

樹木が密生する常呂川の洪水期間中の流れと河床変動の 一体解析法を用いた計画河道断面と樹木管理方法の提案

Flood Flows and Bed Variation in a Compound Meandering

Channel with Cultivated Lands and Trees

福岡 捷二¹・岡部博一²・飯島直己³

Shoji FUKUOKA, Hirokazu OKABE, Naoki IJIMA

¹ 中央大学研究開発機構 教授

² 国土交通省北海道開発局網走開発建設部治水課長

³ 中央大学大学院 理工学研究科 土木工学専攻 修士2年

要 旨

常呂川は低水路が大きく蛇行し、その水際には樹木が繁茂している。また、広い高水敷の大部分は耕作地として利用されており、洪水時は耕作地と流域で生産された土砂が濁水となり流下する。その結果、低水路河床には縦断的に土砂が堆積し、海域には多量の土砂が流出することからその原因の究明と対策が求められている。本研究では、蛇行低水路の土砂堆積機構と海域への土砂流出を平成18年10月に生じた大規模洪水を対象に0km~20km区間で検討を行った。はじめに、洪水前後の横断測量結果、及び河床材料粒度分布から低水路の土砂堆積、耕作地の浸食について検討した。次に、水面形の時間変化を解とする非定常平面二次元解析河床変動解析を適用し、洪水時の流れ場と河床変動を明らかにした。解析では、耕作地の浸食を表すために、低水路と共に高水敷の土砂移動も解いている。樹木群抵抗に関しては、樹木群の粗密を考慮した形で樹木群透過係数を決定している。また、河道に堆積する土砂量を再現するために、上流山地域から河川に流入する土砂量を考慮に入れた境界条件を用いた。浮遊砂による河道内土砂堆積には、上流山地域から供給される土砂が重要であることを示した。また、低水路河床及び樹木群内に堆積土砂は上流域及び河道内耕作地から供給されるシルトであることを示した。浮遊で流出する土砂は流下に伴い、分級が進み、洪水の上昇期に比較的粗い粒径の土砂が多く流出し、洪水期間中に二山の波形を形成することを示した。

《Key Words : vegetation, meandering low water channels, field erosion, flood flow, bed variation, unsteady two-dimensional river bed variation analysis》

1. 序論

日本の河川の多くは中下流域において、複断面蛇行河川である。複断面蛇行河川における洪水の流れ特性や河床変動特性については、多くの研究事例¹⁾がある。その中でも特に、岡田・福岡の研究²⁾では、全国主要河川のデータを用いて、わが国における複断面蛇行河川の平面形状特性を示し、大型蛇行水路実験により、流れと流砂量・河床変動に及ぼす水路の平面形状、水理条件の影響等を検討している。そして、それらの結果から、複断面蛇行河川における特徴的な二つの流れ、単断面的蛇行流れと複断面的蛇行流れの発生領域を提示し、低水路満杯程度の流量時に土砂輸送が最も活発に行われ、最大洗掘深が生じること等を示している。一方、近年では河道内において樹林化が進行している。

藤田ら³⁾は多摩川の扇状地河道を対象に樹林化のメカニズムを検討し、その進行予測モデルの構築を行っている。樹林化が進行すると、洪水の流下断面が狭められ、水位上昇等の治水上の問題が生じる。さらに、蛇行低水路沿いに樹木が繁茂すると、樹木内の遅い流れが低水路内に流入することで流速が低下し、低水路内に土砂が堆積し易くなることが考えられる。よって、河道線形と樹木群繁茂の位置関係が洪水流と河床変動に与える影響を明らかにすることが求められている。福岡ら^{4), 5)}は、複断面蛇行河川の低水路沿いに連続的に樹木が繁茂する場を想定した実験を行い、樹木群の影響によ

