

# 殿ダム貯水池に流入する 粒径別窒素・リン負荷量の推定に関する研究

Estimation of Nutrient Pollutant Loading of Each Particle Size  
Group into Dam Reservoir

増田貴則<sup>1</sup>・中田貴大<sup>2</sup>・細井由彦<sup>3</sup>

Takanori MASUDA, Takahiro NAKATA and Yoshihiko HOSOI

<sup>1</sup>正会員 工博 鳥取大学准教授 社会開発システム工学科 (〒680-8552 鳥取県鳥取市湖山町南4-101)

<sup>2</sup>学生会員 工修 鳥取大学大学院 社会開発システム工学専攻 (〒680-8552 鳥取県鳥取市湖山町南4-101)

<sup>3</sup>正会員 工博 鳥取大学教授 社会開発システム工学科 (〒680-8552 鳥取県鳥取市湖山町南4-101)

Behavior of sediment flowing into water reservoirs depends on the particle size. In addition, nitrogen and phosphorous content in sediment differ by the particle size. Therefore, sediment load has different effects on water quality of reservoirs according to the particle size. In this study, water quality and particle size distribution in runoff into Tono dam reservoir were measured, and L-Q models for estimation of pollution load of SS, nitrogen and phosphorous in each particle size group were built considering nutrient content of each particle size. Estimating sediment load using the models indicated that nutrient load with small particles such as those under 15 $\mu$ m increases with increase in rainfall intensity.

**Key Words:** Soil particle, Particle nutrient, Particle size distribution, L-Q model, Tono Dam Reservoir

## 1. 序論

ダム貯水池などの閉鎖性水域では、窒素・リンなどの栄養物質のうち溶存態のものは植物プランクトンに利用されるなどし、水質に直接影響を与えるが、懸濁態成分はその粒子の大きさにより水中での挙動が異なり、粒径が大きくなると沈降速度が速いためすぐに沈殿して底質を形成し、長期的に水質に影響を与えると考えられる。一方、粒径が小さければ沈降速度が遅く長期間水中に浮遊し、浮遊粒子に付着した有機物や栄養塩類が微生物に利用され水質に影響を与える可能性がある。一般に水質への影響は、溶存態と懸濁態に分けて考えることが多いが、懸濁態が全量沈むことや微生物に利用されないと仮定すると、浮遊している粒子態が微生物に利用される潜在的な影響が考慮されないため、貯水池で利用し得る栄養物質負荷量としては過小評価となりうる。さらに、浮遊粒子はダム貯水池だけではなく、ダムからの放流によって下流河川に影響を与えることが予測される。このようなことから、雨天時にダム貯水池などの閉鎖性流域に流入する汚濁負荷物質を溶存態と懸濁態に分け、さらに懸濁態においては、粒径別に分けてその後の挙動と合わせて評価することが重要と考えられる。

また、懸濁態物質は、粒径の小さい微粒子ほど単位重量あたり栄養塩や一部の金属などの物質を多く含んでいとされる。これは微細な粒子ほど物質が付着する表面積が大きくなるからと考えられている。実際、流域土壌中の窒素・リンについては粒径が小さい試料ほど含有量が高くなる傾向がみられ、他の物質についても粒径によって含有量が異なることが報告されている(史ら2004)。この事実を無視し、粒子に含まれる栄養物質を粒径に関わらず一定と考えると、浮遊している粒子に含まれる栄養量を過小評価してしまうことになる。

そこで本研究では、雨天時に流出する懸濁態汚濁物質を粒径別に分け、さらに、粒子の粒径別の窒素、リン含有量を考慮することによって、流域からダム貯水池へ流入する汚濁負荷のより正確な評価を行うための粒径別窒素、リン汚濁負荷流出モデルを構築することを目的とする。

