

粒度組成を考慮したダム排砂時の微細土砂流下に 伴う河川環境影響評価に関する検討

STUDY ON ENVIRONMENTAL IMPACT ASSESSMENT OF FINE SEDIMENT DISCHARGE DURING SEDIMENT FLUSHING OPERATION CONSIDERING GRAIN SIZE DISTRIBUTION

角 哲也¹・白音包力皋²
Tetsuya SUMI and Baiyinbaoligao

¹正会員 博士(工) 京都大学助教授 大学院工学研究科 (〒606-8501 京都市左京区吉田本町)

²学生会員 工修 京都大学大学院工学研究科博士後期課程 (〒606-8501 京都市左京区吉田本町)

In the Kurobe River, coordinated sediment flushing and sluicing of Dashidaira and Unazuki dams have been executed since 2001. From the view point of the comprehensive sediment management in the sediment routing system and the environmental assessment of these operations, it is very important to monitor quantity and quality of sediment transport, and water quality changes during these events in rivers and reservoirs.

This paper discusses the results of suspended sediment concentration (SS) measurement during sediment flushing and sluicing operation of Unazuki dam from 2001 through 2005. These data show gradual increase of SS-peaks and duration of high concentration based on the progress of sedimentation of Unazuki reservoir. These impacts on aquatic species can be measured by the 'stress-index' that was proposed by Newcomb and Macdonald, and finer suspended sediment concentrations (FSS) that are equal to multiplying the SS by the composition rates of grain size up to 10, 30 and 75 μm respectively are also important to measure these impacts more accurately considering biological characteristics of fish species.

Key Words : sediment flushing, suspended-sediment concentration, fish, stress-index, Kurobe river

1. はじめに

ダム貯水池の堆砂対策として種々の方策が提案されているが、対象ダムの条件が適当であれば、フラッシング排砂は最も経済的な手法の一つであり、下流河川への本格的な土砂供給も期待される。一方でフラッシング排砂は、短時間に貯水池から大量の土砂が排出されるために、下流域の生物相の適応度を考慮しなければ環境被害が発生する可能性があることに留意する必要がある¹⁾。

ダム排砂時における環境影響に関してはフランスやスイスにおいて知見が蓄積されている²⁾。特に高濃度の濁り (SS) の発生と溶存酸素 (DO) の低下が重要であり、フランス電力公社 (EDF) はSSおよびその継続時間が魚類に対する影響を系統的に調査し³⁾、その成果はフランスやスイスにおける排砂時の水質管理基準値として活用されている^{4), 5), 6)}。

一方、Staub⁷⁾は、マスを用いた研究成果をもとに、排砂が魚類に与える影響について、1) SS濃度上昇による魚類の忌避行動がもたらす酸素消費量の増大、2) 微細粒土砂によりエラが閉塞されることによる酸素摂取能力の低下、3) DOの直接的な低下による酸素欠乏、が複合的に影響すると指摘している (図-1)。また、Newcomb and Macdonald⁸⁾は、SS濃度とその継続時間の積の自然対数をストレス・インデックスと定義し、SS濃度の増加による魚類への影響度をランク付けし、ストレス・インデックスと影響度

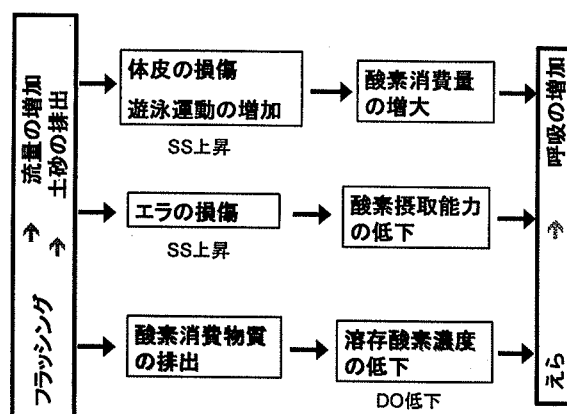


図-1 ダム排砂に伴う魚類への生理的影響⁷⁾

との関係を求めた。

ここで、同一のSS濃度レベルでも魚類に対する影響度は魚種によって異なることが想定され、村岡・角⁹⁾はアユを用いて、また、木下ら¹⁰⁾はイワナを用いて検討を行っており、SS濃度に対する抵抗力がかなり異なることが明らかとなっている¹¹⁾。さらに、木下ら¹²⁾はイワナのエラに付着する土砂の粒径に関する考察から、イワナについては150 μm 以下の粒径の土砂がエラに付着すること、また、粒径が細かければ細かいほど付着しやすいことを指摘している。

