

小河川における豪雨による浮遊物質流出量の定量化

Estimation of Runoff Suspended Solid under Heavy Rain Events in Streams.

国立公害研究所 水質土壌環境部 正員 ○ 海老瀬 潜 一

村岡 浩爾

大坪 国順

1. 緒言

浮遊砂や wash load の生産や輸送については従来から多くの研究がなされているが、現地観測による解析では、ダムの堆砂量のように大きな粒径のものを主対象とした結果としての static な定量化や、いくつかの高水期間の数時点の観測値に基づく解析が多く、高水期間の全流出過程を通しての dynamic な検討例は少ない。また、人工地表面への人工降雨による流出や侵食の大型模型実験や、降雨試験地での流出観測は行なわれているものの、種々の地質、植生、傾斜など流域特性の諸要素が複雑にからんでいる実際の河川上流部における降雨時流出物質の観測例は多くない。^{1)~6)} とくに、浮遊物質の生産と輸送の間をつなぐ山地小河川での1洪水期間を通じての連続観測から、浮遊物質の流出過程における変化の追跡と総流出量の算定を行なった研究は少ない。著者らは、山地河川や市街地河川を含む多くの小河川流域において、降雨時流出負荷量観測を実施しており、この観測の中には多くの豪雨流出を扱っている。^{6)~9)}

降雨強度と降雨量がともに大きな豪雨による流出の場合、河川上流部では、降雨によって新しく流路に供給される浮遊物質のウェイトが高く、先行降雨の流出直後から流路や地表面上の貯留・堆積物質が主として流出する降雨流出の初期の段階、すなわち、first flush による初期流出負荷量は、直接流出全体を通しての総流出負荷量への寄与が小さく、先行降雨および先行晴天期間内の地表面状態の違いを無視できることが多い。つまり、豪雨流出の場合には、降雨流出の初期条件が直接流出全体にあまり大きな影響を及ぼさないと考えられる。また、小河川流域では、流域特性に差違の見られる多くの支流による時間遅れの流達時間で流出が構成されることの大河川流域とは異なり、流域内での降雨分布の一樣さや、降雨に対する流出応答の鋭敏さによって、降雨時流出負荷量変化の現象を比較的単純な形で捉え易い。

したがって、浮遊物質の降雨時流出負荷量の定量化を、豪雨時の流出変化に焦点を絞り、降雨により流域地表面上から流路内に新しく浮遊物質の供給がある場合と考えて以下のような観測例をもとに検討する。まず、同一河川における数回の観測、同一降雨における流下方向3地点の数回の観測、同一降雨についての流域特性の異なる近接河川での数回の観測を、琵琶湖および霞ヶ浦に流入する小河川で行なった結果である。

2. 降雨による流出特性の相違

1 降雨による表面流出と早い中間流出から構成される直接流出を対象とした小河川における観測では、その流出過程全体を通じた流量と浮遊物質負荷量の変化のうち、降雨流出の初期の段階から流量の最大ピークまでの流出前半の変化の過程が各降雨ごとに大きく異なることが注目されるほか、流出後半の流量で減少状態での変化には降雨による差違が小さいのが通常の傾向である。降雨が短時間に集中し、流達時間の時間遅れの影響が小さく、流量変化が大きな1つのピークを呈するような場合には、流量と浮遊物質濃度、したがって、浮遊物質負荷量が同時点に最大ピークを有することになる。しかし、

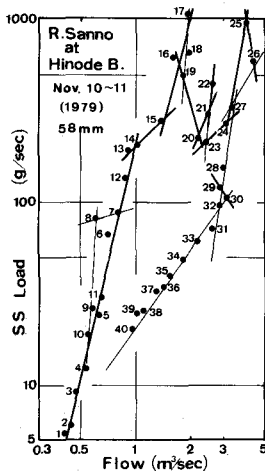


Fig. 1 流量と負荷量の関係

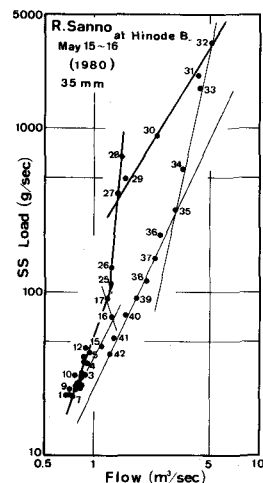


Fig. 2 流量と負荷量の関係

降雨がいくつか山のある波状パターンとなった場合、流量もそれに対応していくつかのピークを有し、その最大ピークも他のピークよりわずかに大きい程度の流出過程では、必ずしも流量の最大ピークと浮遊物質濃度の最大ピークの時点は一致せず、浮遊物質負荷量の最大ピークはFig.1のように流量の最大ピークの時点より前に出現することが多い。また、Fig.3は30分強の間に降雨量9mmの雷雨があった観測例で、約8km隔ててほぼ平行に流下して琵琶湖西岸に流入する2河川での同時観測では、明らかに流量の最大ピーク後に浮遊物質負荷量が最大ピークになっている。

