

10. 環境負荷の軽減を図るための森林管理方法の検討

森林流出水および森林動態の長期モニタリング

金子有子・國松孝男¹⁾・籠谷泰行¹⁾・中島拓男

要約

落葉広葉樹二次林の伐採・スギ植栽が渓流水質に与える影響を、対照流域法により定量的に検証することを目的として、1991年に滋賀県高島市朽木麻生に伐採流域と非伐採流域を設定し、両流域から流出する渓流水質と水量のモニタリングを続けてきた。その結果、伐採の約1年後から、伐採流域の溪流では硝酸態窒素濃度が急上昇し、全窒素濃度は3～4倍に上昇した。年流出負荷量は2年目には4.8倍、3年目には5.6倍に上った。伐採流域からの硝酸態窒素の高濃度流出は約3年続き、4年目の2001年にやや低下し始めた。その後2005年夏季まで高止まりしていたが、それ以降10年目の2006年7月までにかけて、伐採前の濃度レベルにほぼ回復した。一方、非伐採流域で2004年6月頃から全窒素濃度、硝酸態窒素共に上昇し始め、2005年も同様の高水準で推移し、2006年には伐採流域よりも高濃度になり、有機体窒素濃度も上昇した。この水質変化は伐採流域では見られず、非伐採流域におけるナラ枯れの進行と同調していた。非伐採流域の渓流水窒素濃度上昇の原因がナラ枯れであれば、琵琶湖水質に対する影響が強く懸念される。また、同流域で秋に毎木調査を実施し、森林動態のモニタリングを継続した。18年度の調査結果では、現存量は149t/ha、個体数は2623本/haとなり、この1年でそれぞれ3.2 t/ha、11本の増加となった。非伐採流域では近年ナラ枯れの被害が顕著であり、今後のモニタリングがさらに重要となっている。

1. はじめに

現在、森林をめぐる状況は、深刻化する地球温暖化や生物多様性の低下、ナラ枯れ等の被害や竹林の拡大、滋賀県下84,000haの人工林と林業不振といった様々な課題に囲まれながら、レジームシフトを経つつある森林生態系の機能回復を図り、持続可能な森林経営、森林管理を推進していかなければならない状況にある。滋賀県では、2004年に、公益的機能の発揮に重点を置いた環境重視の森林づくりを推進する「琵琶湖森林づくり条例」が制定され、2006年4月から環境重視の森林づくり等を推進するための県民税が導入された。多様化する森林への期待に応え、人間活動に伴う森林の機能の低下を軽減する方策を講じながら、森林の管理や利用を進めていく必要がある。

本プロジェクト研究では、森林の生態学的機能のうち、地球水環境に果たす機能としての森林の蒸発散機能と水質浄化機能、および、地球温暖化防止機能について、その実態と変動を長期にわたって把握するためのモニタリングを継続してきた。本モニタリングは、対照流域法による厳密な比較を行うため、1989年に、滋賀県高島市朽木麻生の植生や地質の類似した隣接する2つの山地小集水域に2基の量水堰の設置し、1990年から渓流水質・

水量等の観測を開始したものである。1994～1998年度は「森林伐採が環境に及ぼす影響」、1999～2001年度は「森林の回復過程が渓流水に及ぼす影響」、2002～2006年度は「環境負荷の軽減を図るための森林管理方法の検討」という3つのプロジェクト研究を通じて実施されてきた。平成18年度も、この既存の伐採・非伐採流域において、森林流出水の水質、および、森林の成長量（二酸化炭素固定量）等についてモニタリングを行った。2006年度に当プロジェクトが終了したのに伴い、今後は滋賀県立大学の共同研究者に引き継がれる予定である。

これまでに蓄積された長期モニタリングデータは、渓流水質・水量では、対照区としての非伐採流域と合わせて、伐採前から継続して二流域における渓流水の測定、中でも窒素やリンの水質の測定を15年以上にわたって実施した例は国内でも例がなく、貴重なデータとなっている。森林の成長量についても、1996年からの毎木データを基に、森林動態の解析や二次林における温暖化防止効果のシミュレーション解析等が行われてきている。

本稿では、主要なモニタリング研究項目について報告する。2節は國松、3節は籠谷が共同研究者として調査研究と執筆を分担し、1節と全体を金子がまとめた。

1) 滋賀県立大学環境科学部

2. 二次林の伐採・スギ植栽の長期影響

2.1 はじめに

湖沼水質保全特別措置法が1985年に施行されてからすでに20年が経過した。しかし、富栄養化は、指定湖沼についてみても、琵琶湖の北湖のリンなど一部を除いて依然として改善されていない。総務省と環境省は2004年度に、その原因の一つとして非特定汚染源からの汚濁負荷量と対策技術について、定量精度が不十分であることを相次いで指摘した。総務省は、湖沼の集水域では森林のような非特定汚染源の対策が重要とし、2004年の政策評価で、滋賀県は負荷源の58%を占める森林等の非特定汚染源への取組強化の必要性を勧告されている。陸域における主な非特定汚染源またはノンポイントソースは林地・農地・市街地である。自然度の高い林地は、農地や市街地より原単位は小さい。しかし、わが国では森林が国土の67%を占めるため、多くの湖沼でその定量精度が集水域の汚濁負荷発生量の精度に大きな影響を与える。琵琶湖集水域でも森林は約7割を占めている。そのため、琵琶湖への汚濁負荷量の約半分は、面源としての森林から河川溪流を通じて流入する負荷である。森林流出水を分析し、窒素、リン等の栄養塩類等化学成分の変動を長期的に把握することは、琵琶湖の水質変動をモニタリングするためだけでなく、水質保全を進めるためにも重要である。

