

自然再生地における洪水導入規模が 既存湿地植生に与える影響

EFFECT OF FLOOD DISCHARGE ON THE WETLAND VEGETATION IN NATURAL REHABILITATION SITE IN RIVER

田中規夫¹・北上裕規²・小川友浩³・浅枝 隆⁴

Norio TANAKA, Yuki KITAKAMI, Tomohiro OGAWA, Takashi ASAEDA

¹正会員 工博 埼玉大学工学部助教授 建設工学科 (〒338-8570 埼玉県さいたま市桜区下大久保255)

²正会員 工修 新潟県佐渡地域振興局 地域整備部 (〒952-1555 佐渡市相川二丁目浜町20-1)

³学生会員 工学士 埼玉大学大学院 理工学研究科 (〒338-8570 埼玉県さいたま市桜区下大久保255)

⁴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)

For evaluating the effect of introducing flood on the vegetation in river-wetland rehabilitation site, where aridification is gradually progressing, this study focuses on two representative and dominant species, *Phragmites australis* and *Miscanthus sacchariflorus*. The transition of the two species was analyzed by their breaking moment of stems in flood conditions and growth dynamic analysis of the two species. River flow was analyzed by using two-dimensional depth averaged Reynolds equation to solve the moment acting on the stems. If the stem breaking is occurred every two years, the superiority of *M. sacchariflorus* is decreased and time for transition from *P. australis* to *M. sacchariflorus* is increased. On the other hand, the transition time becomes short when the flood causes no-stem breaking of *M. sacchariflorus*.

Key Words : *Miscanthus sacchariflorus*, *Phragmites australis*, stem-breaking moment, transition, dynamic growth model

1. はじめに

荒川旧流路群(埼玉県桶川市太郎衛門橋下流)は、旧来は荒川本流であったが、捷水路が整備され高水敷上に残された蛇行河川であった。さらにその旧流路には、荒川河道内に遊水効果を高めるための横堤が建設されたことから、現在では本川から切り離された3つの池(上池、中池、下池)となっている。この環境下においても湿地環境を維持しているが、本川の河床低下に伴う攪乱頻度の低下や周辺土地利用の変化による湿地の乾燥化が生じ生物多様性の減少が報告されている¹⁾。そこで、自然再生推進法に基づく湿地環境の保全整備が計画されている。その水確保の一施策として、本川からの越流をさせやすくすること、横堤により分断された池同士をつなぐこと、等により、中小規模の洪水攪乱を導入することが検討されている。こうした既存湿地に洪水攪乱を導入する場合に生じる影響を事前に予測する必要がある。

洪水が湿地の植物の生長に与える影響を解析するためにはダメージを受けた群落の生長を評価する必要がある。そのため、ヨシ²⁾やヒメガマ³⁾などの抽水植物に対して、刈り取りなどによる地上部損失が再生長や地下器官に与

える影響という形で基礎的な知見が抽出されつつある。そして、その特性は生長モデル^{4),5),6),7)}という形で定量評価されつつある。一方、抽水植物は水質浄化施設等ではSSの除去の役割を果たす等、粒子を沈降させる効果をもつため、粘着性のある湿地土壌に成立した抽水植物群落に対して、小規模な洪水を導入した場合には土砂堆積が進む可能性がある。すなわち、洪水導入規模が既存植生に与える影響を評価する際には、茎の破壊と土砂堆積が植物の生長に与える影響を定量評価する必要がある。

そこで本研究では、既存湿地(上池)にて競合している代表的な河川植生「オギ」・「ヨシ」に着目し、環境影響を①洪水攪乱規模、②ヨシ・オギの茎の破壊強度、③ダメージを受けたヨシやオギの生長解析、④土砂堆積の4点から分析を行った。

2. 解析方法

2-1 旧流路の河川流の解析

(1) 解析モデル

旧流路の流況を解析するに当たっては、細田ら⁸⁾による

一般座標系の平面2次元非定常流れのモデルに, Struve et al.⁹⁾による植生を考慮した直交座標系モデルを一般座標系に変換し取り込んだものを使用した。基礎式を以下に示す。

連続式

$$\theta \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{h}{J} \right) + \frac{\partial}{\partial \xi} \left(\frac{Uh}{J} \right) + \frac{\partial}{\partial \eta} \left(\frac{Vh}{J} \right) = 0 \quad (1)$$

