

植生抗力特性の時空間分布が 流れと河床変動に与える影響

Effect of spatiotemporal variation of vegetation drag characteristics
on flow and bed deformation

夏見祐介¹・竹林洋史²・岡部健士²

Yusuke Natsumi, Hiroshi Takebayashi and Takeshi Okabe

¹徳島大学大学院先端科学技術教育部 (〒770-8506 徳島市南常三島町2丁目1番)

²徳島大学大学院ソシオテクノサイエンス研究部 (〒770-8506 徳島市南常三島町2丁目1番)

Two dimensional bed deformation analysis has been performed to verify the effect of spatiotemporal change of vegetation drag characteristics on flow and bed deformation. The simulated domain is the weak meandering region in the Yoshino River. The analyzed results show that the vegetation density has been changed well in few months due to floods and so on. Furthermore, the spatiotemporal change of vegetation density and vegetation height affects on future bed geometry. These results indicate that spatiotemporal change of vegetation drag characteristics should be considered in bed deformation analysis to reproduce both future flow patterns and bed geometry. Furthermore, the effect of spatiotemporal change of vegetation drag characteristics on bed geometry is varied well by size distribution of bed material and the type of sediment transport.

Key Words : *Vegetation density, two dimensional bed deformation analysis, Yoshino River, vegetation height, non-uniform sediment*

1. はじめに

治水, 利水, 環境の各目標をバランス良く満足させる河川整備計画を作成するためには, 河道内の水の流れと地形の時空間的な変化を定量的に予測することが不可欠となる。近年, 日本の多くの河川では河道内の樹林化が激しく, 河道内の水の流れと地形の時空間的な変化を定量的に予測するには植生繁茂状態の時空間的な分布を考慮した解析が必要と考えられる。しかし, 植生繁茂状態の時空間的な分布特性が流れや河床変動にどの程度影響を与えるかについて, 十分な知見は得られていない。本研究では, 河道内の樹林化が著しい吉野川下流域の緩蛇行区間において, 砂州上に繁茂していた植生の多くを流送させたH16年の出水を対象として, 植生抗力特性の時空間分布を考慮した平面二次元流れの数値解析を行い, 植生抗力特性の時空間分布が河道内の水の流れに与える影響を検討する。

一般に, 植生を考慮した平面二次元の流れと河床変動解析では, 植生は抜水状態とし, 密生度も解析期間中で一定値を用いることが多い。しかし, 流量が大きくなると, 低木は冠水する。さらに密生度は, 1年の間でも季



図-1 解析対象領域^{*)}

節変化する。そこで, まず, レーザー測量による植生の高さと鉛直平均密生度の時空間的な変化を考慮して流れの解析を行う。次に, 植生密生度の季節変化を考慮した平面二次元河床変動解析を行い, 植生抗力特性の時間変化の違いが河床変動量に与える影響を検討する。さらに, 河床材料の粒度や流砂形態の違いによって, 植生抗力の時空間分布特性の違いがどのように河床変動の違いとして現れるかを検討する。

2. 対象河川概要

吉野川は高知県瓶ヶ森(標高1,897m)にその源を発し,

中央構造線に沿ってほぼ東流して紀伊水道に注ぐ日本有数の河川であり、その流域面積は3,750km²、幹川流路延長は198kmである。本研究では、柿原堰と第十堰（ともに固定堰）に挟まれた河口より17kmから24kmを対象区間とする。この区間は川幅が約800mとほぼ一様であり、波長約3kmの緩蛇行区間で、3～4の砂州が存在する。研究対象区間を含む河道の平面状況を図-1に示す。砂州上にはヤナギ類を中心とする木本群落や、ツルヨシ・オギなどの草本群落が広く分布している。特に、ヤナギ類を中心とする木本群落は、大規模な砂利採取が禁止された1970年代後半以降、砂州上に定着しはじめ、その後、より上流の水際沿いの区域に移行させながら年々分布を拡大してきた。

