

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

DYNAMIC GROWTH MODEL OF RIVER VEGETATION CONSIDERING
REGENERATION AND EXPANSION PROCESS OF TREES WITH CHANGING
MAGNITUDE OF DESTRUCTION

八木澤順治¹・田中規夫²・福岡捷二³

Junji YAGISAWA, Norio TANAKA and Shoji FUKUOKA

¹正会員 博(学) 埼玉大学大学院助教 理工学研究科 (〒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 (〒338-8570 埼玉県さいたま市桜区下大久保255)

³フェロー会員 中央大学研究開発機構教授 (〒112-8551 東京都文京区春日1-13-27)

A dynamic model for predicting the long term change of vegetated area in river was developed when the flood does not change the morphology of the gravel bar. In this simulation model, the expansion, destruction due to floods and regeneration of the plants were considered. In this study, the wash-out of plants and tree trunk breakage were considered as the destruction mechanism of the river vegetation due to floods. For elucidating the characteristics of regeneration of tree type vegetation, tree regeneration situation after 1 year of the 2006 and 2007 flood event was investigated in the Arakawa River. The simulation model was applied to the middle stream reach of the Arakawa River for validating the change of vegetated area from 2000 to 2012. This model expressed the situation of vegetated area in 2012 within the reasonable limit. Especially, this model can be found to describe the location of each vegetation and expansion area of woody type vegetation by considering the tree's regeneration and expansion after the trunk bending or breaking damage by floods.

Key Words : *regeneration, expansion of vegetated area, destruction of vegetation due to floods*

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)を正確に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、

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)}、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。

について、流失現象に関しては、過去の多くの観測および解析事例から(例えばEgger⁵⁾ら、田中ら⁶⁾)、その評価はある程度の精度で可能となりつつあり、多くの植生動態モデルに組み込まれている。しかし、その一方で、清水ら⁷⁾で報告されているように、破断・倒伏といったダ

メージを受けた植生のその後の再生長、拡大過程は、無撓乱状態(多くの植生動態モデルで参考にされている末次ら⁸⁾の知見)でのそれと比べると大きく異なると考えられる。また、その相違が洪水撓乱後の砂礫州上の植生分布の状態を大きく変化させるため、特に中長期的なタイムスケールで実施される植生動態モデルの解析結果の精度が著しく悪くなることが予想される。

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済みである。この中で、破断・倒伏された樹木の再生長に関する観測データから生長の遅れを考慮し、それを考慮しなかった場合の植生分布の解析結果と比べ、実測の植生分布に近い状況を表現できることを報告している。しかしながら、破壊後の再生長は小さな出水(2006年洪水)で得られた知見のみを用いて導入されていること、繁茂領域の拡大過程は洪水影響が考慮されていないこと、

得られた植生分布のデータの制約から、2000年から2007年という短い期間での検討であったこと等の課題があった。

そこで、本研究では植生動態解析の対象期間を2000年から2012年までに拡大する。また、2006年、2007年の、それぞれ小規模、大規模洪水後の植生分布調査結果より、上記の植生動態に関連した素過程(再生長、拡大過程)が、植生の破壊規模に応じて変化するという知見を導入し、植生分布の精度良く評価するモデルの開発を目的とする。

2. 植生動態モデルの構築

植生動態は、図-1に示すように、(1)洪水による植生の破壊、(2)洪水時の洗掘・植生空間への土砂堆積、(3)植生の遷移、(4)植生繁茂領域の拡大、という4つの現象を統合した形でモデル化した。以下では、モデルの骨格となる上記4つの現象のモデル化のうち、従来モデル*から変更した(1)、(3)、(4)についてのみ説明する。

(1) 洪水による裸地の維持および植生の破壊

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、裸地を形成する基盤の移動(裸地の維持)、草本・木本の流失(裸地への更新)、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。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⁹⁾)より算出した。草本・木本の流失に関しては、前報³⁾では、植物種毎に流失限界となる底面せん断力 τ_c を設定することで、流失の有無を判断した。しかしながら、 τ_c で評価した場合、河床材料に応じてその値が変化するため、一般化することが難しい。そのため、田中ら⁶⁾が提案している流失評価指標 $WOI(=\tau_{*90}/\tau_{*c90})$ を採用した。田中ら⁶⁾によれば、多摩川や荒川の複数砂礫州を対象に実際の流失状況を調査した結果、木本・多年生草本については概ね $WOI>1$ で流失となることを明らかにしており、本研究ではそれらを各

