

砂礫州切り下げ後の長期植生動態解析に基づく 樹林化抑制効果の確率論的検討

STOCHASTIC ANALYSIS OF FORESTATION ON EXCAVATED GRAVEL BAR BY GROWTH DYNAMIC MODEL

八木澤順治¹・田中規夫²
Junji YAGISAWA and Norio TANAKA

¹正会員 博(学) 埼玉大学大学院助教 理工学研究科 (兼・埼玉大学研究機構レジリエント社会研究センター)
(〒338-8570 埼玉県さいたま市桜区下大久保255)

²正会員 工博 埼玉大学大学院教授 理工学研究科 (兼・埼玉大学研究機構レジリエント社会研究センター)
(〒338-8570 埼玉県さいたま市桜区下大久保255)

As one of the countermeasures for the forestation on gravel bars, excavation of gravel bars is recently conducted. To conduct effective excavation for preventing re-forestation during long term, stochastic analysis is needed considering various flow discharge condition. Therefore, objective of this study is to clarify the effect of forestation due to the excavation of the gravel bar. To fulfill the objective, the long term growth dynamic model was used for evaluating the possibility of forestation under various discharge condition. The developed model was applied to gravel bar at Honda in Arakawa River. Expected value of forestation (EV) was defined and its value was calculated in each excavation type. As a comparison of EV in each excavation type, EV value for Case 6 which gravel bar is excavated diagonally, becomes smallest. It is indicated that developed model can evaluate the suitable excavation type for preventing re-forestation on the gravel bar.

Key Words : stochastic analysis, forestation, excavation of gravel bar, growth dynamic model

1. はじめに

近年、礫河原保全の観点から、砂礫州や高水敷の切り下げが行なわれている¹⁾。切り下げの効果を検討するため、植生動態を予測するモデルの開発が求められている。その際、植生分布の経年変化(拡大、遷移)、洪水による破壊(植生の生育基盤となる河床材料の移動、植物の破壊)を精度よく評価することが必要である。

これまで、河道内植生の中長期的な動態を評価するため、様々な植生動態解析モデルが提案されている(例えば^{2),3),4)})。その動態を評価するための重要な素過程として、①洪水による植生の破壊・流失といった外力との関係に関する知見^{2),3)}、②植生の入植、生長、拡大、遷移といった繁茂特性に関する知見^{3),4)}、が考慮される場合が多い。

八木澤・田中³⁾は、荒川中流域の砂礫州を対象に、上記に挙げたような植生の破壊・流失、再生長、遷移、拡大といった素過程を考慮した植生動態モデルを開発している。その後、破壊規模に応じた樹木の再生長の遅れ⁵⁾、群落拡大率の変化⁵⁾、細粒土砂が堆積しやすい場所を簡易に判定する手法⁶⁾をもとにした植生遷移の早期化をモ

デル化し、荒川中流域の複数砂礫州に開発したモデルを適用し、10数年の植生動態をある程度評価可能であることを示している⁷⁾。

上記のような解析モデルが開発される一方で、実務面では、樹林化対策として砂礫州の一部掘削あるいは切り下げが実施されているが、対策後に再樹林化が生じる事例も多い。本研究で対象とする荒川中流域の本田地先の砂礫州においても、図-1(a)に示すように、2010年に砂礫州の一部掘削が実施されている(ただし一部掘削の主目的は、偏流を抑え、右岸側の水位低下・河岸侵食抑制を図るための洪水時の流路変更)。2012年に実施した現地調査では、掘削流路内において、細粒土砂の堆積が見られ(図-1(b))、その翌年には、大型の多年生草本が掘削流路一面に繁茂していることが確認されている(図-1(c))。従来、年最大流量で対象地点の平均粒径程度の河床材料が移動するように切り下げ高が設定されている場合が多いが、切り下げ後の洪水規模・パターンによっては樹林化抑制効果が異なるため、再樹林化が生じると考えられる。近年、植生の繁茂予測を検討する研究では、洪水外力の不確実性が植生の繁茂状態に与える影響を考慮する試みがなされている(例えば^{8),9)})。すなわち、長期的

に再樹林化が生じづらい切り下げを実施するためには、様々な流量時系列を想定し、確率論的に検討することが必要である。そこで本研究では、実施事例が多い複数の切り下げケースを想定し、長期間の植生動態解析を様々な流量時系列条件下で実施し、各切り下げケースでの樹林化抑制効果を明らかにすることを目的とする。