3. 解析方法¹⁾と解析条件

流れの計算には、水深平均された平面二次元流れの支配方程式を用いる。河床近傍の流速は、水深平均流速の流線の曲率より予測し、予測式中の二次流の強度に関する係数値はEngelund²⁾と同様の7.0を用いている。河床材料は非粘着性の一様砂及び混合砂として扱う。流砂形態は、掃流砂と浮遊砂を考慮する。掃流砂量は芦田・道上式³⁾に河床の局所的な勾配が流砂ベクトルに及ぼす影響を考慮した芦田・江頭・劉の式⁴⁾により算出する。浮遊砂量の算定には、Lane and Kalinske⁵⁾の平衡浮遊砂濃度式を用いるとともに、浮遊砂濃度の輸送方程式を解く。局所的な河床勾配は、安息角よりも小さくなるように補正する⁶⁾。本解析では植生を考慮している。植生の侵入・成長・消滅および植生間の相互作用等に関する条件は、植生種や気象条件等により大きく異なり非常に複雑なため、数学モデルとしては十分に確立されていない。そこで、本研究では清水・辻本の研究⁷⁾を参考に、植生を流体抵抗として考慮し、密生度や高さを時空間的に変化させることにより植生の抵抗特性を時空間的に変化させる。植生域内の掃流砂量は有効掃流力を用いて算出する。植生としては、木本類のみを対象とする。河道内に流路が形成されると、計算領域に表面流の無い浮州が形成される。本解析では、表面流と浸透流の両方を計算し、浮州域の土中の流れの解析も行う。

初期河床形状は、H15年度に実施されたレーザー測量の成果を用いる。ただし、定期横断測量と比較し、測量誤差が非常に大きいと判断された箇所や水面下の河床については、定期横断測量データを用いて内挿した値を用いる。解析メッシュ内の植生の面積存在率は、H15年度に撮影された航空写真より求める。さらに、植生の高さは、H15年度に実施されたレーザー測量から得られる植生頂部の高さと河床位データから求める。植生の密生度については、痕跡水位を最も良く再現できる値を与える。これについては、4. で述べる。

表-1 解析に用いた植生密生度と流量

	植生密生度 (1/m)	流量 (m ³ /s)	流砂形態	河床材料
CASE 1	0.05	7596	-	-
CASE 2	0.01	11908	-	-
CASE 3	0.005	15866	-	-
CASE 4	0	7596	-	-
CASE 5	0	11908	-	-
CASE 6	0	15866	-	-
CASE 7	0.08	7596	-	-
CASE 8	0.02	11908	-	-
CASE 9	0.01	15866	-	-
CASE 10	0.08と0.02	図-2	掃流砂	一様砂
CASE 11	0.05	図-2	掃流砂	一様砂
CASE 12	0	図-2	掃流砂	一様砂
CASE 13	0.08と0.02	図-2	掃流砂	混合砂
CASE 14	0.05	図-2	掃流砂	混合砂
CASE 15	0.08と0.02	図-2	掃流砂と浮遊砂	混合砂
CASE 16	0.05	図-2	掃流砂と浮遊砂	混合砂

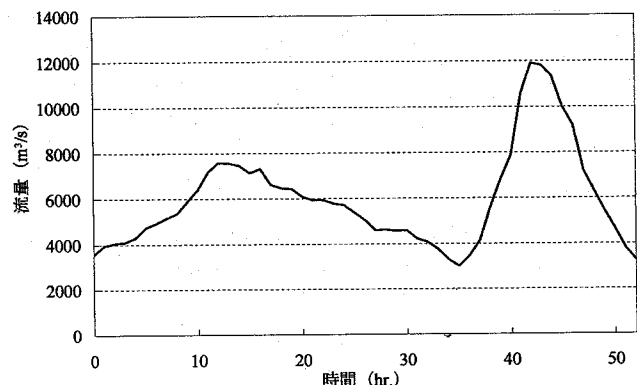


図-2 解析に用いたハイドログラフ

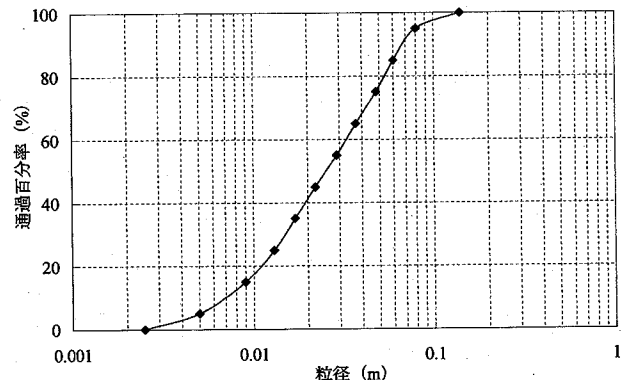


図-3 Case13とCase14に用いた河床材料の粒度

解析はCASE1～CASE16の16の条件で行う。表-1に解析に用いた植生の密生度を示す。これらの密生度の値は、植生が十分に繁茂した領域での値であり、これにメッシュ内の平面的な植生の面積存在率を考慮した値が各メッシュの代表値として使われている。流れの解析のみを行うCASE1～CASE9では、各出水の最大流量を解析対象流量とする。つまり、CASE1は台風10号・11号(H16/8/1)で7596.94m³/s、CASE2は台風16号(H16/8/31)で11908.27m³/s、CASE3は台風23号(H16/10/20)で15866.37m³/sである。マンニングの粗度係数は0.03とする。これは裸地での値と考え、砂堆の発達程度や河床材料の

