

山地森林流域での全窒素流出過程に及ぼす植生分布特性の影響評価

篠田成郎*・衣目 純**・福本圭子・日置琢三・野田幸嗣***・都築克紀****・
間野耕司*****・山下幸伸*****

*岐阜大学流域環境研究センター, **株式会社 CRC 総合研究所,

岐阜大学大学院工学研究科, *日本原子力研究所,

*****株式会社パスコ, *****扶桑建設工業株式会社

要 旨

木曽川水系飛騨川最上流青屋川流域(45.6km²)を対象として、広い森林域での植生特性と窒素収支との関係が、5ヶ年間に及ぶ現地観測と植生分布を基本としたGIS解析から検討されている。その結果、森林内での窒素貯留能力は植生のバイオマス(樹木の材積)と活性度(樹木の成長率)の2つに規定されることが明らかにされた。また、樹種による違いは開葉・展葉・落葉などの生育サイクルを特徴づける季節変化として表れるが、森林内での窒素流出速度が極めて遅いことから、年間を通した顕著な相違としては現出していないことも示唆された。こうした観測および解析結果から、森林での窒素貯留に限定すれば、伐採と植樹が繰り返されるような、人間の手による積極的な森林管理が行われている森林であるほど、窒素貯留には有効となることが主張されている。

キーワード：窒素収支, GIS, 森林植生, 植生バイオマス, 植生活性度, 森林管理

1. 緒 言

森林は流域環境システムを構成する一つの要素に過ぎないが、流域全体に占める面積割合は都市に比べて一般に大きく、そこでの環境動態が流域全体に及ぼす波及効果を見逃することはできない。二酸化炭素の森林固定機能はその代表例であろう。また、森林は年間1~150kg/haもの窒素を吸収し、森林土壌中にはその100倍以上もの窒素が蓄積されているとの報告(Granhall, 1981; 堤, 1987)もあり、大気汚染・酸性雨、温暖化、水域の富栄養化などに寄与する窒素酸化物のかなりの量が森林域内に固定されていると推測できる。このため、都市域で発生した窒素のシンクとしての森林機能を定量的に把握することは、地球環境はもとより、流域環境を保全してい

く上で必須の課題と言える。とくに、我が国の森林域は人間の手によって管理・経営されている場合が多く、林業施策の実施内容いかんによって森林の環境保全機能が大きく変化する可能性がある。このため、どのような森林形態が窒素固定機能などの環境保全機能を最も有効に発揮し、大気環境の変化に対してどの程度の耐性を持ち得るかという実際的问题への早急な回答が、流域環境システム構築において必要とされている。

雨水や大気降水物によって森林内に流入する窒素量は森林環境要因とは独立であると扱えるため、森林による窒素固定機能は森林内からの流出窒素量によって評価できる。また、窒素固定機能は森林域内における植生分布状況、土壌分布状況、地形要因などの様々な土地被覆分布特性に依存すると予想され

る。この極端な例が、Likensら(1970)や石黒ら(1982)による調査事例であろう。彼らの研究では、森林伐採によって溪流水の硝酸態窒素濃度が激増することが報告されており、森林の存在により窒素成分が固定されることが証明されている。これらのことより、森林域内溪流水の全窒素濃度と土地被覆分布特性との相互関係を検討することにより、窒素固定機能を発揮しやすい森林形態を明らかにすることができると考えられる。

森林内溪流水質の形成過程に関する研究は盛んに行われており、降雨流出過程中的の水質変化に関する知見が集積されている。例えば、田村ら(1998)は、森林内での水循環モデルと物質変化過程とを結合した数理モデルを構築し、森林流域全体での物質収支を定量的に把握することを試みている。この扱いは、従来、物質変化の素過程しか注目されてこなかった森林内物質収支を水循環も含めた総合的なシステムとして評価しようとしたものであり、硝化過程の取り入れなど、今後の研究において注目されるべき多くの点を有している。こうした森林土壌学や土壌微生物学の観点から森林土壌および上部植生が窒素固定に及ぼす影響を検討した研究は、ほとんどが単一集水域を対象とした微視的な立場で行われており(例えば、Mitchell et al., 1977; Vitousek, 1997; Ohri and Mitchell, 1997; Magill et al., 1997; Kim, 1998)、複数の集水域に対して森林内土地被覆分布特性と水質との関係を検討した例は意外に少ない。福島ら(1995)は、樹種、土壌比率などが異なる複数の小集水域を対象とした研究を行っており、土地被覆状況の違いが種々な溪流水質に与える影響を検討した結果、人工林と天然林において降雨時の溪流水中硝酸態窒素濃度に相違が生じることなどを明らかにしている。また、浜端(1989)は、植生図のメッシュデータ化に基づいた溪流水質と植生分布との関係の検討を試みている。最近、Fanら(1998)は、GIS解析に基づき北米大陸での森林内窒素収支を検討しているが、あまりにも広範囲な森林を対象としているために、窒素収支そのものを把握することができず、森林域での窒素固定量と植生分布との対応関係を把握するには至っていない。

一方、著者らは、植生分布や土壌分布などの森林構成要素の空間的相違が森林流域内での水質形成過程、とくに窒素流出に及ぼす影響を定量的に評価するために、これまでの研究ではほとんど対象とされてこなかったほど広い森林流域(約45km²)での水文・水質・気象に関する総合的な現地観測を1996年5月より継続的に実施してきている(都築ら, 1998; Shinoda et al., 1999; 篠田ら, 2000; Shinoda et al., 2000)。本

研究では、こうした現地観測結果に基づき、森林内の樹木が窒素流出に及ぼす影響をGIS解析および統計解析に基づき検討し、窒素流出を抑制する上で最適な森林管理方法を提案することを目的としている。とくに、営林署管理の森林管理簿という一般的なデータソースから森林流域の詳細な土地被覆分布を植生分布を主として特定化するとともに、こうした分布特性を代表することのできる植生特性量を抽出し、森林内窒素収支における支配的植生要因を明らかにする。また、現地観測により得られる雨水からの供給全窒素量や溪流からの流出全窒素量のデータに基づき、森林内に蓄積される全窒素量を推定し、植生特性量との関係を検討することにより、森林域における窒素固定機能に及ぼす植生分布特性の影響評価を行う。さらに、対象森林域内の小集水域に限定した詳細な現地観測から、窒素流出の時間スケールと季節変化特性に関しても検討を加える。

2. 全窒素流出過程の概要把握

前述のような、著者らの一連の現地観測(都築ら, 1998; Shinoda et al., 1999; 篠田ら, 2000; Shinoda et al., 2000)から、降雨中全窒素濃度が1~4mg/Lであるのに対し、溪流水中全窒素濃度はその1/10の10⁻¹mg/Lのオーダーとなることが明らかになっている。降雨量と溪流による流出流量はほぼ一致しているため、降雨により供給される全窒素量の約90%が森林土壌内に蓄積されることになる。雨水から溪流水に至る流出過程において窒素量が減じられるのは、主として土壌内微生物による生化学的分解作用と森林土壌そのものの物理的なフィルター作用によるものである(河田, 1989; 服部ら, 1996)ため、土壌内での雨水貯留時間、すなわち降雨の流出遅れ時間が長くなければこうした森林土壌内での大量の窒素蓄積は生じないと考えられる。そこで、広い森林域での窒素流出現象と植生分布との関係を検討するに先立ち、局所的な森林集水域を対象とした現地観測を実施し、降雨とその土壌浸透および溪流水からの窒素流出との関係をそれらの時間応答に着目して調べることで、当該森林流域での全窒素流出過程について考察してみる。

2.1 現地観測の期間と方法

ここで観測対象とする局所的な集水域は、本研究での観測対象森林流域(岐阜県朝日村内の青屋国有林; 木曾川水系飛騨川最上流青屋川流域; 45.6km²)内に存在する0.22km²の森林である。この小集水域内の最大および最小標高はそれぞれ1432.8mおよび1064.1m、平均斜面勾配が0.494の比較的急峻な地形

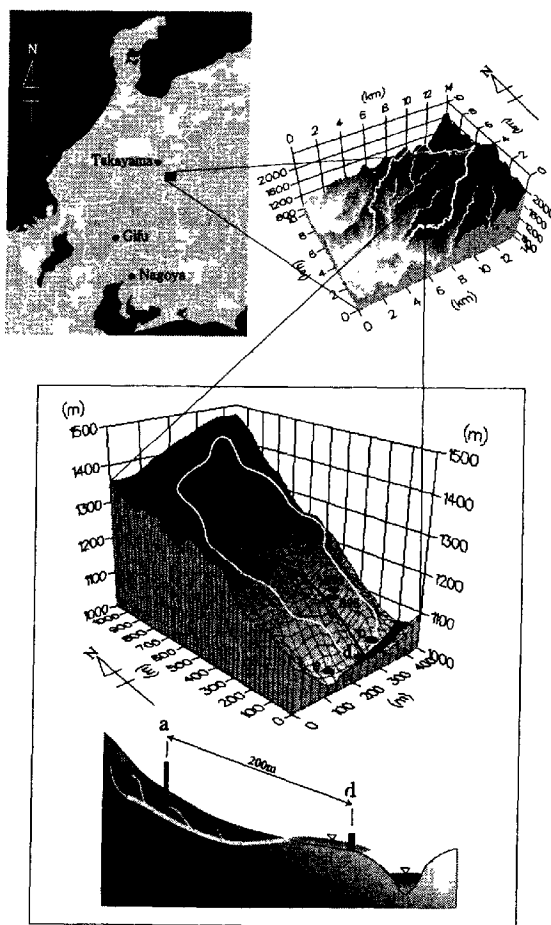


Fig. 1 Location of the experimental watershed and observation points in the forest

となっている。Fig. 1に、この小集水域の位置および測点配置を示す。この小集水域での現地観測は、1997年9月14日～10月10日、1998年7月27日～11月23日および1999年7月17日～12月18日の3回にわたり実施された。1997年は予備観測として行われたものであるため、以下では1998年および1999年の2ヶ年に関する長期連続観測を中心に議論していくことにする。