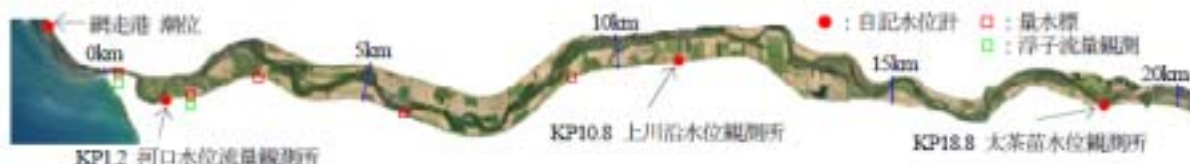


写真-1 H19年9月時の航空写真

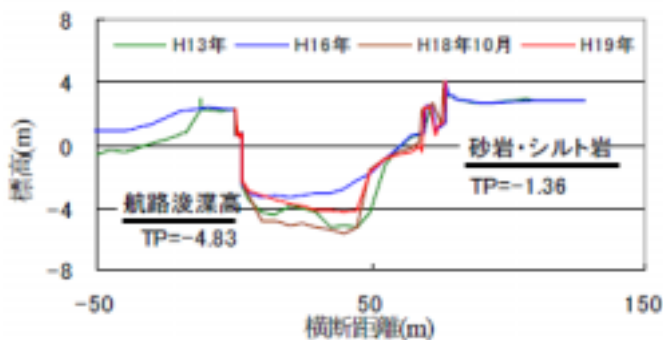


図-1 0.0km 地点における横断面の経年変化とボーリング調査結果

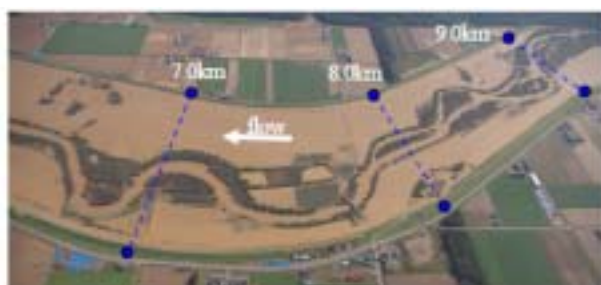


写真-2 H18年10月洪水時の航空写真 (7.0km ~ 9.0km 付近)

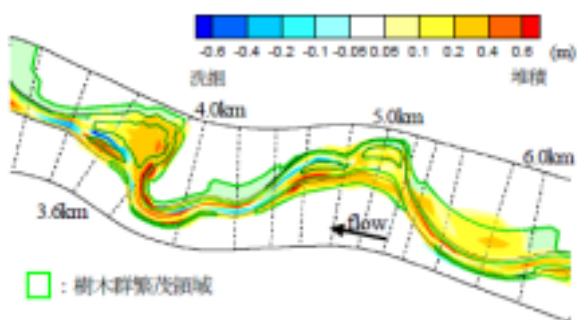


図-2 低水路における実測河床変動コンタ図

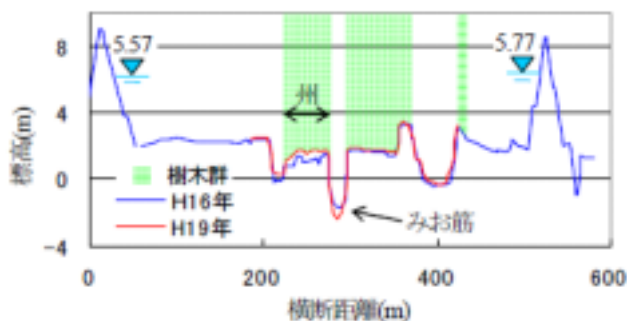


図-3 3.6km 地点の横断面と左右岸痕跡水位

り低水路内流量が少なくなること等を示している。また、江の川を対象に水害防備林が流れや河床変動に及ぼす影響の検討も行っている。しかし、このような実河川を対象とした検討事例は未だ少なく、今後の河川維持管理を考えていく上で、より検討例を増やすことが必要とされている。

北海道北東部を流れる常呂川は、低水路蛇行度が大きく、その河岸際には樹木が繁茂しており、高水敷は主にたまねぎ畑として利用されている。H18年洪水により、低水路河床には縦断的に土砂が堆積した。今後も、継続的に土砂が堆積すると、樹木の存在による河積減少に加え、河床が上昇することによる河積減少が生じるため、その原因と対策を把握することが求められている。

