

急流都市河川豊平川における河道内構造物の 維持管理および植生管理に関する検討

—平成23年9月出水を受けて—

NUMERICAL CALCULATION OF BED DEFORMATION
AND FLOOD FLOW IN TOYOHIRA RIVER

内田有吏子¹・岩崎理樹²・山口里実³・鈴木英一⁴・清水康行⁵
Yuriko UCHIDA, Toshiki IWASAKI, Satomi YAMAGUCHI, Eiichi SUZUKI and Yasuyuki SHIMIZU

¹学生会員 北海道大学工学院 (〒060-8628 札幌市北区北13条西8丁目)

²学生会員 修士(工) 北海道大学工学院 (〒060-8628 札幌市北区北13条西8丁目)

³正会員 博士(工) 北海道大学工学研究院特任准教授(〒060-8628 札幌市北区北13条西8丁目)

⁴フェロー会員 北海道大学工学研究院特任教授(〒060-8628 札幌市北区北13条西8丁目)

⁵正会員 工博 北海道大学工学研究院教授(〒060-8628 札幌市北区北13条西8丁目)

Compound channel with a series of vertical groundfills in low water channel is popular countermeasure for flood and sediment control works in Japan, especially in steep slope rivers. The main river flowing through the city of Sapporo, Toyohira River, has 7 groundfills in low water bed. The river environments of Toyohira River have been changed in recently. For example, the number of riparian trees has been increasing in low water channel and the bed degradation has been going on rapidly. The changes of the river environment give various problems from the point of view of operation and maintenance, especially for groundfills in low water channel in Toyohira River. In this study, we performed numerical simulations of flow and bed deformation with the groundfills and riparian trees in Toyohira River during the flood in September 2011. The results showed clearly the effect of the groundfills and riparian trees for the balance of sediment transport in low water channel in Toyohira River.

Key Words : groundfills, numerical model, bed deformation, riparian trees

1. はじめに

豊平川は図-1に示すように札幌市を縦貫して石狩川に合流する急流都市河川である。札幌の開拓後、治水事業が進むにつれて従来の豊平川はその姿を大きく変えてきた。それに伴う治水安全度の向上は札幌の発展に大きく寄与したが、大都市に変化した札幌では急激な人口増加に対して更なる安全な河川整備計画が求められている。平成23年9月に発生した台風豪雨時、豊平川は過去最大の出水である昭和56年洪水に次ぐ大出水を経験し、本論文で後述する維持管理上の課題が顕在化した。

