

1. 緒言

河川の浮遊物質(SS)は、直径 $1\mu m$ 以上 $2mm$ 以下の水中に浮遊している物質を意味するが、河川の表面流出に関係して急激に増大や減衰をするなど、特に濃度変動の大きい水質である。浮遊物質については立場は異なるが、流出土砂量の算定という観点から古くから研究されており、次第にその流出機構が明らかになりつつある。即ち、河川の浮遊流砂には掃流砂、浮遊砂およびWash loadがあり、浮遊砂には水深方向の濃度分布があるが、Wash loadはほぼ一様分布で流れていることなどである。¹⁾従って、SSとして測定される物質は、浮遊流砂の中の浮遊砂とWash loadであり、特に表面採水の場合には、そのほとんどがWash loadと思われ、SSとWash loadには流出機構に類似性があるものと考えられる。

SSの流出機構については、これまでも大河川や中小河川における調査から、主として $Q_s = a \cdot Q^n$ 型の関数型を基にして指数 n の評価という観点から論じられ、 n の値も $2 \sim 5$ とかなり大きく変動することが報告されている。²⁾また、下水管渠のSSの流出については、山口が残存負荷量や限界掃流量等の概念を入れて $Q_s = K S^m Q^n (Q - Q_c)$ 型の式を用いて整理しており³⁾これは勾配が一定でなく流量により変化することを意味している。この型の式の、河川のSSの流出機構に対する応用も行われている。⁴⁾一方Wash loadについては、全国河川の平均値として $Q_s = 10^{-6} \sim 10^{-7} Q^2$ という経験式や、河川の間接流出量を考慮した村本による $Q_s = K Q^n (1 - Q'/Q)^m$ 型の式が提案され検討されているが^{5) 6) 7)}特に後者は山口のものとは基本的に同じ式であり、SSの流出機構を論ずる上で参考となるだろう。

元来SSは、一降雨毎に複雑な挙動を示し、統一的に論ずるにはまだデータ不足の感は免れない。本稿では、流出機構を論ずる前提として、河川の流量の変動と共にSSの濃度やその成分および粒径や比重がどのように変化し、互いにどのような関係にあるのかという基礎的な性質について検討を行なった。

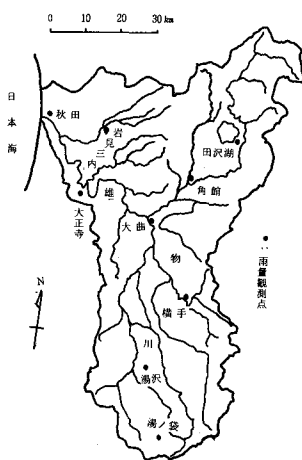
2. 調査および測定方法

河川は、秋田県内を流れる雄物川でその概要を図-1に示した。採水地点は、河口から約4km上流の仁井田浄水場である。調査期間は、昭和54年7月10日～8月9日と10月15日～11月13日のそれぞれ1カ月の計2カ月でそれぞれ夏期および秋期とする。採水時間は、11時半ごろで1日1回行なった。

SSの測定は、メンブランフィルター法、濁度は積分球式濁度計で行なった。粒径の測定は、まず試料をビーカーに取り1～2日間放置してSS分を沈降させ、上澄み液をすてて約10倍に濃縮した。次にこの懸濁液についてできるだけランダムに写真撮影し、これをスライド化してプロジェクターで拡大して粒径を読み取った。粒径は、粒子の長径と短径を測定し、これを単純平均したものと考えた。

比重は、SSの総括的な比重を測定するものとし、JIS-A-1202に大略従って測定を行なった。ただし、河川のSSは、増水時以外は濃度が小さく量が少なかったため、そういう日は3～5日間のComposit Sampleとし、また比重びんについては容量が約5ml程度の小さなものを用いて測定した。方法は、粒径の場合と同様に、約3ℓの試料をビーカーに取り、Stokesの式による粒子の沈降速度を考慮して36～48時間放置して約10倍に濃縮し、その後遠心分離により更に10倍程度濃縮した懸濁液を作り、これを用いて測定した。SSの量が少なく、また小さな容量の比重びんを用いることに起因する誤差については、十分注意深く行なうと同時に、同型および100mlの比重びんに