林地の原単位を正確に設定するためには、汚濁物質の流出量、すなわち、汚濁負荷量を正確に定量したデータが必要である。一般に、林地の物質収支は気象や地形・地質・土壌・植生・森林管理等、多くの自然要因・人為要因に影響されるため、時間的に非定常で、空間的に非均質である。

その結果、溪流河川を經由して流出する物質、または、汚濁負荷量も非定常、非均質である。ところが、全窒素や全リン等の流出量、または、汚濁負荷量（または濃度）は、現状では不連続データしか得られない。そのため、林地の原単位を正確に設定するためには、実測データの非連続性を補完し、短期・長期の非定常性を適切に評価できる定量的推定法を確立する必要がある。一方、非均質性を評価するためには、多くの森林で渓流水の水質と流量を長期にわたって測定し、非定常性を評価したデータを蓄積していかなければならない。

人為的要因のうち伐採・植栽は、流出渓流水の水質、および、汚濁負荷量に大きな影響を与え、長期の非定常性の原因になると考えられる。そこで、本研究では、伐採・植栽が林地流出水の水質、または、原単位に与える影響を明らかにすることを目的として、対照流域法によって落葉広葉樹二次林の伐採・植栽が水質・原単位に与える影響とその回復過程を調査した。

2.2 試験流域の概況と調査方法

対照流域法は、非均質性を最小限にし、かつ非定常性を無視できるようにするために、流域条件が可能な限り相同の2流域をできるだけ近接して設定し、いずれか一方の流域を処理し、処理前後の挙動を処理しなかった対照流域と比較しながらその効果、または、影響を調査研究する方法である。本研究では、先述の如く、隣接する2流域としてL流域（流域面積1.09ha）とR流域（同1.91ha）を設定し、量水堰を設置し、1991年から両流域の溪流の水質と水量のモニタリングを開始した。2流域のうちL流域を1996年12月と翌年3月に分けて皆伐し、1998年5月にスギ苗を植栽した。R流域は処理をしない対照流域とした。

伐採流域と非伐採流域から流出する渓流水については、流量を観測すると共に、1週間に1回の頻度で定期的には、流量を分析している。水質の分析項目は、全窒素、硝酸態窒素、アンモニア態窒素、溶存有機態窒素、粒子態窒素、全リン、リン酸態リン、溶存有機態リン、粒子態リン、溶存態有機炭素、粒子態、ナトリウムイオン、カリウムイオン、カルシウムイオン、マグネシウムイオン、塩素イオン、硫酸イオン、溶存ケイ酸、アルカリ度、懸濁物質、電気伝導率、pHである。

2.3 伐採・植栽が渓流水質に与える影響

朽木麻生の伐採・非伐採流域から流出する渓流水の水質の1991年から2006年までの16年間の変化を、経時的に図1～図6に示した。伐採・スギ植栽が流出溪流の水質に与える影響は、施業開始直後に現れる短期影響と、数年以上続く長期影響に分けられた。

2.3.1 伐採の短期影響

全窒素（TN）と全リン（TP）および化学的酸素要求量（COD）は、伐採中と伐採直後の1996年12月から翌1997年1月の約2ヶ月間、急激に流出濃度が高まり、急激に元のレベルに戻った。その主要因は降雨・降雪による粒子態窒素（PN）と粒子態リン（PP）、および、粒子態COD（PCOD）濃度上昇で、同様の現象は懸濁物質（SS）にも認められた。

しかし、溶存無機態窒素（硝酸態窒素 $\text{NO}_3\text{-N}$ 、亜硝酸態窒素 $\text{NO}_2\text{-N}$ 、アンモニア態窒素 $\text{NH}_4\text{-N}$ ）とリン酸態リン（ $\text{PO}_4\text{-P}$ ）、溶存態COD、および、溶存態有機炭素（DOC）にはこのような濃度変化は認められなかった。その他の溶存主要無機イオンにもこの期間に急激な濃度上昇は認められなかった。

これらのことから、伐採中から伐採直後のTNとTPおよび有機物の短期的濃度上昇は、伐採作業によって林床が攪乱されたために、降雨・降雪によって表層土が流出しやすくなったためであり、1月中旬以降は積雪によって地表面が被覆されたことによって、流出が抑止されたと推察された。