## 2. 研究方法

### (1) 研究方法の概要

粒径別の窒素・リン負荷流出モデルを作成し、従来モデルとの差を評価するために図-1の流れで研究を行った。

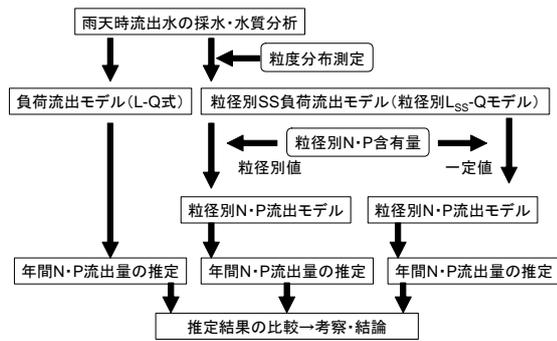


図-1 本研究のフロー図

まず、降雨時に流域からの流出水を採水し、栄養塩類などの濃度と粒度分布の測定を行った。そして、それらの結果を基に、汚濁物質の流出モデル(L-Q式)、および、粒径別に分けたSS(懸濁態物質)の負荷流出モデル(粒径別 $L_{SS}$ -Qモデル)を作成した。さらに、粒子態物質の粒径別窒素・リン(N・P)含有量を考慮した場合と考慮しない場合(粒径別に窒素・リン含有量が一定と考えた場合)の双方を考え、粒径別の窒素・リン負荷流出モデル(粒径別 $L_{NP}$ -Qモデル)を作成した。最後に、これらを用いてダム貯水池に流入する汚濁負荷量の推定を行い、相互の比較検討を行い、特に水中に長期間浮遊するような小さな粒子についてどのような違いが生じるかを評価した。

## (2) 雨天時流出水調査について

ダム貯水池に流入する汚濁負荷特性を把握するために、雨天時観測と常時観測を行った。

### a) 調査地点

鳥取県の鳥取平野の中央には、千代川が流れており、千代川の1支川である袋川の上流に殿ダムが建設されている。殿ダムは集水面積 $38.1\text{km}^2$ 、総貯水量 $11,200,000\text{m}^3$ で洪水調節、水道用水、工業用水、発電を目的とした多目的ダムである。図-2に殿ダム流域を示す。流出水調査は、殿ダムの建設地である殿ダム地点(以下殿地点)と同地点より約3km上流に上った栃本地点で実施した。栃本地点は、殿ダム建設後のダム貯水池上流端付近に位置している。栃本地点の集水面積は $26.8\text{km}^2$ である。土地利用に関しては、大部分が森林と水田で構成されており、森林の土地利用は約90%を占めている。森林が多くを占めるが、上流には集落や牧場もあり、生活排水や処理場排水など人為的な汚染流出もある地域である。

### b) 調査方法・調査項目

常時観測は、2003年6月6日～2004年1月3日、2004年7月1日～2005年11月30日の期間行った。殿・栃本地点ともに多項目水質計を設置し、常時15分間隔で観測を実施した。測定項目は、水温(°C)、pH、濁度(NTU)、水位(m)である。一方、雨天時の採水は、2003年に4回、2004年に3回、2005年に4回の計11回行った(表-1)。

降雨時にはISO-6212型ウォーターサンプラーを用いて

表-1 雨天時観測日時と降雨量

年	採水開始時刻	採水終了時刻	観測時間(hr)	総雨量(mm)
2003	8月8日 5:00	8月10日 3:00	47	79
	9月24日 14:30	9月25日 11:00	22	15
	10月23日 12:00	10月23日 20:00	9	5
	11月11日 5:00	11月12日 14:00	34	39
2004	7月9日 18:18	7月10日 7:47	13.5	30
	8月4日 19:49	8月5日 18:19	22.5	25
	9月29日 18:27	9月30日 4:11	10	138
2005	7月26日 14:46	7月27日 2:16	11.5	31
	9月6日 23:17	9月7日 10:47	11.5	24
	10月22日 4:52	10月23日 11:10	19	130
	11月15日 1:30	11月15日 12:00	11.5	9

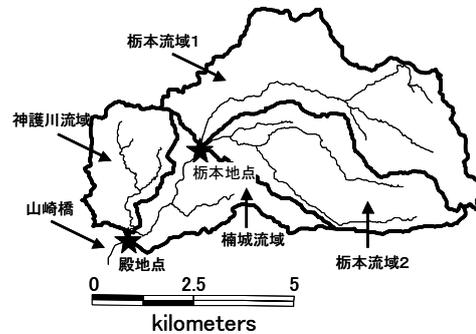


図-2 殿ダム流域

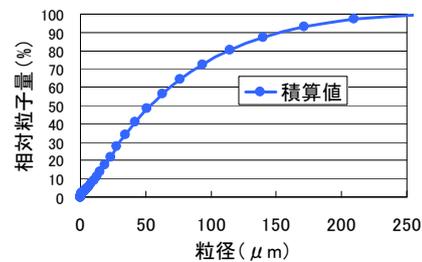


図-3 粒度分布測定結果(2004/8/5 4:38)