図-1 雄物川流域



よるガラスビーズを用いた比較テストの結果、誤差はほとんどないことが確認された。

3. SSの流出特性

3-1 流量およびSSと粒径

夏期の流量とSS、濁度および粒径との関係を図-2に示した。これによると、この1カ月間に4回の流量のピークがあり、特に8月6日には、最大約2,400 m^3/sec を記録するなど全体として流量の豊富な時期であった。SSと濁度は、ほぼ流量の増減に伴って変動しピークもほぼ一致しているが、水質のピークの方が流量より早く表われる場合も見られる。粒径は、最小1.4 μm ~最大299 μm の間でそのほとんどは数 μm ~数十 μm の間にあった。また、粒径はほぼ対数正規分布を示したので、5:50および95%非超過確率値を求めてそれぞれ d_5 d_{50} および d_{95} と表わし、平均粒径については d_m として示す。図-2によると、流量の変動と

共に粒径も変化していることおよびこの変動には大きな径の粒子がより強く対応していることなどが認められる。夏期については、 d_5 が2~5 μm 、 d_{50} が5~9 μm に対し d_{95} は20~80 μm であった。 d_5 d_{50} および d_{95} は、それぞれ対応して変動する傾向が見られるが、流出によっては相反して変動することもあった。

次に、各粒径が流量やSSに対しどの程度の相関を持っているかについて検討した。図-3には、流量とSSに対する各粒径毎の季節別の相互相関を示した。これによると、 d_5 は、流量とSS共に相関が弱く、秋期には1日の遅れが見られる程である。これに対し d_{50} d_{95} は、粒径が大きくなるにつれ当日の流量、SSに対して相関が大きくなる傾向が見られる。季節別には、秋期よりは夏期の方がやや相関が大きく、流量とSSに分けると、SSに対する方がやや高い相関が認められる。

図-4には、同じ夏期の各粒径と流量との関係を示した。これによると、バラツキは大きい、各粒径共に流量の増大と共に徐々に大きくなる傾向が認められ特に大粒径のもの程この傾向が著しい。この関係を

図-2 夏期の流量、SSと粒径

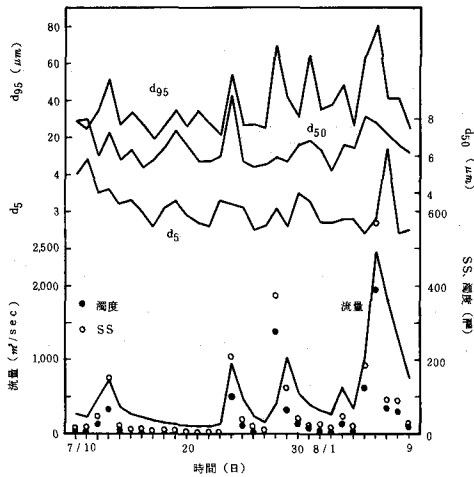


図-4 粒径と流量との関係

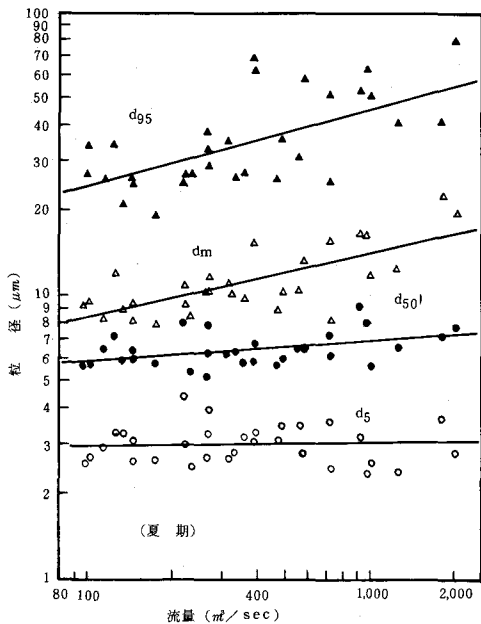
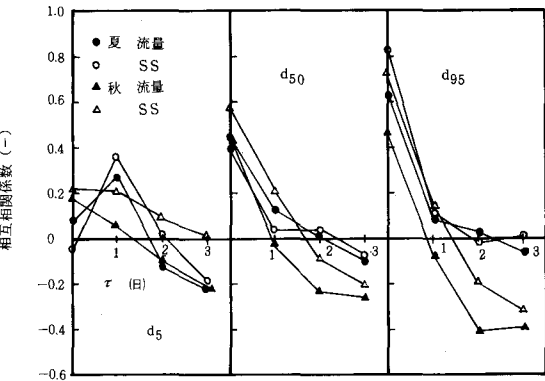