2. 植生動態モデルの概要

植生動態は、図-2に示すように、(1)洪水による植生の破壊、(2)植生の遷移、(3)植生繁茂領域の拡大、という3つの現象を統合した形でモデル化した。ここでは概要のみを記述し、詳細については八木澤ら⁵⁾、八木澤・田中⁷⁾を参考にされたい。

(1) 植生動態の素過程のモデル化

洪水によって砂礫州上が攪乱されると、植生動態に関連して生じる現象として、①裸地を形成する基盤の移動(裸地の維持)、②草本・木本の流失(裸地への更新)、③木本の破断・倒伏(翌年に再生長するものの、胸高直径から換算した樹齢は、実樹齢に対して若くなる。これを本研究では樹齢の巻き戻し効果と定義する)、がある(図-2)。ある洪水によって上記3項目が生じるかどうかは以下のように判断する。①に関しては、砂礫州グリッドの50%粒径の無次元掃流力 τ_{*50} が、当該粒径の無次元限界掃流力 τ_{*c50} を上回るかで判断する。 τ_{*90} 、 τ_{*c90} はそれぞれ以下の式より算出した。

$$\tau_{*90} = \frac{HI_b}{Sd_{90}} \quad (1)$$

$$\frac{\tau_{*c90}}{\tau_{*c50}} = \left[\frac{\log_{10} 19}{\log_{10} 19(d_{90}/d_{50})} \right]^2 \quad (2)$$

ここに、 S 、 I_b 、 H 、 d_{50} 、 d_{90} はそれぞれ、土粒子の水中比重(=1.65)、砂州区間の平均河床勾配、各グリッドの水深(m)、50%粒径(m)、90%粒径(m)である。また、本研究では、50%粒径の無次元限界掃流力 τ_{*c50} を0.06とし、 τ_{*c90} を式(2) (芦田・道上¹⁰⁾)より算出した。②草本・木本の流失に関しては、田中ら¹¹⁾が提案している流失評価指標WOI(= τ_{*90}/τ_{*c90})を採用した。また、③木本の破断・倒伏に関しては、鉛直方向に変化する投影面積、葉層による抗力係数の増分等を考慮し、樹木に作用する抗力モーメント M を求め、タチヤナギ・ハリエンジュそれぞれの破断限界モーメント M_{bc} と比較することによって判定した。破断限界モーメント M_{bc} (Nm)は、田中ら¹²⁾の載荷試験結果を参考に以下の式より算出した。

$$M_{bc} = kd_{BH}^3 \quad (3)$$

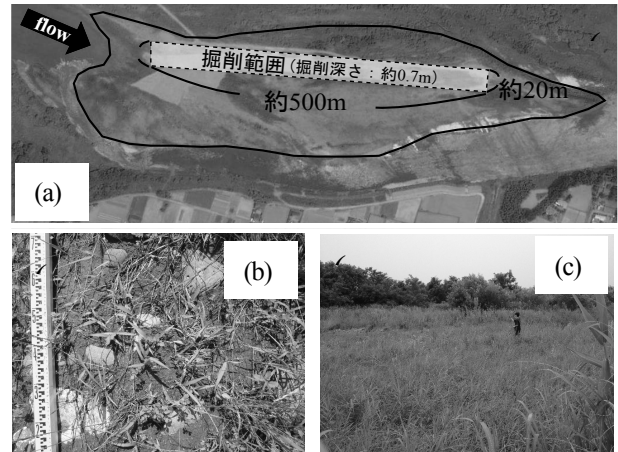


図-1 本研究で対象とする荒川・本田地先砂礫州
(a) 2010年に実施された一部掘削範囲と規模、(b) 2012年に一部掘削流路内で確認された細粒土砂の堆積状況、
(c) 2013年の一部掘削流路の状況

