

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

INFLUENCE OF THE LAND COVERAGE IN A MOUNTAIN FOREST WATERSHED
ON THE TOTAL NITROGEN CONCENTRATION IN STREAM WATER

○都築克紀* · 篠田成郎** · 間野耕司* · 佐藤嘉則*** · 湯浅 晶**

Katsunori TSUDUKI*, Seirou SHINODA**, Kohji MANO*, Yoshinori SATO***, Akira YUASA**

ABSTRACT; Total nitrogen (TN) concentration was surveyed at 31 streams in a forested mountain area (Aoya River basin; 4,500 ha) located in the central part of Japan. A statistical analysis was applied to the TN data and the factors representing the state of the land coverage such as geologic feature, soil species, forest tree species, forest age, growth rate of trees, stem volume of trees, etc. Among these factors, the rate of the brown forest soil and the population of the deciduous coniferous forest showed a positive influence on the TN concentration. The growth rate and the stem volume of trees have a negative contribution to the TN.

KEYWORDS; total nitrogen concentration, stream water in a mountain forest watershed,
land coverage, growth rate and stem volume of trees, soil species

1. 緒言

大気汚染、水質汚濁、ヒートアイランドなどの地域環境に関わる諸問題は、人間の社会活動の空間的な分布状況と密接に関わっているため、土地被覆状態などの分布情報として人間活動を評価することにより、こうした面的に拡がりを持つ問題を分布型の地域環境システムとして検討することが可能になる。酸性雨や温暖化といった地球環境問題を含めて、ほとんどの環境問題は物質やエネルギーの輸送過程における問題と捉えられるため、地域環境システムを検討する場合にも、こうした輸送過程全体を視野に入れる必要がある。すなわち、人間活動の活発な都市域のみならず、人間の影響が直接的には及びにくいと考えられる山地域などもシステムの中に組み込むことが不可欠と考えられる。とくに、上述の大気汚染や水質汚濁といった環境問題は、大気や水の循環過程をある程度閉じた系として扱える流域規模のシステム(流域環境システム)で検討されるべきであろう。例えば、二酸化炭素や窒素酸化物などの地球温暖化物質は、最も小さな循環単位として見れば、主として都市域で生産され、森林域に吸収される。つまり、物質のソース(都市)とシンク(森林)を一貫して扱うことにより、はじめて物質循環過程を表現できる。

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20~150kg/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¹⁾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の問題への早急な回答が、流域環境システム構築において必要とされている。

* 岐阜大学大学院工学研究科 Graduate School of Eng., Gifu University

** 岐阜大学流域環境研究センター Center for River Basin Environmental Research, Gifu University

*** 株式会社ユニック UNIC Corporation

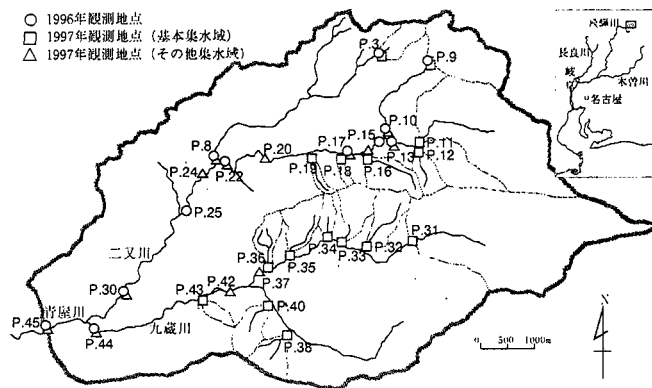


図-1 観測対象流域と観測地点

雨水や大気降下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²⁾や石黒ら³⁾による調査事例であろう。彼らの研究では、森林伐採によって渓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、森林域内渓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。

森林内渓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。ただし、そのほとんどが単一集水域を対象とした微視的な研究であり、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⁴⁾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渓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渓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⁵⁾は、植生図のメッシュデータ化に基づいた渓流水質と植生分布との関係の検討を試みている。

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 4,500ha)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^{6),7)}。本研究では、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流域の詳細な土地被覆分布を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土地被覆特性量を抽出し、現地観測により得られる渓流水中全窒素濃度と土地被覆分布特性量との多変量解析を通じて、森林域における窒素固定機能に及ぼす土地被覆分布特性の影響評価を行う。