この観測では、林内外での雨量計測・雨水採取(測点cとe)、温度・湿度の計測(測点a98とe)および日射量の計測(測点a99とe)、林内での土壌水分計測(測点a98とa99)、集水点での水位計測・渓流水自動採取(測点d)を実施した。なお、測点a98とa99はそれぞれ1998年と1999年における観測ポイントである。また、測点dには、集水域内の渓流が1箇所に集まる場所に設けられているコンクリート製水路(幅58cm、深さ40cm)内に直角三角堰を設置しており、水位計およびポイントゲージによる越流水深の連続

測定から流量を算出できるようにした。これと同時に、測点dには、自動採水装置が設置され、1998年の観測では1日4回のコンポジット採水を1本の試料水として、2000年の観測では1日2回のコンポジット採水を1本の試料水として、自動サンプリングが行われており、1本の試料水を採水実施日の平均的渓流水として解析することにした。土壌水分の計測では、ログ電子社製SS-203Aの土壌水分計(ボラスカップによる差圧型)を使用し、測点a98では同一地点に深さ90cmと50cmの2本を、測点a99では深さ90cmに設置した(実際には、1998年の観測では鉛直深さ方向3箇所に、1999年の観測では落水線上3箇所に設置したが、計測器故障のため、データが利用できなくなっている)。

2.2 降雨-土壌水分-流量の時間応答関係

(1) 水文諸量の時間変化

このようにして得られた降雨量 R 、土壌水分 pF 値および流量 Q に関する観測結果をFig. 2に示す。

土壌水分 pF 値は降雨の発生とともに減少し、降雨終了後には、 pF 値が漸増しながら降雨発生前の値に復元している。ただし、降雨時の pF 値の減少量は、必ずしも降雨強度に依存しておらず、むしろ降雨イベント内での積算降雨量による影響の方が大きいように見える。これは、雨水が鉛直方向に浸透するだけでなく、側方にも浸透するため、降雨継続時間が長くなると、周囲からの集水効果により、 pF 値の減少幅が大きくなると考えられる。すなわち、このような場合、土壌間隙中に存在する物質が水分に接触する時間が長くなることにつながると予想される。

一方、土壌水分 pF 値と流量 Q とはよく対応している。ただし、集水域内各所での土壌水分状態の集積結果が集水点での流量 Q に現れるはずなので、本来ならば、 pF 値の時間変化に比べて、流量の時間変化の方がより緩慢な変動を示すと考えられる。しかし、Fig. ??において、両者の変化にはさほど大きな相違は認められない。このことから、雨水の土壌内浸透に伴って、土壌中の間隙水圧が高まり、土壌内に飽和・不飽和状態で拘束されていた水分が押し出されたとも考えられる。このため、 pF 値の時間変化と流量の時間変化との対応が比較的早く、しかも時間遅れ成分がほぼ一定の状態(集水域内各所からの集積ではなく、間隙水圧の伝播として)流出が発生しているのかもしれない。この点を明確にするために、相互相関解析により、降雨量 R 、土壌水分 pF 値および流量 Q に関する相互の時間遅れ(Lag time) τ について検討してみる。

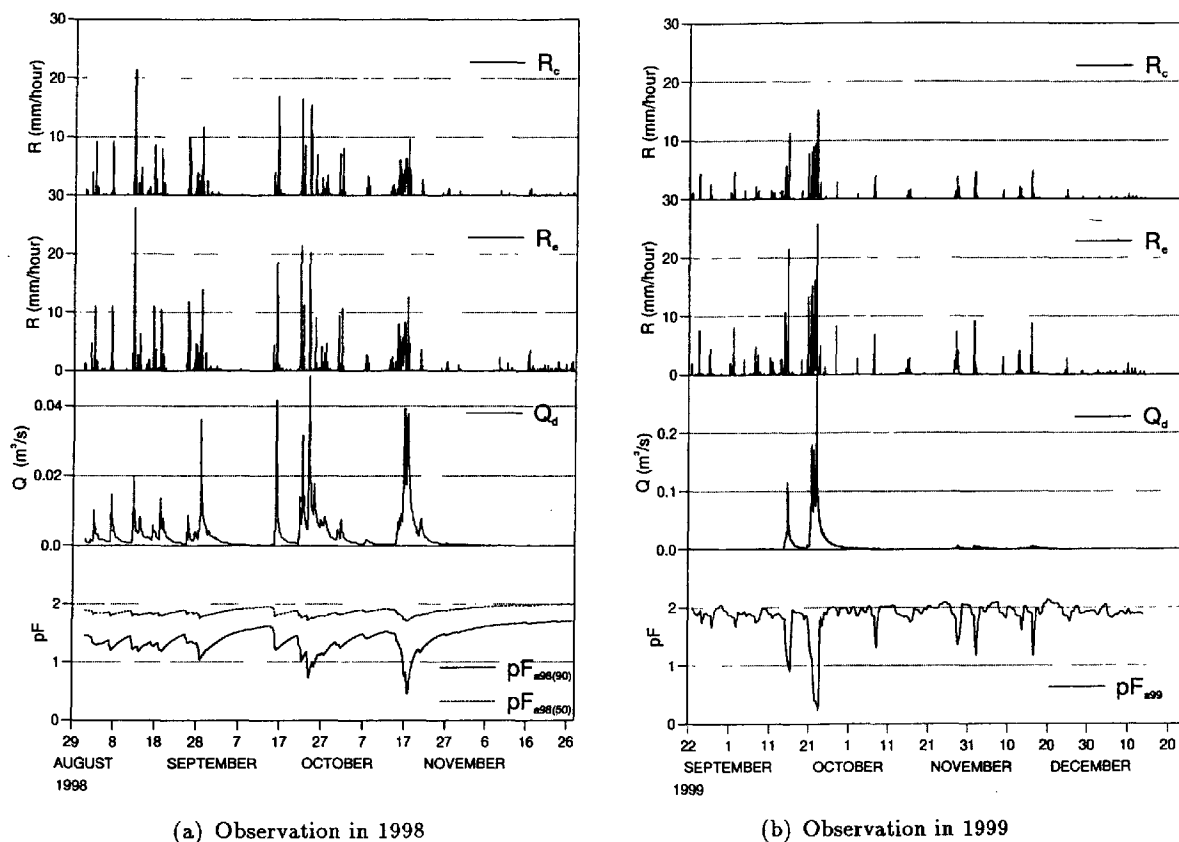


Fig. 2 Observation records of the precipitation R , the soil moisture pF , and the discharge Q

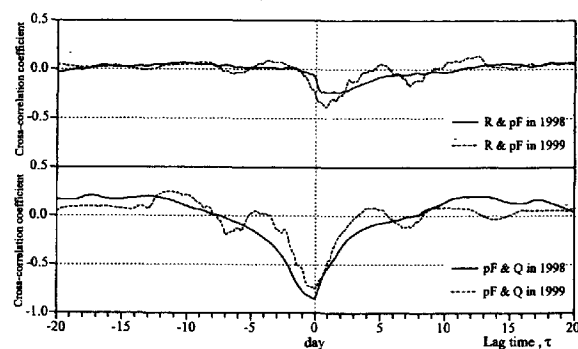


Fig. 3 Cross-correlation among the precipitation R , the soil moisture pF , and the discharge Q

(2) 水文諸量間の相互相関解析

Fig. 3 は、林内の降水量 R_I と土壌水分 pF 値とのクロスコログラム (上段) および土壌水分 pF 値と流量 Q とのクロスコログラム (下段) を示したものである。

1998 年の観測では、降雨発生後 0.5~2.5 日のあたりで pF 値が応答することがわかる。また、1999 年の観測では、降雨発生後約 1 日程の時間遅れを示し

ている。設置地点の透水係数の違いにより時間遅れに差があるものの、土壌水分計の設置深が 90cm であることを考えると、この時間遅れはかなり大きいと言わざるを得ない。これは、上述の考察のように、土壌表面付近では、鉛直方向の浸透流に加え、側方流の影響も大きく、土壌水分計設置箇所周辺各所からの雨水の集積浸透結果の現れが、この時間遅れとなって出現していると理解できる。このため、表層

付近の土壌では、水分の移動、すなわち、土壌水の浸透現象によって水分状態が変化していることが確認された。

一方、こうした降雨量 R に対する土壌水分の pF 値の応答関係に比べ、土壌水分 pF に対する流量 Q の時間応答は極めて早く、数時間でピークを迎えている。また、相互相関係数そのものの絶対値も大きく、Fig. ??で考察したように、 pF 値と流量とは非常に良好な対応関係を示していると言えよう。この現象は、土壌中を水分が移流することでは説明できず、間隙水圧の伝播に伴う土壌内間隙水分の押し出しと解釈できる。

(3) 表層土壌と深層土壌での水分変化の違い

測点 a98 および a99 それぞれについて、土壌水分計の設置位置を集水点とする集水経路の中で最も長い距離が約 150m および約 130m であるのに対し、土壌水分計設置位置から集水点(流量計測箇所 d)までの流下経路長は約 200m および約 220m である(このうち、河道として表面を流下する距離は約 100m)。土中での浸透距離と比較しても、前者が最長で約 150m および約 130m であるのに対して、後者は最短で約 100m および約 120m と推定される。ところが、この間を浸透するのに要する時間が、前者の場合数日間で、後者の場合数時間となっており、降雨の時間変化に対する土壌水分の応答に比べ、土壌水分の時間変化に対する流量変化の応答が極めて短時間で行われているということになる。この原因としては、前述のように、土壌内の水分変化のメカニズムが違ふことが考えられる。つまり、表層土壌付近での水分変化が雨水そのものの土壌内移動(移流)によって引き起こされているのに対し、深層土壌での水分変化は、水分そのものが移動するのではなく、鉛直上方での土壌内水圧の上昇が下方での土壌内水圧を上昇させ、これが流下方向に伝播することにより水分変化が発生していると解釈せざるを得ない。すなわち、前述の‘間隙水圧の伝播に伴う押し出し流出’と理解される。このような土壌内の水分変化の相違は、渓流水質の形成にも大きく影響を与えていると考えられる。以下では、こうした点を踏まえて、渓流水中全窒素濃度およびフラックスの時間変化に及ぼす土壌内水分状態の影響について検討してみることにする。