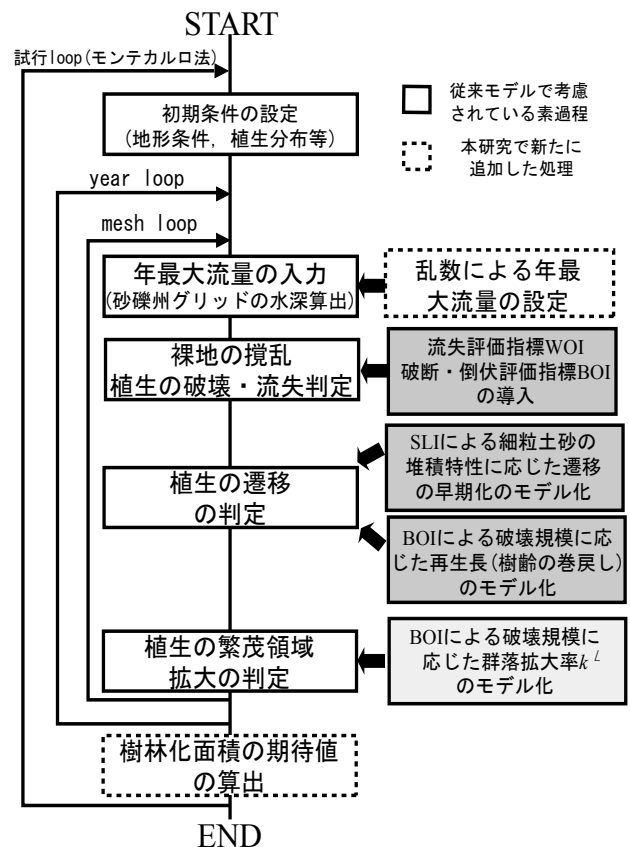


図-2 本研究で用いた解析モデルのフローチャート

ここに、 k ：樹種毎に異なる比例定数(タチヤナギ、ハリエンジュそれぞれ $k=3.0, 2.0$)、 d_{BH} ：樹木の胸高直径(cm)であり、樹齢の関数(ハリエンジュ¹³⁾、タチヤナギ¹⁴⁾)として与えた。解析中で実際に破断・倒伏したと判断された樹木は、倒れた樹幹から萌芽し再生長する。そこで、八木澤・田中³⁾の考え方と同様、樹齢が x 年巻き戻されるとして植生の遷移・拡大過程に考慮した。さらに、破壊規模の違いが、樹齢の巻き戻し効果 x に与える影響は、田

中ら⁶⁾が提案している破断・倒伏評価指標BOIの値と関連付けてモデル化されている。また、破壊が生じた群落の翌年の拡大率 k も同様に、破断・倒伏評価指標BOIの値と関連付けることでモデル化を行っている。

(2) 植生動態解析の初期条件

本研究では2010年に砂礫州の一部掘削が実施された荒川中流域・本田地先の砂礫州(距離標83km)を対象とし、植生動態モデルを適用した。

初期条件として、①対象砂礫州の標高、②植生繁茂状況、③対象砂礫州の粒度分布、が必要である。①解析対象砂礫州の標高は、横断方向に約10m、流下方向に約50m程度のグリッドを作成し、2007年にレーザープロファイラーによって得られた地表面の標高データを平均化することによって設定した。また、②植生繁茂状態の初期条件は、計算開始年である2006年の航空写真をもとに設定した。③砂礫州の各グリッドにおける表層河床材料の粒径は、2006年に行なった砂礫州上の粒度分布調査結果より定めた。また、砂礫州の平面形状の大きな変化がないことから、砂礫州の粒度分布も大幅に変化していないと考え、解析期間中に砂礫州の表層粒度分布は変化しないという仮定を設けている。

(3) 切り下げケースおよび年最大流量の設定

本研究では各切り下げケースが30年後の樹林化面積の期待値に及ぼす影響を把握するため、表-1および図-3に示す7パターンの地形条件を考慮した。a)一部掘削前の地形モデル(Case1)、b)一部掘削後の地形モデル(0.7m掘削)(Case2)、c)b)をさらに2.0m掘削した地形モデル(2.7m掘削)(Case3)、d)現状の掘削部から低水路側を水平に切り下げた地形モデル(水平切り下げ)(Case4)、e)Case4で掘削した土砂を低水路に埋め戻した地形モデル(Case5)、f)現状の掘削部から低水路側を斜めに切り下げた地形モデル(斜め切り下げ)(Case6)、g)Case6で掘削した土砂を低水路に埋め戻した地形モデル(Case7)、を対象とした(図-3)。

