

礫床河道の複断面化が流砂環境に及ぼす影響

福島雅紀* 箱石憲昭**

1. はじめに

1990年代後半から、礫床河道において、樹林化と呼ばれる現象が取りざたされるようになった。樹林化した河川における断面形変化の特徴は、礫床河道の特徴である単断面形が複断面化し、低水路が固定化されたことであり、治水、環境、利用の面で種々の問題を引き起こすことから、樹林化対策は河川管理上の重要な課題となっている。例えば、樹木群による河積の減少に伴う流下能力の低下、出水時における流木発生源の増加、樹林化した砂州の対岸側における水あたりの激化などが治水上の問題として挙げられる。また環境面では、樹林化に伴う河原の減少により、河原固有生物の減少、さらには樹林化の原因となる樹木が外来種であることが多いことから、樹林化が生じる前の生物相が一変するなどといった問題を生じる。利用面から見ると、樹木群が密生することで人々の水際へのアクセスを阻害すること、さらには人目につきにくい空間を形成することから不法投棄等の問題を誘発するなどの問題も生じている。一方、堤防付近に存在する樹木群による堤防侵食の抑制、都市における緑地空間の形成などの利点を有することも忘れてはならない。

河川・ダム水理チームでは、樹林化の原因が土砂問題と関連が深いことから、土砂の連続性に着目した河原再生に着目している。以下、多摩川永田地区を対象として、樹林化（複断面化）の進行に伴う流砂環境の変化について考察し、樹林化対策を検討する上で注目したい留意点を整理した。

2. 検討区間の概要

2.1 礫床河道の特徴と樹林化

河道を構成する河床材料は大別して、礫（粒径 $> 2\text{mm}$ ）、砂（ $2\text{mm} \geq \text{粒径} > 0.074\text{mm}$ ）、シルト・粘土（粒径 $\leq 0.074\text{mm}$ ）で構成され、主として礫で構成された河道を礫床河道と言う。特に、

山本他（1993）は河道の特性を河床勾配や粒径で特徴づけられるセグメントで分類し、粒径に着目した時、この礫で構成された区間をGセグメントと表現した。その礫床河道の特徴としては、河床が粒径 2mm 以上の礫で構成されていることに加え、以下のような特徴が挙げられる。①河岸を構成する河床材料は表層に砂、シルトが薄く乗ることがあるが、低水路を構成する河床材料とほぼ等しい。②河床勾配は $1/100 \sim 1/2000$ 程度である。③河道法線形の蛇行は基本的に小さいが河床勾配が緩やかになるに従って蛇行が大きくなる。④河岸は比較的侵食されやすく、その結果として河道横断形も単断面河道となる。⑤地形区分として、扇状地や谷底平野などで見られる。

樹林化とは、堤防と堤防で囲まれた河道内に樹高 $10 \sim 20\text{m}$ 程度の樹木で構成された樹木群が形成されることを表現したものであるが、樹林化の定義は定性的であり、前述の数値は一つの目安を示したものである。一般的には高水敷化した箇所には樹木群が形成されることが多く、ここでは樹林化を促進する木本としてハリエンジュを想定し、それが5年程度安定的に成長した場合の樹高を示したが、樹林化の厳密な定義ではない。空中写真を用いた全国的な調査も実施され、雄物川、阿賀川、神通川、多摩川、天竜川、重信川などで樹林化が顕著に進行していることが確認されているが（島谷・皆川、1998）、ここでも樹林がまとまって見られることをもって樹林化と定義している。

2.2 永田地区の概要

永田地区は、多摩川の河口から約 52km 地点に位置し、永田橋（ 51.7km ）と羽村大橋（ 53.3km ）に挟まれた約 1.6km 区間を指す。1975年当時の永田地区は、広い礫河原と水深の浅い平らな滯筋の扇状地特有の河道形状であった（河床勾配 $1/250$ 、川幅 300m 程度、河床材料の平均粒径 3.7cm ）。しかし、大量の砂利採取が行われたこと、利水施設等の整備により上流からの土砂供給量が減少したこと、さらには河川流量が安定したことにより、河道形状が複断面化し低水路が固