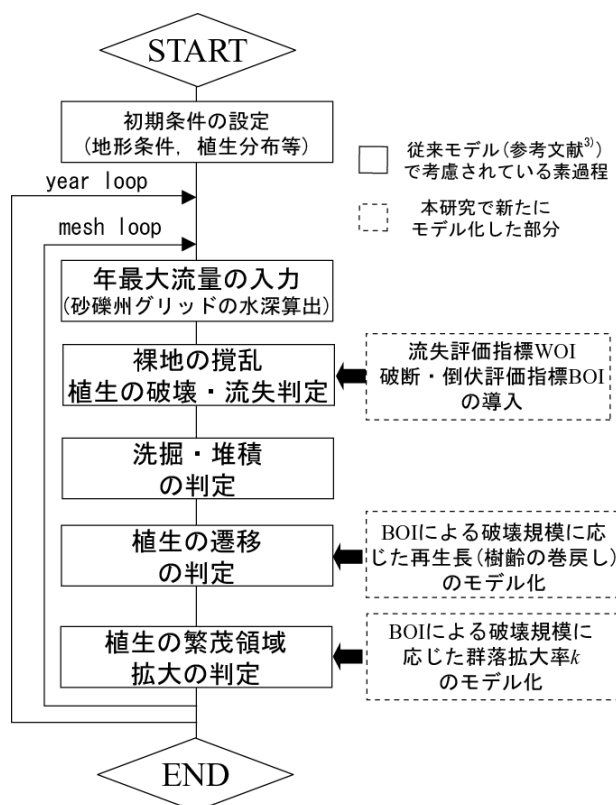


図-1 本研究で開発したモデルのフローチャート

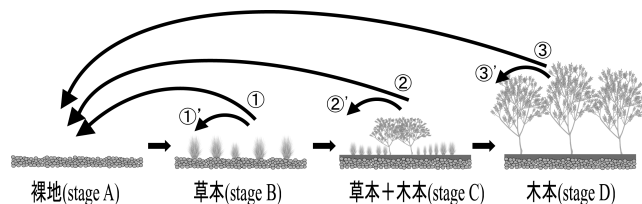


図-2 本研究で取り扱う植生遷移の素過程

、は各ステージから裸地への変化、'、'、'は流失を伴わない破壊。本研究では、主に'、'からの再生長・拡大過程を破壊規模と関連付けてモデル化

植物の流失限界値と設定した。また、木本の破断・倒伏に関しては、田中・佐々木¹⁰⁾と同様の方法で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¹¹⁾の載荷試験結果を参考に以下の式より算出した。

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

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¹¹⁾、タチヤナギ¹²⁾)として与えた。

(2) 植生の遷移 -破断・倒伏評価指標BOIによる巻き戻し効果のモデル化

前節の判断方法で破断・倒伏したと判断された樹木は、図-3に示すように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．前報³⁾では、 x は2006年の洪水によって破断された樹木の翌年の再生長から1年程度の樹齢の巻き戻しが生じるとモデル化した．しかしながら、2006年の洪水は比較的小規模(洪水確率年10年程度)で、樹木の破壊規模もそれほど大きくなかった．そのため、洪水後2週間後に実施した観測では、すでに萌芽が始まっていたことを確認している．一方、2007年の洪水(洪水確率年25年程度)後の観測では、2006年洪水後に見られたような速やかな萌芽再生が確認されなかった．このような地上部の破壊規模の違いは、その後の再生長過程にも違いを生じさせるものと考えられる．そこで、本研究では、上記のような破壊規模の違いが、樹齢の巻き戻し効果 x との関係を調べるため、破壊規模を表す指標として、田中ら⁶⁾が提案している破断・倒伏評価指標BOIを採用した．BOIは式(3)に示す破断・倒伏限界式より、各樹木繁茂グリッドで算出されるモーメントで破壊可能な胸高直径 d_{BH_max} を算定し、得られた d_{BH_max} を胸高直径 d_{BH} で除することで算定した．