採水を行い、降雨の降り始めから降り終わりまで実施した。採水間隔は、降雨の強さに応じて調節し、雨が強いときは30分間隔で行い、弱いときは1時間間隔で行った。採水した試料は持ち帰り、TN、DTN(溶存態総窒素)、 $\text{NO}_3\text{-N}$ 、 $\text{NH}_4\text{-N}$ 、TP、DTP(溶存態総リン)、 $\text{PO}_4\text{-P}$ 、SS、粒度分布を測定した。SSおよび溶存態物質測定のためのろ過は孔径 $1\mu\text{m}$ のろ紙を用いて行い、各水質項目は上水試験方法に従い測定を行った。粒度分布はレーザー回折式粒度分布装置(SALD-2000A、島津製作所製)を用いて測定した。粒径は $0.03\mu\text{m}$ から $700\mu\text{m}$ まで測定でき、その間で粒径別に51区間に分けて個数、面積、体積の分布を得ることができる。粒子の比重が粒径に対してほとんど変化しないと仮定し、また、粒子を球形と仮定して体積から粒度分布を推定した。また、PN(粒子態総窒素)はTNからDTNを差し引いた値、PP(粒子態総リン)はTPからDTPを差し引いた値を用いた。

雨天時観測で採水した試料を測定した結果、雨天時にはリンと窒素の粒子態成分が多量に流出し、溶存態は降雨の影響をあまり受けない結果となった。図-3に2004年8月の観測での流量ピーク時における粒度分布測定結果を示す。 $200\mu\text{m}$ 以下の粒子の流出が見られ、 $50\mu\text{m}$ 以下の微粒子の流出が40%程度を占める結果が確認できた。

11回行った雨天時観測の粒度分布の測定結果より、粒

表-2 粒径別モデルの粒径区分

区分	沈降速度 (cm/min)	粒径 ( $\mu\text{m}$ )
A	$10^2$ 以上	468.14 ~ 700
B	$10^2 \sim 10^3$	140.03 ~ 468.14
C	$10^1 \sim 10^2$	51.22 ~ 140.03
D	$10^0 \sim 10^1$	15.32 ~ 51.22
E	$10^{-1} \sim 10^0$	4.58 ~ 15.32
F	$10^{-2} \sim 10^{-1}$	1.68 ~ 4.58
G	$10^{-3} \sim 10^{-2}$	0.50 ~ 1.68
H	$10^{-4} \sim 10^{-3}$	0.15 ~ 0.50
I	$10^{-5} \sim 10^{-4}$	0.045 ~ 0.15
J	$10^{-6} \sim 10^{-5}$	0.03 ~ 0.045

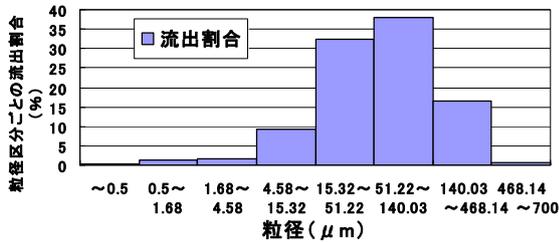


図-4 各粒径区分から粒子が流出する割合 (栃地点)

径区分ごとの流出する割合を求めた。図-4はそれぞれの粒径区分からの平均的な流出割合を示している。これより、15~51  $\mu\text{m}$ と51~140  $\mu\text{m}$ の粒子が雨天時に多く流出していた結果となる。

### (3) 雨量—流量モデル

時系列で雨量から流量を推定するためにタンクモデルを用いた。3段のタンクモデルを使用し、各タンクの側面と底面に1個ずつの孔を設置した。各タンクの側面の孔からの流出量の合計が河川の推定流量とし、この推定量が実際の流量に近くなるように、パラメータを変化させながらトライ&エラー法でそれぞれの孔の高さや孔の流出係数等のパラメータを調節した。

結果として、殿ダム流域では冬季に積雪が多く、春先に雪解けによる流出が生じるため、パラメータの調整だけでは年間の流量の再現は難しいという結果となったが、構築したタンクモデルは夏期における再現性がみられるため、以下ではこのモデルを用いて降雨量から流量の推定を行うこととした。

### (4) 流量—粒径別汚濁負荷モデルの作成

観測によって得られた11回の雨天時実測値のうち2004年8月降雨時以外の10回分の雨天時データを用い、SS, N, Pについて粒径を考慮しない通常の負荷流出モデルと、SS, PN, PPについての粒子粒径別の負荷流出モデルを作成した。いずれも、流掃能力型汚濁モデルであるL-Qモデル(海老瀬 1981)を用いた。

