

# 樹林帯の科学と工学：その評価と制御・利活用

## SCIENCE AND ENGINEERING OF FOREST: EVALUATION OF THE FUNCTION, CONTROL AND UTILAZATION

浅枝隆<sup>1</sup>・田中規夫<sup>2</sup>

Takashi ASAEDA, Norio TANAKA

<sup>1</sup>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)

<sup>2</sup>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)

Riparian vegetation along rivers and coasts has a crucial role of the ecosystem therein. However, it sometimes deteriorates the flow capacity of the river channel, therefore the determination of right amount of vegetation is an important issue in the river management. Vegetation dynamics as well as the river morphology are highly affected by the interactions between the flood disturbance and the response of the vegetation. Recruitment and mortality of riparian vegetation depend on the characteristics of flood disturbances. Several numerical models, either phase based or individual based, are developed to describe the detailed vegetation patterns in the river channel, associated with the hydrological conditions. The concept of 'Ecosystem-based Disaster Risk Reduction (Eco-DRR)' has been reviewed, compared with 'bioshield' concept. Many bioshield studies are conducted for mitigating tsunami disasters including multiple defence systems. However, only a few studies are conducted to increase the forest diversity though complex stand structures of diverse forest have a potential to reduce tsunami energy efficiently.

**Key Words** : growth dynamic model, forestation, flood disturbance, bioshield, tsunami, Eco-DRR

### 1. はじめに

水圏（水際含む）に存在する植生の問題点や効能に関連して、水工学と生態学の関連で多くの研究が行なわれている。1) 河道内樹林化の仕組みとそのモデリング、2) 生態系を基盤とした災害リスク軽減 (Eco-DRR) とバイオシールド、からその現状と課題を整理する。1)は樹林に至る草本からの遷移を含む範囲、2)は樹林の活用という視点で草本を含まない範囲、を主体として論じる。

国際学会 ISE や国際学術雑誌より河道内樹林化問題の動向について取りまとめ、対処方法に関する知見を得る。減災についてバイオシールド、Eco-DRR 概念を整理し、力学的機能の強化と植生多様度が持つ意味の評価を行う。

### 2. 河道内樹林化の仕組み、モデリングと課題

河道内の植生についての研究は、かつては植物学と河川工学で独立して行われてきたが、近年、学際領域の問題として取り扱うことが一般化している。そうした中では、対象とする問題をそれぞれの特性に応じていくつかの領域に区分し、次に、個々の区分ごとの水理・植生条件の分析を行う手法と、水理機構に応じて生育する植生の条件を求めるといった手法の両方が行われる。前者は主に地理学・地形学の分野で、後者は河川工学の分野で頻繁に採用される手法である。

#### (1) 河道内に形成される領域区分

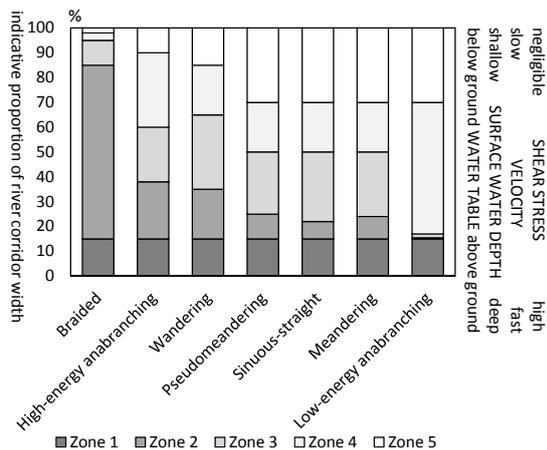
Gurnell et al.<sup>1)</sup>は自然に近い河川では、図-1 に示される

ように、川幅方向に、Zone1 から 5 までの区分分けを提唱、いくつかの河川に適用し一般化を試みている。Zone1 はほぼ常に冠水している場所であり、冠水に強い植生のみが生育、2 は水面に近く、礫の洗掘・堆積を生ずる場所で頻繁な冠水に強い抽水植物、3 は比高が高くなり、細粒土砂の堆積を生ずる場所、4 は冠水はするものの土砂移動は生じない場所で、定期的な冠水が必要な植生が生育、5 はほぼ冠水しない場所で、限られた土壌水分量でも育つ植生が生育する場所である。すなわち、低次元の Zone では、土砂の洗掘、堆積が、Zone の次元の増加に伴って、冠水と堆積、冠水のみが生ずることになる。いずれの Zone においても、土砂移動と植生との相互作用は重要である<sup>2)</sup>。

