

貯水池のバイパス排砂システムによる濁水長期化軽減効果の検討

Study on Bypassing System to Improve the Turbidity in a Reservoir

* ** *** ****

原田稔・寺田昌史・出野尚・葛岡昌基

By Minoru HARADA and Masasi TERADA and Takashi DENO and Shouki KUZUOKA

As a drastic countermeasure to reservoir sedimentation and turbid effluence over a long term, a bypassing tunnel system is proposed and studied. In this paper, the effect of this system to improve the turbidity in a reservoir is discussed. We have successfully reproduced the temperature and turbidity by adopting numerical methods and predicted the effect of the system according to several bypassing discharges.

Keywords: bypassing system, turbidity in a reservoir, numerical method

1. まえがき

河川環境から見たダム貯水池の水理的課題としては、ダム堆砂の進行、濁水の長期化、下流河床の低下等が挙げられる。これらの課題は、建設してからの年数が長い貯水池において、近年とくにクローズアップされてきている。これらへの対策には種々あるが、著者らは解決の一つの手段として、貯水池上流端からのバイパス水路により、濁水や土砂を自然の営力を利用してダム下流へ排出させるシステム（図-1参照）について検討を進めてきた^{1) 2)}。本論文は、上記課題のうち、濁水の長期化現象に対して当システムがどの程度軽減効果を示すのかについて、〇発電所の貯水池をモデル地点として検討した結果を報告するものである。

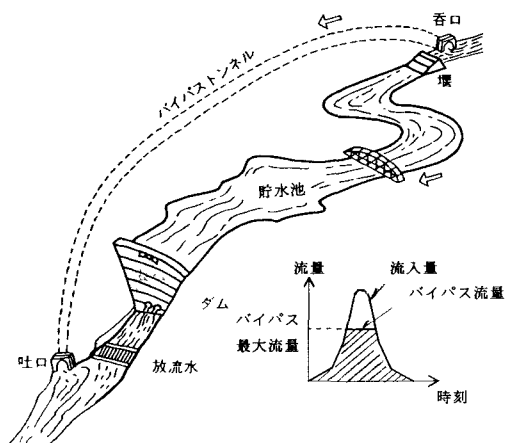


図-1 貯水池バイパス概念図

*	正会員	関西電力株式会社	土木建築室長	(〒530-70大阪市北区中之島3-3-22)
**	正会員 工修	関西電力株式会社	土木建築室	(同上)
***	正会員	関西電力株式会社	土木建築室	(同上)
****	正会員	株式会社ニュージェック	水工部	(〒542大阪市中央区島之内1-20-19)

2. 検討モデル地点における濁水長期化現象

検討モデル地点とした〇発電所（純揚水式）の下部貯水池であるA貯水池（表-1、図-2参照）では、昭和53年の湛水以来、選択放流（選択取水設備の運用）、貯水池周辺の濁水源対策、ダム下流河道ろ過堰対策等、濁水長期化に対して種々の軽減対策が図られてきた。しかし、平成元年以降、これらの対策だけでは十分な効果が得られない状況が頻発するようになってきた（図-3参照）。その原因の一つとして、近年の大型台風の頻出等で流域の崩壊が進行したことが考えられ、事実、貯水池への流入濁度が図-4に示すように次第に大きくなってきている。

平成元年前後の濁水現象を比較するため、出水の最大流入量の規模が類似している昭和54年10月と平成5年9月の出水直後のA貯水池の水温・濁度分布をそれぞれ図-5と図-6に示す。図-5では下層に水温変化層を有し、中層に120度の濁水塊が見られる分布となっているが、図-6では水温変化層がなく、表～中層に200度、下層に2,000度を越える濁度をもつ水塊が分布している。このように近年、貯水池内の全層で高濁水が滞留するようになり、その結果、従来の対策を講じても放流水が長期間にわたって濁水化する傾向が一層強くなってきている。このため、抜本的な対策として、流入水を貯水池に流入させることなくダム下流へ迂回させるバイパス方式を検討することとした。

表-1 〇発電所貯水池の諸元

	湛水面積	貯水容量	流域面積	有効水深
S貯水池（上部貯水池）	0.5km ²	14百万m ³	2.9km ²	34m
A貯水池（下部貯水池）	0.5km ²	15百万m ³	39.2km ²	32m