2.3 水文データと渓流水中全窒素濃度との時間応答関係

測点 d で自動採取された渓流水の水質データを Fig. 4 に示す。全窒素濃度 C_w 、電気伝導度 EC および水素イオン濃度 pH は実験室内での分析結果によ

るものであり、全窒素負荷量 L_w は全窒素濃度 C_w と Fig. ??に示した流量 Q から求められる1日当たりの流出全窒素質量である。

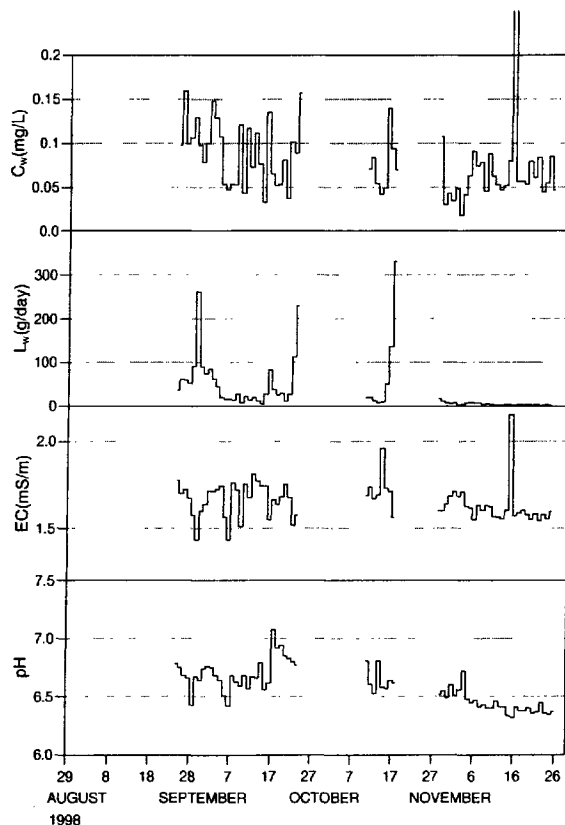
Fig. 5 は、1999 年の観測結果について、降雨量 R および土壌水分 pF に対する渓流水中全窒素濃度 C_w の時間応答関係をクロスコログラムとして示したものである。なお、1998 年については、Fig. ??に示したように、欠測期間が存在したため、クロスコログラムとして相関係数を計算するに十分なデータ数が得られていない。このため、lag time ごとの相関図を用いて検討したが、膨大な図面となることに加え、傾向としては1999 年と全く同様であったので、その掲載を割愛する。

Fig. ??において $\tau = -2 \sim 0$ 日付近で高いピークが見られ、1998 年の結果についても同様な結果が得られている。これは、雨の降り始めでは、全窒素濃度の高い初期降雨の流入や、土壌表面の洗い流しによる影響があるためと思われる。次にピークを示しているのが $\tau = 4 \sim 7$ 日であり、1998 年の観測でも同様な τ について高い相関が認められている。これは、雨水そのものが土壌中に浸透し渓流水中に流出することにより、濃度変化が起きていると予測できる。また、降水量 R ではさほど明瞭には表れていないが、土壌水分 pF では、 $\tau = 15$ 日付近で顕著なピークが表れており、1998 年でも $\tau = 14 \sim 16$ 日あたりで高い相関が認められている。短絡的に判断することはできないが、これは土壌中の水分が移動して集水点から流出するのに15日程度要しているとも解釈することができる。Fig. ??において、土壌水分計設置箇所での雨水浸透応答に数日間かかることを考えると、この15日間という時間は、集水域内各所からの物質移流所要時間としては、あながちでたらめな値ではないようにも思える。この所要時間を基に当該森林域での土中水分・物質移動速度を試算すると、 $1.7 \times 10^{-2} \text{cm/s}$ 程度となり、森林土壌の中でも比較的大きめの透水係数(河田, 1989; 久馬ら, 1993)であることが確認できる。このことから、単に水分の時間応答だけで流出現象を捉えようとするのは極めて危険であることが示唆される。

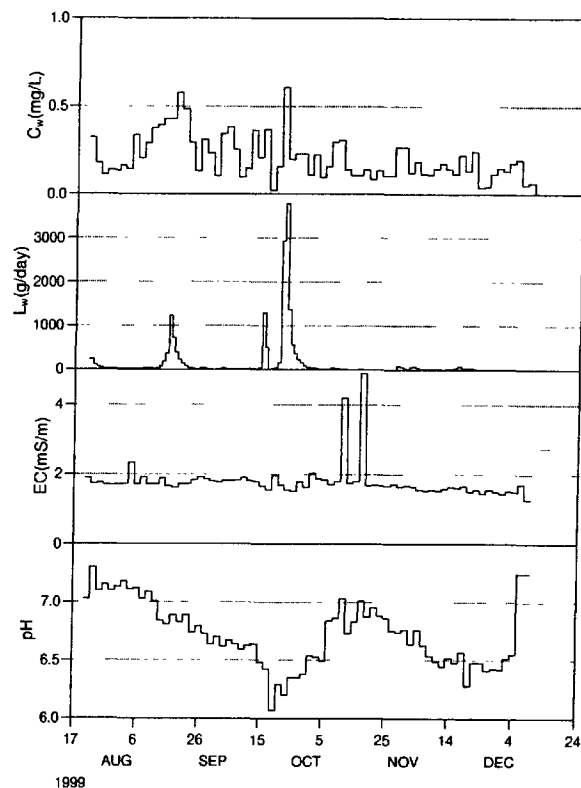
3. 広域森林内窒素収支に関する現地観測

3.1 現地観測の期間と方法

上述の小集水域を内包する広い森林流域を対象として、そこでの窒素収支に及ぼす森林植生の影響を検討するための現地観測を実施した。現地観測は5ヶ年にわたり継続実施されてきており、その概要は次の通りである。



(a) Observation in 1998



(b) Observation in 1999

Fig. 4 Observation records of the TN concentration C_W , the TN load L_W , the electric conductivity EC, and the concentration of hydrogen ions pH in the mountain stream water

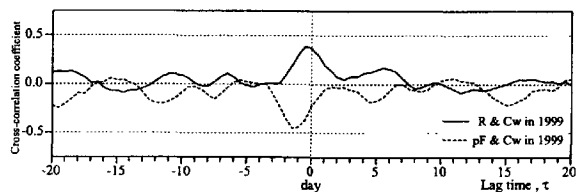


Fig. 5 Cross-correlationship among the precipitation R , the soil moisture pF , and the TN concentration C_W in the mountain stream water

1996年：5月11日～10月13日の期間に2～3週間に1回の頻度で、13地点において定期観測。また、9月4日～10日の短期間に、18地点において集中観測。

1997年：5月31日～8月21日の期間に2～3週間に1回の頻度で、33地点において定期観測。また、9月11日～10月10日の短期間に、39地点において集中観測。さらに、9月11日～11月27日の期間にわたり、5地点において自動計測装置を用いた連続観測。

1998年：7月31日～11月28日の期間に、26地点において自動計測装置などを用いた連続観測。

1999年：7月20日～12月23日の期間に、22地点において自動計測装置などを用いた連続観測。

2000年：4月6日～8月14日の期間に、7地点において自動計測装置などを用いた連続観測。

これらの観測で設置した合計45地点の観測ポイントをFig. 6に示す。上述のようにこの流域は岐阜県朝日村内の青屋国有林に位置し、一般の立ち入りが禁止されているため、近隣での人為的な影響がほとんど存在しない。この流域内の標高および平均斜面

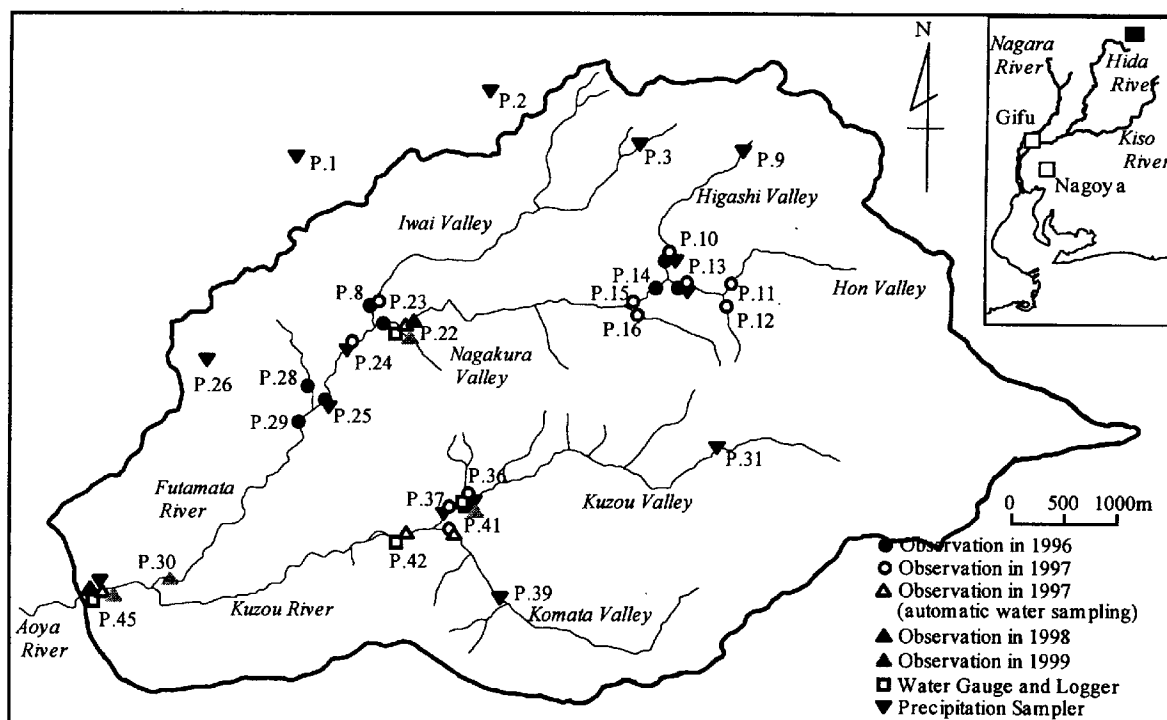


Fig. 6 Experimental area and observation points for the discharge and the water quality at the mountain stream