流下方向には、上流域の河道域が狭い場所では、低い Zone のみが存在、河道域の拡大に従って Zone の数が増えるとしている。わが国の河川の場合には、過去には Braided の分類に区分され、最近では樹林化に伴い、Low-energy anabranching に近づいていると解釈できる。

人工的な改変の下流への影響は、様々な形で捉えられるものの、特に横断構造物による影響を含め、自然河川での取り扱いを超えた扱いが必要になる。

河川の横断構造物は、流路が固定されること、洪水流の特性を変化させること、土砂の流下を妨げることで、Zone の次元が上昇する。動的な解析と共に、衛星写真等を用いた下流への影響範囲の分析も行われている。その結果を見ると、下流域の流域からの流入にもよるものの、概ね、20-30 km の範囲にわたって、植被率が上昇してい



Zone 1: permanently inundated  
 Zone 2: fluvial disturbance dominated (coarse sediment erosion & deposition)  
 Zone 3: fluvial disturbance dominated (fine sediment deposition)  
 Zone 4: inundation dominated  
 Zone 5: soil moisture regime dominated

図-1 河道内の領域区分 (Gurnell et al.<sup>1)</sup> を一部修正)

ることが示されている<sup>3)</sup>。

## (2) 群落の形成および消失

動的には、河岸の植物群落は、植生の定着、生長/遷移、流失/枯死といった過程をたどり、それぞれの段階で重要になる現象が異なる。

### a) 植生の定着

河岸においては、樹木や草本群落の分散は以下のような過程を経る。

河岸植生の大半は水により散布される性質を有し、樹木の種子の散布時期に生じた洪水によって種子が下流に分散される。洪水の低減期に沈降、下流河岸に定着、十分な環境の下にある場合、発芽、生長する<sup>4)</sup>。種子の発芽、生長する場所は、土壤水分量に依存することから、通常時の水面からの比高に依存する<sup>5,6)</sup>。そのため、種子散布の時期に、洪水によって種子がこの比高に定着した場合にのみ発芽・生長する。こうした条件を満たす時期・比高幅でつくられる領域を **Recruitment Box** とよんでいる。季節的な増水、減水を有する河川では、水位は種子の散布期間の時間スケールよりもゆっくり変化する。種子の定着は減水期に生ずることから、図-2のように、減水期に水位が **Recruitment Box** を満たす条件に達し、しかも、減水速度が速すぎない場合に種子が定着・発芽する。減水速度が速すぎると、乾燥化が進み発芽が抑制される<sup>7)</sup>。しかし、わが国の河川のように洪水の期間が短い場合には、種子散布の期間が洪水の期間に比べはるかに長い。また、洪水の低減には数日程度しか要しないために、常に十分な土壤水分量が存在する比高でしか発芽できない。そのため、洪水のピークが **Recruitment Box** の条件を満たす場合に、定着した種子が発芽・生長するという取り

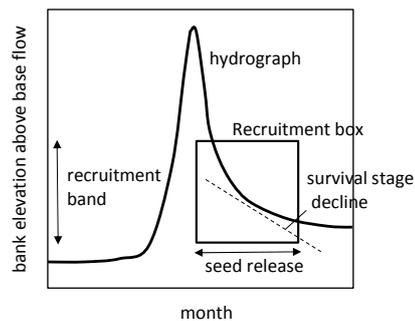


図-2 種子の河岸への定着のしくみ (Mahoney and Rood<sup>7)</sup>)

扱いが有効である<sup>8)</sup>。

種子の散布時期については、北米では主に *Populus* に関して、我が国ではヤナギ類に関してこうしたデータが与えられている<sup>9)</sup>。

### b) 生長、選択的枯死、遷移過程

樹木の定着、発芽後は、自己間引き、初年の冬季における枯死等で急激に密度が減少する<sup>10,11)</sup>。

この過程で、当初の貧栄養、低い土壤水分に対する耐性をもった種から、群落の発達とともに低日射量に対する耐性をもった種への遷移が生ずる。また、同時期においても、洪水の頻度が高い場合には、攪乱耐性の高い種が、頻度が低い場合には、陰影耐性に優れた種が優占する<sup>12)</sup>。さらに、場所的には、水面近傍は、頻繁に洪水で冠水、攪乱を受けることから、攪乱に対して高い耐性を有し、生長の速いパイオニア種の群落が形成され、比高の増加とともに、冠水頻度が低くなることから、乾燥や低日射量に対する耐性を有している種へと変化する。