近年豊平川では河道内における植生の繁茂が著しく、水位上昇や複雑な流れに対する危険性が懸念されているが、植生の全伐採は現実的に困難であるため、効率的に



図-1 研究対象領域¹⁾

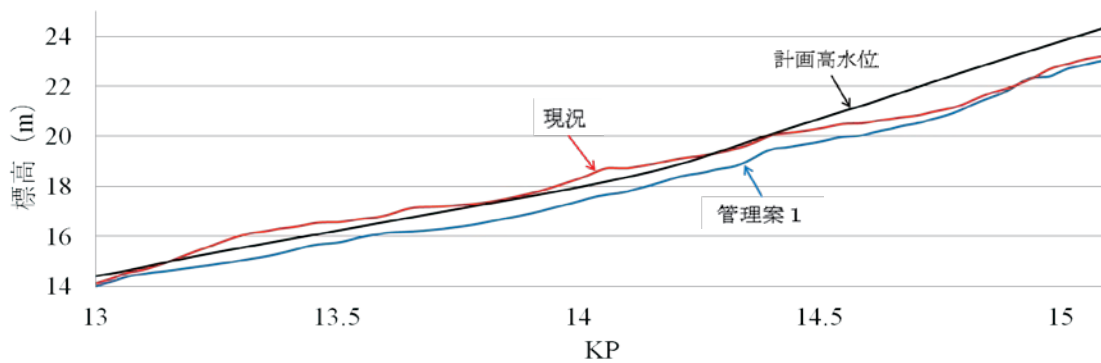


図-2 洪水時における現況と管理案1の水位計算

伐採管理していくことが望まれている。また、従来より河床低下が最大の課題であり、昭和38年までに連続的に7基の床止が配置されている。6-7号床止上の河床より約5m下には札幌市営地下鉄が通っており、連続的に配置された床止は高速流による河床低下に対する防止策として重要な役割を担っている。床止の配置から現在までの約40年間、環境面からの要請で各床止には魚道が設置され、上述したような河道内における植生の繁茂と合わせて河道内環境は大きく変化した。

このような河川の維持管理を考える上で、数値計算による流れと河床変動モデルの構築が重要であることは明らかであり、数多くの河床変動解析モデルが提案されている。清水²⁾らは豊平川にみられる複断面急流河川の低水路部分に連続的な床止が存在する場合の流れと河床変動の予測を目的に、移動床模型実験を行うとともにこれを再現できる数値計算モデルを開発したが、床止といった構造物を乗り越える土砂輸送についての適切な算定法においては問題が残っていた。

本研究は、まず豊平川河道内における流れに対する植生の影響を明らかにすると共に、豊平川維持管理に関する植生伐採方策を具体的に検討した。さらに、連続床止等の構造物や植生の影響を検出出来る河床変動モデルを構築し、平成23年9月豪雨時の出水を対象として、現在の豊平川における洪水流下での流況および河床変動特性を明らかにした。

2. 豊平川における河畔林の影響

現在、豊平川には35科113種オノエヤナギ・ハンノキ・オオアワダチソウなど¹⁾多種多様な植物が生息している。ここを生息域とするカワセミ等の鳥類の繁殖や鮭の遡上が確認されており、動植物に豊かな生育環境を与えると共に、札幌市の貴重な水辺空間となっている。植生を伐採する事によって、流下能力の向上を計ることは治水管理上重要であるが、継続可能な維持管理を考える上で植生の全伐採は現実的に難しい。そのため、洪水流に対する樹木の影響を明らかにし、効率的な伐採方法を検討することは今後の河川管理上重要となる。そこで本研究では数値計算手法により樹木の影響を検討し、具体

的な伐採案を試みる。解析モデルにはiRIC2.0³⁾に搭載されている数値解析ソルバーであるNays2Dを用いた。

(1) 数値シミュレーション

a) 粗度係数及び樹木抵抗についての検討

粗度係数の検討として、昭和56年の洪水を数値計算により再現し、痕跡水位と比較することにより粗度係数を設定した。検討した結果、低水路・高水敷・減勢工を有する床止部の粗度係数を0.038・0.04・0.08と設定した。また、樹林抵抗係数については植生の繁茂状態によって異なるが、ここでは植生は折れ曲がったりしないと仮定し円柱の抵抗係数1.2⁴⁾を用いた。河道断面データについては平成18年の測量データをもとに作成した。樹林抵抗の空間分布を考慮するために、植生密度を粗中密と三段階に分けて設定し、平成18年の航空写真と現場調査を基にこれらの値を設定した。設定した植生の密生度⁵⁾(流体の単位体積に占める植生の遮断面積)は粗・中・密でそれぞれ0.05・0.07・0.1である。

b) 計算条件

計算領域は下流端を東橋付近(石狩川合流点から約12.4km。以後石狩川合流点までの距離表をKPと表記する)、上流端をKP20.8(南20条付近)とする約8.4kmの区間とした。ただし、ここでの計算結果として示すのは樹林帯の密度が高いKP15.14(南7条大橋付近)からKP13(東橋付近)の結果である。流量は、既往最大の昭和56年8月洪水のピーク流量1417 m³/sを上流端から一定として与えた。境界条件は上流端の流速は上で述べた流量から与え、下流端の水位は等流計算から求めた。