定された。図-1に示す定期横断測量結果の代表断面を見ると、経年的に高水敷が形成されるとともに、低水路が局所的に洗掘されてきた状況を確認できる。なお、低水路幅は最も狭い部分で50m程度まで縮小した。また、永田地区の上流から河床低下が進行することで河床勾配も1/350程度と緩勾配化した。写真-1は、52.8km付近を上流側の橋梁から撮影した写真であるが、右岸側の堤防を確認できない程度に樹木が繁茂している。

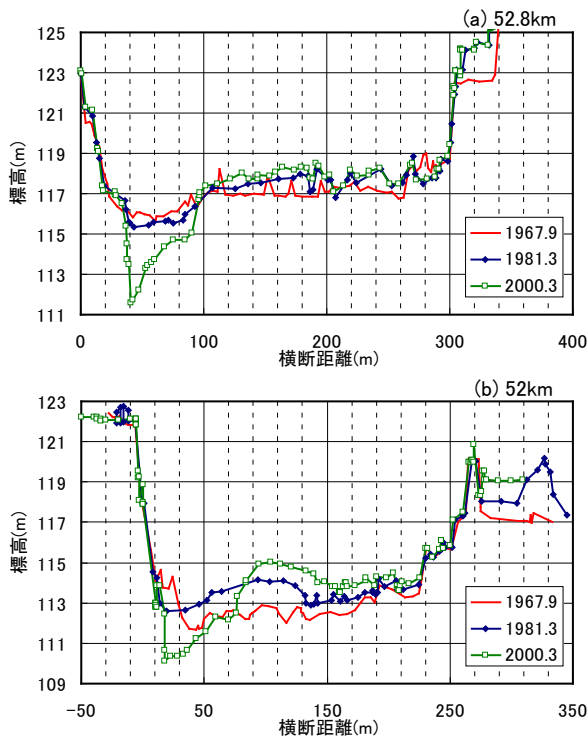


図-1 河道横断形の変化（52.0kmおよび52.8km断面）



写真-1 永田地区における樹林化の状況

2.3 河道修復事業の概要

永田地区では、樹林化の進行に伴って減少した河原環境を復元するため、河道修復事業を実施した（海野他、2006）。具体的には、51.8～52.2km区間の高水敷に繁茂するハリエンジュなどの樹木を伐採・伐根し、低水路幅を拡大するように高水敷を掘削した。最大で幅40m、深さ2m

程度の掘削が行われ、2002年3月までに完了している。また、56km地点の小作堰で浚渫された砂礫をダンプで運搬し、羽村大橋付近に敷設している。2001年以降、ほぼ毎年2月までに実施され、出水に伴って生じる流水の作用で侵食・運搬され、下流河道へと供給される。なお、敷設量は空隙除きで1,800～12,000m³であった。