2. 対象流域内の土地被覆分布状況と現地観測

2.1 観測地点と観測結果

図-1 は、1996 年と 1997 年にかけて著者らが定期的に実施した水文・水質に関する現地観測対象流域と観測地点を示したものである。図中の太線で囲まれる対象流域(約 4,500ha)は岐阜県朝日村内に位置する木曾川水系飛騨川最上流の青屋川流域に相当する山地森林域であり、流域内での人為的な影響はほとんど存在していない。本研究では、1996 年 6 月より 2~3 週間に 1 回程度の頻度で定期的に実施された(積雪期を除く)現地観測結果を用いることにする。1996 年の観測では 6 月 24 日から 11 月 29 日にかけて○印の 11 地点において計 8 回、1997 年には 5 月 31 日から 8 月 21 日の期間に□および△印の 29 地点において計 5 回の渓流水採取が行われており、降雨量、気温、湿度、流量などの水文・気象データも適宜観測されている^{6),7)}。こうした各観測地点を集水点とする小集水域のうち、他の小集水域を包括しない独立な小集水域を、以下では‘基本集水域’として扱う

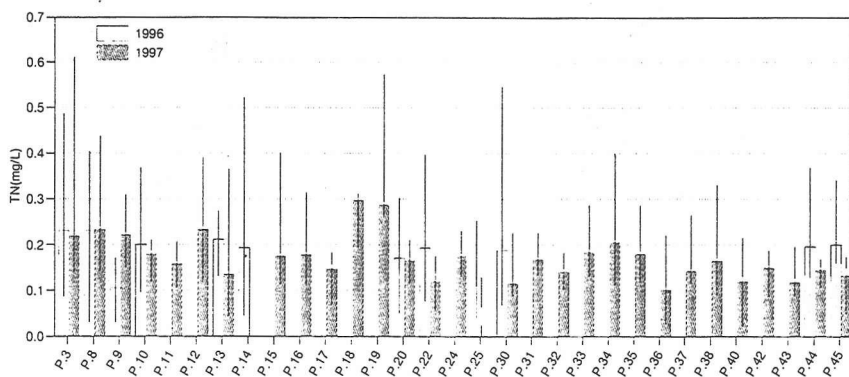


図-2 各観測地点における平均全窒素濃度

ことにする。図-1には、基本集水域の集水点としての観測地点(16 地点)を□印で、その集水域界を細線で示してある。なお、この流域は標高 800.7m~2117.1m にあり、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、木々が芽吹く新緑の季節は 6 月中旬~7 月中旬、落葉期は 9 月下旬~10 月下旬となっている。このため、ここでの現地観測結果は、植生が繁茂し始める春先から落葉が終了する晩秋までの季節に対応したものとなっている。

渓流水中全窒素濃度(TN)の分析には、全窒素・全リン同時分解法(環境庁告示第 140 号の修正法)を用いており、TN の検出限界は 0.003mg/L である。この方法により得られた各測点での全窒素濃度 TN の観測結果を図-2 に示す。図中の棒グラフは各観測年・各観測地点ごとの最大値と最小値を除く TN の平均値を表し、縦線は最大値と最小値を含めたデータ範囲を示している。今回の観測のように連続的なデータが得られていない場合、瞬間値としての観測データの持つ一般性の確保が重要となるため、以下では、図-2中の棒グラフで示される全窒素濃度を、晴天時および降水時を含めた各測点(各小集水域)での平均的な全窒素濃度として扱うものとする。

2.2 森林管理簿による土地被覆情報のメッシュデータ化

渓流水中全窒素濃度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、斜面方位などを求められる。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($m^3/年$)および成長率(%)といった諸量が調査されている。

こうして得られる土地被覆分布状況の例を図-3 に示す。対象流域内の土壌構成は、適潤性褐色森林土壌(BD; 40.2%), 粒状・堅塊状構造型乾性褐色森林土壌(BB; 24.8%), 湿性腐食型弱ポドゾル化土壌(PW(h)₃; 15.8%)などとなっており、図-3(a)には、褐色森林土壌群(B 群)とポドゾル土壌群(P 群)に代表させて示してある。また、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、人工林のほとんどはヒノキ(19.7%)である。この他、ヒノキ以外の常緑針葉樹、カラマツなどの落葉針葉樹(図-3(b)に面積割合を示す)、カンバやミズナラなどの落葉広葉樹がほぼ同じ割合で存在しており、多様な樹種構成となっている。一方、全ての樹種に関する平均値としての ha 当たり材積および成長率も様々であり、これらの分布状況は図-3(c) および (d) のようになっている。