これらの現象は、降雨前の流路内での浮遊物質の貯留・堆積状態の違いや、先行降雨やその後の先行晴天期間の流域地表面の状態の違いなど初期条件のほか、新しく降雨によって流路にもたらされる浮遊物質の供給速度と流路内での輸送速度の関係が、降雨ごと、あるいは、降雨パターンごとに異なるために出現すると考えられる。したがって、1降雨による直接流出の流出過程全体の変化について、浮遊物質負荷量 L が、流量 Q によって $L = a \cdot Q^n$ という関係形でまとめて表現できるほど単純な例はほとんどない。すなわち、いくつかの $L = a_i \cdot Q^{n_i}$ 式で表わされる形となっている。Fig.3 流量と負荷量の関係

それゆえ、 $L = a \cdot Q^n$ 式のみでは、精度の高い1降雨による総流出負荷量の定量化は難しい。

これは、Fig.1~3の例からもわかるように、流量 Q の Δt 時間後の変化量 ΔQ と、浮遊物質負荷量 L の Δt 時間後の変化量 ΔL について、 $L = a \cdot Q^n$ 式の微分形 $(\Delta L/L)/(\Delta Q/Q)$ が常に n に等しいとは置けない事実からも明らかとなる。

$L = a \cdot Q^n$ 式の直接流出の流出過程全体への強引な適用では、 n はほぼ1.5から5までの範囲に入り、 a は流域面積や土地利用状態によって異なるが、同一河川でも降雨によって3オーダー近く変化する。

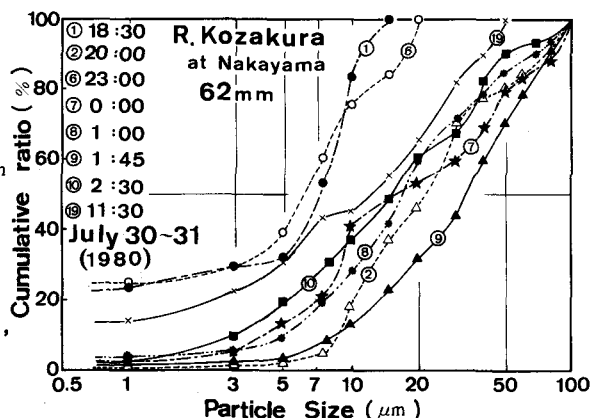
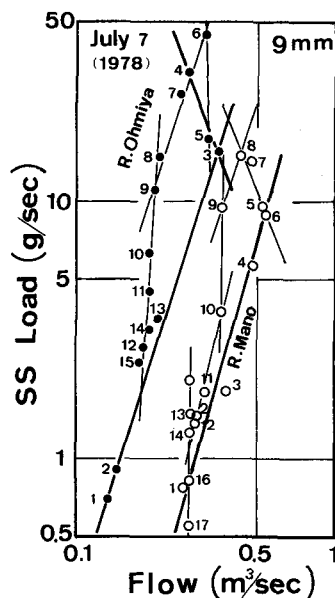


