

出水がアレチウリ群落の拡大に及ぼす影響とその考察—実験・数値解析からの検討

STUDY ON EXPANSION OF BUR CUCUMBER COLONY BY LARGE FLOODS
-BY EXPERIMENT AND NUMERICAL ANALYSIS

大石 哲也¹・天野 邦彦²
Tetsuya OISHI and Kunihiko AMANO

¹ 正会員 工修 (独) 土木研究所水循環研究グループ河川生態チーム 研究員
(〒305-8516 茨城県つくば市南原1-6)

² 正会員 工博 (独) 土木研究所水循環研究グループ河川生態チーム 上席研究員

Bur cucumbers which are annual weeds have grown thickly in Chikuma River since 1994. We presumed that this phenomenon is accelerated by large floods that may spread the seeds of them. We have estimated the critical tractive force of seeds by a waterway experiment and analyzed the places where transported seeds can accumulate along the river and the destruction force of bur cucumber colonies by numerical simulation. Consequently, critical tractive force (τ_c) of the seed was determined as 0.04. When the friction speed (u_*) that works at the river bed exceeds about 17cm/s, the destruction of bur cucumber colonies seem to begin. However, bur cucumber colonies are not destroyed when they are accompanied with false acasia even if the friction speed exceeds that level.

Key Words : bur cucumber, critical tractive force, friction speed, flood

1. はじめに

アレチウリは北米原産の1年生のツル植物であり、近年、秋になるとクズと並んで河川敷で大群落を形成する。アレチウリは、1952年に初めて日本で確認されており、とくに1990年前後に、日本全国の飼料畑を中心にまん延し、農作物を枯らす原因として問題となった外来雑草である¹⁾。アレチウリは、成長が旺盛で、1株あたり長さ数m~10数mになる。種子生産量は400~500個/株であり、発芽率も約70%と高い²⁾。アレチウリの発芽期間は、5月~10月と長く、長く雨が続いたあとに芽生えることが多い³⁾。開花は8月下旬頃から、遅いものは10月になる。果実は、9月上旬から熟れ、下旬にはツルから種子が落ち始める⁴⁾。また、アレチウリは、約800個/m²の種子を生産し、埋土種子の平均密度は、約14個/m²である⁴⁾。光環境を好み、河川では高茎草本の群落の中というよりは、裸地や低茎草本の隙間から発芽し周囲に群落を形成していく。そのため、秋にはヨシ、オギなどを被うことも多い。また、蔓性植物であるため、ヤナギ、クヌギの幹に絡まり、ひどい場合には、樹木に覆い被さり樹木自体を枯らしてしまう例もみられる。

1999年までの河川水辺の国勢調査からアレチウリ群落は、全国109河川のうち20河川でその存在が確認さ

れている⁵⁾。今回、研究の対象とした千曲川(長野県)は、アレチウリ群落の面積が多摩川と並んで全国でもトップレベルにある。アレチウリは、他河川でも確認数が増えるとともに、群落の面積も拡大の一途を辿っており、その成長力からして今後、セイタカアワダチソウ、オオブタクサ以上に河川の在来植物の環境を脅かす危険がある。

アレチウリが蔓延する中で、千曲川流域の数カ所で、アレチウリ撲滅のため、市民が中心となり、その除去作業を行っている。このような取組みがより成果のあるものになるため、アレチウリ種子の着床しやすい場所を把握することや、出水時に種子の供給源となる場所から除去することが重要である。

しかし、アレチウリ群落の拡大に影響を及ぼすアレチウリ種子の拡散、流送特性からアレチウリの着床・流出のシナリオを提示した具体的な研究事例は見あたらない。そこで、本研究の目的は、アレチウリ種子の流送現象をおさえ、アレチウリ種子が過去の出水により、どういった場所に種子が着床あるいは、どういったところから流出し分布域を拡大してきたかを明らかにすることとした。

著者らは以上の観点に立って、流水によるアレチウリ種子の移動を評価する第一歩として、土砂で行われている実験に習って、実験水路でアレチウリの掃流実験を行った。次に、一次元河床変動計算を行い、過去

