

七ヶ宿貯水池におけるウォシュロードの流入・流動・堆積過程 に関する観測と考察

Field Observation on the wash load carried into the Shichikashuku Reservoir

梅田 信*・横山勝英**・石川忠晴***

By Makoto UMEDA, Katsuhide YOKOYAMA, Tadaharu ISHIKAWA

The correlation between wash load and turbidity was studied by water analysis for four floods intruding into Shichikashuku reservoir. The correlation of particulate phosphorus with turbidity was also estimated. The results shows that the monitoring of turbidity is very useful for the estimation of wash load and particulate phosphorus carried into the reservoir, and it will give an valuable information for the management of the reservoir. The amount of deposited sediment was measured by core sampling and also by collection of solid particles settling into open bottles which were set near the reservoir bed. The results of this experiment was consistent with the total inflow of wash load during a long term which was estimated from the turbidity monitoring.

Key Words: turbidity monitoring, estimation of wash load, particulate phosphorus

1. はじめに

河川上流部において洪水時に流送される土砂の大半は、河床材料よりもはるかに細粒であり、ウォシュロードに区分される。しかし大きなダム湖が建設されるとウォシュロードも沈降し、その量の大きさのために、有効貯水容量の減少に少なからぬ影響を及ぼす。また、ウォシュロードに付着する栄養塩（特に懸濁態リン）も沈積するため、貯水池の長期的水質環境に影響を及ぼす。したがって、流入するウォシュロードの量と質の把握が貯水池管理上重要であると考えられる。

ウォシュロードは、流域の土地被覆、地形・地質の状態に大きく左右されるため、ベッドロードのように一般的に定式化することは困難である。それゆえ、それぞれの貯水池において、管理者がウォシュロードの特性の基礎的調査を実施する必要がある。しかしウォシュロードの大半は洪水時に発生するものであるから、SSや付着栄養塩を逐一分析することは實際上難しい。

しかし、近年の計測器の進歩により、比較的簡易に且つ安価に「濁度」を長期計測することが可能になってきている。濁度は水中における光散乱強度を表す指標だが、最近の濁度計は、カオリン等を用いたキャリブ

* 学生員 東京工業大学大学院 環境物理工学専攻

(〒226 横浜市緑区長津田4259)

** 学生員 工修 東京工業大学大学院 環境物理工学専攻 日本学術振興会特別研究員

*** 正会員 工博 東京工業大学教授 大学院総理工環境物理工学専攻

レーションによってSS換算の値をppm表示できるようになっている。一般的に言えば、濁度とSSの関係は懸濁物質の色度、密度や粒度によって変動するものだが、しかし単一の流域に限ればその特性もある程度限定されるから、あらかじめ相関関係を調査しておくことにより、濁度計測結果からウォシュロードを推定することが可能であると考えられる。

そこで本研究では、濁度の連続計測結果と洪水時の採水分析結果及び貯水池堆積物調査結果を照合し、濁度モニタリングからウォシュロードを推定する可能性を検討するとともに、貯水池内でのウォシュロードの堆積特性と、ウォシュロードに付着するリン(懸濁態リン)についても調べた。

2. 観測サイトと観測方法の概要

観測対象は宮城県白石川水系セヶ宿貯水池である。この貯水池は、以下のようにウォシュロードの研究に適した特徴を持っている。①上流に副ダムがあり、ベッドロードはそこで遮断されるためほとんど流入しない。それゆえ湖内堆積物を調べることでウォシュロードの量を把握できる可能性がある。②常時・洪水時を問わずオールサーチャージ表層放流を行っているため、懸濁物質の流出量がわずかである。③1989年10月に湛水を開始した比較的新しい貯水池であり、プランクトン生成等による湖内でのSS生産量が比較的小さい。④主たる流入河川が2本しかなく、それらで全流域面積の78%を占める。したがって河川での観測と貯水池内での観測の照合が比較的容易である。

セヶ宿貯水池の流域と洪水観測地点を図-1に示す。また貯水池平面形と湖内観測点を図-2に示す。流域面積は237km²であり、その内訳は白石川が131km²、横川が53km²、残流域が53km²となっている。白石川と横川は副ダムの直上流で合流する。流域の93%は森林であり、残りの土地利用は田畑、草地と若干の集落である。

