

29 河川水系における土砂輸送の不連続性に関する一考察

○眞板秀二（筑大農林工）、丸谷知巳・笠井美青（九大農）、
黒木幹男（北大工）、清水 収（北大農）、宮崎敏孝（信大農）

1. はじめに

平成9年5月に河川法が改正され、従来の治水、利水に加えて河川環境の整備と保全が位置づけられた。また、これにともなって、山地源流部から河口・海岸までを含めた流域一貫の総合的な土砂管理の必要性が認識され、行政的にもその具体的な取り組みが開始されはじめた^{1)・2)}。流域一貫の土砂管理を考えると、土砂輸送（移動）の不連続性が一つのキーワードになる。実際、総合土砂管理委員会報告の冒頭にもこれらの用語がでてきている。しかし、その内容は必ずしも明確ではない。そこで、本報告では土砂輸送の不連続性についてその内容を検討することによって、土砂移動現象の本質的な特徴に迫ってみたい。ここでの議論は、今回の河川審議会の答申に基づく特定流域における土砂移動の長期観測に対して、何を、どこで、どのように把握するかを計画する際にも有効であると考えており、これについても若干の提言を試みたい。

2. 土砂輸送の不連続性

土砂輸送の不連続性 (discontinuous nature of sediment transfers) は、流水の移動現象との対比で認識されてきた。すなわち、流水は一つの洪水イベントですべて河口まで到達するのに対して土砂は長年月をかけ多くの洪水イベントによって移動と堆積を繰り返し河口まで到達するという認識である^{1)・3)・4)}。この違いは、土砂には滞留という移動の遅れがあるためだと考えられており⁵⁾、このことを土砂輸送の不連続性と呼んでいる。ただし、この不連続性の中には土砂生産の不連続発生に起因する不連続分も含まれるが、もし、土砂輸送が洪水のように一イベントで完結するならば、土砂生産の不連続発生も洪水と同様に問題にはならない。すなわち、土砂生産の不連続な発生も含めて、土砂輸送の不連続性の本質は土砂の滞留現象にあるということになる。しかし、ある河道区間に限定すれば、条件によっては静的あるいは動的平衡が出現しここでは土砂滞留は生じない。このように土砂輸送がいつも不連続であるわけではないが、流域スケールで考えると土砂輸送が連続的に行われることはない。このことは安定河道の検討からも示されている⁶⁾。ところで土砂の滞留現象は、流水の土砂移動能力と輸送可能土砂量との不均衡から生じている。したがって、土砂輸送の不連続性の解明のためには、水系の上流から下流にわたってこの不均衡がどのように生じているのか、その結果滞留土砂が水系内にどのように分布し、その分布が洪水イベントとともにどのように変化しているかを把握する必要がある。

3. 供給土砂支配と流水エネルギー支配

土砂輸送能力と輸送可能土砂量との不均衡は、土砂輸送が供給土砂量の支配下にあるか流水エネルギーの支配下にあるかを分けてみると理解しやすい。前者は Supply limited condition にほぼ相当し、後者は Transport limited condition に相当する⁷⁾。しかし、Supply limited condition は輸送可能土砂量より輸送能力が大きいにもかかわらず河床から土砂を取り込むことができないため供給土砂量が土砂輸送の制限要素となっている、言い換えれば輸送能力には余裕があり供給土砂さえあればそれを運搬できるという状態のみを指している⁸⁾。これに対して供給土砂支配とは、Supply limited condition に加えて土石流などのマスとしての供給土砂量の輸送によって河道世界が支配される状態を含んでいる。土砂輸送の供給土砂支配をこのように考えると、この状態が支配する河道では、土石流などにより過供給された土砂は有り余る輸送能力によってすぐに Supply limited condition になると考えられる。一方、流水エネルギー支配 (Transport limited condition) の河道では河床に十分な輸送可能土砂があり、流水エネルギーに応じて河床低下あるいは河床上昇させながら土砂輸送を行っていく。

4. 滞留土砂分布の変動 (sediment wave)

供給土砂支配河道は水系上部、流水エネルギー支配河道は水系下部に位置することになり、それぞれ溪流（砂防区間）と河川（河川区間）にほぼ対応するものと考えられる⁹⁾。ただし、水系上部がすべて供給土砂支配河道であるというわけではない。水系上部には河道拡幅部と狭さく部が交互に存在しており、拡幅部はある期間、流水エネルギー支配河道となる。供給土砂支配河道の滞留土砂は主として段丘状堆積地形として河岸に分布し、流水エネルギー支配河道では砂州などの河床波として河道全面に分布する。ところで、滞留土砂分布の洪水イベントごとの変動は sediment wave として把握され、その移動速度が推定されている。Redwood Creek の測定例によれば、平均河床勾配が 0.31 % の区間で 800 ~ 1600