#### (a) 負荷流出モデルの作成

雨天時においては同じ流量でも流量のピーク前後において負荷量が異なるヒステリシスを有するため流量増加時と減少時を分けるとよい(山本ら2003)といわれているが、本流域では顕著なヒステリシスは見られなかったため、流量の増減を分けずにL-Q式を作成した。

2004年8月の雨天時のデータを用い、モデル検証を行っ

表-3 山林土の粒径別汚濁負荷含有量と比重 (史ら 2004)

粒径 ( $\mu\text{m}$ )	含有量	
	N(mg/g)	P(mg/g)
355 ~ 2000	1.705	0.300
212 ~ 355	2.368	0.331
106 ~ 212	3.000	0.490
45 ~ 106	3.742	0.625
20 ~ 45	4.017	0.726
~ 20	4.103	0.811

た結果、L-Qモデルで推定すると、流量のピーク時には過小評価をし、降雨前と降雨後の低水位時に過大評価をする結果となった。同様に、晴天時においては本L-Q式では負荷量を過大評価するため、低水位L-Qモデルを構築した。低水位L-Q式で推定した方が実際の濃度に近い値を推定できる結果となった。

#### (b) 粒径別SS負荷流出モデルの作成

まず、ダム貯水池に流入する懸濁態物質量をいくつかの粒径区分に分けて推定することができるように、流出水中の懸濁物質(SS)濃度と粒径分布の測定結果を基に、いくつかの粒径区分毎にSS負荷のL-Q式を作成することとした。

粒子のダム貯水池流入後の挙動に影響を与えるものとしては、粒径、形状、比重、水の動粘性係数、河床の状態、砂粒相互の干渉、水の流れなどが考えられるが、ここでは、水中に長期間浮遊しているような微粒子の流入量をおおまかに評価するために、水中の粒子の沈降速度ごとに、おおまかに粒径区分を分類することとした。簡単のため、粒子を単一粒子と考え、形状は球体、比重が2.6で一定、静水中を等速で沈降すると仮定し、ストークス式を用いて、粒径区分を沈降速度のオーダーごとに区分し決定した。表-2に沈降速度で分けた粒径区分を示す。

次いで、採水時刻毎に、粒度分布の測定結果をこの粒径区分ごとに分け直し、同時刻の流出SS量をこの粒径区分と同じ割合で分配し、その時刻の粒径別SS量とした。その上で、この値と流量をもとに、粒径別SS負荷流出量を推定できる粒径別L<sub>SS</sub>-Q式を作成した。

#### (c) 粒径別N・P負荷流出モデルの作成

粒径別の窒素・リン負荷流出モデルを構築するためには、各粒径ごとの窒素、リンの含有量を求めることが必要となる。しかし、流水中の粒子の粒径別の窒素、リンの含有量を測定するには、試料水中のSSを粒径別に分け、SS中の窒素、リンの含有量を調べなければならない。これは非常に難しいため、試料水からの粒径別窒素、リンの含有量の測定は行わず、以下の手順で粒径別の窒素、リン含有量を推定した。

窒素、リンの含有量については、粒径が小さな粒子ほど窒素、リンの含有量が多くなる。例えば、流域から流出すると考えられる山林土壌中の粒径別含有量を測定した例として、史ら(2004)の分析結果がある(表-3)。

一方、殿ダム流域の雨天時観測での観測値から、懸濁態の物質量を示すPN, PP負荷量とSS負荷量の関係から、SS1gあたりの窒素、リン(mg)を求めたところ、SS1gあ

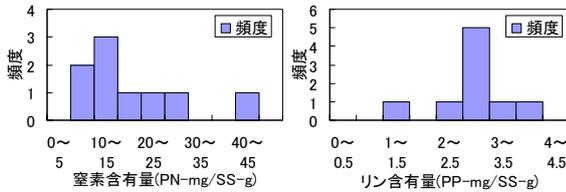


図-5 降雨時流水中のSS1g当たりPN, PP含有量平均値のヒストグラム (降雨観測11回分)

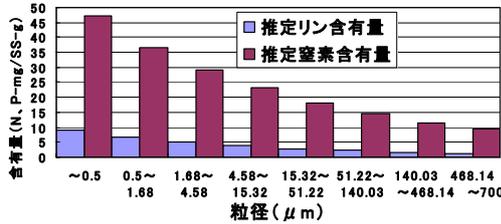


図-6 流水中の窒素, リンの含有量の推定値 (栃本地点)

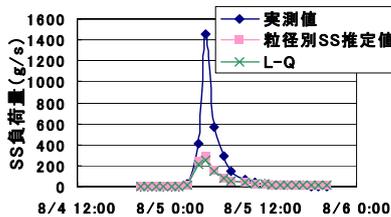


図-7 粒径別 $L_{SS}$ -Qモデルの検証結果 (2004年8月降雨)