河岸植生は、一方で、生態系エンジニアとして、他の種の侵入やその後の植生の遷移に大きな影響を及ぼす<sup>13)</sup>。細粒土砂の卓越する河川では、洪水後短時間で侵入する樹木は、攪乱や貧栄養に強く、土壤水分や植物の種子に富む細粒土砂を捕捉、草本類を中心に他の植生の生長を促進させる機能を有している<sup>2)</sup>。一方で、わが国の多くの河川にみられる様に、礫に富む河川では、堆積する土砂は水分や栄養分が乏しいことから、植生の回復が遅れ、礫の堆積が植生群落の形成を遅らせている<sup>14)</sup>。

この過程を上記の領域区分で考えると、低次元の **Zone** では、攪乱強度が激しく、比較的短時間に生ずる、細粒土砂を捕捉する生態系エンジニアとしての働きが重要になり、高次元の **Zone** では、長時間をかけて行われる種間競争が主要な要素となる<sup>12)</sup>。この十分に生長した後においては、個々の樹種の生長速度に依存する<sup>15)</sup>。

いずれにしても、空間的には水際からの距離や比高の増加によって、時間的には洪水から経過時間と共に、生態系にとって植生の持つ生態系エンジニアとしての機能、すなわち細粒土砂を蓄積する機能が重要になる過程から、種間競争の重要性の増す過程へと変化していく (図-3)。

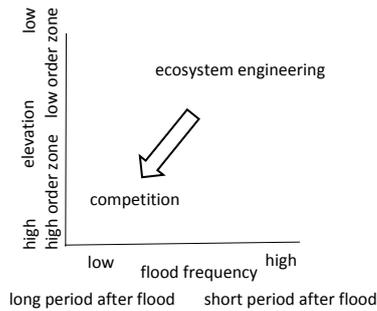


図-3 植物にとって重要になる形質

わが国の河川においては、大規模な洪水が比較的頻繁に生ずることから、樹種間の競争に依存する過程にまで達することは限られ、攪乱された土壌において、他の種も含めて定着を早める作用が重要である。ここでは、細粒土砂や有機物を捕捉、蓄積して土壌水分を捕捉する機能、及び、特に草本類において植物量を増加させる、窒素濃度を高める機能が重要になる<sup>16)</sup>。

土壌窒素濃度は、通常、大気負荷と窒素固定に依存する。ニセアカシア、アキグミ、ハンノキ、ネムノキ、クズ等がわが国の河川に多く見られるのは、これらの種が窒素固定機能を有するためである。洪水後初期の間は、盛んに窒素固定が行われて土壌窒素量を増加させるものの、窒素濃度の増加と共にその割合は徐々に減少する。また、それが特に比較的比高の高い場所で生じる。これは、窒素固定を行う種が、水際には生えないことと符合している<sup>17)</sup>。

さらに、冠水頻度の高い場所では、土壌窒素濃度が十分なレベルに達する時間がない。こうした場所では、mycorrhiza とよばれる植物の根に共生、栄養塩の吸収を助ける菌類の役割が重要になる。こうした場所では、ほとんどの植物種が mycorrhiza と共生することで、栄養分の補給を行っている<sup>18)</sup>。

#### c) 枯死、流失

植物の枯死、流失の評価には、河川の水文量にリンクさせて取り扱いがなされる場合は、洗掘量のような外部的な量で行われることが多い<sup>9)</sup>。しかし、わが国の場合、十分な水文データが存在することから、より詳細な取り扱いが可能である。