(2) 河道内における河畔林の影響

a) 現況(樹木伐採前)の流れ

図-2の赤線は現況河道(植生伐採前)における水路中央部の水位計算結果である。樹木伐採前はKP13.2からKP14.3において計画高水位を上回っており、これは低水路内植生による流下阻害によるものと考えられる。

b) 水位低下に対する検討(管理案1)

図-2の青線は管理案1(伐採後)における水路中央部水位計算結果である。管理案1は全体的に植生の遮断面積を半減させ粗・中・密でそれぞれ0.025・0.035・0.05と

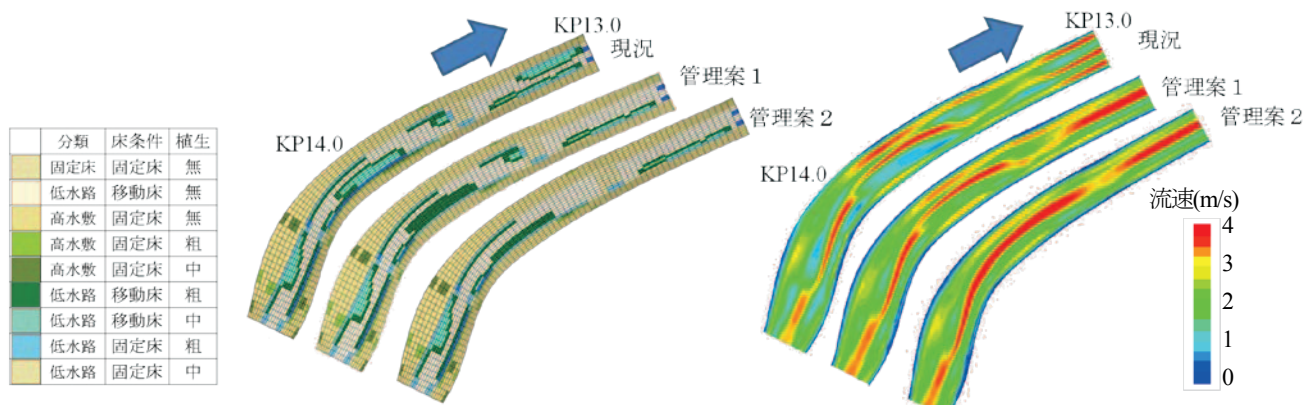


図-3 洪水時における現況と管理案1と管理案2の流速計算結果



写真-1 平成23年出水時6・7号床止付近

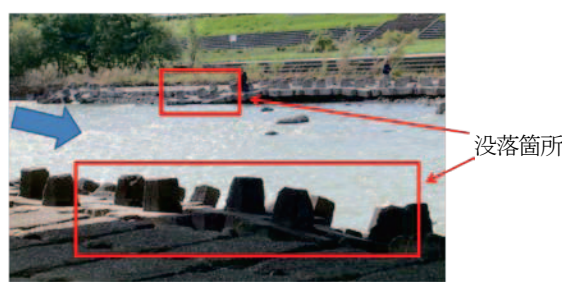


写真-2 平成23出水後の6.7号床止上流部侵食状況

した。さらに、KP13.5付近の水位上昇の原因と考えられる低水路内左岸にある樹林帯の全伐採とKP14付近の水位上昇の原因と考えられる樹林帯密度を中から粗に低下を行なった。流下能力向上により、管理案1では現況より1~1.5mの水位低下を実現でき、計画高水位に達するような水位上昇を抑えられていることが確認できる。

c) 堤防近接高速流の抑制 (管理案2)