(3) 破断・倒伏評価指標BOIによる木本群落拡大速度のモデル化

前報³⁾では、植生の繁茂領域の拡大を表現するために、植物種ごとに異なる拡大率 k (m/year)を用いている．その拡大率を決める際に、多摩川・千曲川で様々な植物種の拡大率を観測結果より推定している末次ら⁸⁾を参考にした．その結果から、本研究ではタチヤナギ、ハリエンジュの拡大率 k はそれぞれ、4.0、1.0として設定している．しかしながら、それらの値は、非攪乱状態で得られた知見であるため、本研究で対象とするような破壊・再生が繰り返される場合の拡大率とは異なる可能性が高い．そこで、前節と同様、規模の大きく異なる2006年、2007年洪水時に破壊された群落の翌年の拡大量から拡大率 k を把握し、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なった．

(5) 計算条件

熊谷大橋上流に位置する砂礫州(距離標80km)を対象とし、平成12年(2000)から平成25年(2013)の14年間に対し、植生動態モデルを適用した．平成11年(1999)の洪水で砂礫州上の比高の大きい場所に残存したヤナギ群落を除く大部分の植生が流失していた．残存したヤナギ群落を植生繁茂状態の初期条件として与え、2000年を計算開始年とした．本モデルでは大規模な側岸侵食や河床変動に伴う砂礫州の平面形状の変化を含めるまでには至っていない．そこで、平成11年以降の砂礫州の形状がそれほど大きく変わっていないということを過去の航空写真により

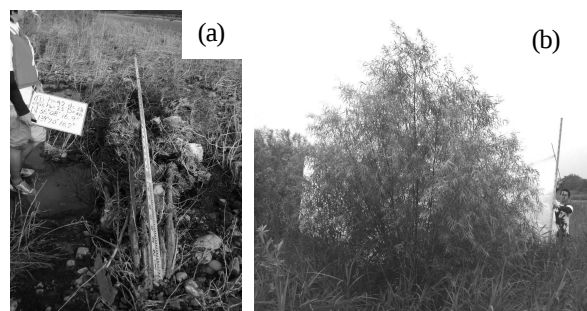


図-3破壊された樹木の翌年の再生長

(a) 2006年洪水時に破断された樹木、(b) 2007年に再生長した(a)の樹木

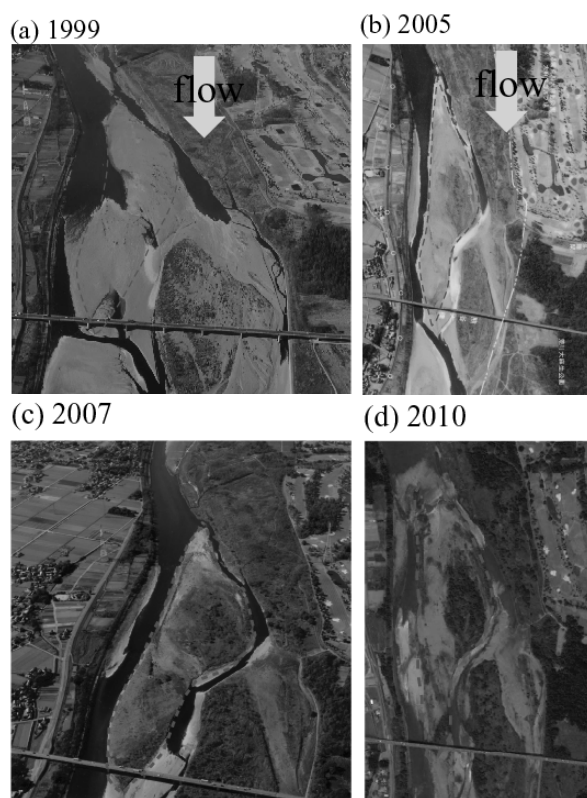


図-4 解析期間2000年-2013年における計算対象砂礫州の平面形状の変化を示す航空写真 (a)1999年、(b)2005年、(c)2007年、(d)2010年