図-3 粒径と流量、SSの相互相関



$y = a x^n$ 型の式で表わすと、各粒径毎にそれぞれ次のように求められた。

夏期	$d_5 = 2.80 Q^{0.0130} \quad (r = 0.098)$	秋期	$d_5 = 2.25 Q^{0.0280} \quad (r = 0.212)$
	$d_{50} = 4.23 Q^{0.0711} \quad (r = 0.434)$		$d_{50} = 2.83 Q^{0.127} \quad (r = 0.403)$
	$d_m = 3.01 Q^{0.224} \quad (r = 0.746)$		$d_m = 3.74 Q^{0.193} \quad (r = 0.525)$
	$d_{95} = 6.85 Q^{0.274} \quad (r = 0.641)$		$d_{95} = 13.1 Q^{0.182} \quad (r = 0.434)$

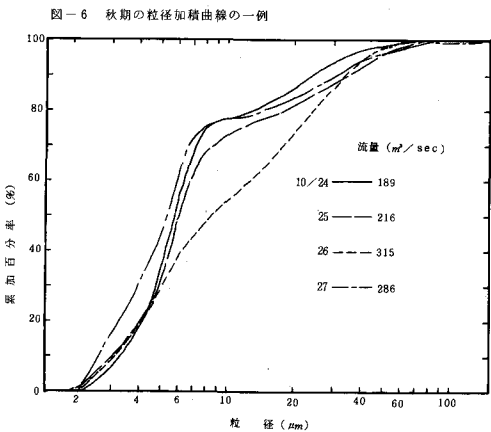
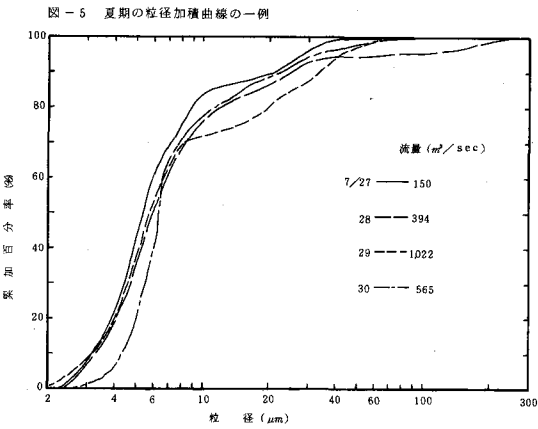
これによると、 d_{50} 以下の粒子は、流量変化の影響をあまり受けずに常に一定の大きさを持って流れていることおよびこの傾向は季節にもよらないこと等がわかる。これに対し大きい粒子は流量の影響を受け、例えば流量が $100 \text{ m}^3/\text{sec}$ から $1,000 \text{ m}^3/\text{sec}$ に10倍に増えると、 d_m は8.4から14.1 μm と1.67倍に、 d_{95} は24.2から45.5 μm と1.88倍になることがわかる。

また、粒径が大きくなるとバラツキも大きくなり、 d_{95} では夏期、秋期共に相関係数が d_m よりも小さくなっている。指数 n の値も、一般に粒径と共に大きくなるが、秋期の d_m と d_{95} では逆転しており、流量の範囲によってもSSの流出傾向が異なることがわかる。このことは、 d_{50} 以下の粒子については n の値が秋期の方が大きく、 d_m 以上では逆に夏期の方が大きいことにも表われている。

