

洪水時広域採水による 涸沼川水系の土砂動態観測

A SURVEY OF CATCHMENT-SCALE SEDIMENT MOVEMENTS
BY MULTI-POINT FLOOD WATER SAMPLING IN THE HINUMA RIVER SYSTEM

平林桂¹・平舘治²・望月達也³・藤田光一⁴・松尾和巳¹・坂野章¹・服部敦²
塚原隆夫²・梅野浩一²・渡辺敏⁵・近藤和仁⁵・山形宙⁵・李参熙⁶・赤木泰雄⁶

Katsura HIRABAYASHI, Osamu HIRATATE, Tatsuya MOCHIZUKI, Koh-ichi FUJITA, Kazumi MATSUO
Akira SAKANO, Atsushi HATTORI, Takao TSUKAHARA, Koichi TOGANO, Satoshi WATANABE
Kazuhito KONDO, Hiroshi YAMAGATA, Sam-hee LEE, and Yasuo AKAGI

¹正会員 建設省土木研究所河川研究室主任研究員 (〒305 茨城県つくば市大字旭1番地)

²正会員 同研究室研究員、³正会員 建設省熊本工事事務所所長 (前河川研究室長)

⁴正会員 工博 同研究室室長、⁵正会員 同研究室交流研究員、⁶正会員 筑波大学連携研究員

Sediment load in a river is classified, from its transport regime, into three categories: washload, suspended load, and bed load. Since each category has a different role in the process of river geomorphic change, it is important to know sediment supply of each category. The authors conducted comprehensive measurement of sediment transport in the Hinuma River system during the flood on June, 20th-21st, 1997. This paper describes the outline of this measurement, some consideration about the source of washload in the tributary Kataniwa River and Inada River, a cause of the hysteresis between the washload flux and the discharge, deformation of the washload flux-time curve in the flow process, and the role of each sediment load category in the change of sinuosity.

Key Words: *sediment yield, sediment runoff, sediment source, sediment transport, hysteresis of washload rating curve*

1. まえがき

例えば、蛇行帯に属する河川では、上流より供給される土砂のうち浮遊砂・ウォッシュロードが河岸に堆積し高水敷の地形的・土質的特徴を決定していると考えられる¹⁾。このことは、上流域で生産された土砂の粒度特性が、下流の河道において高水敷の耐侵食性をはじめとする種々の河道特性の個性化に密接に関連していることを示唆するものである。流域スケールでの粒径ごとの土砂動態を把握することは、対象河川の河道地形の変化予測、物質循環の素過程把握と生態系への影響評価、流域の人工的改変の地形的・環境的影響評価、合理的な河道管理方法の立案等のために重要である。土木研究所では、上記の研究の一端を担うべく、流域スケールの土砂動態を推定する手法の開発を目標に、涸沼川における

流砂量観測を行っている。本論では、1997年6月20～21日に発生した中規模洪水に関して流砂量観測を実施した結果をもとに、流砂の流出特性がサブ流域(第2項を参照のこと)ごとに異なることを明らかにするとともに、この原因について考察し、土砂生産形態に着目した仮説づけを行った。また、浮遊土砂濃度ピークと流量ピークにずれがあり、この現象がサブ流域からの土砂供給特性の違いを反映したものであることを見いだした。

2. 本論文における用語の定義

本論文では記述を容易にしかつ読解しやすいよう、土砂水理学の一般的用語にないものを使用している場合があるので、表-1に一括して定義しておく。

表-1 本論文における用語の定義

用 語	次 元	説 明
ウォッシュロード量	L^3/T	ウォッシュロードの体積フラックス(全幅)
全幅浮遊砂量	L^3/T	浮遊砂の体積フラックス(全幅)
総流出土砂量	L^3	一洪水を通した流砂の移動体積
浮遊土砂	—	ウォッシュロード + 浮遊砂
浮遊土砂量	L^3/T	ウォッシュロード量 + 全幅浮遊砂量
サブ流域	L^2	1水系流域を支川レベルまで分割した小流域。

