

## 森林から水環境を考える

滋賀県立大学教授 國松 孝男

### 一 はじめに

私は下水道の専門家ではありませんが、いまから三十年ほど前、琵琶湖や瀬戸内海の富栄養化が問題になり始め、流域下水道の是非が全国各地で議論されていた頃に、当時の建設省から委託されて下水の二次処理水を森林に還元して高度処理（当時は三次処理と言っていました）する土壌浄化法を研究していましたし、我が家の庭に土壌浄化システムを自作して家庭下水を処理していましたので、下水文化と多少の関わりはあります。すでに一九六四年には京阪神の水道水に「臭い水」または「異臭味」問題が発生しており一九七七年には水源である琵琶湖に「淡

水赤潮」が発生しました。一方、瀬戸内海では養殖ハマチの無惨な大量斃死がテレビニュースで度々報道されていました。この頃は、特に関西で富栄養化と飲み水の安全に関心が高まり、社会問題になった時期でした。当時（一九七五年）、わが国の下水道は大都市を中心に整備されており、人口普及率は三〇％で、年間伸び率は一％前後でした。一方、滋賀県の普及率は僅か三・二％で、水質汚濁防止の切り札と言われた下水道によって琵琶湖の富栄養化が防止できるようになるのは、五十年先か百年先かという時代でありました。河川汚濁を研究している者として我が家に下水の土壌浄化システムを自作した由縁です。

今日は、琵琶湖を例にして水環境とその保全につ

いて考察します。琵琶湖―淀川水系は近畿千四百万人が水道水源として利用していると推定されています。琵琶湖はそのような重要で関心が高い湖ですから、すでに数多くの解説書や資料が出版されています。そこで、水源である森林について私たちの水質化学的研究の一端を紹介しながら、これまでとは少し違った切り口から琵琶湖水質の保全について考え、森林の水質化学研究の重要性を理解していただきたいと考えています。ちなみに、私が森林の水質化学研究を始めたのは一九八五年頃からで、それまで森林の化学的性質すなわち物質循環などについては、主に地球化学・森林生態学の研究者によつて研究されていました。森林の水質化学研究では私が草分け的役割を果たしました。

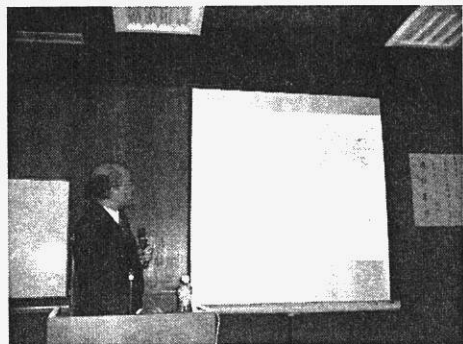
## 二 森林の多面的機能について

日本は国土の六六・四％が主に山岳森林で占められている森林国です。ちなみに農用地は二三・二％です。琵琶湖集水域でも、林地が全国平均とほぼ同じぐらいの割合を占めています。ただし、日本の森林は

すでにその四〇％以上が、スギやヒノキ・ミツなどの人工林に換えられてしまっています。ところが、一九六四年に木材の輸入が完全に自由化されると、国産材は安い外材に押されて急速に経済的価値を失い、一九七〇年には自給率は五〇％を割り、林業は完全に斜陽産業になってしまいました。今や木材自給率は二〇％を割り込んでしまっています。その結果、これらの人工林の多くが長期にわたつて間伐や枝打ちなどの管理もさ

れず、さらに伐期を迎えても伐り出されずに放置されています。

森林は木材生産の外にも薪炭・シイタケなどを生産する場として経済的価値を持っていることは言うまでもありませんが、併せ



てレクリエーション・空気浄化・水質浄化・水源涵養・洪水防止・国土保全・生物多様性維持などの経済外的価値も持っていると考えられています。以前は、それらを森林の公益的機能と呼んでいましたが、最近では多面的機能と呼ぶことが多いようで、森林環境税などの根拠にもされています。しかし、レクリエーション機能以外の森林の機能は、まだ科学的に十分な精度で確認されているとは言えないと、私は考えています。以下では森林の水質浄化機能について、私の研究に基づいて具体的に示しましょう。