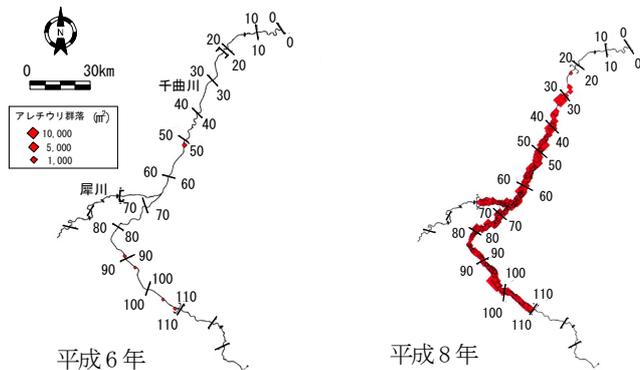


図-1 アレチウリ群落の分布状況の経年変化³⁾

の出水によるアレチウリ種子の着床状況、出水時に河床に働く摩擦速度の違いからアレチウリ群落の破壊耐性を示し、アレチウリの生活史、人為影響からアレチウリ種子が拡大に到った背景を考察した。これらは、結果として、出水規模に応じたアレチウリ種子の着床しやすい場所や種子の供給源となりうる場所の抽出が予測でき、アレチウリの除去対策を計画するうえで有用なツールとなる。

2. 研究対象河川のアレチウリ群落の分布概要

研究対象河川は信濃川水系を流れる千曲川（長野県）とした。対象区間は、新潟県境から上流の30～109kmである。国土交通省北陸地方整備局千曲河川事務所では、1994年以降、数年おきに水辺の国勢調査や踏査により、アレチウリ群落の分布状況の把握に努めている³⁾⁴⁾⁵⁾（図-1）。調査報告によると、アレチウリ群落の分布面積は1994年の段階では1（ha）であったが、2001年は、162（ha）にまで拡大した。

アレチウリ群落の縦断的な分布状況を見ると、犀川合流点より下流付近の比較的川幅が広い区間にアレチウリ群落が集中していた。また、横断的な分布状況の変化としては、1996年にはアレチウリ群落は河岸（ここでは、高水敷と低水路の変化点）を中心に繁茂しており、本研究で対象とした期間のうち最も繁茂した時期にあたる。その後、1999年の調査では、大きな出水

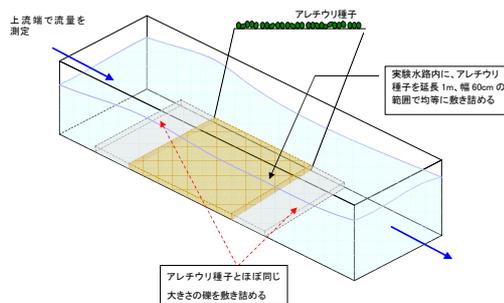


図-2 アレチウリ種子の実験

表-1 実験ケース

Run No.	河床勾配	流量(m ³ /s)
Run 1	1/1563	5.6 × 10 ⁻⁴ ～4.7 × 10 ⁻³
Run 2	1/943	5.6 × 10 ⁻⁴ ～4.9 × 10 ⁻³
Run 3	1/578	3.9 × 10 ⁻⁴ ～2.5 × 10 ⁻³
Run 4	1/288	4.4 × 10 ⁻⁴ ～3.3 × 10 ⁻³

後の調査のためか、大部分のアレチウリ群落の消失が確認された。ところが、2年後の2001年のアレチウリ群落の分布調査では、再びアレチウリ群落が現れることに加えて、これまで存在していなかった河岸から離れた高水敷の箇所までアレチウリ群落が現れる結果となった。

2001年の段階で、アレチウリ群落の面積は、千曲川河川直轄区間の植物群落のうち約10%を占めており、現在もなお増え続けている。

3. 研究方法

(1) アレチウリ種子の掃流実験

実験は、国土交通省国土技術総合研究所内の実験水路（全長30m、幅60cm）で行った。水路は、側壁がガラス張りの鋼製で、勾配が1/100～水平で自動設定が可能であり、通水量は自動制御ポンプにより任意に設定できる（表-1）。実験の目的は、地表面にある状態の種子が出水時にどのような挙動を示すのかを把握することとした。実験は①～④の工程で行った。