一般にSS濃度は100~200 μm 以下の微細粒土砂が対象となるが、ダム排砂時の水位低下から自然流下

に移行する段階では、SS濃度および粒度組成が時間的に大きく変化することが、黒部川連携排砂を対象とするバケツ採水、高濃度濁度計および差圧式SS濃度計（SMDP）などを用いた現地観測により明らかにされてきている¹³⁾。

そこで本研究では、黒部川連携排砂時の採水試料から得られた SS 中の粒度組成をもとに、SS 濃度とさらに微細粒土砂に着目した SS 濃度（以下 FSS 濃度と呼ぶ）の両者について、排砂中の時間経過に伴う濃度とその構成比、および継続時間について整理を行い、SS 濃度および FSS 濃度の両者を対象とする影響評価を行った。

2. 黒部川連携排砂の実施状況と環境調査

黒部川のダム排砂の特徴は、下流河道区間のみならず河口・海域に対する環境影響をも考慮する必要があることであり、黒部川ダム排砂評価委員会において、排砂に伴う下流域の影響を把握するために必要な環境調査項目が検討されている。現在は、水質・底質・水生生物などの調査が、ダム貯水池、河川、海域等において排砂実施前、実施中、実施後に行われている。このうち、下流河川の主要3地点（図-2：出し平ダム直下、宇奈月ダム直下および下黒部）では、排砂実施中に、水温、pH、DO、濁度、SSが1時間間隔でモニタリングされている。

図-3,4に、一例として連携排砂が開始された2001年および2004年の排砂時の貯水位、流入量・放流量および3地点のSS変化を示す。一般に、SSピーク値は排砂用に貯水位を低下させた直後に発生すると言われているが、宇奈月ダムでは2001年は明確ではない。これに対して、2004年は排砂中に生じた大規模洪水をはさんで排砂～洪水調節～通砂が連続的に実施され、宇奈月ダムの堆砂が進行し土砂をよ

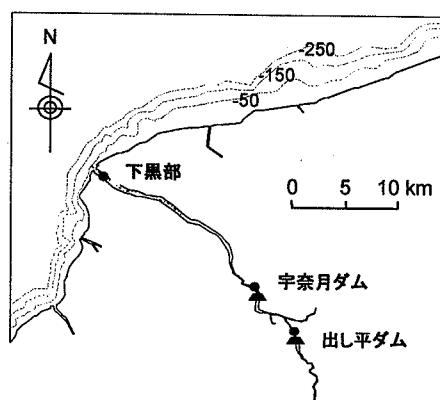


図-2 黒部川下流の水質調査地点

り通過させるように変化してきたことから、この間はSS最大値で10,000mg/lに達する高濃度波形を繰り返している。

これら調査は、先に完成した出し平ダムの単独排砂時代から宇奈月ダム完成後の連携排砂移行後も継続的に行われてきている。宇奈月ダム直下および下黒部橋地点においては、2001年の連携排砂開始以降は、宇奈月ダムの堆砂がまだ十分に進行していないことから、上流から流入した高濁水が宇奈月貯水池内で希釈され、下流河川のSS最大値は一時的に低下した。一方2003年の排砂以降は、下流河川のSS最大値が上昇する傾向にあり、宇奈月ダムの堆砂進行により上流からの土砂が次第に通過しやすくなってきていると考えられる。このことは、図-5に示すように、3地点における2001年以降の連携排砂期間中のSS濃度平均値と最大値の変化に端的に現れており、下流域のSS平均値と最大値が次第に上昇している。また、各年の第一回目である排砂に比べて、二回目以降の通砂ではSS濃度が低下することが確認される。