運動方程式

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{Q_x}{J} \right) + \frac{\partial}{\partial \xi} \left(\frac{UQ_x}{J} \right) + \frac{\partial}{\partial \eta} \left(\frac{VQ_x}{J} \right) = -gh \left(\frac{\xi_x}{J} \frac{\partial Z_s}{\partial \xi} + \frac{\eta_x}{J} \frac{\partial Z_s}{\partial \eta} \right) - \frac{\tau_x}{\rho J} - \frac{F_x}{\rho J} + \quad (2)$$

$$\frac{\xi_x}{J} \frac{\partial}{\partial \xi} (-u'^2 h) + \frac{\xi_y}{J} \frac{\partial}{\partial \xi} (-u'v'h) + \frac{\eta_x}{J} \frac{\partial}{\partial \eta} (-u'^2 h) + \frac{\eta_y}{J} \frac{\partial}{\partial \eta} (-u'v'h)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{Q_y}{J} \right) + \frac{\partial}{\partial \xi} \left(\frac{UQ_y}{J} \right) + \frac{\partial}{\partial \eta} \left(\frac{VQ_y}{J} \right) = -gh \left(\frac{\xi_y}{J} \frac{\partial Z_s}{\partial \xi} + \frac{\eta_y}{J} \frac{\partial Z_s}{\partial \eta} \right) - \frac{\tau_y}{\rho J} - \frac{F_y}{\rho J} + \quad (3)$$

$$\frac{\xi_x}{J} \frac{\partial}{\partial \xi} (-u'v'h) + \frac{\xi_y}{J} \frac{\partial}{\partial \xi} (-v'^2 h) + \frac{\eta_x}{J} \frac{\partial}{\partial \eta} (-u'v'h) + \frac{\eta_y}{J} \frac{\partial}{\partial \eta} (-v'^2 h)$$

ここに, θ : 間隙率, t : 時間, J : ヤコビアン, (U, V) : 流速ベクトルの反変成分, (u, v) : 水深平均流速, (Q_x, Q_y) : 流量フラックス, g : 重力加速度, h : 水深, ρ : 水の密度, Z_s : 水位, (τ_x, τ_y) : x - y 座標系の底面せん断応力の成分, $-\overline{u'^2}$, $-\overline{u'v'}$, $-\overline{v'^2}$: x - y 座標系の水深平均レイノルズ応力, (F_x, F_y) : 単位面積あたりの植生抵抗である。

水深平均レイノルズ応力は Nezu & Nakagawa¹⁰⁾ による水深平均乱れエネルギーの実験式から算出する。また, 底面せん断応力は Manning 則より算出し, 間隙率 θ 及び植生抵抗 (F_x, F_y) は以下のように算出する。

$$\theta = 1 - \pi \frac{D_t m_t^2}{4} \quad (4)$$

$$F_x = C_d D_t m_t \frac{u \sqrt{u^2 + v^2}}{h}, \quad F_y = C_d D_t m_t \frac{v \sqrt{u^2 + v^2}}{h} \quad (5)$$

ここに, C_d : 抵抗係数, D_t : 植生密度, m_t : 直径 である。

(2) 平面流況解析条件

対象とした河川は, 図-1 に示す荒川旧流路(全長約 5km 川幅 30~100m) である。河床高データは国土交通省荒川上流河川事務所による測量データ(20~50m ピッチでの横断測量)を使用した。横断データは一般座標系のグリッドデータとして 100m ピッチに変換して使用した。旧流路の格子点数は, 流下方向 50 × 横断面方向 10 とした。また, 荒川旧流路のうち, オギ及びヨシの繁茂する場所として上流部(上流から約 1.3km 地点まで), その中でも洪水時における流速・水深状況の大きく異なる 2 点, すなわち, 上流から 400m 地点(Point A)と 1300m 地点(Point B)に着目した。Point A は河道内から陸域に向かいヨシからオギに分布が変化し, Point B は比高の高い部分にオギが見られるがほぼ河道内全域でヨシが分布している。

計算条件について, 初期水深は実際に水が溜まっている部分に水深を, フラッシュの流量規模は 3 ケース

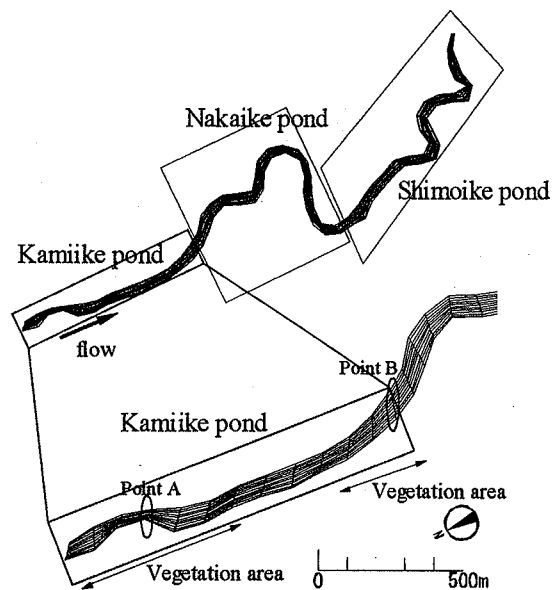


図-1 荒川旧流路の計算格子

(10, 20, 30m³/s) の一定流量を与え, 最下流の勾配が急勾配であるため上流にそれほど影響しないと考え下流端水深は等流計算による水位-流量関係より求めた。また, Manning の粗度係数は 0.032 とし, 抵抗係数 C_d は植生を円柱と考え一定の値 1.0, 植生密度, 直径は現地観測値を平均し, それぞれ 50 本/m², 8mm とした。なお, 本研究で設定した流量, 土砂堆積速度等は想定値であり, 事業と直接関係するものではない。