3. 複断面化の進行状況の実態

3.1 航空写真に見る平面形状の変化

写真-2は、1947年、1961年、1974年、1984年、

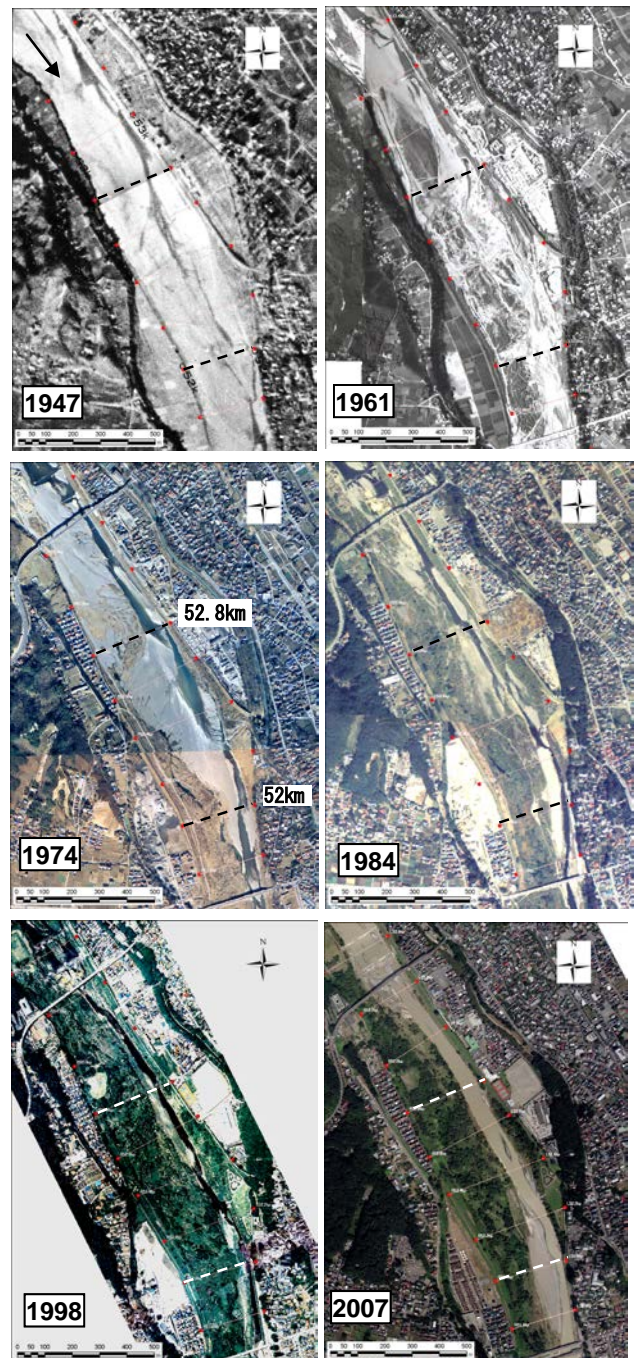


写真-2 航空写真で見える平面形状の変化(赤点:距離標)

1998年、2007年（9月出水後）に撮影された航空写真である。1947年当時は白く見える砂礫河原が堤間幅全体に広がり、滯筋（黒く見える部分）も河道の中央付近を蛇行していた。1961年の写真には砂利採取によるものと考えられる車輪跡が右岸側を中心に見られる。また、図-1の1967年9月の地形にも同様に人為的な改変の跡を確認でき、この頃の掘削量が42,000t/年とも言われるように（小倉他、2003）、多量の砂利採取が行われていたことを示している。ちなみに、この砂利採取量は、上流から供給される土砂量の数年分の土砂量に相当することが確認されている（服部他、2003）。その後、図-1の横断図でも確認できるように1981年には右岸側の河床に土砂が堆積し、それ以降、複断面化、そして樹林化が進行したことを1984年以降の航空写真からも確認できる。

3.2 定期横断測量結果に見る断面形の変化

図-2は、定期横断測量結果から算出した低水路幅、高水敷川幅比、比高差の時間変化を示す（福島他、2008）。ここで、低水路幅は等流計算によって算定した平均年最大流量時の水面幅である。また、高水敷川幅比は、堤間幅（川幅）から低水路幅を差し引くことで高水敷幅を求め、高水敷幅を川幅で割った値、すなわち川幅に占める高水敷幅の割合を表す。比高差は、それぞれ上述した高水敷および低水路の平均河床高の標高差である。

低水路幅の変化を見ると、1967年当時から100m以下と狭い区間もあったが、永田地区では全区間で低水路幅が縮小し、最大で1/4程度の川幅となった箇所もある。また、そのような場所では高水敷川幅比が増加し、川幅の8割を高水敷が占める区間も800m程度存在する。比高差についても同様に、永田地区において1967年当時に比べて1~2mと急激な増加が見られる。52.4~52.8km区間では1980年代に一時的に比高差が小さくなったが、これは図-1(b)に見られるように、低水路内への砂礫の堆積によるものと考えられ、このような砂礫の堆積による滯筋の蛇行が、川幅全体に礫河原を作る駆動力になっていたと考えられる。ただし、低水路内への砂礫の堆積が先であったか、側岸侵食に伴う低水路の蛇行が先であったかについては厳密には解析していない。また、小作堰の下流では比高差の増加が顕著でないが、これは羽村堰が固定堰であるのに対して、小