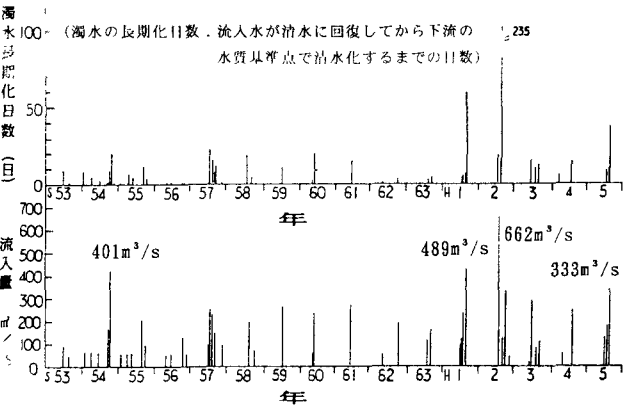


図-3 濁水長期化発生状況

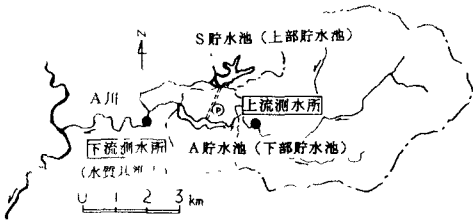


図-2 モデル地点概要図

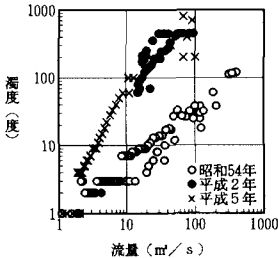


図-4 貯水池流入の濁度と流量の関係

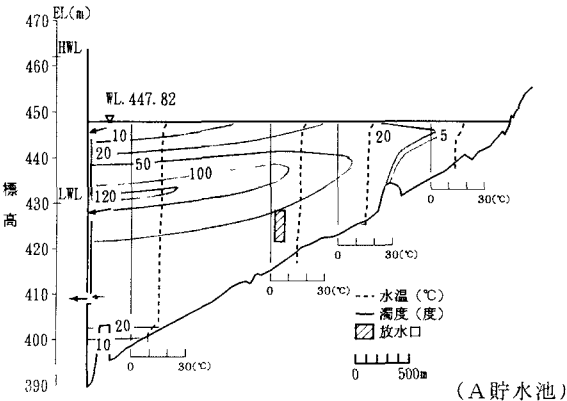


図-5 昭和54年10月出水直後の水温・濁度分布

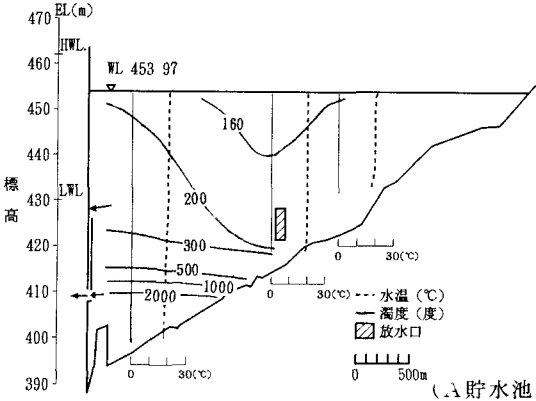


図-6 平成5年9月出水直後の水温・濁度分布

3. 濁水長期化軽減効果の検討方法

3. 1 概説

バイパス時の濁水現象は、バイパスされることなく流入する河川水による貯水池内の濁水現象と、ダム放流水とバイパス放流水がダム直下で合流して下流河川を流下する際に自然浄化されるダム下流域の現象とに分けられる。当モデル地点では、濁水長期化の評価地点がダムから1.6km下流の水質基準点となっており、下流河川の浄化現象も考慮した評価が必要である。以下では、貯水池の水質現象を解析するモデルとダム下流の濁度流下過程を解析するモデルについて述べる。

3. 2 貯水池水質解析モデル

貯水池における濁水現象を解析する手法としては、鉛直1次元モデルあるいは2次元モデルを用いるのが一般的であり、前者としては安芸・白砂の電研モデル³⁾、後者は岩佐・松尾の一方多層流モデル⁴⁾が代表的である。鉛直1次元モデルは流れの運動学的条件（流速分布）をあらかじめ規定しておいて現象を表現するもので、洪水後の短期間における現象変化について十分な精度が期待できないものの、長期的な濁水現象を対象とした場合に適するモデルとされている。一方、2次元モデルは運動量保存則を解いて得られる流速分布から水温および水質濃度の輸送過程を計算するモデルであり、貯水池内部の現象をより忠実に表現することで洪水直後短期間の解析にも適しているとされている。