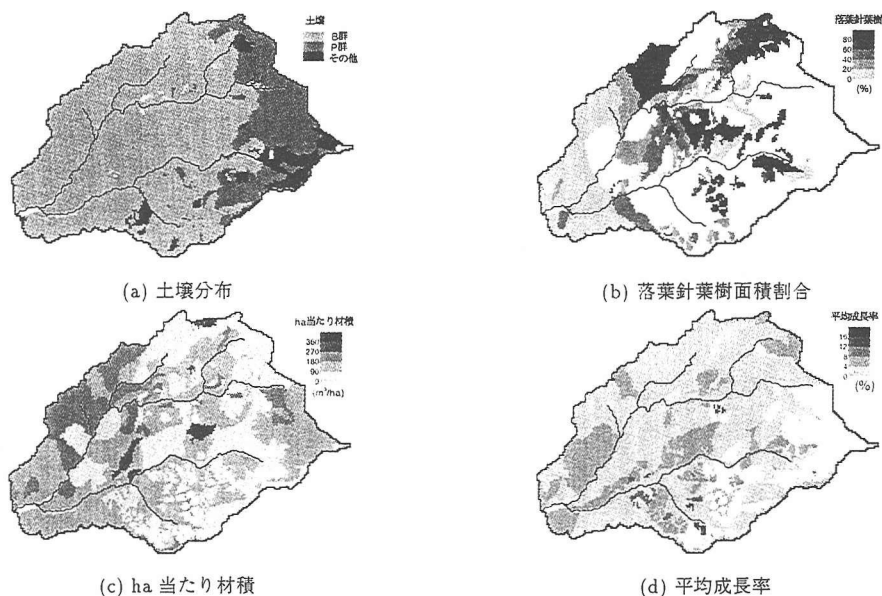


図-3 土地被覆分布状況の例

3. 全窒素濃度と土地被覆特性量に関する多変量解析

3.1 基本変量としての土地被覆特性量

まず、渓流水の全窒素濃度 TN がどんな条件に依存するのかについて考察してみる。なお、以下では、土地被覆状況を表す諸量を‘土地被覆特性量’と呼ぶことにする。

森林流域内では、次の5つの渓流水中窒素の発生源が考えられる。i) 土壌：森林内では、渓流水の大部分は降雨に伴う土壌水の押し出しによるため、土壌中に含まれる全窒素の総量に比例した全窒素負荷量が渓流水中に含まれて流出すると考えられる。ii) 植生：大気降下物中に含まれる窒素が植生表面に付着して、これが降雨によって洗い流されることによって直接渓流に流出することが考えられるが、この影響は極めて微少と予想される。iii) 大気：大気中の窒素 (N_2 よりむしろ大気降下物中に含まれる窒素化合物) が直接渓流に降下することにより渓流水中窒素濃度を増大させ得る。しかし、この影響は空間的に均一と見なされるため、場所的な変化特性として捉えることは困難と考えられる。iv) 降水：雨滴が直接渓流に降下することにより、雨水中の窒素が渓流水中に混入することが考えられる。しかし、森林域では、植生による樹冠遮断のために雨滴が直接渓流に達することは稀であるので、直接的な原因とはなりにくいと予想される。v) 生息動物：対象森林内には、クマ、イノシシ、日本カモシカ、リス、野ウサギなどの各種哺乳類、ライチョウをはじめとする高山性の鳥類や多種の昆虫が生息している。これらの生息動物の影響を定量的に把握することはほとんど不可能であると思われる。

こうしたことから、ここでは、渓流水中全窒素濃度は土壌中に存在する窒素の総量に依存すると考えてみることにする。つまり、土壌中窒素総量 N_S に対して β_S の割合だけ渓流水中に流出すると考えれば、渓流水中全窒素負荷量 n_W は、

$$n_W = \beta_S N_S \quad \dots \dots \dots (1)$$

と表されることになり、 β_S は土壌からの全窒素の流出率と扱われる。ここで、 β_S が流量 Q に比例すると仮定すれば、

$$\beta_S = \kappa Q \quad \dots \dots \dots (2)$$

と表される。ここに、 κ は比例係数である。式 (1) および式 (2) から β_S を消去すれば、次式を得る。

$$C_W = n_W / Q = \kappa N_S \quad \dots \dots \dots (3)$$

すなわち、渓流水中の全窒素濃度 C_W が土壌中全窒素量 N_S に比例するという関係が導かれる。もちろん渓流水中全窒素濃度 C_W は晴天時・降雨時などの気象要因や季節変化などに左右されるため、 κ および N_S を時間的に