### 三 森林は水質汚染源

#### 三、一 非定常な流出現象

結論から先に言いうと、私が森林について水質化学的研究を始めるまでは、森林が湖沼や内湾などの閉鎖性水域の汚染源になっているなどとは、ほとんど誰も考えませんでした。特に林業関係者や林学の実証者には、森林は浄化こそすれ琵琶湖を汚染するなどととは考えられないことでした。ところが、私は水質化学の研究者ですので、次の二つの理由からそのよう

には考えませんでした。

第一に、森林溪流は清澄ではありますが、決して純水が流れているわけではありません。溪流といえどもミネラル成分とともに、窒素やリン、有機物などのいわゆる水質汚濁物質を必ず含んでいます。これらがいったん琵琶湖に入ると、家庭排水や工場排水などの人為起源の汚濁物質と化学的に区別することは出来ないので。すなわち森林も化学的には閉鎖性水域に対する汚染源の一つであると位置づけられるのです。ただし、森林は汚染源ではあっても、単位面積当たりの汚濁負荷量（原単位と呼んでいます）は農地よりは小さいことを、私たちは精度の高い定量的実験で確かめています。ところが、森林は集水域に占める面積が農地より五・六倍も大きいのが普通で、琵琶湖にとつては無視できない汚染源になるのです。

第二の理由は、森林の汚濁物質の流出現象は非定常性が高く、定量的な測定・評価は極めて困難です。河川を対象とした研究では、一九八〇年代まではせいぜい月に一回程度、晴れた日（低平水時）に調査し

た水質データから流出物質量を評価するのが普通でした。そのような低頻度の調査では、何かの都合でたまたま雨の日（または雨の影響を受けている時）に調査すると、異常に高濃度のデータが一つ混ざることになり、平均濃度も物質流出量も異常に大きな値になります。このようなデータは異常値とみなされ、棄却されるのが普通でした。科学の方法としては、安定している系すなわち定常状態にある現象を対象とするのが常道で、非定常な現象は測定も解析も著しく困難で科学になりにくいのです。少なくとも日本では次に述べるように、私たちの研究以外に森林の浄化機能を科学的に評価できるほど精度の高い定量的な汚濁物質の流出量に関するデータはないのが実情です。

### 三・二 洪水流出の評価

晴れた日の森林流出水・溪流の水質は、確かに清澄で安定しています。しかし、溪流といえどもひとたび三〇～五〇mm以上の降雨が降ると、林床の肥沃

な表土を浸食し、濁流となって流出します。そのようないわゆる洪水流出時には、窒素リンの濃度は数倍に上昇します。しかもその間は流量は数十倍～数百倍に増加しています。水に運ばれる物質量は、濃度Cと流量Qの積で計算される連続量です。

$$L \parallel C \times Q$$

従つて、雨の日は晴れた日の数十倍～数百倍の物質が森林から流出しているのです。従つて、流出物質量を正確に実測するためには、連続して濃度と流量を測定する必要があります。しかし、現状ではそれは技術的にも、経費的にも無理です。そこで私は、まず森林から流出する物質の量を洪水流出を含めて正確に評価できる調査・解析法の研究から始めました。

ここでは詳細は割愛して結果だけを紹介しますが、鈴鹿山脈南端にある油日岳S森林実験流域での調査では、全窒素・全リンの年間流出量のそれぞれ七二・八二％が雨の日すなわち洪水流出によって流出したことがわかりました。その結果、窒素リンの汚濁負荷量は降雨量の多い年は、少ない年より多くなる傾

向があり、年によって二〜三倍も差があることがわかりました。さらに、森林からの汚濁負荷量は雨の降り方にも強く影響されることがわかってきました。例えば、一〇〇mmの雨が十回の降雨に分けて一〇mmづつ降った時に流出する窒素・リンの総量と、一回の大雨で一〇〇mm総て降った時に流出する量を較べると、後者の方がはるかに大量であることがわかりました。降雨時に流出する窒素・リンの大部分は主に表層土壌の浸食に起因する粒子成分が占めていますが、浸食力は大雨の方が圧倒的に大きいからです。