2-2 オギ・ヨシの解析

(1) 生長・競合モデル

本研究においては植物の洪水によるダメージを植物の刈り取りと同義として扱うため, オギ・ヨシの刈り取りモデルの検証を行った。植物の純群落の生長解析に関しては, Asaeda & Karunaratne⁴⁾ はヨシのモデルを提案し, Tanaka et al.⁹⁾ は, ヨシとの鉛直方向の生産構造の違いを表現することにより, ガマ・ヒメガマのモデルを提案している。オギ¹¹⁾ の生活史, 各器官のバイオマス変化の値は異なるものの, 器官間のエネルギー輸送という観点では類似しているため, 本研究では, Asaeda & Karunaratne⁴⁾, Tanaka et al.⁹⁾ と同じ基礎方程式系を使用した。なお, 日射・気温のモデル化については, 田中ら⁹⁾ のモデルと同様とした。なおヨシモデルは田中ら⁹⁾ を基本とした。

i) オギモデル

洪水攪乱によりダメージを受けるが, オギ・ヨシ共に再生長する。その再生長を評価するため, オギの生長モデル(刈り取り再生長を含む)を作成し, 刈り取りが地下茎バイオマスに与える影響を定量評価した。刈り取りがある場合のオギモデルは現地観測¹²⁾ をもとに刈り取り後の生活史とモデル定数の設定を行った。生活史とモデル定数は既往観測¹¹⁾ と本現地観測をもとに表-1, 表-2 の

ように設定した (比較のためヨシとともに示す)。

群落頂部から i cm の高さの光合成量 $Ph_{shi}(i)$ は田中ら⁷⁾ を基本とし、水位が生長に及ぼす影響を考慮して

$$Ph_{shi}(i) = P_m \cdot K_{co} \cdot K_{NP} \cdot K_{level} \cdot \theta^{(T-20)} \times \frac{I_{PAR}(i)}{K_{PAR} + I_{PAR}(i)} \times \frac{K_{age}}{K_{age} + Age_{sh}} \cdot LAI(i) \quad (6)$$

$$K_{level} = \frac{K_{water}^2}{K_{water}^2 + (w_l - w_m)^2} \quad (7)$$

とした。ここに、 P_m : 最大光合成率, K_{co} : 二酸化炭素の乾燥重量への変換定数, K_{NP} : 地中のリン酸濃度, 窒素濃度が生長に与える影響を表す変数 (0 ~ 1), K_{level} : 水位影響¹⁴⁾を表す関数 (以後式(7)を水位モデルと呼ぶ), θ : アレニウス定数, T : 日平均気温, $I_{PAR}(i)$: i 層の高さにおける有効日射量, Age_{sh} : 光合成開始日からの日齢, K_{PAR} , K_{age} , K_{water} : 半飽和定数, w_l : 開水面を基準とした水位, w_m : 生長が最大となる水位, $LAI(i)$: 各層の葉面積指数 (生葉面積/土地面積) である。表-2 に式 (6), (7) のモデル定数一覧を示す。

群落内日射量分布は、ある高さでの有効日射量 $I_{PAR}(i)$ を Lambert-Beer の法則を用い、植物頂 ($j = 1$) からその高さ ($j = i$) までの葉面積指数の積分値の関数 F_i として、

$$I_{PAR}(i) = I_{PAR} \cdot e^{-k \cdot F_i} \quad (8)$$

$$F_i = \sum_{j=1}^i LAI(j) \quad (9)$$

と表現した⁴⁾。ここに、 k は吸光係数¹⁰⁾, I_{PAR} は光合成に利用可能な日射量¹⁰⁾である。

ii) 群落競合モデル

競合解析の場合には、他種の葉の作る陰も考慮する必要があることから、

$$I_{PAR}(i) = I_{PAR} \cdot e^{-(k_I \cdot F_{II} + k_{II} \cdot F_{III})} \quad (10)$$