たりの窒素, リン量は降雨に応じて時間変化していたが, 降雨時の分布形状をみると図-5のとおりであり, 平均値を中心とした正規分布あるいは対数正規分布に近い形状が得られた. 流水中のSSに含まれる窒素, リン量はある値を中心として分布していることが示された. ここで, 全体の平均をとると, 窒素16.5N-mg/SS-gとリン2.64P-mg/SS-gが得られた. この値は表-3に示した含有量と, 大きく値が異なるため, ここでは以下の式を用いて流水中の各粒径区分における窒素, リンの含有量を推定した.

$$Y = a_1 X_1 + a_2 X_2 + \dots + a_i X_i \quad (1)$$

ここで, Y: 流水中のSS1g中の窒素, リンの平均含有量 (mg/SS-g) (16.5N-mg/SS-g, 2.64P-mg/SS-g),  $X_i$ : 粒径区分*i*における粒子の平均的な流出割合 (%) (図-4の値),  $a_i$ : 粒径区分の流水中の窒素, リンの含有量 (N-mg/SS-g, P-mg/SS-g) である.

また,  $a_i$ については次式が成り立つと仮定した.

$$a_i / a_1 = W_i / W_1 \quad (2)$$

ここで,  $W_i$ : 土壌粒子中の粒径区分*i*の窒素, リンの含有量 (N-mg/SS-g, P-mg/SS-g) となる. この式 (2) では, 土壌中の一つの粒径区分に対する含有量の比率は, 流水中の含有量においても比率が等しくなることを仮定しており,  $W_i$ には表-3の値を用いた. これらの式を解き, 流出水中の各粒径区分の窒素, リンの含有量を求めた結果を図-6に示す.

このようにして求めた各粒径区分の粒子の窒素, リン含有量を, 粒径ごとのSS量に乗じることで粒径別N・P負

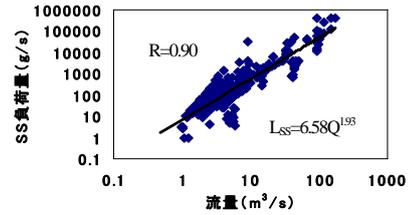


図-8  $L_{SS}$ -Q式への近似結果

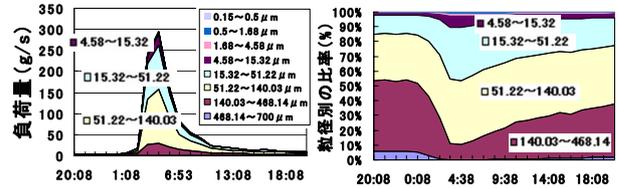


図-9 SS負荷流出量の粒径別推定値の内訳 (2004年8月)

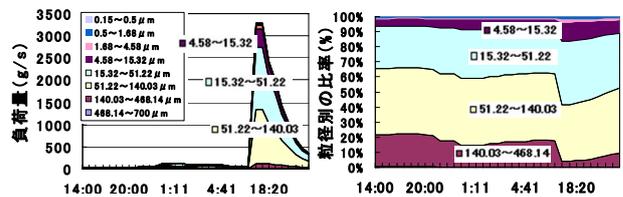


図-10 SS負荷流出量の粒径別推定値の内訳 (2003年8月)

荷流出モデル (粒径別 $L_{NP}$ -Q式) を得ることができた.

### 3. 結果と考察

#### (1) 粒径別SS負荷流出モデルの結果

粒径ごとの $L_{SS}$ -Q式を構築した結果を示す. 図-7に検証として, 栃本地点の2004年8月の雨天時観測の実測値, および, 粒径別に分けていない通常L-Q式による推定値との比較を行った結果を示す (これ以降, 栃本地点のみの結果を示す). また, 参考のため, 観測されたSS負荷量に通常のL-Q式を近似したときのグラフと近似式を図-8に示す.

既に述べた通り, ピーク時の負荷量を過小評価している点は, 粒径別 $L_{SS}$ -Q式, 通常のL-Q式とも共通している. また, 粒径別にSS負荷量を推定した値と通常のL-Q式から推定した負荷量の推定値にはほとんど差異がみられない結果となった.