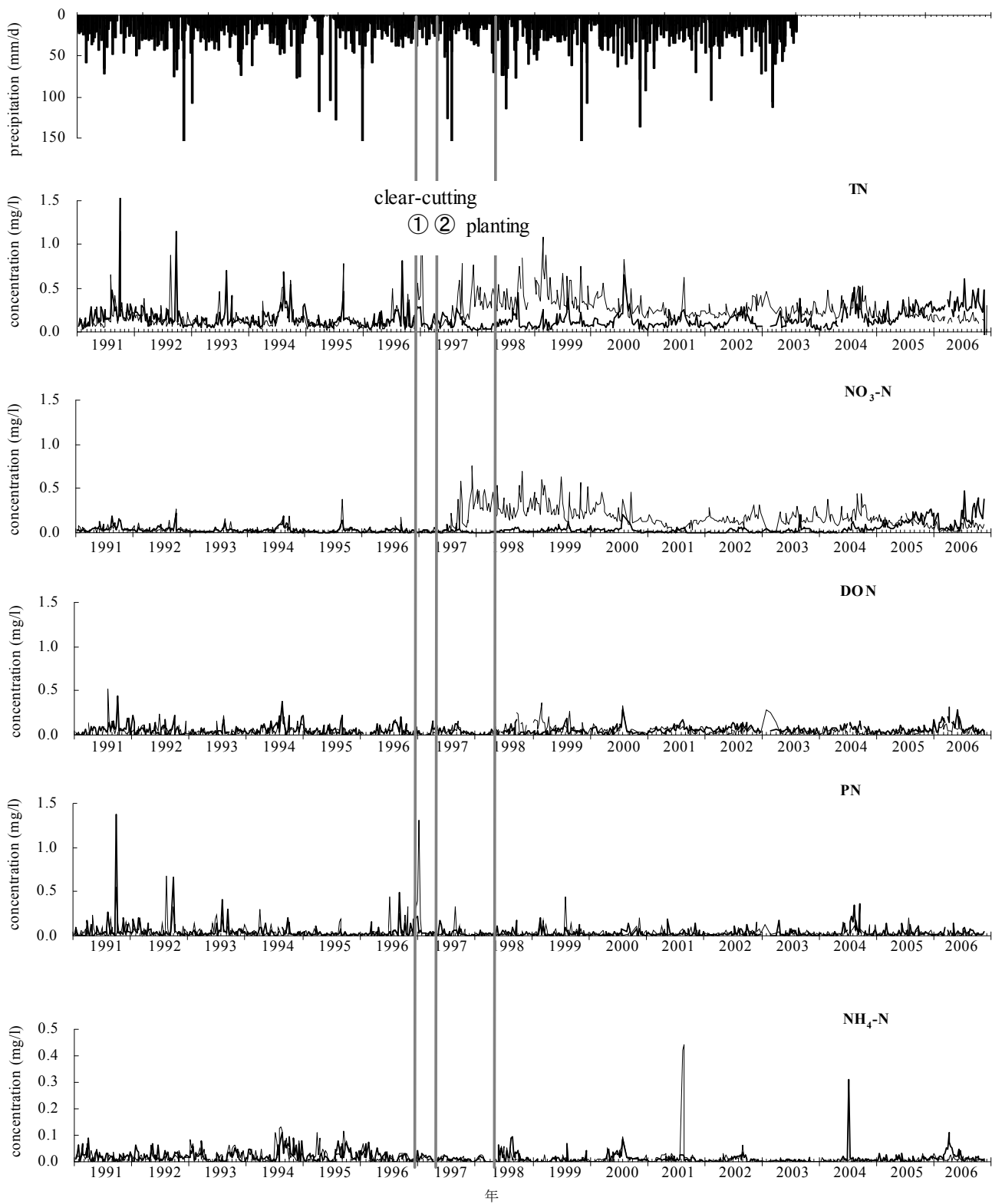


図1 窒素の濃度変動 (太線：非伐採流域、細線：伐採流域)

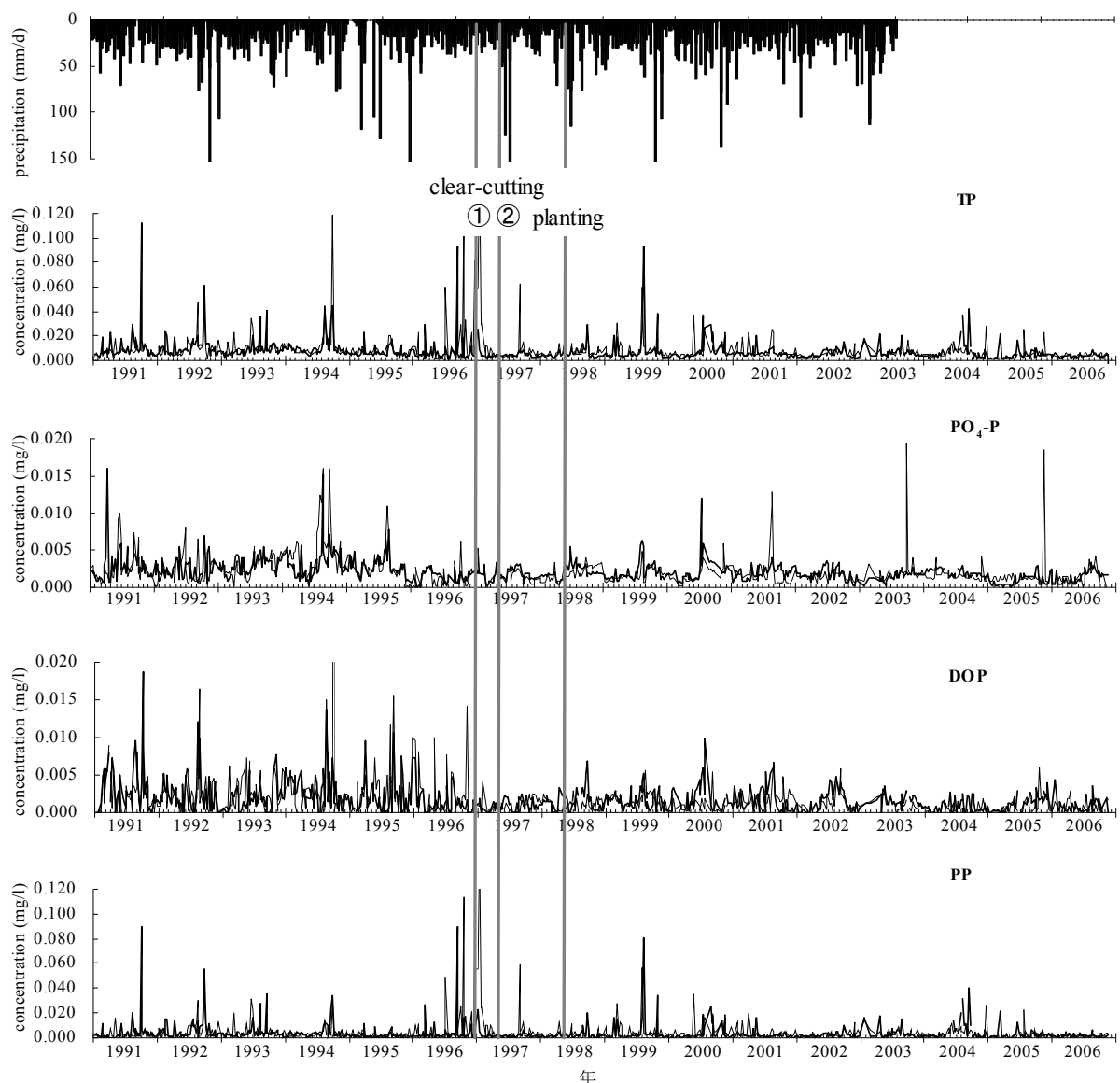


図2 リンの濃度変動 (太線：非伐採流域、細線：伐採流域)