L:長さ T:時間

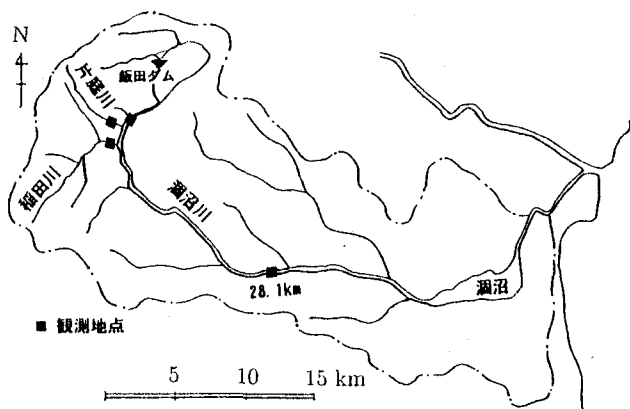


図-1 湊沼川の流域

3. 湊沼川の概要

図-1に湊沼川の流域を示す。湊沼川は茨城県中央部を流下し、湊沼を介して那珂川に注ぐ流域面積459km²の1級河川である。

湊沼川流域を踏査し、地形学的な観点から土砂供給量について推定すると、観測地点より上流域における土砂の主たる供給源は本川および支川稲田川と片庭川であると推定される。

本川の主たる土砂供給は、最上流域において砂岩、ホルンフェルス化した粘板岩等からなる、かつて湊沼川自身が形成した河岸段丘を侵食することによりもたらされている。ただし、侵食面の勾配は緩く、近傍の河床もアーマー化が進んでいることから土砂生産量は少ないと考えられる。支川稲田川は、湊沼川への合流点近傍で川幅7m、最大水深4m程度であり、低水路幅が25m程度ある湊沼川本川より小規模な河川であるものの、その上流域に採石場を有していること、河床材料が数ミリオーダーのマサ土でかつ河床勾配が約1/380と急であることから湊沼川への供給土砂量はかなり多いと推定される。支川片庭川は川幅4m、最大水深2m程度と稲田川に比べてもいっそう小規模ではあるものの、上流に採石場を有し、微細砂が流出しやすい状況にあることから、洪水時にはそれに応じた土砂供給があるものと考えられる。

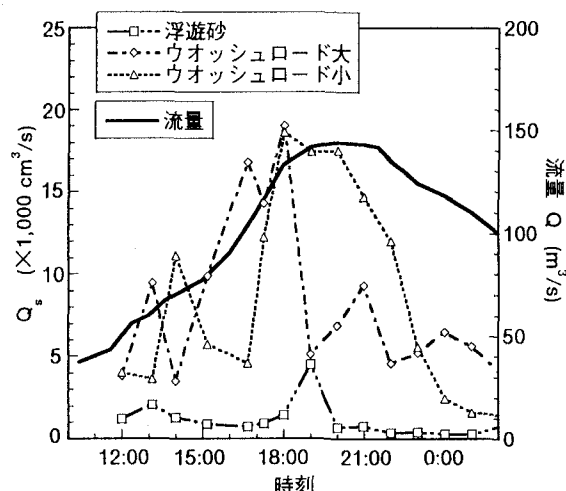


図-2 湊沼川28.1kmの流量と粒径別流砂量

4. 流砂観測の概要

1997年6月20～21日、台風7号がもたらした洪水に対して観測を実施した。洪水規模は、28.1km地点において高水敷水深が最大で約1.5m、低水路水深が最大で約4.5mとなる湊沼川としては中規模の洪水であった。28.1km地点における流量ハイドログラフを図-2に示す(同図に示されている浮遊砂・ウォッシュロード量については後述する)。当該洪水の特徴としては、降雨が一時停滞したために増水期において水位上昇速度が鈍った時間帯があったこと、洪水継続時間が通常時と比べかなり長かったことが挙げられる。この洪水に対して、土木研究所では以下のような観測を実施した。湊沼川28.1km地点では、採水法による浮遊土砂観測、流量観測、および水位観測を実施した。この観測に用いる施設・計測機器の詳細については参考文献2)を参照されたい。なお、本地点においては掃流砂観測、流速観測および水面勾配観測も実施しているものの、本論の範囲では直接関係しないので説明を省略する。一方、稲田川、片庭川では湊沼川水位の影響を受けない程度に上流の地点で浮子による流量観測、および採水法による浮遊土砂観測を実施した。また、両支川の合流点よりも上流の湊沼川本川(以下、湊沼川上流地点と表記する)においても浮遊土砂観測を行った。なお、両支川および湊沼川上流地点の採水は柄杓により水面近傍で行っている。

