

河道内に繁茂するヒメガマ *Typha angustifolia* の 拡大可能性分析

ANALYSIS OF EXPANSION POSSIBILITY FOR *Typha angustifolia* IN URBAN RIVER

武村武¹・田中規夫²

¹学生会員 博(学) 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)

²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)

To elucidate the expansion threshold of *Typha angustifolia*, an emergent macrophyte, in a river, the growth characteristics and the roughness characteristics were investigated based on field observation and water flume experiments, respectively. The growth analysis indicated that the light interception by primary shoots affected the secondary shoot production. Moreover, when external forces affected the primary-shoot growth of *Typha angustifolia* in river, the secondary shoots production became larger by decreasing the light interception from the primary shoots. The drag coefficient of *Typha angustifolia* was measured by water flume experiment with the function of the water depth. The velocity and breaking moment were calculated with a depth-averaged Reynolds equation in two rivers. In the expansion area of the vegetation in the Touemon River, the fluid force that acted on *Typha angustifolia* exceeded a physical and productive threshold of the expansion of the vegetation.

Key Words : *Typha angustifolia*, Drag coefficient, Secondary shoot, Expansion threshold

1. はじめに

都市域における中小河川は、流下能力の向上や河岸防護を主目的としながら、一方で、多様な生態系の創出(動植物の棲息空間の確保)を期待できる空間でもある¹⁾。しかし、河道拡幅が非常に困難であり、かつ洪水時のための排水路と化している都市域での小河川においては、豊かな生態系の確保は非常に困難な場合が多い²⁾。

埼玉県南部に位置する2河川(藤右衛門川、伝右川)には、代表的な抽水植物・ヒメガマが多く生育している。前者では、河道右岸側に一列に整然と存在しているのに対して、後者では、河道が埋め尽くされている。Fiala³⁾によれば、ヒメガマは年に2~3m程度拡大すると報告されているが、外力によりその生育が制限される場合もある⁴⁾。これらの群落を潜在的自然植生⁵⁾としてとらえた場合、効率的にその規模をコントロールできれば、身近な生態系空間としての価値が見いだせるものと考えられる。

河道内植物の存在量を評価するためには、外力下における植物の生長量を評価する必要があると同時に、植物の粗度としての評価が重要である⁶⁾。水理学では河川に生育する植物を正方や千鳥配列の円柱群粗度として表現し、それによる流れの運動量損失や、物体により形成される乱流せん断力特性を評価するなどの形で多くの検討がなされてきた。しかし、実際の植物は、多様な形状をしているため、その種ごとに植物周りの流れ特性は大きく変

化する。そのため、実植物の特性を考慮した粗度特性や粗度周りの流れに関する検討も行われている^{7,8)}。また、植物種によっては、株状に繁茂した群落が集まり、大きな群落を形成する場合⁹⁾もあり、その粗度周りの特性も検討されている^{10),11),12),13)}。さらに、ヒメガマのような大型抽水植物による抵抗は、出水時のように水深が深くなる場合、抽水状態から沈水状態へと大きくその状況が変化する。このような状況変化を考えた場合、植生帯による抵抗は、円柱の抵抗とは大きく異なると考えられる。さらに、群落の位置(群落中心部、群落端部等)の違いによっても、植生密度が大きく変化するため、ヒメガマの受ける抗力も大きく変化するものと考えられる。

そこで本研究では、ヒメガマの生態学的特性の一つである、一次シュート、二次シュート生産量と地下茎生産量の季節変化を定量評価する。さらに、ヒメガマの粗度特性を水理実験により検討すると共に、流れのモデル解析により、河川に繁茂するヒメガマの繁茂限界を、河川の水利条件により検討する。これら両者の検討により、ヒメガマの河川空間内における動的特性を評価した。