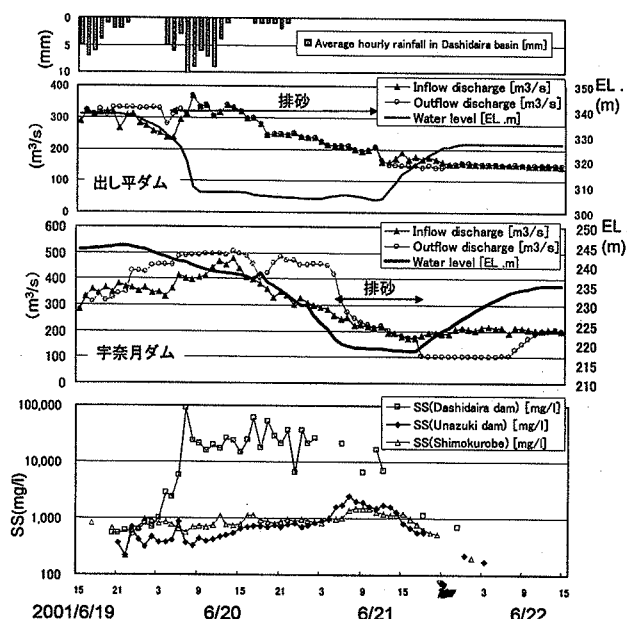


図-3 2001年黒部川連携排砂時の状況

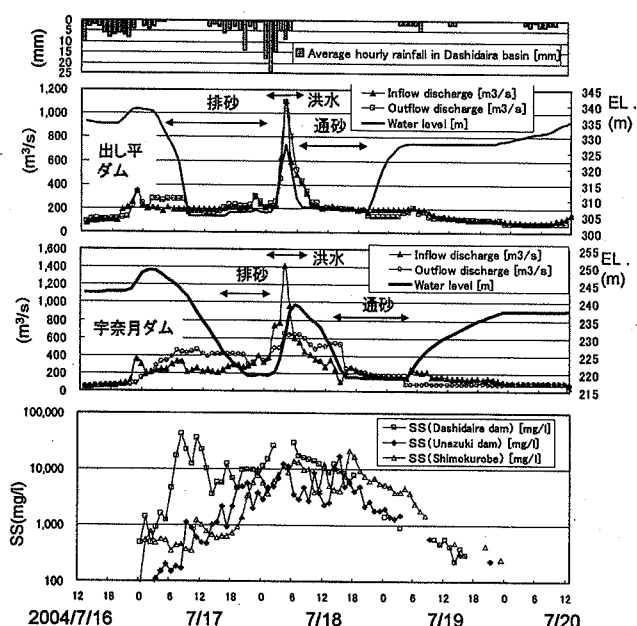


図-4 2004年黒部川連携排砂・通砂時の状況

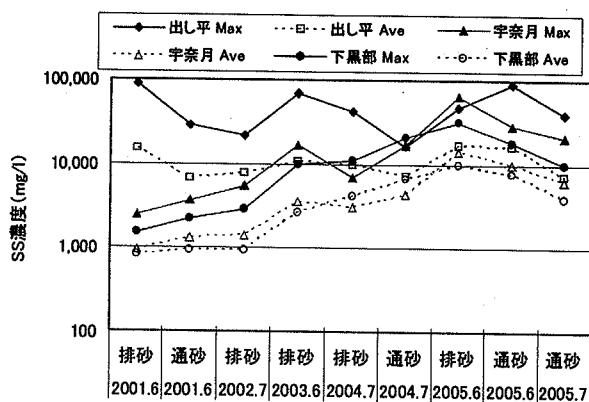


図-5 連携排砂中のSS濃度の経年変化

3. 排砂による河川環境調査の評価

(1) 排砂による環境影響評価

現在の黒部川の連携排砂および通砂は、自然洪水に合わせて、間隔が長くないように一定頻度で排砂を実施すべきというスイスやフランスの知見にも合致したものとなっている。出し平ダムの単独排砂時から、DOに関しては、黒部川に生息する魚類への影響などを考慮して危険値の2倍に相当する4mg/lを下回らないようにモニタリングされてきた。近年は、このDOに関してはほとんど問題となっていない。一方、SSに関しては重点項目としてモニタリングされているが、数値基準は定められていない。高濃度のSSの発生と環境影響を評価する指標として先述のストレス・インデックスがあり、次節に、これを用いて各年の排砂実施に伴う環境インパクトの相互比較を試みる。