5. 観測結果

図-2に湊沼川28.1km地点で観測された流送形態別(粒径別)の全幅流砂量および流量ハイドログラ

表－2 流送形態と粒径の関係

流送形態	粒径 (mm)
ウォッシュロード 小	～0.014
ウォッシュロード 大	0.014～0.10
浮遊砂	0.1～0.8
掃流砂	3

フを示す。全幅浮遊砂量およびウォッシュロード量は、採水資料に対してふるい分け試験および比重浮ひょうによる沈降試験を実施し、土粒子の比重を2.65の一定値と仮定し粒径別に体積濃度を求め、これに流量を乗じることによって求めた。ウォッシュロードと浮遊砂の判別は、ラウス分布を参考に、摩擦速度 u_* と土粒子の沈降速度 w_o の比 u_*/w_o が15～28程度を与える粒径0.11mmを境界値とすることで行った。なお、浮遊砂粒径の上限値は観測結果に基づき0.84mmである。また、ウォッシュロード量の時間変化に着目した場合、粒径の小さいものは時間変化が少なく、大きいものは洪水初期に増大し、末期に減少するという流出傾向に差異が見られたため、便宜上0.014mmを境界値としてウォッシュロードをさらに(大)・(小)に区分した。なお、掃流砂については観測機器の不調により適切な観測ができなかったため今回の検討からは除外してある。なお、28.1km地点において、浮遊土砂の採取を行った水深は、18:00以降30cmに統一したものの、それ以前は1m～10cmの範囲でばらつきがある。また、18:00以降の資料は洪水流速よりやや速い速度で採水されており、それ以前の資料は洪水流速より遅い速度で採水されたものが含まれている。

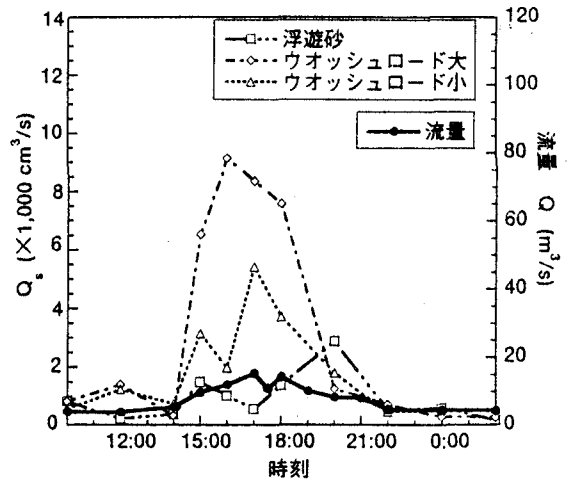
図－3は支川片庭川の、図－4は支川稲田川の、図－5は両支川の合流点より上流の涸沼川の流砂量の時間変化を示したものである。いずれも洪水時柄杓により表面採水した資料に基づいて計算したものであるが、片庭川については洪水時水深が1m未満の場合もあり、水面近傍からの採水となっていないものも含まれている可能性がある。

6. 考察

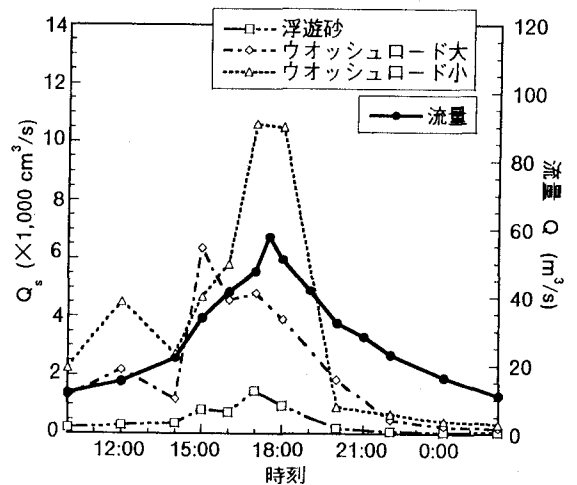
本項では、上記5の基礎情報を元に、明らかになった現象およびその機構等について考察を行う。