2. 解析方法

(1) ヒメガマの生長解析

a) 生長解析モデル

ヒメガマは多年生の抽水植物であり、年間の生活史は大

きく分けて、初期生長期、光合成生長期、老化期に分けて考えることができる¹⁴⁾。初期生長期は春先の4月頃に地下部に蓄えられている栄養を用いて一次シュートを出芽させる時期である。光合成生長期は、初夏の7月頃に一次シュートの光合成活動によって得られる栄養を用いて一次シュートの間から二次シュートを出芽させる時期である。老化期は越冬に備えて地上部の栄養を地下部に輸送する時期である。Fiala³⁾は、Czechにおいて1969年から1970年にかけてヒメガマの季節ごとのシュート形成率・群落の拡大率などを詳細に研究し、7～8月にかけて多くの新シュート（本研究では二次シュートと呼ぶ）を生産することを明らかにした。この二次シュートは群落内をふくめ、群落の外側2～3mにわたり平面的に出芽し、群落の維持拡大に大きく関わっている。

このような生活史を考慮すると、二次シュートの生産量を評価する際には、一次シュートにより生産される地下茎量や一次シュートの作る日陰のもとで育つという条件を考慮する必要がある。したがって、基礎方程式系は、Asaeda & Karunaratne¹⁵⁾、田中ら²⁾と同じものを使用し、ヒメガマの一次シュートと二次シュートの競合モデルとして解析を行うものとする。

b) 二次シュートの計算

一次シュートと二次シュートの競合計算は、以下の定義に基づき行った。

- 1) 一次シュートの初期地下茎量 (g/m²) を設定して、競合させない状態で季節変化を計算する。
- 2) 一次シュートの季節変化の中で、二次シュートの成長開始日である210日における新地下茎量を求める。
- 3) 一次シュートの間から出芽する二次シュートの初期地下茎量を求める。
- 4) 一次シュートの季節変化の中で210日目から二次シュートと競合させる。

c) 外力の与え方

Asaeda & Karunaratne¹⁵⁾、田中ら²⁾において、地下茎、根、新しい地下茎、葉茎、穂の枯死量は、それぞれ、

$$D_a = \gamma_a \theta^{(T-20)} B_a \quad (1)$$

と表現される。ここに、 θ はアレニウス定数(1.09)、 T は日平均気温、 γ_a は20℃の時の枯死率、 B_a は各器官におけるバイオマス、添え字の a は地下茎(rh)、根(rt)、新しい地下茎(n)、葉茎(sh)、穂(p)を表す。

外力による影響を反映させるにあたっては、呼吸などの自然枯死率に、外力による枯死率 k_f (g/g/day) を加えることで表現した。ここで、枯死率とは、単位バイオマス当たりにおける枯死による減少バイオマスを1日当たりで表したものである。すなわち、

$$D_a = \gamma_a \theta^{(T-20)} B_a + k_f B_a \quad (2)$$

ここに、 k_f は洪水時に植物に与える損傷だけでなく、洪水後にも植物に残るゴミの付着による光合成活動の低下による枯死率の増加などを考慮しており、後述する現地観測を行った河川の状態（月に1回以上、出水による攪乱を受ける）を踏まえて一定値で与えた。また、 k_f を与える時期は植物の生長開始日から老化期の終わりまでとした。

(2) 河川流の解析

a) 解析モデル

河川の流況解析にあたっては、細田ら¹⁶⁾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.¹⁷⁾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¹²⁾。一般座標系 (ξ, η) の基礎式を以下に示す。

連続式

$$\lambda \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{h}{J} \right) + \frac{\partial}{\partial \xi} \left(\frac{Uh}{J} \right) + \frac{\partial}{\partial \eta} \left(\frac{Vh}{J} \right) = 0 \quad (3)$$