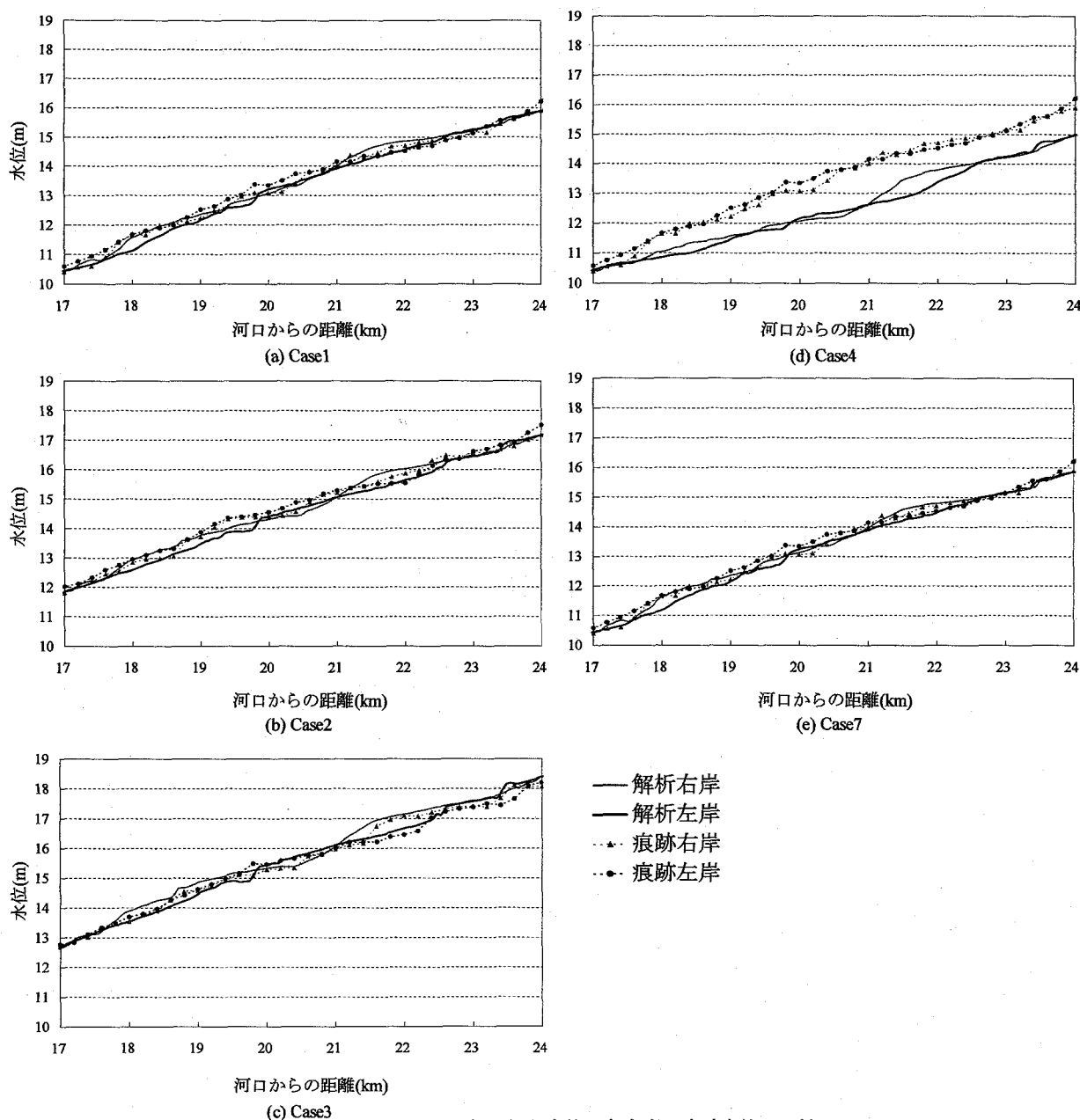


図-4 解析縦断水位と左右岸の痕跡水位の比較

粒度による時空間的な変化を無視し、一定値を与える。下流端の水位境界条件は左右岸の痕跡水位の平均値を与える。CASE1～CASE3は、植生が全て抜水状態として扱った条件である。CASE4, CASE5, CASE6は、それぞれCASE1, CASE2, CASE3と同一の水理条件において植生無しの条件である。CASE7, CASE8, CASE9は、それぞれCASE1, CASE2, CASE3と同一の水理条件において植生高さを考慮した場合である。つまり、植生の冠水により、流水に対する植生の射影面積の減少を考慮している条件である。

河床変動解析を実施したCASE10～CASE16は、図-2に示すように、台風10号・11号(H16/8/1)と台風16号(H16/8/31)によるハイドログラフを繋げたものを上流端給水条件とする。ただし、砂州冠水流量が $3000\text{m}^3/\text{s}$ 程度であるため、 $3000\text{m}^3/\text{s}$ 以上の時間帯のみを対象とした。下流端の水位境界条件は、第十堰水位観測所の観測値を

等流条件で解析下流端における水位に換算して与える。河床材料の平均粒径は実測値より 3.2cm とする。CASE10はCASE7とCASE8により得られた植生の密生度の値を用いて、出水ごとに密生度の値を変化させた条件である。CASE11は、CASE7とCASE8により得られた植生の密生度の値の平均値である 0.05 の一定値を与えたものである。CASE12は植生無しの条件である。CASE13とCASE14は、それぞれ、CASE10とCASE11と同一の水理条件であるが、河床材料が混合砂である。CASE15とCASE16は、それぞれ、CASE10とCASE11と同一の水理条件であるが、河床材料が混合砂であり、河床形態として浮遊砂も考慮している。解析に用いた粒径加積曲線を図-3に示す。

4. 結果と考察

表-1に解析に用いた植生の密生度を示す。図-4におい