表-1 小班ごとの土地被覆特性量に関する相関行列

	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)
(1)B 群面積割合	1.00										
(2)P 群面積割合	-0.72	1.00									
(3)ヒノキ面積割合	0.31	-0.24	1.00								
(4)他常緑針葉樹面積割合	-0.27	0.39	-0.35	1.00							
(5)落葉針葉樹面積割合	0.10	-0.08	-0.09	-0.27	1.00						
(6)落葉広葉樹面積割合	0.07	0.03	-0.48	-0.06	-0.43	1.00					
(7)平均林齢	-0.07	0.23	-0.35	0.69	-0.27	0.21	1.00				
(8)ha 当たり材積	0.19	-0.03	-0.01	0.24	0.15	-0.08	0.37	1.00			
(9)平均成長率	0.21	-0.12	0.48	-0.36	0.09	-0.08	-0.50	-0.08	1.00		
(10)平均標高	-0.54	0.57	-0.32	0.38	0.05	-0.02	0.29	-0.17	-0.26	1.00	
(11)平均斜面勾配	0.10	-0.13	0.03	-0.02	0.01	-0.04	0.03	-0.04	-0.02	-0.09	1.00

一定と扱うことはできないが、 C_W の時間平均値ならば、 κ や N_S の空間分布として評価することが可能になる。

そこで、式(3)に対する土地被覆状況の影響について考察してみる。土壤中全窒素量 N_S は土壌種別によって直接的な影響を受けると考えられる。また、土壌から植生への窒素供給量は植生の活動状態によって左右されると予想されるので、 N_S は樹種ごとの面積割合、単位面積当たり材積、成長率、林齢などに影響されると考えられる。さらに、土壌中での硝化・脱窒などを行う微生物の活動は場所ごとの地温に依存するため、地温を左右する因子としての標高も重要な要素となり得る。一方、流量 Q に対する全窒素流出率 β_S の比である κ は、地形的な影響を受けると考えられる。とくに、斜面勾配が大きな場合には、単位流量に対する流出率が大きくなることが容易に想像されるため、 κ の支配因子として斜面勾配を考えることが必要になると思われる。

以上のことより、土壌、植生および地形のそれぞれについて、渓流水中全窒素濃度に関する土地被覆特性量として次の11種類が挙げられる。

土壌：褐色森林土壌群(B群)面積割合およびポドゾル土壌群(P群)面積割合。

植生：ヒノキ面積割合(人工林面積割合とほぼ等しい)、その他の常緑針葉樹面積割合、落葉針葉樹面積割合、落葉広葉樹面積割合、平均林齢、ha 当たり材積および平均成長率。

地形：平均標高および平均斜面勾配。

表-1は、これら11種類の土地被覆特性量を小班ごとに求めて得られる相関行列を示したものである。また、各測点を集水点とする小集水域ごとの土地被覆特性量を表-2にまとめて示す。表中のハッチング箇所が前述の基本集水域を表しており、多様な土壌構成および樹種構成と成っているほか、林齢、材積、成長率も様々な値を示しており、それぞれに特徴的な小集水域となっていることが確認できる。

なお、B群とP群のいずれの土壌種別にも属さないと同時に、植生の存在しない荒れ地の面積割合は1割にも満たないため、変量間の従属関係を考慮する必要がある。すなわち、土壌面積割合に関しては、B群がP群の面積割合が決まれば他方の面積割合は自ずと計算され、樹種面積割合についても、4種類の樹種のうちの3種類の面積割合が得られれば残りの面積割合を求めることが可能となる。このため、最下流の集水域(測点P.45)において、最小の土壌面積割合および樹種面積割合を示しているP群面積割合およびヒノキ面積割合を便宜的に除いた9種類を基本変量とする多変量解析を行うことにする。

3.2 全窒素濃度に影響を及ぼす土地被覆特性量の抽出

まず、渓流水中平均全窒素濃度と上述の9個の土地被覆特性量との相互関係を規定する因子数を主成分分析から決定する。表-3に16個の基本集水域に関する主成分分析の結果を示す。一般に、因子分析では、因子数を決定するための基準として、主成分分析によって得られる累積寄与率が用いられるため、ここでは、変量の全変動の8割以上を表現できる(累積寄与率が0.8を超える)主成分の数を因子分析における因子数と扱うものとする。表-3においてハッチングを施してある第4主成分までで初めて累積寄与率が0.8を上回っていることから、因子分析での因子数を4と決定できる。

因子数を4とした因子分析によって得られる基本集水域に対応した因子負荷量は表-4のようになる。特定の因子にのみ高い負荷量を示す変量をその因子を代表する変量として捉えることにすれば、表中のハッチング箇所が代表変量に対する因子負荷量と考えられる。すなわち、落葉針葉樹面積割合、平均成長率、褐色森林土壌