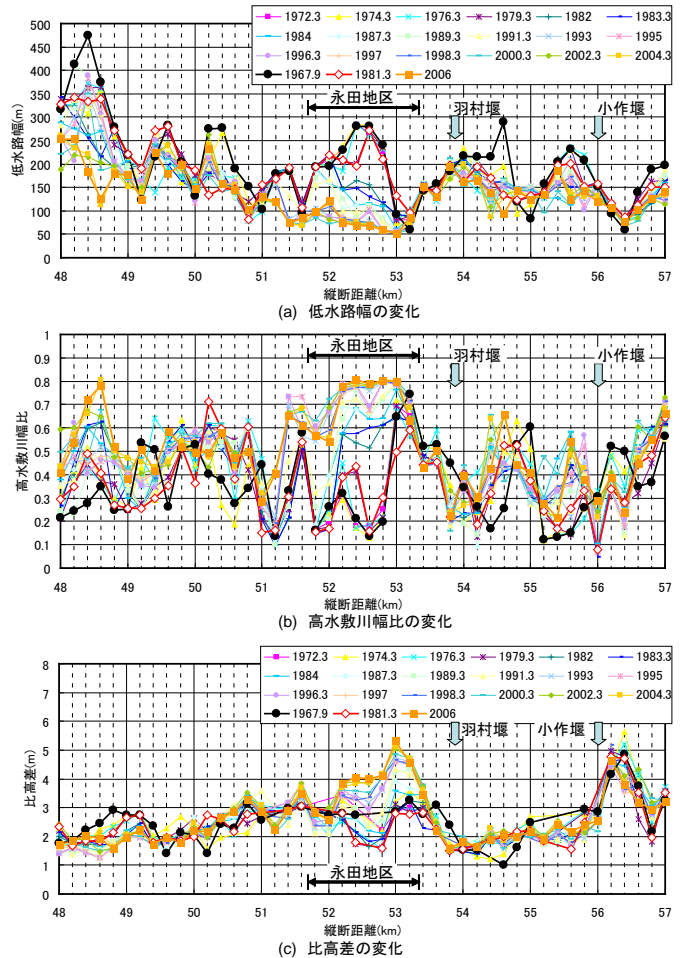


図-2 低水路幅、高水敷川幅比、比高差の変化

作堰は可動堰であることで土砂の連続性が比較的確保されていたためと考えている。

4. 水理量の変化に見る流砂環境の変化

4.1 検討にあたって

本節では、流砂環境の変化を水理量の変化から考察する。考察にあたって、水理量と河床材料の移動しやすさを関連付けておくことが有効となる。図-3は、永田地区における線格子法による河床材料調査結果から平均的な粒径加積曲線を求め、それぞれの粒径階に対する限界摩擦速度を算定した結果を表す。ここで、粒径階とは粒径をある幅でいくつかの集団に分割し、それぞれの幅での代表的な粒径を意味する。現地の河床材料が混合粒径であることを考慮して、岩垣の式および芦田によって修正されたEgiazaroffの式（芦田・道上、1972）を用いて限界値を算定した。また、参考までに岩垣の式による一様粒径の場合の限界値も示した。Ashida-Egiazaroffの曲線を見ると、D30（粒径23mm）、D50（粒径37mm）、D90

(粒径100mm)の移動限界摩擦速度がそれぞれ0.16m/s、0.17m/s、0.21m/sであることを確認できる。混合材料の移動特性として、平均粒径よりも大きな粒径の材料はそれが単体である場合に比べて動きやすく、小さい粒径の材料は動きにくくなるのが混合効果として知られているが、D90に相当する粒径100mmについて見ると、単体で存在する場合に比べて、2/3程度の流体力で移動を開始することが分かる。

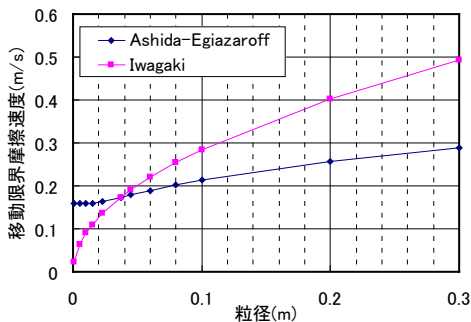


図-3 粒径ごとの移動限界摩擦速度

次に、4.2節に示す河道に4.3節で示す出水が作用した時のピーク流量時の摩擦速度の縦断分布、およびD30、D50、D90の粒径に対する移動可能継続時間の変化を調べる。解析にあたっては、一般的な流れの基礎式である式(1)、(2)を用いた。細田(土木学会、2002)に従い、スタガード格子を用いて差分化し、常射流が混在する流れ場を不定流解析によって表現する。なお、細田(土木学会、2002)に掲載されたモデルを一般断面に拡張したものをここでは用いている。