て、左右岸沿いにおける痕跡水位と解析水位を比較している。CASE1~CASE3とCASE7は、痕跡水位を最も良く再現できるように密生度の値を変化させた結果である。CASE1~CASE3を見ると、痕跡水位を再現するには、植生の密生度を各出水で変化させなければならないことがわかる。これは、CASE1 (H16/8/1) の最大流量時には出水規模もあまり大きく無かったこともあり、植生はあまりフラッシュされず、密生度は大きいままであるが、CASE2 (H16/8/31) の最大流量時には、植生の流下方向への傾斜、流路側岸浸食による植生の消滅、木本類周辺の草本類の掃流等により、密生度がCASE1より小さくなったと予想される。さらに、CASE3は、CASE2において発生した現象がさらに進み、密生度がさらに低下したと考えられる。つまり、植生の密生度は出水により1年の間でも大きく変化することが予想される。植生無しの場合 (CASE4) は、当然ながら、右岸・左岸ともに解析水位は痕跡水位より低く評価され、その差は1.5mとなっている断面も存在する。植生高さを考慮した場合 (CASE7~CASE9) は、(CASE1~CASE3) よりも密生度の値が大きくなった。これは、一部の植生が冠水状態となり流れに対する植生の射影面積が減少し、その減少分を密生度の増加で補ったためである。水位の縦断分布の再現性については、CASE1とCASE7で大きな違いは無いが、CASE7の方が痕跡水位を良く再現していることがわかる。

図-5に無次元掃流力の平面分布を示す。植生有り (CASE1, CASE7) と植生無しの場合 (CASE4) を比較すると、掃流力分布において明らかな違いがみられる。植生無しの場合には植生による抗力が無いため、広い範囲で0.05~0.075程度の無次元掃流力が働いているが、植生有り (CASE1, CASE7) では、掃流力の大きい領域が流路内に限定されている。また、CASE7~CASE9による結果を見てみると、台風10・11号通過時では砂州全域において最大掃流力が0.05をわずかに越えたのみで、砂州表面の砂礫は軽微な移動をする程度であるが、台風16号と台風23号通過時には最大掃流力が0.075~0.15の範囲で、かなり激しい砂礫の移動があったことが予想され、多くの植生が流送、埋没したことが予想される。