以上の研究から、森林の汚濁負荷量調査は雨による流出すなわち洪水流出の調査が重要で、特に粒子成分を含む窒素・リン・有機物などの汚濁物質では洪水流出負荷を評価しない従来の方法では、著しく過小評価になることを明らかにしました。

### 三・三 森林の浄化機能

森林の水質浄化機能は、一年間の林地からの流出負荷量と降雨や降下煤塵による流入負荷量（大気

降下物負荷量AD）との差、すなわち物質収支Bで評価されてきました。

$$B \equiv L - AD$$

$$B \wedge 0 : \text{浄化}$$

$$B \vee 0 : \text{汚染}$$

Bがマイナスであれば浄化、プラスであると汚染と評価されます。単純な収支式ですので、森林の水質浄化機能は簡単に正確な評価ができると思われますが、そうは問屋が卸さないのです。前述しましたように従来の方法ではその定量精度が不十分で、過小評価になっているからです。正確に評価するためには、洪水流出を含んだ正確な流出負荷量を定量しなければなりません。これはかなり難しい研究であることは先に説明しました。

それだけではありません。大気降下物負荷も非定常性の強い現象で、ADの定量的測定・評価は難しく、未だに定量法すら標準化されていないのです。私のこれまでの窒素・リンの大気降下物負荷量の測定・評価方法に関する研究では、従来の方法では過大評価になっています。結局、引かれるしが過小評価で、引

くADが過大評価になっているのですから、その差Bには浄化の方向に強いバイアスがかかっています。言い替えば、これまでの森林の水質浄化機能の評価は、十分な定量的根拠に基づいて行われた評価ではないのです。世界的に見ても事情はほぼ同じで、森林の水質浄化機能については未だに正確には評価できていないのです。

## 四 伐採・植林の水質影響

### 四・一 人工林の維持管理

商品価値のある木材を生産するためには、人工林は適正に管理されていなければなりません。そして工業生産と違って、たとえ木材が売れなくなっても、林業経営が経済的に成り立ちにくくなっても、人工林を放棄することは許されません。例えば、もやしのようになったスギやヒノキが台風によつて倒され流れ出すことによる二次災害を防ぐためにも、そのために林務労働者の技能を維持するためにも、人工林の管理を止めるわけにはいかないのです。言い替える

と、森林をいったん人工林に転換すると、枝打ち、間伐、再造林など人工林としての維持管理を、途中で放棄できないということです。

一方、全森林の四割もそのような人工林にしてしまったのにもかかわらず、人工林の維持管理が溪流水質に与える影響についての研究は、わが国では私たちの研究以外にありません。伐採・植林によつて林床を少々攪乱しても、森林が水を汚すということなど、思いも寄らなかつたのでしょうか。森林の伐採・植林は、閉鎖性水域の水質に関して少なくとも二つの問題を持つています。

第一の問題は過去に関わる問題です。戦後、木材とパルプ需要が急増し、林業家が材木を伐り出し、製紙会社が奥山のブナ林を皆伐し、そのあとにスギやヒノキを植林しました。さらにエネルギー革命は里山やホトラ山（茅場）を不要にし、そのあとにもスギやヒノキが植えられました。森林の皆伐・植林（拡大造林）が盛んに行われたこれらの時期に、拡大造林が琵琶湖の水質にどのような影響を与えたのか、不明であることです。

第二の問題は将来に関わる問題です。すでに四〇%を超えているスギ・マツ・ヒノキの人工林は、二一世紀に入つて順次、伐期を迎えます。伐採して再造林するか、間伐してより大径木の人工林に育成しなければなりません。しかし、再造林や間伐が閉鎖性水域にどのような影響を与えるのか、誰にも予測できないのです。

そこで私が次に取り上げた研究課題は、皆伐・植林が溪流水質または下流の閉鎖性水域の富栄養化に与える影響を明らかにすることでした。

#### 四、二 朽木森林実験流域での伐採実験

皆伐・植林の水質影響を判定するためには、その前後の溪流の水質または汚濁負荷量を比較すれば済むことで、やはり一見、はなはだ簡単な研究のようには思えます。しかし、三、一で述べたように、非常な溪流の水質または汚濁負荷量の皆伐・植林前後の変化を比較できるほど精度良く定量することは、決して簡単なことではありません。そもそも研究室からそう遠くない場所に実験流域を見付け、森林を