上記の各ケースに対して、乱数で発生させた流量時系列データを与えた。その際、乱数で与える流量が非現実的なものとならないよう、対象砂礫州の上流に位置する寄居水位・流量観測所の流量データ(56年分)より非生起確率分布を求めた(図-4)。本研究では得られた流量データが少ないことから、3つの流量規模範囲に応じて異なる回帰式を考慮した。そのため用いるプロットングポジション公式が及ぼす影響は少ないと考えワイブル法を用いた。得られた非生起確率分布をもとにランダムに流量時系列データを作成した。本研究では、2006年から2036年までの30年間の植生動態解析を実施するとともに、30年後の樹林化傾向を確率的に検討するため、30年間の流量時系列を変化させて、解析を1000回試行した。図-5は、解析で与えられた流量30000データ(30年×1000回)

表-1 各切り下げケースの概要

ケース名	概要
Case1	一部掘削(0.7m)前
Case2	現状(一部掘削(0.7m))の河道地形
Case3	現状より深く掘削(2.0m)
Case4	水平切り下げ
Case5	水平切り下げ+低水路埋め立て
Case6	斜め切り下げ
Case7	斜め切り下げ+低水路埋め立て

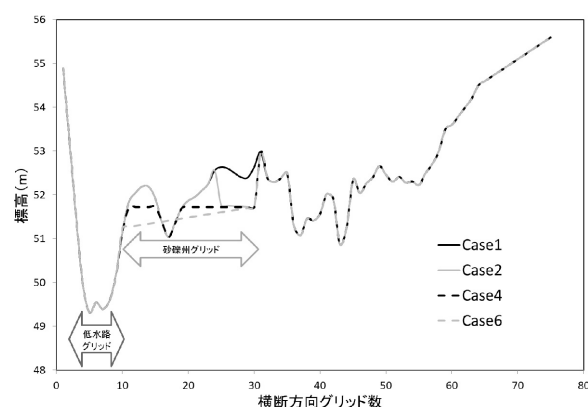


図-3 対象砂礫州の中央における横断面図と各切り下げケースで想定した横断面図

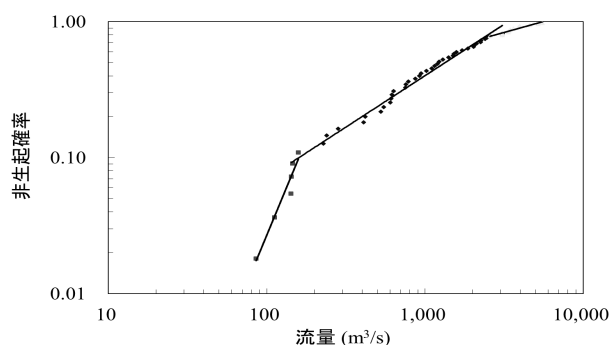


図-4 対象砂礫州上流の寄居水位・流量観測所の流量データから作成した非生起確率流量図

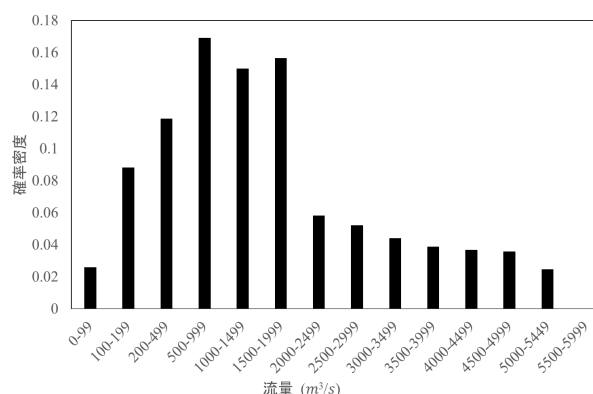


図-5 解析で与えた流量データの確率密度分布の一例

の確率密度分布の一例を示している。上記のような手法をもとに、樹林化面積の期待値を算出し、切り下げケースが樹林化傾向に及ぼす影響を把握した。本研究では、樹林化面積の期待値(EV)は、砂礫州全面積(A_{all})に対し、

30年後にどの程度の面積が樹林化しているか示す値と定義し、式(4)から算出した。

$$EV = \sum_{i=1}^n (A_i(i) / A_{all}) / n \quad (4)$$

ここに、 $A_i(i)$ は各試行回*i*における30年後の樹木繁茂面積、*n*は前述したモンテカルロ法によって繰り返し試行した回数である。

砂礫州グリッドの水深は、対象とする洪水の継続時間をすべて含めて流況解析を計算することで得られる。しかし、本研究で目的とするような長期解析を行なう場合、計算時間が膨大になってしまうため実用的では無い。そこで、一般座標系を用いた平面二次元流況解析で流量規模の異なる複数洪水の流況計算を別途行ない、その結果から得られた流量 Q と最大水深 H_{max} の関係(H - Q 曲線)を個々の砂礫州グリッドにおいて求めた。本解析モデルでは砂礫州の移動が生じるような大規模な河床変動を伴う洪水を対象としていないため、この関係より任意の洪水流量に対して、砂礫州グリッドの水深を得る方法が有効であると考えた。