次に, 粒径別 $L_{SS}$ -Qモデルで計算されたSS負荷の粒径別内訳について, 2004年8月の雨天時の結果, および, その比較として, 約3倍の降雨量を観測した2003年8月の雨天時の結果を図-9, 図-10に示す. いずれも, 出水時には15~51  $\mu$ mと51~140  $\mu$ mの粒子の流出が多く, 特に流量が増加する際に15  $\mu$ m以下の微粒子の流出が増える結果を示した. 図-3の粒度分布の実測値と図-9のモデル推定値を比較すると, 流量ピーク付近では50  $\mu$ m以下の粒子が50%程度を占めており, 両者が似た傾向を示していることからこのモデルが妥当な推定結果を示していると考え

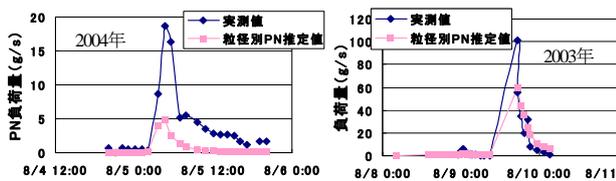


図-11 粒径別汚濁負荷モデル (PN) の検証結果

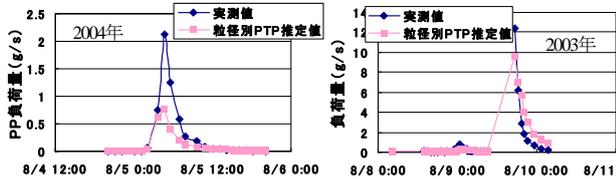


図-12 粒径別汚濁負荷モデル (PP) の検証結果

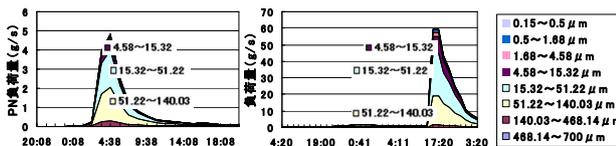


図-13 粒径別窒素負荷流出モデル (PN) の内訳

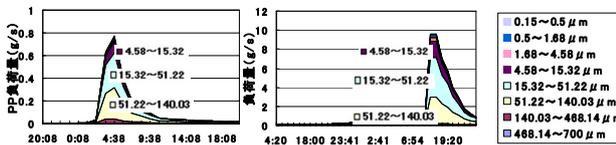


図-14 粒径別リン負荷流出モデル (PP) の内訳

られた。また、モデルの推定結果からは、図-10のように降雨量が多い場合には、 $\sim 15 \mu\text{m}$ 、 $15 \sim 50 \mu\text{m}$ の粒子の流出する割合が大きくなっていることが示された。一方、各図の右側に示した粒径別SS流出量の100分率のグラフを見ると、流量が少ない時間帯には、 $140 \mu\text{m}$ 以上の粒子の割合が大きくなることを示されている。

## (2) 粒径別N、P負荷流出モデルの検証結果

図-11、図-12に粒径別N、P負荷流出モデルの検証結果を示す。粒径別のN、P流出量の実測値は測定していないため、懸濁態の窒素、リンの総量 (PN、PP量) で検証を行った。なお、SSモデル同様、粒径を考慮しないモデルと考慮したモデルとでほとんど差が見られなかったため、ここでは粒径を考慮したモデルの結果のみを示す。図より、窒素、リンの負荷量ピーク時に過小評価をしている。リンについては、降雨前と降雨後の流量が低い時間帯では、負荷量を若干過大評価している。また、降雨規模が大きいほど、推定値がより実測値に近くなっている。これらは、SS流出モデルと同様の再現傾向を示しているが、これは、粒径別N、P負荷流出モデルが粒径別SS流出モデルをベースに作成されているからである。したがって、粒径別N、P負荷流出モデルの再現性を向上させるためには、SS流出モデルを改善することが必要と思われる。

SSモデルの精度の悪さに起因して、粒径別N、P負荷流出モデルの再現性も十分とは言えないが、以下では、このモデルを用いて粒径別N、P負荷についての分析と考察を試みる。

表-4 SSの粒径別年間負荷量の推定結果

年	2003年	2004年	2005年
年降水量(mm)	2318	2318	2218
粒径 ( $\mu\text{m}$ )	粒径別SS負荷量(kg/year)		
468.14~700	5,126	5,168	5,155
140.03~468.14	155,636	206,405	181,015
51.22~140.03	277,737	743,012	414,275
15.32~51.22	173,828	703,104	298,772
4.58~15.32	33,283	192,759	64,958
1.68~4.58	3,925	31,699	8,655
0.5~1.68	5,001	24,130	9,144
0.5~	687	3,419	1,270
合計	655,222	1,909,694	983,245
従来モデルによるSS負荷量(kg/year)	640,152	1,449,435	902,237