Fig.4 降雨流出過程における浮遊物質の粒径変化

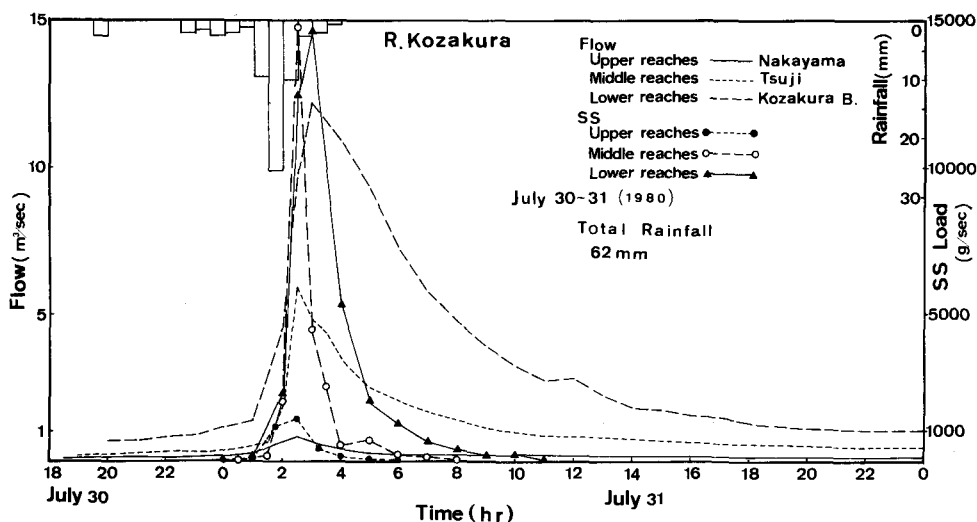


Fig.5 豪雨流出時の流量と浮遊物質負荷量の経時変化

3. 同一河川の流下方向における流出変化

小河川は流域面積が小さいため、流下方向での流域特性の変化が降雨流出の流出物質の変化に大きく反映される。これは、霞ヶ浦（西浦）への流入河川である山王川と恋瀬川の1支流の小桜川における同一降雨の流下方向に3地点の観測でも明らかになった。山王川は、最下流の観測点（日の出橋）での流域面積が 12.4km^2 と小さく、中流部で石岡市の市街地を貫流するためその前後での流量変化や流出物質質量変化が大きく異なることは論を待たない。しかし、筑波山の東麓を上流とし、中流部の水田・畑地の中を貫流する小桜川は、最下流の観測地点での流域面積が 17.6km^2 であるが、上流および中流部の山地と畑地からの浮遊物質の供給が大きく、上流部の流量変化および浮遊物質負荷量変化パターンが最下流部まで伝播した形となり、上流部の影響が強く反映される。

Fig.4,5および7は、時間最大降雨量が 40.5mm という極端な豪雨の場合の上流部の中山（ 2.4km^2 ）、中流部の辻（ 8.0km^2 ）および下流部の小桜橋（ 17.6km^2 ）の3地点での観測例である。初めの20分間に 2.5mm の先ぶれがあったが、上流部のほかには影響がほとんど現われなかった。Fig.7の両対数紙上の流量と浮遊物質負荷量の関係は、上流から下流までよく似た変化パターンとなっている。しかし、降雨の集中した時期に対応した流量の上昇期の上流部の勾配（ n ）は、およそ3であり、ほぼ2の中・下流部の勾配を上回っており、上流部の山地が浮遊物質の流路への供給に大きく寄与することがわかる。Fig.6は、時間最大降雨強度 13mm とさほど強くない雨であるため、first flush時の勾配は高いけれども、流量、浮遊物質負荷量ともFig.7の場合とは1オーダー小さい流出となったが、中・下流部での流出変化の傾向は同じパターンを呈している。

Fig.4は、上流部の中山において採水した流水中の 0.1mm 以下の粒径の浮遊物質について、その粒径構成の流出過程における変化を示したものである。先ぶれの降雨によって、降雨流出の影響のない時点①の90%が 10μ 以下の粒径から、②の時点の90%が 10μ 以上と大きく変化して、⑥の時点で降雨流出前の状態にほぼ復帰した。その後豪雨によって⑨の時点で粒径構成が最も大粒径側へ傾いたが、流量の最大ピークの⑩の時点では、⑨の時点よりさらに小粒径の構成となっている。筑波山麓は黒ボク土を中心とした土壌構成になっており、中山地点までは平均傾斜度が14%である。 0.1mm 以下の粒子は、腐植を含む表層土の流出によるため、有機物質も多量に含有している。とくに、first flushにおける浮遊物質には、流路内の生物を含む有機性の貯留・堆積物質の流出の寄与も大きい。

