

目的別テーマ：天然繊維の高機能化とその応用

研究テーマ

15-2-7：水生昆虫類の絹糸の構造解析とそれを利用した水質浄化法の開発

ABSTRACT

Stenopsyche marmorata, a net-spinning caddisfly, is distributed in East Asia, and is commonly found in the middle reaches of Japanese rivers. In rivers with stable gravel substrata, the larvae and pupae of this species often occupy dominant positions in the aquatic insect community. The biology of this species has attracted much attention at the middle reaches of rivers, but few studies have been reported on the mechanical property and structure of the nets. The net of the *S. marmorata* larvae is divided into two parts; one is a nest where the larvae lived (type 1), and the other is a feeding net (type 2) which filters the river water and collects the particulate organic matter, POM. In this study, we attempted to examine the construction and strength of feeding nests made by larvae of the same age but in a different flow velocity environment in order to clarify whether or not the change in such a flow velocity environment would change the net construction and / or strength. The net of type 2 consisted of fine mesh size and thinner fiber than that of type 1. The net of type 1 was stronger than that of type 2, and its elasticity depended on the velocity of the river water. The mesh size at the entrance to the net of type 1 was larger than on the other side. In conclusion, *S. marmorata* larva was able to make different types of feeding nets in their habitats (different velocities). In addition, we attempted to examine the water purification by net made by larvae of the same age during winter. Our result suggested that sticky material, e.g., mucopoly-saccharide, plays an important role of attaching of POM to the net.

研究目的

河川に生息する水生昆虫類の幼虫は、流速の早い環境でも石壁表面に巣を固定し、流されずに生活することができる。特に、ろ過食性の大型トビケラ類の幼虫は、水中に網を張り、網にかかった水中の有機物を集めて捕食している。こうした幼虫類は絹糸腺を持ち、絹糸を吐き出して、巣や餌捕獲用の網を作ることが知られている。一方、これらの絹糸は水中でも極めて強固であり、また、餌生物にも目立たぬように、極めて細い材質で構成されている。本研究では、新しい繊維素材として、水生昆虫類の幼虫が吐く絹糸に注目した。幼虫が構築する巣網のネット構造を解析し、水中での強度維持のメカニズムを明らかにした。また、水生昆虫類の巣網が河川水中の有機物を濾過し、除去することから、水質浄化機能についても検討し、実測値を元に、その効果について検証した。

5年間の研究内容と成果

1. ヒゲナガカワトビケラ幼虫の構築する巣網の構造解析：対象としたヒゲナガカワトビケラの巣網は5齢幼虫の構築したもののみとした。巣を採集するごとに、その捕獲網入り口付近の流速を測定し、巣全体を破壊しないように周囲の石ごと水を張ったトレイに移した。5つの流速の異なるカテゴリで、合計51サンプルを採集した。巣網はその特徴から、巣室(タイプ1)と摂食時に用いられる捕獲網(タイプ2)の2つの部分に大別できる。持ち帰ったサンプルはタイプ別に分類後、各々の網から30mm×5mmの計測用シートを1枚切り取った。採集から12時間以内に、光学顕微鏡に付属しているデジタルカメラにより、写真を1つの試料につきほぼ等間隔に中央縦に10枚撮影した。撮影した写真により、試料の網目の構造(繊維の束の太さとその交点の数)の観察・計測を行った。結果は、流速の速い環境に巣を作るヒゲナガカワトビケラ幼虫は、目が粗く(一定面積での交点数が遅い環境の1/4程度)、太い繊維の束(2~4倍)からなる網を構築している。一方、捕獲網(タイプ2)と巣(タイプ1)との違いについては、同じ流速で比較してみると、捕獲網の方が細い繊維の束(約半分)からなり、網目も細かい(交点の数は倍以上)ことが明らかとなった。

2. ヒゲナガカワトビケラ幼虫の構築する巣網の強度の解析：採集から36時間以内に、TENSILON UMT-III-100 (cross head speed : 20mm/min, chart speed : 500mm/min)による試料の強度を測定した。

網が完全に破断されるまでの最大荷重 (gf) と、最大荷重がかかっている状態における網の伸度 (%)、そして弾性係数 (gf/mm) によりそれぞれの網の強さを評価した。網の弾性係数は流速に依存しており、タイプ 1、2 ともに流速が速くなるに従い弾性係数は大きくなり、タイプ 1 では $r=0.75$ 、タイプ 2 では $r=0.59$ となった。また、傾きはタイプ 1 > タイプ 2 であった。これらのことから、流速の速い環境においては、より強度の高い網が構築されていることが明らかとなった。

