

氏名	高橋 和也
博士の専攻分野の名称	博士 (学術)
学位記号番号	博理工甲第 875 号
学位授与年月日	平成 24 年 3 月 22 日
学位授与の条件	学位規則第 4 条第 1 項該当
学位論文題目	湧水涵養水路群における水草の生態学的研究
論文審査委員	委員長 教授 浅枝 隆 委員 教授 金子 康子 委員 准教授 川合 真紀 委員 准教授 藤野 毅

論文の内容の要旨

本論は、滋賀県琵琶湖畔に位置する酸性湧水水路、黒橋川において、そこに生育する沈水植物を主体とした水草に関し、1) 種・生育型および現存量の空間分布とその決定要因を明らかにするとともに、優占種であるオオカナダモ (*Egeria densa* Planch.) について、2) 酸性湧水が本種の成長を促進するという関係性について研究したものである。また、併せて、3) 栄養塩の吸収や土砂の沈降・堆積といった水草の有する生態系サービスについての定量化を行ったものである。

1) については、これまでも、湧水で涵養されている河川や水路にナガエミクリ (*Sparganium japonicum* Rothert) 等、特定の水草が分布するという事実は報告されてきた。しかし、そのメカニズム、理由についての研究報告はほとんどない。本研究をとおして、ナガエミクリが同水路における競合種に比べて、貧栄養状態、特に、底泥、水中ともにリン濃度が低い場所を好んで生育していることが明らかになった (水中 $[PO_4-P] = 0.012 \pm 0.00mgL^{-1}$ 、土壌 $[TP] = 0.63 \pm 0.22mgg^{-1}$)。湧水がこのリンに関する低濃度環境を創出・維持し、オオカナダモやコカナダモ (*Elodea nutallii* St. John) といった競合種の侵入が阻止され、結果としてナガエミクリが湧水と強く結びついて生育しているものと考えられた。また、ナガエミクリは、沈水葉と抽水葉の両方を有しているが、この葉の形態の決定要因は流速にあり、流速が速いときは沈水葉を形成し、流速が $10cm s^{-1}$ を下回ると葉を水面より上に突出し、抽水葉を形成することが今回わかった。

2) については、上述の酸性湧水水路において、オオカナダモの成長速度を計測し、これと河川水中の遊離炭酸濃度との間に正の相関があることを明らかにしたものである ($r=0.67$, $p=0.02$)。湧水の特徴の一つに大気中の二酸化炭素分圧よりも遊離炭酸濃度が高くなるという特徴が知られている。そのため、湧水は炭酸の作用により一般的に酸性を示すことが多い。これは、地中においては微生物による呼吸のみが進行する一方、植物による二酸化炭素の消費がないためである。このような酸性湧水が水路内に流入することで、河川水の遊離炭酸濃度が高くなると同時に、pH が低下することで水中の遊離炭酸と炭酸水素イオンとの化学的平衡がより遊離炭酸側に移行し、さらに遊離炭酸濃度が高くなる。これらのメカニズムを介して、酸性湧水がオオカナダモの成長を促進している結果、オオカナダモの成長速度と遊離炭酸との間に正の相関が得られたも

のと考えられた。多くの水生植物は悪条件下において、遊離炭酸のかわりに炭酸水素イオンを光合成に利用するといわれている。そのメカニズムは proton pump といわれており、水素イオンを葉上に供給して pH を下げることで炭酸水素イオンを遊離炭酸へと移行させ、その遊離炭酸を光合成に利用している。本研究では、酸性湧水の proton pump としての機能発現の可能性を含め、遊離炭酸に富む湧水がオオカナダモの成長速度を助長している事実を明らかにした。

3) については、オオカナダモの栄養塩の吸収速度および土砂の捕捉に伴う栄養塩の蓄積機能を定量化したものである。2009年夏季(7月)から2010年春季(5月)にかけてオオカナダモの成長様式を調査し、調査期間中、平均で、全窒素で $77\text{mgN m}^{-2}\text{day}^{-1}$ 、全リンで $25\text{mgP m}^{-2}\text{day}^{-1}$ の吸収速度を確認した。この値は、現存量が相対的に大きいヨシやミクリといった抽水植物に比べても遜色なく、単位重量当たりの吸収速度は、これらの植物よりも2-5倍程度大きかった。また、2)で酸性湧水がオオカナダモの成長を助長することを明らかにしたが、全窒素、全リンの吸収速度は、成長速度に比例していた。このことは、酸性湧水がオオカナダモの成長を介して、水中の総窒素、総リンの吸収を高める機能を有しているともいえ、湧水の生態学的機能の一つとしてとらえることができる。土砂の捕捉に伴う栄養塩の蓄積効果については、平均で、総窒素で $4.5 \pm 2.1\text{gN m}^{-2}\text{month}^{-1}$ 、総リンで $1.7 \pm 1.8\text{gP m}^{-2}\text{month}^{-1}$ であったが、これは、既往の報告よりも大きな値であった。オオカナダモは成長期にはシュートや根茎を側芽より展開し、水塊を覆うように繁茂する性質をもつ。そのため、他の水生植物より土砂の捕捉効果に富み、その結果、栄養塩の蓄積量も大きくなるものと推定された。植物体による栄養塩の吸収、土砂の捕捉に伴う栄養塩の蓄積の結果、水路内を河川水が流下するに従い、溶存態窒素の濃度で22.7~35.4%が、オルトリン酸態リン濃度で51.1~77.8%の濃度軽減効果が野外水路において確認された。