運動方程式

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{Q_x}{J} \right) + \frac{\partial}{\partial \xi} \left(\frac{UQ_x}{J} \right) + \frac{\partial}{\partial \eta} \left(\frac{VQ_x}{J} \right) = \\ -gh \left(\frac{\xi_x}{J} \frac{\partial Z_s}{\partial \xi} + \frac{\eta_x}{J} \frac{\partial Z_s}{\partial \eta} \right) - \frac{\tau_x}{\rho J} - \frac{F_x}{\rho J} \\ + \frac{\xi_x}{J} \frac{\partial}{\partial \xi} (-\overline{u'^2}h) + \frac{\xi_y}{J} \frac{\partial}{\partial \xi} (-\overline{u'v}h) \\ + \frac{\eta_x}{J} \frac{\partial}{\partial \eta} (-\overline{u'^2}h) + \frac{\eta_y}{J} \frac{\partial}{\partial \eta} (-\overline{u'v}h) \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{Q_y}{J} \right) + \frac{\partial}{\partial \xi} \left(\frac{UQ_y}{J} \right) + \frac{\partial}{\partial \eta} \left(\frac{VQ_y}{J} \right) = \\ -gh \left(\frac{\xi_y}{J} \frac{\partial Z_s}{\partial \xi} + \frac{\eta_y}{J} \frac{\partial Z_s}{\partial \eta} \right) - \frac{\tau_y}{\rho J} - \frac{F_y}{\rho J} \\ + \frac{\xi_x}{J} \frac{\partial}{\partial \xi} (-\overline{u'v}h) + \frac{\xi_y}{J} \frac{\partial}{\partial \xi} (-\overline{v'^2}h) \\ + \frac{\eta_x}{J} \frac{\partial}{\partial \eta} (-\overline{u'v}h) + \frac{\eta_y}{J} \frac{\partial}{\partial \eta} (-\overline{v'^2}h) \end{aligned} \quad (5)$$

ここに、 λ ：間隙率、 t ：時間、 J ：ヤコビアン、($\xi_x, \xi_y, \eta_x, \eta_y$)：変換のマトリクス、(u, v)：水深平均流速、(U, V)：流速ベクトル (u, v) の反変成分、(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)：植生抵抗である。

水深平均レイノルズ応力は Nezu & Nakagawa¹⁸⁾ による水深平均乱れエネルギーの実験式から算出する。この式は、植物が破断する前の流れ場を解くものとして使用した。破断した茎が浮遊物として流水中に存在する条件、あるいは他の茎に付着している条件は、本研究の適用外とする。底面せん断応力は Manning 則より算出し、間隙率 (λ) 及び植生抵抗 (F_x, F_y) は以下のように算出する。

$$\lambda = 1 - \pi \frac{D_t m_t^2}{4} \left(1 + n \frac{h_s}{h} \right) \quad (6)$$

$$F_x = \frac{1}{2} C_d \rho m_t h u \sqrt{u^2 + v^2}, F_y = \frac{1}{2} C_d \rho m_t h v \sqrt{u^2 + v^2} \quad (7)$$

ここに、 D_t : 植生密度 (本/m²), m_t : 直径 (m), n : リター率 (=リターバイオマス/地上部バイオマス), h_s : 植生高 (m), C_d : 抵抗係数である。ここで、本論文内ではリター率は考慮していない。しかし、今後河道内植生の老化期に生産されるリターの堆積を考慮した解析を想定しているため、モデル内には組み込んである。

b) 検討対象河川ならびに流況解析条件

藤右衛門川は、上流に貯水池が、下流には調節池がある。観測地点 (35°51'N, 139°40'E, 河床勾配: 約 1/2500, 水路幅: 約 6m) におけるヒメガマ群落は、調節池よりも上流域に繁茂している。平常時は流速 0~20 (cm/s) 程度、水深 0.3~0.5 (m) 程度であるが、出水時は流速 0.5~1.2 (m/s) 程度、水深 2.0 (m) 程度となりヒメガマ群落に大きなダメージを与えており (出水後の倒伏状況により)、出水回数は月に 1~5 回程度である (1999 年から 2001 年の水位データより)。ヒメガマ群落は、4 月から 7 月にかけて繁茂域を幅 2~3m 程度に広げるものの、次第に縮小し、4 月当時の 1~2m に戻って越冬する状況が観察された (2000 年~2005 年)。また 10 月から 12 月には出水頻度が下がった後に出芽したシュートの割合が高い。