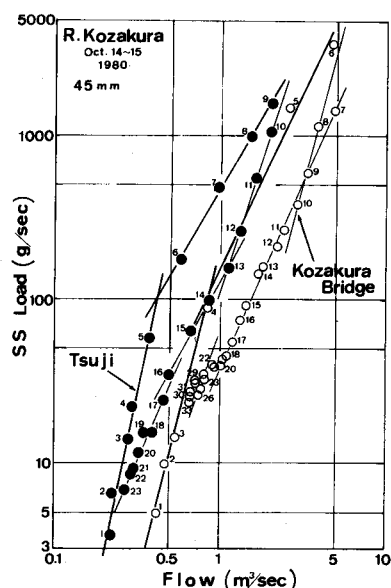


Fig. 6 流量と負荷量の関係

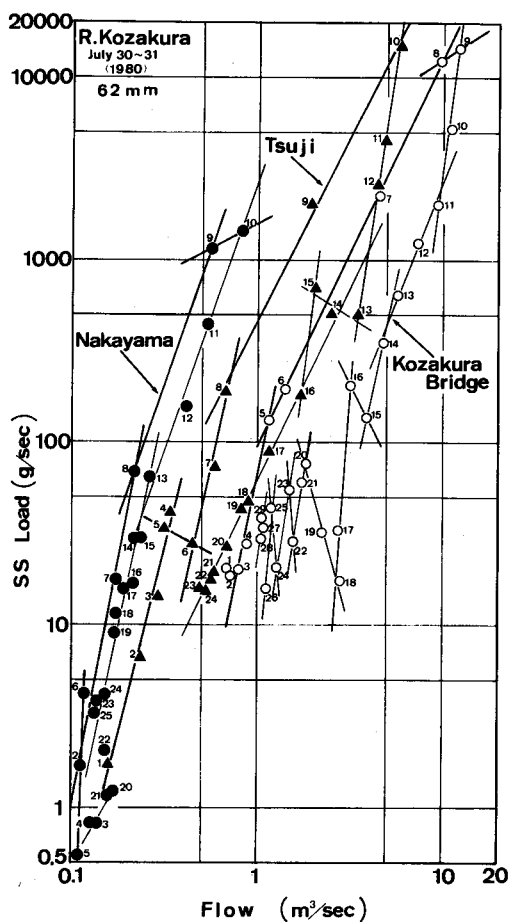


Fig. 7 流量と負荷量の関係

4. 同一降雨の2河川での流出変化

互いに近接し、流域特性の異なる2河川での同一の降雨流出による流出負荷量変化の比較から、流域特性の流出負荷量に及ぼす影響を検討することができる。Fig.8と9はおよそ8Km隔てて、ほぼ平行に琵琶湖西岸に流入する2河川、真野川(16.6Km²)と大宮川(6.3Km²)において時間最大降雨強度29mm、総降雨量65mmの降雨が実質4時間に集中した台風による豪雨の観測例である。

流域面積が大きく、河床勾配も大きくなく、上流部が山地、中・下流部が水田の真野川では、流量ピークが1つの単調な流量増加を示しているのに対して、上流部が山地、下流部に市街化された門前町を有し、河床勾配の大きな大宮川では、流量の最大ピークの時点までに小さな2つの流量ピークが存在する。したがって、Fig.8の両対数紙上の流量と浮遊物質負荷量の変化では、大宮川では下流都市街地によるfirst flushが見られ、集中的な強雨に対する流出も市街地部と山地部の2段に分かれた応答を示しているほか、流量の最大ピーク直前には、最も大きな勾配(n)が出現し、first flushで大きな勾配の見られた真野川のnを上回る値を示している。すなわち、first flushでは、真野川のn値が大宮川を上回るが、降雨強度のピークに対する流出応答では、流域の平均傾斜度の大きな大宮川が流出初期のn値を上回るのに対して、流域の平均傾斜度があまり大きくない真野川のn値は減少のみとなる。

この両河川は、その13日前に総降雨量が77mmの豪雨があり、この豪雨の真野川での観測結果を示したのがFig.

10である。この豪雨は、最初の6時間に29mm、時間において、4時間に38mm、少し間において1時間に10mmと3回に分けて降雨が集中した。1回目と2回目の集中的強雨に対する流出応答では、両対数紙上の流量と浮遊物質負荷量の関係が、ほぼ同じ勾配の上昇直線を描いている。しかし、このn値はほぼ3であるのに対して、Fig.8の真野川のfirst flushのn値はおよそ4と大きな差違がある。ちなみに、Fig.3の両河川とも初期のnは3.5前後となる。