著者らはH18年洪水による土砂の堆積状況を調査し、河道特性との関係について検討してきた⁶⁾。本論文では、高水敷の広い耕作地と蛇行低水路沿いに繁茂する樹木群が洪水流と河床変動に与える影響について明らかにすることを目的としている。まず、実測データに基づき洪水流と土砂堆積の関係について検討する。そして、その考察に基づき非定常平面二次元河床変動解析を用いて、低水路内の縦断的な土砂堆積を再現し、耕作地と樹木群が洪水時の河床変動に与える影響に関して検討する。

2. 対象区間・対象洪水の概要

検討対象区間は常呂川の0.0km～20.0kmとした。写真-1はH19年9月時の航空写真に観測所の位置を併せて示している。約10kmピッチで観測所があり、洪水時は連続的に水位観測が行われている。また、下流区間では、量水標を用いた水位観測が洪水ピーク付近の約8時間行われており、0.2km、1.4km地点で浮子による流量観測が行われている。河床材料粒度分布に関しては、H15年に1.0kmピッチで低水路左右岸、H21年に4.0km左岸・9.0km右岸高水敷において調査が行われた。河口には大きな蛇行狭窄部を有しており、ボーリング調査により岸は露岩していることが分かっている。

図-1に0.0km地点における横断面の経年変化と河岸におけるボーリング調査結果を併せて示す。航路確保のためTP=-4.83mまで掘削が行われており、この掘削高以上は河床洗掘がさほど生じていないことが分かる。0.2km、0.4kmにおいても同様の傾向を確認しており、この蛇行狭窄部では河岸だけでなく河床にも岩が露出していると考えられる。写真-2はH18年10月洪水時の航空写真である。高水敷の耕作地は作物を収穫した後、裸地となっている。洪水時にはこれらが洗掘を受け、堤内の耕作地からの土砂流出と相まって⁷⁾、濁流となって流下している様子がうかがえる。H18年10月洪水は、河口観測所におけるピーク流量が計画流量(2000m³/s)の8割近い1600m³/s程度の大流量が流下した。

本研究では、このH18年10月洪水を対象に洪水流と河床変動の検討を行う。

3. 対象区間・対象洪水の概要

図-2に4.0km付近の低水路における洪水前後での実測河床変動コンタ図、図-3に3.6km地点の横断面と左右岸痕跡水位を示す。蛇行低水路に沿って樹木が繁茂している3.8km、5.4km付近において、顕著に土砂が堆積していることが分かる。痕跡水位を基に相対水深を求めると約0.5程度となり、流れは複断面的蛇行流れとなる。よって、流れの直進性が増し、低水路線形の影響を受けずに洪水流は流れていると考えられる²⁾。3.8km、5.4km付近では、蛇行低水路沿いの樹木群により流速が低減し、土砂堆積が生じたものと推察できる。写真-3は3.6km付近のH15年、H19年の航空写真である。3.6km地点左岸側の砂州において、樹木の繁茂領域が拡大している様子が見て取れる。図-2、図-3より、樹林化が進行している砂州(250m付近)では土砂が堆積しており、その右側のみお筋(300m)では洗掘が生

じている．図-4 に河床材料粒度分布を示す(調査位置は図-9 に示す)．これらは，対象洪水によって形成されたものではないが，その特徴は示していると考えられる．これより，低水路の河床材料は砂礫が主体であり，耕作地の材料はシルト・粘土質である．また，低水路内の河床材料は低水路蛇行の影響を受け，外岸側で大きく，内岸側で小さな材料となっている⁶⁾．

写真-4 は 3.6km 地点左岸砂州における H19 年時の現場写真である．砂州を形成している河床材料は砂礫であり，その上にシルト・粘土質の材料が堆積している様子が分かる．図-5 に 12.0km 地点の横断面を示す．洪水の作用により，左岸高水敷において 0.3m～0.4m 程度の洗掘が生じていることが推測される．以上のことから，洪水時はシルト・粘土質の材料で構成される耕作地が洗掘され，その細粒土砂が 3.6km 地点を含めて縦断的に堆積していると考えられる．