3. 植生動態解析結果

(1) 解析モデルの検証

まず、本解析手法が実際の樹林化傾向を表現可能か確認するため、現状の河床地形であるCase2で30年間の植生動態解析を1000回試行した。その際に得られる各年の樹林化率(砂礫州の総面積のうち樹木が繁茂する面積の割合)の最大・最小値を図-5に示す。実測値は2006・2010年の国勢調査と、2012年-2014年における現地調査結果によるものである。なお、本研究では、砂礫州上で1グリッド(50m×20m)に樹木が1本以上存在していれば樹木繁茂グリッドと定義した。図-6より、解析結果の最大・最小値の範囲内に実測値が存在していることから、本手法を用いた解析は妥当であると考えた。

(2) 各切り下げケースがSLIに及ぼす影響

本研究では、図-2に示すように土砂堆積指標SLIをもとに、細粒土砂の堆積傾向が植生の遷移の早期化を考慮することをモデル化している。そのモデル化を当該砂礫州に導入するにあたり、切り下げケースの変化がSLIの分布に及ぼす影響を調べた。図-7は代表的な切り下げケースとして、Case2(現状の一部掘削)、Case4(水平切り下げケース)、Case6(斜め切り下げケース)の結果を示しており、土砂堆積が生じやすい場所(図中の黒グリッド)、堆積しづらい場所(図中の灰色グリッド)を分類したのとなっている。なお、堆積の有無を分類する手法として、田中ら⁹⁾と同様に、砂礫州で平均したSLIの値を上回っ

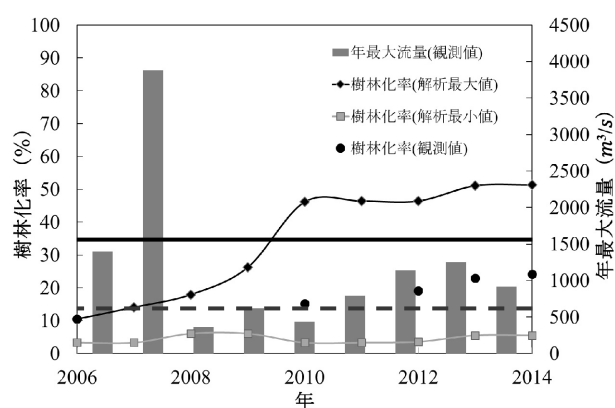


図-6 対象砂礫州の樹林化率の経年変化観測値と解析値との比較 (図中の実線は当該砂礫州が全没する流量規模を、点線は砂礫州に乗り上げる流量規模を意味する)