伝右川は、観測地点 (35°53'N, 139°44'E, 河床勾配: 約 1/4000, 水路幅: 約 10m) の上流部に綾瀬川への放水路があり、洪水時はその放水路を通り、綾瀬川へ水が流れるため、年間を通して出水はほとんどなく、流速は常に 0~0.4 (m/s) 程度である。そのため、流れによるヒメガマ群落の損傷は、それほど無いものと考えられる。ヒメガマ群落は、河道内に一様に繁茂しており、その繁茂状況は 1 年を通してそれほど変化しない。河道内には、一部まだヒメガマ群落が繁茂していない区間も存在するが、ヒメガマ群落の拡大は進んでいる。

本研究では、解析の簡単化のため、解析対象河川の断面は台形断面とした (図-1)。植生群は、両河川の状況を踏まえ、片側に繁茂したもの (図-1(a)) と、河道内に一様に繁茂したもの (図-1(b)) の 2 ケースとした。

(3) 実験

流水中に存在するヒメガマは、水深の変化に対して、没水部の状態が各部位の形状の違いやそれらの剛性の違いによる傾きの変化等により、大きく変化する。そこで、そのヒメガマの粗度特性を検討するために、以下の実験を行った。

a) ヒメガマの破壊強度

ヒメガマの外周直径に対する破壊強度の関係を、Coops

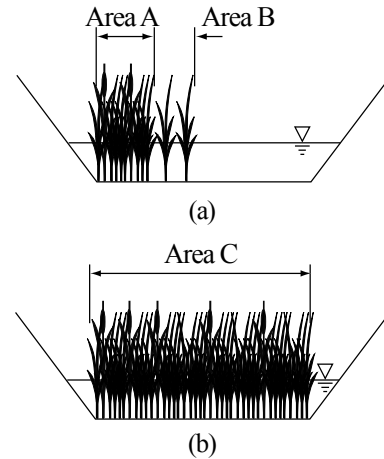


図-1 解析対象河川の断面イメージ図

(a) 片側に植生帯がある場合、(b) 一様に植生帯がある場合

表-1 実験条件一覧表

U (m/s)	h (m)	Parts name	Inclination of model	Leave numbers
0.2	0.2	Shoot base	0	-
		Dense leaves	0	10
		Sparse leaves	30	5
			45	
			60	

& Velde⁴⁾にもとづき、Push-Pull gauge (AIKOH 9550A) を用いて求めた。群落の繁茂特性をとらえるために、実験は一次シュートと二次シュートに対して行った。

b) 実験装置

水理模型実験は、全長 15m、幅 0.5m、深さ 0.4m の矩形断面を有する可変勾配開水路 (可傾範囲 0~1/50, 最大流量 0.1m³/s) にて行った。粗度を上流から 8.5m 地点 (流水が十分に安定した場所) の水路中央に 1 つ設置し、上流から 8m-9m を実験観測区間とした。断面平均流速は 0.04, 0.1, 0.4m/s の 3 ケースで、実験を行った。

モデルにかかる抗力を測定するにあたって、2 分力計 (計測方向: X, Y 方向) を使用した。計測は、サンプリング周波数を 100Hz、計測時間を 30 秒間とし、時間平均値、ならびに変動成分の特性を求めた。また、本研究における抗力係数 (C_d) は、以下のように定義する。

$$C_d = \frac{2F}{\rho A_p U^2} \quad (8)$$

ここに、 F (N) は抗力、 ρ (kg/m³) は水の密度、 A_p (m²) は粗度モデルの水平投影面積、 U (m/s) は断面平均流速である。

c) ヒメガマを用いた粗度モデル

検討対象としたヒメガマは、その草丈は 3m 程に生長する種であり、水深と流速の変化で、没水部の状況が大きく変化する。最も水深が浅い場合には、偽基部のみが水中に存在するが、水深が深くなると、葉が密に集まって