勾配はそれぞれ800.7m～2117.1m および0.53であり、亜高山性気候に区分されるため、積雪期は11月初旬～6月初旬の間と長く、木々が芽吹く開葉の季節は6月中旬～7月中旬、葉を生い茂らせる展葉の季節は7月中旬～8月下旬、落葉期は9月下旬～10月下旬となっている。また、後述する森林管理簿の解析より、流域内は、74.7%の天然林と21.6%の人工林によって占められ、ヒノキ(20.3%)などの常緑針葉樹、カマツ(20.3%)などの落葉針葉樹、カンバやミズナラなどの落葉広葉樹(35.7%)といった多様な樹種構成となっているほか、適潤性褐色森林土壌(BD; 40.2%)、粒状・堅葉状構造型乾性褐色森林土壌(BB; 24.8%)、湿性腐食型弱ボツル化土壌(PW(h)₃; 15.8%)などの土壌構成となっていることがわかっている。

観測では、自記式転倒マス雨量計および自作の雨水採取装置を用いた降雨観測、手採水または自動採水装置による溪流水の採取、溪流水の水温・EC・pHの現場測定、自記式圧力型水位計または現場計測による溪流の水位観測、プロベラ流速計または電磁流速計による溪流の流速測定、溪流の河床横断面形状の定期的測定、自記式気温・湿度計、地温計、日射計による連続測定が実施されている。また、降水サンプルおよび溪流水サンプルについては、実験室に冷暗所保存状態で持ち帰り、全窒素・全リン同時

分解法(環境省告示第140号の修正法; 全窒素検出限界濃度0.003mg/L)により全窒素(TN)濃度を測定している。

3.2 観測結果

Fig. 7に、長期間の連続観測が実施された4ヶ年分の主な測点での降雨量 R および降水中全窒素濃度 C_R に関する観測結果を示す。図中の階段状の折れ線が雨水採取結果によるもので、棒グラフは雨量計による結果を表す。同様に、Fig. 8およびFig. 9は、それぞれ溪流水の流量 Q および溪流水中全窒素濃度 C_W に関する観測結果を表す。流量 Q は、水位の連続観測と定期的な河床横断面形状および流量計測から水位-流量曲線を作成して得られている。また、溪流水中全窒素濃度 C_W は、主として自動採水装置により採取された溪流水サンプルの結果である。

4. 土地被覆状況の評価

4.1 森林管理簿によるメッシュ型土地被覆データの作成

森林内での窒素収支に影響を及ぼすと予想される土地被覆情報としては、地形情報、植生情報、土壌・地質情報などの様々な分布型情報が考えられる。地

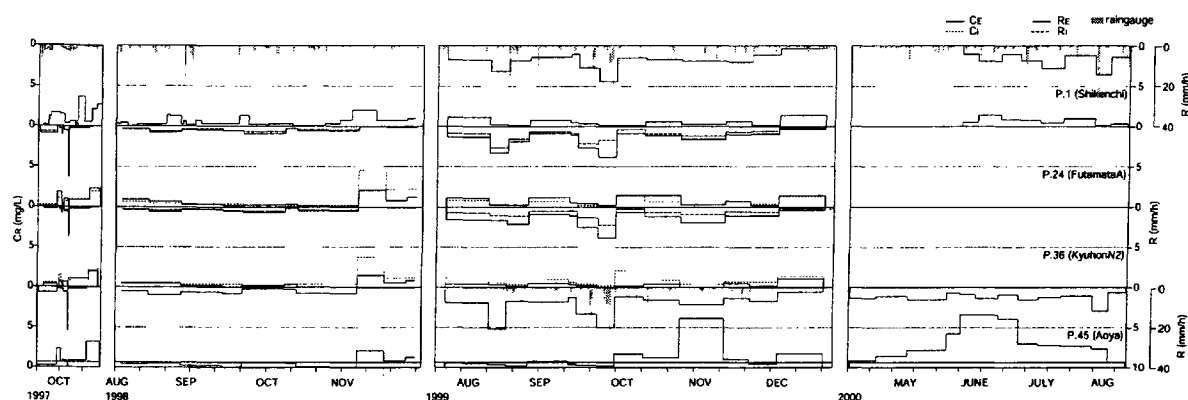


Fig. 7 Observation records of the precipitation R and the TN concentration C_R in the rain water

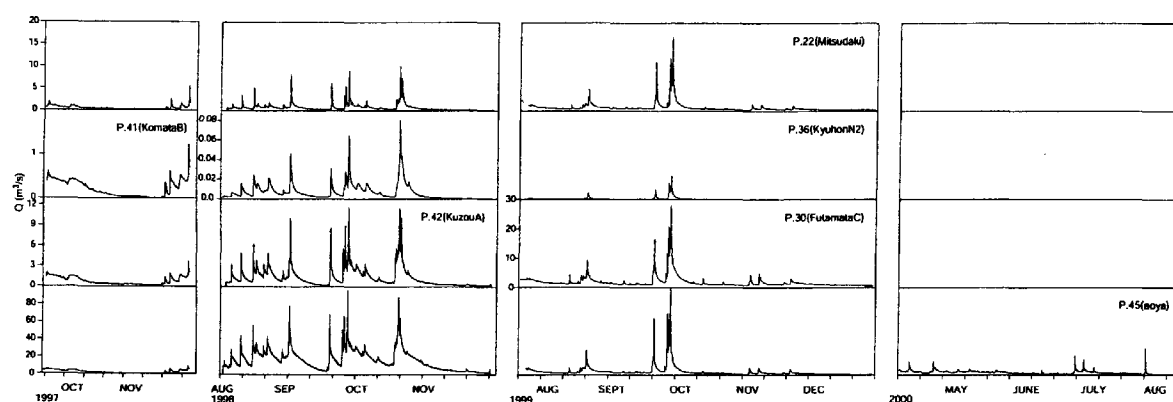


Fig. 8 Observation records of the discharge Q

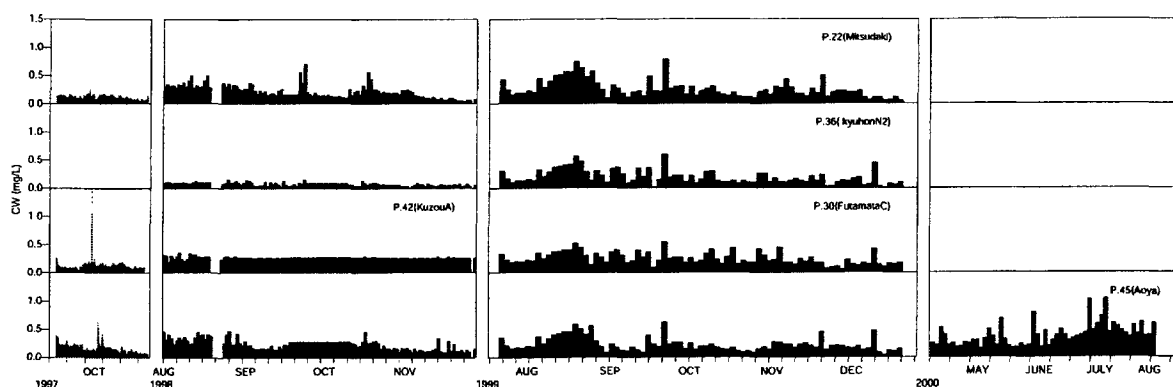
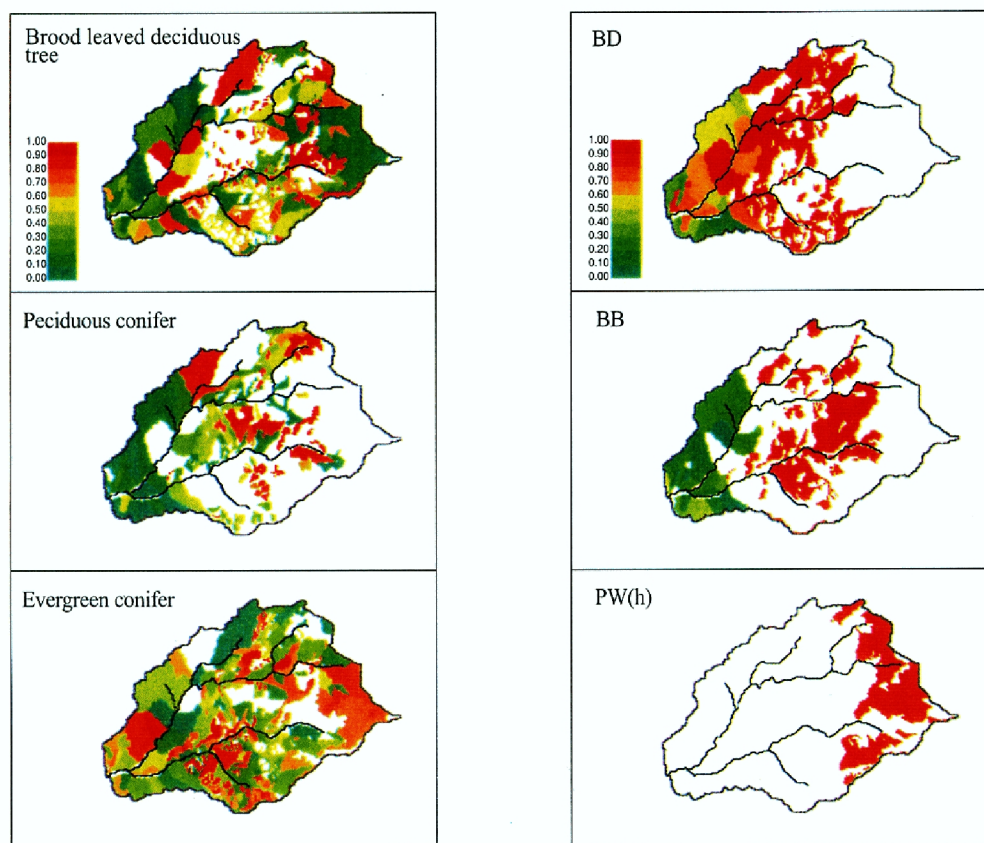