図-6に台風10号・11号(H16/8/1) と台風16号(H16/8/31) による出水を与えた後のCASE10 (密生度を出水で変化) とCASE11 (密生度一定) の河床位の差を示している。図より、砂州上については、砂州上流域の裸地から植生上流域において、また、流路内については、砂州下流の植生域を有する断面において、両者の差が大きく、植生の抗力特性の時間的な変化が河床変動特性に大きく影響を与えていることがわかる。

図-7に台風10号・11号(H16/8/1) と台風16号(H16/8/31) による出水を与えた後の河口から20.2kmと17.5kmにおける横断形状を示す。20.2kmは上述の砂州上での河床変動特性の違いが大きい断面であり、右岸側に形成されてい

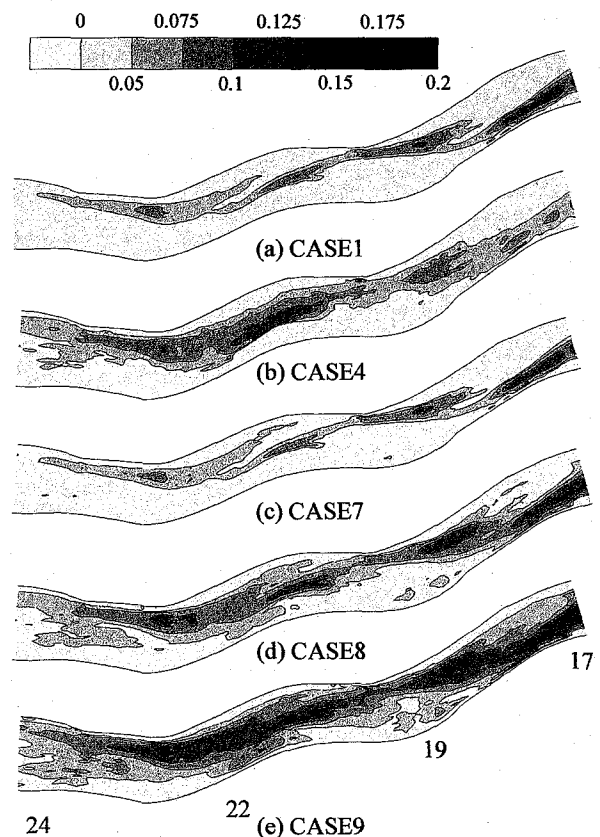


図-5 無次元掃流力の平面分布

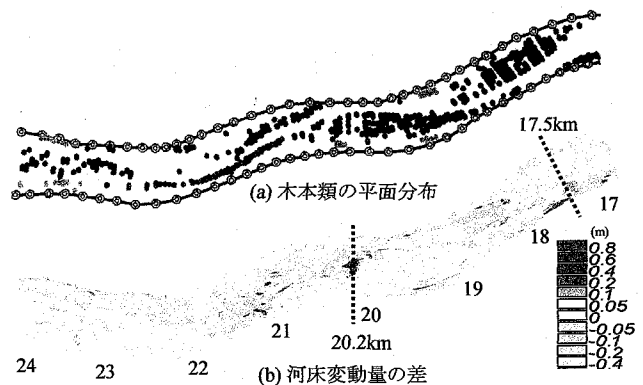


図-6 木本類の平面分布と解析後のCASE10とCASE11の河床位の差の平面分布

る砂州内の上流域に位置する。17.5kmは、流路内で河床変動特性の違いが大きい断面であり、左岸側に形成されている砂州内の下流域に位置する。図より、20.2km断面では、CASE10 (密生度を出水で変化) とCASE11 (密生度一定) とともに左岸から300m~400mの植生域で堆積傾向となっているが、堆積厚の差は大きく、約60cmとなっている。また、CASE10とCASE12 (密生度ゼロ) を比較すると、植生が無いCASE12では、流路内の河床が上がりるとともに、左岸から300m~400mの植生域で河床低下しており、平水時の水際の河床が緩勾配化していることがわかる。一方、17.5km断面では、17.5km断面よりも上流域に植生が繁茂しているため、17.5km断面の砂州上の植生域まで土砂が輸送されて来ないため、CASE10 (密生度を出水で変化) とCASE11 (密生度一定) では砂州上では河床変動が全く発生していない。ま