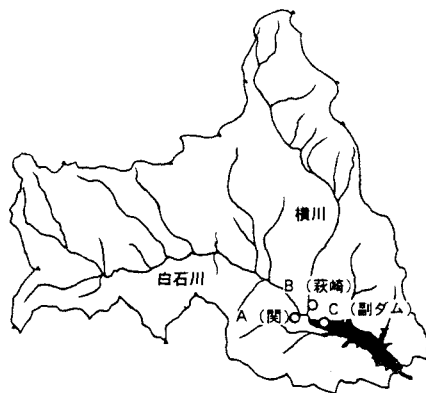


図-1 貯水池流域と洪水観測点

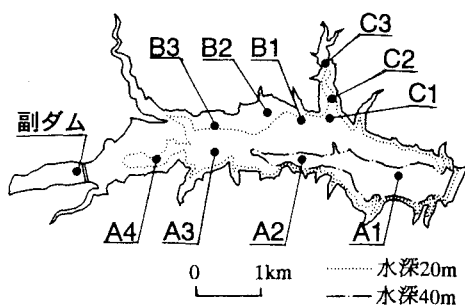


図-2 貯水池内観測点

本研究では次の3種類の観測を実施している。

①濁度モニタリング：1994年から毎年、春から晩秋にかけて、図-1に示す副ダム地点（C点）に自記式濁度計（アレック電子製、MTB-16）を設置し、貯水池流入水の濁度を連続観測している。この地点で白石川と横川からの流入分（全流域の78%）を補足できる。なお、この測定器はカオリン標準液によりキャリブレーションされている。

②洪水採水分析：洪水期間中に、図-1のA～Cの3箇所において、30分から2時間間隔で採水を行い、その場で濁度・水温を計測した後、実験室に持ち帰りSS、全リン、溶存態リン及び強熱減量などを分析した。

③貯水池内堆積物調査：図-2に示す地点の湖底付近に沈降物採取用のピンを設置し、一定期間に沈降する物質の量とリン含有率を分析した。観測期間は平成8年6月13日～9月10日と、9月10日～10月7日の2回に分けた。前者では長期間の平均的沈降量を把握した。また後者では台風17号出水（9月22日通過）の輸送したウォシュロードの沈降量（沈降に約二週間かかる）を把握した。またこれとは別に、11月5日に採泥器を用いて湖底に堆積している物質を採取し、堆積厚、平均密度、リン含有率を求めた。なお、採泥には離合社製改良型簡易コアサンプラーを用いた。

3. 洪水時における懸濁物質の流入特性

本研究室では、1993年から上記の地点で洪水観測を実施している。(表-1) 一例として、1996年9月22日出水の白石川における観測結果を図-3に示す。上から雨量、流量、濁度、SS、T-P、 PO_4 -Pである。流量の増加とともに各濃度が増加する様子がわかる。

過去4年間の出水で得られたデータから濁度とSSの相関を調べた結果を図-4に示す。前述のように、懸濁物質の密度、色度、粒度によってこの関係は変化すると考えられるが、しかし流域を限ればこのように高い相関が認められる。¹⁾この流域の場合、SSと濁度の値はほぼ等しい。

次に濁度とリン濃度との関係を図-5に示す。ここに懸濁態リン(P-P)はT-P濃度から PO_4 -P濃度を差し引いて求めた。厳密に言えば PO_4 -P以外の溶存態リン(例えば有機態リン)も存在するが、その割合は一般に少ない²⁾ので、ここでは無視している。懸濁態リンと濁度の相関関係はかなり高く、ほぼ一価関数で表されることがわかる。

図-6は、河川から副ダムを経由して貯水池まで流下する過程での濁質の粒度組成変化を示している。ただし河川と副ダムの分布形は洪水観測で得られた多数の粒度解析結果を各地点で平均したものである。また貯水池内での分布形は、後述する沈殿ビン観測から得られたものである。(洪水観測で得られた粒度は当然時間ごとに変化するが、空間変化を見やすくするために平均化した。)河川では浮遊砂と見られる粒径分も多少含まれているが、副ダム及び貯水池内では0.1mm以上の粒子がほとんど見られず、ウォッシュロードのみが貯水池に流入していると考えられる。