m/year の値が得られており、下流に行くほど移動速度が遅くなると報告されている¹⁰⁾。日本での sediment wave 速度の推定例は沙流川(河床勾配 0.36 ~ 0.52 %) だけであり、1000 m/year という値が得られている¹¹⁾。しかし、これらはいずれも流水エネルギー支配河道区間の値であり、供給土砂支配河道区間では世界的にみても sediment wave 移動速度の測定は行われていない。前述の Redwood Creek の sediment wave 速度測定区間では、上昇した河床が元に戻るまでに最小で 8 ~ 15 年かかったと報告されているのに対して、大井川上流の供給土砂支配河道区間(河床勾配 10 %) では、大規模洪水によって最大 8m の河床上昇が起こったが、その後の 2 年間の 4 洪水によって河床位置は元に戻った¹²⁾。これらから考えると供給土砂支配河道区間の sediment wave 速度は、流水エネルギー支配河道区間に比べてかなり速いことが推定される。

5. おわりに

流域一貫の土砂管理を考える際には、まず水系網を通した土砂輸送の全体像の把握が必要になる。このためには、土砂輸送の本質が滞留現象にあることを考えると、水系網を通して滞留土砂分布がどのように変動していくか、すなわち sediment wave の伝播、を把握することも一つの有効な方法と考えられる。そして、その把握のためには、水系網において当該河道が供給土砂支配の状態にあるのか、流水エネルギー支配の状態にあるのかを判別することが重要である。なぜなら、両者では土砂輸送の世界が大きく異なるからである。供給土砂支配河道では、拡幅部が重要になる。ここは、土砂の滞留場であると同時に、ある期間流水エネルギー支配状態となり、sediment wave の伝播速度がここで規制されるからである。では、sediment wave をどのようにつかまえるかである。流水エネルギー支配河道では河床変動計算による sediment routing が大いに威力を発揮するかもしれないが、供給土砂支配河道では現地観測が主になると考えられる。とすると、ここではまず、河床縦横断の長期観測が必要になる。長区間を長期に継続観測することは難しく、現実的には観測区間を選択する必要がある。そこで、供給土砂支配河道では、これまで述べてきた理由で拡幅部での観測を推奨したい。また、これまで得られた河床縦横断測量のデータも大いに利用すべきである。長期間のデータがあれば、平均河床高の上昇とそれが元に戻る時間(復帰時間)およびその変動高を求めたい。各地点での復帰時間とその変動高を比較すれば、sediment wave の伝播の態様を知ることができるだろう。

水系における土砂輸送を sediment wave の伝播と捉えれば、各生産源から不連続に発生した振幅の大きな wave は、下流に伝播するに従い振幅を減じ、あるいは分解し、そして時には重合しながら、結局は下流では小さな多数の wave となり、ついには wave の判別ができなくなるまでになるであろう。自然の水系はもともとこのような土砂輸送システムをもっている。砂防はこのシステムに介入し sediment wave の大きな振幅を、人間社会に許容される小さな振幅に誘導することだと考えている。この意味では、各水系がもともと持っている土砂輸送システムの特性のより深い理解が大切である。本論では、河床変動にかかわる土砂成分をとりあげ、wash load のような微細土砂輸送については議論していない。しかし、海岸・河口までを含めた流域一貫の土砂管理ということでは、微細土砂輸送は土砂収支あるいは環境という観点からも重要である。これについては、機会をあらためて検討したい。

引用文献

- 1) 河川審議会総合土砂管理小委員会(1998): 流砂系の総合的な土砂管理に向けて
- 2) 南 哲行ら(1998): 水系一貫土砂管理に関する研究について. 砂防学会発表概要集
- 3) 武居有恒(1975): 砂防計画に想う. 新砂防 16(2)
- 4) K.Richards(1993): Sediment Delivery and the Drainage Network; In Channel Network Hydrology. John Wiley & Sons Ltd.
- 5) 新谷 融(1971): 荒廃溪流における土石移動に関する基礎的研究. 北大演報 28(2)
- 6) 吉川秀夫(1985): 流砂の水理学. 丸善
- 7) D.R.Satterlind *et al* (1992): Wildland Watershed Management. John Wiley & Sons Ltd.
- 8) J.C.Pitlick *et al* (1987): Sediment Supply, Movement and Strage in an Unstable Gravel-bed River ; In Sediment Tranport in Gravel-bed Rivers. John Wiley & Sons Ltd.
- 9) 眞板秀二ら(1994): 砂防学における溪流地形研究の意義と役割. 新砂防 46(5)
- 10) Mary Ann Madej(1996): Channel Response to Sediment Wave Propagation and Movement, Redwood Creek, California, USA. Earth Surface Processes and Landforms, Vol.21
- 11) Futoshi Nakamura *et al* (1995): Speed of Sediment Wave in the Saru River Estimated by Age Distribution of Sediment. Proc. of the international Sabo Symposium
- 12) 眞板秀二(1988): 破碎帯流域における荒廃溪流の動態に関する砂防学的研究. 筑大演報 4号