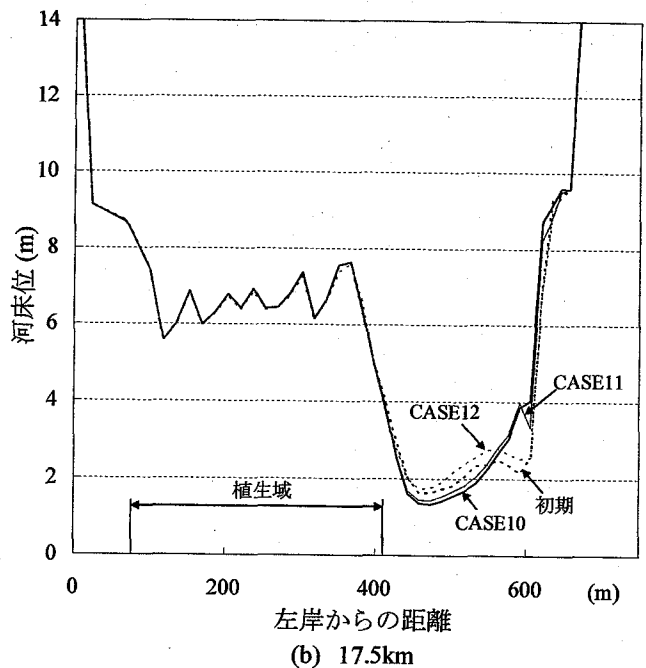
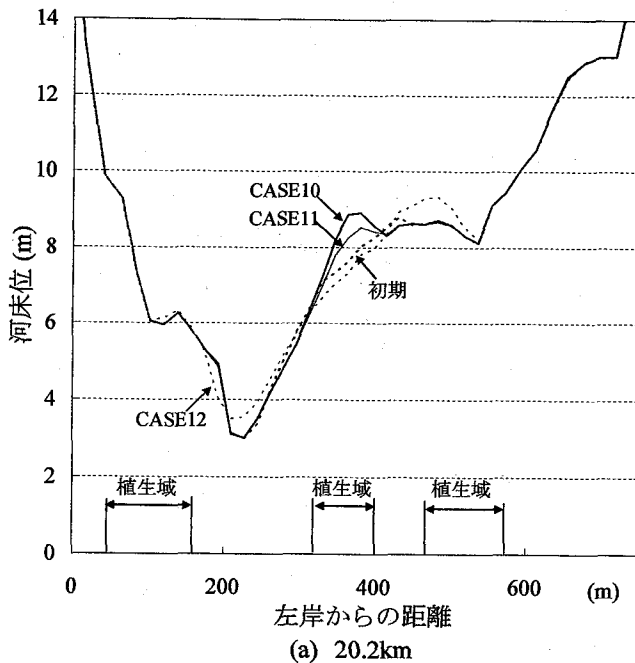


図-7 台風10号・11号(H16/8/1)と台風16号(H16/8/31)による出水を与えた後の河口から20.2kmと17.5kmにおける横断形状

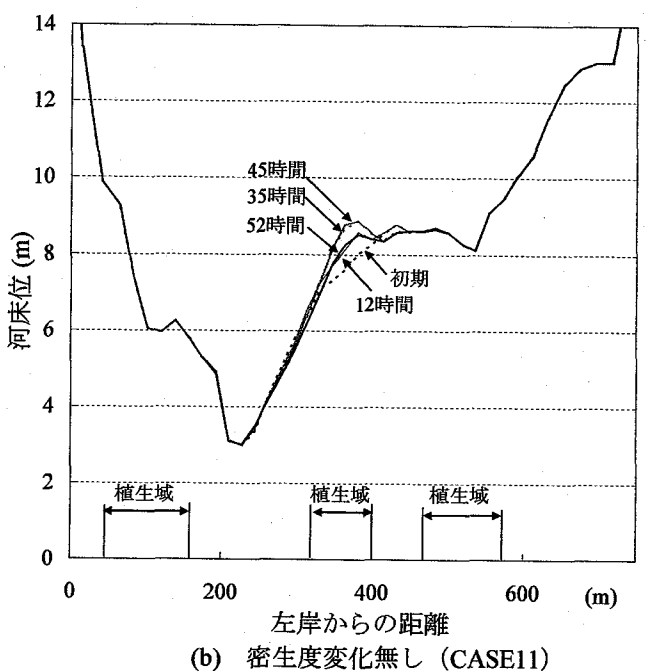
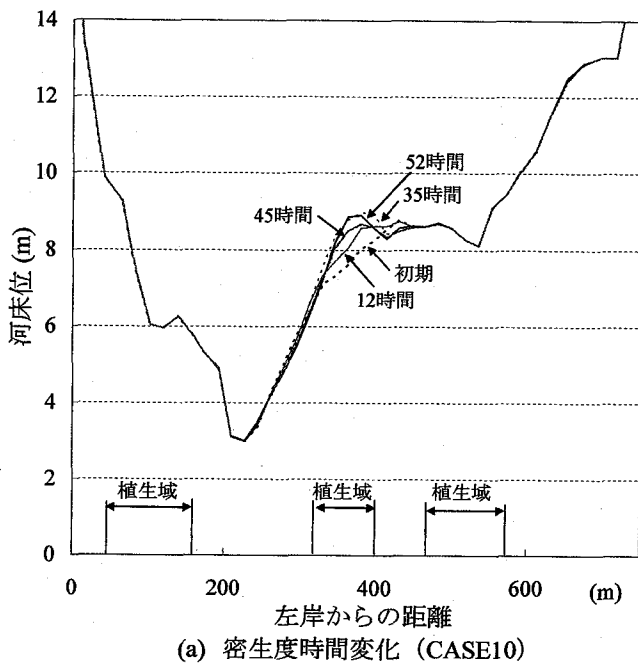