①2005年10月20日に現地にて種子を採取したのち、約30cmの深さのある容器に水を張った中にアレチウリ種子を一昼夜浸した。そのうち、沈降しないものについては、実験で扱う種子から除外した。

②アレチウリの種子を、図-2に示すように水路の一部に延長約1m、幅60cmの範囲に平坦に敷き詰めた。また、敷き詰めたアレチウリ種子の上下流にほぼ同じ粒径の礫を敷き詰め、アレチウリ種子に対し急激な水深の変化が起きないようにした。

③通水を開始し、少しずつ流量を増加させながら、アレチウリ種子が下流へ流送され始める瞬間と、完全に流送され始めた瞬間の水位、流量を記録した。

表-2 諸条件

流量 (m ³ /s)	区間間隔 Δx(km)	時間間隔 Δt(×3600(s))	1日あたりの河床変動量計算回数(回)
0-50	1.0(ただし、犀川合流箇所は0.5km)	24	1
50-100		6	4
100-500		3	8
500-		2	12

④実験に使用したアレチウリ種子のうち、無作為に40個の種子を取り出し、粒径(長径, 短径)を測定した。次に、メスシリンダーに種子を入れ、水中での落下速度と湿潤重量を測定し、沈降速度と密度を計算した。

(2) 一次元河床変動計算による種子着床状況の縦断的变化

a) 基礎方程式

本数値解析では複断面水路(低水路及び高水敷を表す2つの矩形断面を積み重ねた形で表現)の取扱いが可能な一次元河床変動計算モデルを使用した。水面形の計算は井田の方法⁶⁾によって行った。

流砂の基礎方程式

Q_B を B_s 全体にわたっての総流砂量とすると、全流砂の連続の式は以下のように示される。

$$\frac{\partial z}{\partial t} + \frac{1}{B_s} \frac{\partial Q_B}{\partial x} = 0 \quad (1)$$

ここに、 z :河床高、 t :時間、 B_s :掃流砂幅、 λ :砂の空隙率で表す。

掃流砂量式

掃流砂量式には、混合砂の掃流砂量に関する芦田・道上の式を使用した⁷⁾。

$$\frac{q_{Bi}}{i_b u_{*e} d_i} \equiv 17 \tau_{*ei} \left(1 - \frac{\tau_{*ci}}{\tau_{*i}} \right) \left(1 - \sqrt{\frac{\tau_{*ci}}{\tau_{*i}}} \right) \quad (2)$$

ここに、 q_{Bi} :粒径 d_i の砂礫の単位幅流砂量、 i_b :粒径 d_i の砂礫が河床において占める割合、

$$\tau_{*ei} \equiv u_{*e}^2 / (\sigma / \rho - 1) g d_i,$$

$$\tau_{*i} \equiv u_*^2 / (\sigma / \rho - 1) g d_i,$$

$$\tau_{*ci} \equiv u_{*ci}^2 / (\sigma / \rho - 1) g d_i,$$

σ, ρ :砂, 水の密度、 u_{*e} :有効摩擦速度、 u_* :摩擦速度、

u_{*ci} :各粒径 d_i の限界摩擦速度、 g :重力加速度 で表す。

各粒径砂の連続式

河床上昇の場合について記述すると、各粒径の砂粒の連続式は、砂が掃流される河床幅を B_s として次のように表される。

$$\frac{\partial i_b}{\partial t} = \frac{1}{a B_s (1 - \lambda)} \left\{ \frac{\partial (q_{Bi} B_s)}{\partial x} - i_b \frac{\partial (q_B B_s)}{\partial x} \right\} \quad (3)$$