いる部分（ここでは密葉部とする）が没水し、その後、葉が粗な部分（ここでは粗葉部とする）が没水する。その後、ヒメガマの大きさを超える水深になると、抽水状態から、沈水状態へと状況が大きく変化する。また、水深が深い流れの中では、ヒメガマは倒伏した状態で存在する。このようなヒメガマの変形を考慮するために、実物をそのまま用いて、その抗力測定実験を実験水路で行う事は、そのサイズが大きいことから非常に困難である。そこで、ヒメガマ粗度モデルは、上記の粗度形状・構成を考慮し、ヒメガマの実物を上記の各部に分け、3種類5パターン7ケース（偽茎モデル、密葉モデル、粗葉モデル（30度、45度、60度））のモデルを用意し、実験を行った¹²⁾。実験条件を、表-1に示す。

3. 結果と考察

(1) ヒメガマの初期地下茎量と二次シュートの関係

図-2に一次シュート、二次シュート生産量の初期地下茎量による変化を示す。同図は初期地下茎量 (g/m^2) を、250 (g/m^2) から 2000 (g/m^2) まで変化させ、一次シュートおよび二次シュートの最大生産量 (g/m^2) を算出した結果を示したものである。

初期地下茎量は、一次シュートの生産量に大きく関わっており、同じ栄養状態においては初期地下茎量が多いほど一次シュートの生産量は増加する。初期地下茎量が少ない場合は、一次シュートの生産量が少なく、二次シュートの生産量の割合は他の場合と比べて多く生産されることが分かる。これは、一次シュートの生産量が少ないために、一次シュートの間より生長を開始する二次シュートの光合成が阻害されにくいためと考えられる。一方、初期地下茎量が多い場合は、一次シュートの生産量が大きくなり、二次シュートの生産量の割合が減少することが分かる。二次シュートの生産量の割合が減少するのは、一次シュートの生産量が多いために日射量が制限され光合成活動が阻害されるためと考えられる。

(2) 外力と二次シュートの関係

籾右衛門川における現地調査で得られた初期地下茎量の 374 (g/m^2) を用いて、一次シュートおよび二次シュートの生長解析を行なった。図-3に籾右衛門川における解析結果を現地観測結果を示す。本結果は、 $k_f=0.035$ の時のものである。本解析結果より、一次シュートの季節変化、地上部の最大生産量、二次シュートの増加傾向等、概ね解析結果は現地観測を満足していると言える。

次に、 k_f 値の違いによる二次シュートの生産量の季節変化を図-4に示す。流れがなく外力がほとんどない場合、すなわち $k_f=0$ における一次シュートの生産量に対する二次シュートの生産量の割合は他のケース ($k_f=0.01, 0.035$) に比べて小さいことがわかる。 k_f が 0 から 0.01 へ大きく