図-3は現況と管理案1及び河道中央の流下能力を上げた管理案2の流速の計算結果である。管理案2は管理案1に加え、KP13.5曲線部分において低水路内樹木を伐採し、KP13.8蛇行部分において内側に繁茂する樹木を一部伐採したものである。現況と管理案1では、KP13.5や13.8付近で堤防付近左岸に4m/s以上の高速流が発生しているため、護岸が侵食される危険性がある。KP13.5の高速流発生の原因としては、低水路内の樹林帯を避けるように洪水流が流れたためと考えられる。またKP13.8は蛇行部であるため、外側に高速流が発生しやすい上、蛇行部分内側の樹林帯による流下能力低下が流れの集中を促したと考えられる。一方で管理案2では低水路に流れを集中させることができている。このように、植生伐採の検討は単純な計画高水位との比較のみならず、平面的な流れの集中度合に関する検討も重要となる。

3. 豊平川における河床変動計算特性

豊平川は従来幌平橋付近(KP16.6)から上流は急勾配である上、発電ダム建設による流下土砂の減少や治水工事の進展による掃流力の増大や玉石、土砂、砂等の土砂採取といった要因により、河床低下が生じていた。その

ため、昭和25年から昭和48年にかけて、水面勾配・河床勾配の緩和による河岸護岸工物の保護、河床低下の防止や低水路の安定を目的として、約KP13.5からKP17.4において0.7km間隔に全7基の床止が連続して配置された。前述のように、豊平川の地下には地下鉄といった交通施設が存在し、地下空間が高度に利用されており、豊平川の河床低下は単に河川環境の問題ではなく、健全な都市機能や住民の生活環境を維持するためにも深刻な課題となっている。また、自然環境の配慮から各床止に対して平成6~10年にかけて床止の魚道設置が行われ、床止周辺の流れや河床変動特性はますます複雑になりつつある。

(1) 平成23年9月豪雨時の河床変動

平成23年9月台風時の豪雨によって大きな河床変動と共に、床止構造物に甚大な被害があった。幌平橋(KP16.61)下流に位置する6,7号床止(KP16.50付近)では跳水の現象がみられ、上流側に高速流が発生したのがうかがえる(写真-1)。また、6,7号床止上流部は河床洗掘によって広範囲にわたって床止護床ブロックが被災し(写真-2)、床止直下流部では低水路中央部にマウンド状の土砂の堆積(写真-3)が生じているのが洪水前8月11日の床止直下流部(写真-4)と比較する事からも伺える。この堆積に伴い低水路兩岸の護岸付近では流れの集中によると思われる大規模な局所洗掘が生じた。平成23年9月の出水は近年では稀であり、今後の維持管理の方策を講じる上でこの洪水を検証する事は非常に重要である。そこで、本研究では平成23年9月出水時の豊平川における河床変動特性を明らかにすると共に、懸念材料の一つである植生についてその伐採の効果を検討した。



写真-3 H23出水後6.7号床止下流部の堆積状況



写真-4 H23出水前6.7号床止下流部



写真-5 低水路内に侵入している樹木（被災箇所直上流）

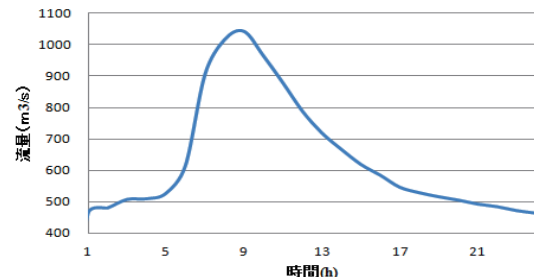


図-4 ハイドログラフ（雁来地点）

(2) 数値シミュレーションによる再現

a) 計算モデル

豊平川の河床変動解析を行うには、植生や床止を有する急勾配複断面における非定常洪水流とそれに伴う河床変動を適切に表現できる計算モデルが必要である。しかしながら、これらすべての影響を適切に評価することは現状では極めて困難であるといえる。

