

貯水池の流動形態と水質

(財)電力中央研究所 正会員 安芸周一

同 同 ○白砂孝夫

1. まえがき

大規模貯水池の築造に伴ない、ダム下流河川に濁水長期化現象が生じる場合がある。濁水現象の発生を支配する因子は①常時および洪水時の河川水の懸濁物質の性状、②流入水の貯水池内での滞留機構の2つと考えられる。①に関しては懸濁物質中に含まれる直径約 20μ 以下の粒子濃度が貯水池水の濁度の主成分となり、このような微細な粘土鉱物粒子の流出は流域の地質、開発状況に影響されるものと考えられる。②に関しては洪水期に当る夏季の貯水池水の鉛直方向安定度、すなわち水温成層の形成状態が密接な関係を持つものと考えられる。安定度を支配する因子は主として $\alpha = \text{貯水池年間総流入量} / \text{貯水池総容量}$ および $\beta = 1 \text{ 洪水総流量} / \text{貯水池総容量}$ の2つと考えられる。現在までの調査によると、大まかな目安として、 $\alpha < 10$ ならば安定した成層型になり、 $\alpha > 20$ ならば池水が上下の混合を生じやすい混合型になる。また、成層型であっても $\beta \geq 1$ のような洪水が生じると混合型に移行することもある。 $\alpha > 20$ 程度の混合型の貯水池においては貯水池水の交換が比較的に早いので特に問題は生じないものと考えられる。濁水長期化現象は $\alpha < 10$ の成層型貯水池に見られる。

本報告は濁水長期化現象が顕著に認められている大規模発電専用貯水池および大規模混合揚水発電所貯水池の例について、その濁水現象長期化機構を明らかにし、その結果に基づき水理学的軽減対策として選択取水設備を設置することを提案するとともに選択取水設備に関する実験的検討によって得られた知見について述べるものである。

2. 貯水池における水温成層形成、消滅過程

1) 発電専用貯水池の場合

貯水池には夏季を中心とする受熱期および冬季を中心とする放熱期がある。放熱期には池水は表面から冷却されるため上層の水の密度が大きくなり、対流現象によって上下混合しながら降温し、冬の末期に最低水温に達する。この時の水温分布は貯水池の全水域にわたりほぼ一様である。なお、貯水池の最低水温が 4°C 以下になると冬季にも水温成層の形成が見られるが、ここでは日本の大半の貯水池に認められるように最低水温の 4°C 以上の熱帯湖として考える。

水温分布が一様で池内に密度差のない状態では取水による流れは図-1(a)に示すように貯水池全層に及ぶ。

春になり、日射、気温および流入水温が上昇すると貯水池は表層から昇温し、表層に水温成層が形成されるようになる。流入水温は概して表層

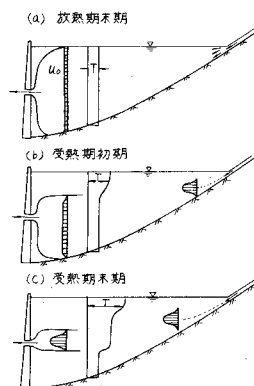


図-1 水温成層の形成過程

水温と底層水温の中間にあり、表層水を連行、混合しながら表層の下部層に流入し、水温成層の発達を助ける。取水による流れは取水口の標高に支配されるが、貯水池の中間標高に取水口が設けられている場合、表層の昇温した軽い水は下降しにくくなり、流れは図-1(b)に示すように水温分布の様な下層に限られる。

日射による輻射熱の貫入が顕著な範囲は表層のほぼ10m程度の深さまでであり、深部への熱の輸送の大半は底層冷水の流出、温水の流入による熱の移流によって行なわれる。冷水の流出が進み、温水が取水口標高にまで達すると今度は逆に深層の重い冷水は取水口に浮上しにくくなり、軽い上層の温水が取水される。この結果、流入水の昇温につれて取水口に達する水温も上昇し、取水口標高付近に水温躍層が形成される。

水温成層は夏の末期にもっとも安定した状態に発達し図-1(c)に示すように、表層に日射、気温による1次躍層が、また取水口標高付近に熱の移流による2次躍層が形成される。このような水温成層の状態では取水による流れは水温による密度こう配によって中間層に限定される。

水温成層は洪水条件によって変形ないしは破壊を受けるが、洪水後の再形成は比較的すみやかに行なわれる。余程の大洪水でない限り流入水が底層にまで達することはまれであり、底層の水温は年間を通じてほとんど変化しない。