表-2 小集水域ごとの土地被覆特性量

測点 番号	土壌面積割合 (%)		樹種面積割合 (%)				平均 林齢 (年)	ha 当たり 材積 (m ³ /ha)	平均 成長率 (%)	平均 標高 (m)	平均 斜面 勾配
	B 群	P 群	ヒノキ	他常緑 針葉樹	落葉 針葉樹	落葉 広葉樹					
P.3	23.4	75.0	7.9	9.1	59.6	21.9	30.6	60.7	3.21	1598.6	0.313
P.8	95.0	4.6	15.0	6.1	41.9	36.6	46.9	136.3	2.11	1370.1	0.467
P.9	27.3	68.7	0.2	15.4	52.2	43.2	28.1	55.8	4.18	1700.9	0.400
P.10	64.2	33.3	13.3	14.4	44.3	32.5	45.4	85.6	3.07	1587.7	0.476
P.11	26.7	71.2	3.3	49.4	1.3	44.0	120.2	109.7	0.94	1729.4	0.595
P.12	100.0	0.0	32.1	45.0	2.3	20.7	68.4	117.0	1.70	1576.6	0.665
P.13	36.3	61.8	6.6	48.0	1.3	42.3	115.5	110.6	0.99	1696.2	0.605
P.14	47.4	50.6	9.4	35.5	16.8	38.8	90.0	102.0	1.74	1650.9	0.558
P.15	48.6	49.4	9.9	35.3	16.5	38.9	90.2	102.7	1.73	1643.1	0.562
P.16	100.0	0.0	20.1	14.9	11.0	54.1	75.1	107.5	1.43	1518.8	0.687
P.17	53.5	44.7	10.9	33.7	15.7	40.1	89.3	102.4	1.71	1625.3	0.574
P.18	100.0	0.0	25.6	6.9	29.6	37.9	41.5	41.1	2.13	1423.4	0.643
P.19	100.0	0.0	16.3	0.0	46.8	36.8	33.6	102.6	3.20	1348.6	0.615
P.20	62.8	35.2	15.5	28.8	20.5	34.9	78.4	106.3	2.07	1554.2	0.573
P.22	65.2	32.7	16.2	27.9	21.3	34.3	76.0	110.0	2.10	1527.9	0.577
P.24	75.0	23.4	15.7	20.7	27.8	35.5	66.3	118.4	2.12	1473.1	0.541
P.25	76.0	22.6	16.0	20.0	27.3	36.4	65.1	119.3	2.18	1459.8	0.542
P.30	80.6	18.2	18.0	18.9	24.4	38.3	58.2	126.9	2.57	1390.8	0.532
P.31	35.8	47.0	1.1	39.5	17.8	39.2	107.5	89.7	1.56	1807.8	0.479
P.32	100.0	0.0	13.3	17.1	43.6	26.0	76.9	185.5	1.65	1503.0	0.562
P.33	100.0	0.0	21.1	0.5	58.6	19.8	37.0	151.7	3.16	1440.5	0.600
P.34	100.0	0.0	35.1	0.0	61.5	3.4	24.5	34.1	5.33	1362.5	0.586
P.35	100.0	0.0	33.9	5.8	48.1	12.2	25.3	36.9	5.05	1345.5	0.560
P.36	100.0	0.0	73.8	4.5	4.9	16.8	48.6	130.0	4.14	1254.8	0.494
P.37	61.3	29.2	9.7	31.2	22.4	35.3	89.5	91.5	2.18	1614.4	0.541
P.38	70.5	0.0	47.1	15.8	16.0	20.5	66.3	75.4	3.69	1385.4	0.546
P.40	75.5	0.0	68.9	12.2	3.3	15.7	49.9	69.1	5.43	1325.5	0.596
P.12	67.7	23.3	15.7	29.8	17.4	36.2	86.9	87.6	2.10	1542.9	0.546
P.43	100.0	0.0	32.1	10.1	6.9	50.9	81.3	93.9	3.29	1238.7	0.569
P.11	71.9	20.2	18.9	26.1	17.9	35.8	79.7	97.0	2.33	1469.7	0.540
P.15	77.3	18.1	19.7	21.8	20.8	36.5	66.2	114.9	2.54	1402.6	0.532

表-3 基本集水域に関する主成分分析結果

主成分番号	固有値	累積寄与率
1	4.27	0.39
2	2.76	0.64
3	1.65	0.79
4	1.01	0.88
5	0.72	0.95
6	0.28	0.97
7	0.14	0.98
8	0.08	0.99
9	0.07	1.00
10	0.00	1.00