そこで、本研究では将来に豊平川のような急流都市河川における洪水流及び河床変動を予測可能なモデルを構築する事を念頭に置き、現在河床変動解析に一般的に用いられている平面二次元ベースの河床変動モデルを用いることで、本イベントの解析を行うこととする。解析モデルは、河川解析ソフトIRIC2.0³⁾に記載されている清水ら²⁾の開発した平面二次元の河床変動モデルに、掃流砂層モデル⁶⁾を組み合わせることにより、床止群等の固定床の上の流砂移動を考慮したものである。このモデルでは、流れに対する樹木の抵抗を流体抗力として考慮することが可能である。また、流砂モデルとしては全掃流砂量を芦田・道上式で求め、流砂ベクトルの分配には二次流と横断勾配の影響を考慮した渡邊⁷⁾の式を用いる平衡流砂量を基本としたスキームである。

b) 計算条件

粗度係数や樹木の抵抗係数については、前出の係数を用いた。計算領域はKP13.82（水穂大橋上流付近）～KP18.82（ミュンヘン大橋下流付近）とする約5.0kmの区間とした。ただし、ここで計算結果として示すのは床止が多く存在する南二十二条大橋（KP17.8付近）から南一条大橋（KP14.1付近）の結果とする。

境界条件として上流端の流速は流量から与え、下流端の水位は等流計算から求めた。河床材料の粒径は120mmとした。これは平成18年に行われた河床材料調査を基に、

KP19における代表粒径から算出した値である。

流量は、出水時の流量観測より水位と \sqrt{Q} をプロットし最小2乗法により直線近似式を求めたH-Q式を用い計算領域下流に位置する雁来大橋における観測水位を基にハイドログラフを作成し、上流端から流量を与えた。与えたハイドログラフに図-4に示す。河床変動計算は、低水路の移動床部分のみを行い、高水敷の侵食は行わない。

(3) 豊平川における河床変動特性

a) 現地観測値と計算結果の比較

平成18年度と平成23年9月洪水後に行われた現地観測の結果よりその間の河床変動量を求めたものを図-5に示す。6・7号床止下流付近に約2mの堆積が見られるが、これは写真3で示したような床止め直下流のマウンド状の堆積域に対応するものである。同様の堆積域が5号床止および4号床止でも生じているのがわかる。これに対して、6・7号床止～8号床止間や3号床止～4号床止間の低水路内で洗掘が生じているのがわかる。図-6～図-8に河床変動再現計算の結果を示す。図-6は流量減水後の6日19:00における河床変動量を示したものである。図-6をみると計算結果は上述の堆積域や洗掘域を定性的には良好に再現している。これより数値計算モデルによる今回の洪水流及び河床変動を定性的に評価が可能であるとして、以下により詳細な検討を加える。

b) 植生による流速への影響

図-7は流量ピーク時6日9:00の流速及び流線についての再現計算結果を示した。一般に床止通過時に流れは横断方向に均一となるため、床止上では流線はほぼ等間隔に広がりを示すはずである。しかし図-7を見ると、床止上の流線の間隔は不均一であり、高水敷に流線の集中が見られる床止上もあることがわかる。これは、現況植生