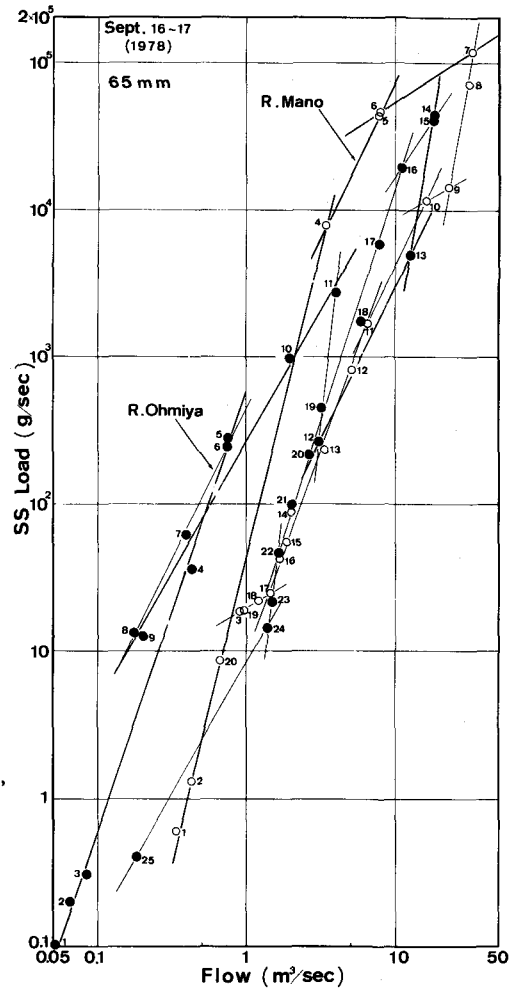


Fig.8 流量と負荷量の関係

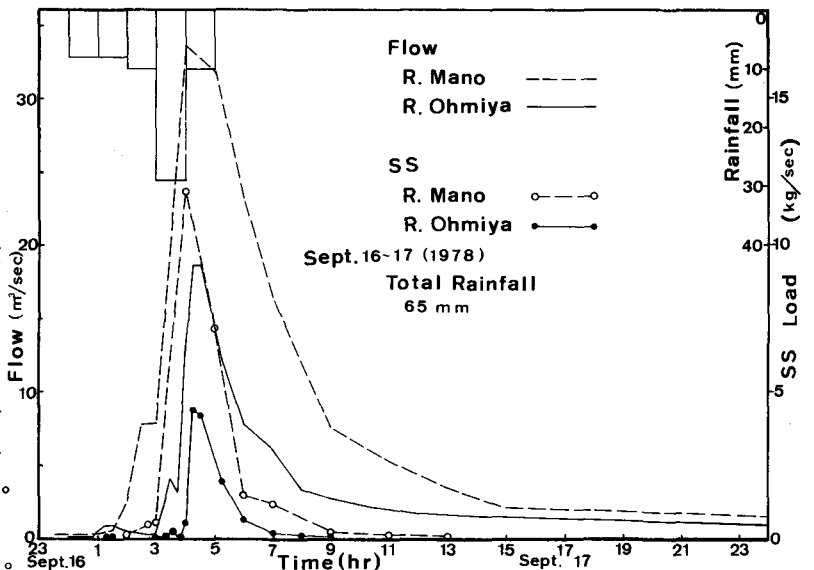


Fig.9 豪雨流出時の流量と浮遊物質負荷量の変化

5. 市街地部の流出への影響

山王川中流部の石岡市街地（2.1 Km²）の直前・直後の2地点での同一降雨の流出比較（Fig.11と12）から、市街地部の流速時間の速さと流出率の高さによる流出パターンの著しい変化のほか、市街地部の最下流（12.4 Km²）の総流出流量と負荷量に占めるウェイトの大きさがFig.1と13と併せればよくわかる。

