

学位論文題名

The Mechanisms on a Suspended - Sediment Supply to Rivers

(河川懸濁物の産出機構)

学位論文内容の要旨

従来、河川の懸濁物流量は、河川流量との間に様々なヒステリシスを示すことが知られている。一般には、懸濁物流量の極大値は、物質を運搬するエネルギーが最大である河川流量最大時に出現するようと思われるが、実際には懸濁物流量極大時が河川流量極大時より先行したり、あるいは遅れたりすることが多い。本研究では、懸濁物流量の極大値が河川流量の極大時より先行するものを「先行型」、ほぼ同時に出現するものを「同時型」、遅れるものを「遅れ型」と呼ぶ。従来の研究では、懸濁物流量変化を説明するために数多くの統計的経験則に基づくモデルが考案された。また近年、“sediment availability”の概念が提唱されたが、これはあくまでも概念的なものであり、物理的な懸濁物流出機構を検討したものではない。本研究では、特に懸濁物の粒径組成と鉱物組成に着目し、その供給起源を明らかにするとともに、河川への懸濁物産出の物理的機構について検討する。

調査流域は、札幌市近郊の盤渓川流域（流域面積1.1 km²）および冷水沢流域（流域面積0.9 km²）である。盤渓川流域は人工改変を受けていないが、冷水沢流域には調査期間中に未舗装の林道が開通した。盤渓川の河床表面のほとんどは礫に覆われるアーマーコート状態である。冷水沢の河床表面は、アーマーコート状態の部分と砂質の堆積物に覆われた部分とが交互に存在する。

先行型の懸濁物流量変化は、盤渓川において、融雪期初期の1982年4月6日から7日に観測した。両日とも懸濁物濃度のピークは流量のピークより数時間先行して出現した。また、懸濁物の粒径組成は、河床堆積物中の細粒物質の粒径組成と一致した。これは、河床堆積物中の細粒物質が河川水中に巻き上げられて懸濁物になったことを示している。ところが、河床堆積物中の細粒物質は、アーマーコート状態の礫に被覆されたている。そこで、河床堆積物中からの細粒物質巻き上げ機構を説明するため、次のような「巻き上げモデル」を考えた。1. 河川流量が増大すると、河床表面の一部を転動させる掃流力が河床に

加わる。2. すると、河床表面の礫の一部が転動し、礫と礫の間に間隙が生じる。3. この間隙から、細粒物質が巻き上げられる。4. 更に大きな掃流力が河床表面に加わると、新たに1~3のプロセスが生じるとともに、既に生じていた間隙からも新たな巻き上げが発生する。ここで、河床の礫の底部から頂部に向かう圧力差 Δp により粒子に揚力が加わり、揚力が水中重量を上回るような粒子が巻き上げられる、と考えた。また、 Δp は次式 $\Delta p/\tau=0.556[\ln\{(10.4 D_{65}/k_s)+1\}]$ を用いて計算した。ここで、 τ は河床に働く掃流力、 k_s は河床の相当粗度、 D_{65} は間隙に存在する細粒物質の65%粒径である。そして、河床堆積物の粒径組成から各時刻において巻き上げられる粒子の体積比を求め、4月7日15時の懸濁物濃度を1.0として規格化した濃度変化を計算した。この結果、観測した懸濁物濃度時間変化を説明することができた。巻き上げモデルで計算した懸濁物粒子の最大粒径は、実際の懸濁物粒子の5%粒径と一致した。これらから、巻き上げモデルは、河床からの懸濁物巻き上げ現象を説明するのに適すると考えた。冷水沢においても、1990年の融雪期初期に先行型の懸濁物濃度変化を観測した。懸濁物の粒径組成は、砂質河床堆積物中の細粒物質粒径組成に類似し、懸濁物は河床堆積物中から巻き上げられたと判断した。懸濁物流量の極大値は流量の極大時より1時間先行し、この先行時間は盤溪川の観測結果より数時間短い。これは、冷水沢の河床には砂質の堆積物が多いためと思われる。

同時型の懸濁物流量変化は、盤溪川において、夏季大雨出水時の1982年9月13日に観測した。このときの懸濁物粒径組成が山腹岩屑層中の細粒物質の粒径組成と類似していたことから、懸濁物は岩屑層中の細粒物質が洗い流されてきたものと判断した。降水が河道に集中する過程で細粒物質を洗い出してくるのであるから、最大物質運搬エネルギーを持つ水が河川に集中する流量最大時に、懸濁物流量の極大値が出現する、と考えた。