植物の流失限界評価手法を大別すると、流失限界流速値、流失限界せん断力値、植物の許容変形量を指標とするものがある。日本においては、無次元掃流力による評価が多い。末次ら<sup>19)</sup>は50%粒径を用いた無次元掃流力を指標として評価し、流失に対する抵抗力が弱い(目安として無次元掃流力が0.06~0.09程度で流失する)草本類と、抵抗力が強い(目安として無次元掃流力が0.08~0.14程度で流失する)草本類の分類を行なっている。一方、樹木を用いた引き倒し試験により樹木の倒伏限界モーメントを求める方法は一般的に行なわれており、末次ら<sup>20)</sup>は、1999

年8月の千曲川洪水による植生群落破壊の実態とその発生機構を調査し、ハリエンジュの倒伏・流失の特徴として、樹木の倒伏は流れによる抗力が原因であることを示し、清水ら<sup>21)</sup>は渡良瀬川を対象とし、ハリエンジュ樹林の攪乱痕跡調査と平面流数值解析をもとに、樹木が受ける破壊規模とその要因の推定を行い、樹林の破壊(流失、倒木、傾斜木)は河床、すなわち物理基盤の攪乱が主要因とし、移動限界礫径を指標とした樹木の破壊形式の仕分けが重要な視点となるとしている。田中ら<sup>22)</sup>は、多年生草本の流失限界<sup>23)</sup>や、荒川での樹木破壊と樹木流失の事例を組み合わせて、河道内砂礫州の樹林化し易さを評価する簡易指標を、90%粒径の無次元掃流力に関連する樹木流失指標と、抗力モーメントによる樹木破壊指標を用いて提案し、植生流失と場の動態の関係把握手法を提案している。

#### (3) 河岸植生の予測モデル

河川管理においてはこうした過程を表現しうる植生動態モデルの構築が求められている。

河岸植生の予測モデルは大きく二つの系統に分けられる(図-4)。CASiMiRに代表されるモデル<sup>24)</sup>では、対象となる河岸域をメッシュに分け、洪水かく乱の大きさや比高に応じて、存在する植物相を流失させる。流失の後、時間の経過とともに、環境条件に応じて定められた植物相 phase を過程、次にその植物相の遷移過程に従って、植物相を徐々に遷移させていく。植物相を記述していく、phase-based モデルである。従って、個々の phase 中の個々の個体の状況の把握はできないものの、水文データの精度による影響は少なく、大陸河川にみられるような規則的に季節的な洪水による、数百年レベルの長期間の影響を再現するには適した構造になっている。このモデルでは、多くの場合、微細土壌の場所に適用される場合が多く、phase の選択においても土壌水分量に大きく依存する。そのため、RibAV では、不飽和土壌中の水分分布の計算を取り込んでいる。

これに対し、Recruitment Box Model や DRIPVEM モデルでは、樹木個体を対象とする individual-based モデルである。Phase-based モデルと同様に、河岸域をメッシュに分割、洪水かく乱の大きさや比高に応じて存在する樹木個体を、樹齢等の樹木の特性に応じて流失させる。同時に、冠水域に樹木の種子を散布させる。Recruitment Box Model では、この過程を、河道内における種子の分散、沈降に分けて詳細に計算を行う。DRIPVEM は経験に基づく種ごとの密度で侵入させる。その後、樹木個体は個々に生長を行うものの、Recruitment Box Model では初年度の冬季の枯死率を、DRIPVEM では、経年的な枯死率を与えて個体数を減少させる。これらのモデルでは個体を基本においていることから、個体同士の競争の影響、樹齢分布、伐採等の人工的な影響の評価等、様々な適用が