3. ヒゲナガカワトビケラ幼虫の構築する巣網が水中で果たす機能的役割の解析：河川水中の POM (懸濁態有機物粒子)、捕獲網上の POM、消化管内の POM を顕微鏡下で観察し、POM を以下の 4 つに分類した。①藻類 (珪藻類、緑藻類、藍藻類)、②デトリタス、③動物由来、④植物由来 (藻類は含まない。高等植物の葉や茎などの破片)。分類群毎に出現頻度を計測し、画像解析装置で、各分類有機物の平均面積を求め、量的な指標とした。出現頻度は河川水、網、消化管ともに藻類の占める割合が多く、全体の約 70% を占めた。次いで、デトリタスが約 30% を占め、動物、植物質はほとんど観察されなかった。一方、河川水 POM の場合、藻類は $284.0 \pm 369.3 \mu\text{m}^2$ ($n=200$)、デトリタスは $4171.9 \pm 8553.3 \mu\text{m}^2$ ($n=200$)、動物質は $83237.7 \pm 65437.5 \mu\text{m}^2$ ($n=20$)、植物質は $57365.4 \pm 46251.1 \mu\text{m}^2$ ($n=20$) であった。この傾向は、網、消化管ともに共通していた。以上のことから、粒子の大きさは、藻類 < デトリタス < 植物質・動物質となり、出現頻度は、藻類 > デトリタス > 植物質・動物質となっていた。消化管内の有機物の多くはデトリタスや珪藻で占められている。また、流速の速い地点の方が動物や植物質などの大型の有機物が占める割合が高くなった。このように、流速の速い地点においては、単位時間あたりの過量が流速の遅い地点に比べて多いので、通常出現頻度の低い大型の餌 (動物・植物質の栄養価の高い有機物) をより多く捕獲し、捕食していることが明らかとなった。

4. ヒゲナガカワトビケラ幼虫の構築する巣網の水質浄化機能：河川水の有機汚濁の主要因は、水中の有機懸濁物質であることが良く知られている。冬季の千曲川河川水には、水中懸濁物質 (SS) がおよそ 10mg/L 含まれていた。このうち、POM はおよそ 1mg/L 含まれており、SS 中に含まれる POM 量は約 10% であった。採集した河川水を自然沈降法により 1L から 30ml まで濃縮後、POM を顕微鏡で観察した結果、河川水 1L には 2, 104, 000 個の有機懸濁物が存在することが明らかとなった。一方、河川水 100L をメッシュサイズ 1.000、0.504、0.250、0.063、0.022、0.005 mm^2 の 6 種類の篩を用いて、物理的に濾過し分画を試みた。それぞれの分画には 1L 中に、6, 099、2, 552、3, 791、10, 182、11, 178、27, 216 個の POM が確認された。ヒゲナガカワトビケラの巣アミ (Type 1) の平均メッシュサイズは 0.1 mm^2 であり、メッシュサイズはアミのどの部分でも有意に異なることはなかった。野外から採集してきた巣アミを蒸留水 50ml で洗浄した結果、巣アミ 1 枚当たり、1L 中に 32, 400 個の POM (0.016mg/L) が付着していた。冬季河川中にヒゲナガカワトビケラが約 800 匹/ m^2 の密度で存在している (福永, 2004)。このことから、巣アミ 1 枚当たり、 $12.8\text{mg/L} \cdot \text{m}^2$ の POM がアミに付着すると推定された。上田市の小牧橋から古舟橋までの間の千曲川の流域面積は約 300000 m^2 である。そのうち、ヒゲナガカワトビケラが多く存在する瀬の面積は約 250000 m^2 である。この瀬にヒゲナガカワトビケラが 800 匹/ m^2 で存在した場合、小牧橋から古舟橋の間で 3.2kg/L の POM がアミに付着すると推定された。巣アミのメッシュサイズより大きい 1.000、0.504、0.250 mm^2 の分画でトラップされた POM 数の合計は 1L 当たり 12, 442 個であった。0.1 mm^2 メッシュサイズの巣アミは 32, 400 個/L で物理的な濾過よりも約 3 倍の POM が付着していたことから、巣アミによる生物濾過には POM を効率よく捕らえる機構が存在する可能性が示唆された。巣アミへの POM の付着に mucopoly-saccharide などの物質が、重要な働きをしていることが示唆される。冬季のヒゲナガカワトビケラは 200 日間を水中で過ごす。夏季におけるヒゲナガカワトビケラの 1 日の摂食量は 24mg になる。冬季は水温の低下により摂食量が低下する。仮に夏季の 10 分の 1 と仮定した場合、 2.4mg/日 の摂食量となる。摂食量のうち、半分は排泄物として再び川に戻る。半分が同化されると仮定すると、越冬世代は $1.2\text{mg} \times 200 \text{日} = 240\text{mg}$ の摂食量が見込まれる。河川水中には 1mg/L の POM が含まれていたことから、240L 中に含まれる POM が越冬世代のヒゲナガカワトビケラ 1 匹の生涯で利用されることが推測される。ヒゲナガカワトビケラが 800 匹/ m^2 で存在した場合、1 日に 960L の河川水中の有機物が利用され、200 日間では 192000L の河川水中の POM が利用されることが示唆される。河川水中の有機物除去は生物活動によって冬でも活発に行われていることが示唆される。