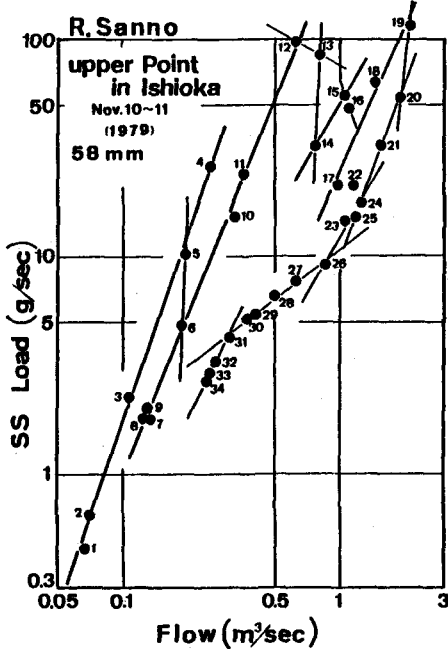


Fig.11 流量と負荷量の関係（市街地上流）

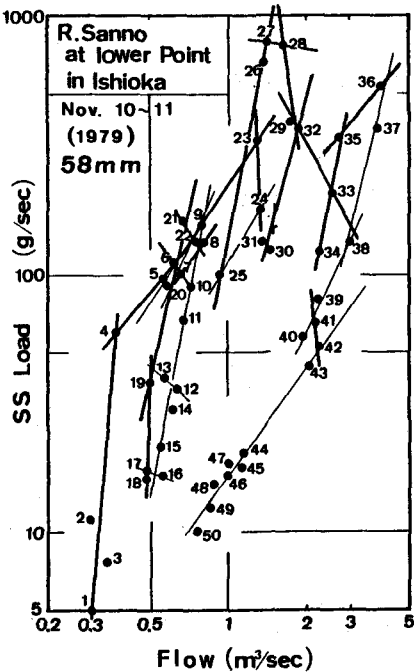


Fig. 12 流量と負荷量の関係（市街地下流）

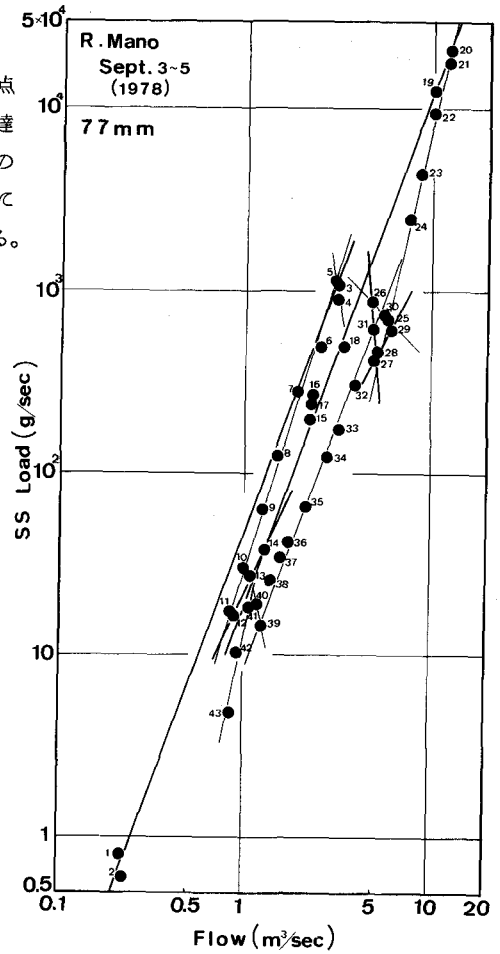


Fig.10 流量と負荷量の関係

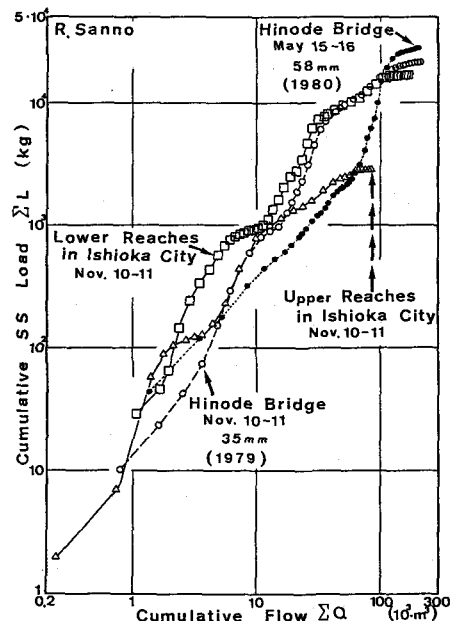


Fig.13 累加流量と累加負荷量の関係

6. 累加負荷量の変化

1 降雨の直接流出による総流出負荷量の算定には、累加流量と累加負荷量との関係の検討を欠かすことはできない。この両者の関係を両対数紙上にプロットすれば、浮遊物質の直接流出による総流出負荷量は、Fig.14 のように、直接流出の終期段階の累加流量の微増状態に対する累加負荷量の頭打ち現象から押えることが可能となる。すなわち、浮遊物質の総流出負荷量の定量化は、流出後半の流量変化の tailing 状態下での累加負荷量の上限值への漸近現象として、明瞭に把握えられるため、より高い精度での予測も可能と考えられる。

また、累加流量に対する累加負荷量の両対数紙上の経時変化から、first flushをはじめ、個々の流量ピークに対する流出負荷量ピークが、別個の降雨に分けられるような中間段階での一時的な上限値への漸近現象として見られる場合が多い。この事実は、浮遊物質の流路への供給や流路中の輸送・堆積を考え併せると、浮遊物質の降雨流出の初期条件を、先行降雨の直接流出直後の流路や流域地表面上における浮遊物質の貯留・堆積状態にとり、その後の先行晴天期間内での変化を加えた形とする2段階の取り扱いを必要とする。

とくに、first flushによる流出負荷量が直接流出による総流出負荷量中に占めるウェイト、すなわち、降雨流出の初期条件の重要さの程度が明らかとなり、同一河川の降雨ごとの比較、同一降雨の異なる観測地点での比較、同一降雨の2河川での比較から、降雨パターンによる差違と、流域面積による差違の大きさがより明確なものとなった。

7. 有効雨量による流出負荷量の定量化

1 降雨の直接流出による総流出流量と総流出負荷量は、流域の地形・地質・土地利用状態などを反映した結果となるから、山地河川、田園地河川、市街地河川のような性格による比較もできる。それには、比流量や比流出負荷量のように、流域面積A当りの量とし、流域規模の違いの影響を少くした上で、河川相互の比較検討を行なう必要がある。