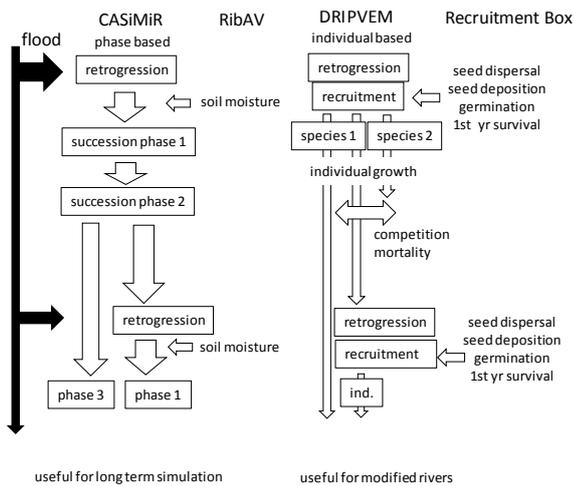


図-4 河岸植生モデル相互の関係

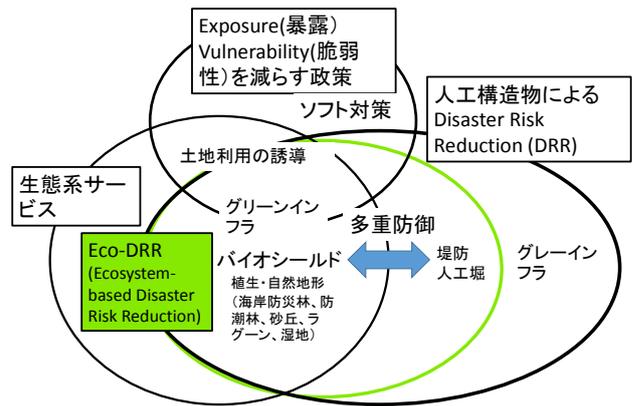


図-6 減災関連用語のキーワードの関係

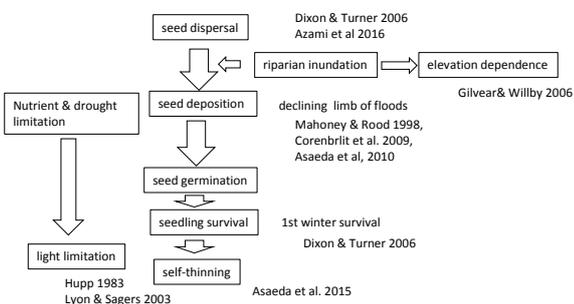


図-5 Individual-based model での種子の定着，発芽，生長の過程（文中の引用文献に Asaeda et al.<sup>25)</sup>, Hupp<sup>26)</sup>を追加）

可能である（図-5）。ただし、個体の生長を追跡することから、数十年レベル以上の長い期間の再現、多くの種を含む再現には問題を残している。水文データが充実し、人工的な改変の影響の著しいわが国の河川には合ったモデルといえる。

ここでは、樹木や草本類の分散は Recruitment Box やわが国の河川の特성에応じて改良された概念が用いられている。

### 3. 海岸防災林、多重防御の構成物、Eco-DRR としての樹林帯

#### (1) Eco-DRR (Eco-system based Disaster Risk Reduction)

2004 年インド洋大津波や 2011 年東北地方太平洋沖地震津波といった津波災害後の調査を受けて、マングローブ<sup>27)</sup>,<sup>28)</sup>,<sup>29)</sup>、砂丘と植生<sup>28)</sup>,<sup>30)</sup>、などの自然地形が津波の減勢に効果があったと再認識された。そうした自然地形の減災要素は広くバイオシールド<sup>31)</sup>と定義され、研究が活発化している。そのような概念は Eco-DRR としても注目を浴びている（図-6）。これは、2005 年に兵庫県で開催された「第 2 回国連防災世界会議」で合意された「兵庫行動枠組」の 5 つの優先行動のひとつである「潜在的なリ

スク要因を軽減する」に対して、環境資源の管理を通じて取り組むものである。日本でも、環境省の「生態系を基盤とした防災・減災」という概念により、干潟なども含む自然要素を積極的に保全・再生し、活用するという方向に向かっている。Eco-DRR は生態系サービスを活用しての潜在的なリスク軽減であるため、適用範囲は非常に広い。川沿いの水田や上流域の樹林帯も含め、すべて対象になる。しかし、本総説では水際の植生に限定して話を進める。

#### (2) バイオシールド (Bioshield)

バイオシールドとしての機能を発揮するのは密な樹木構成で樹林帯として多様な平面・鉛直構造であることが災害調査<sup>28)</sup>より指摘されている。破壊により機能を失う場合もあり、破壊限界、フラジリティ曲線、などが取りまとめられており、数値計算へも反映されており、効果を算出する研究が盛んに行なわれた<sup>32)</sup>。近年は堤防との比較で樹林帯効果を定量評価したもの<sup>33)</sup>、樹形の効果を論じるもの<sup>34)</sup>、堀や堤防などとの組み合わせでその効果を論じるもの<sup>35)</sup>なども増えている。単体の実樹木抵抗に関する知見はあるものの、密度変化や破壊をうける中で実樹木の抵抗がどのように変化するかについて、樹林帯の密度管理に耐えうる抵抗として知見は不足している。