とした (田中ら⁷⁾ と同様)。ここに、添え字 I, II は種 I (オギ), 種 II (ヨシ) を表す。

$LAI(j)$ (m^2/m^2) は Asaeda & Karunaratne⁴⁾ と同様の式形

$$LAI(j) = a_{LAI} \cdot [b_{leaf}(j)]^{b_{LAI}} \quad (11)$$

$$b_{leaf}(j) = a_{fr} \cdot b_{sh}(j) \quad (12)$$

で表現した。ここに、 $b_{leaf}(j)$, $b_{sh}(j)$ はそれぞれ、第 j 層の葉のバイオマス、葉茎のバイオマス、 a_{fr} は葉茎のうち葉に利用される割合、 a_{LAI} , b_{LAI} は観測データより求まる定数である。なお両植物の地下茎の位置にはすみわけがなされているため¹⁷⁾、地下空間での競合は考慮しないこととした。また、土砂堆積速度は上池が約 70 年間で 0.73m 堆積した¹⁾ことから現状では 1cm/year であるが、攪乱の

表-1 オギとヨシの生活史

	オギ	ヨシ
生長開始日 ($idayb$)	105 day ($idayb I$)	91 day ($idayb II$)
穂の形成日 ($idayf$)	$idayb I + 135$ day	$idayb II + 105$ day
光合成生長開始日 ($idaye$)	$idayb I + 65$ day	$idayb II + 0.14(idayf II - idayb II)^{1.27}$
老化開始日 ($idays$)	$idayb I + 160$ day	$idayb II + 0.22(idayf II - idayb II)^{1.36}$
根の生長開始日 ($idayr$)	$idayb I + 35$ day	$idayb II + 21$ day
物質輸送開始日 ($idapp$)	$idayb I + 75$ day	$idayb II + 75$ day

表-2 パラメータ一覧

(その他のパラメータは Asaeda & Karunaratne⁴⁾)

パラメータ	パラメータの意味	オギ	ヨシ
k	吸光係数 (91~120day)		0.3 ^d
	" (121~151day)		0.4 ^d
	" (152~180day)	0.55 ($i > 61$)	1.05 ^d
	" (181~212day)	1.0 ($i < 60$) ^c	0.965 ^d
	" (213~242day)		0.88 ^d
	" (243~273day)		0.78 ^d
a_{LAI}	バイオマスと葉面積の関係を表す定数	0.0069 ^a	0.01352 ^{e1}
	バイオマスと葉面積の関係を表す定数 (指数)	0.986 ^a	1.0179 ^{e1}
P_m	最大光合成率 ($gCO_2/g/day$)	38 ^c	30 ^c
K_{age}	半飽和定数 (day)	200 ^{c2}	125 ^c
K_{water}	半飽和定数 (m)	1 ^{c3}	0.75 ^{c3}
w_m	生長が最大となる水位 (m)	0.3 ^{c3}	-0.3 ^{c3}

a: 観測より同定, c: 実測データによるキャリブレーションにより同定

e1: Kvet et al.¹²⁾ により同定

c2: Mutoh et al.¹¹⁾ に基づきキャリブレーション

c3: Yamasaki & Tange¹⁰⁾ に基づきキャリブレーション

d: Kvet¹³⁾ により同定

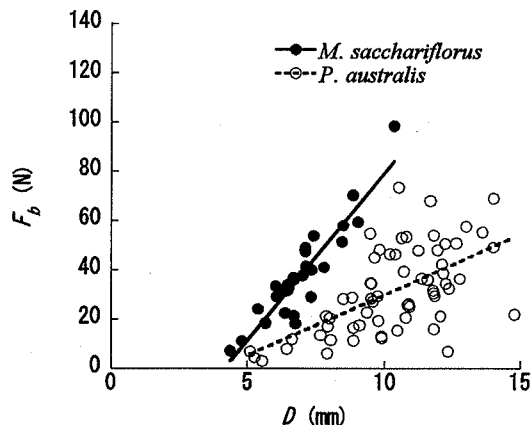


図-2 破壊強度 (D : 茎直径, F_b : 破壊強度)

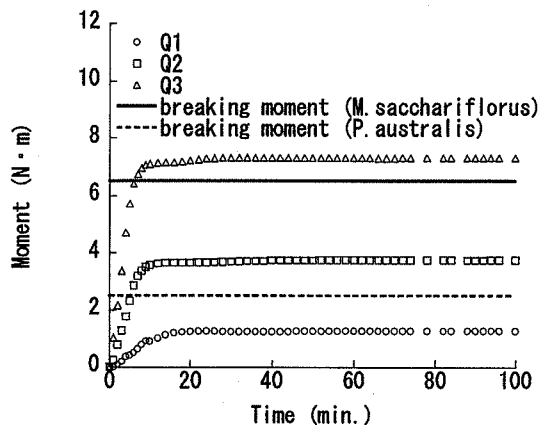


図-3 茎に働くモーメント (解析結果) とオギ・ヨシの茎の破壊モーメントの比較 (PointA)