表-4 基本集水域に関する因子分析結果

	第1因子	第2因子	第3因子	第4因子
B 群面積割合	0.19	-0.32	0.96	0.15
他常緑針葉樹面積割合	-0.64	0.59	-0.23	0.08
落葉針葉樹面積割合	1.00	-0.02	-0.21	-0.16
落葉広葉樹面積割合	-0.23	0.59	0.01	0.02
平均林齢	-0.70	0.56	-0.04	0.42
ha 当たり材積	-0.05	0.31	0.26	0.68
平均成長率	0.25	-0.94	-0.17	-0.22
平均標高	-0.13	0.76	-0.56	-0.08
平均斜面勾配	-0.26	0.10	0.82	-0.02

群(B 群) 面積割合, ha 当たり材積という4つの土地被覆特性量が, 渓流水中平均全窒素濃度に影響を及ぼす代表変量として抽出されたことになる。

3.3 全窒素濃度と土地被覆特性量との重回帰分析

16 個の基本集水域における平均全窒素濃度を被説明変数として得られる上述の4種類の土地被覆特性量に関する重回帰係数を表-5 に示す。表中には, 各説明変数の影響の大きさを比較するために, 説明変数と被説明変数を平均値ゼロおよび分散1 で標準化した場合の結果も併せて示してある。これより, 褐色森林土壌群(B 群) 面積割合と落葉針葉樹面積割合が大きいほど渓流水中全窒素濃度が増大し, 逆に, ha 当たり材積と平均成長率

表-5 基本集水域に関する重回帰係数

	標準化前	標準化後
切片	0.280	0.0
B群面積割合	0.055	0.309
落葉針葉樹面積割合	0.137	0.567
ha当たり材積	-0.001	-0.710
平均成長率	-0.029	-0.758

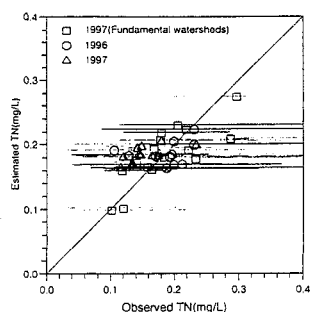
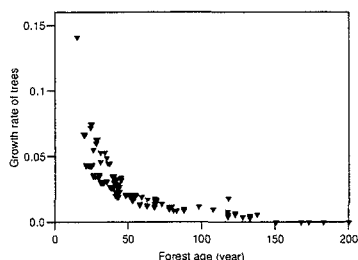
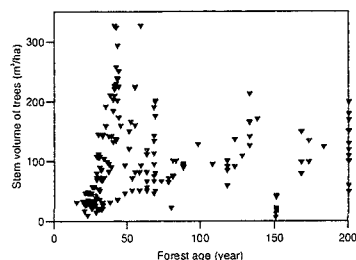


図-4 各測点での渓流水中全窒素濃度の重回帰推定結果



(a) 林齢と平均成長率との関係



(b) 林齢と ha 当たり材積との関係

図-5 小班ごとの植生特性量間の関係

が大きいほど渓流水中全窒素濃度を低下させることがわかる。また、渓流水中全窒素濃度を小さくするには、褐色森林土壌群 (B 群) や落葉針葉樹の面積割合を低下させるよりも、ha 当たり材積や平均成長率を高くする方が効果的であるとも言える。

図-4 は、表-5 の重回帰係数を用いたときの各測点での平均全窒素濃度の推定結果と実測結果を比較したものであり、図中の細い横線は実測データの最小値と最大値の範囲を示している。表-5 の重回帰係数推定には基本集水域でのデータが用いられているため、□印で示される基本集水域に関する結果は重回帰式そのものの表現精度に対応したものとなる。このときの重相関係数が 0.80 であることに加え、図-4 中の□印のプロット結果より、褐色森林土壌群 (B 群) 面積割合、落葉針葉樹面積割合、ha 当たり材積および平均成長率を説明変数とする重回帰表現の妥当性が確認できる。一方、○印および△印のプロットは、基本集水域での重回帰係数を適用した結果であるため、純粋に土地被覆特性量のみから渓流水中全窒素濃度を推定した結果に対応している。いずれの場合においても実測値と推定値との対応は良好であり、上述の 4 つの土地被覆特性量による全窒素濃度の推定が十分可能であることを確かめられる。