4. 貯水池内の堆積分布

4-1 洪水後に沈降した懸濁物質量

ひとつの洪水により輸送されるウォッシュロードをとらえるために、1996年9月10日に沈殿ビンを設置して出水を待った。9月22日に台風17号による出水があったので、微粒子の沈降がほぼ終了した10月7日に沈殿ビンを引き上げて分析した。この出水の最大流量は $172m^3/s$ であった。なお、微粒子の沈降の終了は濁度観測で確認した。沈降量の分布を図-7に示す。なお、棒グラフの一部に、次節で算定される平常時の沈降量も示した。この量を差し引いた部分が洪水流入による沈降量であると考えられる。

沈降量には地点ごとにかかりの差が見られる。顕著な傾向として、浅瀬(旧河岸段丘上:Bシリーズ)には少なく、湾

表-1 過去の洪水観測

観測期間	観測項目
1993年8月27日	水温、濁度
1994年9月29日	水温、濁度、粒度分析
1995年9月27日	水温、濁度、粒度分析、SS、リン濃度
1996年9月22日	水温、濁度、粒度分析、SS、リン濃度

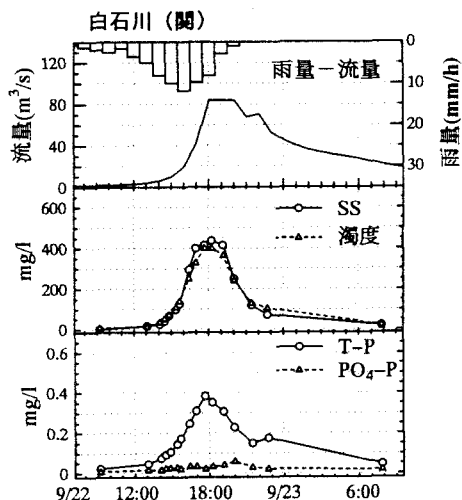


図-3 洪水流出時系列
(96年9月の台風)

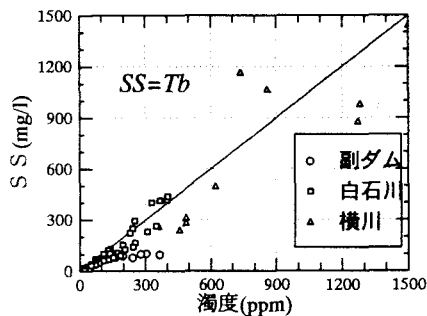


図-4 濁度-SS相関図

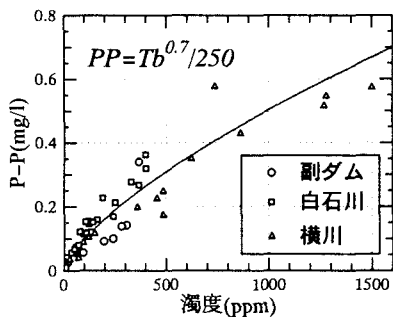


図-5 濁度-懸濁態リン相関図

筋(旧河道：Aシリーズ、旧支川：Cシリーズ)に多い。また滞筋沿いでは下流に行くにつれて堆積量が減少してる。

以上の分布特性には侵入洪水の経路が関係していると考えられる。図-8は、洪水侵入の翌朝に観測した貯水池内濁度の縦断分布である。洪水流は貯水池表層水より5℃程度冷たいために、濁水は水温躍層の下部に侵入している。図には各観測点の湖底高さと沈降ビン設置位置、及び平均的な河岸段丘高さを示している。このことから洪水流は主に旧河道を流下したものと考えられる。本貯水池では6月から9月にかけて深度15m付近に水温成層が形成されているから、融雪出水を除けば、図-8のような位置に濁水は浸入すると考えられる。したがって本貯水池では図-7に示した沈降分布が一般的と考えてよいと思われる。

さて、濁度モニタリングからウォッシュロードを推定する可能性を調べるために、沈降量を湖内で積分した値と副ダム地点の濁度フラックスの積算値とを比較する。前述のように湖内沈降量は浅瀬と滞筋で異なることから、地形図上で領域を区分した後に各観測点の支配面積を定めて積算した。また副ダムの濁度フラックスは、流量に濁度モニター値をかけ、時間積分して求めた。