(2) ストレス・インデックスによるSS評価

ストレス・インデックス (SI) とは、SSの時系列波形を用いて、SS-継続時間によるインパクト評価を行うもので、NewcombらはSIが大きくなるほど魚類などの水生生物への影響が大きくなることを指摘している⁸⁾。SIは、SS濃度とその継続時間の積の自然対数を取ったもので、式(1)で示される。

$$SI = \log_e (SS \text{濃度 (mg/l)} \times \text{継続時間 (hr)}) \quad (1)$$

例えば、図-3, 4に示したSSの時間波形を用いて、縦軸にSS、横軸にそのSSが最大継続した時間をプロットすることができる。これを2001年以降の宇奈月ダム下流のデータについて整理したものを図-6に示す。ここで、2004年は洪水をはさんで排砂と通砂が連続的に発生したために、これらは一連のイベントとして整理している。

図-6からも明らかなように、宇奈月ダム下流のSS濃度は年々上昇しており、継続時間の観点からもこの傾向が確認される。また、同様に排砂に比べて通砂のSS濃度が低下することも明らかである。

さらに図には、ストレス・インデックスがSI=10および11となる直線を同時に示している。これによ

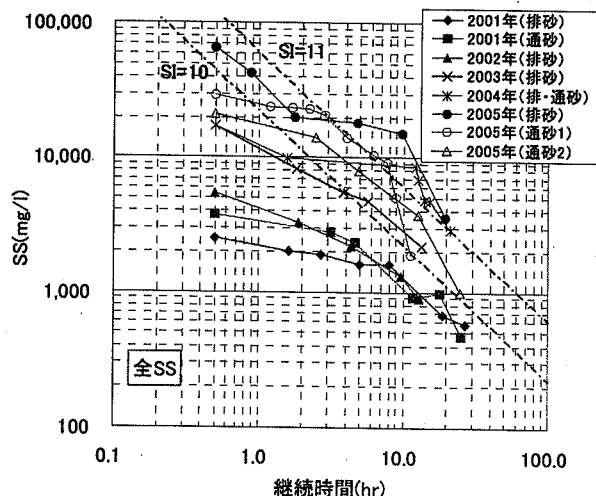


図-6 宇奈月ダム下流のSS濃度～継続時間

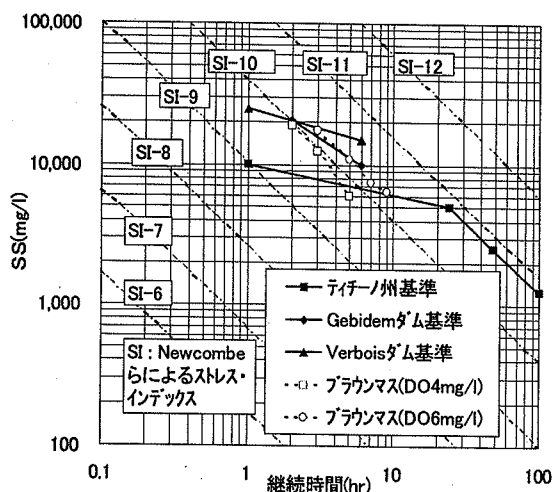


図-7 既往のダム排砂時のSS濃度基準

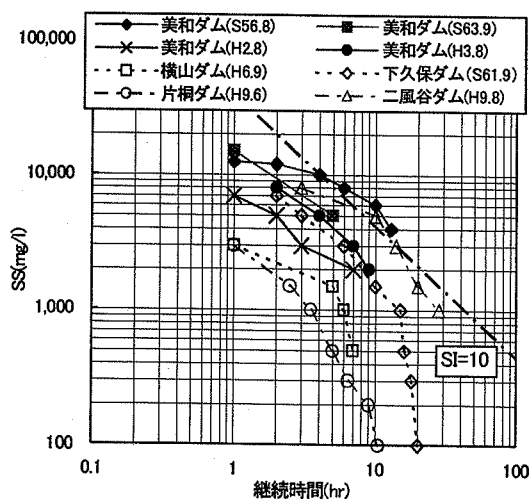


図-8 自然河川におけるSS濃度～継続時間の観測例

れば、宇奈月ダム下流では、2003年の排砂までは概ねSI=10程度に収まっていたが、2004年の排砂・通砂以降SI=10~11、さらには一部SI=11を超える事例も散見される。

ここで、図-7に示すようにスイス・フランスなどにおける既往のダム排砂時のSS濃度基準は概ねSI=10~11と設定されており、現在の宇奈月ダムの水準も同程度である。一方、日本における自然出水における高いSS濃度の観測事例の一部を整理したものを図-8に示すが、これらは概ねSI=10程度であり、自然出水の高濃度事例を考慮すれば、SI=10~11程度が目標とすべき許容可能な上限と考えられる。しかしながら、近年はSS濃度がさらに上昇する傾向が見られ、その変化を予測し、適切に評価する必要がある。