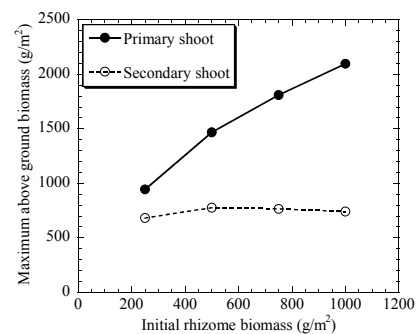


図-2 初期地下茎バイオマスの違いによる地上部の最大生産量

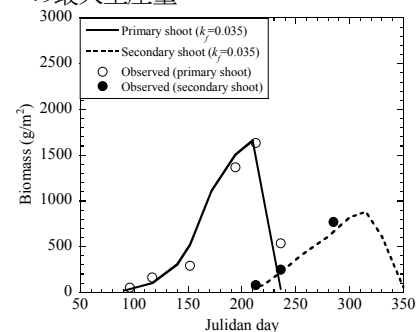


図-3 籾右衛門川におけるヒメガマの季節変化と生長解析の比較

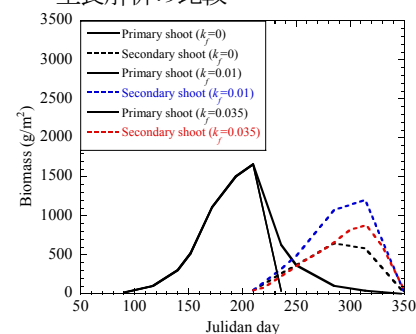


図-4 k_f 値の違いによる二次シュートの生産量の季節変化

なると、1次シュートが外力によりダメージを受けることにより、二次シュートへの日射量制限が少なくなるため、一次シュートに対する二次シュートの生産量の割合が多くなっている事がわかる。一方、 k_f が 0.01 から 0.035 へ大きくなると、二次シュートの生産量が小さくなっている。これは、ヒメガマに対する外力が大きいため、一次シュートの減少のみならず、二次シュートの生長に対しても大きな影響を与えているためと考えられる。さらに、解析結果は示していないが、この時に生産される地下茎量は初期地下茎に比べて 1.7 倍程度になるが、群落外周部（二次シュートの出現による群落の拡大域）における生産量が大きくないことから、現在の群落の大きさを維持することが出来るが、次年度以降に群落は大きくは拡大しないものと考えられる。

(3) ヒメガマの破壊強度

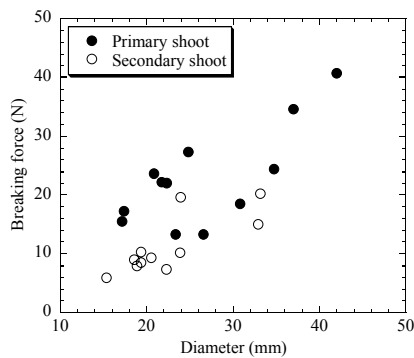


図-5 ヒメガマの直径と破壊強度の関係

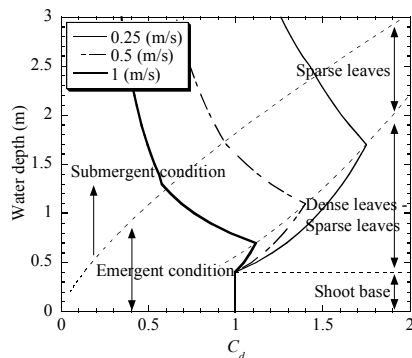


図-7 水深・流速の変化に伴うヒメガマの C_d 値の変化

図-5に、ヒメガマの直径と破壊強度の実験結果を示す。本結果より、群落中央部で生育する一次シュートに対して、群落周辺部（拡大部）に生育する二次シュートの結果は若干値が小さくなっている。これは、二次シュートの方が、生長開始時期が遅く、一次シュートに対して、シュートの成熟度が低いため、より簡単に破断されてしまうものと考えられる。生長初期におけるヒメガマは群落内部・拡大域共に一次シュートが存在する。その後、二次シュートが群落内で生長する。一方、群落の外部（初期の群落位置より若干離れた拡大域）には、生長初期に一次シュートが存在しないことから、夏期において二次シュートのみが存在することになる。Fiala³⁾などによって、ヒメガマの拡大力に関する報告はされているが、その生長は生育地の状態に依存するため、一次シュート、二次シュートの密度比や、その季節変化を判断することは非常に難しい。そこで、本研究内では、一次シュート、二次シュートにおける破壊強度は区別しないものとする。

(4) ヒメガマの抵抗係数

図-6に水理模型実験によるヒメガマの各部の C_d 値の結果を示す。本結果より、水深が浅い場合に支配的となる偽茎部における C_d 値よりも、若干水深が深くなったときの、密葉部の C_d 値が2倍以上大きくなっている。さらに、それよりも水深が深いときに使用される粗葉(30)部も同様に大きな C_d 値を示している。これらは、偽茎部に対して、個々の形状が複雑になり、非常に大きな抗力を受けることが要因である。