(1) 流域別の土砂供給特性の違い

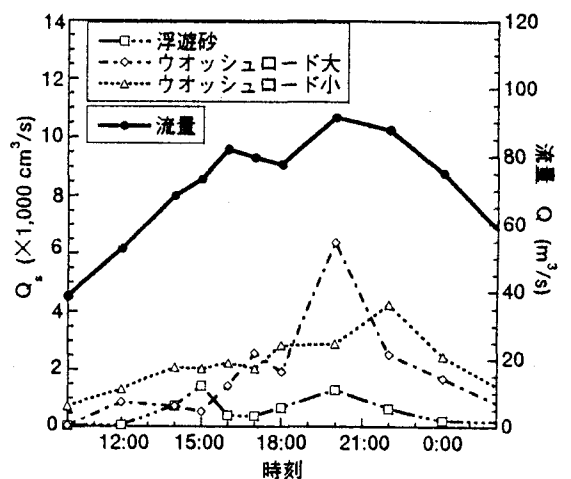
まず、河道の規模と粒径別土砂収支の関係に注目する。表－3は涸沼川上流(流域面積48.6km²)・片庭川(同8.2km²)・稲田川(同39.4km²)の流域面積



図－3 片庭川の流量と粒径別流砂量



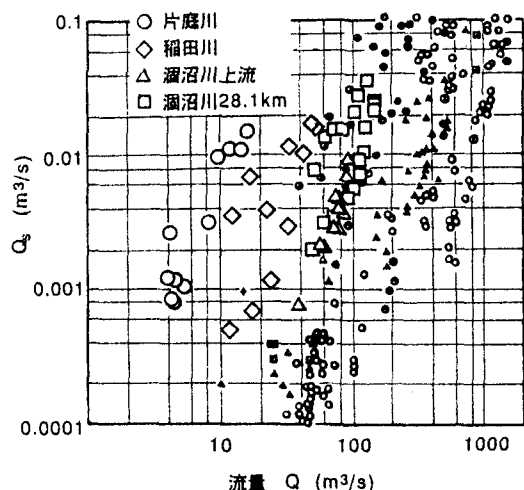
図－4 稲田川の流量と粒径別流砂量



図－5 涸沼川上流の流量と粒径別流砂量

表－3 流域面積と粒径別総流出土砂量

河川名	流域面積 (km ²)	ウォッシュロード小(m ³)	ウォッシュロード大(m ³)	浮遊砂(m ³)	掃流砂(m ³)
濁沼川上流	48.6	249(大・小合計)		31	0
片庭川	8.2	94	159	54	0
稲田川	39.4	204	123	24	145