2.3.2 伐採の長期影響

伐採・植栽の影響が長期にわたって認められたのは、窒素とナトリウムイオン (Na^+)、塩素イオン (Cl^-)、溶存ケイ酸 ($\text{SiO}_2\text{-Si}$) であった。リンや電気伝導率 (EC)、pH、カリウムイオン (K^+)、カルシウムイオン (Ca^{2+})、マグネシウムイオン (Mg^{2+}) には、伐採直後から現在までその影響は認められなかった。以下では、伐採・植栽の影響が現れた物質についてのみ取り上げた。

(1) 窒素

非伐採流域のTNは、夏期に濃度が上昇し冬期に低下する周年変動をしていた。一方、伐採流域では、伐採約10ヶ月後の1997年10月頃から、硝酸態窒素濃度が急上昇し、全

窒素濃度は3～4倍に達した。全窒素濃度上昇の主因は $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度の上昇で、伐採流域からの硝酸態窒素の高濃度流出はその後2000年まで約3年間続いた。年間の流出窒素負荷量は2年目には4.8倍、3年目には5.6倍に上った。伐採流域の硝酸態窒素濃度は4年目の2001年にやや低下し始めた。しかし、伐採以前に見られた秋季から冬季に濃度が低下し、夏に上昇する季節変動が崩れ、秋季から冬季に低下が起こらず、一年を通して夏の高水準が維持されるようになった。2001年以降、伐採流域の全窒素濃度はほぼ非伐採流域の夏季の高濃度レベルで推移した。硝酸態窒素濃度は2001年にやや低下してから2005年夏季まで高止まりしていたが、それ以降10年目の2006年7月までにかけて、

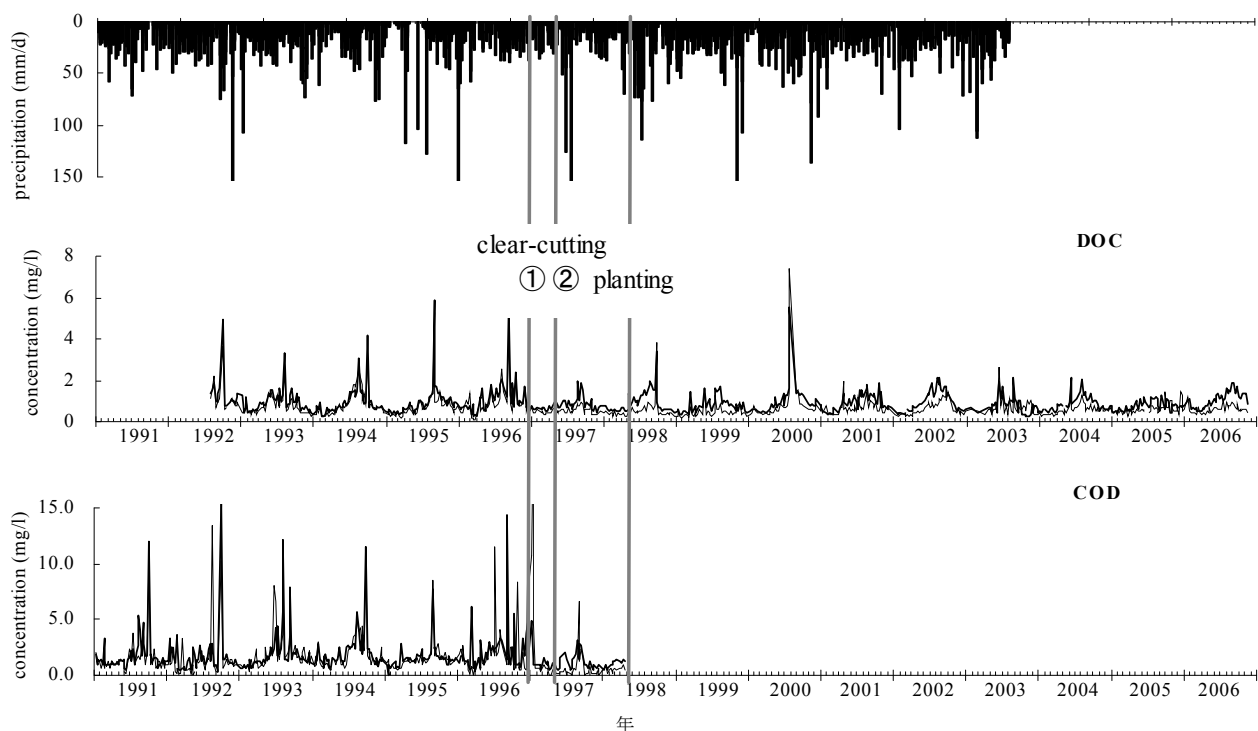


図3 DOC、CODの濃度変動（太線：非伐採流域、細線：伐採流域）

伐採前の濃度レベルにはほぼ回復した。

(2) ナトリウムイオンと塩素イオン

ナトリウムイオン (Na^+) と塩素イオン (Cl^-) の濃度は、伐採処理以前から伐採流域の方が非伐採流域よりやや低い傾向があった。伐採・植栽後も1998年までは、両流域の間に大きな変化は認められなかった。ところが、1999年から伐採流域の濃度が下がりはじめ、以降2006年まで低いレベルで推移した。伐採後に伐採・非伐採流域で長期にわたって観測されているこのナトリウムイオンと塩素イオンの濃度差は、2006年も維持されている。