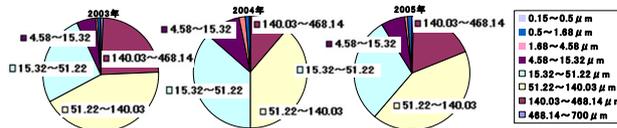


図-15 粒径別SS年間汚濁負荷量年間比較

## (3) N、P負荷の粒径別量について

粒径別N、P負荷流出モデルを用いて雨天時の粒径別N、P負荷量を計算した結果を図-13、図-14に示す。粒径別にみると、懸濁態の窒素、リンは、 $15 \sim 51 \mu\text{m}$ や $51 \sim 140 \mu\text{m}$ の粒子として流出する量が多い。また、 $15 \mu\text{m}$ 以下や $15 \sim 51 \mu\text{m}$ の微粒子に関しては、流量増加時にその割合が増加することが示されている。これらの傾向は、粒子態物質そのものであるSSの算定結果と同様であるといえる。しかし、詳細に見ると、SSのときより細粒径のものが占める割合が増えていることがわかる。SSのときにはあまり見られなかった $5 \mu\text{m}$ 以下の微細粒子による流出負荷量が、流量ピーク時を中心に10%近くを占めた。これは微粒子ほど窒素、リン含有量が多いという前提に基づくもので、窒素、リン含有量が粒径に係わらず一定だと仮定すると導き得ない結果である。流量増加時の数%の違いは、負荷量で考えると大変大きな違いとなる上に、微細粒子はダム貯水池内で長期間浮遊し、貯水池内や下流河川の水質成分に影響を与え得る物質であるので、これらの結果は水質管理上重要な意味を持つと思われる。

## (4) 粒径別年間汚濁負荷量の推定結果

以上で作成したタンクモデルおよび各種の負荷流出モデルを用いてダム貯水池に流入する年間の汚濁負荷量について推定した。推定は、2003年~2005年の3年間で行い、タンクモデルの出力結果(流量)をL-Qモデルの入力とした。なお、晴天時に負荷量を過大評価することを避けるために低水位L-Qモデルを適応させている。

SSの粒径別 $L_{SS}$ -Q式を用いて、年間の汚濁負荷量を推定した結果を表-4と図-15に示す。これらより、粒径 $15 \sim 50 \mu\text{m}$ 、 $50 \sim 140 \mu\text{m}$ の粒子が多く流出しており、各年度とも $50 \sim 140 \mu\text{m}$ の粒子は約40%、一方、 $15 \sim 50 \mu\text{m}$ の粒子は約27~37%を占める結果となった。また、 $15 \mu\text{m}$ 以下の粒子もそれぞれの年で約7、13、9%程度みられた。小粒径のものほど、年変動が大きく、降水量が多い年には全体の中で占める割合が増加することがわかった。

粒径別N、P負荷流出モデルを用いて年間の窒素、リン

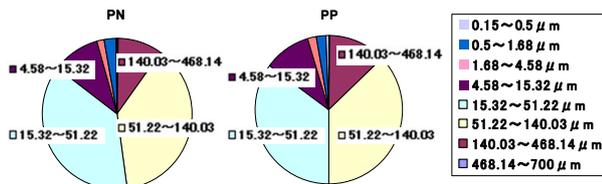


図-16 粒径別含有量を考慮した場合の粒径別年間N, P負荷量

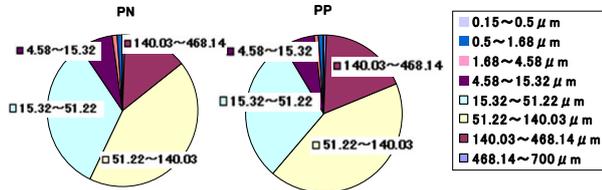


図-17 含有量一定とした場合の粒径別年間N, P負荷量

の汚濁負荷量を推定した結果のうち2005年の結果を図-16に示す。窒素、リンについては、50~140 $\mu\text{m}$ の粒子と15~50 $\mu\text{m}$ の粒子がそれぞれ約35~38%を占める結果となった。15 $\mu\text{m}$ 以下の粒子は、約15%見られ、SS粒径別汚濁負荷量に比べて多い結果となった。