秋季になり気温、日射が低下してくると池水は表層から冷却され、対流による混合のために水温成層は表層から次第に消滅して行く。水温低下が2次躍層より下層にまで達すると池水は全水深にわたる対流現象、いわゆる大循環を生じ、水温分布は全域で一様になり、ふたたび図-1(a)の状態に戻る。発電専用貯水池(Aダム)の水温分布の年変化の実測例を図-2に示す。

2) 揚水式発電所貯水池の場合

揚水式発電所貯水池は通常の貯水池に較べて特殊な流動形態を示す。大規模混合揚水式発電所貯水池の上部池は自分流のみで考えれば、一般に $\alpha < 1.0$ であり、発電専用貯水池であれば安定した水温成層が形成されるはずである。しかし、揚水、発電の繰返しによる混合によって池水の混合が強くなるため、取水口の標高にもよるが、取放水の影響を受ける範囲の水温分布は鉛直方向にほとんど一様になってしまう。この混合によって熱の深部への輸送が行なわれ、底層水温は季節に応じて大幅に変化する。取放水口が中間標高に設けられている大規模貯水池の場合、受熱期においては、表層のみに安定した水温成層が形成され、取放水による流れの影響は表層までは及ばない。揚水式発電所Bダムにおける水温分布の実測例を図-3に示す。

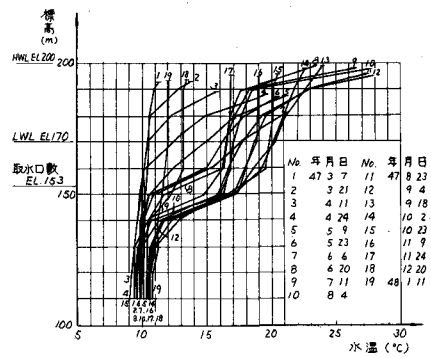


図-2 発電専用貯水池水温分布(Aダム)

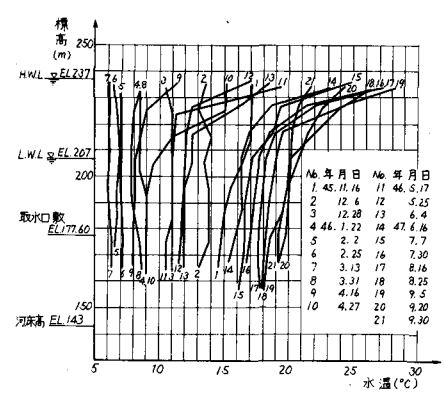


図-3 揚水式発電所上部貯水池水温分布(Bダム)

3. 貯水池の濁水長期化の形態

1) 発電専用貯水池の場合

濁水長期化機構は洪水の規模に応じて異なる。 $\beta \ll 1$ で貯留と発電放流で流下させることができる小規模洪水、主として表層の洪水吐からの放流で流下させざるを得ない洪水で表層の1次躍層を破壊する $1/2 < \beta < 1$ 程度の中規模洪水、1次躍層のみではなく2次躍層をも破壊する $\beta > 1$ の大規模洪水が観測されている。

図-4および図-5はAダムにおける小規模洪水の流入、流出状態を示したものである。この間2次躍層以下の底層の濁度は1000 PPM近い濁水の流下にもかかわらずほとんど変化していないことおよび水温分布の変化がほとんどないことから濁水は懸濁粒子の沈降がほとんどない状態で取水口標高に帯状に滞留し、中層にある取水口から発電放流された様子がよくわかる。この場合、自然の状態では2~3日の河川の濁りが貯水池の築造によって2~3週間に長期化されたことになる。

図-6はAダムにおける中規模洪水(最大流量 $1,100 \text{ m}^3/\text{s}$)後約1週間の時点における水温、濁度分布である。表層の数mの範囲は既に清水化し、1次躍層の再形成が見られる。濁度は取水口標高で最高値となり、すでに中間取水の流れによる微細粒子の懸濁の状況を示している。2次躍層以下の底層でも濁度が増大しているが、水温は洪水前と変化しておら

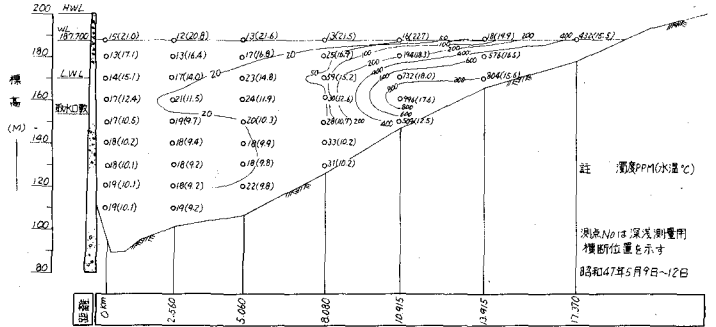


図-4 小規模洪水の流入状態 (Aダム)

