 2-8 を実施した。その結果、ケース 2-8 は 2-7 と同じ下段取水率となった。よって、「下段取水口と水温躍層の鉛直距離」が取水率の支配因子の 1 つと考えられる。

(3) 異高同時取水時における取水特性の考察

前述の分析結果から、取水率の主な支配因子として水温躍層が考えられる。すなわち、取水塔内で上層から取水した温水を下段の取水口まで引き込もうとすると、水温躍層より下方で鉛直上向きの浮力が発生するため、鉛直下向きの放流に伴う慣性力が浮力に打ち勝つ必要がある。この浮力と慣性力の比率が異高同時取水の取水率を支配していると考えられることから以下に示す密度フルード数 (Fr_d) を用いて感度分析の結果を整理した。

$$Fr_d = \frac{U}{\sqrt{((\rho_L - \rho_U)/\rho_L)gL}} \quad (1a)$$

ここに、 U : 取水に伴う取水塔内の断面平均流速(m/s), ρ_U : 上層密度(kg³/m³), ρ_L : 下層密度(kg³/m³), L : 水温躍層と下段取水口(貯水池側中心標高)の鉛直距離(m)を表す。

Fr_d と下段取水率の関係を整理した結果を図-10 に示すが、水温成層を設定した全ての検討結果から指数関数的な関係性が認められた。また、同図には現地観測で成層

時に上下層から異高同時取水が実施された4回についても同様に整理した結果を掲載したが、感度分析とほぼ同じ関係性を示しており、本研究で提案した F_{ra} は現地スケールの現象も適切に表現可能と考えられる。

5. おわりに

本研究では殿ダム貯水池を対象とし、鉛直2次元熱流体解析によって異高同時取水の水理現象と取水特性を検討した。その結果、以下のことが明らかとなった。

- (1) 熱流体解析による再現計算の結果、異高同時取水時の流速分布や水温分布を概ね再現でき、取水塔内での鉛直2次元的な混合機構を明らかにした。
- (2) 成層時を想定した感度分析の結果、異高同時取水時の下段取水率は貯水池の水温鉛直分布、取水量、取水位置によって50~100%の範囲で比較的大きく変化すると考えられる。特に取水位置に関しては、下層の取水標高のみが取水率に影響を及ぼす結果となった。
- (3) 殿ダムの連続サイフォン式取水設備による異高同時取水の取水率は、取水量、貯水池水温分布、取水標高より算出される密度フルード数によって評価可能と考えられた。

以上から、貯水池の水温分布を計測して取水標高を適切に設定すれば異高同時取水時の放流水質を適切に制御できる可能性が示された。なお、本研究は殿ダムの選択取水設備に特化して成層時の2箇所同時取水を想定したが、今後は取水時の内外水位差や取水塔形状、水温分布の一般化を含め、異高同時取水の取水量式を明らかにする予定である。また、3箇所以上の異高同時取水による取水特性も明らかにし、異高同時取水による貯水池及び下流河川の水質環境の新しい水質管理手法を提案したい。

謝辞：本研究は、国土交通省河川砂防技術研究開発（地域課題分野）の研究助成（H26-27「殿ダム貯水池における異高同時取水による選択取水設備の効率的運用」、研

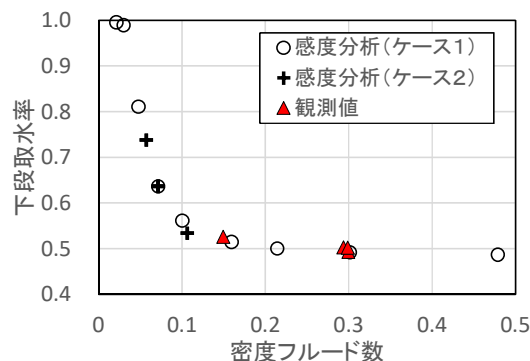


図-10 異高同時取水時の下段取水率と密度フルード数の関係

究代表矢島啓)の成果を利用した。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- 1) 日野幹雄, 大西外明: 密度成層流におよぼす pointsink の高さの効果, 土木学会論文報告集, 第163号, pp39-48, 1963.
- 2) 大西外明ら: 貯水池の選択取水に関する研究: 土木学会論文報告集, 第369号/II-5, pp79-87, 1986.
- 3) E.Howington: Simultaneous multiple-level withdrawal from a density stratified reservoir, Technical Report W-90-1, 1990.
- 4) 柏井条介, 野仲典理: 多重式ゲートの選択取水特性, ダム技術, No.135, pp11-16, 1997.
- 5) 泉谷隆志, 矢島啓, 鈴木伴征: ダム貯水池の異高同時選択取水による取水特性の検討, 土木学会論文集 BI(水工学), Vol72, No4, ppI-685-I-690, 2016.
- 6) 国土交通省 中国地方整備局: 殿ダム定期報告書概要版, pp43, 2016.
- 7) 国立大学法人 鳥取大学: 平成27年度 殿ダム貯水池における異高同時取水による選択取水設備の効率的運用報告書, 2016.
- 8) CHAM-Japan: 直交格子法について, < <http://www.phoenics.co.jp/column/cutcell1.htm> >, 2017.
- 9) 白砂・安芸: 貯水池の濁水現象とその水理学的軽減対策, 発電水力, No.128, p3-25, 1973.
- 10) 土木学会編: 水理公式集 平成11年度版, 1999.
- 11) ダム・堰施設技術協会編: ダム・堰施設技術基準(案)(基準解説編・マニュアル編), 2011.

(2018.5.31 受付)

ANALYTICAL STUDY ON SELECTIVE WITHDRAWAL SYSTEM WITH SIMULTANEOUS MULTI-GATE OPERATION AT TONO DAM RESERVOIR

Tomoyuki SUZUKI, Hiroshi YAJIMA and Takashi IZUMIYA

The hydrological phenomenon and intake characteristics of selective withdrawal system (SWS) with simultaneous operation of multi-gates were clarified by thermal fluid analysis based on CFD for Tono Dam reservoir in Japan. First, we constructed a model that can reproduce the water temperature distribution in the intake tower, the flow velocity distribution at its front, and the discharged water temperature at the time of the simultaneous multi-gate intake. Then, we estimated the water mixing mechanism inside the water intake tower by the model. Finally, by sensitivity analysis, we examined factors influencing the water intake rate, and clarified the relationship between water intake rate and density Froude number. These results indicated high possibility to control the discharged water quality of the dam by the simultaneous multi-gate intake.