Fig. 9 Observation records of the TN concentration C_W in the mountain stream water

形情報については、国土地理院の50mメッシュ標高データより容易に標高、流路位置、流路長、斜面勾配、斜面方位などが求められる。一方、植生情報および土壌・地質情報については、久々野高山営林署

(現飛弾森林管理署)より提供された森林管理簿と第二次施業管理図に基づき整備する。この際、50mメッシュ標高データに対応したメッシュ(経度方向1.5秒および緯度方向2.25秒間隔)ごとの林班・小班を第二次



(a) Vegetation distributions

(b) Soil distributions

Fig. 10 Vegetation distributions and soil distributions in the experimental forest

施業管理図から拾い出すことにより、森林管理簿の各種データをメッシュデータに変換した。森林管理簿には、林地面積 (ha)、林種、林相、立木度、樹冠粗密度、材齢 (年)、1ha 当たりの材積 (m^3/ha)、土壌および地質が小班内の一括情報として記載されている。また、樹種ごとの情報としては、混合歩合 (%), 面積歩合 (%), 胸高直径 (cm), 樹高 (m), 材積総数 (m^3), 連年成長量 ($\text{m}^3/\text{年}$) および成長率 (%) といった諸量が調査されている。こうして得られる樹種分布および土壌分布の例を Fig. 10 に示す。

4.2 植生特性量

ひとくちに「植生分布」と言っても、樹種の分布のみならず、森林内窒素収支には、様々な植生特性量の分布が重要な要素となる。著者ら (都築ら, 1998) による溪流水質、地形特性、植生特性、土壌特性に

関する相関解析結果によれば、溪流水質に影響を及ぼす重要な植生特性量は、樹木の成長率、樹木の材積、樹高、胸高直径、林齢の 5 種類であり、その中でもとくに成長率と材積が支配因子になることがわかってきている。Fig. 11 に主な植生特性量間の関係を示す。ここでの植生特性量は、森林管理簿の小班 (数 a ~ 数十 ha) 内での平均植生特性量として算出されている。この図からも明らかなように、樹種ごとのばらつきは存在するものの、平均胸高直径 $\bar{D}$ 、平均樹高 $\bar{H}$ および林齢 y は平均成長率 $\bar{\alpha}$ の関数として評価可能であり、材積 v のみが独立した特性量になっていることがわかる。

4.3 樹種と土壌の結合確率分布

Fig. 12 は、植生分布と土壌分布との関係を検討するために、14 種類に分類された樹種と 11 種類の

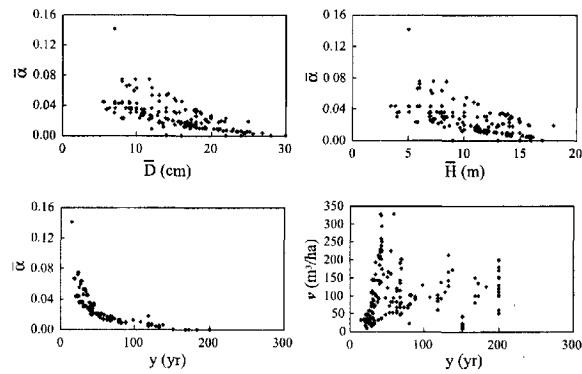


Fig. 11 Relationships among vegetation characteristics ($\bar{\alpha}$: averaged growth rate, $\bar{D}$: averaged diameter at breast height, $\bar{H}$: averaged tree height, y : forest age, and v : stem volume)

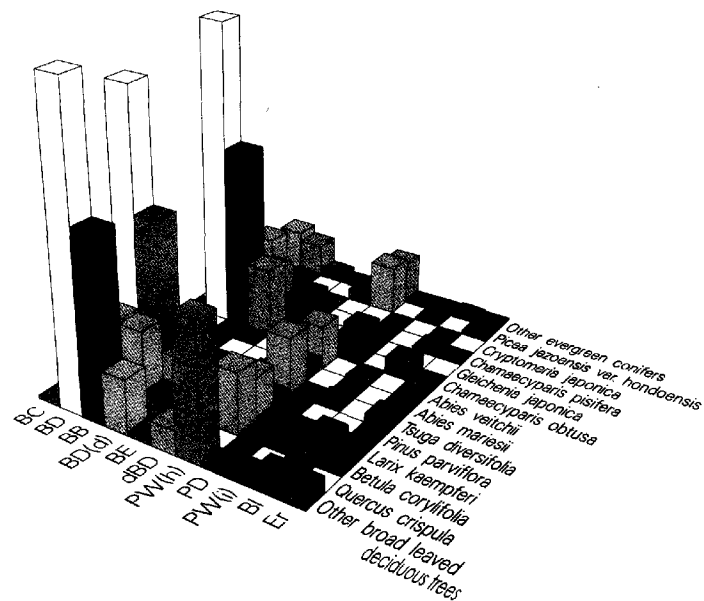
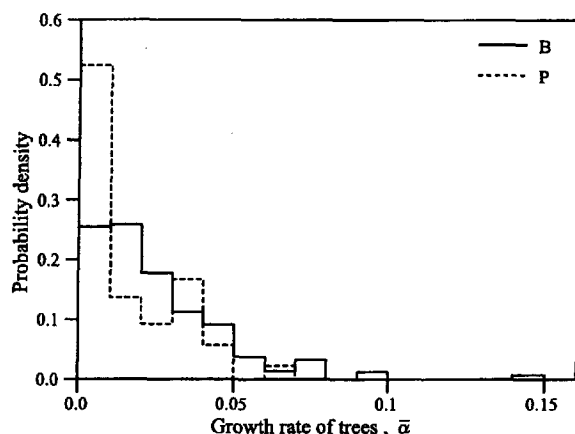


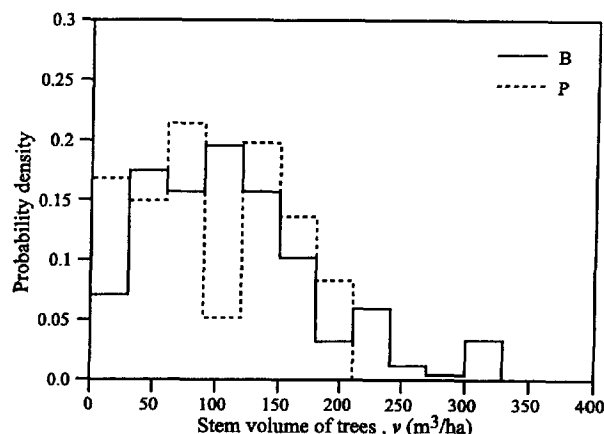
Fig. 12 Joint distribution of tree species and soil types

土壌種別との結合面積割合を示したものである。適潤性褐色森林土壌 (BD) および粒状・堅菓状構造型乾性褐色森林土壌 (BB) でのヒノキ (*Chamaecyparis obtusa*) とカラマツ (*Larix kaempferi*) の面積割合が高いことが目立つ。ヒノキとカラマツは、そのほとんどが人工林で占められ、樹木の生育に適した BD や BB 土壌に意図的に植林されていることも考えられる。これに対して、湿性腐食型弱ポドゾル化土壌 (PW(h)₃) に代表されるポドゾル土壌群 (P 群) については、カラマツがわずかに分布しているものの、ヒノキやスギ (*Cryptomeria japonica*) はほとんど分布し

ていない。一方、広葉樹については、BD, BB および PW(h) 土壌における他広葉樹の割合が際だっているが、他広葉樹の面積割合そのものが大きいため、土壌種別ごとの特徴とは言えない。ミズナラ (*Quercus crispula*) は P 群土壌ではほとんど分布しておらず、カンバ (*Betula corylifolia*) は PW(h) 土壌での専有面積が大きく、トウヒ (*Picea jezoensis* var. *hondoensis*), シラベ (*Abies veitchii*), コメツガ (*Tsuga diversifolia*) といった針葉樹とともに、P 群土壌での優占樹種となっている。



(a) Averaged growth rate $\bar{\alpha}$



(b) Stem volume of trees v

Fig. 13 Probability distribution of the vegetation characteristics at each soil type

Fig. 13 は、土壌種別ごとの平均成長率 $\bar{\alpha}$ および ha 当たり材積 v の確率分布を示したものである。Fig. ??(a) より、平均成長率が 5% を超えるほどの高い成長期の森林は B 群土壌に存在し、成長がほとんど停まった森林は P 群土壌に多いことがわかる。一方、Fig. ??(b) では、200m³/ha 以上の材積が大きな森林は B 群土壌にしか存在していない。森林土壌学の知見 (河田, 1989; 服部ら, 1996; 永塚, 1997; 小林, 1998) によれば、土壌中の有機態窒素を無機化する硝化細菌は、P 群土壌では存在せず、BB などの乾性褐色森林土壌では少なく、BD などの適潤性褐色森林土壌では多いと言われている。このことは、土壌中の硝化限界 pH4.5 に対して、P 群土壌では pH4.0、B 群土壌では pH4.5~5.5 であることに起因している。無機態窒素は樹木の生育を促進する物質であり、その存在量が土壌の自然肥沃度に対応する。このため、無機態窒素の存在量、すなわち、土壌の肥沃度を表す尺度として窒素量に対する炭素量の比 (C/N 比) が用いられている。上述の森林土壌学における成果を集約すると、調査事例によって大きなばらつきがあるものの、C/N 比の値は、P 群土壌では 50~200 程度、B 群土壌では 10~120 程度となっている。以上を総合すると、P 群土壌に比べ、B 群土壌の方により多くの無機態窒素が存在しており、Fig. ??に見られるような結果が得られていると判断できる。

こうした考察から、土壌種別はその結果として生じる樹木の成長率や材積に関連した要因と見なすことができるため、以下の検討では、森林域での窒素収支において最も特徴的な因子として、平均成長率