モデル地点の〇発電所は揚水式発電所であり、貯水池を上下に持つため、揚水発電による上下部貯水池間の水の受け渡しを再現できるものとした。上部のS貯水池については流域面積が小さく流入量が少ないこと、観測結果から水温と濁度分布は一樣であることからボックスモデルでモデル化した。下部のA貯水池については電研の鉛直1次元モデルを用いた。以上のモデルの概要を図-7に示す。なお、このモデルの再現性の確認のため、両貯水池に対して2次元モデルを適用した計算も実施している。

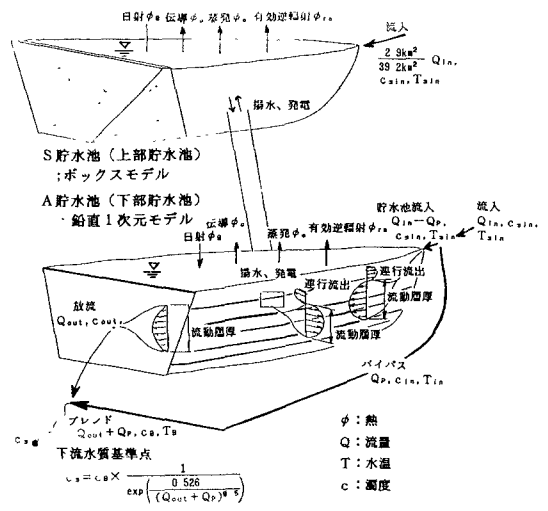


図-7 モデル地点解析モデルの概要

3. 3 ダム下流濁度算定モデル

下流河川は本川合流まで6 kmあり、水質基準点はダムから1.6kmのところにある。この下流河川は瀬や淵を有する礫床の山地河川であり、図-8に示すように、濁度が、①流下距離に対して指数関数的に減衰し、②流量が小さいほど減衰性が大きく、③上流端濁度が異なっても流量が同じであれば減衰性は変化しないという傾向が観測されてきた。芦田ら⁵⁾はこうした濁度減衰現象を実験で確認し、河床との水交換（交換層モデル）で説明している。牛島⁶⁾はさらに広範な水理条件のもとでも適用できる関係として砂粒Reynolds数Re*が100以上に対して得られる濁度の減衰速度V_bを提案するとともに、濁度の流下方向の変化について解析する次式の移流分散方程式を示し、実河川へ適用している⁷⁾。

$$\frac{\partial AC}{\partial t} + \frac{\partial QC}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} \left(AD \frac{\partial C}{\partial x} \right) - SV_b C + qC', \quad \frac{V_b}{u_*} = 4.1 \times 10^{-3} \frac{d_m}{h} \quad (Re_* > 100) \quad (1)$$

ここに、C:濁度、A:断面積、Q:流量、D:分散係数、S:潤辺、V_b:濁度減衰速度（=λ_e・V_e、λ_e:砂礫層空隙率、V_e:芦田らの交換速度）、q、C':横流入の流量および濁度、u_*:摩擦速度、d_m:河床材料平均粒径、h:水深

ここで、(1)式の分散効果を見捨てる、一様水路での定常状態を仮定して解を求めると(2)式が得られる。な

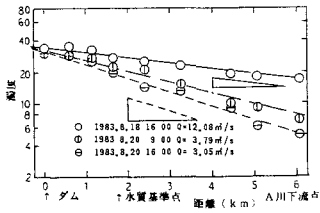


図-8 下流河川濁度の低下観測結果

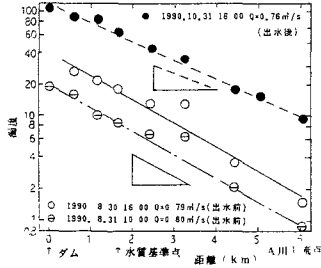
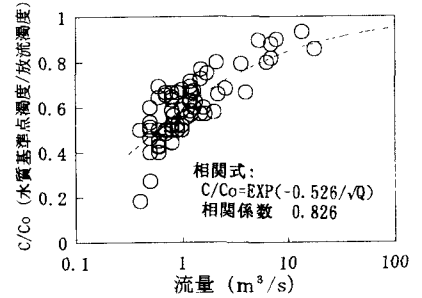