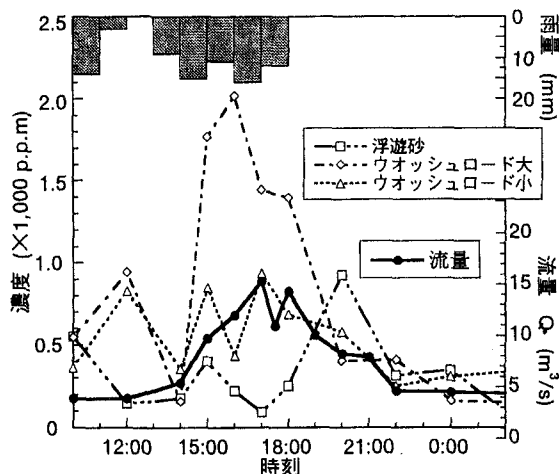
図－6 浮遊土砂量と流量の関係

と粒径別土砂収支との関係を示したものである。片庭川は流域面積が小さいものの総流出土砂量が多く、逆に濁沼川上流は流域面積が最も広いにも関わらず総流出土砂量が少ないことがわかる。この傾向を一般的な指標で見るために、全国の一級河川で実施した浮遊土砂量観測結果をもとに作成した浮遊土砂量～流量相関図³⁾に当該観測結果をプロットした(図－6)。これによれば、片庭川の浮遊土砂量が全国平均レベルよりもかなり多く、次いで稲田川が多く、最も少ない濁沼川が全国河川並みであることがわかる。両支川からの供給土砂が多い原因については、上流部に採石場を有していること、特に片庭川流域面積の多くが山地部であることが関与している可能性を指摘することができる。

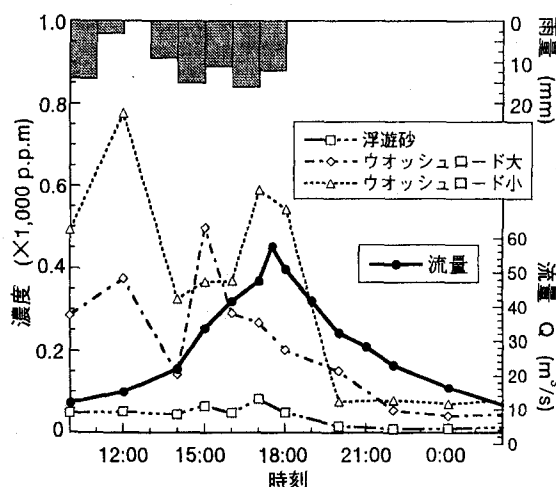
次に、流域別に見た流送土砂の質的な違いに注目する。図－3～5を見ると、片庭川からはウォッシュロード(大)が、稲田川ではウォッシュロード(小)が最も多く供給されており、流域別に土砂の供給特性がかなり異なることを示している。両支川の供給土砂の質的な違いの原因については、(2)に述べる土砂生産源の違い、流域の土地利用形態の違い、等を反映しているものとは推定されるものの、その機構の全容については未知な点が多い。

(2) 支川における浮遊土砂の生産形態

図－7、8はそれぞれ片庭川、稲田川での粒径別



図－7 片庭川の浮遊土砂濃度



図－8 稲田川の浮遊土砂濃度

浮遊土砂濃度の時間変化を示したものである。これによれば、両支川ともウォッシュロード濃度が洪水初期に高い値を示し、12:00～15:00頃に一旦減少し、その後再び増大する傾向を呈している。浮遊砂濃度については、ばらつきはあるものの、洪水増水期には一定値を保つようであり、ウォッシュロード濃度に見られる増→減→増という特徴的な傾向は見られなかった。ここで、このような違いの生じる原因について考察する。図－7、8には両支川の最寄りの雨量観測所である笠間観測所で得られた洪水当日の降雨ハイトグラフが併記してある。これによれば、12:00～13:00頃一旦雨が止んでおり、ウォッシュロード濃度の時間変化傾向と類似している。また、降雨の終了した18:00頃のウォッシュロード濃度に注目すると、両支川ともに急速に低下しており降雨パターンに追従する傾向を示す。一方、両支川の流出形態について地形的な視点から推定すると、片庭川は

地形が急峻で羽状流域をなしていることから流出時間は早く、稲田川も地形は片庭川よりも平坦で流域面積も広いものの農業用の排水路網が高度に整備されていることから表面流出時間は早いと推定される。以上から、片庭川・稲田川のウォッシュロードは降雨に直接結びついた流出、すなわち表面流出により運搬されたものである可能性を指摘できる。とすれば、ウォッシュロードが流域から広く生産されている可能性もある。しかし、今回の観測の範囲では以上の仮説を実証することは不可能であり、今後集中的な流砂量観測を行う必要がある。