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(uQ) + gA \frac{\partial H}{\partial x} + gA \frac{n^2 u |u|}{R^{3/4}} = 0 \quad (2)$$

ここで、 A :河積(m²)、 Q :流量(m³/s)、 u :流速(m/s)、 H :水位(m)、 n :粗度係数(m^{-1/3}・s)、 R :径深(m)、 g :重力加速度(m/s²)、 t :時間(s)、 x :縦断距離(m)である。

4.2 対象河道

検討の対象とした河道は、1967年9月(以下、1968年河道)および2000年3月(以下、2000年河道)に実施された定期横断測量結果から作成した河道である。複断面化が進行する前の比較的フラットな河道形状、および複断面化が進行し比高差が最大で5m程度になった河道形状にそれぞれ

相当する。河道の粗度係数としては、2002年から2004年にかけて発生した出水の洪水痕跡水位を不等流計算によって比較的良く再現した粗度係数0.032(m^{-1/3}・s)を河道内で一様に与えた。なお、これらの出水時に高水敷は冠水していないことから、高水敷の粗度は表現していない。したがって、以下では断面形の変化のみによる複断面化の影響を評価するものであり、樹木群による粗度係数の変化を考慮すれば、その影響がさらに強調されることを追記しておく。

4.3 対象出水

検討の対象とした出水は、図-4に示す2006年10月6日(ピーク流量430m³/s、以下、2006年10月出水)、2007年9月7日(ピーク流量2,900m³/s、以下、2007年9月出水)である。流量値は、調布橋水位観測所の水位データを2005年H-Q式を用いて換算した値である。流量ハイドロを比較すると、2006年出水がほぼ平均年最大流量相当の出水であったのに対して、2007年9月出水は、約30km下流の石原水位観測所で計画洪水水位を超過する戦後2番目の水位を、上流の小河内雨量観測所で既往最大の総雨量を記録するなど、大規模な出水であった。しかし、洪水継続時間に大きな差はなかった。

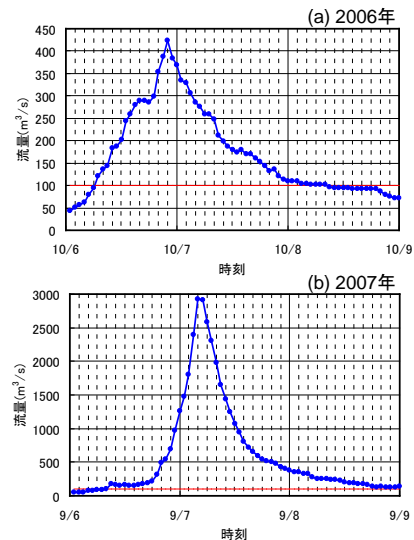


図-4 流量ハイドログラフ

4.4 攪乱強度の変化

図-5は、流量ピーク時の摩擦速度の縦断分布を複断面化の前後で比較した結果であり、図中にはD30(二点鎖線)、D50(一点鎖線)、D90(点線)の移動限界摩擦速度を記入した。平均年最大流量相当の2006年10月出水ピーク時の図-5(a)を

見ると、一部の区間を除き、2000年河道で摩擦速度が増大している。特に、複断面化の進行が顕著であった永田地区では、摩擦速度の増大の割合が大きい。また、平均年最大流量時の出水で、2000年河道の永田地区全域でD90相当の礫が移動する状況は、福岡(2008)の指摘する大きな河床材料の持つ河床を安定化させる役割を考えると深刻である。一方、1968年河道では、河床材料の停止区間と移動区間が存在する。以上の結果から、複断面化は河床の安定化機構を破壊し、低水路河床を低下させることで複断面化をさらに進行させることが分かる。なお、50km付近で1968年河道の摩擦速度が大きいのは、その当時の低水路幅が上下流に比べて狭かったためである。