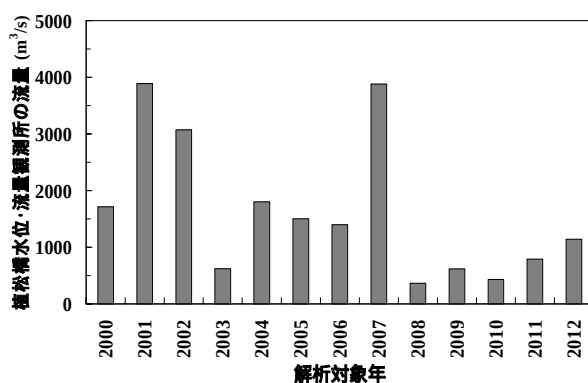


図-5 植生動態モデルに用いた2000～2012年の年最大流量 (植松橋水位・流量観測所(距離標86km地点))

確認した(図-4)．対象洪水としては，上記計算期間の年最大流量を対象として計算を行なった(図-5)．1年に複数の洪水がある場合もあるが，その年で最も砂礫州上の植生に影響のあったものとして，年最大流量の洪水のみを対象とした．また，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，植生繁茂状態の初期条件は，計算開始年である2000年の航空写真をもとに設定した．

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，計算開始年(2000年)の粒度分布の情報がないこと，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．

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が，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へた．

3. 植生動態解析結果

(1) 異なる洪水規模による破断・倒伏後の樹齢の巻き戻し効果および拡大速度の変化

図-6(a)に破壊前の胸高直径から推定される樹齢(Y_b)と破壊後に再生した胸高直径から推定される翌年の樹齢(Y_a)との関係を示す．ここで破壊前後の植生調査はそれぞれ，2006年10月と2007年9月(台風前)，2007年9月(台風後)と2008年9月，の約1年間の間隔で実施した．なお，推定樹齢は平均的なタチヤナギ¹¹⁾・ハリエンジュ¹²⁾の樹齢と胸高直径の関係を用いた．図-6(a)の破線は，破断・倒伏を受けなかった樹木の翌年の樹齢を表している．胸高直径から推定された破壊後の樹齢(Y_a)は，破線よりも小さい値を示していることから，樹齢の巻き戻し効果があることがわかる．樹齢にして何年程度巻き戻されたかに関しては，多少ばらつきはあるものの，比較的規模の小さい2006年洪水では $Y_a=Y_b-1$ の関係式で表せることがわかる．一方，規模の大きい2007年洪水で破壊された