(3) 粒度分布を考慮したSS-SI評価

河川ごとに生息する生物相には相違があり、同じSI（インパクト）であっても生物相への影響（レスポンス）は異なるものと考えられる。日本の河川では、水温、平常時の濁度や流下する栄養塩などが生物相を規定しているが、黒部川では溪流に生息するイワナ・ヤマメ、下流域に夏季に放流されるアユ、さらには河口域に遡上してくるサケなどに対する影響が重要と考えられる。一般に、溪流魚であるイワナ・ヤマメなどは短時間の高濁度には耐性があり、アユなどは濁りには弱いとされる^{9), 10), 11)}。さらに、木下ら¹²⁾はイワナのエラに付着する土砂の粒径に関する考察から、イワナについては150 μm 以下の粒径の土砂がエラに付着すること、また、粒径が細かければ細かいほど付着しやすいことを指摘している。

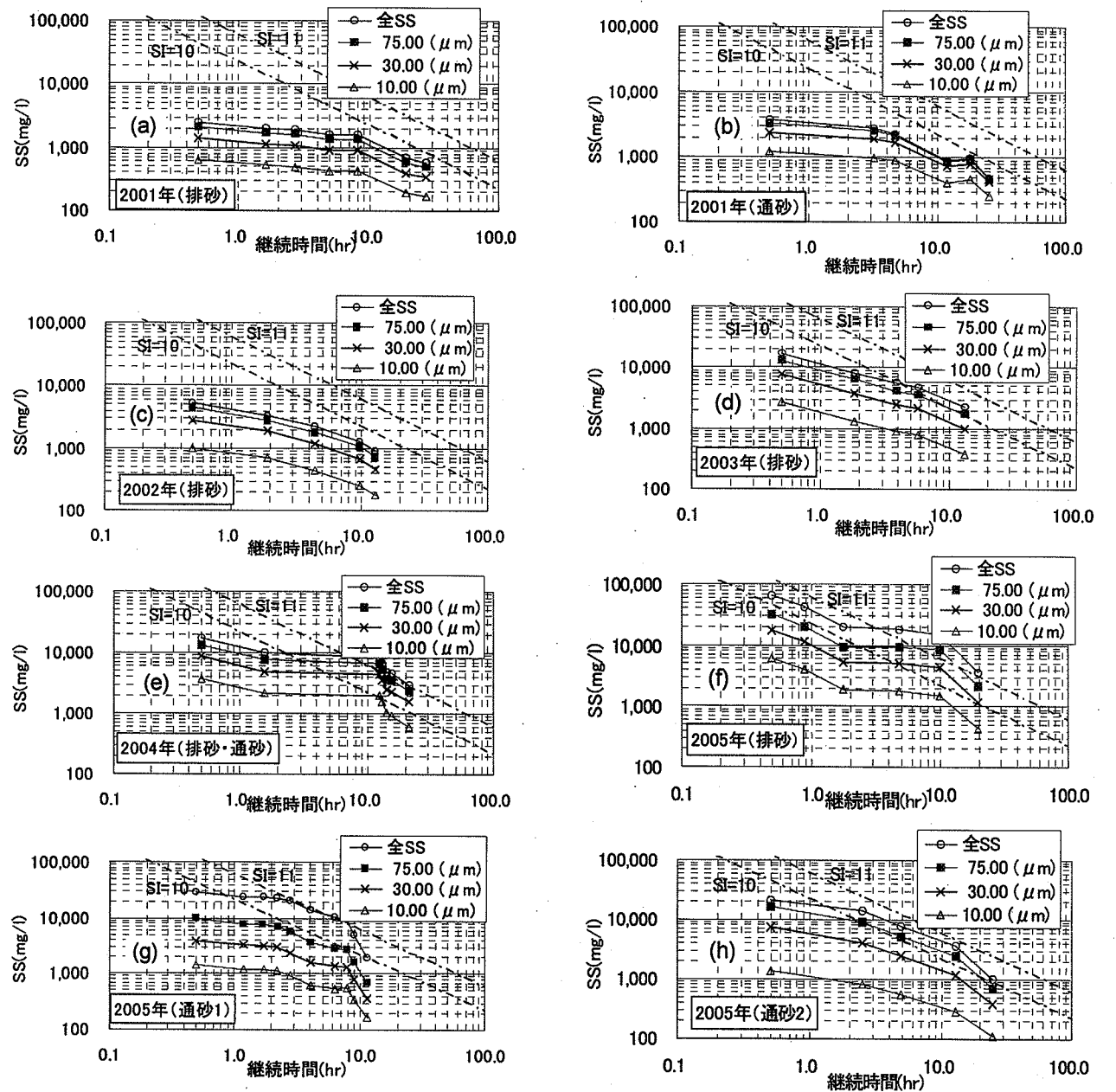


図-9 粒度分布を考慮したSS-SI評価 (2001-2005年 排砂・通砂)