(3) 硫酸イオン

硫酸イオン (SO_4^{2-}) は、濃度変動はやや大きい、両流域にほとんど濃度差はなかった。しかし、伐採・植栽後に伐採流域でやや濃度が低下し、2001年頃まで続いた。2002年以降は、両流域での差はほとんどなくなった。

(4) 溶存ケイ酸

伐採・植栽後から2003年頃までの期間は、伐採流域で、溶存ケイ酸 ($\text{SiO}_2\text{-Si}$) の濃度は少し低下した。しかし、2004年以降はほぼ回復した。

2.4 ナラ枯れが渓流水質に与える影響

クリ・コナラなどを主とする落葉広葉樹二次林のまま

保存した非伐採流域でも、2004年6月頃から渓流水の全窒素濃度、硝酸態窒素が共に上昇し始めた。2005年も同様の高水準で推移して、伐採流域との差がほとんどなくなり、2006年には伐採流域よりも高濃度になった。それまで見られた秋季から冬季に低下し、夏に上昇する季節変動が崩れ、伐採流域と同様に秋季から冬季の低下が起こらなくなり、一年を通して伐採流域より高水準が維持された。2006年には有機態窒素濃度も上昇した。この非伐採流域の全窒素濃度の上昇は、2004年には粒子態窒素 (PN) が主因であったが、2005年は硝酸態窒素が主因となり、2006年は硝酸態窒素に加えてアンモニア態窒素と有機態窒素が上昇した。さらに、2006年には溶存全有機炭素 (DOC) が増加の兆しを見せた。

これは伐採流域では見られなかった変化で、最近2、3年来、非伐採流域にナラ枯れが拡大しつつあることが原因になっている可能性が強い。ここ2、3年、琵琶湖集水域でもいわゆる「ナラ枯れ」現象が拡大している。クリ・コナラを主とする非伐採流域でも2005年には、大径木（胸高直径30cm以上）の過半数に害虫の侵入が確認され、大多数の木にナラ枯れ被害が見られるようになった。本研究で明らかになった非伐採流域における2004年以降の窒素濃度の上昇は、ナラ枯れの進行と同調してお

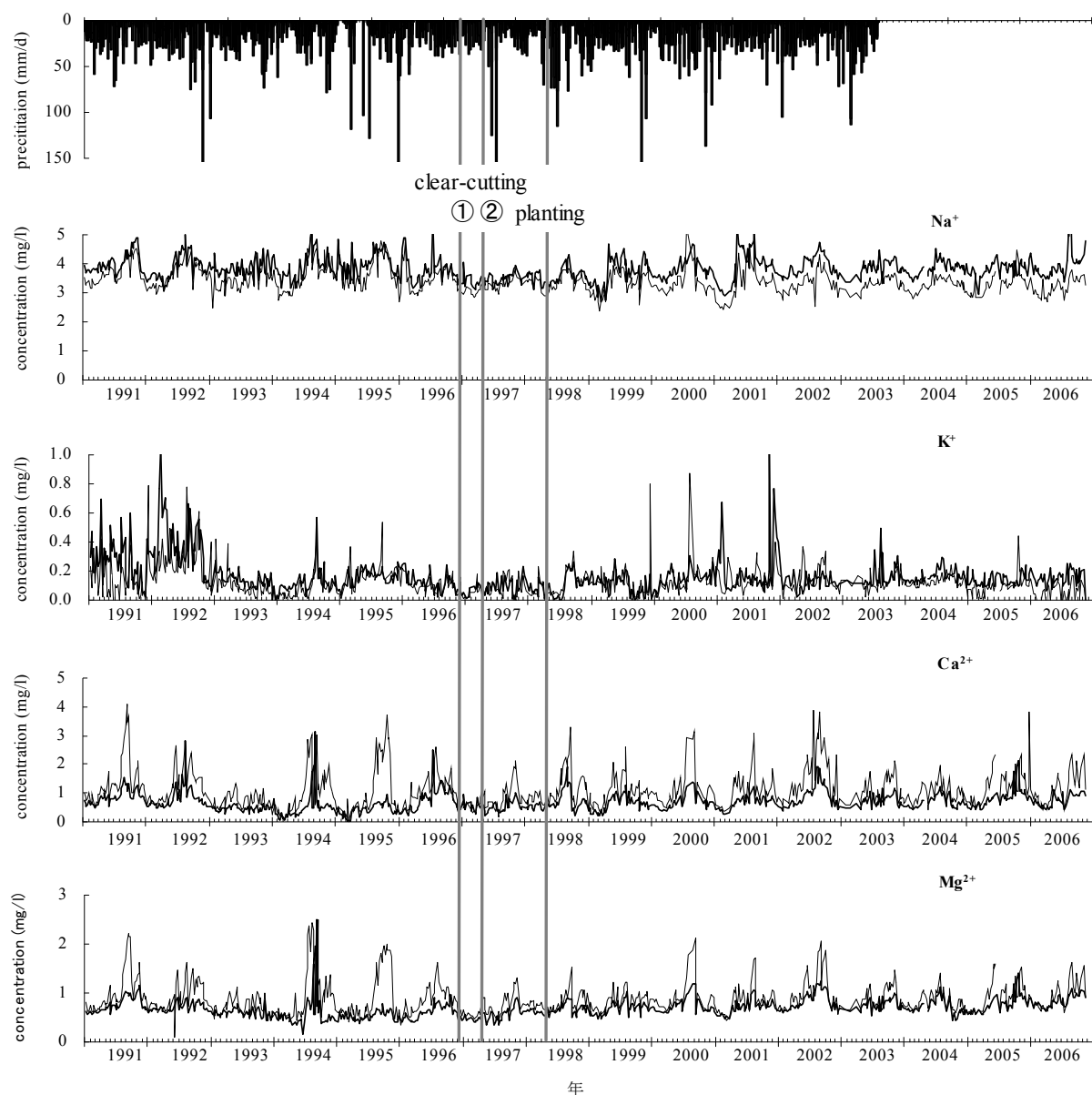


図4 主要陽イオン濃度の変動 (太線：非伐採流域、細線：伐採流域)

