【建設工学研究所論文報告集第 56 号〔論文〕2014 年 11 月】

河川湾曲部の礫河原におけるカワラハハコ群落のレフュージアの水理特性について

On Hydraulic Characteristics of Refugia of Anaphalis Margaritacea Community on a Cobble-Bar in a Bend of River

川 谷　　健　　　浅 見 佳 世
Takeshi Kawatani　　Kayo Asami

1．はじめに

礫河原は、河川の生物多様性が保たれるために不可欠な場である。十分に発達した礫河原には、「カワラ-」と名のつく固有の動植物が多く生息・生育している。そして、このような礫河原が維持されるためには、表層の細粒土砂や草本類を流出させる規模の出水が適当な頻度で起こる必要がある。中小規模の出水時に細粒土砂が礫原表層に堆積し、その後、草本類が密生することになると、植物体による被陰やリターの堆積による流砂の捕捉なども加わり、細粒土砂の堆積が一層進み、高植被率の植生が広がることで、礫河原が消失することになる。

「カワラ-」と名のつく代表的な植物としてカワラハハコがある。カワラハハコは、乾燥した砂礫堆上に固有なキク科の多年草で、植物社会学では礫河原という特殊な立地に成立する植生の標徴種と位置づけられ[1)]、その生育により識別される植生がヨモギ―カワラハハコ群団（以下、カワラハハコ群落と呼ぶ）である。すなわち、カワラハハコは礫河原特有の環境に対する感受性のよい指標植物である。

出水の攪乱によって礫河原が維持され、カワラハハコ群落が他群落に遷移するのが抑制され、あわせて群落の主要構成種の実生定着の場となる裸地が作られる[2)]ことは、上述のとおりである。しかしその一方で、出水の擾乱が大き過ぎ、礫河原特有の植物が完全に流失してしまうと、当該河原でのそれら植生の回復が危うくなる[3)]だけでなく、種子の供給源が失われることでセグメントスケールでの種の絶滅も起こり得る。そのため、大きな攪乱を受けてもなお、カワラハハコなど群落の主要構成種が残存し得る分布地（レフュージア）を保全することが必要となる[4)]。

揖保川の宍粟市山崎町平見地区にある湾曲区間（河口からの距離 L＝25.2～25.6 km）の砂礫堆には、カワラハハコ群落の成立する礫河原がある。この砂礫堆は明治時代から存在し、1948 年以降の航空写真により、そこに自然裸地や草本群落の成立が確認されており、出水の攪乱によって裸地化や植生遷移が繰り返されてきたと考えられる。そして、この遷移の繰り返しの中で、カワラハハコ群落も増減してきたと推察される。

ここ 10 年程では、カワラハハコ群落の消長に影響した出水は、2004 年 8 月 31 日の出水（L=29.5 km にある山崎第二観測点でのピーク流量 1515 m^3/s）、2009 年 8 月 10 日の出水（同 1582 m^3/s）および 2011 年 9 月 3 日（同 約 1300 m^3/s）であり、これら出水の前後にはカワラハハコ群落の動態調査が行われている。2004 年の出水では、出水前には礫原全体に広がっていたカワラハハコ群落が礫原中央部に残るだけとなった。その後、2009 年の出水前には、カワラハハコ群落は礫原全体に生育するまでに回復していたが、この出水により分布地の大半が裸地化した[4)]。そして回復途中で 2011 年の出水を受け、カワラハハコは約 10 個体が残存するだけとなったが、2013 年時点で、カワラハハコは再び礫原全体に広がって、植生が分布を回復しつつあることが確かめられている[5)]。これら 3 つの出水では、当該礫河原内にカワラハ