(a) H15年6月



(b) H19年9月

写真-3 3.6km 付近の航空写真



写真-4 H19 年 6 月時 3.6km 地点左岸砂州の現場写真

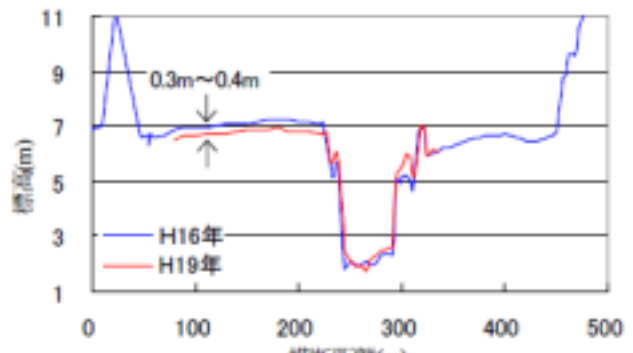


図-5 12.0km 地点の横断面

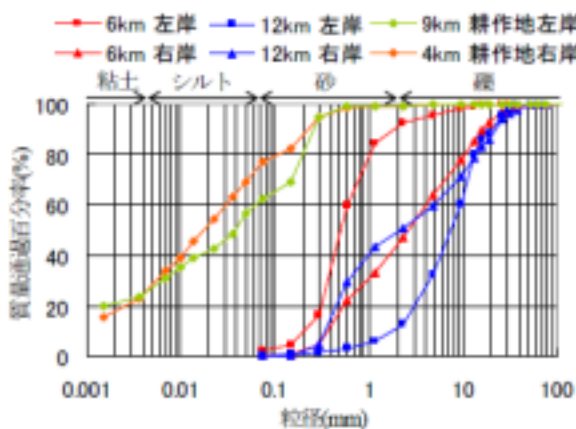


図-4 河床材料粒度分布

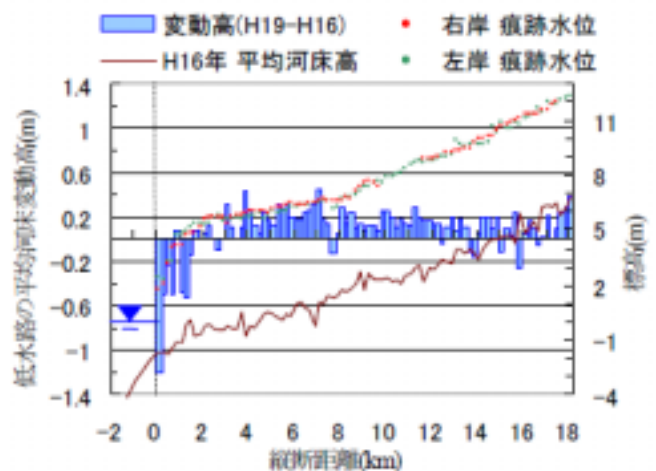


図-6 痕跡水位と低水路の平均河床変動高の縦断分布

次に、縦断的な土砂堆積を洪水流との関係から検討する。図-6 に H18 年 10 月洪水時の左右岸痕跡水位と低水路の平均河床変動高の縦断分布を示す。河口の蛇行狭窄部の影響を受け水位が堰き上がり、約 9.0km 付近まで水面が緩やかになっている。また、河口では洪水流が海に向かって流れ込むため、水面勾配が大きくなっている。対象洪水では縦断的に 0.2m 程度の土砂が堆積した。これは、耕作地から過大な土砂供給があったこと、また、上述したような蛇行低水路沿いの樹木群の影響により生じたと考えられる。そして、水面が緩やかになっている 3.0km~9.0km 付近では顕著に土砂が堆積し、水面が急勾配になる 0.0km~2.0km にかけては洗掘傾向にあることが分かる。特に、0.0km 地点では平均的に 1m 以上の河床洗掘が生じている(図-1)。

4. 非定常平面二次元河床変動解析

(1) 解析方法と解析条件

福岡は洪水中の水面形の時間変化に洪水流の全ての情報が現れているとの考えから、水面形の時間変化を解とした非定常平面二次元解析法を提案している⁸⁾。この解析法の特徴は、観測精度の高い水位ハイドログラフを上下流側の境界条件として与え、粗度係数は河道固有の一定値、樹木群透過係数は河道スケールやその繁茂状況による値を用いて⁹⁾、観測水面形を捉えるように水位と河床高を同時に解くことで、高精度に洪水流と河床変動の検討が出来る点にある¹⁰⁾。非定常平面二次元方程式は、蛇行度が大きい個所では十分に二次流を表現でき得ない。