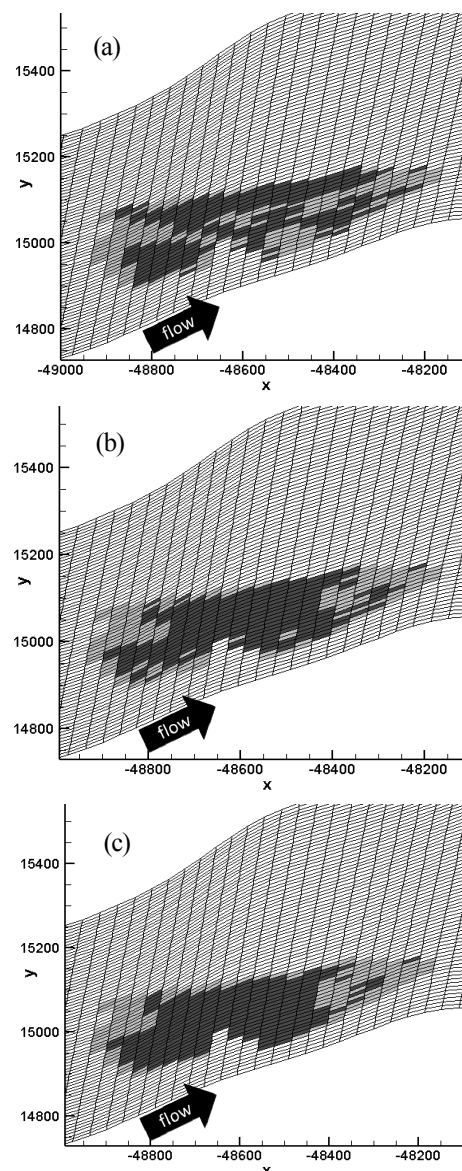


図-7 SLIから判定した対象砂礫州における堆積場所の各切り下げケースでの変化 (a)Case 2, (b)Case 4, (c)Case 6
黒：SLIにより堆積しやすいと判定されたグリッド、灰色：SLIにより堆積しづらいと判定されたグリッド

たグリッドを堆積しやすい(黒グリッド), 下回ったグリッドを堆積しづらい(灰グリッド)と定義し, 堆積しやすいグリッドでは, 植生遷移の早期化が生じるとしてモデル化している. 図-7より, Case2の現状の砂礫州形状では, 1)一部掘削を実施した砂礫州左岸側において, 堆積しやすい状況となっていること, 2)砂礫州の上流側で堆積しづらいこと, 3)砂礫州の中央部付近でやや堆積が生じづらいことなど, 2012年以降の小規模出水後の現地調査より把握された堆積傾向が概ね表現できている. また, Case4, Case6では, 切り下げた領域において, 全体的に細粒土砂が堆積しやすい状況となっていることがわかる. これらの情報を植生動態解析に反映させた.

(3) 各切り下げケースが樹林化面積の期待値に及ぼす影響

各切り下げケースにおいて, 試行回数1000回のうち解析最終年に樹木が繁茂する回数を平面的に可視化したものを図-8に示す. ここでは, 表-1に示す7パターンのうち, 特徴的なCase1, Case2, Case4, Case6の結果のみを示している. また, これまで植生動態解析の精度向上のために導入してきたモデル化(SLIによる遷移の早期化, BOIによる群落拡大速度の変化・再生長に及ぼす影響)が樹林化傾向に及ぼす影響を把握するため, 図-8に上記のモデル化を考慮しない結果, 図-9に上記モデル化を考慮した結果を示している.

図-8において, Case1とCase2を比較すると, 一部掘削を実施した領域において, 900回以上樹木の繁茂が確認されたグリッドが大きく減少し, 多くのグリッドで500回程度に減少していることがわかる. 一部掘削により洪水営力が増加し, 掘削範囲内の植生流失が生じる機会が増加したためと考えられる. その一方で, 掘削により周辺のグリッドでは出水時の水深が下がることで樹林化する機会が増えると予想した. しかしながら, 2010年に実施した切り下げが小規模であったことから, 一部切り下げ流路周辺のグリッドにはほとんど影響がなかった. 水平に切り下げたCase4, 斜めに切り下げたCase6では冠水頻度・規模が増大するため, 両ケースともCase1や2と比較すると, 切り下げ範囲では大幅に樹木が繁茂する領域が大きく減少していることがわかる. 特にCase4では, 切り下げ領域の付近で, 樹木が繁茂する回数が大きくなっており, 切り下げを実施する際には, 周辺領域の樹林化が生じやすくなる可能性があることを示唆している.

図-9にSLI・BOIによる各種モデル化を導入した場合における図-8と同様の図を示す. 図-8の各切り下げケースと比較すると, 解析最終年に樹木が繁茂するグリッドの範囲は大きく変化しない. しかし, Case4や6のように大規模な切り下げを実施した範囲では, SLI・BOIによるモデル化を導入することで, 洪水外力は同じ条件下でも解析最終年に樹木が繁茂する頻度が大きく増加してい

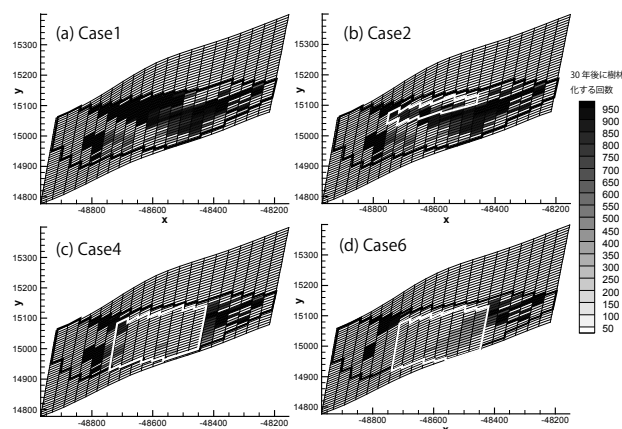


図-8 SLI・BOIによるモデル化を導入しない場合において解析最終年に樹林化と判定される回数の分布図 (a)Case 1, (b)Case 2, (c)Case 4, (d)Case6 (図中の黒線は対象砂礫州の外縁を, 白線は切り下げケースにおける切り下げ範囲を示す)