一方、宇奈月ダムにおける近年のSS濃度の上昇には、SSの中でも主に $75\mu\text{m}$ 以上の粒度成分が寄与していることが採水分析による詳細な現地調査結果から明らかにされている¹³⁾。具体的には、2005年の排砂・通砂時のSS中の粒径別の土砂収支では、 $75\mu\text{m}$ 以上が45、65%と次第に増大しており、宇奈月ダムの堆砂進行に伴って排出される粒径が粗くなっていることを示している。

そこで、先に示したストレス・インデックスの評価についてもこの粒度分布の変化を加味することが必要と考え、SS濃度とさらに微細粒土砂に着目したSS濃度（FSS濃度）の両者について、排砂中の時間経過に伴う濃度とその構成比、および継続時間について整理を行い、SS濃度およびFSS濃度の両者を対象とする影響評価（SS-SIおよびFSS-SI評価）を行う。

図-9(a)-(h)は、各排砂イベントについて、各時刻で計測されたSS濃度と粒度分布を用いて、SS濃度（全SS）とFSS濃度（10、30、 $75\mu\text{m}$ 以下の粒径割合でSS濃度を補正したもの）とそれらの継続時間を求めたものである。ここで、粒度分布はSS濃度の計測時刻全てで同時に計測されているわけではないので、前後の時刻のデータを用いて平均化処理を行っている。

これを見ると、経年的に10、 $30\mu\text{m}$ 以下のみで評価されるFSSと全SSの乖離が大きくなってきていること、特に2005年の排砂・通砂においてその傾向が顕著となっていることがわかる。言い換えれば、最近の排砂・通砂（2004、2005年）ではSS中に占める $75\mu\text{m}$ 以上の粗粒分の割合が増加し、これが全SSを引き上げていることになる。

そこで、図-6と同様に、FSS濃度（10、30、 $75\mu\text{m}$ ）ごとに各年度の排砂・通砂の濃度と継続時間の関係をプロットしたものを図-10～12に示す。これによれば、2004年排・通砂および2005年排砂のように、洪水調節をはさんで長時間土砂流出が継続した事例を除いてFSS濃度（ $75\mu\text{m}$ ）ではSI=10程度が上限となり、さらに小さいFSS濃度（10、 $30\mu\text{m}$ ）ではSI=10を大きく下回る結果となっている。

一般に、自然河川における洪水時のSS粒度分布によれば $d_{50}=30\mu\text{m}$ 程度であり、仮に図-8に示したSS濃度の1/2が $30\mu\text{m}$ 以下と仮定すれば既存の自然出水の実績ではSI（FSS= $30\mu\text{m}$ 以下）=9～10程度と考えることができ、図-11のFSS（ $30\mu\text{m}$ ）の実績とほぼ同等な結果となっている。従って、このような傾向と先述の細粒分の方が魚類等への影響度が高いとする木下らの研究を参考にすれば、SS-SIに加えてFSS（ $30\mu\text{m}$ ）-SIの評価を同時に行って微細粒土砂にも焦点を当てた影響評価を行うことが重要と考えられる。この場合、FSS（ $30\mu\text{m}$ ）-SIは主に魚類のエラなどに対する生理的影響の評価に、一方、SS-SIは細粒土砂の収支および生態系全般に対する影響の評価というように、それぞれの目的に応じてこれら指標を活用することができる。