2007年9月出水時には、高水敷まで冠水していることから、断面平均された摩擦速度の縦断分布では厳密な議論はできないが、52.8km付近の摩擦速度は、1968年河道に比べ2000年河道の方が低下している。これは、摩擦速度が断面平均値であることに加え、複断面化に伴う摩擦速度の増大により河床が低下し、52.8km付近から下流にかけての河床勾配が緩くなってきたことによると考えられた。一方、その上流側では52.8km付近の河床が低下することで河床勾配が増加し、摩擦速度も増加したと考えられた。

4.5 攪乱の継続時間の变化

ここでは、ある粒径に着目し、その粒径が移動可能な継続時間の变化について考える。この移動可能な継続時間の变化は、ある区間から流出、もしくはある区間へ流入する流砂量を変化させることとなる。したがって、この变化が上下流で異なった場合、河道では土砂の侵食、もしくは堆積が生じることとなる。

図-6は、対象出水が作用した時の52km断面の摩擦速度の時間变化を示す。図-5と同様に、D30、D50、D90の移動限界摩擦速度を記入した。複断面化に伴ってD90粒径が移動可能な時間が2006年出水の場合で2時間から32時間以上に、2007年出水の場合で26時間から52時間に変化している。同様な図面を紙面の関係で示していないが、複断面化の進行が顕著でない永田地区の上下流区間と比較すると、同地区では出水中に河床材料が移動している時間が相対的に長くなり、流入する河床材料に比べ流出する材料が多くなる。その結果と

して、河床高が徐々に低下してきたものと考えられる。しかしながら、52.0km断面の近年の変化を見ると河床高は比較的安定しており、その理由は現地踏査等の結果も合わせて考えると、河床材料の粗粒化によると推測される。一方、52.8km断面では、河床が緩勾配化したことにより、摩擦速度の時間変化に大きな違いは見られなかった。総じて見ると、52.0km断面は粗粒化によって、52.8km断面は緩勾配化によって複断面化後の流砂環境の変化に河道が応答してきたものと考えられた。