り、侵入・拡大しつつあるナラ枯れが原因になっている可能性が高い。ナラ枯れは琵琶湖集水域全域で拡大しており、非伐採流域の渓流水窒素濃度の上昇の原因がナラ枯れであるとする、窒素濃度の低下が停滞している琵琶湖水質に対する影響が強く懸念される。

2.5 結論

2.5.1 伐採・植栽の渓流水質への影響

朽木麻生の試験流域で対照流域法によって、落葉広葉樹二次林の伐採・スギ植栽が水質、および、汚濁負荷に与える影響を定量的に検証した。その結果、伐採・植栽施業中の表土攪乱によって短期的に粒子成分を含む汚濁物質、すなわち、SS、TN、TP、有機物質の降雨流出が増大

した。さらに、約1年後から約3年間にわたってTNの濃度が3～4倍急上昇した。原因はNO₃-Nの高濃度流出で、4年目以降も伐採以前に見られた秋季から冬季に濃度が低下し夏に上昇する季節変動が崩れ、秋季から冬季の低下が起らず、一年を通して夏の高水準が維持されるようになった。その後2005年夏季まで高濃度のまま高止まりしていたが、それ以降10年目の夏季にかけて、伐採前の濃度レベルまでほぼ回復した。

ナトリウムイオン、塩素イオン、硫酸イオン、溶存ケイ酸も伐採・植栽の影響を受けて明らかに濃度が低下した。ナトリウムイオンと塩素イオンは硝酸態窒素と同様に2006年も回復しなかった。これらの長期にわたる濃度変化が伐採による影響が継続しているためなのか、落葉