3-2 粒径分布

次に、個々の降雨流出毎の粒径分布を見てみよう。図-5に、7月27日～30日の4日間の降雨流出時のSSの粒径加積曲線を示した。この4日間の流量の変化は、初日 $150 \text{ m}^3/\text{sec}$ が3日目に最大 $1,022 \text{ m}^3/\text{sec}$ まで約7倍に増え、4日目にはそれが半減する程の大きな変化であった。粒径分布をみると、初日は、10 μm 以下の小粒子が約85%を占め、最大粒径も70 μm 程度であったのが、2日目に流量が25倍に増加すると共に全体的に粒径が大きくなり、特に100 μm 以上の粒子が増加して最大250 μm 程度の粒径を記録した。3日目の流量ピーク時には、10 μm 以下の粒子が70%程度まで低下し、10～50 μm の範囲の粒子が増加したが、100 μm 以上の粒子は認められなかった。4日目の流量半減と共に10 μm 以下の粒子の占める割合も80%近くまで回復し元の粒径分布に近くなっているが、流量の絶対値が大きい割に粒径は小さいものが多く、増水期と減水期では同じ流量でも粒径分布はかなり異なっていることがわかる。また、全体として粒径は数 μm ～数百 μm の範囲であり、粒径から見る限りSSの成分は粘土、シルトおよび細砂から成り、しかもそのほとんどはシルトであることがわかる。

同様に図-6には、10月24日～27日の4日間の粒径加積曲線を示した。この期間の流量の変化は、初日の $189 \text{ m}^3/\text{sec}$ から3日目のピーク $315 \text{ m}^3/\text{sec}$ まで徐々に増え、4日目に $285 \text{ m}^3/\text{sec}$ に減ずるという比較的ゆるやかな変化であった。この時の粒径分布をみると、初日10 μm 以下の粒子の割合は約78%で最大粒径80 μm 程度は図-5の場合とほぼ同じであるが、2日目に流量がやや増えると10 μm 以下が約74%に低下して全体として粒径がやや大きくなり、3日目の流量ピーク時にはそれが約55%まで低下し、また5



～30 μm の範囲の粒子が急激に増加しているが大きな特徴である。4 日目には、流量がピーク値の10%程度減少しただけであるが、流径分布は初日の曲線にまでは戻り、流量が減衰期に入るとSSの粒径が、ピーク時に比べて急激に小さくなることが図-5の場合と同様に認められる。

ここには二例を示したが、他にも降雨流出時の粒径分布には様々な変化が伴ない、例えば洪水時の加積曲線は、なめらかな曲線というよりも段状の小ピークが二、三見られ、従って各種の粒径を一樣に含んだ分布というよりも、特定の粒径毎に集中したような分布が認められた。また、10 μm 以下の粒子の占める割合がほぼ70～80%と非常に大きく、これに対し大きな粒径の粒子は、必ずしも流量ピーク時に増加するわけではなく、図-5の場合に見られるようにその前後に増加する例も見られるなど、降雨毎に複雑な挙動を示すことが認められた。

次に、粒径分布を総括的に表わす係数として、均等比、均等係数および篩分け係数を求めて検討した。⁸⁾

$$\text{均等比 } M = \frac{\sum_{p=50}^{p=100} d_{\Delta p}}{\sum_{p=0}^{p=50} d_{\Delta p}}$$

$$\text{均等係数 } U.C. = d_{60} / d_{10}, \text{ 篩分け係数 } S = \sqrt{d_{75} / d_{25}}$$

図-7に、秋期1カ月間の流量、SS等の変化に対する各係数の変化を示した。秋期は、3回の降雨流出があり、流量の最大値は約600 m^3/sec であったが、夏期に比べ変動が少なく安定した時期であった。各係数は、SSの粒径分布を推定する上でそれぞれに重要な係数であるが、図-7によるとはば流量の増減に対応して変動している。秋期については、Mは3～6、U.C.は1～4、Sは1～2程度であり、粒径分布としては全体として均等であると言えよう。これら3つの係数の中で、流量やSSとの相関が一番大きかったのは均等比Mであった。これは、Mの定義より流量増大と共に大きな粒子の占める割合が増加するためと思われる、秋期よりも夏期の方がより明瞭な傾向が認められた。