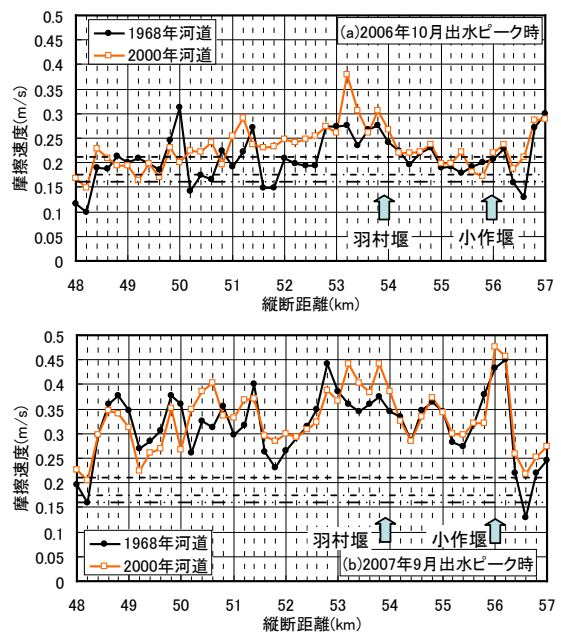


図-5 摩擦速度の縦断分布

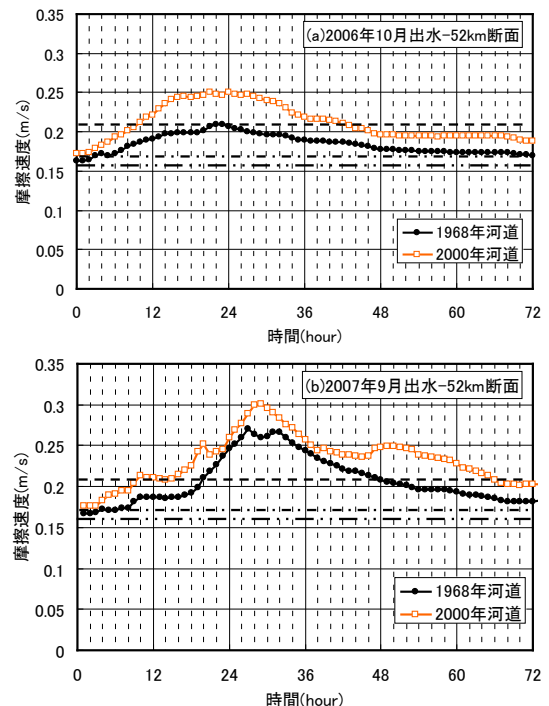


図-6 52km断面における摩擦速度の時間変化

5. まとめ

多摩川永田地区を対象として、複断面化の進行した河道の流砂環境の変化を攪乱強度の縦断分布、その継続時間の視点から調べた。その結果、複断面化した河道は、より複断面化が進行しやすい流砂環境へと変化し、複断面化をさらに進行させることが理解された。具体的には、複断面化が進行することで中小出水時においても比較的大きな掃流力が発生し、河床材料が移動しやすくなること、また、そのような状態が複断面化していない区間に比べて長時間にわたって継続されることから、同区間からの河床材料の流失が顕著となるものである。

河道の整備計画においては、整備後の河床の変化を簡便に確認するため、平均年最大流量時の摩擦速度が現況の±15%以内の変化であれば、河床は安定するものとしている。上述した結果は計画規模相当以下の出水、すなわち発生頻度の高い平均年最大流量規模の出水について、摩擦速度の縦断分布とその継続時間を事前に検討することの重要性を改めて示したものと言える。特に、摩擦速度の変化が小さい場合でも、その継続時間の変化に留意されたい。

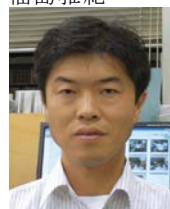
謝 辞

本研究を実施するにあたり、国土交通省関東地方整備局京浜河川事務所および国土交通省国土技術政策総合研究所には、貴重なデータを提供していただいた。また、4節で使用した不定流計算プログラムは、著者の一人が国土技術政策総合研究所に在籍した時に作成したものであり、元国土技術政策総合研究所河川研究室交流研究員の高部一彦氏（現日本工営株式会社）には協力していただいた。ここに記して謝意を表します。また、2節の内容は河川生態学術研究会多摩川研究グループの調査研究の一環として整理されたものである。

参考文献

- 1) 山本晃一・藤田光一・赤堀安宏・太田知章：沖積河道縦断形の形成機構に関する研究、土木研究所資料、第3164号、pp.3-8、1993
- 2) 島谷幸宏・皆川朋子：日本の扇状地河川の現状と自然環境保全の事例、河川の自然復元に関する国際シンポジウム論文集、(財)リバーフロント整備センター、pp.191-196、1998
- 3) 海野修司・齋田紀之・伊勢勉・末次忠司・福島雅紀・佐藤孝治・藤本真宗：多摩川永田地区における河道修復事業実施後の生物群集と物理基盤の変化、応用生態工学、第9巻、第1号、pp.47-62、2006.
- 4) 小倉紀雄・河川生態学術研究会多摩川研究グループ：水のこころ誰に語らん、リバーフロント整備センター、pp.104-106、2003
- 5) 服部敦・瀬崎智之・伊藤政彦・末次忠司(2003)：河床変動の観点で捉えた河原を支える仕組みの復元—多摩川永田地区を事例として—、河川技術論文集、第9巻、pp.85-90
- 6) 福島雅紀・武内慶了・坂野章・箱石憲昭：定期横断測量結果の河川管理・河床変動予測技術への活用に向けた検討、河川技術論文集、第14巻、pp.97-102、2008
- 7) 芦田和男・道上正規：移動床流れの抵抗と掃流砂量に関する基礎的研究、土木学会論文集、第206号、pp.59-69、1972
- 8) 土木学会：水理公式集例題プログラム集[平成13年版]、例題2-9、2002
- 9) 福岡捷二：石礫河川の移動床水理の諸問題と解決への道筋、水工学に関する夏期研修会講義集、第44回、A-1、2008

福島雅紀*



独立行政法人土木研究所
つくば中央研究所水工研
究グループ河川・ダム水理
チーム 主任研究員
Masaki FUKUSHIMA

箱石憲昭**



独立行政法人土木研究所
つくば中央研究所水工研
究グループ河川・ダム水
理チーム 上席研究員
Noriaki HAKOISHI