(3) 観測地点付近の土砂収支

図-9は、土砂収支を明確に表現するために、図-2～5の粒径別流砂量を洪水継続時間で積分して洪水時における粒径別総流出土砂量に換算したものである。この図から、濁沼川上流、片庭川、稲田川および濁沼川下流の土砂収支はほぼ一致しており、両支川合流点から28.1kmまでの間に目立った土砂の流入や土砂生産がないことがわかる。次に、支川合流点から28.1km地点までの16.4kmの流下過程におけるウォッシュロード量の拡散の度合いについて調べる。図-10は、濁沼川上流・片庭川・稲田川で観測されたウォッシュロード量(大)・(小)の合計と、濁沼川28.1kmでの観測結果を重ね書きしたものである。これによれば、14:00～15:00に見られるフラックスの急増が若干均された程度で、約2時間の時差をもって両曲線の幾何形状は概ね一致することがわかる。これは両地点の距離を平均流速で除して求めた流水到達時間(距離16.4km/流速2m/s $\div$ 2.3時間)とほぼ一致する。

次に、この現象についてさらに粒径別に検討する。図-2において、特に浮遊土砂の中で大きな割合を占めるウォッシュロード量(大)・(小)に着目すると、流量ピークが22:00に発生しているのに対し、ウォッシュロード量(大)のピークが17～18時ごろに、ウォッシュロード量(小)は18～20時にピークを迎えている。この原因については、(3)の結果からウォッシュロードを多く供給する支川の特徴を反映したものである可能性が高い。そこで、図-3、4において、両者のウォッシュロード量(大)・(小)をそれぞれ合計して見ると、ウォッシュロード量(大)のピーク時刻は15～16時ごろ、ウォッシュロード量(小)のピーク時刻は16～18時ごろと考えられる。各粒径とも、28.1km地点の観測地とのずれは2時間程度であり、これは上記の流水到達時間とほぼ一致する。

以上の事実は、多くの河川で指摘されるハイドロ

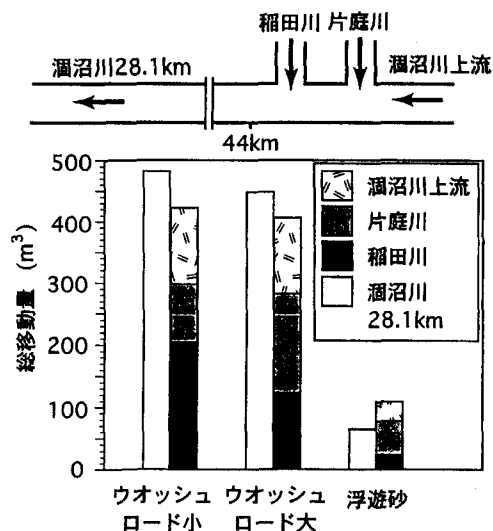


図-9 土砂収支

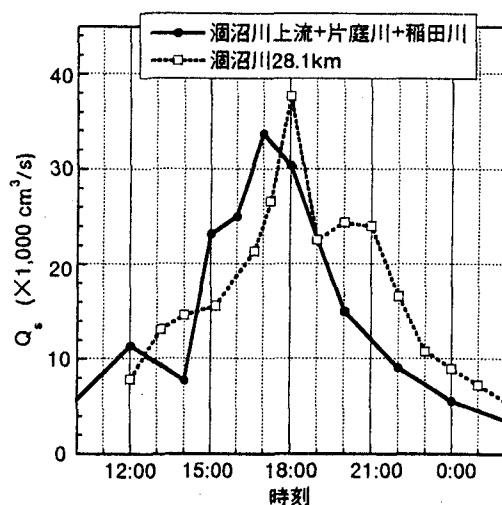


図-10 ウォッシュロード量の比較

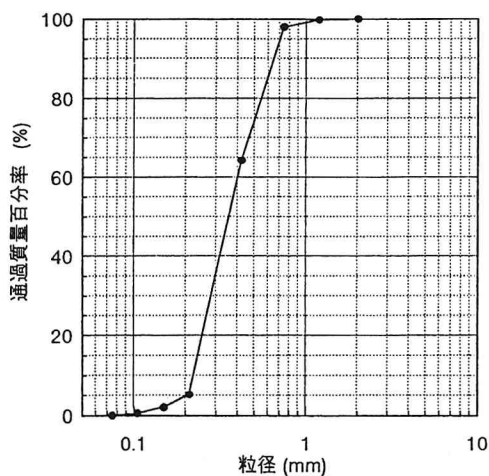
グラフと浮遊土砂濃度のピークのずれの一因として上流のサブ流域からの土砂流出が本川の土砂濃度に強く関与することがあること、さらには上流のサブ流域からの土砂流出を単純に足し合わせる水文学的な手法で下流での土砂動態がある程度予測可能であることを示唆するものである。