なお、河床低下の場合には、上式の右辺の i_b の代わりに元河床の粒径 d_i の砂礫が河床に占める割合 (i_{b0}) を用いた。ここに、 a は流砂の交換層厚(最大粒径程度を仮定)で表す。また、 $q_B = \sum_i q_{Bi}$ で、 $Q_B = q_B \cdot B_s$ で表す。

b) 初期条件の設定

計算区間と計算時間の設定

数値解析の対象区間は、新潟県境から上流の30km~

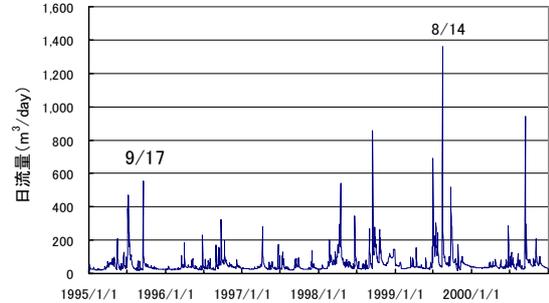


図-3 1995年~2001年までの日流量(杭瀬下流量観測所)

109kmとした。流れの計算において与えた諸条件を表-2に示す。縦断方向に断面分割した区間距離 x は、原則として1.0kmとした。ただし、河床変動が大きいと想定される犀川合流地点付近等の区間では $x=0.5$ kmとした。計算時間間隔 t は1日を基準としたが、流量が大きい場合、24時間以内にかんりの量の土砂が移動してしまう。そのため、流量規模に応じて、計算時間の間隔を細かく設定しなおし、計算の安定性を確保した。

使用した流量時系列

解析期間(1995年1月~2000年12月)および計算区間(30km~109km)が長いことや、研究の目的が縦断的に種子の着床・流出箇所を把握するといったことにあるので、河床変動および流砂量の計算には、日流量を用いることとした。各支川(16支川)と本流合流点での流量時系列を把握するため、まず、杭瀬下流量観測所より上流側の流域面積と各支川の流域面積の面積比を求めた。次に、杭瀬下流量観測所の流量(図-3)を先に求めた面積比をもとに比例配分し、各支川の比流量($Q_{SISEN}(1\sim16) = Q_0$ (杭瀬下流量) $\times a_{1\sim16}$ (各支川流域面積) / a_0 (杭瀬下流域面積))を求めた。最後に、各支川が本流と合流する地点での流量時系列を求め、数値解析に利用した。

諸定数の設定

河床砂の粒度分布は区間ごとの実測値を用いた。数値解析では、これらを10階級に分けて河床砂の粒度分布を計算した。粒径の階級分けは0.074~0.25mm, 0.25~0.84mm, 0.84~2.0mm, 2.0~9.52mm, 9.52~25.4mm, 25.4~50.8mm, 50.8~76.2mm, 76.2~150mm, 150~250mm, 250~400mmとした。

また、マンニングの粗度係数 n は低水路で $n=0.03$, 高水敷で $n=0.035$ とした。なお、本検討では低水路幅は一定とし、低水路、高水敷それぞれについて、計算水深に応じ、土砂輸送量から変動量を計算した。ただし、

高水敷上の変化は、過去の測量結果から大きな低下は生じていないため、堆積のみが生じると仮定した。さらに、支川の流砂量は、河床勾配・川幅と河床砂の粒度分布等を用いて、前述した掃流砂量式(式-(2))より計算した。

c) モデル計算結果とアレチウリ分布変化との比較

過去6年間の出水のうち、アレチウリ種子の移動に大きく関与したと思われる期間を2つ選定した。すなわち、1996年のアレチウリ分布に影響を与えたと思われる出水期間(1995年9月16日～18日)を検討期間I(繁茂期)とした。同様に、2001年のアレチウリ分布に影響を与えたと思われる出水期間(1999年8月14日～16日)を検討期間II(攪乱減少期)とした。

これら2つの期間における計算結果を用いて、アレチウリ分布の変化状況との比較から、出水とアレチウリ繁茂との関係について調べた。

4. 結果と考察

(1) アレチウリ種子の挙動について

a) 沈降速度

実験結果から Rubey⁸⁾の式(式-(4))を用い、アレチウリ種子の沈降速度を求めると平均で6.66cm/sであり、細砂(0.2～0.02mm)の沈降速度(2.51-9.79cm/s)の範囲と一致する。このことは、アレチウリ種子の着床が、出水の低水位時に流速が低下した場所で、細砂と同様な箇所にとどまる可能性を示唆するものである。なお、砂粒子の比重2.65、水温20度として計算した。

$$w_0 = \sqrt{\frac{2}{3} \left(\frac{\sigma}{\rho} - 1 \right) gd} + \frac{36\nu^2}{d^2} - \frac{6\nu}{d} \quad (4)$$