遅れ型の懸濁物流量変化は、冷水沢において、夏季大雨出水時の1989年8月23日と9月20日に観測した。このとき、懸濁物粒径組成は山腹岩屑層中の細粒物質の粒径組成あるいは林道表面の盛土中の細粒物質の粒径組成と類似した。また、懸濁物の鉱物組成は、分水界付近の岩屑層の鉱物組成あるいは林道盛土中の鉱物組成と類似していた。もし懸濁物が岩屑層中の細粒物質が洗い出されたとすれば、同時型の懸濁物流量変化を示すと考えられる。そこで、林道盛土中から流出した濁水が岩屑層中を浸透することにより、遅れ型の懸濁物流量変化が生じていると判断した。この機構について検討するため、次の実験を行った。内径10cm、高さ30cmの円筒形カラムに珪砂(平均粒径 $54.4\mu\text{m}$)またはガラスビーズ

(粒径 250 μm)をつめ、この表面から一定濃度の濁水を浸透させ、カラムの底部から流出する水の流量と懸濁物濃度を測定した。懸濁物質には、平均粒径約 2 μm の feldspar powder を用いた。流出水の懸濁物濃度は、初期には低濃度であるが次第に増加し、濁水の供給を打ち切る時に最大となった。また、流量が増加すると懸濁物濃度の変化率が増大した。流出水の懸濁物濃度は、カラム表面から供給した懸濁水濃度よりも常に低かった。これらから、浸透した濁水中の懸濁物のほとんどはカラム内部にトラップされ、その残りだけが流出することがわかった。そして内部にトラップされた懸濁物の量が増加するとともにカラム内部の濾過効率が減少し、このため懸濁水の供給が止まるまで流出水の懸濁物濃度が上昇することが判明した。この結果から、冷水沢で観測した遅れ型の懸濁物濃度変化は、林道盛土中から流出した濁水が、浸透しやすい植生に覆われた土壌表面から浸透し、岩屑層中にトラップされた残りの懸濁物が河川に流出したために生じた、と判断した。

これらの結果から、次のような懸濁物産出機構が明らかになった。先行型は、河床堆積物中の細粒物質が河川水中に巻き上げられた時に生じる。ただし、河床堆積物の粒径組成が均一粒径に近い時は、同時型に近い懸濁物流量変化を示すと考えられる。同時型は、流域の岩屑層中の細粒物質が、河川に集中する水により洗い出された時に出現する。遅れ型は、土壌表面から濁水が浸透し、岩屑層内でトラップされた残りの懸濁物が河道に流入した時に生じる。濁水の土壌表面からの浸透は、裸地表面から流出した濁水が植生のある土壌表面に到達した時にのみ生じると考えられる。また、土壌層の厚いところでは、浸透した濁水中の懸濁物をトラップする能力が大きいと思われる。したがって、遅れ型の懸濁物流量変化は、土壌層厚が薄く、かつ人工改変等で生じた裸地が植生に覆われた流域の中に存在するところでのみ発生する、と考えられる。

乾燥地域や半乾燥地域の植生のない流域では、土壌表面に難透水性の crust が形成されるため、流域全体から表面流が河川に流入する。表面流の土壌表面侵食量は大きいので、同時型が多く出現すると考えられる。湿潤地域では subsurface flow が河川に供給される。このうち、均一性地下水流の流域では、河道からの巻き上げによる先行型は発生するものの、帯水層を層流で流れる地下水流は流域全体から懸濁粒子を洗い出しづらいつと考えられ、同時型はあまり見られないと思われる。また、土壌層が厚いため、濁水が浸透したとしても、遅れ型は起こらないと考察される。パイプ流や基岩表面地下水流の流域では、先行型・同時型共に発生するが、遅れ型は土壌層の薄い流域に限られると考えられる。

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 中 尾 欣 四 郎
副 査 教 授 小 林 大 二
副 査 助 教 授 浦 上 晃 一
副 査 講 師 知 北 和 久

学 位 論 文 題 名

The Mechanisms on a Suspended-Sediment Supply to Rivers

(河 川 懸 濁 物 の 産 出 機 構)