導入により場所により土砂堆積が進む可能性もあるため最大 10cm/year まで想定して計算を行った。

2-3 現地観測

(1) 植生調査

植生の遷移状況を観測するために、荒川旧流路内上池 (35° 58' N, 139° 30' E) にて調査を行った。上池の横断方向に対して、湛水域でのヨシ群落の端部から 1m 毎に、葉茎高さ、葉茎密度、根元の直径を計測した。また植生の調査とともに、1m 毎に開水面を基準とした水位を計測した。

(2) オギ・ヨシの破壊強度

植物 (オギ・ヨシ) の外周直径に対する破壊強度の関係を, Coops & Velde¹⁸⁾ にもとづき, プッシュプルゲージ (AIKOH 9550A) を用いて求めた。

3. 調査結果ならびに考察

(1) オギ・ヨシの破壊強度

図-2 にオギ・ヨシの直径と破壊強度の分布を示す。この図からも明らかのように、ヨシに比べてオギのほうが茎の強度が高い結果となった。

解析を行うにあたり、図-2 を近似し上池のオギ・ヨシの平均直径を用い、上池におけるオギとヨシの破壊強度を求めた。また流体力によるモーメントと比較するため、実験結果より破壊モーメント M_b (N・m) を求めた。

(2) 平面流況解析結果及び茎に働くモーメント

10 (Q1) , 20 (Q2) , 30 (Q3) m^3/s の規模の洪水を与えたときの最大流速、最大水深は、Point Aにおいて約1.17~1.98m/s, 0.66~0.96m, Point Bにおいて1.25~1.69m/s, 0.38~0.68mとなった。この流況解析結果を用いて、流れがヨシ及びオギに与える抗力を算出し、その抗力から茎に働く最大モーメント (土壌面地点) を求めた結果を、オギ・ヨシの破壊モーメントとともに図-3に示す。図-3より、流量 $10m^3/s$ (CASE1) : オギ・ヨシともに破壊モーメントに到達しない、流量 $20m^3/s$ (CASE2) : ヨシのみが破壊モーメントに到達、流量 $30m^3/s$ (CASE3) : オギ・ヨシともに破壊モーメントに到達、の3ケースを想定することができる。

(3) オギ・ヨシモデルの検証

観測時期は秋季であり、葉茎はほぼ枯れているが、枯死葉茎の高さと葉茎密度より地上部バイオマスを推定した (図-4 (a) (b))。推定されたバイオマスをその地点の最大バイオマスと考え、解析値の最大バイオマスと比較した。なお、図-4 (a), (b) 中で、実線は水位モデルとモデルを考慮した計算結果、破線は考慮していない結果である。また、オギ・ヨシ混在群落と観測された地点で