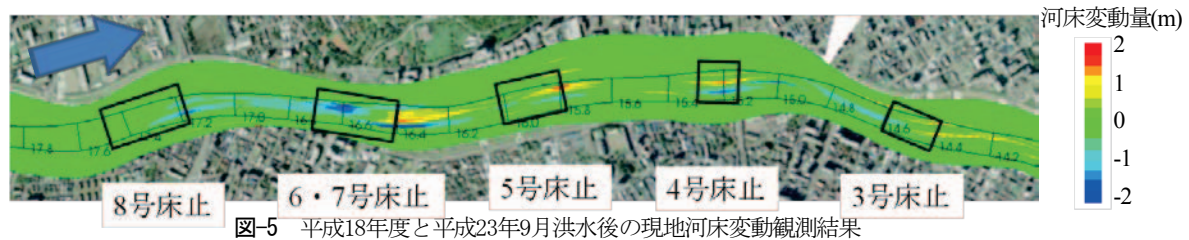


図-5 平成18年度と平成23年9月洪水後の現地河床変動観測結果

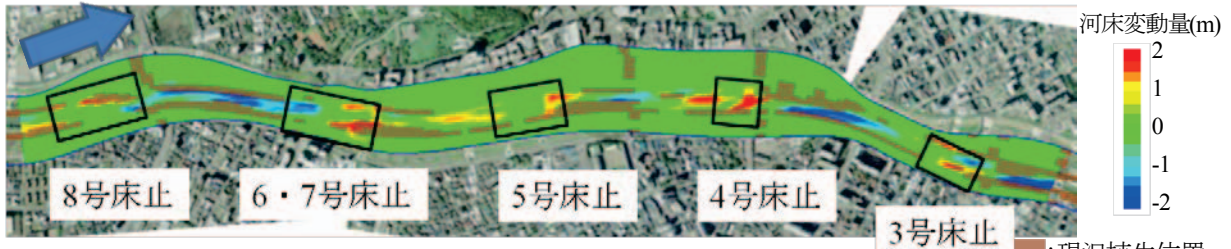


図-6 平成23年9月6日19:00における河床変動計算結果(河床変動量)

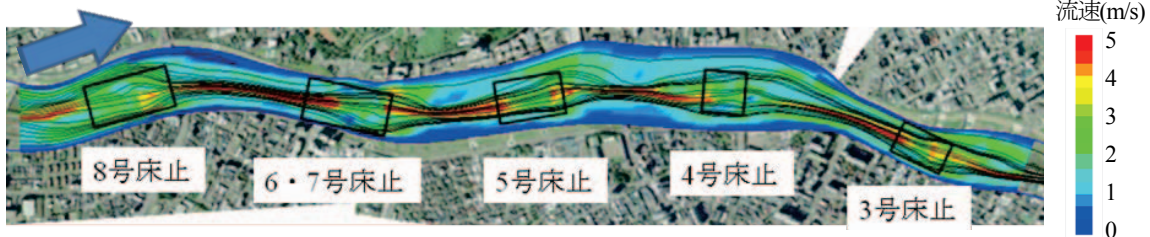


図-7 平成23年9月6日ピーク時における河床変動計算結果(流速・流线)

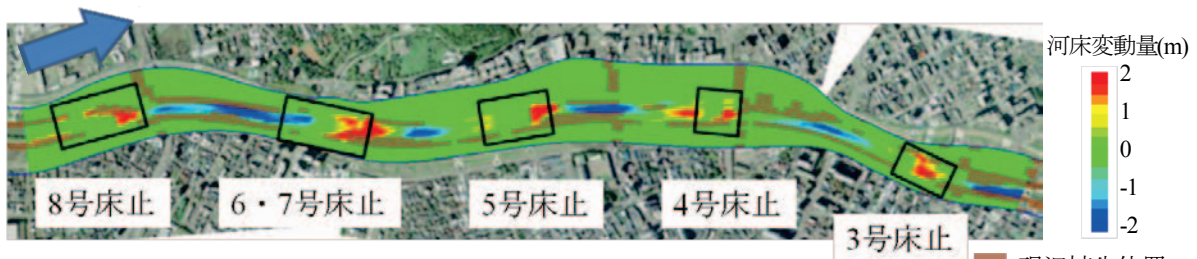


図-8 平成23年9月6日ピーク時における河床変動計算結果(河床変動量)

位置(図-6に示している)から、樹木の影響であると考えられる。床止は元々流下能力を低下させる性質を有する構造物であり、植生の影響で更に流下能力が低下して高水敷の広い範囲にまで高速の洪水流が広がりやすくなることは容易に想像できるが、図-7はその危険性を具体的に示す結果となった。また、床止間の低水路には5m/s以上といった高速流が発生しているのが分かる。この高速流は低水路幅よりも狭く集中して発生している。本研究で対象にした領域は床止間低水路に植生が多く繁茂している(写真-5)ことから、低水路内に繁茂する植生によって、低水路内により集中した高速流が発生しているものと考えられる。結果として、床止上では高水敷にまで大きく流线が広がってしまっているのに対して、床止間では低水路幅よりも狭く集中しているといった歪な流況が生じていることがわかる。

c) 河床変動に関する考察

図-8にピーク時の河床変動量について再現結果を示す。図-8をみると、床止間のいずれの低水路においても約2mの洗掘がみられる。これらの洗掘域では、ピーク時の河床変動量(図-8)と流量減水後の河床変動量(図-6)を