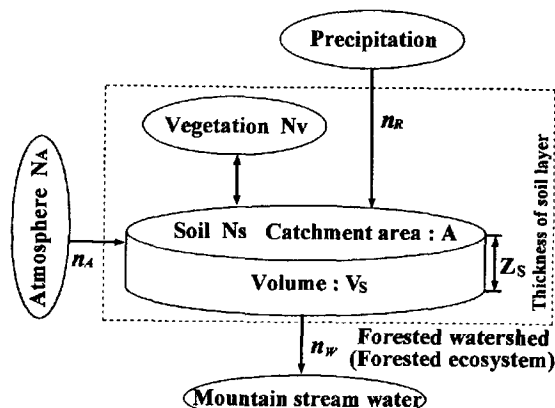


Fig. 14 Metabolism of TN flux in the forest watershed

$\bar{\alpha}$ と ha 当たり材積 v を用いることにする。

5. 森林流域内全窒素収支と植生分布との関係

5.1 観測記録を用いた全窒素輸送速度の算出

森林内での窒素収支は、微生物による土壌内での生化学的分解作用、大気と土壌間でのやり取り、植生による土壌内無機態窒素の摂取作用など、極めて複雑かつ多くの素過程の上に成り立っている。ここでは、こうした詳細な森林内窒素収支を議論するのではなく、広い森林域での窒素動態と植生との関係をマクロ的に検討することが目的であるため、Fig. 14 に示すような森林構成要素間での窒素の大まか

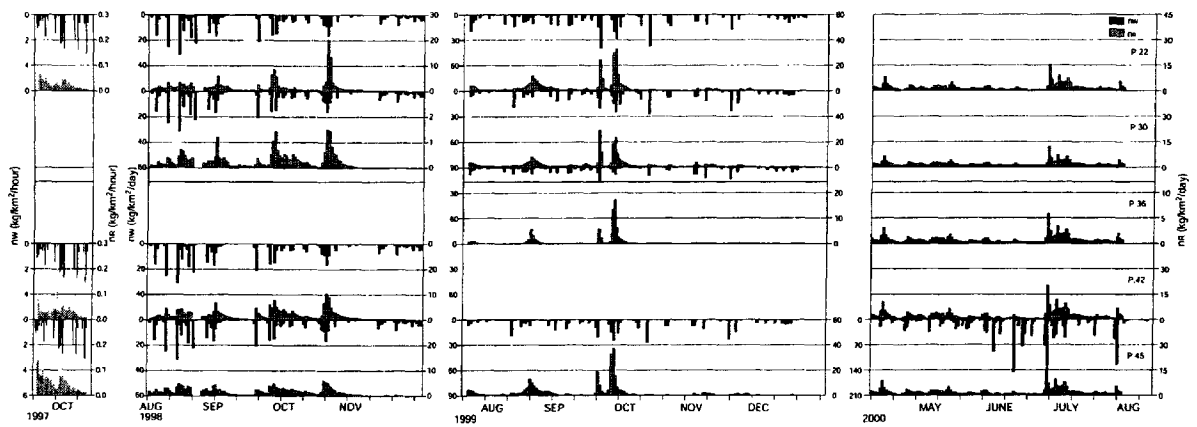


Fig. 15 Observed flux of TN into the stream water n_W and TN flux in the rain water n_R at each observation point

なやりとりに着目してみる。森林は植生部分と土壌部分に大別される。この森林域に外部から供給される全窒素は、主として降水中に含まれる成分と乾性沈着や窒素固定菌により大気から入る成分の2種類がある。また、森林の外部に流出する全窒素は、渓流水による成分と脱窒やアンモニア揮発により大気中に放出される成分がある。Fig. ??では、単位時間・単位面積当たりの全窒素輸送質量を‘全窒素(TN)フラックス’と定義し、降水による流入全窒素フラックスを n_R (雨水中全窒素フラックス)、渓流水からの流出全窒素フラックスを n_W (渓流水中全窒素フラックス)、大気からの供給量から放出量を減じた流入全窒素フラックスを n_A として表示している。

上述の現地観測では、乾性沈着も含めた降水供給窒素量や渓流水としての流出窒素量を測定していたため、これらの観測結果から n_R および n_W を求めれば、森林内に残る窒素蓄積量の速度 γ_F を推定することができる。すなわち、大気からの流入フラックス n_A を降水からの流入フラックス n_R に取り込んで表現すれば、次式となる。

$$\gamma_F = n_R - n_W \quad (1)$$

Fig. 15 は、渓流水中全窒素濃度 C_W 、渓流水流出流量 Q 、雨水中全窒素濃度 C_R および雨量 R の観測記録を用いて、各観測年ごとの主な観測地点における渓流水中全窒素フラックス n_W および雨水中全窒素フラックス n_R を算出した結果である。この結果を式(??)に適用し、観測期間内の平均値として森林内全窒素蓄積速度 γ_F を推定して、年間の値に換算した結果をFig. 16に示す。また、こうした各観測地点を集水点とする集水域内の平均植生特性量($\bar{\alpha}$: 平均成長率および $\bar{v}$: 樹種別材積)をFig. 17に示す。なお、平均成長率 $\bar{\alpha}$ や材積 $\bar{v}_k$ は年々変化するため、データソー

スとなっている森林簿の調査年を基準として、Fig. ??で示した林齢 y との関係を基に、観測年ごとの平均成長率 $\bar{\alpha}$ および材積 $\bar{v}_k$ を推定した結果を以下の検討では用いる。

5.2 植生特性量による森林内全窒素蓄積速度の重回帰推定

Fig. 18 は、樹木の成長量 $\bar{\alpha}v_k$ および材積 $\bar{v}_k$ に対する森林内全窒素蓄積速度 γ_F の関係を樹種別に示したものであり、 $k=0$ の全樹種の場合には、 $v_0 = v_1 + v_2 + v_3$ の関係が存在している。森林簿データの精度や観測地点数の少なさに起因してなのか、いずれもプロットのばらつきが大きく、明瞭な関係が存在するとは言いがたいが、全体的には植生特性量に対して森林内全窒素蓄積速度 γ_F が単調増加する傾向が認められる。とくに、成長量に関しては、全樹種 $\bar{\alpha}v_0$ の場合に、他の樹種に比べわずかながら単調増加傾向が強く、森林内全窒素蓄積速度 γ_F に対して支配的な要因になっている。また、材積については、常緑針葉樹材積 v_3 に関する単調増加傾向が他の樹種に比べて強く、森林内全窒素蓄積速度 γ_F に対して支配的と判断できる。

こうした結果に基づき、森林内全窒素蓄積速度 γ_F を全樹種平均成長量 $\bar{\alpha}v_0$ と常緑針葉樹材積 v_3 の関数として、次の重回帰式で表現してみる。

$$\gamma_F = a\bar{\alpha}v_0 + bv_3 + c \quad (2)$$

Fig. 19 は、観測値としての森林内全窒素蓄積速度 γ_F と式(??)により重回帰推定された森林内全窒素蓄積速度 γ_F との比較を示す。このときの重回帰係数は、 $a = -44.04 \times 10^{-3} \text{ t/km}^3/\text{yr}$ 、 $b = -30.42 \times 10^{-3} \text{ t/km}^3/\text{yr}$ および $c = 0.304 \times 10^{-3} \text{ t/km}^2/\text{yr}$ であった。観測地点数の少ない1999年と2000年のデータに対する適用性が低い、オーダとして見た推定精度は

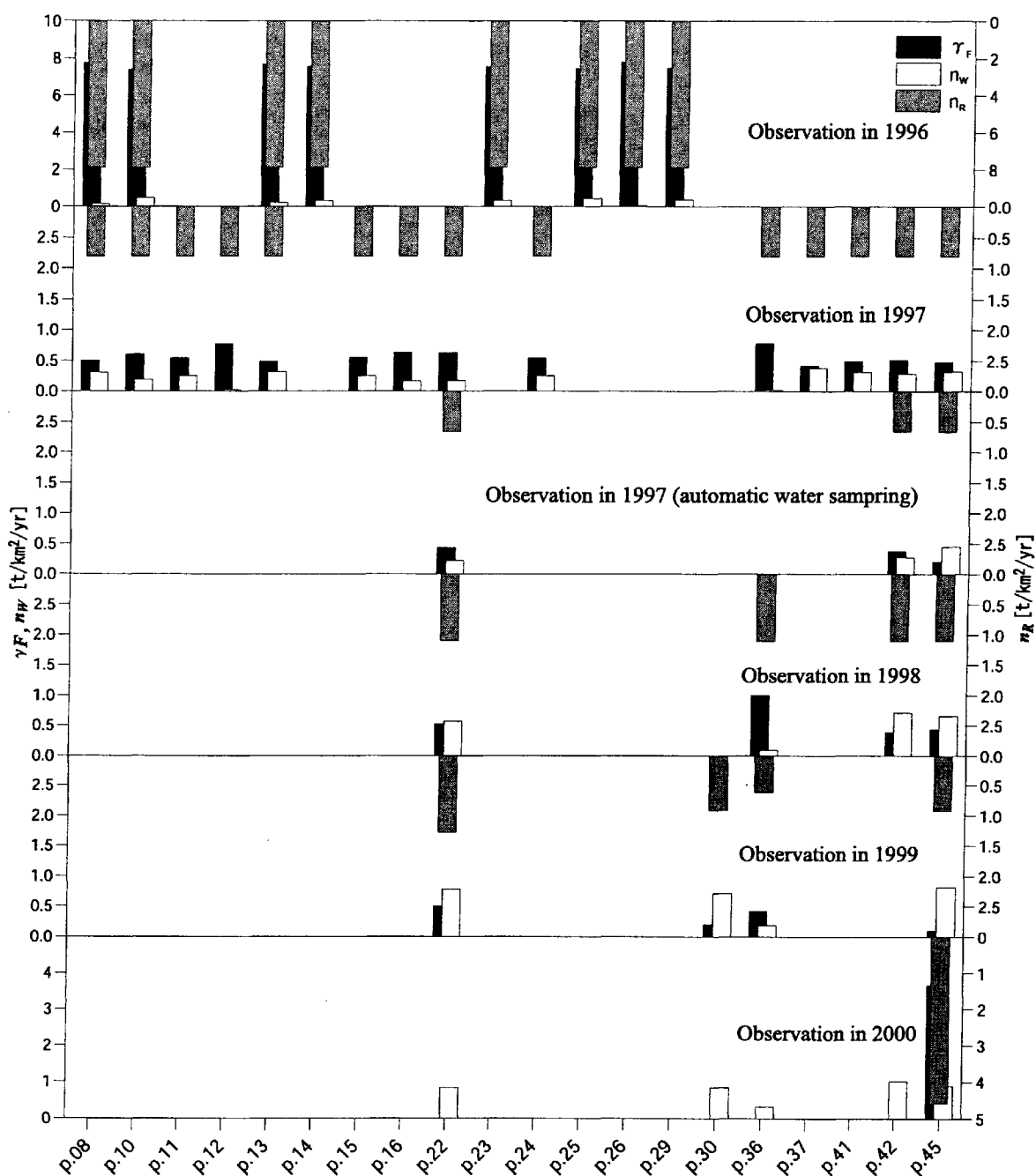


Fig. 16 The estimated annual net flux of TN into the stream water n_W , the annual net TN flux in the rain water n_R , and the annual accumulation rate of TN in the forest γ_F at each observation watershed corresponding to the observation point