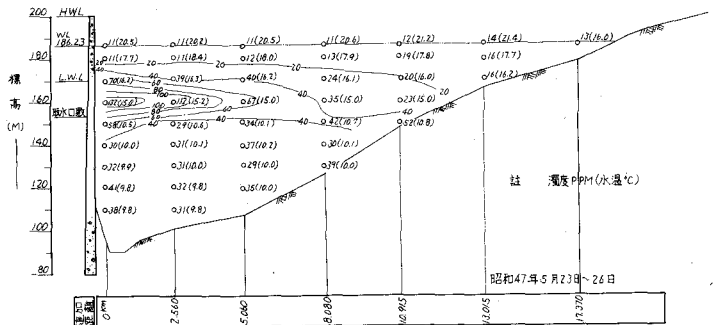


図-5 小規模洪水の流出状態 (Aダム)

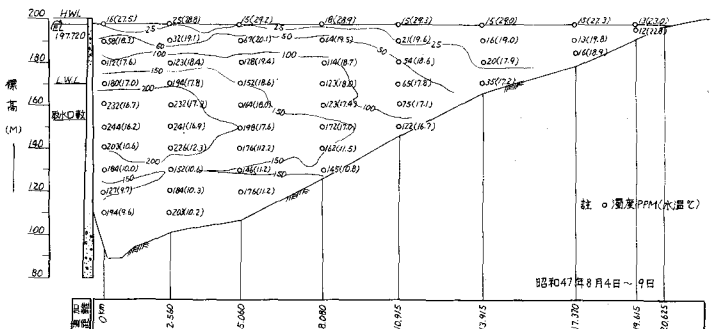
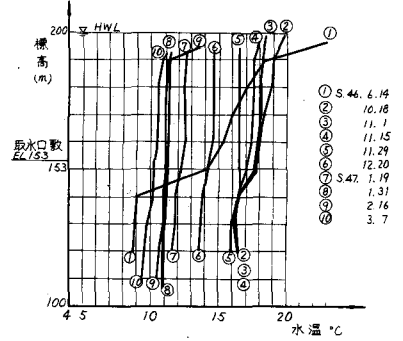


図-6 中規模洪水後の水温、濁度分布 (Aダム)

ず、底層に入った懸濁物質は2次躍層の上層に流入した濁水から2次躍層を通して沈降したものと判断され、水の実質部分の流入、流出はないものと思われる。以後は、1次躍層の再形成が促進されるにつれ取水による中間流が顕著になり、表層から沈降する粒子は沈降を阻止される。底層の粒子は静水中ですみやかに沈降するので、懸濁粒子はやがて中間取水流れの層に帯状に滞留し、ダム下流

河川の濁水期間は2次躍層上の濁水が排出される期間に相当し、Aダムにおいては2～4ヶ月に及んでいる。

図-7はAダムにおいて竣工後の10年間に一度だけ生じた大規模洪水(8月末,最大流量 $3,600\text{ m}^3/\text{s}$)による水温成層破壊の前後およびその後の放熱期の貯水池水冷却過程を示したものである。底層の密度を上まわる高濁度水が2次躍層下面に達し、底層に進入し、貯水池は全体的に洪水時流入水によって入れかわった結果、貯水池の水温成層が破壊されたものと思われる。洪水後、水温成層は移流などによってある程度回復し懸濁粒子も徐々に沈降し表層から清水化する。しかし、底層水温が高いため全水深にわたる冷却による大循環は通常年より早



く生じ、図-8に示すようにまだ沈降しきらない懸濁物質を巻き上げ、上層部の濁度は上昇し貯水池全体が濁る。大循環は放熱期間中継続するので、一旦巻き上げられた微細な懸濁粒子は沈降できず濁水現象はこれらが流入水によって稀釈され、取水口から排出されるまで持続する。Aダムにおいては、この時の濁水期間は翌春まで及んでいる。

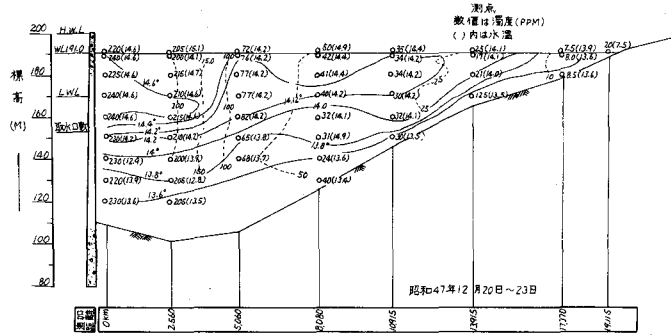


図-8 大循環発生後の水温、濁度分布(Aダム)