湖内沈降量の積分値は1213tonであり、濁度フラックス総量は1084tonであった。残留域からの流入も多少あるとすると、この数値はほとんど一致していると考えてよい。

4-2 平常時の沈降量分布

1996年6月13日～9月10日の約100日間の沈降量の日平均値の分布を図-9に示す。図-9と図-7を比較すると、洪水時に比べて平常時には浅瀬部分と滞筋部分の沈降量の差が小さくなっている。これは恐らく、一旦沈殿したSSが乱流によって巻き上げられ、再配分された結果であると考えられる。

そこで、前節と同様に、100日間の副ダム地点の濁度フラックス総量と貯水池内総沈降量を比較すると、前者が384tonで後者が1336tonとなる。前述のように流入濁質は滞筋(観測点のAシリーズ)に流入・沈降する。また流入濁質と沈降量の差である約1000tonは、一度湖底に沈殿した濁質が巻き上げられ、貯水池内に均等に再沈降すると仮定すると、Aシリーズの沈降量はB、Cシリーズの沈降量の約2倍となり、図-9の観測結果とほぼ一致する。このことから、貯水池内の擾乱によるSSの巻

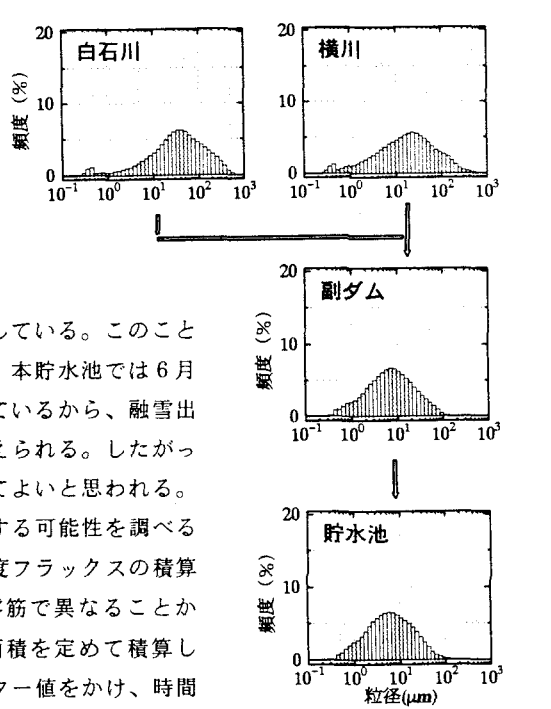


図-6 流下による濁質粒径分布変化

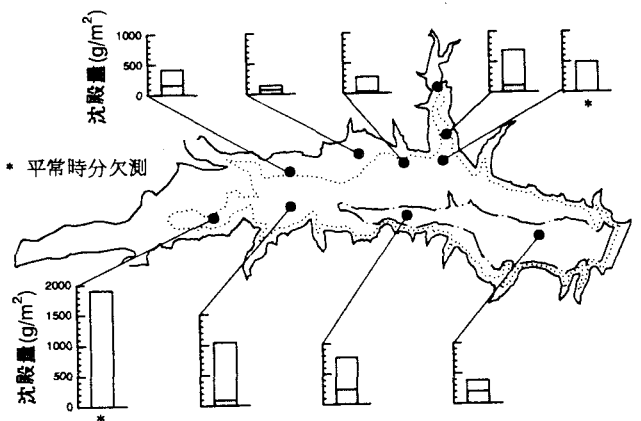


図-7 洪水後濁質沈殿量分布

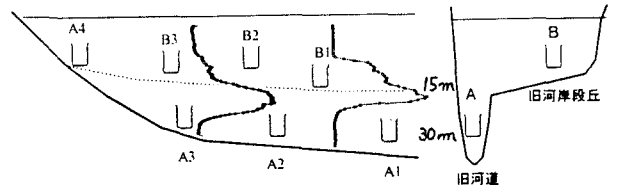


図-8 貯水池縦断濁度プロファイルと沈殿ビン設置深度

き上げ・再配分量は、一日当たり約 4g/m^2 に達していると考えられる。この値は、5節で求めるウォシュロードの推定年間平均値の3分の1となっている。したがって浅瀬にいったん沈積したウォシュロードのうち、かなりの部分が再配分されると考えられる。