ここに、沈降速度 w_0 (cm/s)、アレチウリ種子密度 σ : 1.06 (g/cm³)、水の密度 ρ : 1.00 (g/cm³)、重力加速度 g : 980cm/s²、粒径 d : 1.15 (cm)、水の動粘性係数 ν : 1.01 × 10⁻² (cm²/s) で表す。

b) 限界掃流力

実験結果から掃流砂量式を用い、流量の増加によりアレチウリ種子が下流へ動き始める限界(=無次元限界掃流力 τ_{*c})を岩垣の式⁹⁾により求めた。なお、限界掃流力を求めるにあたり、アレチウリ種子の粒径、密度は実験の平均値を用いた。

$$\tau_{*c} = \frac{u_{*c}^2}{(\sigma/\rho - 1)gd} = f(R_{e*}) \quad (5)$$

ここに、無次元限界掃流力 τ_{*c} 、レイノルズ数 R_{e*} 、摩擦速度 $u_{*c}^2 = (ghi)^{0.5}$: (水深・勾配により1.14-3.47で変化)で表す。

図-4は、実験より得られたアレチウリ種子の無次元限界掃流力の計算結果である。アレチウリの密度が砂

粒子に比べてかなり小さいことや果皮、種皮による影響があるとも考えられ、一概に砂粒子との比較はできないが、無次元化した限界掃流力の最小値は0.04付近に集中しており、砂の場合の無次元限界掃流力(0.05)よりも概ね小さくなっており、通常の土砂に比べると、より少ない流量でも流送されやすいものと考えられる。

(2) 一次元河床変動計算による種子着床状況の解析結果

a) モデル検証

図-5は、初期の平均河床高(1995年)を基準とし、計算によって得られた終了時(2000年)の平均河床高の変化量と実測によって得られた平均河床高の変化量を比較した結果である。平均河床の変動傾向は、実測値、計算値ともに概ね一致していた。

b) 種子着床状況の解析結果

検討期間I: 1995年の出水による種子の着床と流出

図-6に1995年の9月16日～18日の低水路内、左・右岸高水敷での種子に働く無次元掃流力を示す。なお、ここでは、横断面の特徴から、30-52kmを狭窄区間I、52-66km区間を拡幅区間、66-109kmを狭窄区間IIと定義した。表-3に、図-6,7から求めた出水ピーク時における各区間の種子に働く無次元掃流力の平均を示した。

数値解析の結果、9月17日の時点で、左・右岸高水敷上には、種子が下流へと流される掃流力は働かなかった。一方、低水路内の種子に働いた掃流力は、種子の移動限界掃流力を上回る状況にあり、対象区間の低水路内ではア種子が移動しやすくなっていたと考えられる。また、狭窄区間I、IIでは、拡幅区間よりも相対的に無次元掃流力が大きくなっていった。したがって、出水時に種子が下流方向へ流されやすい箇所であったと言える。一方、拡幅区間では、その上・下流の区間よりも、無次元掃流力が相対的に約40～50%小さくなっていった。そのため出水の減水期には、掃流力も減少し、上流から流入してくる種子量と比較し、下流へ流送される種子量が少なくなるため、この区間で、種子がより着床しやすい傾向にあったと考えられる。しかし、実際には、1996年のアレチウリ分布図から判断すると、河岸沿いを中心にアレチウリ群落が分布しており、減水期には、すべての区間の水際域において種子が着床しやすかったものと思われる。

検討期間II: 1999年の出水による種子の着床と流出

図-7に1999年8月14日～16日の低水路内、左・右高水敷での種子に働く無次元掃流力を示す。8月15日の時点で、検討期間Iの場合と比較し、左・右岸高水敷上、低水路内ともに種子に対し大きな掃流力が働いていた。