良好であり、既存の $0.1 \sim 15.0 \text{ t/km}^2/\text{yr}$ という年間窒素蓄積量の報告 (Granhall, 1981; 堤, 1987) にほぼ一致した結果となっている。

これらの検討より、全樹種に関する成長率および常緑針葉樹の材積が高い場合ほど森林内に蓄積される窒素量が大きくなると言える。成長率は植生の活

性度に対応するパラメータであり、材積はバイオマスに相当する。すなわち、樹体維持のために大量の栄養分を必要とするような樹齢の高い成木が多く存在する林分であるか、成長のための栄養分を多量に必要とする若い林木が多く存在する林分である場合に、窒素貯留能力が高くなると結論づけられる。

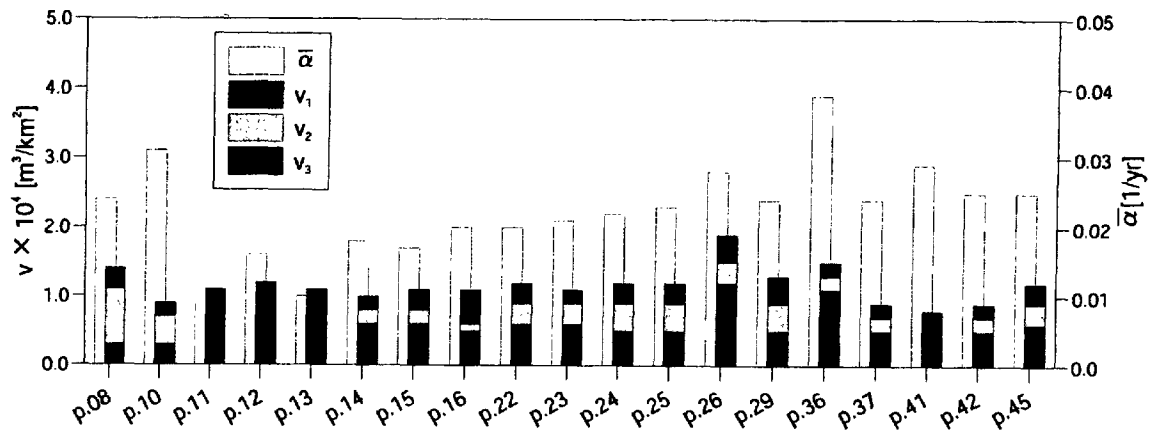


Fig. 17 The averaged growth rate $\bar{\alpha}$ and the stem volume of the k -th species of trees v_k in each observation watershed corresponding to the observation point ($k = 1$: broad leaved deciduous tree, $k = 2$: deciduous conifer, $k = 3$: evergreen conifer)

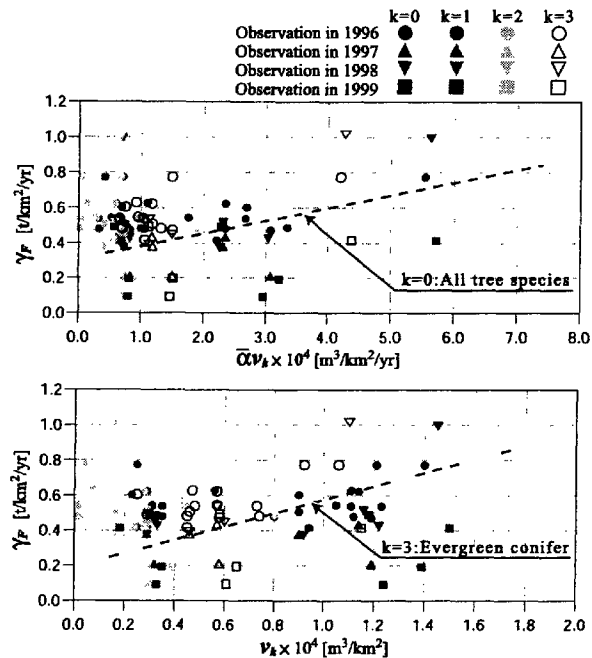


Fig. 18 Relationship between the annual accumulation rate of TN in the forest γ_F and the vegetation characteristics $\bar{\alpha} v_k$ and v_k ($k = 0$: all tree species, $k = 1$: broad leaved deciduous tree, $k = 2$: deciduous conifer, $k = 3$: evergreen conifer)

5.3 森林内全窒素蓄積速度の季節変化特性

開葉、展葉、落葉といった樹木の生育サイクルは森林内全窒素蓄積速度に大きな影響を及ぼすと予想される。また、こうした生育サイクルは樹種によって異なり、樹種構成の相違により、渓流水からの流出全窒素フラックスにも季節的・場所的違いが表れてくると考えられる。

Fig. 20 は、現地観測から得られた各観測ごとの渓流水中全窒素フラックス n_W の時系列データのうち最下流の観測地点(P.45)での結果を示したものである。春季においては雪解けによる流量の増加と冬季の生物活性の低下による硝酸塩消費量の減少によって、全窒素流出量が高くなっている。一方、開葉・展葉の時期に相当する6月から8月にかけては、生物

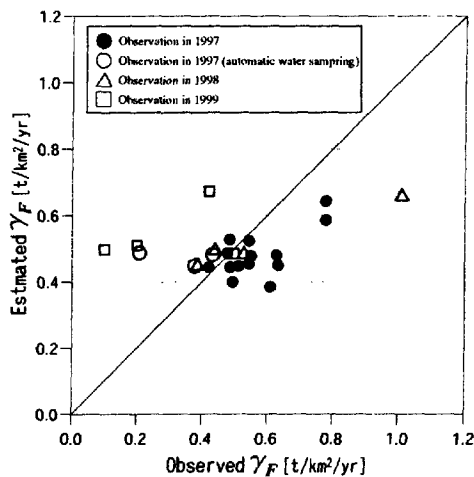


Fig. 19 Comparison of the annual accumulation rate of TN in the forest between the observed γ_F and the estimated γ_F

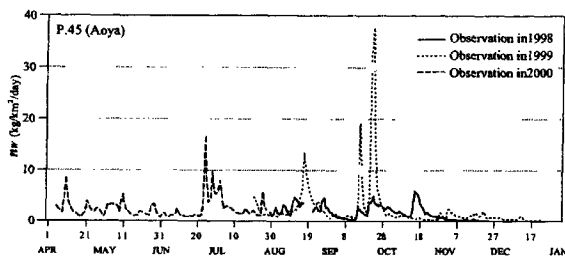


Fig. 20 Time series of the flux of TN into the stream water n_W at P. 45

の活性が高くなることから流出量が減少すると予想できる。しかし、実際には降雨量が他の季節に比べて非常に多いため、流量が増加し、全窒素流出量も多くなっている。秋期においては、落葉時期に林床での有機物分解が増加したことによって、アンモニウム濃度が高くなり、流出量が多くなっている。そこで、こうした季節ごと・樹種ごとの生育状態の違いを全窒素流出フラックスと植生特性量との関係から考察してみる。

Fig. 21 は、それぞれ各観測地点の成長量 $\bar{\alpha}v_k$ に対する各季節(4~5月, 6~7月, 8~9月, 10~11月)ごとの渓流水中全窒素流出フラックス n_W の関係を樹種別に示したものである。また、同様に、材積について整理した結果を Fig. 22 に示す。全樹種の成長量 $\bar{\alpha}v_0$ および常緑針葉樹の成長量 $\bar{\alpha}v_3$ の場合に、全ての季節において明瞭な単調減少傾向を示しており、渓流水中全窒素流出フラックス n_W に対して支配的となっていると考えられる。また、材積との関係においても同様の結果が得られている。一方、落葉広葉

樹および落葉針葉樹においては、わずかに開葉・展葉による単調増加傾向の増大や落葉による単調増加傾向の減少が認められるに過ぎない。全体的には、プロットの傾向が季節によって大きく変動しており、あまり明瞭な傾向は見られない結果となっている。

上述の小集水域での現地観測に基づく検討から、窒素流出の時間遅れは数週間であり、森林域の土中水分・物質移動速度が 1.7×10^{-2} cm/s 程度であった。各測点を集水点とする対象流域がこのような小集水域の集合だとすれば、それぞれ異なった植生特性量の影響と流出遅れが重なり合いながら集水点に達していると考えられる。この事実から判断すると、窒素流出速度に関する明瞭な季節変化が表れないのは、窒素流出が季節変化と同程度の時間スケールを持つ現象であり、流域内各所からの流出成分の合成結果には、落葉樹のような森林表層土壌における季節変化の影響が現出しにくいメカニズムになっているためと解釈できる。

6. 結 語

以上、本研究では、数千 ha に及ぶ広い森林域を対象とした5ヶ年の現地観測結果に基づき、森林内の植生特性が全窒素流出特性に及ぼす影響について検討した。その結果、森林流域内での全窒素流出過程には、降雨量などの水文・気象特性の他に、森林内の樹木が大きく影響していることが明らかになった。とくに、植生のバイオマスに対応する樹木の材積と植生活性度に相当する樹木の成長率の2つが大きな支配因子となっていることが、森林内窒素収支に関する詳細な現地観測および植生分布に関するGIS解析から解明された。これは、樹体維持のために大量の栄養分を必要とするような樹齢の高い成木が多く存在する林分であるか、成長のための栄養分を多量に必要とする若い林木が多く存在する林分である場合に、窒素貯留能力が高くなることを意味する結果となっている。また、こうした傾向に関する樹種による違いは、開葉・展葉・落葉などの生育サイクルを特徴づける季節変化として表れるが、森林内での窒素流出速度が極めて遅いことから、年間を通した顕著な相違としては現出してこないことも示唆された。