ここで、殿ダム貯水池の有効水深約30mに対し、静水・密度差無しの場合を仮定し粒子の沈降時間を計算すると、水底まで沈降するためには、140 $\mu\text{m}$ 以下の粒子で約3.5時間以上、50 $\mu\text{m}$ 以下では約1.5日、15 $\mu\text{m}$ 以下の粒子では約15日以上を要する結果となる。そのため、貯水池に流入する懸濁態窒素、リンの約60%は、流入後1.5日ほどで沈降するが、10%前後の粒子と15%近くの窒素・リン量はかなり長期間にわたって水中に浮遊していることが考えられる。ただし、本殿ダム貯水池の回転率が約15程度と予測されていることから、濁水が長期化することは無いと思われる。

一方、粒径による窒素、リン含有量の差異を考慮せず、含有量を窒素16.5N-mg/SS-g、リン2.64P-mg/SS-gの一定値として年間汚濁負荷量を計算した結果を図-17に示す。SS1gあたりの窒素、リンの含有量を一定値とすると小さな粒子ほど多くの含有量を持つという特性が表せない。図-16では50~140 $\mu\text{m}$ の粒子の割合が43% (50 $\mu\text{m}$ 以上のもの全てだと約60%) を越える一方、15 $\mu\text{m}$ 以下の粒子は10%に満たない結果となっており、粒径別に含有量を考慮した場合と大きく異なる結果となった。

#### 4. 結論

殿ダム貯水池への流出調査を行い、粒径別のSS, N, P負荷流出量算定モデルを作成した。以下に、結論を示す。

(1) 観測データを基に、粒径別のSS負荷流出モデルとして、粒径区分別の $L_{SS}$ -Q式の作成を試みた結果、L-Q式の構造では、ピーク時の急激な負荷量の増加を表現できなかったが、SSを粒径区分別に分けることによる誤差はほとんどみられず、比較的良好な検証結果であった。また、

このモデルによる流出負荷量推定の結果、15~50 $\mu\text{m}$ 、50~140 $\mu\text{m}$ の粒子が大半を占めることがわかった。その一方で、流量の増加に伴い15 $\mu\text{m}$ 以下の微粒子の割合が増加する結果となり、降水量が多くなると微粒子の流出が増大することを示すことができた。ここから、小粒径のものほど降水に起因する年変動が大きく、降水量が多い年には全体の中で占める割合が増加することが指摘できる。

(2) 粒径別の窒素、リンの含有量を考慮した粒径別窒素、リン負荷流出モデルとして、粒径区分別の $L_{NP}$ -Q式を作成し、流出負荷量を推定した結果、15 $\mu\text{m}$ 以下の微粒子の形で流入する窒素・リン量が全懸濁態量の15%ほどを占めることがわかった。また、流量ピーク時を中心にSS自体としてはあまり見られない5 $\mu\text{m}$ 以下の微細粒子の形で窒素・リン流出量が10%近くを占めることが示すことができた。

(3) また、粒径別の窒素、リン含有量を一定と考えた場合のモデルを作成し負荷算定を行ったところ、多くの粒径区分において、粒径別の含有量を考慮した場合のモデル算定結果と大きく異なる結果となった。特に、15 $\mu\text{m}$ 以下の粒子の形で流入する窒素・リン量は年全懸濁態量の10%に満たない結果を示した。これらのことより、含有量を一定と考えると、貯水池流入後に長期にわたり浮遊する可能性のある窒素、リン量を過小評価してしまうことが指摘できる。

以上、流水中の粒子の粒径別窒素、リン含有量に仮定をおき推定した値を用いて導いた結果なので、結果の解釈には注意が必要であるが、方法論の重要性は示すことができたと思われる。今後、実測による立証が課題といえよう。

謝辞：本研究を遂行するにあたって、国土交通省中国地方整備局殿ダム工事事務所の方々には採水器の設置・運用等で多大なる協力を頂きました。また、鳥取大学工学部土木工学科の矢島啓准教授に様々なアドバイスを頂きました。ここに記して感謝の意を表します。

#### 参考文献

- 1) 海老瀬潜一：流出負荷モデル、陸水域の富栄養化に関する総合研究(V)霞ヶ浦流入河川の流出負荷量変化とその評価、国立公害研究所報告, 21, 1981
- 2) 史 承煥, 細井由彦, 増田貴則：中山間地域における非点源水質汚染源の潜在力評価, 水工学論文集, vol.48, pp1429-1434, 2004.
- 3) 山本幸一, 二村貴幸, 坂野章, 日下部隆昭, 末次忠司, 横山勝英：濁度計による懸濁態栄養塩負荷推定に関する研究, 河川技術論文集, pp515-520, 2003.

(2007. 9. 30受付)