表-3より、種子に働く無次元掃流力は、狭窄区間Iで最も大きく、拡幅区間の2倍であった。1995年と比較すると、どの区間でも約1.6～2.1倍の無次元掃流力

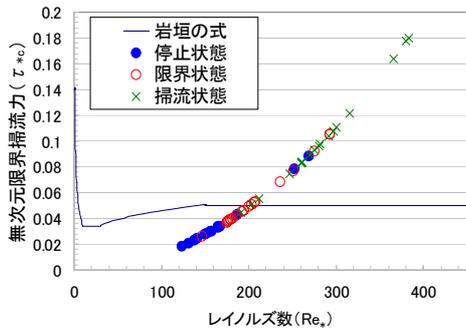


図-4 アレチウリ種子の無次元限界掃流力

(実験結果)

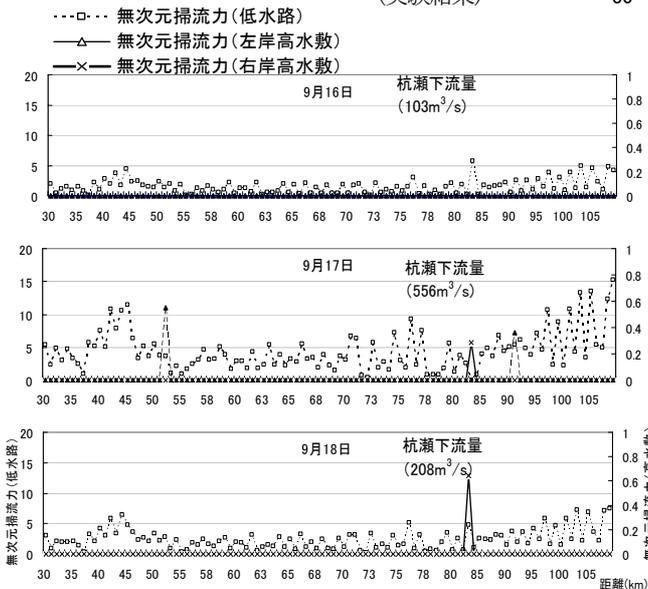


図-6 検討期間 I (1995年9月)

が働いていた。また、水位が高水敷まで到達した区間の無次元掃流力は、高水敷と同様に拡幅区間で最も小さい値を示したものの、低水路のような違いはなく、どの区間も 0.5 前後であった。なお、拡幅区間では、他の区間と比較し、高水敷へ水がのりやすく(表-3 参照)、出水後期には、多くの種子が着床しやすかったものと思われる。

この出水後の秋に行われたアレチウリ群落の分布状況(図-1, 図-7 参照)をみると、狭窄区間 I のようにアレチウリ群落が確認されない区間や、拡幅区間、狭窄区間 II のように、アレチウリ群落がところどころ確認されている箇所がみられる。これらは、出水後にも残っていたアレチウリ群落と思われるが、なぜその箇所に残っていたのかは不明であった。そこで、アレチウリ群落の残存の有無の違いを知るため、出水ピーク時の河床に働く摩擦速度を比較した。その結果、拡幅区間において、アレチウリ群落が残存していた 60~62.5km では、河床に 13.0~17.6cm/s の摩擦速度が働いていた。同じく拡幅区間において、アレチウリ群落が確認されなかった 63~64.5km 区間では、河床に 16.6~30.5cm/s の摩擦速度が働いていた。両者の結果から、アレチウリ群落の消失した箇所の河床の摩擦速度は、