そこで、均等比Mについて流量との関係を示したのが図-8であり、同じくSSとの関係を示したのが図-9である。図-8から、流量が増えると均等比Mも増加する傾向が見られる。この傾向は季節によらないが夏期よりも秋期の方が全体として1前係均等化が大きいことがわかる。これは後にも触れるが、夏期と秋期との流量範囲の違いや、流域の状態の変化によるSSの成分の違いによるものと考えられる。

同様に、図-9から、均等比Mは流量に対するよりもSSの方がより強い相関を持っていることがわかる。

図-8および9から、最小二乗法により求められた回帰直線は、季節毎にそれぞれ次の通りである。

夏期 $M = 1.05 Q^{0.221} (r = 0.732)$

$M = 2.14 SS^{0.169} (r = 0.804)$

秋期 $M = 1.05 Q^{0.221} (r = 0.732)$

$M = 2.14 SS^{0.169} (r = 0.804)$

図-7 秋期の流量、SSと均等比

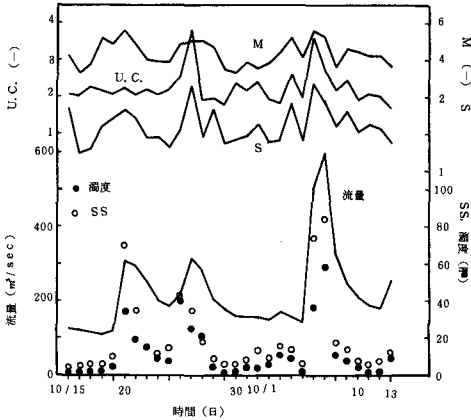


図-8 均等比と流量との関係

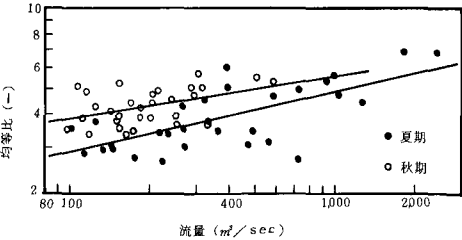
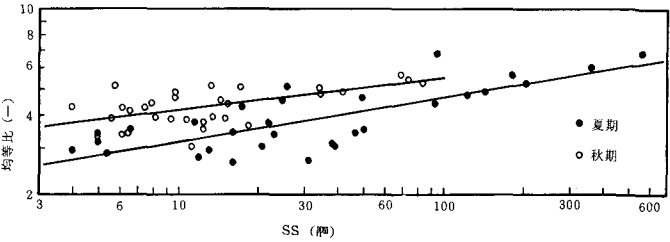


図-9 均等比とSSとの関係



秋期 $M = 1.83 Q^{0.161} \quad (r = 0.457)$

$M = 3.19 SS^{0.117} \quad (r = 0.652)$

これから、流量が増加すると共にSSが増し、この時大きな粒子の占める割合もSSに比例して大きくなることや、夏期と秋期では、同じSS濃度でも粒径の構成がやや異なり、本調査では秋期の方が大きな粒子の占める割合が比較的大きい傾向があった。

3-3 有機成分率と比重

SSには、粘土やシルト、有機物や生物など様々な物質が含まれていると思われ、流量変動と共にその成分も変化していると考えられる。そこで、SS中に有機成分がどの程度含まれているかおよびそれが流量やSSの変動と共にどのように変化するかを調べた。SS中の有機成分を直接求めるには量が少ないので、海老瀬(9)が求めたように $P-COD/SS \times 100$ (%)を計算し、これを有機成分率 r としてこの変化を調べた。図-10に、夏期1カ月間の流量、SSの変動に伴う有機成分率 r と比重 ρ の変化を示した。これによると、夏期については r は1.9~6.0%の間で変化し、一般に流量が増えると小さくなり、流量が減少すると次第に大きくなる傾向が見られる。同様に、秋期についても、 r は2.0~6.8%の間で変化し、夏期よりも変動が大きかつやや高い値を示した。これは、流量が増すと粒径の大きい無機物が増して相対的に有機物が少なくなることや、前述した流域特性の変化によりSSの内容が変化し、秋期の方が有機物が増すためと考えられる。他の時期についても同様の傾向が認められるが、雄物川については r の値はほぼ数%~十数パーセント程度であり、海老瀬等が報告している中小河川の値と比べてかなり小さく、雄物川の低汚濁河川としての性質が伺われる。(10)