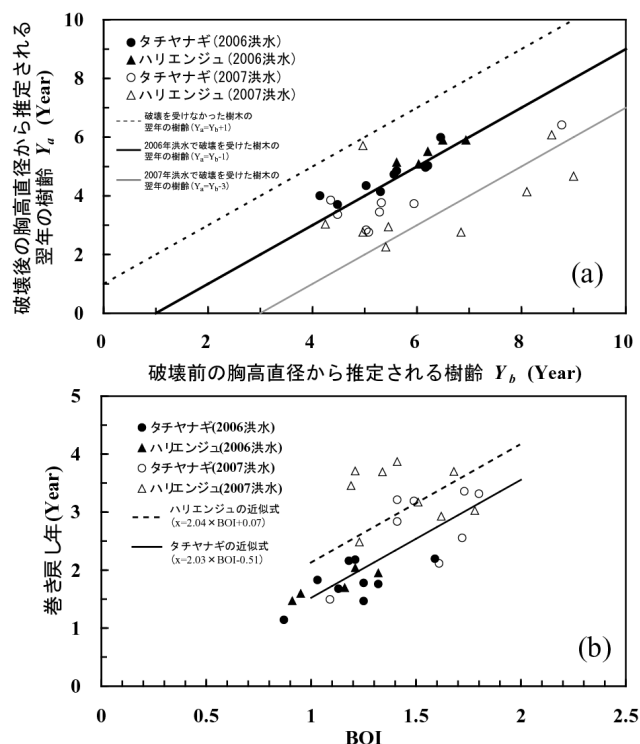


図-6 破壊された樹木の再生特性
(a)破壊前後の胸高直径から推定される樹齢の関係
(b)BOIと巻き戻し年 x との関係

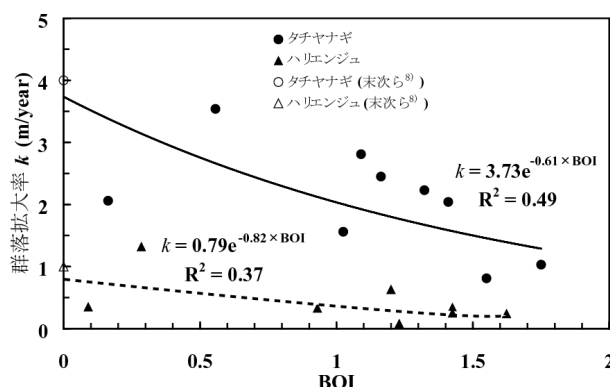


図-7 破壊された樹木群の破壊規模(BOI)による群落拡大率 k の変化

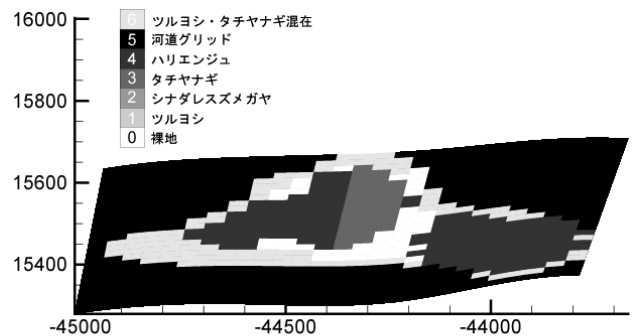
樹木に関しては，樹種・樹齢による相違が見られる．樹種による違いに関しては，ハリエンジュよりもタチヤナギの方がやや巻き戻し年が小さい(再生長が早い)傾向が見られる．また，どちらの樹種についても破断前の樹齢が若い方が再生長が早いことがわかる．しかしながら，今回データが取得できた多くの樹木について $Y_a=Y_b-3$ で概ね表現可能となっていると考えられる．2006洪水，2007年洪水で破断・倒伏を受けた樹木が巻き戻された平均的な時間はそれぞれ約2年，約4年であることがわかる．このことから，より大きな洪水規模で生じた破壊では巻き戻される樹齢が大きくなることがわかる．そこで，異なる破壊規模で生じる巻き戻し年をモデル化するために，巻き戻し年とBOIとの関係を調べた(図-6(b))．この図よ

り、BOIが大きくなるに従って巻き戻し年 x も大きくなる傾向がみとれる。樹種による違いを見ると、特にハリエンジュにややばらつきが見られるものの、両樹種について直線の近似式を仮定すると、それぞれ図-6(b)中に示す式が得られた。本研究では、これらの式より破壊規模に応じた樹齢の巻き戻し年 x を考慮した。

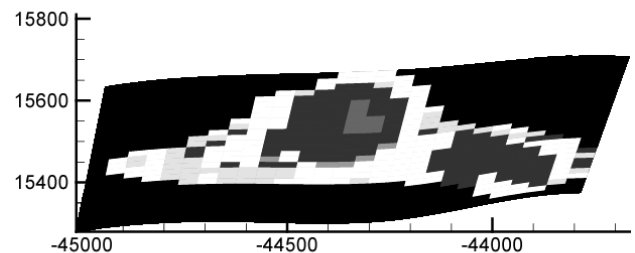
図-7に破壊された樹木群の破壊規模(BOI)とその後の群落拡大率 k との関係を示す。ここで示した k は、2007年9月洪水後から2012年8月までの約5年間で群落の拡大から年平均値として算出した値を示している。この図より、2007年洪水で得られた破壊規模(BOI)が大きくなるに従って、群落拡大率 k は小さくなるのがわかる。この原因としては、地上部が破壊された樹木は、群落の拡大よりも再生を優先させることが考えられる。従来モデル³⁾では、洪水攪乱を受けた樹木群に対しても、図中にあわせて示した末次⁸⁾の調査結果を用いていた。本研究では、破壊規模が群落拡大率 k に及ぼす影響を考慮した、図-7中の式をそれぞれの樹種の群落拡大率 k として用いた。