図-9 下流水質基準点濁度/放流濁度と放流量の関係



お、横流入が無く、 SV_b/Q は一定とした。

$$C = C_0 \text{EXP}(-SV_b/Q \cdot x) \quad (C_0: \text{上流端濁度}) \quad (2)$$

さらに、 $S = B(\text{河川幅})$, $B = \alpha Q^{0.5}$ (レジーム則) と置けば、(2)式は次の(3)式で表せる。

$$C = C_0 \text{EXP}(-\gamma/Q^{0.5}) \quad , \quad \gamma = \alpha V_b \cdot x \quad (\text{定数}) \quad (3)$$

モデル地点では観測値が豊富であることから、この区間の上流と下流の濁度および放流量を用いて(3)式による相関式が得られれば下流濁度を算出する実用式になると考え、観測値(C, C_0, Q)から $\ln(C/C_0)$ と $Q^{0.5}$ の値を最小自乗法を用いて γ を求めてみた。図-9はこのようにして得た(3)式と観測値を比較した図であり、濁度遞減モデルとして当式が妥当であると言える。この結果より、この関係式を用いて水質基準点濁度を算定することとした。バイパス時の評価は図-7の下部に示すようにダム直下でダム放流水とバイパス放流水をブレンドさせた後、この関係式を当てはめて水質基準点濁度を算出するものとした。

4. 水温・濁度のシミュレーションによる検討

4. 1 濁水現象再現性の検討

モデル地点における濁水長期化事例としてH2.9～H3.5の9ヶ月間を対象に鉛直1次元モデルと2次元モデルによる再現計算を行った。再現解析条件を表-2に、ダム下流の水温・濁度解析結果を図-10に示す。再現にあたっては、風速・湿度・雲量を除く気象データ、水文条件、流入条件を全て時間観測値で入力すること、濁質の粒度分布で $1 \mu\text{m}$ 以下の微細粒子成分を考慮すること、等により全計算期間にわたって精度を上げた。

なお、モデル地点は揚水発電所のため貯水池の水位変動が大きい。このため、鉛直1次元モデルを適用すると、取水形態が水位変動に伴い、表面取水、中層取水、底層取水のいずれにもなるため、その位置を判別して流動場を規定することとした。

図-10を見ると、下流水質基準点濁度に対して、鉛直1次元モデルによる計算濁度が12～1月に観測値より若干高めであることを除けば、鉛直1次元モデルは2次元モデルと類似した結果であるとともに、両モデルとも洪水直後を含めて観測値をよく再現していることが分かる。このことより鉛直1次元モデルは今回の検討に対して実用上問題がないと判断した。

表-2 再現解析条件

項目	1次元モデル	2次元モデル
貯水池分割	1ボックス	水平方向500m、鉛直方向2m
	下部池	1m多層
		水平方向500m、鉛直方向2m
気象条件	気温・日射量 風速・湿度・雲量	時間単位 (観測値) 日単位 (観測値)
水文条件	流入量 流出量 使用水量	時間単位 (観測値) 時間単位 (観測値) 時間単位 (観測値) (揚水量、発電使用水量)
流入条件	流入水温 流入濁度	時間単位 (観測値) H2 9 17 9 22 9 29 10 3 11 2 11 7 11 29 12 3 その他の期間
		C=10.81(Q-5) ^{0.79} C=13.60(Q-5) ^{0.79} C=11.70(Q-5) ^{0.79} C=26.20(Q-5) ^{0.79} C=10.81(Q-5)
粒度分布	粒径沈降速度 μm m/日	比率 Q $\geq$ 10 Q<10
	0.3 0.007 0.5 0.019 1.0 0.077 4.0 1.244	10% 33% 20 67 30 — 40 —
パラメータ	日射量反射率 日射量吸収率 日射量減衰係数	$\alpha = 0.06$ $\beta = 0.5$ $\eta = 0.4$
拡散係数	$\text{m}^2/\text{日}$	D=0.01Q+0.02 (随時制A) 水平方向 D=500,000 鉛直方向 D=0.01Q+0.02