津波において被害にあった箇所は、砂丘を削ってつくられた新興住宅地や観光地である場合が多いため、インド洋大津波以降、砂丘上にモクマオウなどの植林が NGO などにより行なわれた。マングローブ樹林帯においても、そうした植林が古くから行われている。近年、そうして形成された樹林帯の自然森林への回帰可能性についての研究も行われている<sup>36)</sup>。これは、植生多様度という側面だけではなく、Eco-DRR の力学機能としても多様な構成が望まれる。

短所として流木化の問題が古くから唱えられている<sup>37)</sup>。しかし、トラップした場合には樹林帯背後の流体力低減

効果<sup>38)</sup>や浮遊物捕捉機能のほうが大きい<sup>39)</sup>ことも評価されつつある。しかし、樹種、成長段階による効果の相違や密度管理の果たす役割についての研究は不足している。植生の多様度は、抵抗だけではなく破壊やトラップ現象を含めた力学面での多様度をもたらす可能性があるため、植生多様度も含めた検討が望まれる。

頻繁に津波被害が生じる日本においては、水際樹林帯の機能を堤防等と組合せた多重防御システムとして評価する研究がなされている。海外では、津波に限定せず海岸林、潟湖、砂丘、湿地などの生息場とその維持が滅亡に資するとした研究が増加しつつある。特に、Temmermanら<sup>40)</sup>は、湿地を再生し、そこに防災の役割を持たせることが既存工法よりも気候変動下では有効かつ低コストな防災であることを論じており、注目に値する。

#### 4. 結論

本レビューで得られた主な結果は以下の通りである。

- 1) 河道内樹林化の研究は、わが国の他にアメリカ、ヨーロッパで盛んである。しかし、海外での研究の多くは大陸の緩勾配の河川を対象にしたものであり、わが国で研究対象とされているものと異なる。すなわち、わが国では、急勾配であることから洪水の規模が相対的に大きく、樹木の更新速度が速いことから、対象とされる樹林が樹齢20–30年程度以下であるのに対し、大陸河川での研究は樹齢100年程度の樹木が対象となる。
- 2) 樹林化モデル構築に際しても、わが国では洪水による定着、生長、洪水による枯死の過程を対象とするのに対し、欧米では洪水による侵入の他に、一次遷移の過程を持ち込んでいる場合も多い。
- 3) 大陸河川の場合、河床が細粒土壌で構成されていることから、植物の生長律速因子として土壌水分が用いられており、わが国の河川中流域での河床構成材料である礫を対象としたものと異なる。
- 4) Eco-DRRはバイオシールドを包含する広い概念である。バイオシールドとしての機能を発揮するには密な樹木構成が必要であり、マングローブ樹林帯においても、そうした植林が行われる。海外では、そうした形成された樹林帯の自然森林への回帰可能性についての研究も行われている。
- 5) 頻繁に津波被害が生じる日本においては、海岸林の機能を堤防と組合せた多重防御システムとして評価する研究がなされている。
- 6) 陸地にある海岸防災林や水防林に関しては、樹種による効果の相違や密度管理の果たす役割についての研究は不足している。水際で災害時に効果を発揮する樹林帯においても植生の多様度も含めた検討が望