2) 混合揚水発電所貯水池の場合

図-9、図-10はCダムにおける洪水前後の水温、濁度分布を示したものである。図-10によれば、表層水を連行した濁水が比較的水温の高い底層に進入している様子がわかる。洪水は発電所を通して放流されているので表層30～40mの清水は確保されている。底層は揚水により擾乱を受けるので懸濁物質は沈降しにくく濁水期間は自分流で稀釈、排出される間継続する。また底層水温が高いため大循環の開始時間が早く、懸濁物質が排出される前に始まると池全体が濁るおそれもある。

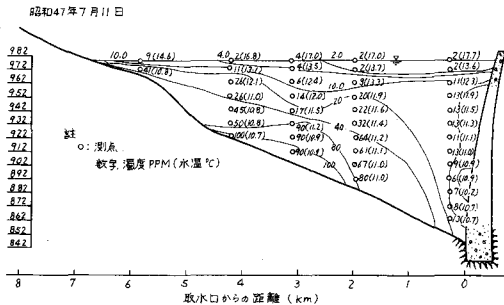


図-9 Cダム貯水池水温濁度分布(洪水前)

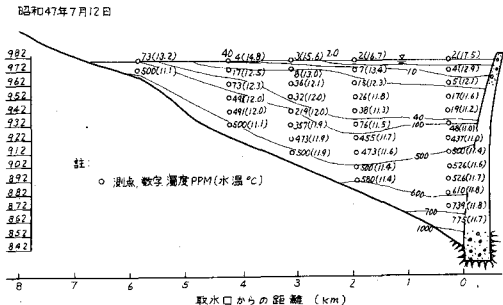


図-10 Cダム貯水池水温濁度分布(洪水後)

4. 水理学的濁水軽減対策

濁水軽減対策は第1に洪水時の濁水をできるだけすみやかに下流に疎通させることである。このためには貯水池の中間標高以下にある程度の規模の洪水放流設備を設けることが望ましい。この場合、サーチャージと組合わせ、できるだけ表層水の放流を行なわないのが効果的である。第2は中間標高の取放水口とは別個に表層に取放水口を設置し選択取放水することである。すなわち、通常および洪水後のある期間は中間標高の取放水口を使用し、従来通りの水温成層を形成させるとともに洪水後、表層の1次躍層の形成および清水化をはかる。表層が清水化して後、表層取放水設備に切換えれば下流河川の濁水期間は短縮され、同時に下層の流動層は静止するので、懸濁物質の早期の沈降が期待できる。

以下は、塩水により密度成層を造り表層選択取水に関する実験を行ない、計画表層取水水深（選択取水の計画の対象とする表層の水深）に対して適切な取水口の規模、形状を決定する場合に考慮すべき条件について得られた知見を述べたものである。

5. 選択取水の理論的背景

密度成層流体からの選択取水についての理論的な証明は2次元水路の下流端に全水路幅にわたる線吸込みがある2次元流の場合および十分に広い水域に点吸込みがあり周囲から吸込みに流入する軸対称流の場合がある。取水層の厚さ δ と取水流量 Q との関係を規定する無次元数は2次元流の場合には Y_{ih} の F で、軸対称流の場合には日野、大西の G でそれぞれつぎのように与えられる。

1) 2次元流の場合 Y_{ih} の F

$$\delta/a = F^{1/2} \quad (5-1)$$

ここに、 a は $a = (q/\sqrt{g\varepsilon})^{1/2}$ で表わされる特性長、ただし、 q は単位幅当りの流量、 g は重力の加速度、 ε は密度こう配で水面の水の密度を ρ_s 、水底の水の密度を ρ_0 、全水深を d とすると $\varepsilon = (\rho_s - \rho_0)/\rho_0 d$ で表わされる。

2) 軸対称流の場合の日野、大西の G

$$\delta = G^{-1/3} (Q/\theta \sqrt{g\varepsilon})^{1/3} \quad (5-2)$$

ここに、 θ は取水口の中心角（ラジアン）である。

F 、 G の値はそれぞれの取水条件について理論的に得られているが、実用に際しては実験によって決めるべきものと思われる。

6. 表層選択取水の実験的検討

実験は回流水路および補給のない無補給型の2種類とし、回流型の実験は幅1m、長さ15m、高さ2mの水路で取水口が水路全幅にわたる線吸込み(L.S.)、中心角120°の扇形取水口(S.C.)、オリフィス(P.S.)について、無補給型は幅3m、長さ20m、高さ1.5mの水槽の隅に矩形の取水口を置いて行なった(R.E.)。実験は密度こう