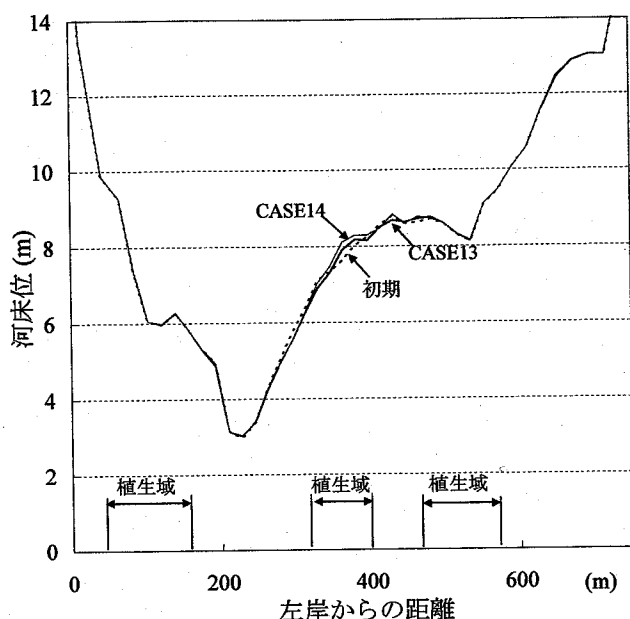
図-8 密度度時間変化有り (CASE10) と変化無し (CASE11) の20.2km断面における横断形状の時間変化

た、両河床位の違いが発生しているのは流路内であり、最大で約70cmの差がある。一方、CASE12 (密度度ゼロ) については、流路内だけでなく、砂州上についても若干の変動が見られる。砂州上の河床位は低下し、流路内の河床位は上昇しており、砂州の段丘化が緩和される方向に変動している。

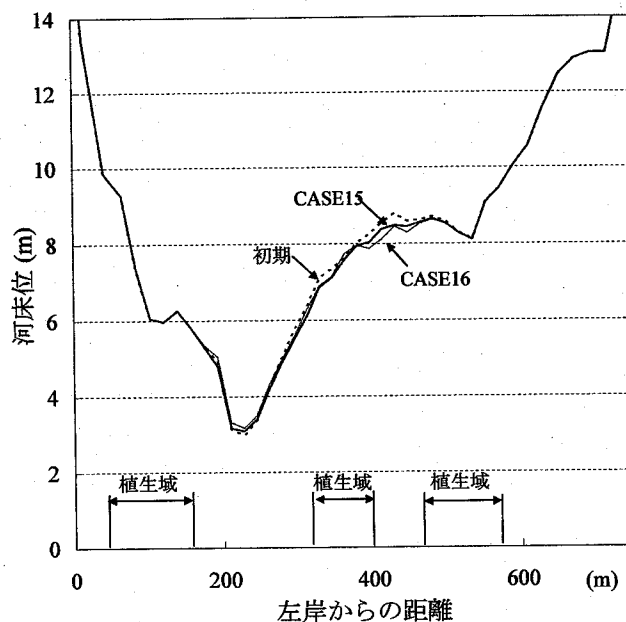
図-8は、20.2km断面におけるCASE10 (密度度を出水で変化) とCASE11 (密度度一定) の河床位の時間変化を示す。図より、左岸から300m~400mの植生域における河床変動は、堆積と浸食を繰り返した結果であることがわかる。さらに、CASE10とCASE11の時間的な変動特性にも違いが発生している。CASE10では、計算開始から台風10号・11号(H16/8/1)の出水終了までが堆積、そ