本結果と、Push-Pull gaugeを用いた現地実験より、ヒメ

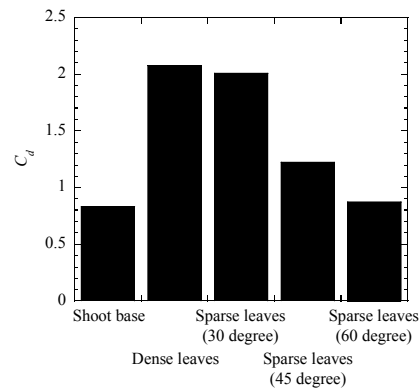


図-6 ヒメガマの各部位における抗力係数

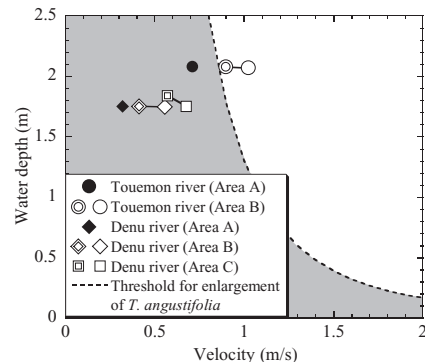


図-8 藤右衛門川・伝右川における流速と水深の違いによるヒメガマ群落の拡大可能性 (Area A, B, Cは図-1で定義)

ガマにおける水深と流速の違いによる C_d 値を算出した。その結果を図-7に示す。本結果より、流速の増加に伴い、ヒメガマが大きいたわむため、 C_d 値は大きく減少する。また、水深が大きくなると、一旦 C_d 値は大きくなり、その後大きく減少する。これは、ヒメガマを構成する部位において、偽茎部よりも、密葉部や粗葉 (30)部がより大きな C_d 値を有しているためである。さらに、流速の増加に伴い、そのピーク値が減少しているのは、ヒメガマのたわみ角が大きくなるためである。

(5) 2 河川におけるヒメガマ群落の拡大の可能性

図-7で求めた C_d 値を用いて、藤右衛門川、伝右川における流れの解析を行い、ヒメガマ群落内における流速を算出し、それを元に、ヒメガマに作用する流体力の検討を行いヒメガマ群落の生存可否を示す閾値を算出した。閾値は、モデル解析において水深と流速を変化させ、ヒメガマに作用する流体力がヒメガマの破壊強度を超える点を結んだものである。図-8において、閾値より左側(色付きの範囲)を、ここでは「Stable zone」とする。このStable zoneの中にプロットが存在する場合、そのヒメガマ群落は、拡大する可能性があることを示す。藤右衛門川における解析結果は、群落内部 (Area A) では、ヒメガマの破壊強度を超える流体力を受けることが無いことがわかる。しかし、群落端部 (Area B) では密度の違いによらず、Stable zoneの外側にプロットがあることから、ヒ

メガマは破壊強度を超える流体力を受けることがわかる。一方、伝右川では群落内部 (Area A) , 群落端部 (Area B) 共に、ヒメガマは安全サイドに位置することがわかる。これらの結果より、藤右衛門川では、群落内部ではヒメガマの破壊強度を超える流体力を受けることが無いことから、群落は存在することが出来るが、群落端部 (群落の拡大に使用される範囲) では、その閾値を超えてしまっているため、群落は現在の形態を保っているものと考えられる。一方、伝右川では、ヒメガマの進入初期でも、受ける流体力が小さいため、出水そのものが群落の拡大を阻害することが無く、群落は拡大できるものと考えられる。本結果より、進入したヒメガマが、図-7 の Stable zone に存在する場合、そのヒメガマ群落は維持されると考えられる。さらに、拡大部も Stable zone 内に存在する場合、その河川は、ヒメガマによって覆いつくされる可能性が有る。そのような河川において、適度な自然植生を保持するためには、刈り取りなどの人為的コントロールが必要である。

4. まとめ

河川に繁茂するヒメガマ群落の拡大可能性を、生長解析と、流れの解析の両者を用いることで、評価した。その結果以下の点が明らかとなった。

- 1) 二次シュートは、一次シュートによる日射制限を大きく受けるため、初期地下茎量が多いほど、二次シュートの生産量の割合が少なくなる。
- 2) 藤右衛門川のように、ヒメガマに外力が作用する場合には、一次シュートが損傷し、日射制限が和らげられるため、二次シュートの生産量の割合が増加する。
- 3) ヒメガマ群落を実河川内に維持するための「必要条件」を、生長解析、河川の流れの解析の両者を用い、説明することが出来た。