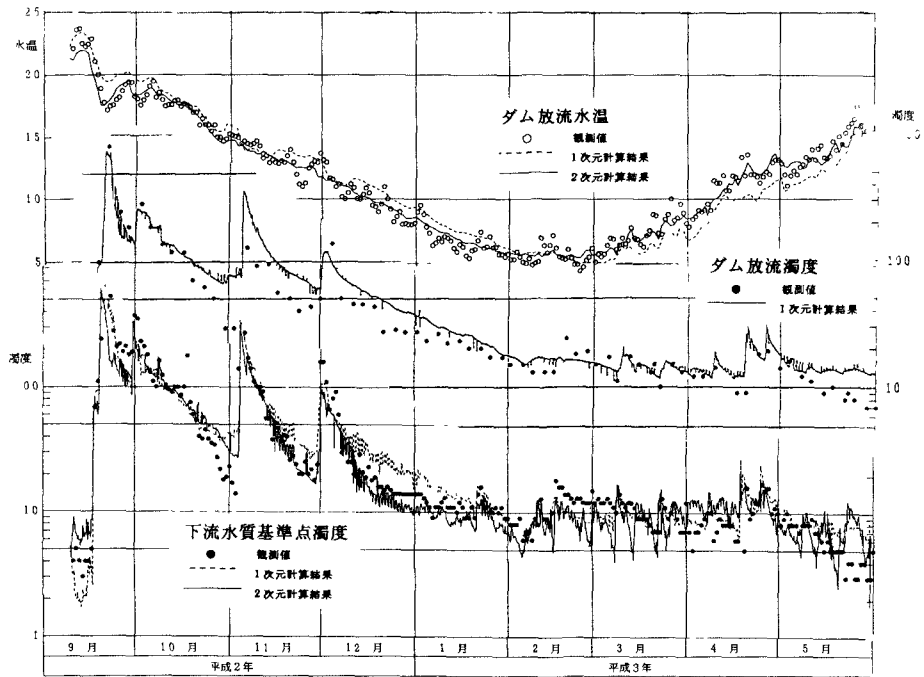


図-10 ダム下流の水温・濁度の再現解析結果

4. 2 バイパス規模と濁水長期化軽減効果の比較

(1) 実績出水におけるバイパス効果

前述のモデルを用い、下部貯水池（S貯水池）にバイパスを適用した場合の濁水長期化軽減効果についてH2.9～H3.5を対象に検討した。バイパス規模（バイパス最大流量）としては、平水量程度の $3\text{ m}^3/\text{s}$ 、年1回程度発生する出水規模の $170\text{ m}^3/\text{s}$ 、および既往最大出水規模（バイパス地点）の $550\text{ m}^3/\text{s}$ の3ケースを想定した。バイパスさせる流量は貯水池上流流入量がバイパス規模以下でその全量、同以上でバイパス最大流量とした。図-11に現状の実測および計算結果を示している。この図より、いずれのバイパス規模においても濁水長期化は現状より軽減され、また、その効果はバイパス規模の増大に応じてより期待できることが分かる。

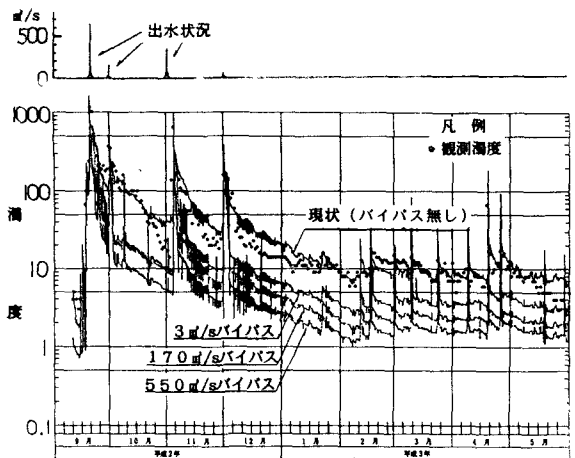


図-11 バイパスによる水質基準点の水温と濁度

(2) モデル出水によるバイパス規模と長期化期間の関係の検討

ここでは、1出水による濁水長期化がバイパス規模の違いでどの程度に短縮されるかを検討した。検討には規模の異なるモデル4出水（最大流量 $50\sim 660\text{ m}^3/\text{s}$ 、図-12参照）を用い、現状運用（バイパス $0\text{ m}^3/\text{s}$ ）とバイパス運用7ケース（バイパス $3, 90, 120, 170, 240, 320, 550\text{ m}^3/\text{s}$ ）に対し、下流水質基準点における濁水長期化日数をシミュレートした。その結果を図-13に示す。ここで濁水長期化日数とは、流入水が清水に回復してから下流の水質基準点で清水化するまでの日数とした。