4-3 湖底堆積量

貯水池内6地点(図-2のA1～A4、B1、B3)において採泥し、堆積厚、平均密度、リン含有率を調べた。なお、湖底堆積量(ダム湛水後の濁質総堆積量)は、平均密度と堆積厚の積を単位面積あたりの堆積量として計算した。

図-10に堆積厚の空間分布を示す。滞筋(旧河道)と浅瀬(旧河岸段丘上)では堆積量が著しく異なり、ほとんどが滞筋に堆積していることがわかる。これは図-11に示すメカニズムによっていると考えられる。すなわち、本貯水池では6月上旬から11月初旬にかけて水温成層が水深15m付近に形成されているため、風などによって生じる乱流混合が湖底に達するのは、主に旧河岸段丘の部分だけである。そこで浮上した粒子は水平に輸送・拡散されて沈降するが、水温躍層より深部に沈殿すると再浮上できなくなる。したがって、平常時には浅瀬の部分がSSのソースとなり、滞筋の部分がシンクとなる。このような物質移動の結果、浅瀬の部分には堆積物がほとんど残らないものと推定される。

なお、湖底堆積物の総量を4-1節に述べた支配面積区分から積算すると $1.36\times 10^5\text{ ton}$ になった。

4-4 堆積物のリン含有率

洪水中懸濁物、貯水池沈降物、及び貯水池堆積物のそれぞれについてリン含有率(P/P/SS)を求めた結果を表-2に示す。なお洪水中懸濁物については貯水池流入直前(副ダム)での平均値を示した。底泥のリン含有率と前節で求めた堆積物の総量をかけ合わせて、貯水池内に沈殿している総リン量を求めると、36tonとなる。

貯水池内で採取された物質のリン含有率は、沈殿物(洪水後、平常時)でも堆積物(上層、下層)でも大きな違いは見られない。しかし流入時点のリン含有率は、これらより数倍大きい。このことは、ウォシュロードに含有されるリンのかなりの部分が、貯水池に流入してから一次沈降(再浮上前)するまでの間に溶脱している可能性を示している。懸濁態リンの溶脱については未知の部分が多いが、比較的早期の溶脱を示唆する事例もある。