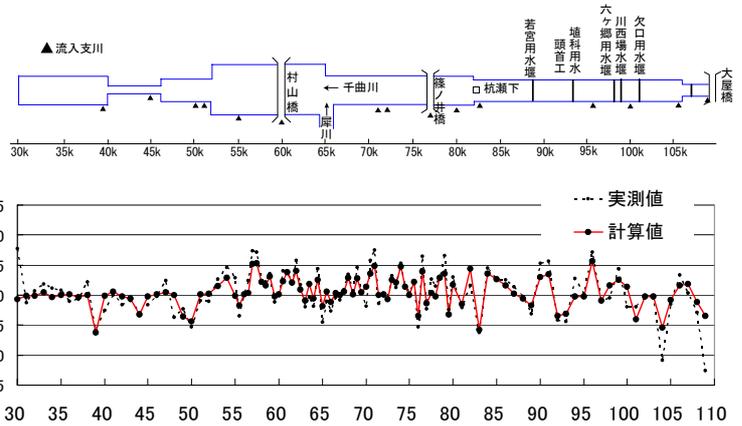


図-5 1995年から2000年までの平均河床変動量の比較

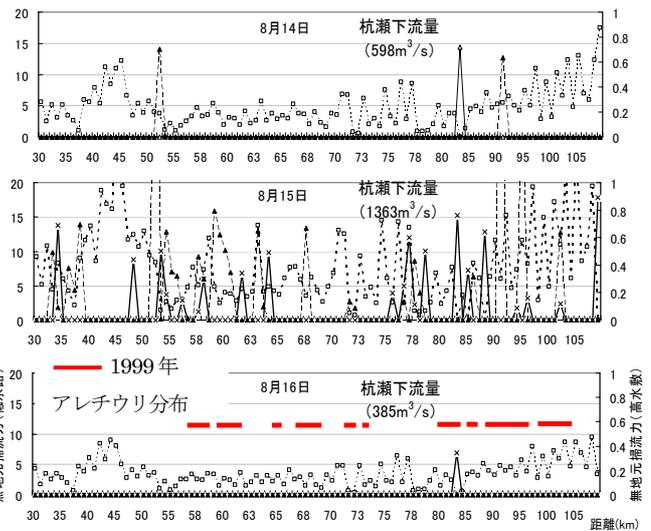


図-7 検討期間 II (1999年8月)

表-3 各区間の種子に働く無次元掃流力の平均

対象区間(km)	1995		1999	
	低水路	高水敷	低水路	高水敷
30-52(狭窄区間 I)	5.43	0.00	11.57	0.50 (14%)
52-66(拡幅区間)	3.03	0.00	5.06	0.47 (42%)
66-109(狭窄区間 II)	4.79	0.00	8.33	0.55 (19%)

一()内は、全区間のうち高水敷に水が乗り上げた区間の割合一

約 17cm/s 前後(岩垣の式⁹⁾より砂礫の移動限界粒径は 3.6cm)であったと思われる。

ところが狭窄区間 II についてみると、アレチウリ群落を確認された箇所の摩擦速度は、例えば、93~97km では 17.8~36.2cm/s であった。これは、先に検討した結果と矛盾する。原因として考えられるのは、この区間に生育する植生に違いがみられるということである。実際に、狭窄区間 II の中州、河岸沿い、高水敷上にハリエンジュが多く存在しており、93~97km の箇所では、中州・河岸沿いのハリエンジュの林床にアレチウリ群落を確認されていた。つまり、流水により、大部分のアレチウリ群落は消失したものの、大規模なハリエンジュ群落の存在により、群落の内部や下流側では流れの緩い空間が形成された。そのため、そこに生育していたアレチウリ群落は、全て消失するには至らず出水

後も群落を確認できたものと考えられる。

今回の一次元河床変動計算では、確かにハリエンジュが多くあるといった横断の特性を考慮しきれていない。しかしながら、縦断的にアレチウリ種子の着床しやすい箇所や河床に働く摩擦速度からアレチウリ群落が消滅に至った背景を考察できた。

5. アレチウリの分布に関する生物的・人為的側面からの考察

4章でとりあげた物理的な側面からのアレチウリ群落が繁茂・消失の検討に加え、ここではアレチウリの生活史から、1995年と1999年に起きた出水後のアレチウリ群落の広がりや差を決めた点も考察しておく。