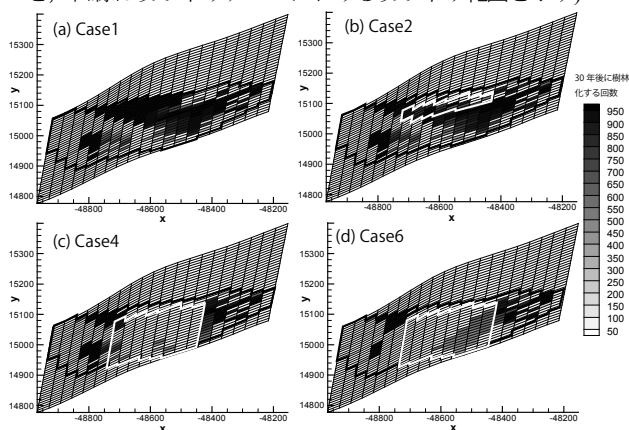


図-9 SLI・BOIによるモデル化を導入した場合において解析最終年に樹林化と判定される回数の分布図 (a)Case 1, (b)Case 2, (c)Case 4, (d)Case6 (図中の黒線は対象砂礫州の外縁を, 白線は切り下げケースにおける切り下げ範囲を示す)

表-2 各切り下げパターンにおける樹林化面積の期待値

ケース名	樹林化面積の期待値 (EV)		備考
	SLI・BOI考慮	SLI・BOI未考慮	
Case1	43.8	42.2	一部掘削(0.7m)前
Case2	38.3	36.2	現状(一部掘削(0.7m))の河道地形
Case3	29.2	27.6	現状より深く掘削(2.0m)
Case4	21.7	20.4	水平切り下げ
Case5	19.5	18.4	水平切り下げ+低水路埋め立て
Case6	18.6	16.5	斜め切り下げ
Case7	15.9	15.1	斜め切り下げ+低水路埋め立て

る. このことから, SLI・BOIによる各種モデル化を導入することが, 特に, 長期的な樹林化傾向を予測する際には重要であると考えられる.

表-2に, 植生動態解析から得られた本田地先砂礫州での樹林化面積の期待値を示す. 表-2には, SLIやBOIによる各種モデル化の有無が樹林化面積の期待値に及ぼす影響も示している. SLIやBOIを考慮しなかった場合, 考慮した場合に比べ, ケース間で差はあるものの, 0.8~2.1の範囲で樹林化面積の期待値が小さくなっていることがわかる. これは, 主にSLIによる植生遷移の早期

化によって、砂礫州が裸地に戻りづらくなっていることが原因であり、こうしたモデル化を植生遷移の素過程に加えて考慮することが重要であると考えられる。

以降、SLIとBOIのモデル化を加えた結果について議論する。現状の地形(Case2)では、30年後には砂礫州の38.3%の面積に樹木が繁茂する結果となった。それに対して一部掘削をしなかった場合(Case1)、43.8%と期待値が増加していることから、実際に行われた一部掘削(Case2)は樹林化抑制に対して効果的であったと考えられる。一方、従来実施されることが多い切り下げケース(Case4,6)では、それぞれ21.7%、18.6%と大きく樹林化期待値が減少したことから、本研究で想定した条件では樹林化抑制に更に効果的であることがわかった。また、掘削した土砂を低水路に戻したケース(Case5,7)では、それぞれ19.5%、15.9%と僅かながら期待値が減少した。本研究で対象とした荒川のように低水路幅に対して堤間幅が大きい河川の場合、掘削土砂の還元によって二極化を改善したとしても、砂礫州や高水敷に乗り上げてからの水位の上昇にはそれほど影響しないため、それほど期待値が減少しなかったと考えられる。しかしながら、低水路幅に対して堤間幅が小さい河川に対しては、流下能力上問題がない場合に限っては、低水路の通水断面積を減らし二極化を改善することで、大きな樹林化抑制効果が得られるものと考えられる。