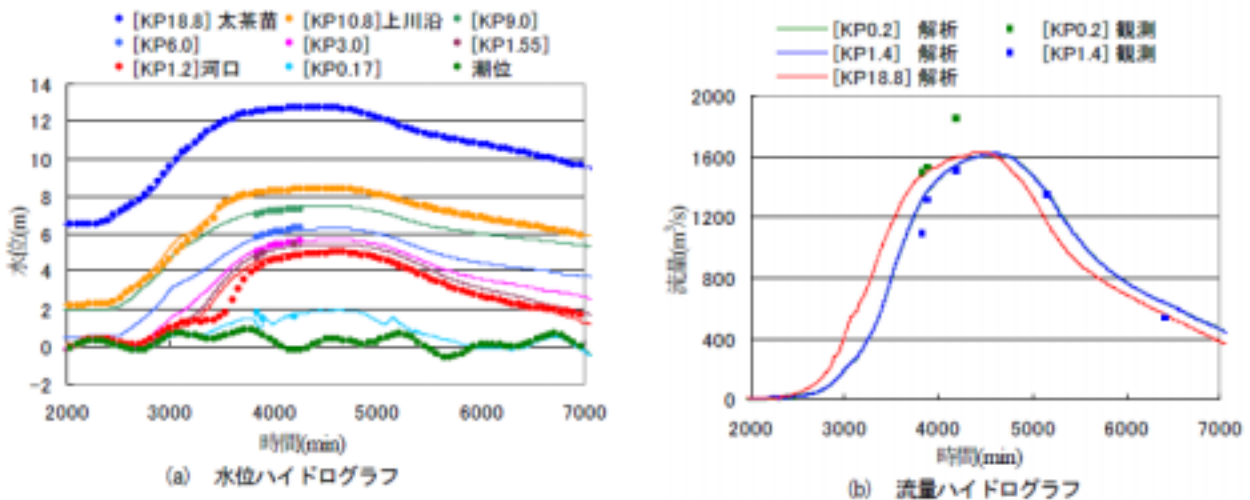


図-7 解析結果と観測値の比較

表-1 解析に用いた粗度係数と樹木群透過係数

粗度係数		樹木群透過係数	
低水路	0.020m ^{1/3} s	密な樹木群	10m/s
高水路	0.035m ^{1/3} s	疎な樹木群	35m/s~60m/s

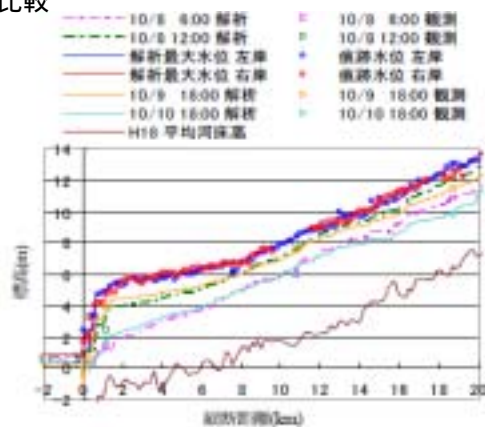


図-8 痕跡水位と解析最大水位の縦断分布及び解析水面形の時間変化

しかし，常呂川は広い高水敷，狭い低水路を有する河道であり，水位が高いときは複断面的蛇行流れとなることから，本解析法を適用し，高水敷の耕作地と蛇行低水路沿いに繁茂する樹木群が河床変動に与える影響について考察する．樹木群抵抗は式(1)に示す樹木群透過係数を用いて評価する．

$$(\tau_{kz}, \tau_{k\eta}) = \left(\frac{gh_{tree}}{K^2} \right) \sqrt{u^2 + v^2} (U, V) \quad (1)$$