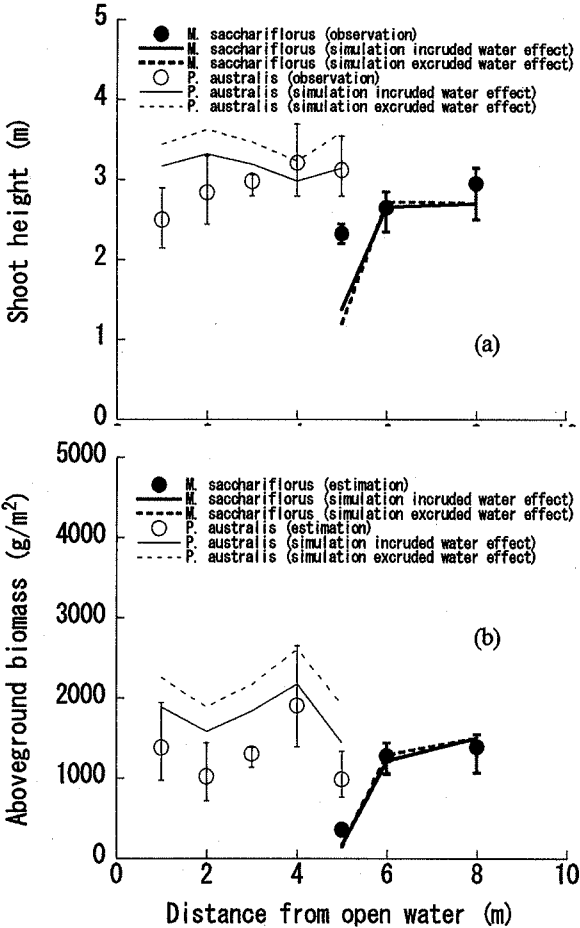


図-4 現地観測と解析結果の比較

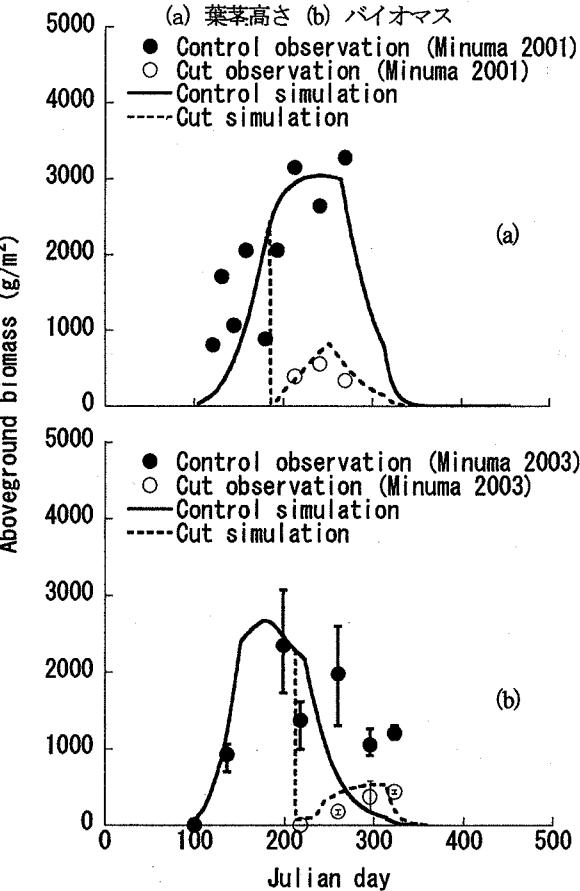


図-5 刈り取りモデルの検証 (a) オギ, (b) ヨシ

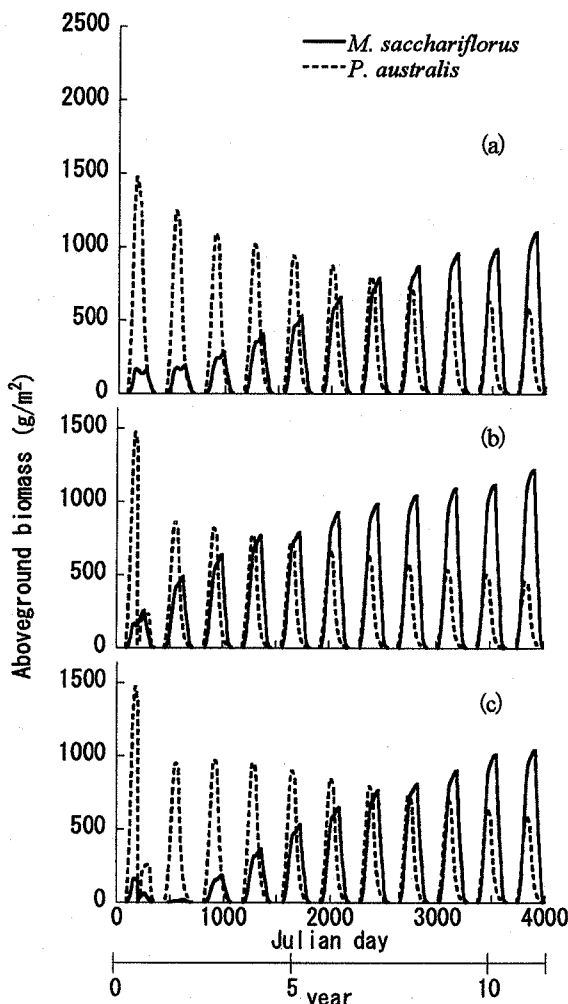


図-6 洪水を初年度に1回だけ導入した場合
(a) CASE 1, (b) CASE 2, (c) CASE 3

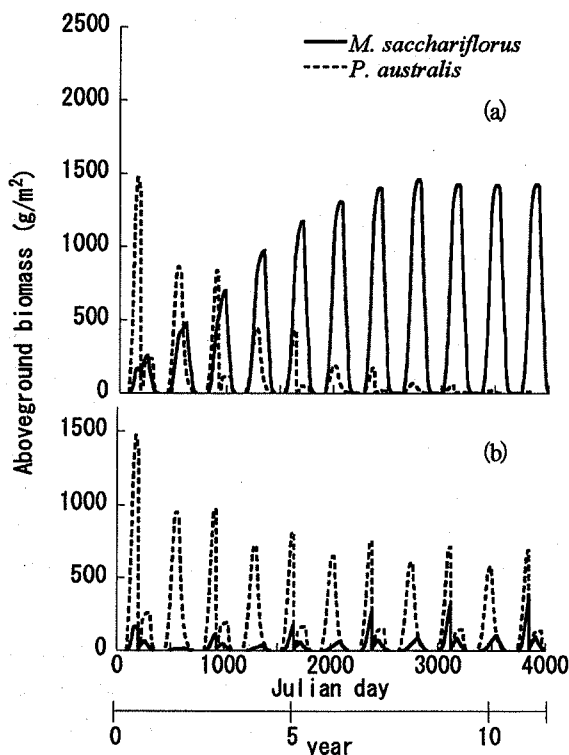


図-7 2年間隔の洪水を導入した場合
(a) CASE 2, (b) CASE 3

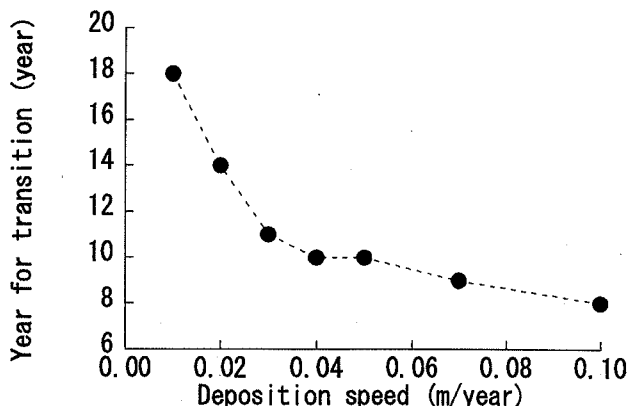


図-8 土壌堆積速度と遷移年数(ヨシからオギ)の関係

は、比較した。なお、図-4 (a), (b) 中で、実線は水位検証においても競合解析を行った。また本解析において、 K_{NP} (土壌の栄養を表すパラメータ、0~1) = 0.8 のときに上池を最もよく表現できた。したがって以下の上池の解析においてはすべて $K_{NP}=0.8$ とする。バイオマスの検証(図-4 (b))では、水位モデルの導入により、植生の分布をおおむね表現できている。しかし、葉茎高さ(図-4(a))に関しては、オギはよく表現できているが、水際のヨシについては若干の精度低下が生じている。水際のヨシの生長は様々な環境要因(外力、酸化還元状態等)が関係してくるため、いまだ不明な点が多く、複雑なメカニズムがあると考えられる。

(4) 刈り取りモデルの検証

埼玉県川口市見沼田んぼ(35°52'N, 139°43'E)における観測結果・実験結果を元に、モデルの検証を行ったものを図-5 (a), (b) に示す。両モデルともに観測結果を十分に表現しうるものであり、この結果をもとに以下の解析に用いるものとする。

(5) 洪水導入解析

流量解析および破壊強度の計測より想定された3ケースと刈り取りモデルにより、上池の将来予測を行う。

i) 洪水を1回導入した場合