4. 全窒素濃度に及ぼす土地被覆特性量の影響に関する考察

4.1 植生特性量の影響

全窒素濃度 TN、溶存態全窒素濃度 TDN、アンモニア態窒素濃度 $\text{NH}_4\text{-N}$ 、硝酸態窒素濃度 $\text{NO}_3\text{-N}$ などの森林域渓流水中の窒素濃度と林齢との関係については、林齢が大きな森林ほど窒素濃度が高い場合もあれば、その逆もあるようであり、福島ら⁴⁾の指摘のように、林齢の影響に関する明確な結論は得られていないのが現状であろう。一方、上述の因子分析結果では、林齢は渓流水中全窒素濃度に影響を及ぼす代表因子として抽出されていない。

図-5 は、小班ごとの林齢、平均成長率および ha 当たり材積といった 3 種類の植生特性量間の相互関係を示したものである。林齢が大きくなるほど、平均成長率は単調減少しつつゼロに漸近するとともに、材積が大きくなる傾向が現れている。また、林齢に対する材積の関係は、樹種などの相違により様々な単調増加傾向を示

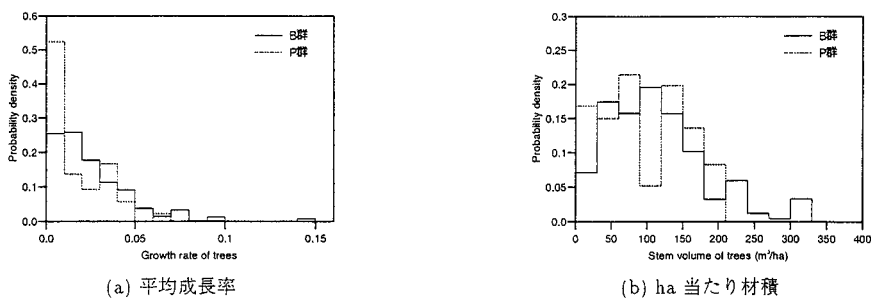


図-6 土壌種別ごとの植生特性量の確率分布

すこともわかる。表-5の重回帰分析結果では、平均成長率とha当たり材積は全窒素濃度に対してともに負の影響を示していた。若い樹木は、自信の樹体を成長させるためにより多くの無機態窒素を必要とする。このため、老齢な森林に比べ、若い森林では土壌中の無機態窒素が少なくなり、渓流水中の窒素濃度も低くなる。すなわち、成長率が大きな若い森林ほど窒素濃度を低下させる働きがあると言える。一方、年老いた樹木の場合には、葉の現存量が大きく、新陳代謝を維持するために必要とする無機態窒素の量も多くなる。このため、森林がある程度成長すると、成長のための窒素消費量よりも樹体維持のための窒素消費量が大きくなり、渓流水中の窒素濃度を再び低下させることになる。

なお、晩秋の落葉期や初春の融雪期には、落葉の影響による渓流水中窒素濃度の上昇が予想される。一方、夏期では植生活性が高くなるため、渓流水中窒素濃度が減少することも想定される。しかしながら、今回の観測結果では、こうした季節の変動傾向は認められていない。これは、森林域では表面流は全く存在せず、落葉・落枝が堆積する森林土壌表層部で土壌水中に供給される窒素成分はゆっくりとした地下浸透過程を経て渓流に流出(土壌水の押し出し流出)するため、落葉や植生活性度の影響による季節的な変動を示さなかったと考えられる。

以上のことより、渓流水中全窒素濃度を林齢だけで一概に評価することはできず、成長率の効果と材積の効果の両者を考慮することが必要になると言える。従来の研究において、林齢の効果がまちまちであったのは、こうした理由によると思われる。

4.2 樹種の影響

一般に、年間の落葉量は、落葉針葉樹、落葉広葉樹、常緑針葉樹、常緑広葉樹の順に多くなると言われている⁸⁾。一方、樹体の中で最も多く窒素を含むのが葉部であり^{1),8)}、落葉量は植生が土壌に要求する窒素量と密接に関係すると予想される。ただし、林学の分野で調査されてきている樹種ごとの年間の窒素要求量は、落葉針葉樹で106~111kg/ha/年、落葉広葉樹で42~152kg/ha/年、常緑針葉樹で20~120kg/ha/年であり^{1),8)}、大きなばらつきが存在する。また、これらの調査結果は土壌特性、立木密度、林齢などが異なる森林を対象としてまとめられていることに加え、調査方法も統一されておらず、土壌に対する植生の窒素要求量の明確な大小傾向は明らかにされていないのが現状である。このため、明快な根拠を示すことはできないものの、落葉量の少ない落葉針葉樹では、他の樹種に比べ、前述の材積や成長率による土壌中窒素の消費効果が小さいために、渓流水中に溶出する窒素濃度が高くなる傾向があるとも解釈できる。広葉樹林が多い森林流域ほど硝酸態窒素濃度が低くなるという報告⁵⁾もあるが、落葉量が多い場合に渓流水中窒素濃度が低下するという上述の傾向と一致する結果であると思われる。