の後の台風16号(H16/8/31)のピークまでが浸食、台風16号(H16/8/31)のピークから計算終了までが堆積となっている。一方、CASE11では、計算開始から台風10号・11号(H16/8/1)の出水終了までが堆積は、CASE10と同じ傾向であるが、その後の台風16号(H16/8/31)のピークまでが変化無し、台風16号(H16/8/31)のピークから計算終了までが浸食となっている。

図-9 (a) はCASE13 (混合砂、密度度を出水で変化) とCASE14 (混合砂、密度度一定)、図-9 (b) はCASE15 (混合砂、浮遊砂考慮、密度度を出水で変化) とCASE16 (混合砂、浮遊砂考慮、密度度一定) の20.2km断面における最終河床形状を示す。図-9 (a) より、混合砂河床では河床変動そのものが抑制されるため、



(a) 混合砂・浮遊砂無し



(b) 混合砂・浮遊砂考慮

図-9 CASE13～CASE16の20.2km断面における最終河床形状

植生の抗力特性の時間的な変化が河床変動特性に与える影響も、一様砂であるCASE10とCASE11に比べて小さくなっている。また、CASE13とCASE14の河床位に違いが発生している場所は、CASE10とCASE11の場合と異なっており、本断面では右岸側にシフトしている。浮遊砂を考慮したCASE15とCASE16では、各地点における河床位の違いは小さいが、河床位の違いが発生している領域は広がっている。

5. 結論

河道内の樹林化が著しい吉野川下流域の緩蛇行区間を対象として、植生抗力特性の時空間分布を考慮した平面二次元河床変動解析を行い、植生密度の時空間分布が河道内の水の流れと地形に与える影響を検討した。本研究で得られた結果をまとめると以下ようになる。

- (1) 植生抗力特性の時空間変化を考慮した流れの解析において、痕跡水位を最も良く再現できる密度の値を調べた結果、密度は出水及び季節により大きく変化していることが明らかとなった。
- (2) 植生の高さデータを用いて樹木冠水域を表現することにより、植生密度の値は、全て排水として解析をする場合よりもかなり大きい値を用いないと痕跡水位を再現できないことがわかった。
- (3) 植生抗力特性の時空間変化を考慮した河床変動解析において、植生密度の時間変化を無視した場合と時間変化を考慮する場合の河床位の差は、砂州内の上流域では砂州上で大きく、砂州内の下流域では流路内で大きくなった。さらに、植生を無視すると、平水時の水際の河床が緩勾配化する。
- (4) 河床材料を混合砂として扱えば、河床変動そのもの

のが抑制されるため、植生の抗力特性の時間的な変化が河床変動特性に与える影響も小さくなる。また、流砂形態として浮遊砂を考慮すると、植生の抗力特性の時間的な変化が河床変動特性に与える影響が現れる範囲が広がった。

謝辞：本研究は、国土交通省受託研究（研究代表者：岡部健士）、平成17年度科学研究費補助金基盤研究（B）（研究代表者：清水康行）、同若手研究（B）（研究代表者：竹林洋史）の助成を受けて行われた。記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 竹林洋史：河川中・下流域の河川地形，ながれ，Vol. 24 (2005) 27-36.
- 2) Engelund, F.: Flow and Bed Topography in Channel Bends, Jour. of Hy. Div. ASCE, Vol. 100 (1974), No. HY11.
- 3) 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 (1972)，pp.59-69.
- 4) 芦田和男，江頭進治，劉炳義：蛇行流路における流砂の分級および河床変動に関する数値解析，水工学論文集，第35巻 (1991)，pp.383-390.
- 5) Lane, E. W. and Kalinske, A. A.: Engineering calculation of suspended sediment, Trans. A.G.U., 22 (1941).
- 6) 永瀬恭一，道上正規，檜谷治：狭窄部を持つ山地河川の河床変動計算，水工学論文集，第40巻 (1996)，pp.887-892.
- 7) 清水義彦，辻本哲郎：植生帯を伴う流れ場の平面2次元解析，水工学論文集，第39巻 (1995)，pp.513-518.
- 8) 国土交通省四国地方整備局徳島河川国道事務所HPより。
(2007.4.5受付)