また、流量ピーク時の r は、これまでの調査から一般的に小さくなる傾向が見られるが、ピーク時と同時にあるいは1日程度のずれで r もピークを示す例も認められた。これは、洪水時や融雪時に見られたが、河床の付着生物や滞積していた有機物等がSSとして流出したために r も大きくなったものと思われ、降雨流出毎にSS中の有機成分にも変化があり、滞積した物質がどのような時に流出してくるかを知ること重要なることを示している。

次にSSの比重であるが、図-10に夏期のデータを示した。これによると、比重は、SSの量が少なくて

図-10 夏期の比重と有機成分率

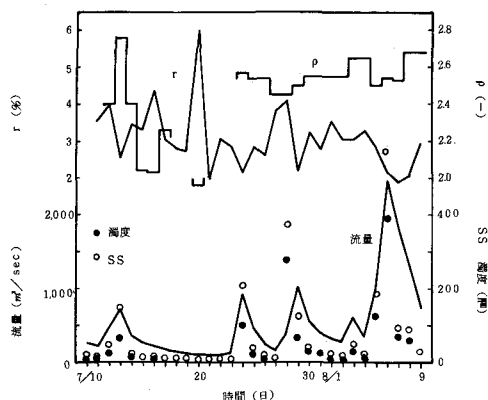


図-11 有機成分率と比重との関係

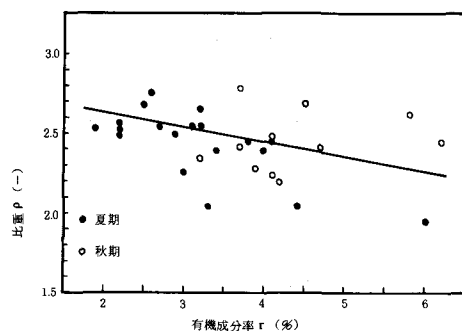


表-1 比重によるSSの分類

	(I)2.61以上	(II)2.41~2.60	(III)2.21~2.40	(IV)2.20以下
比 重	2.70	2.50	2.32	2.06
流量(m^3/sec)	541	530	319	185
SS (脚)	42.0	87.2	37.5	9.7
r (%)	3.72	3.36	3.60	4.48
d_{min} (μm)	1.7	1.4	1.7	1.4
d_5 (″)	2.6	2.7	2.8	2.7
d_{50} (″)	6.2	5.8	5.9	5.9
d_m (″)	11.4	11.9	10.8	9.4
d_{p5} (″)	35.0	40.0	34.0	29.0
d_{max} (″)	262	299	258	124
M	4.42	4.82	4.09	3.47
U. C.	2.43	2.16	2.12	2.06
S	1.74	1.71	1.60	1.49

測定できなかった時もあるが、約2.0~2.7程度の値を示し、この中で2.4~2.6が一番多かった。比重は、流量が増すと大きくなる場合も、逆に小さくなる場合もあり、流量との明瞭な関係は認められない。有機成分率 r と比重との関係は、あまり明瞭ではないが、 r が大きくなると ρ は小さくなる一般的傾向は認められる。特に7月20日には、流量が減少して最小流量に近い日が数日続いていたが、 r が6%まで急増してこの時の ρ は最小の約2であった。観察によると、この日のSSには付着生物がかなり混じっており、これが r を高め、 ρ を小さくした原因と思われた。このように、SSの比重も、有機成分の含有量によっても変化しており流出機構の解明に取って重要である。