所有する個人または団体に伐採・植林を実施または許可してくれるよう説得し、その場所に量水堰を設置して採水・分析するための研究費を獲得しなければなりません。私は最初に紹介した汚水の二次処理水の林地還元の研究をしていたため、財団法人森林文化協会注から自然研修所の浄化槽処理水の山林散布施設の浄化効果の調査を委託されたことが縁で、滋賀県高島市朽木の森林環境基地「朝日の森」の中に、二つの隣り合う二次林の小流域を実験に使わせていただけになり、併設されていた森林環境研究所のスタッフも全面的に協力してくれることになりました。実験はそのうち一方の小流域（R）をそのまま維持する保存区とし、他方の小流域（I）を二年後に皆伐・植林する伐採区として、両区の溪流の水質・水量を同時に測定して比較する方法で行うことにしました。このような方法を対照流域法と呼んでいます。

注）朝日新聞の創刊百年を記念して設立された財団法人で、滋賀県高島市朽木の一四八haの森林に自然研修所と森林環境研究所を持つ森林環境基地「朝日の森」を建設した。

一九八八年から予備調査を始め、一九九〇年には私が兼務していた滋賀県琵琶湖研究所（現滋賀県琵琶湖環境科学研究所）の予算で二つの森林実験小流域の末端に、それぞれ量水堰を設置することができました。大がかりなフィールド調査を基にした協同研究には、さらに協同研究であるが故の困難性があります。異なる分野の研究者のタイミングを合わせることの困難性です。例えば植物の研究者は現存植生の種組成や現存量（バイオマス）などの調査を行つてからでないと伐採に同意しません。この研究でも総ての研究者が同意して伐採できたのは、結局、本調査開始から七年後の一九九六年で、スギ苗を植林したのは一九九八年四月でした。

実験の結果を紹介しましょう。長期（一九八八～一九九六年）の事前調査によつて、伐採（予定）区と保存区の間には窒素・リンの濃度に重要な差はないことが十分に確かめられました。伐採区の伐採を一九九六年十二月から始めましたが、その途端に溪流の粒子態の窒素とリンの濃度が急上昇しました。溶存成分の濃度は保存区と変わらなかったことから、伐

採作業による林床の踏み荒らしなどによる攪乱が、降雨時に表土の一部を粒子成分として流出しやすくさせたことが原因であると推察しました。それは、粒子態窒素・リンの流出が翌年一月になって雪が積もると、直ぐに収まった事実からも支持されました。ところが十月ころから伐採区の溶存窒素（硝酸態窒素）濃度が急に上昇し始め、その後、約三年間も二～三倍の高濃度が続きました。伐採から約四年後の二〇〇〇年頃から徐々に低下し始め、二〇〇一年以降は夏期はほぼ元の水準に戻りました。しかし、冬期はその後も保存区より高い状態が続いています。

#### 四・三 琵琶湖水質と伐採植林

さて、ここで本節の冒頭で述べた二つの問題について、実験結果を琵琶湖に当てはめて考えてみましょう。琵琶湖では一九六〇年代に富栄養化が急速に進みました。この時期は日本の高度経済成長の時期で、これまでは工場排水や生活排水、農業排水による汚濁物質の流入増大が原因であると考えられて



きました。ところが、この時期は琵琶湖を取りまく森林で拡大造林が進んだ時期とも重なります。実験の結果は、拡大造林によって窒素流出量を増加させた森林も、琵琶湖の富栄養化を進行させた要因の一つであった可能性を否定できないことを示しています。ただし、それを定量的に証明するためには、さらに琵琶湖集水域で植生や地理的条件が異なつた森林で同様の調査をして、少なくとも流入総量とその推移を推定する必要があります。