4. おわりに

植物の破壊・流失、洪水攪乱後の再生長特性、細粒土砂の堆積特性に応じた遷移速度の変化を考慮したモデルを用いて、砂礫州の切り下げケースに応じた樹林化のしやすさの確率的な評価を試みた。実際に砂礫州の一部掘削が実施された荒川の本田地先における砂礫州を対象に、洪水流量を変化させた30年間の植生動態解析を1000回試行することで、切り下げケースが樹林化期待値に及ぼす影響を比較したところ、以下の点が明らかになった。

- ① 本解析モデルは、実際に一部切り下げが実施された2006から2014年までの樹林化面積を概ね表現できており、用いた解析モデルの妥当性を確認できた。
- ② 各切り下げケースの樹林化期待値を比較したところ、一部掘削は掘削前の地形に比べて樹林化期待値を下げるということがわかった。また、この砂礫州においては、斜め切り下げケース(Case6)が、考慮した切り下げケースの中で最も樹林化期待値を下げるということがわかった。
- ③ SLIによる遷移の早期化、BOIによる破壊規模に応じた再生長速度の変化を考慮すると、樹林化面積の期待値はそれぞれ、増加、減少した。長期的な植生動態を把握する場合、上記のモデル化は有効であることが示唆された。

謝辞：本研究を行なうにあたり、国土交通省関東地方整備局荒川上流河川事務所に多くの資料を提供して頂いた。また、河川環境管理財団助成(代表者 田中規夫)の一部を使用した。記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 清水義彦：礫床河川の植生化について－河川地形・河床材料と洪水攪乱の視点から－，第44回水工学に関する夏期研修会資料，2008。
- 2) 藤田光一，李參熙，渡辺敏，塚原隆夫，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/II-65，pp.41-60，2003。
- 3) 八木澤順治，田中規夫：河道内植生の洪水による破壊・再生を考慮した植生動態モデルの開発，水工学論文集，第53巻，pp.1171-1176，2009。
- 4) 酒井紀誓，戸田祐嗣，辻本哲郎：河道内植生の種間競争・拡大を考慮した砂州地形及び植生変化の数値解析，水工学論文集，第57巻，pp.I-1357-1362，2013。
- 5) 八木澤順治，田中規夫，福岡捷二，河道内植生の洪水による破壊および破壊規模に応じた再生・拡大過程を考慮した植生動態モデルの開発，河川技術論文集，第19巻，pp.393-398，2013。
- 6) 田中規夫，八木澤順治，大塚翔平，洪水減水波形と砂礫州の形状特性による土砂堆積特性を考慮した砂礫州の樹林化評価，土木学会論文集B1(水工学) Vol.70, No.3, 60-70, 2014。
- 7) 八木澤順治，田中規夫，洪水時における砂礫州上の土砂堆積とそれに応じた植生遷移を考慮した植生動態モデルの開発，土木学会論文集B1(水工学) Vol.70, No.3, 71-81, 2014。
- 8) Kasun De Silva, Tanaka, N. and Yagisawa, J., Identification of the return period of flood disturbance suitable for increasing the diversity at gravel bars in middle stream of rivers, *Landscape and Ecological Engineering*, published online, 2013。
- 9) 利守伸彦，宮本仁志，植生動態モデルを用いた樹林化河道の間伐・切り下げによる洪水水位低減効果の確率評価，土木学会論文集B1(水工学)，Vol.70, No.4, I_1381-1386, 2014。
- 10) 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実験，土木学会論文報告集，第206号，pp.59-69，1972。
- 11) 田中規夫，八木澤順治，福岡捷二，樹木の洪水破壊指標と流失指標を考慮した砂礫州上樹林地の動態評価手法の提案，土木学会論文集B，Vol. 66, No. 4, 359-370, 2010。
- 12) 田中規夫，八木澤順治，佐々木寧，福岡捷二：河道内樹木の洪水破壊形態と破壊限界値の基盤土壌条件による相違，水工学論文集，第52巻，pp.649-654, 2008。
- 13) 森千春：河道管理のための植生の長期変動予測に関する研究，東京大学修士論文，pp.42-45，1999。
- 14) 茂木信祥，須賀堯三，池田裕一：河道内高木群落の形成過程，水工学論文集，第44巻，pp.837-842，2000。

(2015. 4. 3受付)