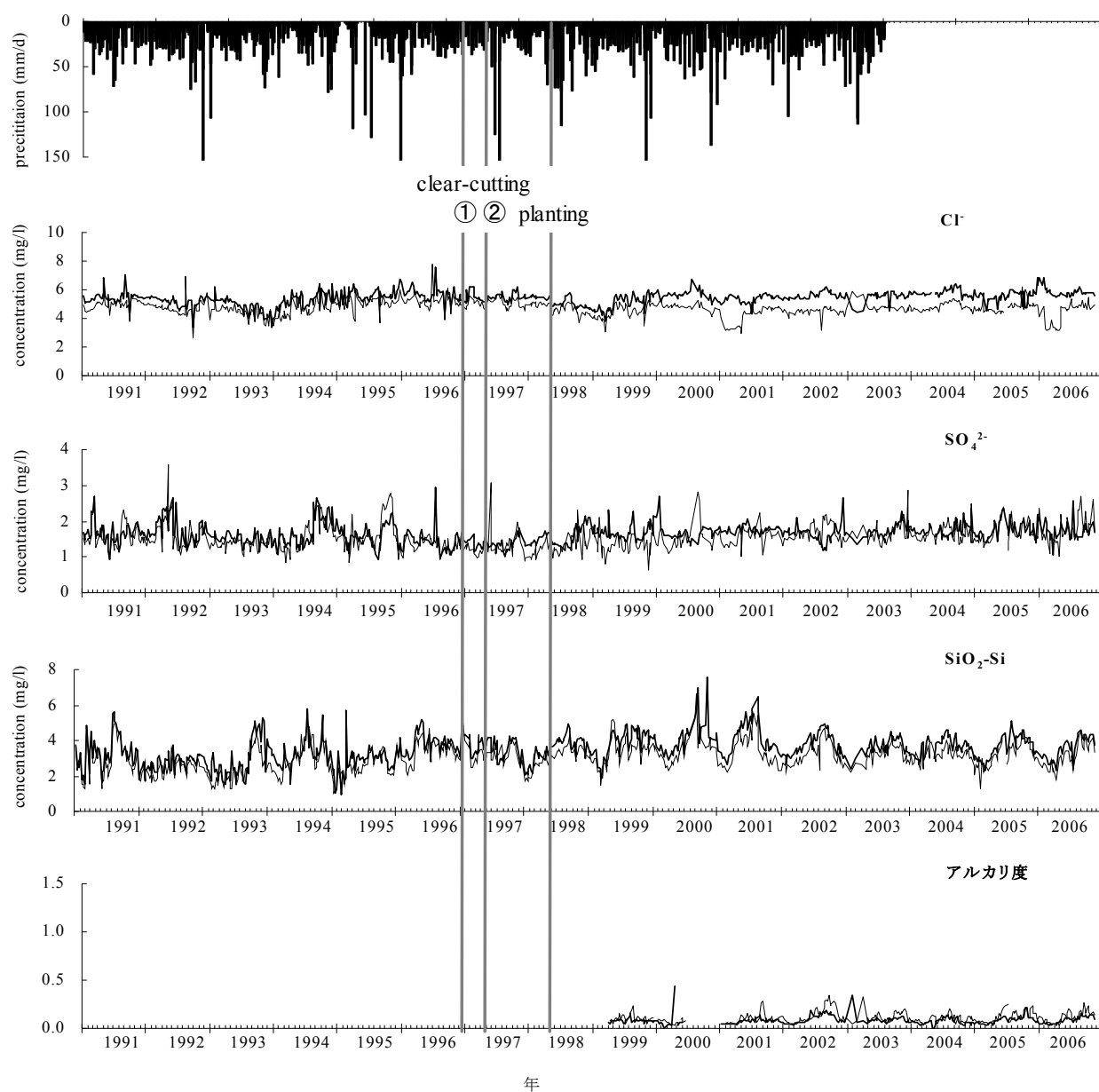


図5 主要陰イオンとアルカリ度の濃度変動（太線：非伐採流域、細線：伐採流域）

広葉樹二次林からスギ人工林への植生変化によるのかについては不明である。これを明らかにするためには、非伐採流域で伐採・植栽実験を行う等の新たな実験が必要である。

2.5.2 ナラ枯れの水質影響

落葉広葉樹二次林のまま放置した非伐採流域でも、2004年6月頃からTN濃度が上昇し始め、2005年には伐採流域との差がほとんどなくなり、2006年には伐採流域を上回った。同時に2005～2006年には溶存全有機炭素（DOC）が増加の兆しを見せた。

この非伐採流域のTN濃度の上昇は、2、3年来、非伐採流域にナラ枯れが拡大しつつあることが原因になっている可能性が強い。ナラ枯れは、現在、琵琶湖集水

域全域で拡大しており、非伐採流域の渓流水窒素濃度の上昇の原因がナラ枯れであるとする、琵琶湖水質に対して、今後重大な影響を与えることが心配される。

ナラ枯れが森林渓流水質に与える影響の兆候が発見されたのは、本研究が日本で最初である。そこで、本実験流域の量水堰を再整備して精度を確保し、ナラ枯れの森林水質影響を定量的に機構解明し、琵琶湖の将来水質に与える影響を予測する必要がある。研究成果はナラ枯れが問題になっている本州の閉鎖性水域の保全に先進的に貢献できる。

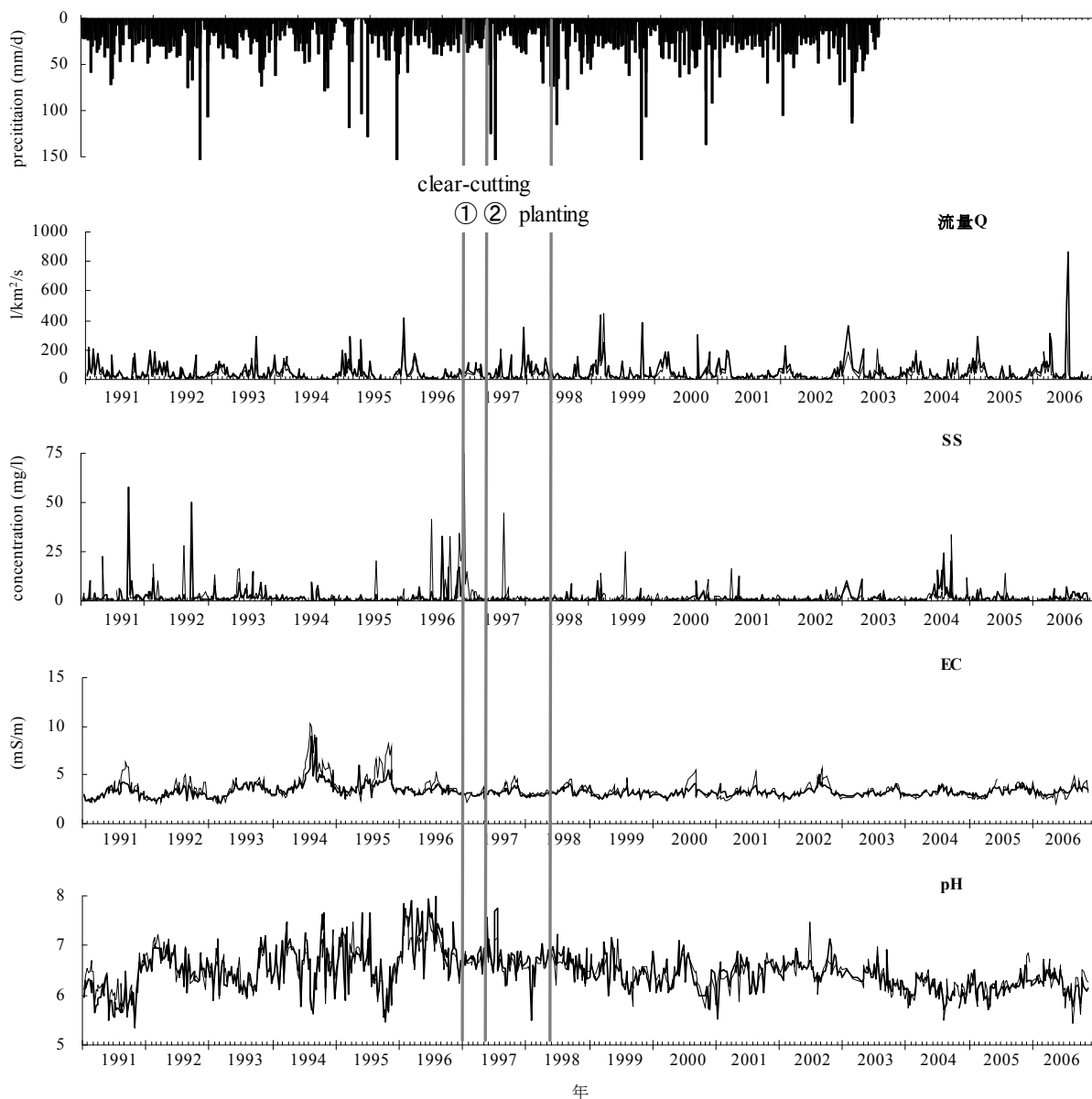


図6 電気伝導率（EC）、pH、懸濁物質（SS）、流量の変動（太線：非伐採流域、細線：伐採流域）

3. 森林動態のモニタリング

3.1 はじめに

琵琶湖集水域の森林植生は、そのほとんどが人為影響の及んだ二次林か造林地である。このうち、かつての里山林を中心とする落葉広葉樹二次林は、滋賀県内でもかなりの面積を占めており、人の定常的な利用がなくなった今日において、その森林動態を明らかにしていくことは重要な課題となっている。旧琵琶湖研究所のプロジェクト研究「森林伐採が環境に及ぼす影響」以来、滋賀県高島市朽木麻生の落葉広葉樹二次林に設置された試験流域において、流域内の森林植生の動態を1996年から毎年観測を続けてきた。平成18年度