それから四〇年以上が経過した現在、その頃に植林したスギヒノキがこれから次々伐期を迎えることは前述しました。人工林を伐採し、若い苗木を再植林して森林を育成することは、新たにCO<sub>2</sub>を吸収し固定する(カーボンシンク)ことになるため、わが国では地球温暖化防止のための主要な施策の一つに数えられています。しかし、実験の結果は、この再造林が琵琶湖の水質環境を悪化させる恐れがあることを示唆しています。すなわち、再造林による炭酸ガスの吸収・削減と富栄養化の防止は二律背反の關係にあることを、この研究は示しています。しかし、このこと

## 五 森林の窒素汚染

### 五・一 高濃度窒素流出林地

人為汚染のない森林から流出する溪流の晴れた日または低く平水時の窒素(全窒素)の濃度は、日本では0.2~0.3mg/l程度と考えられてきました。ところが、窒素(主に硝酸態窒素)が1mg/lを超える溪流があることが、一九七五年に多摩川流域で発見されました。その原因については大気汚染説(窒素飽和説・樹齡説・土壤微生物説・地質説など諸説が出されていますが、まだどれも定説になっていません)そこで、私の森林研究の最後の課題をその原因究明とすることにしました。

私たちは高濃度窒素流出林地の分布を確かめるために、まず隣の荒川流域で広域調査を始めました。その結果、高濃度窒素流出林地は多摩川流域の外にも関東山地に広く分布することが確認できました。そして、高濃度窒素流出が一過性の現象でないことを確認するために、窒素濃度が特に高い溪流、中く

らしい溪流、通常濃度の溪流を各二カ所づつ選んで、一九九九年から二〇〇〇年にかけて月に一回、一年一カ月間継続して調査しました。その結果、多少の変動はあるもののそれぞれの濃度レベルは一年を通じて維持されており、従つて一回だけの調査でも濃度レベルの判定は可能であることを確認しました。

関東山地での高濃度窒素流出林地の分布を見ると、地質が花崗岩地域と比較的新しい堆積岩地域（四十万帯）では見付からず、特定の古い堆積岩地域に分布していました。そこで、私は地質の相違が原因であるとの仮説を立てました。それ以降最近まで、その仮説を証明すべく、沖縄を除くほぼ全国を調査しました。その結果、全窒素濃度が $1\text{ mg/L}$ を超える高濃度窒素流出林地は、東北の太平洋側、関東の桐生から関東山地、関西では滋賀東部の鈴鹿山脈から名張・生駒にかけて、四国では瀬戸内海側、九州でも見付かりました。今まで「山の水はきれいだ」との先入観がありましたが、窒素で汚染された森林が全国に分布していることがわかりました。

## 五.二 琵琶湖集水域の高濃度窒素流出林地

琵琶湖集水域の調査では、東部の鈴鹿山脈を中心に $1\sim 2\text{ mg/L}$ を超える高濃度窒素流出林地が少なからず存在することがわかりました。鈴鹿山脈の南端部には一九八八年から二〇〇年以上にわたつて週に一回の頻度で定期調査をしている森林実験流域が二カ所あります。この辺りは古い花崗岩地帯にありますが、そのうち油日岳S森林実験流域（一九九五年）の全窒素濃度は $0.6\text{ mg/L}$ 前後で中間的な濃度の林地です。前述したように荒川などの関東山地の調査では花崗岩地域では高濃度窒素流出林地は見付からなかったもので、油日岳周辺の林地を詳しく調査することにしました。その結果、 $1\text{ mg/L}$ 前後の林地が少なからず分布しており、 $2\text{ mg/L}$ を超える林地もあることがわかりました。この地域は自動車交通量の多い国道一号線と名阪国道に東側と南側を囲まれており、さらに北側の土山と西側の朝宮・信楽には窒素肥料をたくさん施用する茶畑が存在しています。ともに大気の窒素汚染の原因である

ことがわかっています。しかし、今のところ林地の高濃度窒素流出は地質が主因なのか、または自動車排気ガスが原因なのか、肥料が原因なのか特定できていません。これらの原因のいずれかあるいは相加的に影響を及ぼしているとすれば、森林もまた人為汚染の被害者なのでしょうか。とにかく少なからざる森林が、琵琶湖の窒素汚濁源になっていることは間違いありません。