まれる。

#### 参考文献

- 1) Gumell, A.M., Corenblit, D., Garcia, de J. D., Gonzalez del T. M., Grabowski, R.C., O'Hara, M.T., Szewczyk, M.: A conceptual model of vegetation-hydrogeomorphology interactions within river corridors, *River Research and Applications*, Vol.32, No.2, pp.142-163, 2015.
- 2) Gumell, A.: Plants as river system engineers. *Earth Surface Processes and Landform*, Vol.39, pp.4-25, 2014.
- 3) Uddin, F.M.J., Asaeda, T. and Rashid, M. H.: Factors affecting the changes of downstream forestation in the South American river channels. *Environment and Pollution*, Vol.3, pp.24-40, 2014.
- 4) Johnson, W.C.: Tree recruitment and survival in rivers: influence of hydrological processes. *Hydrological Processes*, Vol.14, pp.3051-3074, 2000.
- 5) Gilvear, D. and Willby, N.: Channel dynamics and geomorphic variability as controls on gravel bar vegetation: River Tummel, Scotland. *River Research and Applications*, Vol.22, pp.457-474, 2006.
- 6) Asaeda, T., Gomes, P. I. A., Sakamoto, K., and Rashid, M. H.: Tree colonization trends on a sediment bar after a major flood. *River Research and Applications*, Vol.27, No.8, pp.976-984, 2011.
- 7) Mahoney, J.M. and Rood, S.B.: Streamflow requirements for cottonwood seedling recruitment-An integral model. *Wetlands*, Vol.18, pp.634-645, 1998.
- 8) Asaeda, T., Gomes, P.I.A. and Takeda, E.: Spatial and temporal tree colonization in a midstream sediment bar and the mechanisms governing tree mortality during a flood event. *River Research and Applications*, Vol.26, pp.960-976, 2010.
- 9) Dixon, A.M., Turner, M.G.: Simulated recruitment of riparian trees and shrubs under natural and regulated flow regimes on the Wisconsin river, USA. *River Research and Applications*, Vol.22, pp.1057-1083, 2006.
- 10) Azami, K., Fukuyama, A., Asaeda, T., Takechi, Y., Nakazawa, S. and Tanida, K.: Conditions of establishment for the *Salix* community at lower-than-normal water levels along a dam reservoir shoreline. *Landscape and Ecological Engineering*, Vol.9, pp.227-238, 2013.
- 11) Asaeda, T., Rashid, M.H. and Sanjaya, H.L.K.: Flushing sediment from reservoirs triggers forestation in the downstream reaches. *Ecology*, Vol.8, pp.426-437, 2015a.
- 12) Solari L., van Oorschot M, Belletti B, Hendrics D, Rinardi M, and Vargas-Luna A.: Advances on modelling riparian vegetation-Hydromorphology interactions. *River Research and Applications*, Vol.32, pp.164-178, 2016.
- 13) Corenblit D, Steiger J, Gumell AM, Tabacchi, E, and Roques L.: Control of sediment dynamics by vegetation as a key function