こうした検討結果から、森林での窒素貯留に限定すれば、伐採と植樹が繰り返されるような、人間の手による積極的な森林管理が行われている森林であるほど、窒素貯留には有効となると言える。逆に、森林保護という名目などにより、森林全体の林木を伐採せずにいつまでも放置するような状況は、窒素流出の観点からは望ましい姿とは言えない。若い林木や大きな成木をうまく組み合わせた適正な林業施

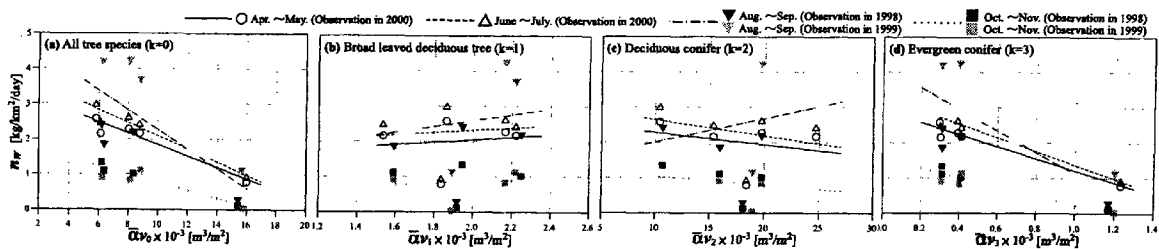


Fig. 21 Relationship between the flux of TN into the mountain stream water n_W and the average amount of growth αv_k in each season ($k=0$: all tree species, $k=1$: broad leaved deciduous tree, $k=2$: deciduous conifer, $k=3$: evergreen conifer)

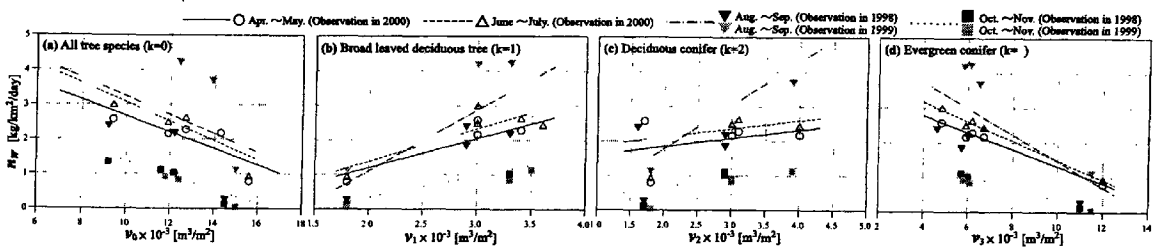


Fig. 22 Relationship between the flux of TN into the mountain stream water n_W and the stem volume of the k -th species of trees v_k in each season ($k=0$: all tree species, $k=1$: broad leaved deciduous tree, $k=2$: deciduous conifer, $k=3$: evergreen conifer)

策によって、窒素貯留効果を最大限に発揮させられるものと考えられる。森林の保全が声高に叫ばれて久しいが、単に森林を守るという意識のみならず、森林の持つ役割・機能を十分理解した上で、その有効活用が図られることを期待したい。

謝 辞

本研究の実施にあたり、森林管理簿を提供して下さるとともに国有林内での観測・調査を許可して下さった久々野高山営林署（現飛弾森林管理署）、観測に際して数々のご便宜を図って下さった岐阜県朝日村役場および私有地内での観測装置設置をご快諾下さった朝日村の地元の皆様に深謝の意を表す。また、本研究が平成11～13年度文部科学省科学研究費補助金・地域連携推進研究(1)「木曾三川のエコロジカル流域管理計画—流域生態系の物質循環機能を生かした流域環境管理システムの提案」(課題番号11794029, 代表・秋山侃岐阜大学流域環境研究センター教授), 平成11～13年度文部科学省科学研究費補助金・基盤研究(B)(2)「農林地および草原の持続的生産性評価のための指標作成」(課題番号11490015, 代表・秋山侃岐阜大学流域環境研究センター教授)および平成12～13年度文部科学省科学研究費補助金・基盤研究(C)(2)「リモートセンシング画像と植生データベースを用いた森林流域内窒素固定能の広

域的評価」(課題番号80187369, 代表・篠田成郎岐阜大学流域環境研究センター助教授)の一部であることを付記し、謝意を表す。

参考文献

- 石黒宗秀・小林慎太郎・三野徹・丸山利輔(1982): 畑地造成に伴う水質の変化, 農業土木論文集, Vol. 102.
- 河田弘(1989): 森林土壌学概論, 博友社.
- 久馬一剛・佐久間敏雄・庄子貞雄・鈴木皓・服部勉・三土正則・和田光史(1993): 土壌の辞典, 朝倉書店.
- 小林繁男(1998): 森林土, 土の環境図[岩田進午・喜田大三監修], 第2編第1章第3節, フジ・テクノシステム, pp. 435-443.
- 篠田成郎・都築克紀・山下幸伸・竹下慶・日置琢三・湯浅晶(2000): 山地森林域における降水中全窒素負荷量の時間変化特性, 第8回地球環境シンポジウム論文集, pp. 277-282.
- 田村隆雄・吉田弘・端野道夫(1998): 硝化を考慮した森林土壌からの硝酸態窒素流出過程の数値モデル化に関する基礎的検討, 水工学論文集, 第42巻, pp. 229-234.
- 都築克紀・篠田成郎・間野耕司・佐藤嘉則・湯浅晶(1998): 山地森林内渓流水中全窒素濃度に及ぼす土地被覆分布特性の影響評価, 環境システム研究, Vol. 26, pp. 119-127.

- 堤利夫 (1987): 森林の物質循環, 東京大学出版会, p. 124.
- 永塚鎮男 (1997): 原色日本土壌生態図鑑, フジ・テクノシステム.
- 服部勉・宮下清貴 (1996): 土の微生物学, 養賢堂.
- 浜端悦治 (1989): 流域・水質評価モデル, 河川汚濁のモデル解析 [国松孝男・村岡浩爾編], 技法堂出版, pp. 185-193.
- 福島武彦・松重一夫 (1995): 山林河川における流域特性と水質との関係について, 水環境学会誌, 第18巻, 第11号, pp. 909-916.
- Fan, W., Randolph, J. C. and Ehman, J. L. (1998): Regional estimation of nitrogen mineralization in forest ecosystems using geographic information systems, *Ecological Applications* Vol. 8, No. 3, pp. 734-747.
- Granhall, U. (1981): Biological nitrogen fixation in relation to environmental factors and functioning of natural ecosystems, *Terrestrial nitrogen cycles*, edited by Clark, F. E. and Roswall T., *Ecol. Bull.*, Vol. 43, pp. 427-448.
- Kim, C (1998): Soil nitrogen mineralization at various levels of canopy cover in red pine (*pinus resinosa*) plantations, *Jour. of Forest Res.*, Vol. 3, No. 2, pp. 85-89.
- Likens, G. E. et al. (1970): Effects of forest cutting and herbicide treatment on nutrient budgets in Hubbard Brook watershed-ecosystem, *Ecological Monographs*, Vol. 40, pp. 20-47.
- Magill, A. H., Aber, J. D., Hendricks, J. J., Bowden, R. D., Melillo, J.M. and Steudler, A. P. (1997): Biogeochemical response of forest ecosystems to simulated chronic nitrogen deposition, *Ecological Applications*, Vol. 7, No. 2, pp. 402-415.
- Mitchell, M. J., Iwatsubo, G., Ohru, K. and Nakagawa, Y. (1997): Nitrogen saturation in Japanese forests, *Forest Ecology and Management*, Vol. 97, pp. 39-51.
- Ohru K. and Mitchell, M. J. (1997): Nitrogen saturation in Japanese forested watersheds, *Ecological Applications*, Vol. 7, No. 2, pp. 391-401.
- Shinoda, S., Tsuduki, K., Yuasa, A., Sato, Y. and Mano, K. (1999): Influence of the vegetation distribution on the mass balance of total nitrogen in a forested mountain watershed, *Jour. of Global Environment Eng.*, Vol. 5, pp. 127-137.
- Shinoda, S., Tsuduki, K., Yuasa, A., Mano, K., Yamashita, Y., Korome, J., and Takeshita, K. (2000): Field experiment and mass balance modeling of total nitrogen in a forested mountain watershed with various tree species, *Proc. of 4th Int Conf. on Hydroinformatics 2000*, CD-ROM.
- Vitousek, P. M. (1977): The regulation of element concentrations in mountain streams in the northeastern United States, *Ecological Monographs*, Vol. 47, pp. 65-87.

Influence of the Vegetation Distribution on the Runoff Process of Total Nitrogen in a Forested Mountain Watershed

Seirou SHINODA*, Jun KOROME**, Keiko FUKUMOTO, Takuzo HIOKI, Koji NODA***, Katsunori TSUDUKI****, Koji MANO***** and Yukinobu YAMASHITA*****

* Center for River Basin Environmental Research, Gifu University

** CRC Research Institute, Inc., Japan

*** Graduate School of Engineering, Gifu University

**** Japan Atomic Energy Research Institute

***** PASCO Corporation, Japan

***** Fuso Water Industries Co. LTD., Japan

Synopsis

The relationship between the total nitrogen (TN) balance and the vegetation characteristics in a forested mountain area (Aoya River Basin; 4,560 ha) located in the central part of Japan was investigated by field observation for five years and GIS analysis. TN loading in the stream water was generally small and the assimilation of nitrogen in trees became active in the forest watershed in which the growth rate corresponding to the vegetation activity and the stem volume of tree corresponding to the biomass were large. Seasonal variations of TN in the stream water were not large because the runoff process of TN was very slow.

Keywords: mass balance of total nitrogen; GIS, vegetation distribution; biomass; vegetation activity; forestry management