ここで， K ：樹木群透過係数， $tree\ h$ ：樹高， g ：重力加速度， $(u, v) \cdot (U, V) : (x, y) \cdot (\cdot, \cdot)$ 方向流速成分である．従来までの洪水解析⁹⁾では，水面形の時間変化や流量ハイドログラフの算出を目的とし，樹木群抵抗はある区間の平均的な抵抗値として考えてきた．しかし，樹木群内の土砂堆積を表現するには，より詳細に抵抗分布を考慮する必要がある．ここで，一メッシュ毎に抵抗値を変化させることは実用的ではないと言える．

よって本解析では航空写真を用いて密に繁茂している樹木群には大きな抵抗値を与えることで，樹木群内の土砂堆積を再現する．流れの境界条件は，上流側に 18.8km 太茶苗観測所水位，下流側に網走港潮位を与えて計算した．河床変動解析では，縦断及び横断方向流砂量式に芦田・道上式¹¹⁾，長谷川の式¹²⁾を用いた．シルト質で構成される耕作地の浸食を表すために，浮遊砂を含めて計算した．沈降速度に Rubey の式，鉛直濃度分布式に Lane-Kalinske の式，浮上量に板倉・岸の式を用いている¹³⁾．

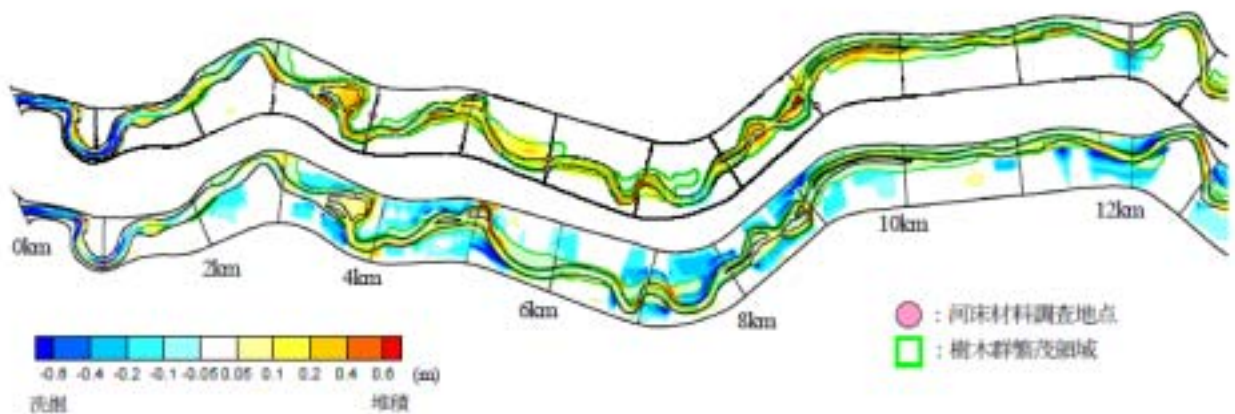


図-9 実測(上)と解析(下)の低水路河床変動コンタ図の比較
(高水敷の河床変動量は，12.0km を除き観測されていない)