- driving biogeomorphic succession. *Earth Surface Processes and Landforms*, Vol.34, pp.1790-1810, 2009.
- 14) Sanjaya, K. and Asaeda, T.: Assessing the performance of a riparian vegetation model in a river with a low slope and fine sediment. *Environmental Technology*, Vol.38, pp.517-528, 2017.
  - 15) Yin, Y., Wu, Y., Bartell, S.M. and Cosgriff, R.: Patterns of forest succession and impacts of flood in the Upper Mississippi River floodplain ecosystem. *Ecological Complexity*, Vol.6, pp.463-472, 2009.
  - 16) Asaeda, T. and Rashid, M.H.: The impacts of sediment released from dams on downstream sediment bar vegetation. *Journal of Hydrology*, Vol.430, pp.25-38, 2012.
  - 17) Asaeda, T., Rashid, M.H. and Ohta, K.: Nitrogen fixation by *Puraria lobata* as a nitrogen source in the midstream sediment bar of a river. *Ecology*, Vol.9, pp.995-1005, 2016.
  - 18) Sarkar, A., Asaeda, T., Wang, Q. and Rashid, M.H.: Arbuscular mycorrhizal influences on growth, nutrient uptake, and use efficiency of *Miscanthus sacchariflorus* growing on nutrient-deficit river bank. *Flora*, Vol.212, pp.46-54, 2015.
  - 19) 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, pp.1-6, 2004.
  - 20) 末次忠司, 服部敦, 瀬崎智之: 洪水攪乱に伴う植生変化 - 千曲川を例にとり -, 水利科学, Vol.261, pp.33-47, 2001.
  - 21) 清水義彦, 小葉竹茂機, 吉川武志: 出水によるハリエンジュ樹林地の破壊とその規模推定に関する考察, 水工学論文集, 第 46 卷, pp.953-958, 2002.
  - 22) 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川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, pp.359-370, 2010.
  - 23) 瀬崎智之, 服部敦, 近藤和仁, 徳田真, 藤田光一, 吉田昌樹: 礫川上草本植生の流失機構に関する現地調査と考察, 水工学論文集, 第 44 卷, pp.825-830, 2000.
  - 24) Benjankar, R., Egger, G., Jorde, K., Goodwin, P. and Glenn, N.F.: Dynamic floodplain vegetation model development for the Kootenai River, USA, *J of Environmental Management*, Vol.92, pp.3058-3070, 2011.
  - 25) Asaeda, T., Rashid, M.H. and Baker, R.A.: Dynamic modelling of soil nitrogen budget and vegetation colonization in sediment bars of a regulated river. *River Research and Applications*, Vol.31, pp.470-484, 2015b.
  - 26) Hupp, C.R.: Vegetation pattern on channel features in the Passage Creek Gorge, Virginia. *Castanea*, Vol.48, pp.62-72, 1983.
  - 27) Danielsen, F., Sorensen, M.K., Olwig, M.F., Selvam, V., Parish, F., Burgess, N.D., Hiraishi, T., Karunakaran, V.M., Rasmussen, M.S., Hansen, L.B., Quarto, A., and Suryadiputra, N.: The Asian tsunami: a protective role for coastal vegetation, *Science*, Vol.310, p.643, 2005.
  - 28) Tanaka, N., Sasaki, Y., Mowjood, M.I.M., and Jinadasa, K.B.S.N.: Coastal vegetation structures and their functions in tsunami protection: Experience of the recent Indian Ocean tsunami. *Landscape and Ecological Engineering*, Vol.3, pp.33-45, 2007.
  - 29) FAO, ISBN 978-974-13-9321-3 (<http://www.fao.org/docrep/010/ai389e/ai389e00.htm>), 2007.
  - 30) Mascarenhas, A. and Jayakumar, S.: An environmental perspective of the post-tsunami scenario along the coast of Tamil Nadu, India: Role of sand dunes and forests, *J of Environmental Management*, Vol.89, pp.24-34, 2008.
  - 31) Renaud, F. G., Karen S.-R. and Marisol, E.: The role of ecosystems in disaster risk reduction. United Nations University Press, 2013.
  - 32) Tanaka, N., Vegetation bioshields for tsunami mitigation: review of effectiveness, limitations, construction, and sustainable management, *Landscape and Ecological Engineering*, Vol. 5, No.1, pp.71-79, 2009.
  - 33) Tanaka, N., Yasuda, S., Iimura, K. and Yagisawa, J.: Combined effects of coastal forest and sea embankment on reducing the washout region of houses in the Great East Japan tsunami, *Journal of Hydro- environmental Research*, Vol.8, pp.270-280, 2014.
  - 34) 田中規夫, 庭田侑, 佐藤 創, 鳥田宏行, 野口宏典: 樹形による破断・転倒現象の相違を考慮した海岸林管理に資する津波計算法の構築. 土木学会論文集 B2(海岸工学), Vol.71, No.2, pp.1\_307-312, 2015.
  - 35) 五十嵐善哉, 田中規夫, 堤防前面の樹林帯の厚みと樹木倒伏が堤防越流量に与える影響の実験的検討, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol. 72, No. 2, pp. 1\_319-1\_324, 2016.
  - 36) Asaeda, T., Barnuevo, A., Sanjaya, K., Fortes, M.D., Kanesaka, Y. and Wolanski, E.: Mangrove plantation over a limestone reef: Good for the ecology?, *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, Vol.173, pp.57-64, 2016.
  - 37) 首藤伸夫: 防潮林の津波に対する効果と限界, 第 32 回海岸工学講演会論文集, pp.465-469, 1985.
  - 38) Tanaka, N. and Onai, A.: Mitigation of destructive fluid force on buildings due to trapping of floating debris by coastal forest during the Great East Japan tsunami, *Landscape and Ecological Engineering*, Vol.13, pp.131-144, 2017.
  - 39) Tanaka, N. and Ogino, T.: Comparison of reduction of tsunami fluid force and additional force due to impact and accumulating after collision of tsunami-produced driftwood from a coastal forest with houses during the Great East Japan tsunami, *Landscape and Ecological Engineering* (in press).
  - 40) Temmerman, S., Meire, P., Bouma, T. J., Herman, P. M., Ysebaert, T. and De Vriend, H. J.: Ecosystem-based coastal defence in the face of global change, *Nature*, Vol.504, No.7478, pp.79-83, 2013.

(2017. 4. 3 受付)