ハコ群落のレフュージアが存在し、出水後の当該礫河原でのカワラハハコ群落の植生回復に大いに寄与した。

本研究では、2009年8月10日の出水をとりあげ、当該湾曲区間の礫河原を含む約1kmの河川区間(L=24.8～26.0 km)を解析対象として、平面2次元流の数値シミュレーションを行い、カワラハハコのレフュージアの水理特性について調べる。湾曲あるいは蛇行する実河川の流れを数値シミュレーションする場合、その目的が例えば砂礫堆の形成や移動の機構・過程を調べることにあれば、流れの3次元構造が把握できる解析手法を採る必要があるが、それら手法は一般に計算容量・時間ともに非常に大きくなり、実河川への適用を困難なものとしがちである。これに対して、本研究は湾曲区間の礫原上の流況把握が主な目的であるので、礫原が冠水しても、冠水深が主流部の水深と比べてかなり小さいため、そこでは流れの3次元性が相対的に小さいことを考慮して、平面2次元流の数値シミュレーションを採ることとした。

2. 数値シミュレーション手法

物理平面 (x,y) における浅水流方程式を計算平面 (ξ, η) の方程式に変換[6) 7) 8)]すると、連続の式は

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

となる。運動方程式は

$$\frac{\partial M}{\partial t}+\frac{1}{J}\left[\frac{\partial(UM)}{\partial \xi}+\frac{\partial(VM)}{\partial \eta}\right]-\frac{1}{J}\left\{\frac{\partial}{\partial \xi}\left[\in J\left(q_{11}\frac{\partial M}{\partial \xi}+q_{12}\frac{\partial M}{\partial \eta}\right)\right]+\frac{\partial}{\partial \eta}\left[\in J\left(q_{12}\frac{\partial M}{\partial \xi}+q_{22}\frac{\partial M}{\partial \eta}\right)\right]\right\}$$
$$+\frac{gh}{J}\left[y_\eta\frac{\partial(h+z_b)}{\partial \xi}-y_\xi\frac{\partial(h+z_b)}{\partial \eta}\right]+\frac{\tau_{bx}}{\rho}=0$$

および

$$\frac{\partial N}{\partial t}+\frac{1}{J}\left[\frac{\partial(UN)}{\partial \xi}+\frac{\partial(VN)}{\partial \eta}\right]-\frac{1}{J}\left\{\frac{\partial}{\partial \xi}\left[\in J\left(q_{11}\frac{\partial N}{\partial \xi}+q_{12}\frac{\partial N}{\partial \eta}\right)\right]+\frac{\partial}{\partial \eta}\left[\in J\left(q_{12}\frac{\partial N}{\partial \xi}+q_{22}\frac{\partial N}{\partial \eta}\right)\right]\right\}$$
$$+\frac{gh}{J}\left[-x_\eta\frac{\partial(h+z_b)}{\partial \xi}+x_\xi\frac{\partial(h+z_b)}{\partial \eta}\right]+\frac{\tau_{by}}{\rho}=0$$

となる。ここに、t =時間変数、h =水深、$M=uh$、$N=vh$、u,v =x,y －方向の水深平均流速成分、ϵ=渦動粘性係数、そして座標変換に伴う諸量は

$$\xi_x=\frac{\partial \xi}{\partial x},\quad \xi_y=\frac{\partial \xi}{\partial y},\quad \eta_x=\frac{\partial \eta}{\partial x},\quad \eta_y=\frac{\partial \eta}{\partial y}$$
$$x_\xi=\frac{\partial x}{\partial \xi},\quad x_\eta=\frac{\partial x}{\partial \eta},\quad y_\xi=\frac{\partial y}{\partial \xi},\quad y_\eta=\frac{\partial y}{\partial \eta}$$

$$J=x_\xi y_\eta-x_\eta y_\xi\ ,\qquad q_{11}=\xi_x^2+\xi_y^2\ ,\qquad q_{12}=\xi_x\eta_x+\xi_y\eta_y\ ,\qquad q_{22}=\eta_x^2+\eta_y^2$$

であり、U,V = 反変速度は次式で与えられる。

$$U=J\left(\xi_x u+\xi_y v\right),\quad V=J\left(\eta_x u+\eta_y v\right)$$

また、 τ_{bx},τ_{by} =x,y－方向の底面せん断応力成分であり、次式で与えられる。