謝辞: 現地調査を行うにあたっては、さいたま県土整備事務所より快諾をいただいた。記して謝意を表します。

参考文献

- 1) Takahashi, Y. and Uitto, I. J. : Evolution of river management in Japan: from focus on economic benefits to a comprehensive view, *Global Environ. Change*, 14, pp. 63-70, 2004.
- 2) 田中規夫, 武村武, 浅枝隆, 谷本勝利, 長谷川敦 : 河川空間におけるヒメガマ *Typha angustifolia* の地下茎拡大機構, *土木学会論文集*, No.698, II-58, pp. 81-91, 2002.
- 3) Fiala, K. : Underground Organs of *Typha latifolia* and *Typha angustifolia* , their growth, propagation and production, *Acta Sc. Nat. Brno*, Vol. 12(8), pp.1-43, 1978.

- 4) Coops, H. & van der Velde, G. : Effects of waves on helophyte stands: mechanical characteristics of stems of *Phragmites australis* and *Scirpus lacustris*, *Aquat. Bot.* 53, 175-185, 1996.
- 5) 玉井信行: 多自然型川づくりから自然復元へ, *河川*, No.664, pp.3-5, 2001.
- 6) Tanaka, N., Kitakami, Y., Ogawa, and Asaeda, T. : Effect of stem-breaking caused by flood on the transition of wetland vegetation in old river trace, *Proc. 4th Int. Symp. Env. Hyd. & 14th Congress of APD-IAHR*, 2004.
- 7) Järvelä, J. : Flow resistance of flexible and stiff vegetation: a flume study with natural plants, *J. Hydrology*, 269, 44-54, 2002.
- 8) Tsujimoto, T., Kitamura, T., Fujii, Y. and Nakagawa, H. : Hydraulic resistance of flow with flexible vegetation in open channel, *J. Hydrosience Hydraulic Eng.*, 14(1), pp. 47-56, 1996.
- 9) 鎌田磨人, 小島桃太郎, 岡部健士 : 河川砂州上に侵入したシナダレスズメガヤを除去するに必要な洪水営力, *応用生態工学会, 第8回研究発表会講演集*, pp.97-98, 2004.
- 10) 武村武, 田中規夫 : 株状粗度モデルに作用する流体力について, 流体力の評価とその応用に関する研究論文集, 第3巻, pp.37-41, 2004.
- 11) 武村武, 田中規夫 : 株状粗度モデルに作用する流体力の評価に関する基礎実験, *水工学論文集*, 第49巻, pp.871-876, 2005.
- 12) Takemura, T. and Tanaka, N. : Evaluation of expansion threshold for *Typha angustifolia* in river, 31th IAHR Biennial Congress, pp.428-429, 2005.
- 13) Tanaka, N., Takemura, T. and Shirono, Y. : Flow structures and sand deposition behind a colony-type grass on a gravel bar, 31th IAHR Biennial Congress, pp. 476-477, 2005.
- 14) Tanaka, N., Asaeda, T., Hasegawa, A. & Tanimoto, K. : Modelling of the long-term competition between *Typha angustifolia* and *Typha latifolia* in shallow water - Effects of eutrophication, latitude and initial advantage of below-ground organs. *Aquat. Bot.* 79: 295-310, 2004.
- 15) Asaeda, T. and Karunaratne, S. : Dynamic modeling of the growth of *Phragmites australis*: Model description, *Aquat. Bot.*, Vol.67, pp.301-318, 2000.
- 16) 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.
- 17) 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.
- 18) Nezu, I. & Nakagawa, H. : Turbulence in open channel flows, *IAHR Monograph Balkema, Rotter-dam*, 53-56, 1993.

(2005. 9. 30 受付)