比べると、ピーク後に若干の埋め戻しが生じていることがわかる。しかし、3号床止～4号床止間と6・7号床止～8号床止間ではほとんど埋め戻しが生じずに、出水を通して著しく河床が低下する傾向が示された。この要因としては、4号、8号床止上流で土砂が補足され、3号や6・7号床止への給砂量が減少し、床止間の洗掘が誘発されたためと考えられる。

洗掘が激しい2区間内では低水路全体ではなく、局所的な洗掘が見られた。これは前述のように区間内に存在する植生により流れが部分的に集中し、局所的な洗掘を誘発させている可能性があると考えられる。特に、3号床止と4号床止間や6・7号床止と8号床止間は低水路内両岸に植生が多く繁茂しており、前出の歪な流況が床止上下流の河床変動特性に大きく影響していると考えられる。そこで、以下に植生の有無による検討を加える。

d) 河床低下に対する植生伐採の効果

河道内の河床変動に及ぼす植生の影響を検証するため、河道内に植生が無い(樹木による抵抗が無い)状態を数値計算において仮定し、同様の条件で検討を行なった。

図-9は植生が無い状態での計算結果であり、平成23年

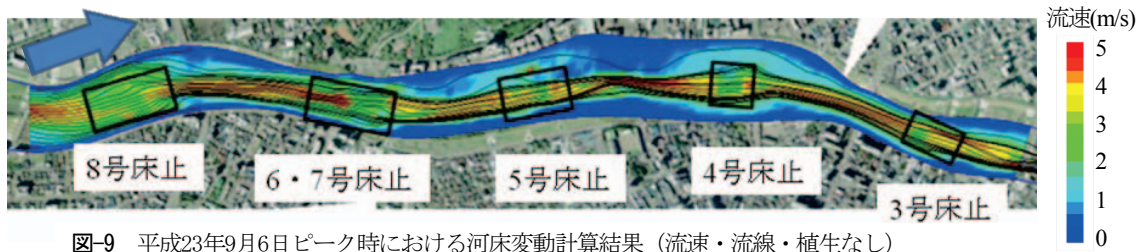


図-9 平成23年9月6日ピーク時における河床変動計算結果（流速・流線・植生なし）

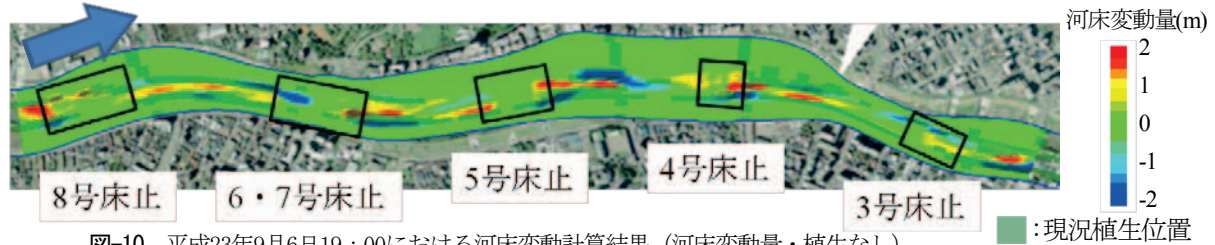


図-10 平成23年9月6日19:00における河床変動計算結果（河床変動量・植生なし）

■：現況植生位置

9月6日流量ピーク時における流速と流線を示す。床止上流部分の低水路には高速流が発生しているが、5m/s以下に抑えられ、この高速流が発生している部分も現況の場合(図-7)よりも低水路全体に広がっている。また流線を見ると、床止における膨らみも抑制されており、図-7に見られた歪な流況が改善されていることが確認できる。