(2) 破壊規模が再生に及ぼす影響を考慮した植生動態解析結果

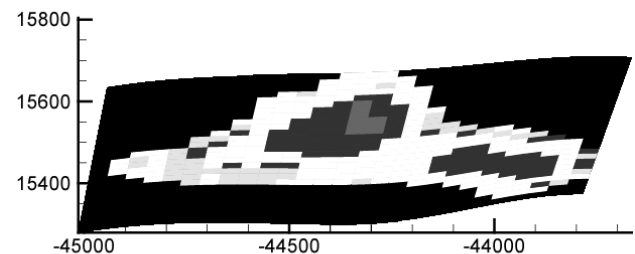
図-8(a)、(b)に破壊規模(BOI)に応じた樹齢の巻き戻し効果考慮の有無による、解析最終年(2012年)の植生動態解析結果を示す。また、図-9に、解析結果に対応する対象植物の分布図(2012年の洪水後に観測)を示す。図-8(a)と(b)を比較すると、従来モデル³⁾のように破壊を受けた樹木は一律で樹齢が1年巻き戻されるとモデル化した場合の結果(図-8(a))よりも、本解析のように、図-6に示す破壊規模に応じて再生に遅れが生じるモデル化を加えた結果(図-8(b))の方が、実際の植生分布(図-9)をより再現できていることがわかる。特に、砂礫州外縁のツルヨシ・タチヤナギの繁茂領域、砂礫州後部付近のハリエンジュの繁茂領域が、従来モデルに比べ本解析の結果の方が減少している点において、実際の植生分布により近い形で表現できていることがわかる。本研究では、破壊された年には群落の拡大は生じないと仮定してモデル化している。そのため、破壊規模の大きな樹木の再生により遅れが生じることを考慮した本解析の方が破壊される状況が増加することで、群落の拡大が抑制されたと考えられる。一方、破壊規模に応じた樹齢の巻き戻し効果を加えることで、全体的な植生繁茂領域の傾向は実際の状況に近いものの、砂礫州後部のハリエンジュ群落の繁茂領域が過大に評価されている点、砂礫州中央部のハリエンジュ・タチヤナギ群落の繁茂領域がやや過大に評価されている点については、樹齢の巻き戻し効果の考慮のみでは、より実測に近い結果を得ることは難しいと考えられる。



(a) 従来モデル

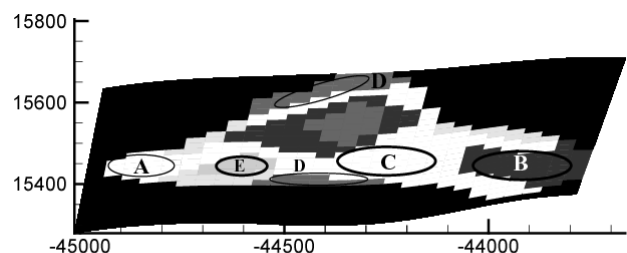


(b) 従来モデル + 破壊規模に応じた樹齢の巻き戻し考慮



(c) 従来モデル + 破壊規模に応じた樹齢の巻き戻し考慮 + 破壊規模に応じた群落拡大率 k の考慮

図-8 解析最終年(2012年)における対象砂礫州の植生分布に関する解析結果 (a)従来モデル³⁾による解析結果、(b)従来モデルに破壊規模に応じた樹齢の巻き戻し効果(図-6)を考慮した解析結果、(c) (b)にさらに、破壊規模に応じた群落拡大率 k の変化(図-7)を考慮した解析結果



(d) 解析最終年(2012年)の解析対象砂礫州で観測された植生分布

図-9 2012年の現地観測より確認した対象砂礫州の植生分布図 (A: 裸地の維持、B: ハリエンジュ群落の繁茂、D: タチヤナギの繁茂、E: ツルヨシの侵入)