ところで、琵琶湖に注ぐ河川の源流域の渓流水の全窒素の濃度が $1 \sim 2 \text{ mg/L}$ を超えていることの重大性については、河川水質の専門家でもなければにわかには判断できないでしょう。そこで、大まかに状況が把握できる琵琶湖—淀川水系の窒素濃度を参考にしましょう。まず、琵琶湖の水質をみてみましょう。北湖（主湖盆）の中央部に設定されている三方所の環境基準点—中央部表層—の全窒素濃度の年平均値の平均値は、 $0.32 \text{ mg/L}$ （全リンは $0.008 \text{ mg/L}$ 、 $2004$ 年度）でありました。陸水学では $0.2 \text{ mg/L}$ （同 $0.01 \text{ mg/L}$ ）以下まで下げないと、温帯にある湖沼では植物プランクトンの異常増殖（湛

水赤潮）を抑えることはできないと考えられており、富栄養化の限界濃度とされています。ところが、湖沼水質のバックグラウンドと言われ、清澄であると考えられてきた上流森林地帯の溪流が、すでに琵琶湖の約三～六倍、富栄養化限界の約五～一〇倍以上、窒素に汚染されているのです。

次に、汚染が進んだ都市河川の窒素濃度はどの程度でしょうか。もちろん汚染の程度によって異なりますので、淀川下流の鳥飼大橋地点（大阪市に入る直前）の全窒素濃度と較べてみましょう。大阪府の調査によると、 $2005$ 年度の流心の平均濃度は $1.5 \text{ mg/L}$ （全リンは $0.1 \text{ mg/L}$ ）でした。すなわち、上流の水源地帯の森林溪流の一部は、淀川下流並かそれ以上の窒素に汚染されているということです。

## 六 おわりに

今、本州では猛威を振るった「マツ枯れ」に加えて、ミズナラやコナラ、クリなどのナラ類の樹木が広範囲に枯れる「ナラ枯れ」が拡大しています。朽木森林実験小流域の保存区Rでも、 $2004$ 年頃からコナラ

が枯れ始めました。その頃から、溪流の窒素の濃度が上昇し始め、二〇〇五年以降はそれまでの三倍以上の高濃度での流出が続いています。別の目的（伐採・植林の水質影響）で調査を継続していた森林に、たまたまナラ枯れが発生するという偶然に恵まれ、ナラ枯れの琵琶湖水質への影響解明へと研究を展開することができました。現在、琵琶湖集水域の二次林のナラ枯れによって、琵琶湖に対する窒素負荷をどの程度増大させる可能性があり、どれだけの期間続くのかについて調査・解析を進めています。

このように森林溪流の水質は、人工改変のみならず自然条件の変化にも影響され、常に変動しています。森林といえども、常によい子ではられないのです。自然は、われわれ人間にとつて、時には不都合な存在になるという、至極当たり前の事ではあるけれども、“常識”からすれば決して当たり前でないような事が、実際に起こっているという当たり前の事を、私が二〇年以上研究してきた森林と水質との関係性を例にして、紹介しました。

## 引用文献

- ・國松孝男・須戸幹 (1997) 林地からの汚濁負荷とその評価, 水環境学会誌, 20, 810-815.
- ・Kunimatsu T., Otomori T., Osaka K., Hanabata E. and Komai Y. (2006), Evaluation of nutrient loads from a mountain forest including storm runoff loads, *Water Science & Technology*, 53 (2), 79-92.
- ・國松孝男・須戸幹 (1994) 大気降下物によるチッソリンの供給量の變動, 環境技術, 23, 710-713
- ・Kunimatsu, T. and Sudo, M. (2006), Long-term fluctuation and regional variation of nutrient loads from the atmosphere to lakes, *Water Science & Technology*, 53 (2), 53-62.
- ・滋賀県琵琶湖環境部水生か琵琶湖環境政策室 (2005) 2005 年版環境白書, p. 54
- ・大阪府 (2008) 大阪の環境ホームページ <http://www.epcc.pref.osaka.jp/main/status/#top>, エコギャラリー
- ・環境の状況
- ・大阪府域河川等水質調査結果
- ・測定計画に基づく水質測定結果 (大和川以水域、鳥飼大橋流心)