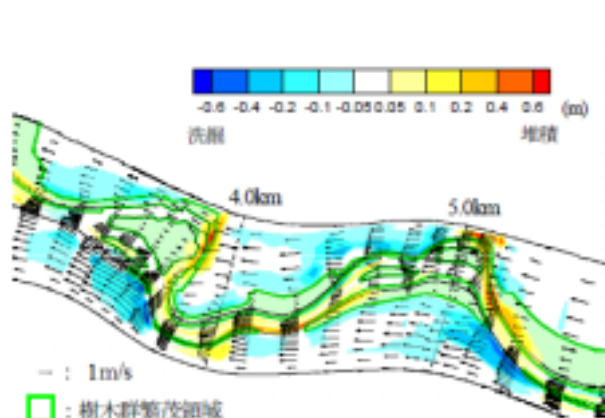


図-10 水位ピーク時における流速ベクトルと河床変動コンタ図

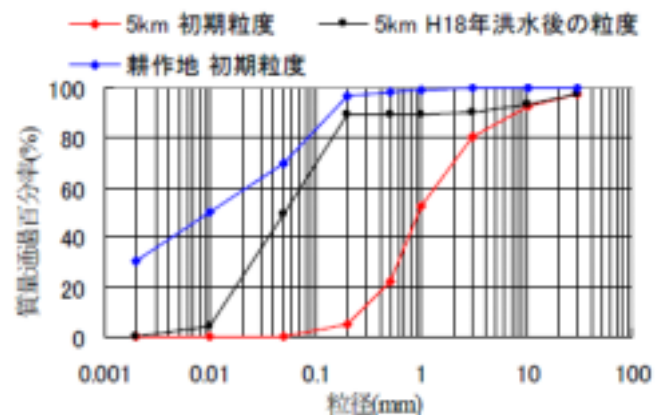


図-11 5.0km 地点における解析初期の粒度分布と解析により求めた粒度分布

土砂の境界条件に関して、掃流砂は上流端の断面において動的平衡状態を仮定し、浮遊砂は助走区間で濃度を十分に発達させ、その濃度分布を与えた。また、河口付近には岩が存在することを考慮し、岩の位置以下には河床洗掘は生じないとした。常呂川では高水敷の大部分が耕作地として利用されており、低水路における堆積土砂の供給源は耕作地であると考えられるため⁷⁾、低水路と共に耕作地の土砂移動の解析を行った。

(2) 解析結果

図-7に解析結果と観測値の比較を示す。図-8は痕跡水位と解析最大水位の縦断分布及び水面形の時間変化である。表-1は解析に用いた粗度係数と樹木群透過係数を示している。密に繁茂している樹木群には10m/s、疎に繁茂している樹木群には、著者らのこれまでの研究を基に35m/s～60m/sの値を用いた⁹⁾。図-7(a)の水位ハイドログラフを見ると、水位上昇期において解析値と観測値の対応が低い。これは、初期地形にH16年河床形状を用いており、H18年は8月にも洪水が発生しているため、その河床変動を考慮していないのが原因と考えられる。しかし、他の時間帯及び痕跡水位と解析最大水位の縦断分布は概ね一致しており、流量ハイドログラフも実測値をほぼ捉えていることから、洪水流解析は信頼できると考えられる。次に、河床変動について考察する。図-9に13.0kmより下流における実測と解析の低水路河床変動コンタ図の比較を示す。洪水後の測量は12.0kmを除き、低水路沿いのみで行われている。よって、実測では、12.0km断面を除き高水敷の河床変動量を0として示している。

解析河床変動コンタ図より、低水路河床には縦断的に土砂が堆積しており、耕作地は全体的に洗掘傾向にある。実測値と比較すると、4.0km付近の低水路内や樹木群内における土砂堆積の傾向や、12.0km地点における耕作地の浸食が再現されている。しかし、解析では堆積土砂量が少なく、また、河口付近では蛇行外岸における河床洗掘の再現性が低い。堆積量に関しては、上流域から入って来る土砂量に問題があると考えられる。常呂川は土砂生産の多い河川であるため⁷⁾、洪水中は上流から多量に土砂が流入してきていると考えられる。しかし、解析ではその流入量を考慮していないため、堆積土砂量が少なく計算されている。河口付近の急湾曲部では、平面二次元モデルを用いているために、断面内の二次流分布が再現しきれず、湾曲外岸の洗掘については小さく計算されている。しかし、洪水流及び河床変動は全体として再現していると考え、以下の考察を行う。

図-10に4.0km付近の水位ピーク時における流速ベクトルと河床変動コンタ図を示す。高水敷において高流速が発生し、樹木群内で流速が低下している。また、流向は低水路線形の影響を受けずに直線的に流れていることが分かる。よって、低水路が蛇行している5.0km付近では、樹木群内の遅い流れが流入することで、低水路内において顕著な流速低減(1m/s程度)が生じている。河床に関しては、低水路から高水敷に流れが乗り上がる個所において局所的に大きな洗掘が生じ、耕作地が平均的に0.05m～0.1m程度洗掘されている。また、蛇行低水路沿いの樹木群の影響で流速が低減している個所において、土砂堆積が生じている。図-9に示す樹木群内の土砂堆積は、洪水減衰期に高水敷から水が引く際に生じることになる。図-10は5.0km地点における解析初期の粒度分布と解析により求めた粒度分布である。低水路河床に元々存在する材料(赤線)は砂礫であるが、洪水により低水路河床には土砂が堆積し、その堆積土砂の粒度分布(黒線)は耕作地に存在したシルト分であることが分かる。この堆積土砂は融雪出水のような低水路満杯流程度の小洪水時には、耕作地からの土砂供給がないので徐々に流送され、やがて、元々存在していた河床材料(赤線)に近づいていくことになる。以上のことから、洗掘を受けた畑の土砂が下流に流送され、蛇行低水路沿いに繁茂している樹木群内や低水路内