図-10は植生無しの条件における流量減水後の6日19:00における河床変動量を示している。現況の場合(図-7)では洗掘が起こっていた6・7号床止上流部低水路や4号床止下流部は、植生無しの場合、堆積が起こり河床低下が抑制されているのがわかる。

5号床止や6・7号床止直下流部に約2mの洗掘が起こっているが、このような洗掘が起こっている場所には現況で植生が繁茂している箇所である。写真-3～写真-4を見てもわかるように、植生が繁茂している箇所には元々局所的な土砂堆積が起こっていると考えられる。そのため、植生の伐採によりこのような局所的な堆積が解消され、本来河川が持つべき河床状況に近づくことができる。

4. おわりに

急流都市河川である豊平川では平成23年9月の出水の際に、局所的な著しい河床低下や床止上流部が大きく被災する等、植生繁茂や床止の維持管理に対する課題が顕在化した。本研究では、植生の影響を明らかにし、植生の効率的な伐採手法を検討した。また、床止等の固定床上の流砂現象や植生の影響を検討できるモデルを用いて河床変動再現計算を行い、その結果から植生と床止が流れの複雑さを誘発し、河床変動に大きな影響を及ぼす事を明らかにした。これらをまとめると豊平川河道内管理において以下の点に留意する必要があると考えられる。

・樹木の管理を行う上では、水位による安全管理だけでなく平面的に流れを検証することが重要である。また、その際に留意する点は、まずは低水路樹木を優先して伐採し、特に蛇行部分においては内側に生息する樹木を優

先して伐採することにより高水敷に高速流が乗り上げようとする危険な流れを抑制する必要がある。

・連続的に床止が配置されている豊平川において、低水路内の樹木は、流れを局所的に集中させる（高速流の発生）一方で、床止上の流れに対しては高水敷の広い範囲に高速の流れを発生させる危険因子となっていることを具体的に示した。床止の性質上、床止周辺である程度の土砂堆積が生じることはやむを得ないものの、上述のような植生の影響が床止間の河床低下と床止での土砂堆積を助長している結果が示された。

謝辞：本研究は北海道開発局札幌開発建設部より貴重なデータのご提供頂いた。快く提供していただいた関係者各位に心より厚く御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 北海道開発局札幌開発建設部:石狩川流域委員会現地調査(第3回)資料, 2005.
- 2) 清水康行, 藤田陸博, 平野道夫:連続床止工を有する複断面河道における流れと河床変動の計算, 水工学論文集, 第43巻, pp. 683-688, 1999.
- 3) <http://i-ric.org/ja/index.html>
- 4) 重枝未玲, 朝位孝二, 坂本洋, 長太茂樹, 秋山壽一郎, 樋口直樹, 重岡広美, 徳永智宏:大野川とその派川の乙津川を包括した平面2次元洪水流解析と河道内樹木が乙津川への分流量に及ぼす影響, 河川技術論文集, 第12巻, pp.85-95, 2006.
- 5) 清水義彦, 辻本哲郎, 小葉竹重機:平衡植生流れと浮遊砂輸送に関する数値計算, 水工学論文集, 第41巻, pp. 845-850, 1997.
- 6) 竹林洋史, 中元達也, 藤田正治:粘着性・非粘着性河床材料混在場における土砂輸送特性—トネサップ川を対象として—, 京都大学防災研究所年報, 第52号B, 2009.
- 7) 渡邊明英, 福岡捷二, 安竹悠, 川口広司:河道湾曲部における河床変動を抑制する樹木群水制の配置方法, 河川技術論文集, 第7巻, pp. 285-290, 2001.

(2012.4.5受付)