図-11には、夏期と秋期の2カ月間に求められたSSの比重と有機成分率の関係を示した。これによると、かなりのバラツキはあるが、 r が増すと ρ は小さくなるという一般的傾向が認められる。が、この傾向は、秋期よりも夏期の方が明瞭であり、秋期はかなりバラツキが大きい。全体としてみると、下記に示す回帰直線が得られ、これによると、 r が2%から6%に増加すると ρ は2.55から2.28に約10%減少することになる。

$$\rho = 2.68 - 0.0661 r$$

次に、SSと比重、粒径、有機成分率や流量が互いどのような関係にあるかについて検討した。表-1には、2カ月間のデータを比重を基にして、4つに分類し、それぞれ流量、SS、 d_5 、 d_{50} 、 d_{95} 、 d_m 、最小および最大粒径、 r 、 M 、 $U.C.$ 、 S 等の数値を平均してまとめて示した。比重の大きい方から順に、各グループをそれぞれI、II、III、IVとすると、一般に比重が大きくなるにつれて流量、 $U.C.$ や S は大きくなるが、これ以外の項目は全て比重が最大のIと次に大きいIIグループとで傾向が逆転していることが表-1からわかる。即ちIとIIでは、Iの方が粒径は小さく r は大きくかつ流量はやや大きいという結果である。また、 d_{50} 以下の粒子については、比重による違いは認められなかった。これらの傾向は、まだデータ数が不十分ではあるが、降雨流出時のSSの挙動を知る上で重要と思われ、更にデータを集めて検討したい。

図-12には、均等比と r との関係を示した。粒径分布から見て均等化が大きくなると、有機成分率 r は小さくなる傾向が一粒的に見られ、有機成分がどちらかと言うと小粒径の粒子中に多いことがわかる。また、夏期と秋期の M はそれぞれ4.02と4.36であり、 r はそれぞれ3.07と4.33であり、秋期は夏期に比べて M がそれ程大きくない割に r は約40%も大きく、SSの内容がかなり異なっていることもわかる。

図-12 均等比と有機成分率

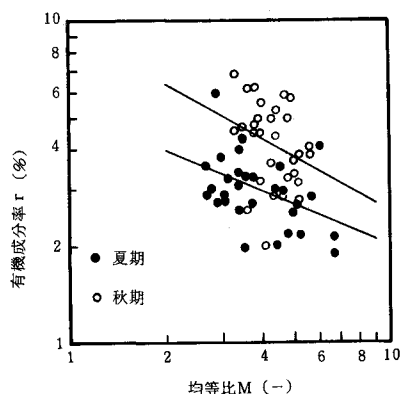
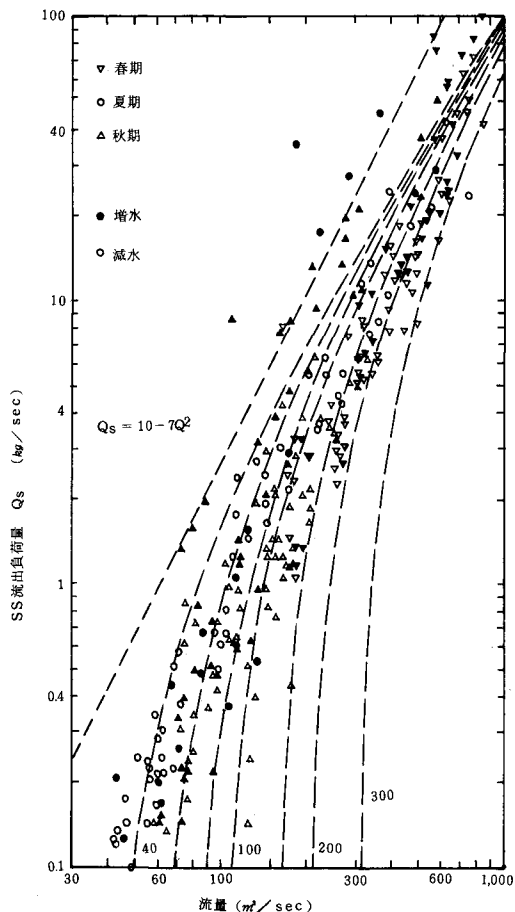