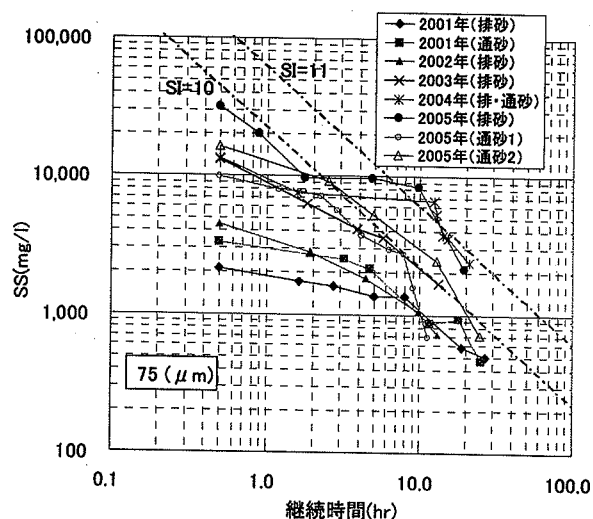


図-10 FSS濃度（ $75\mu\text{m}$ ）～継続時間の関係

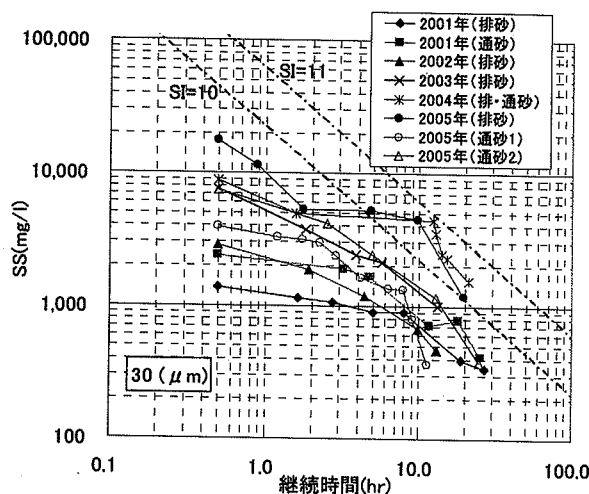


図-11 FSS濃度（ $30\mu\text{m}$ ）～継続時間の関係

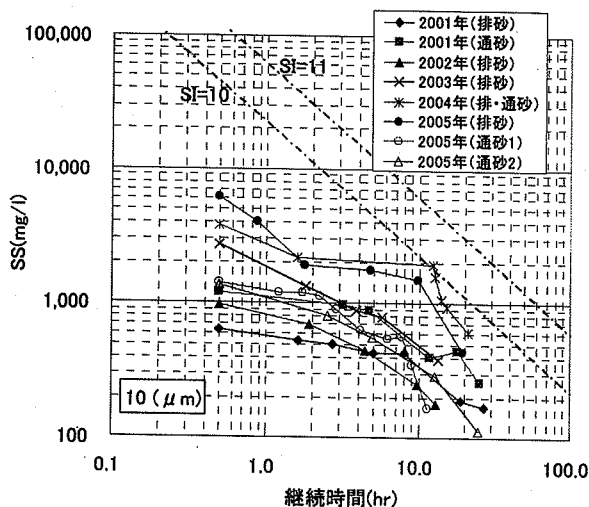


図-12 FSS濃度（ $10\mu\text{m}$ ）～継続時間の関係

(4) SSおよびFSSのモニタリング手法

本研究では、採水試料による詳細なSSおよび粒度分析データを用いることができたが、一般にはここまでのデータを常時把握することは困難である。著者らによる2005年の黒部川連携排砂を対象とした検討により、図-13に示すようにSSと濁度の比率がSS中の粒度分布に大きく依存していることを明らかにした¹³⁾。この理由としては、もともと濁度計はカオリンなどの粘土鉱物を用いてキャリブレーションを行っており、SSの中でも超微細粒子との相関が高いことに起因する。これより、SSと濁度を同時に計測しておくことにより、全ての時刻における粒度分布データが得られない場合でもSS中の数十 μm 以下の微細粒土砂の割合を推定し、ここで示したSS-SIおよびFSS-SIの評価を行うことが可能となるものと考えられる。その観点から、ダム排砂時の水質モニタリングに関しては、高濁度まで計測可能な濁度計とSS濃度のリアルタイム測定手法の組み合わせが重要である。

4. おわりに

本研究では、2001～2005年に実施された黒部川連携排砂時における宇奈月ダム下流のSS観測データをもとに、魚類などへの影響評価を行う手法として、既往の研究でも行われているストレス・インデックス(SI)を用いて、特にSS中に含まれる微細粒土砂の割合にも着目しながら検討を行った。得られた結論を以下に示す。