河川の懸濁物濃度と河川流量との時系列において、従来より非線形的関係が指摘されていた。単純に考えると、懸濁物濃度の最大値は、懸濁物を侵食・運搬するエネルギーが最大となる河川流量最大時に出現するはずである。しかし、懸濁物濃度と流量の最大が同時に出現する同時型の観測事例に加えて、本研究のごとく、懸濁物濃度の最大値が流量の最大となる時刻に先行する先行型が多数報告されている。また、観測例は少いが、遅れ型も報告されている。これら3つの河川懸濁物出現特性について、これまで、流域および河床からの懸濁物産出過程から考察した定説はない。

申請者は、研究流域として札幌市近郊の盤溪川流域（流域面積 1.1km^2 ）および冷水沢流域（流域面積 0.9km^2 ）を選定した。その結果、盤溪川で融雪期に先行型を秋期に同時型を観測し、冷水沢では先行型、遅れ型の事例を観測した。

先行型が発生したとき、河床表面は大礫に被われ、ゆわゆるアーマーコート状態にあった。また、河川懸濁物の粒径組成は河床堆積物細粒部の粒径組成と良く一致した。申請者は先行型の発生機構として、次のような河床堆積物の巻き上げモデルを提案した。

河川流量が増大すると、河床に働く掃流力が河床の大礫の一部を転動させる。その結果、河床表面の礫相互に間隙が生じ、そこから、細粒物が圧力差で巻き上げられ、懸濁物濃度が増大する。一方、間隙内の細粒物の存在量は次第に減少し、流量の増大にもかかわらず、懸濁物濃度が減少することになる。その後、より大きな礫を転動させる出水が発生

すれば、再び、河床巻き上げが生じることになる。申請者は一連の出水例について、河水の懸濁物濃度の変化を数値解析により先行型の発生を再現した。この計算結果が実測の時系列と極めて良く一致することから、先行型はアーマーコート状態にある河床からの細粒堆積物の選択的巻き上げに起因して発生することを初めて明らかにした。

遅れ型の懸濁物濃度変化は、冷水沢の夏期出水時に観測された。冷水沢流域は調査期間中に未舗装の林道が建設された。懸濁物の粒径組成は山腹岩屑中の細粒部分の粒径組成、あるいは林道表面盛土中の細粒部分の粒径組成と類似した。さらに、懸濁物の鉱物組成は、分水界付近の岩屑層および林道盛土の鉱物組成と一致した。なお、この流域において降雨流出形態は、河谷斜面の基岩表面地下水流が早い集中流を構成していることが、すでに明らかにされている。

もし、懸濁物が岩屑層の細粒部分より洗い出されたとすると、盤溪川の夏期出水時に観測されたごとく、同時型の懸濁物濃度変化が出現するはずである。そこで、林道盛土中から流出した濁水が岩屑層中を浸透する過程で、遅れ型の懸濁物濃度変化が生じたと推論した。濁水の岩屑層中での透過特性を明らかにするため、多孔質体での濁水透過実験を行なった。その結果、流出水の懸濁物濃度は、初期には低濃度であるが次第に増加し、濁水の供給が止るときに最大に達した。また、流量増加に伴い懸濁物濃度の変化率が増大した。多孔質体中を流れる濁水は、透過中に懸濁粒子を内部にトラップする。なお、多孔質体中にトラップされた懸濁粒子が増加すると、濾過効率が減少し、懸濁水の供給が止るまで流出水の懸濁物濃度が増加することが明らかとなった。この実験結果から、冷水沢で観測した遅れ型の懸濁物濃度変化は、林道盛土から発生した濁水が、林地斜面の表土から浸透する過程で、岩屑層に懸濁粒子がトラップされる機構で生じたものと結論した。

先行型は河床からの細粒堆積物の巻き上げによって生じるが、河床堆積物の粒径が均一になると、同時型になる。また、乾燥地域の出水は表面流として河川に集中するので、同時型が出現する事例が多いなど、これまで、世界各地で報告された観測例について流域の気候、地質、降雨流出特性の差異による懸濁濃度変化の出現形態を統一的に解釈することが可能となった。

河川地形学の分野で長年懸案であった河川懸濁物濃度の変化における先行型、同時型、遅れ型の出現機構が本研究によって初めて明になったことにより、河川流域の侵食過程および河川営力過程についての理解を一段と飛躍させた点で河川地形学上の貢献は極めて大きい。

よって、審査員一同は申請者が博士（理学）の学位を受けるに十分な資格があるものと認める。