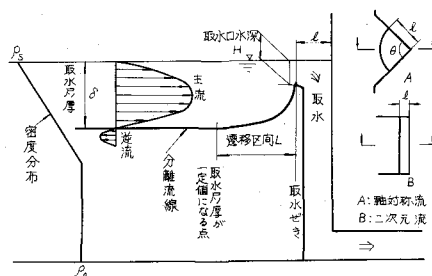


図-111 表層取水による流れ

配 $\varepsilon (0.084 \sim 2.50) \times 10^{-4}/\text{cm}$, 取水口幅 $B (5.1 \sim 100 \text{ cm})$, 取水口水深 $H (2 \sim 10 \text{ cm})$ を組合わせて行なった。

取水層の厚さ δ としては図-11に示す主流の厚さを採用した。

図-12は(5-1)式の F と q との関係を示したものであるが水路幅によって異なる F の群があるようであり、実際の貯水池のように取水口幅に比べて水路幅が大きい場合には取水層の厚さを(5-1)式で予測することは適当でないことを示していると思われる。

図-13, 図-14によれば, 取水口水深を取水層厚さの $1/2 \sim 1/3$ 以下にとれば取水層厚さに及ぼす取水口水深, 取水口幅の影響は顕著でないことを示しているものと思われる。

図-15は R, E , および S, C について(5-2)式で与えられる G と Q との関係に点描したものである。これによれば G の値はかなりばらついていますが水路幅の影響は認められない。実験に用いた取水口の規模が実物の $1/100$ に相当すると仮定すると取水

流速は実物に換算し $0.16 \sim 1.7 \text{ m/sec}$ の範囲である。取水口水深を $1/2 \sim 1/3 \delta$ 以下にすれば, 取水口幅は上記の流量範囲において選択取水上の制約よりも通常の取水口としての水理学的な流況の面から定められると考えられる。その場合, 取水層厚 δ は G の実験値の平均 $G = 0.324$ を用いれば(5-2)式によりかなりの精度で予測されるものと判断される。

7. あとがき

揚水式発電所貯水池の場合の揚水時の流況など多くの問題が残されているが, 別の機会に報告したい。なお, 実験に際しては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) Yih, C.S.: On the flow of stratified fluid. Proc. 3rd U.S. Nat. Congr. Appl. Mech. 1958.
- 2) 日野幹雄・大西外明: 密度成層に及ぼす point sink の高さの効果, 土木学会論文報告集, 163号, 昭和44年3月

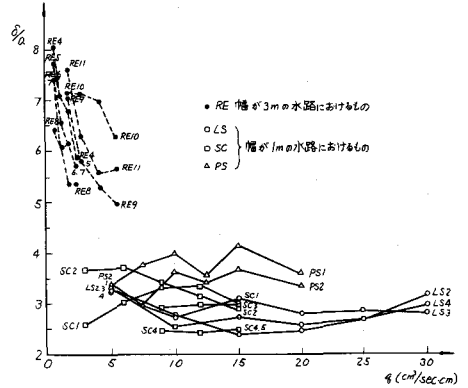


図-12 δ/a に及ぼす水路幅の影響

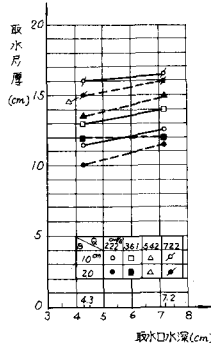


図-13 取水口水深の影響

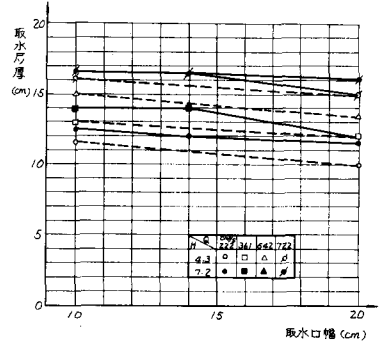


図-14 取水口幅の影響

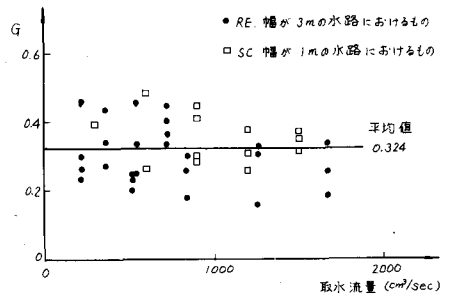


図-15 表層取水時の G の実験値