- 1) SS濃度の排出特性は、10年以上の排砂経験を有する出し平ダムにおいてほぼ安定しているのに対して、完成後の経過年数の少ない宇奈月ダムでは年毎の変化が大きい。
- 2) 宇奈月ダムでは、排砂時のSSのピーク濃度が年々上昇する傾向があるものの、これに寄与しているのはSS分のうちの主に75 μm 以上の粗粒分が中心であり、貯水池内の堆砂が進行してこれらの粗粒分が排出可能となってきたことに起因するものと考えられる。
- 3) 複数の排砂データや自然洪水との比較の観点から、魚類などの水生生物に対する影響評価を行うためには、SS濃度とその継続時間で評価されるストレ・スインデックス(SI)は有用であるが、全SSに加えてさらに微細粒分に着目したFSS(例えば30 μm 以下など)の評価を同時に行うことが重要である。
- 4) ダム排砂時の水質モニタリングに関しては、高濁度まで計測可能な濁度計とSS濃度のリアルタイム測定手法の組み合わせが重要である。

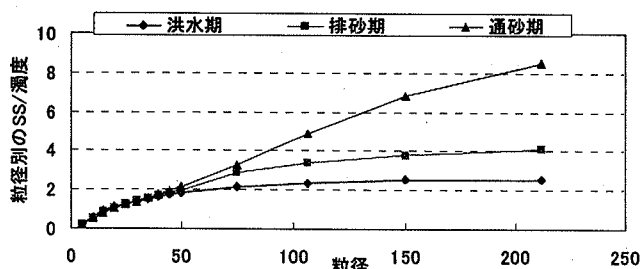


図-13 各粒径階までのSSと濁度の比率
(2005年連携排砂・通砂(宇奈月ダム下流))¹³⁾

参考文献

- 1) Merle, G. : Some Environmental Aspects of Flushing, Int. Workshop and Symposium, Toyama, Japan, pp.195-202, 2000.
- 2) 角 哲也 : ダム貯水池からの排砂と排砂時の放流水質管理, ダム技術, No.127, pp.30-39, 1997.
- 3) Rambaud, J. et al : Experience acquise dan les vidanges de retenues par Electricité de France et la Compagnie Nationale du Rhône, 16th ICOLD Congress, San Francisco, Q. 60, pp.483-514, 1988.
- 4) Gerster S. and Rey, P: Ökologische Folgen von Stauremspülungen, Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft (BUWAL), Schriftenreihe Umwelt, Nr. 219, 1994.
- 5) Gartmann, R.: Spülungen und Entleerungen von Stauseen und Ausgleichesbecken, Wasser, Energie, Luft 82, 1/2, pp.33-36, 1990.
- 6) Conca, A.: Gli spurghi dei bacini di accumulazione e delle prese, Wasser, Energie, Luft, 82, 5/6, pp.111-114, 1990.
- 7) Staub, E.: Effects of Sediment Flushing on Fish and Invertebrates in Swiss Alpine Rivers, Int. Workshop and Symposium, Toyama, Japan, pp.185-194, 2000.
- 8) Newcombe, C.P. and Macdonald D.D.: Effects of Suspended Sediments on Aquatic Ecosystems, North American Journal of Fisheries Management, 11, pp.72-82, 1991.
- 9) Newcombe, C.P. and Jensen, T.O.T.: Channel Suspended Sediment and Fisheries: A synthesis for Quantitative Assessment of Risk and Impact, North American Journal of Fisheries Management, 16, pp.693-727, 1996.
- 10) 村岡敬子, 角 哲也: 高濃度の濁りがアユに与える影響について, 第25回土木学会関東支部技術研究発表会, VII-13, pp.1048-1049, 1998.
- 11) 木下篤彦, 水山高久, 藤田正治, 澤田豊明, 吉清守 : ヒル谷における人為的排砂のイワナへのインパクト, 河川技術論文集, Vol.7, pp.363-368, 2001.
- 12) 木下篤彦, 藤田正治, 田川正朋, 水山高久, 澤田豊明 : 排砂に伴う濁りが魚類に与える生理的影響とその評価法, 砂防学会誌, Vol.58, No.3, pp.34-43, 2005.
- 13) 角 哲也, 白音包力畢 : 宇奈月ダムフラッシング排砂時の細粒土砂流下特性, 水工学論文集, 第50巻, 2006.

(2006. 4. 6 受付)