もこれを継続し、この1年間の変化を明らかにするとともに、長期的な動態解明のためのデータとした。

3.2 毎木調査

調査地は先述の伐採・非伐採流域である。各流域は、測量データにもとづき20m×20mの区画に区切られている。非伐採流域の毎木調査は1996年から毎年継続して行われ、植生動態のモニタリングを続けている。

毎木調査では非伐採流域内の胸高直径4.5cm以上のすべての木本植物について直径測定を行った。

3.3 成長量計算

前項での毎木調査の結果に基づいて現存量を推定し、年ごとの推定値を比較して成長量を求めた。現存量の推定には、本試験流域におけるバイオマス調査によって得られた下記の推定式を用いた（島田，1997）。

（樹高）

アカマツ： $1/H=1/1.47D+1/23.5$ [m, cm]

アセビ： $1/H=1/1.94D+1/5.64$

斜面上部： $1/H=1/2.25D+1/14.4$

斜面下部： $1/H=1/2.02D+1/27.2$

（現存量）

アカマツ： $W_T = 0.0112 (D_{0.1}^2 H)^{1.07}$

アカマツを除く全樹種： $W_T=0.0304 (D_{0.1}^2 H)^{0.979}$

ただし、 $D_{0.1}=1.45D^{0.862}$ [cm, cm]

3.3.1 樹種組成

2006年における調査区の樹種組成を図7に示す。出現種数は59樹種であった。コナラは51.5t/ha（35%）、アカマツ35.5t/ha（24%）、リョウブ11.6t/ha（8%）で、コナラ、アカマツの優占度が高かった。リョウブ、タカノツメなどの先駆的な樹種の存在も多く見られた。

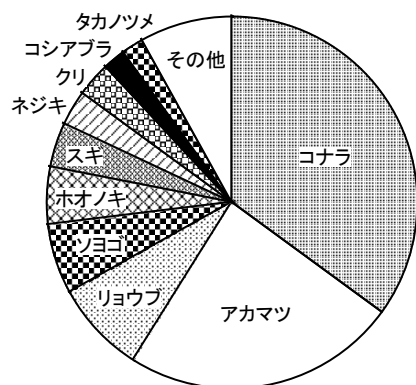


図7 非伐採流域の樹種組成（現存量比）

3.3.2 現存量・個体数の経年変化

調査区全体における現存量の10年間の動態（図8）は、1997年の127t/haから2006年の149t/haまで増大した。これに対し、個体数（幹数）は2,887本/haから2,623本/haへと減少した。この10年間の変化では、現存量は3.2t/haの増加、個体数は11本の増加となった。

図9には主要樹種の現存量の経年変化について、各樹種の1997年の現存量を1として示す。これより、コナラ、ホオノキなどは全体の現存量の経年変化同様に増大傾向が認められた。一方、ウリカエデやクリは減少傾向が見られた。

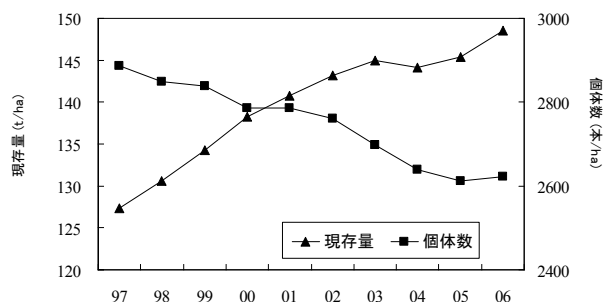


図8 非伐採流域における現存量と個体数の経年変化

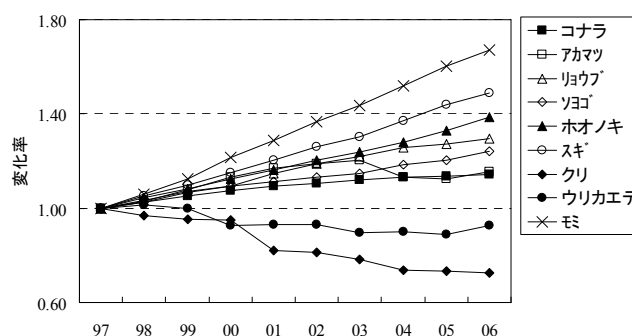


図9 主要樹種の現存量の経年変化。
（1997年の現存量を1とした比を示す。）

3.4 結論

これまでに引き続き、平成18年度も非伐採流域の毎木調査を実施し、データを採取した。全体の現存量の増大は継続していたが、個体数はこれまでの傾向と異なり前年より微増となった。

調査地付近ではナラ枯れの被害がこの2、3年で広がりがつつある。調査流域においてもカンナガキクイムシの食痕がコナラで数多く認められるとともに、一部でその影響と思われる衰退木も見られるようになった。コナラは調査地では最優占樹種であり、その衰退は植生構造に重大な影響をもたらすことになる。それは、さらには森林の物質動態、環境機能にも波及していくことだろう。今後ますますこの林分の植生動態に注目していく必要がある。

引用文献

島田佳津比古(1997)：森林伐採に伴う森林動態の把握．平成8年度琵琶湖研究所委託研究報告書．滋賀県琵琶湖研究所．