1995年の出水は、9月中旬であり、低水路内を中心に、河床に落ちていたものに加えて、ツルに付いた結実した種子の多くが下流へと流れたものと思われる。しかも、小規模な出水であったため、結果として、種子がすべて下流へと掃流される前に、52~66kmの拡幅区間や出水減水期の初期に掃流力の落ちる河岸沿いを中心に着床し、翌年、大繁茂に到ったものと考えられる。一方、1999年7月の出水は、7月の出水であったため、まだツルには種子は生産されておらず、発芽に適していた流送された種子の多くは、前年までに形成されていた埋土種子と考えられる。このときの出水は、規模が大きく、高水敷まで水が浸ったことでアレチウリ種子の着床が起こったが、同時に出水継続時間も長かったため、1995年の出水と比較し、減水期に種子を河床へ着床させる前に多くの種子が下流へと流された可能性がある。したがって、1996年のアレチウリ群落の面積と比較すると、2001年の群落の面積は小さかったとも考えられる。

また、アレチウリ群落は今もなお千曲川上流から供給され続けている可能性がある。筆者らは、アレチウリの発生源を確かめるため、109kmよりさらに上流域にある川を数日に渡り踏査した。その結果、112km付近の支川にて、アレチウリが支川沿いに沿って大群落を形成している箇所を発見した。この支川の上流は小高い丘となっており、その屋外には飼料置き場がある。その飼料置き場のから支川へと雨水が流れる道筋がある。晩夏になると、種子が流れ着いた支川の両サイドには、本川との合流の地点まで、アレチウリ群落がびっしり繁茂する。支川はかなり急傾斜であり、秋になると多くの種が支川や丘の傾斜を伝って、本流へと種子を供給するものと考えられる。

以上のように、河川だけでなく、アレチウリを根絶するためには、その流入となる場所からの供給を止めるような対策も考える必要がある。

6. まとめ

全国の河川に徐々に蔓延しつつあるアレチウリ種子の移動を評価する手がかりとして、実験水路にて、種子の掃流実験を行った。次に、千曲川を対象に、過去に起きた出水によるアレチウリ種子の縦断的な着床箇所の状況を一次元河床変動計算から明らかにした。

- ① 実験結果より、アレチウリ種子の沈降速度は、6.66(cm/s)で細砂の沈降範囲にあり、種子の無次元限界掃流力は0.04であった。
- ② 一次元河床変動解析の結果より、種子に対する無次元掃流力の小さい52km~66km区間で種子が着床しやすかったと考えられた。
- ③ 河床に働く摩擦速度が約17cm/s前後より、アレチウリ群落が消滅し始めた。しかし、上流区間では、17cm/sを超えた箇所でも、ハリエンジュの存在により、消滅に至らないケースも見られた。
- ④ アレチウリの繁茂には、種子の結実期、出水の時期・規模と流域の人為影響の関与が考えられる。

謝辞：資料提供いただいた国土交通省北陸地方整備局千曲河川事務所の担当の方々には大変お世話になった。ここに感謝の意を記す。

参考文献

- 1) 村上興正・鷲谷いずみ：外来種ハンドブック pp208-209, 390p, 地人書館, 2002.
- 2) 長野県林業総合センター：ミニ技術情報, No. 15, 1999. 8.
- 3) 国土交通省北陸地方整備局千曲河川事務所, 株式会社建設環境研究所：平成12年度アレチウリ調査検討業務委託報告書, 2001. 3.
- 4) 国土交通省北陸地方整備局千曲河川事務所, 株式会社建設環境研究所：平成14年度アレチウリ調査検討業務委託報告書, 2002. 3.
- 5) 国土交通省河川局河川環境課：平成11年度河川水辺の国勢調査年鑑（植物調査編）, 2001. 10.
- 6) 井田至春：自由表面を有する急勾配流れ, 土木学会誌, 第40巻, 3号, pp. 17-22, 1955.
- 7) 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的研究, 土木学会論文報告集, 第206号, pp. 59-69, 1972.
- 8) (社)土木学会編：水理公式集[平成11年版], pp. 157, 1999.
- 9) 岩垣雄一：限界掃流力に関する基礎的研究, (I) 限界掃流力の流体力学的研究, 土木学会論文集, 第41号, 土木学会, pp. 1-21, 1956.

(2005. 9. 30受付)