に、その流送土砂が堆積することが分かる。

5. 結論

本研究では、常呂川を対象に、実測データから洪水流と土砂堆積の関係を検討した。また、そこから得た知見を非定常平面二次元河床変動解析に取り入れることで、耕作地からの土砂流出と蛇行低水路沿いに繁茂する樹木群が河床変動に与える影響を検討した。以下にその主な内容をまとめる。

(1) 実測データに基づく検討から、樹林化が進行している砂州にはシルト質の細粒土砂が堆積していることなどを示し、河口の蛇行狭窄部の影響を受けて水位が堰き上がり、水面が緩やかになる 3.0km ~ 9.0km 付近において縦断的な土砂堆積が顕著であることを示した。

(2) 非定常平面二次元河床変動解析を用いることで、蛇行低水路沿いに繁茂する樹木は、低水路内流速を低減させ、土砂堆積を生じさせる得ることを示し、その堆積土砂は広い高水敷の大部分を占める耕作地から流送されるシルトであることを示した。

(3) 解析では、堆積土砂量が全体的に少なく計算されている。実測値で示される縦断的な堆積土砂量を評価するためには、上流域から河川に流入する土砂量の影響を検討する必要性を示した。

参考文献

- 1) 福岡捷二：洪水の水理と河道の設計法，森北出版，2005.
- 2) 岡田将治，福岡捷二：複断面河道における洪水流特性と流砂量・河床変動の研究，土木学会論文集，No.754/ -66，pp.19-31，2004.
- 3) 藤田光一，李参熙，渡邊敏，塚本隆夫，山本晃一，望月達也：扇状地礫床河道における安定植生域消長の機構とシミュレーション，土木学会論文集，No.747/ -65，pp.41-60，2003.
- 4) 福岡捷二，五十嵐崇博，高橋宏尚：江の川水防林の特性と治水効果，水工学論文集，第 39 巻，pp.501-506，1995.
- 5) 福岡捷二，川岡秀和，平林由希子：水害防備林と低水路線形が洪水流に与える影響，水工学論文集，第 42 巻，pp.967-972，1998.
- 6) 福岡捷二，岡部博一，飯島直己：蛇行低水路の土砂堆積に及ぼす樹木群の影響，河川技術論文集，第 14 巻，pp.19-24，2008.
- 7) 黒田保孝，加納浩夫，奥山昌幸：常呂川水系常呂川における土砂流出調査に関する報告，河川技術論文集，第 10 巻，pp.167-172，2004.
- 8) 福岡捷二：招待論文，洪水流の水面形観測の意義と水面形に基づく河川維持管理技術，河川技術論文集，第 12 巻，pp.1-6，2006.
- 9) 福岡捷二，藤澤寛，大沼史佳：利根川河道の樹木群透過係数と高水敷粗度係数，河川技術論文集，第 13 巻，pp.333-338，2007.
- 10) 川口広司，藤堂正樹，福岡捷二：水面形時系列データに基づく交互砂州平均河床高の時間変化

及び流量ハイドログラフ，水工学論文集，第 53 巻，pp.751-756，2009.

- 11) 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，土木学会論文報告集，第 206 号，pp.59-69，1972.
- 12) 長谷川和義：沖積蛇行の平面および河床形状と流れに関する水理学的研究，北海道大学学位論文，1983.
- 13) 清水康行，板倉忠興：浮遊砂を考慮した河床変動計算手法，土木試験所月報第 396 号，1986 .