現状運用では長期化日数は出水 $50\sim 660\text{ m}^3/\text{s}$ に対して $50\sim 160$ 日程度となっている。 $3\text{ m}^3/\text{s}$ バイパスでは $50\text{ m}^3/\text{s}$ 出水に対して長期化を解消し、 $170\sim 660\text{ m}^3/\text{s}$ 出水に対しては $30\sim 80$ 日と現状長期化日数を5割程度に短

縮する。170 m^3/s 出水に対しては120 m^3/s バイパスで長期化を解消する。330 m^3/s 出水では120 m^3/s バイパスで長期化日数を10日程度まで短縮する。既往最大660 m^3/s 出水に対しては90～170 m^3/s バイパスで70日、240～55 m^3/s バイパスで60～30日と長期化日数を短縮する。

以上を120 m^3/s バイパスを対象として言い換えると、次のとおりとなる。すなわち、年1回程度発生する出水規模（170 m^3/s ）以下では長期化を解消するが、中～大規模出水では長期化を軽減するにとどまり、仮にこれ以上にバイパス規模を大きくしても軽減効果の向上はそれほど期待できないことが分かる。

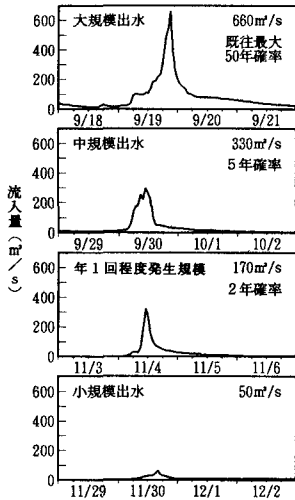


図-12 出水モデル波形

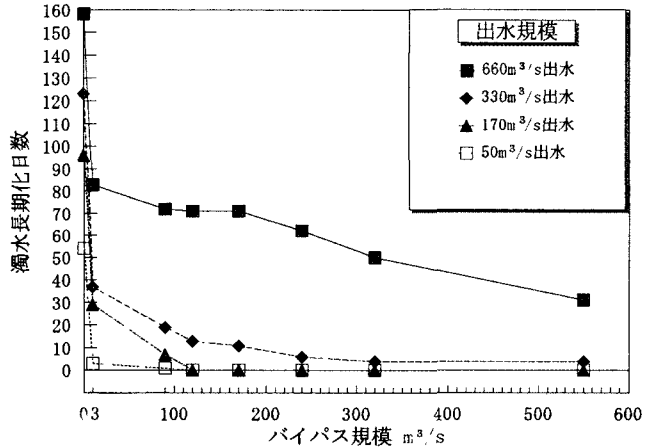


図-13 バイパス規模と濁水長期化日数

5. まとめ

- (1) 従来の貯水池水質解析モデルを用いると、バイパスによる濁水長期化軽減効果の予測が可能である。
- (2) 揚水発電所のような流動の大きい貯水池においても、鉛直1次元モデルにより、実用的に十分な精度で濁水現象を表現できる。
- (3) 芦田らの交換層モデルを解いた相関式により、ダム下流河川の濁度逓減を定量的に表現できる。
- (4) 濁水長期化軽減効果を出水規模とバイパス規模の別で評価することにより、バイパス規模の選定が可能である。

最後に、本検討を実施するにあたり御助言を頂いた中部大学松尾教授に謝意を表します。

参考文献

- 1) 寺田昌史・原田稔・芦田和男：貯水池のバイパス排砂システムの計画について，土木学会第50回年次学術講演会，II-209，1995。
- 2) 原田稔・芦田和男ら：貯水池のバイパストンネル排砂に関する実験的研究，土木学会第50回年次学術講演会，II-211，1995。
- 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（その1），発電水力，No.134，1975
- 4) 岩佐義朗・松尾直規・愈 朝夫：貯水池水理の数値解析法とその適用について，京大防災研年報第22号-B，1987。
- 5) 芦田和男・江頭進治・金屋敷忠義・小川義忠：河道における微細土砂の生産・流出機構に関する研究，京大防災研年報，第23号B-2，1980。
- 6) 牛島省：河川における濁質の流送機構に関する研究，京都大学修士論文，1984。
- 7) 楠田哲哉編書：自然の浄化機構の強化と制御，5.2節，技報堂出版，1994。