4.3 土壌種別の影響

図-6は、土壌種別ごとの平均成長率およびha当たり材積の確率分布を示したものである。図-6(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、図-6(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^{8),9),10),11)}によれば、土壌中の有機態窒素を無機化する硝化成菌は、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。森林土壌学における成果^{8),9),10),12)}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、図-6に見られるような結果が得られていると判断できる。

これに対して、前述の重回帰分析結果 (表-5) では、B 群土壌の面積割合が大きいほど渓流水中の全窒素濃度が高くなる傾向が現れている。1996 年の観測においては全窒素濃度の他に無機態窒素濃度も分析しており、全窒素濃度に対する無機態窒素濃度の割合が 9 割以上であることが確認されている。すなわち、式 (1) で示したように、土壌中の無機態窒素が多いほど、渓流水中の無機態窒素が多くなる傾向が現れていると考えられる。ただし、成長過程にある樹木が多く存在するような森林では、植生に吸収される無機態窒素の量も多くなるため、窒素流出量は抑制されることになる。なお、土壌種別を制御することは実際問題として困難であることに加え、表-5によれば、B 群土壌に関する標準化された重回帰係数は他の土地被覆特性量の重回帰係数に比べて小さいため、渓流水中全窒素濃度を抑制するには、適切な林業施策によって、樹種構成、成長率、材積などを制御する方が効果的と考えられる。

5. 結語

以上、本研究では、森林の持つ窒素固定機能を定量的に把握するために、広域な森林流域における現地観測結果および詳細な土地被覆情報に基づく多変量解析により、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について検討した。その結果、植生の成長量および単位面積当たりの材積が大きな集水域ほど、植生に吸収される土壌中窒素量が多くなり、その結果として、渓流水中の全窒素濃度が低くなることを明らかにした。この逆に、落葉量が少なく土壌への窒素要求量が小さいと推測される落葉針葉樹において、渓流水中の全窒素濃度が高くなることも示せた。また、従来より真相が不明とされた林齢の影響について、植生の成長量と材積の両者の効果として捉えることにより、一つの明快な解釈を与えることができた。さらに、こうした成長量、材積および落葉針葉樹面積割合ほど顕著な影響はないものの、褐色森林土壌群 (B 群) に種別される土壌には、窒素現存量が多いために、渓流水中の全窒素濃度が高くなる傾向の存在も確認できた。これらの結果より、森林の窒素固定機能を効果的に発揮させるためには、植生の成長率と材積を高く維持できるような適切な林業施策とカラマツなどの落葉針葉樹の適切な配置・管理が重要になることが明らかになった。

最後に、本研究の実施に当たり、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を許可して下さった久々野高山営林署、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、本研究が日本証券奨学財団平成 8 年度研究調査助成、文部省科学研究費基盤研究 (A)(2)(課題番号:07406015)・奨励研究 (A)(課題番号:09750591) および文部省平成 9 年度創造開発研究の一部であることを付記する。

参 考 文 献

- 1) 堤利夫：森林の物質循環，東京大学出版会，1987，p. 124.
- 2) Likens, G. E. et al.: Effects of forest cutting and herbicide treatment on nutrient budgets in Hubbard Brook watershed-ecosystem, Ecological Monographs, Vol. 40, 1970, pp. 20-47.
- 3) 石黒宗秀・小林慎太郎・三野徹・丸山利輔：畑地造成に伴う水質の変化，農業土木論文集，Vol. 102, 1982.
- 4) 福島武彦・松重一夫：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，1995，pp. 909-916.
- 5) 浜端悦治：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，1989，pp. 185-193.
- 6) 間野耕司・篠田成郎・佐藤嘉則・都築克紀・斎木浩：山地森林域での降雨中全窒素濃度の観測，土木学会中部支部研究発表会講演概要集，1998，pp. 391-392.
- 7) 篠田成郎・佐藤嘉則・都築克紀・間野耕司・湯浅晶：植生分布を考慮した森林流域内全窒素収支モデルとその適用性，第 6 回地球環境シンポジウム講演論文集，1998，pp. 63-68.
- 8) 河田弘：森林土壌学概論，博友社，1989.
- 9) 小林繁男：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，1998，pp. 435-443.
- 10) 永塚鎮男：原色日本土壌生態図鑑，フジ・テクノシステム，1997.
- 11) 服部勉・宮下清貴：土の微生物学，養賢堂，1996.
- 12) 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：土壌の辞典，朝倉書店，1993.