直接流出による浮遊物質の総流出負荷量 ΣL は、累加流量と累加負荷量の関係から簡単に上限値と決定できるが、総流出流量 ΣQ は、流出負荷量が降雨流出の影響を受け始めてから、降雨流出前の負荷量レベルに復帰した時点までの累加流量とする。この1降雨の直接流出分の流域面積当りの流量 $\Sigma Q/A$ は、有効雨量であり、重要な水文量となる。

Fig.16 は、1降雨による有効雨量と比流出負荷量の間を琵琶湖および霞ヶ浦に流入する6河川について、各観測地点ごとに両対数紙上にプロットしたものである。図より、直接流出の流出率の高い琵琶湖流入河川の有効雨量の大きさが

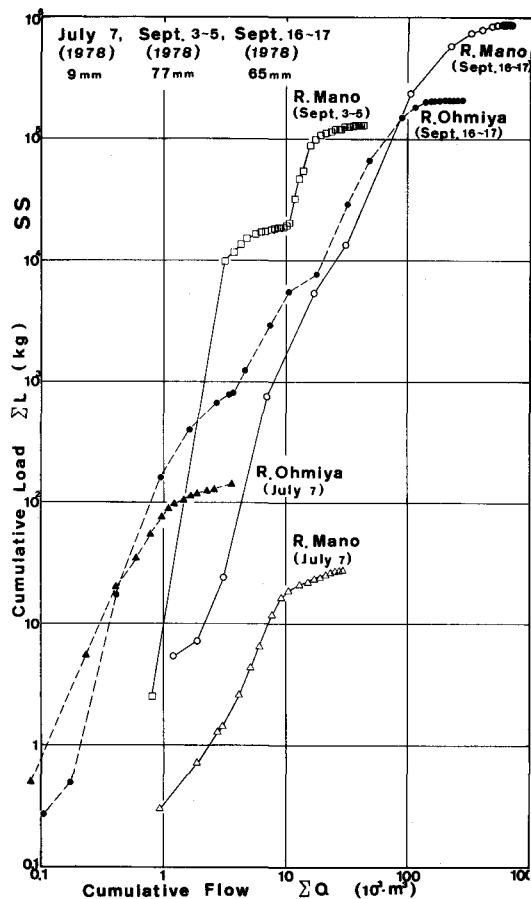


Fig.14 累加流量と累加負荷量の関係

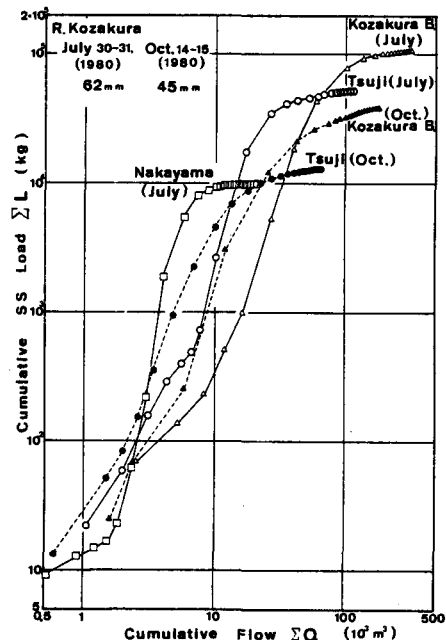


Fig.15 累加流量と累加負荷量の関係

目立つほか、市街地河川の山王川と相模川が有効雨量に対して高い比流出負荷量となっているのが注目される。この6河川の観測値が、破線内のかなり限られた範囲内に分布し、 $\Sigma L/A$ は、 $\Sigma Q/A$ の1.9乗に比例した回帰式となる。すなわち、 $L(Kg), A(Km^2), Q(10^3 \cdot m^3)$ とすれば、 $\Sigma L/A = 15 \cdot (\Sigma Q/A)^{1.9}$ 、($r = 0.88$)である。