(3) 破壊規模が群落拡大率 k に及ぼす影響を考慮した植生動態解析結果

図-8(b)、(c)に解析最終年(2012年)における植生動態解析結果を、破壊規模に応じた群落拡大率 k の考慮の有無による相違に注目して示す。図-8(b)と(c)を比較する

と、図-9中のC:裸地の維持、B: ハリエンジュ群落の繁茂領域については、破壊規模に応じた群落拡大率 k の変化(図-7)をモデル化した方が、実際の状況を表現することができる。このことより、破壊による樹木の再生長の遅れだけでなく、群落拡大率の変化も合わせて考慮することが、実際の植生繁茂状況を評価する上で重要となることがわかる。一方、D: タチヤナギの繁茂、E: ツルヨシの入植については、本解析モデルでは裸地と判断され、正しく表現することができなかった。本解析では、裸地が維持されるためには、各年の出水で50%粒径が動くことを条件としている。上記のDやEといった場所では平水位からの比高差が小さいため、比較的小規模の出水でも50%粒径が移動することで、解析上では裸地が維持されたと考えられる。また、もうひとつの原因として、本解析モデルでは細粒成分の堆積を考慮していないことが考えられる。近年の研究において、栄養塩を豊富に含んだ細粒成分が植生の入植に大きく影響することが指摘されている^{2), 4), 13)}。また、著者ら¹⁴⁾も洪水減衰期における細粒土砂の堆積と植生繁茂状態との関係を調べ、堆積の可能性が高い領域には、植生が繁茂していることを確認している。しかし、本解析では長期間の解析を可能にすることに重点をおいたため、洪水ピークのみで判断していること、また、入植の条件として、生育基盤の攪乱の有無と平水位からの比高差だけを用いて判断しているため、DやE地点の植物の入植を正しく評価できなかったと考えられる。

4. おわりに

本研究では、植物の破壊・流失、洪水攪乱後の再生長特性を考慮したモデルに、従来考慮されていなかった、破壊規模に応じた再生長、群落拡大率を考慮した植生動態モデルの改良を試みた。荒川の熊谷大橋地点における砂礫州を対象に2000年から2012年の13年間の植生動態解析を行ない、実際の植生分布と比較したところ、以下の点が明らかになった。

破壊規模に応じた再生長、群落拡大率を考慮した本解析モデルは、樹木群落の繁茂領域、裸地が維持されている箇所等、実際の砂礫州の状況を概ね表現できており、今後の植生動態を予測できる可能性を示唆した。

実際の植生分布を表現できている部分もあったものの、低水路際の植物の入植が正確に評価できない場合もあるため、外力による植生の破壊のみならず、植生の入植に大きな役割を果たす細粒成分の堆積過程も植生動態解析モデルに反映することで精度向上を図る必要があると考えられる。

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/ -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) Egger, E., Benjankar, R., Davis, L. and Jorde, K.: Simulated effects of dam operation and water diversion on riparian vegetation of the lower bois river IDAHO, USA, 32nd IAHR congress(CD-ROM), 2007.
- 6) 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.
- 7) 清水義彦，小葉竹茂機，岡田理志：ハリエンジュによる動的河道内樹林化について，水工学論文集，第45巻，pp.1099-1104，2001.
- 8) 末次忠司，藤田光一，服部敦，瀬崎智之，伊藤政彦，榎本真二：礫床河川に繁茂する植生の洪水攪乱に対する応答，遷移および群落拡大の特性 多摩川と千曲川の礫河原を対象として，国土技術政策総合研究所資料，第161号，2004.
- 9) 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.
- 10) 田中規夫，佐々木 寧：2006年ジャワ津波災害において海岸林が果たした役割とその破断・なぎ倒し限界，水工学論文集，第51巻，pp.1445-1450，2007.
- 11) 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.
- 12) 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.
- 13) 渡辺敏，藤田光一，塚原隆夫：安定した砂礫州における草本植生発達の有無を分ける要因，水工学論文集，第42巻，pp.439-444，1998.
- 14) 八木澤順治，田中規夫，福岡捷二，土砂堆積指標を考慮した砂礫州の樹林化評価に関する研究，河川技術論文集，第18巻，pp.65-70，2012.

(2013.4.4受付)