(4) 支川からの土砂が本川地形に及ぼす影響

写真-1は、濁沼川河道内に数多く見られるテラス状地形の一例を示したものである。テラス状地形は、比高が砂州と高水敷の間で、河岸から流路側に張り出した地形を呈している。この地形は、現地踏査および蛇行度調査から⁴⁾、稲田川合流点よりも上流ではほとんど見られず、下流で急増することが確認されている。この原因は次のように考察すること



写真－１ テラス状地形の一例



図－１ １ テラス状地形上の土砂の粒径加積曲線

ができる。この地形は、ボーリング調査等により求めた層序構造と構成材料の粒径から、次のような過程で形成されるものと考えられる⁵⁾。①洪水時、河岸近傍に砂利、粗砂が砂州状に堆積する。②これが洪水の度に徐々に発達して水面上に顔を出すようになり、植生が繁茂する。③植生の作用により洪水時に浮遊砂をトラップ可能となり、堆積速度が急増し、比高が急速に高くなる。一方、テラス状地形の構成材料の粒度分布を調べると、図－１ １に示したとおり浮遊砂と対応しており、今回の観測結果から主として稲田川から供給されたものと推定される。以上から、テラス状地形が稲田川合流点より下流で急増する原因として、上記のプロセスに対応した挙動を示す粒径の土砂が稲田川から大量に供給されたこと、すなわちサブ流域からの土砂流出特性が本川河道の地形的な特徴を支配している可能性を指摘できる。この点についてはさらに詳細に検討していく必要がある。

7. 今後の検討

本検討を通じ明らかにされた事項は次のとおりである。

①流域ごとに土砂の流出特性が異なる。また、同一流域内でも粒径ごとに流出時間がずれる場合がある。
②多くの河川でしばしば指摘される浮遊土砂濃度ピークと水位ピークのずれの原因の一つとして、本川とは流出時刻が異なる支川からの供給土砂量が本川の土砂濃度が強く影響を与えることが挙げられる。
③涸沼川28.1kmのウォッシュロード量は、涸沼川上流および片庭川・稲田川両支川のそれを足し合わせることで予測可能である。これは、ウォッシュロードについてはサブ流域のそれを足し合わせる水文学的手法で動態が表現できる可能性を示唆するものである。

以上の結果は、流域土砂動態把握手法の開発に関して、一つの大きな流域を地質・地形学的観点・土地利用の観点等からいくつかのサブ流域に分割し、それぞれの出口で土砂動態を観測あるいは予測すれば、下流域の任意の点での流送土砂の予測ができる可能性を示唆するものである。今後は観測精度の向上を目指すのはもちろんのこと、性質の異なる多くの小流域での土砂動態について検討し、流域の状況と土砂流出の関係について調べていきたい。

参考文献

- 1) 藤田・宇多・服部(1995)：水系土砂収支分析のための「有効粒径集団」の考え方の提案、土木技術資料、Vol. 37、No. 12、pp. 34-39.
- 2) 望月ほか(1997)：涸沼川における流砂観測、水工論文集、Vol. 41、pp. 1011-1016.
- 3) 建設省技術研究会(1968)：河床変動に関する研究、第21回建設省技術研究会報告、pp. 12.
- 4) 平林・宇多(1995)：支川稲田川の流入が本川涸沼川の蛇行特性に及ぼす影響、年講概要集、Vol. 50、pp. 454-455.
- 5) 宇多・平林・藤井・深谷(1994)：涸沼川におけるポイントバーの発達過程の分析、土木技術資料、Vol. 36、No. 7、pp. 70-75.

(1997. 9. 30受付)