したがって、1降雨の直接流出による総流出流量の正確な推定が可能ならば、浮遊物質の総流出負荷量のラフな予測が可能となる。

8. 有効降雨強度による比流出負荷量の定量化

有効雨量による浮遊物質の総流出負荷量の関係では、総降雨量の大きさは反映されていても、流域地表面から流路への供給量を左右する降雨継続時間あるいは降雨強度、すなわち、降雨パターンの差違が十分表現されていない。したがって、有効雨量を降雨のあった実質の降雨継続時間 T で除し、これを有効降雨強度 $\Sigma Q/A \cdot T$ とし、比流出負荷量 $\Sigma L/A$ との関係を両対数紙上にプロットしたがFig.17である。この関係はFig.16の有効雨量よりさらに精度を上げるために降雨強度に変えた形となり、観測値はより幅の狭い範囲に分布し、直接流出による浮遊物質の総流出負荷量 $\Sigma L/A$ は $\Sigma Q/A \cdot T$ の1.7乗に比例した回帰式となる。 $T(hr)$ とすれば、 $\Sigma L/A = 1100 \cdot (\Sigma Q/A \cdot T)^{1.7}$ ($r = 0.90$)

この有効降雨強度は、流量には有効雨量の地表面での土壌浸透能、浮遊物質の流出負荷量には降雨による表土の侵食との関係をつなぐ、重要な水文量として意味を有すると考えられる。

9. 結 言

琵琶湖および霞ヶ浦に流入する小河川における降雨流出の浮遊物質負荷量観測結果をもとに、流出過程全体を通してみると、いくつかの $L = a \cdot Q^n$ 式の合成で表現されるべき現象であり、 n は降雨によっても大きく異なる。流出負荷量に及ぼすfirst flushのウェイトの大きさから、先行降雨の直接流出直後に始まる流路や地表面上の貯留・堆積物量の初期条件の重要性を指摘した。さらに、その初期条件の影響の小さい豪雨流出における浮遊物質の総流出負荷量が、有効雨量より、実質的な降雨継続時間で除した。有効降雨強度で、より精度よく推定できることを明らかにした。

参 考 文 献

- 1) 水山高久(1980): 山地河川の浮遊砂観測, 土木技術資料, Vol. 22, No.5, pp.46~51
- 2) 吉川秀夫(1952): 浮遊流砂量に関する二、三の考察, 土木研究報告, 第83号の2, pp.25~35
- 3) 村本 他(1975): ウォッシュ・ロードに関する研究, 京大防災研究所年報, 第18号B, pp.541~549
- 4) 須賀亮三(1970): 浮遊流砂に関する雑考(その2): 土木学会第25回年次学術講演会, II, 243~246
- 5) 金屋敷他(1980): 山地流域における濁度物質の生産・流出流出モデルに関する研究, 第24回水理講演会
- 6) 海老瀬・村岡・大坪(1979): 小河川における総流出負荷量の観測と評価, 第24回水理講演会論文集
- 7) 海老瀬・村岡・相崎・大坪(1980): 中小河川における期間総流出負荷量の変化と評価, 環境問題シンポ
- 8) 海老瀬他(1979): 市街地河川における降雨時流出負荷量の変化特性, 水質汚濁研究, Vol. 2, No.1
- 9) 海老瀬他(1979): タンクモデルを用いた降雨流出時流出負荷量解析, 用水と廃水, Vol. 21, No.12
- 10) 海老瀬潜一(1980): 小河川の降雨時流出負荷量の算定と評価, 環境技術, Vol. 9, No.4, pp.5~13

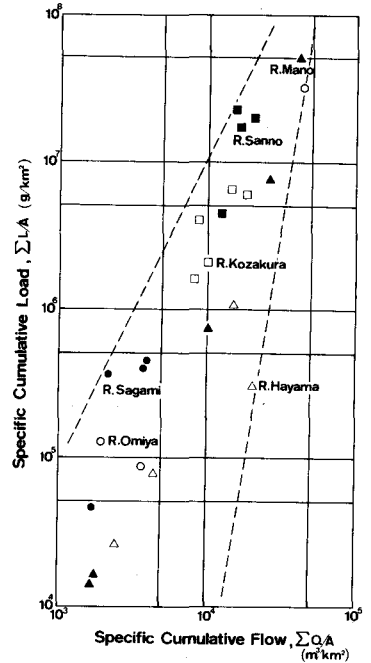


Fig. 16 比流出負荷量と有効雨量

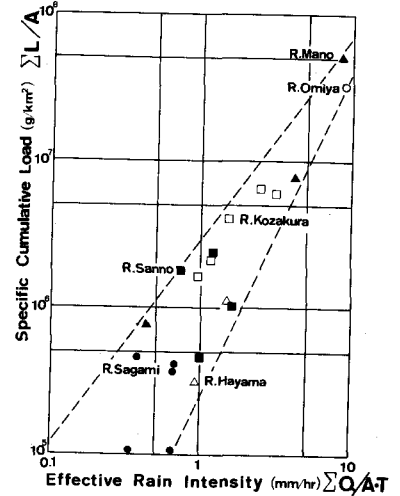


Fig. 17 比流出負荷量と有効降雨強度