今回の研究成果は、一つは、湧水が水生植物の分布や成長に与えるメカニズムが明らかになった点にある。現在、我が国では湧水の枯渇、減少、水質悪化が問題化しているが、今回示したような湧水の生態学的機能が明らかになることによって、湧水保全の運動がより加速化するものと期待している。

二つ目の研究成果は、水生植物の生態系サービスを、オオカナダモについて定量化したことにある。この成果をとおして、水生植物による生態系保全への活用や、水路における生態系サービスを最大化させるような水草管理の在り方に寄与できるものと考えている。

論文の審査結果の要旨

本論文では、滋賀県琵琶湖湖畔に位置する酸性湧水水路、黒橋川において、そこに生育する沈水植物を主体とした水草に関し、1)種および現存量、生育型の空間分布とその決定要因を明らかにするとともに、優占種であるオオカナダモについて、2)酸性湧水が本種の成長を促進するという関係について明らかにしている。また、併せて、3)栄養塩の吸収や土砂の沈降・堆積といった水草の有する生態系サービスについての定量化を行っている。

以下にその詳細を示す。

1)については、これまでも、湧水で涵養されている河川や水路にナガエミクリ等、特定の水草が分布するという事実は報告されてきている。しかし、そのメカニズムについての報告はみあたらない。そのため、まず、ナガエミクリが同水路における競合種に比べて、貧栄養状態、特に、底泥、水中ともにリン濃度が低い場所を好んで生育していることを示している。このことは、湧水により、リンの低濃度環境が創出・維持されることによって、オオカナダモやコカナダモといった競合種の侵入が阻止され、結果としてナガエミクリが生育することを示している。また、ナガエミクリは、沈水葉と抽水葉の両方を有しているが、この葉の形態の決定要因は流速にあり、流速が速いときは沈水葉を形成し、流速が 10cms^{-1} を下回ると葉を水面より上に突出し、抽水葉を形成することも同時に明らかにしている。

2)については、オオカナダモの成長速度と河川水中の遊離炭酸濃度との間に正の相関を確認している。地下では呼吸に伴う二酸化炭素の供給のみが進行し、植物による二酸化炭素の消費がないため、湧水自体に溶け込んでいる遊離炭酸の濃度も通常、表流水より高くなっている。また、水路内に酸性湧水が流入することで、河川水の pH が低下し、水中の遊離炭酸と炭酸水素イオンとの化学的平衡状態により、より遊離炭酸側に移行する。これらのメカニズムが働くため、酸性湧水がオオカナダモの成長を促進しているものこと示している。その際に、多くの水草が、悪条件下では遊離炭酸のかわりに、炭酸水素イオンを光合成に利用するといわれている。このとき、植物体内で水を分解し、水素イオンを水中に供給して pH を下げ、遊離炭酸の濃度を増加させる。本結果は、酸性湧水は、これと同じ機能を有していることを示しているといえる。

3)については、オオカナダモの研究地における 2009 年 7 月～2010 年 6 月までの年間の生産量は 0.66kgDWm^{-2} 、窒素およびリンの吸収速度は、窒素で $17.7\text{gNm}^{-2}\text{yr}^{-1}$ 、リンで $5.1\text{gPm}^{-2}\text{yr}^{-1}$ であったことから、オオカナダモの生産速度は、7～10月に速く、栄養塩の吸収速度も窒素で、 $80\text{mgNm}^{-2}\text{d}^{-1}$ 、リンで $23\text{mgPm}^{-2}\text{d}^{-1}$ であったのに対し、11月以降は生長速度が鈍化し、吸収速度は、窒素およびリンでそれぞれ $34\text{mgNm}^{-2}\text{d}^{-1}$ 、 $10\text{mgPm}^{-2}\text{d}^{-1}$ であった。このことから、オオカナダモは抽水植物と比べて、乾燥重量あたりの窒素、リンの吸収量が多いことを結論づけている。また、土砂の沈降・堆積とこれに伴う窒素、リンの捕捉効果については、既往事例と同程度のものであったが、本論文では、さらに、この量に関して定量化している。その結果、栄養塩の捕捉量は土砂の沈降・堆積厚に比例すること、また、捕捉速度は、窒素で $4.5 \pm 2.1\text{gNm}^{-2}\text{month}^{-1}$ 、リンで $1.7 \pm 1.8\text{gPm}^{-2}\text{month}^{-1}$ であることを示している。これらの結果は、水路内を河川水が流下する従い、溶存態窒素の濃度で 22.7～35.4%が、オルトリン酸態リン濃度で 51.1～77.8%の濃度軽減効果が生ずることにあたり、高い浄化機能有していることを示した結果となっている。

以上をまとめると、本論文の成果は、湧水が水草の分布や成長に与えるメカニズムが明らかにした点といえる。現在、我が国では湧水の枯渇、減少、水質悪化が問題化しているが、本論文で示されている湧水の生態学的機能が明らかになることによって、湧水保全の運動がより加速化することが期待される。また、二つ目の成果として、水草の生態系サービスを、オオカナダモについて定量化した点である。こうした成果を

基に、水草による生態系保全への活用や、水路における生態系サービスを最大化させるような水草管理の在り方に貢献すると考えられる。

本論文の内容は、国際誌 *Journal of Ecology and the Natural Environment* および *Landscape and Ecological Engineering* において、掲載もしくは掲載が決定されている。以上のことから、本論文の内容は、博士（学術）に相応しい内容と判断した。