図-6に洪水を初年度に1回導入し、折れる/折れないで分類した3ケースごとに解析を行った結果を示す。1回の洪水では規模によらずヨシ群落はオギ群落へと遷移していく可能性を示唆した。CASE2 の場合はヨシがダメージを受けるためオギへの遷移をさらに助長する。しかし、CASE3 ではオギの優位性がわずかに減少し、ヨシからオギへの遷移に要する期間が延びる結果となった。

ii) 洪水間隔(茎の折れる規模)が2年の場合

図-7に2年間隔で洪水を導入した場合の解析結果を示す。CASE2 の場合はヨシのみが折れるため、オギに対してヨシの高さが低くなり、ヨシの光をめぐる競合優位性が大きく減少し、オギへの遷移が早まる結果となった。逆に CASE3 の場合は両種ともに折れるが、刈り取りに対

する耐性はヨシのほうが大きいのでヨシが優位となり、混成状態が続いていると考えられる。

iii) 洪水（茎の折れない規模）導入による土砂堆積

毎年洪水を導入し、かつ毎年土砂堆積が生じた場合については、上池の条件では、将来的にはオギが占有していく結果となった（図-8）。上池のヨシ帯には数 cm のリター層が存在するため、土壌堆積速度として 0.0 m ~ 0.03 m 以上は十分に考えられる。また土砂が堆積しさらにヨシのみが折れる規模の洪水を導入した場合、オギへの遷移に要する年数がさらに減少するものと考えられる。

このようにオギの勢力は非常に大きい結果となり、1 回洪水を導入しただけでは、ヨシ群落はオギ群落に遷移する可能性が示唆された。オギが非常に強い理由としては、生産力の強さによるところが大きいと考えられる。猶原¹⁹⁾はオギとヨシの日生産量 ($\text{g wet/m}^2/\text{day}$) を求めており、オギの最大日生産量は 4 月中旬から 5 月中旬の間に 133 ($\text{g wet/m}^2/\text{day}$) にものぼった。比べてヨシの最大日生産量は 51 ($\text{g wet/m}^2/\text{day}$) となっており、オギにはるかに劣るものであった。したがってヨシに比べてオギは、ダメージを受けた後の生長初期における地下部からの輸送率は小さいが、日生産量が大きい結果として再生力が大きい。そのため洪水によりダメージを受けてもオギは回復力が強く、オギが優勢となったといえる。