²⁾ 貯水池に侵入したウォシュロードの沈降速度を粒径か

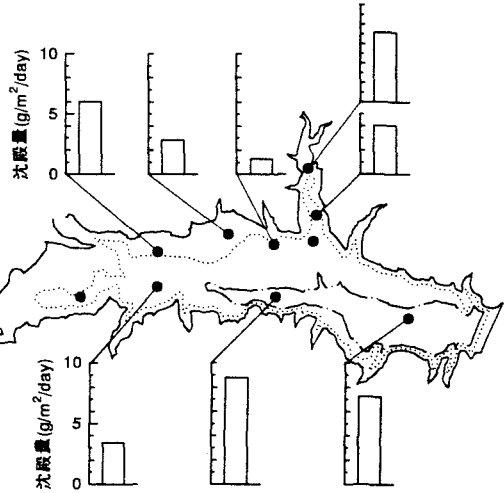


図-9 平常時沈殿量分布

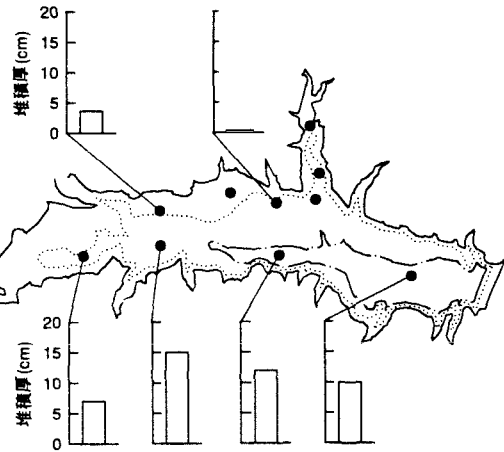


図-10 湖底堆積物厚さ分布

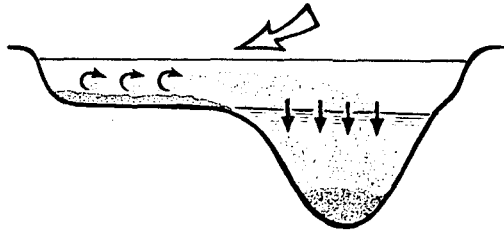


図-11 貯水池内沈殿物再配分概念図

表-2 採取条件別リン含有量

採取地点	リン含有率(%)
副ダム(洪水濁水)	1.487
沈殿物(28日間)	0.278
底泥(上層)	0.300
底泥(下層)	0.234

ら算定すると、平均粒径 ($6.0 \mu\text{m}$) について 2.7m/day となる。濁水の流入深度と旧河道部の平均的な深さの差 (20m) を沈降速度で割って平均浮遊時間に換算すると、 7.5 日となる。(実際には、乱流効果等によって少し長くなると考えられる。) また1996年出水後に濁度が平常時に近い値に戻るまでに数週間要した。この程度の日数で懸濁態リンが溶脱するかどうかを基礎実験で調べる必要があるが、今後の課題である。

5. SS及びリン流入量の長期間推定

4-1で述べたように、濁度をモニターすることにより洪水時のウォッシュロードを推定することが可能であると考えられる。しかし筆者らの濁度モニタリングは1994年以降しか行われていないので、前節で計測した湖内堆積総量との比較ができない。そこで以下のような方法で、貯水池完成以後の全流入量を概算した。

洪水時の濁度と流量の関係は一般にループを描く。図-12は筆者らが観測した4洪水での関係であり、確かにループを描いている。しかし、ある程度の誤差を承知で、濁度と流量の間に一価関係を想定すれば、過去の流量資料と図-4及び図-5から、貯水池建設後のSS及びリン流入量を推定できる。

そこで七ヶ宿貯水池が湛水を開始した1989年10月から1996年10月までの流量記録から、図-12の実線の関係を用いて濁度時系列を求め、さらに図-4、図-5からSS及びリン流入量の時系列を求めた。その結果を時間積分して貯水池建設後の流入総量を計算すると、SSについて $0.71 \times 10^5 \text{ ton}$ 、リンについて 73ton という結果を得た。非常に粗い推算方法ではあるが、どちらについても前章の堆積物調査から求めた値と同オーダーである。なお、リンが堆積物調査の推算値よりかなり大きいのは、前述したように、溶脱したリンが貯水池から流出していることによる可能性が高いと筆者らは考えている。

6. おわりに

本研究では、七ヶ宿貯水池と流域において、洪水時の流出特性をもとに、濁度とSSあるいは懸濁態リンとの相関を調べ、それを利用して貯水池に流入するウォッシュロードと付着リンを推定した。

濁度のモニタリングは、比較的手軽に行えるものであるが、懸濁物質の流入状況を知る上で極めて有用であることが示された。また、SSとリン濃度の関係を調べておけば、リンの流入量も推定可能だと考えられる。さらに、現在まで濁度のモニターを行っていないところであっても、濁度と流量の相関式をこれから作成すれば、精度は落ちるものの、流量記録から過去のウォッシュロードの量の推定が可能であると考えられる。

貯水池に流入した後のウォッシュロードは、いったん沈降した後に、再び巻き上げられて、湖内に再配分される可能性の高いことが解った。また、懸濁態リンは、流入後の数週間で溶出している可能性が示唆された。

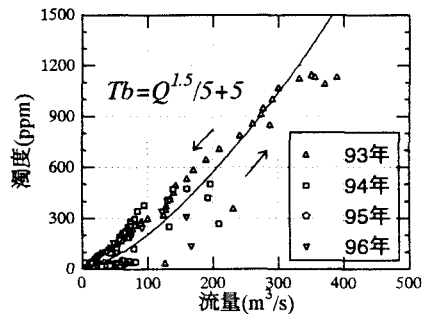


図-12 流量-濁度相関図

謝辞:建設省七ヶ宿ダム管理所には観測の便宜を図って頂き、各種データの提供を受けた。また、日本大学高橋迪夫助教授並びに研究室の皆様には現地観測に多大なるご協力を頂いた。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 張旭紅・首藤伸夫・田中仁: 降雨に伴う濁質の発生及び流出過程, 水工学論文集, 第38巻, pp. 259-264, 1994
- 2) 佐藤教久: 水環境工学 技報堂出版, pp. 39~42, 75, 76, 1987