図-13 SS流出負荷量と流量との関係



以上、流量が変動する時のSSは、流量のピーク前後に大きく変化し、特に粒径分布、有機成分率、比重等がその時の流量変化に応じて複雑に変動していることがわかる。

4. SSの流出機構について

SSの流出機構については、これまでも様々な河川について研究されているが、河川の水文学的な違いや汚濁流出源の違い等により河川毎に様々な特徴を持っており、それだけに未知の点も多い。また、SSとは言っても定義があまり明確ではなく、河川によりその内容はかなり異なっていることも考えられる。従って現在の所は、個々の河川毎に経験式により評価するのが一般的な方法である。

本稿でもその域は出ないが、一つの試みとして、Wash loadについて求められた村本による式を当てはめて検討を行なってみた。この曲線は、流量によりSS流出曲線の勾配が変化することを表わしており

$$Q_s = K \cdot Q^n (1 - Q'/Q)^m$$

で表わされる。図-13に、これまでに求められた全データを、季節別および増水、減水期別に区別して示した。また同図には、 Q' を40、60、80、100、150、200および300 m^3/sec と変えた時の(1)式の曲線と、Wash loadについての全国平均の式 $Q_s = 10^{-7} Q^2$ も示してある。

これによると、SS流出負荷量 Q_s は、 $10^{-7} Q^2$ よりもかなり小さいが全体としてみると Q^2 に比例して増減しているように認められる。が、季節毎に個々の流出を見ると、必ずしも Q^2 ではなく、流出によって勾配が変化しているように思われ、(1)式の曲線へも比較的良く合致して変動する場合も見られる。

このようなSSの流出に、前述した粒径分布、有機成分率および比重等の変化がどのように影響してくるのかについて評価することは、現在の所困難であるが、以上のような方法を手がかりに、調査例を増やして検討していくつもりである。

5 結言

河川の流量変化時に、SSの濃度や粒径、有機成分率、比重等がどのように変化し、互いにどのような関係があるのかについて、夏期と秋期の2カ月の調査を行なった。その結果、次のことがわかった。

- (1) SSの粒径は、数 μm ～数百 μm の範囲にあり、10 μm 以下の微細な粒子が全体の70～80%を占め、粒径分布から見るとそのほとんどがシルトである。
- (2) 流量が増すと粒径は大きくなるが、時に大きな粒径の粒子の増加する割合が大きい。
- (3) 粒径分布を表わすには均等比が良く、SSの濃度と良い相関がある。
- (4) SSの有機成分率は、数%～十数%の範囲で変化した。一般に流量が増すと小さくなり、減じると大きくなるが、流出によっては、流量ピーク時に r もピークを示すこともある。
- (5) SSの比重は、ほぼ2.4～2.6程度と思われる。比重は、有機成分率に関係し、 r が増加すると比重は小さくなり、また r は、均等比にも関係がある。

謝辞

本研究に関して終始適切な御指導と御助言を頂いた東北大学教授松本順一郎先生に対し、深甚なる謝意を表します。また、調査に御協力頂いた佐藤信博（現、秋田市役所）、藤田重晴（現、大都工業）の両君に感謝致します。

参考文献

- (1) 建設省土木研究所、土木研究所資料第612号、昭和45年8月、(2) 海老瀬他、水質汚濁研究、第2巻第1号pp 33～44、1979、(3) 山口、1978年度水工学に関する夏期研修会講義集Aコース、1978
- (4) 浅野他、第24回水理講演会論文集、pp 173～178、1980、(5) 村本他、京大防災研究所年報第6号B、pp 433～447、1973 (6) 村本他、京大防災研究所年報、第18号B、PP 541～549、1975 (7) 村本他、京大防災研究所年報、第20号B-2、pp 233～241、1977 (8) 石原、応用水理学I、中I、pp 10～11
- (9) 海老瀬他、第7回環境問題シンポジウム講演論文集pp 124～131、1979 (10) 羽田、第16回自然災害科学総合シンポジウム講演論文集、pp 205～208、1979。