4. 結論

洪水導入を検討した場合、ヨシからオギへの遷移に以下のような影響を与える可能性が示唆された。

- ① 両種の茎が折れる規模の洪水を一度導入してもその遷移傾向を逆転させるにはいたらない。洪水規模によってはオギへの遷移を助長する。
- ② 洪水を 2 年間隔で導入した場合、CASE2 の流量 ($20\text{m}^3/\text{s}$) ではオギへの遷移を早めるが、CASE3 の流量 ($30\text{m}^3/\text{s}$) であればヨシにとって有利となる（遷移傾向に逆転が生じる）。

謝辞：本研究を行うにあたっては、荒川上流河川事務所から断面データを提供していただいた。また、大学院生八木澤順治氏、城野裕介氏に現地観測を手伝っていただいた。記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 荒川太郎衛門地区自然再生協議会：荒川太郎衛門地区自然再生事業自然再生全体構想（案），pp.1-68, 2004.
- 2) 内田泰三，田崎冬記，丸山純孝，佐藤洋平：Phragmites 属、特にヨシ（*Phragmites australis* (Cav.) Trin.）およびツルヨシ（*P. japonica* Steud.）群落の地上部損失に対する反応，日本緑化工学会誌，Vol. 29, No. 1, pp.74-79, 2003.
- 3) 湯谷賢太郎，田中規夫，武村武，浅枝隆：刈り取り時期の違

いがヒメガマ（*Typha angustifolia*）の再成長に及ぼす影響，日本緑化工学会誌，Vol. 29, No. 1, pp.21-26, 2003.

- 4) Asaeda, T. and Karunaratne, S. : Dynamic modeling of the growth of *Phragmites australis*, Model description, *Aquat. Bot.*, Vol. 67, pp.301-318, 2000.
- 5) Tanaka, N., Asaeda, T., Tanimoto, K. and Hasegawa, A.: An analysis of the growth of *Typha angustifolia* and *Typha latifolia*, *J. of Hydroscience and Hydraulic Eng.*, Vol. 20, pp.197-206, 2002.
- 6) 田中規夫，浅枝 隆，Shiromi Karunaratne：日射量・気温変化によるアシ *Phragmites australis* の生長予測解析，土木学会論文集 No.663/II-53, pp.119-129, 2000.
- 7) 田中規夫，長谷川敦，浅枝 隆，渡辺哲広，岸田明義：土壌の栄養状態がガマとヒメガマの競合の優位性に与える影響について，土木学会論文集，No.719/II-61, pp.93-103, 2002.
- 8) 細田 尚，長田信寿，村本嘉雄：移動一般座標系による開水路非定常流の数値解析，土木学会論文集，No.533/II-34, pp.267-272, 1996
- 9) Struve, J., Falconer, R.A. and Wu, Y. : Influence of model mangrove tree on the hydrodynamics in a flume, *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, Vol. 58, pp.1-9, 2003
- 10) Nezu, I. and Nakagawa, H. : Turbulence in open channel flows, IAHR Monograph Balkema, Rotterdam, pp. 53-56, 1993
- 11) Mutoh, N., Yoshida, K. Yokoi, Y., Kumura, M., and Hogetsu, K. : Studies on the production processes and net production of *Miscanthus Sacchariflorus* community., *Jap. J. Bot.*, Vol. 20, pp.67-92, 1968.
- 12) 北上裕規，田中規夫，湯谷賢太郎，武村武：オギ（*Miscanthus sacchariflorus*）の刈り取りが翌年の生産量へ与える影響について，第 30 回関東支部技術研究発表会（CDROM），2003.
- 13) Květ, J., Svoboda, J. and Fiala, K. : Canopy development in stands of *Typha latifolia* L. and *Phragmites communis* Trin. in South Moravia, *Hydrobiologia*, Vol. 10, pp.63-75, 1969.
- 14) Yamasaki, S. and Tange, I. : Growth responses of *Zizania latifolia*, *Phragmites australis*, *Miscanthus sacchariflorus* to varying inundation, *Aquat. Bot.*, Vol. 10, pp.229-239, 1981.
- 15) Květ, J. : Growth analysis approach to the production ecology of reedswamp plant communities, *Hydrobiologia*, Vol. 12, pp.15-40, 1971.
- 16) Dykxjová, D. : Production, vertical structure and light profiles in littoral stands of reed-bed species, *Hydrobiologia*, Vol. 12, pp.361-376, 1971.
- 17) 沼田 真：植物生態学，生態学大系 第 1 巻，pp.540-549, 1959.
- 18) Coops, H. and van der Velde, G. : Effects of waves on helophyte stands: mechanical characteristics of stems of *Phragmites australis* and *Scirpus lacustris*, *Aquat. Bot.*, Vol. 53, pp.175-185, 1996.
- 19) 猶原恭爾：日本の草地社会，柏書房，pp.113-121, 1974.

（2004. 4. 7 受付）