

5. 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

MASS BALANCE MODELING OF TOTAL NITROGEN IN A MOUNTAIN WATERSHED WITH VARIOUS FOREST TREE SPECIES

篠田成郎* · 佐藤嘉則** · 都築克紀*** · 間野耕司*** · 湯浅 晶*
Seirou SHINODA, Yoshinori SATO, Katsunori TSUDUKI, Kohji MANO, Akira YUASA

ABSTRACT; A mathematical model of total nitrogen balance in a watershed ecosystem was developed by deriving a time evolution equation of total nitrogen stored in the soil layer. The distribution of forest tree species was characterized by the growth rate and the stem volume of trees in this model. Applicability of this model was examined in a forested mountain area (Aoya River basin; 4,500 ha) located in the central part of Japan. Total nitrogen loading in the stream water is generally small and the nitrogen fixation in trees becomes active in the forested watershed in which the growth rate and the stem volume of trees are large.

KEYWORDS; stream water chemistry, forest ecosystem, total nitrogen balance, nitrogen fixation, growth rate and stem volume of trees

1. 緒言

二酸化炭素の固定をはじめ、森林は様々な環境保全機能を有している。中でも、二酸化炭素固定機能ほど注目されてはいないが、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・酸性雨や温暖化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。森林によるこうした窒素固定機能を定量的に把握することは、地域環境はもとより、地球環境を保全していく上で必須の課題と言える。とくに、昨今の酸性雨・酸性霧問題の顕在化や林業経営存続の危機の中で、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効率的に発揮し、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解答が必要とされている。

森林内での各種物質収支・循環過程に関する研究は農学を中心とした分野で主として行われてきており、土壌内微生物や植生の果たす役割などに関する基礎的知見が集積されてきている。しかしながら、森林土壌学や土壌微生物学などにおける研究には極めて微視的なものが多く、流域全体での物質収支を把握するまでには至っていないのが現状であろう。これに対して、最近、田村ら²⁾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。ところが、こうした森林内物質収支過程に関するほとんどの森林水文学の研究では、高々数 ha~数十 ha 程度の局所的な流域における検討にとどまっており、様々な樹種によって構成される森林全体としての窒素固定機能を把握できるまでには至っていない。

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物質収支、とくに窒素収支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。その結果、森林域内渓流水中の全窒素濃度が樹種ごとの成長率と材積に大きく支配されることを明らかにしている³⁾。また、林内外の雨水採取結果より、林外よりも林内の雨水中全窒素負荷量の方が空間的に一様な値を示す傾向にあることも見いだしている⁴⁾。本研究では、こうした現地観測成果に基づき、森林による窒素固定機能を定量的

* 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

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

に把握するために、森林流域内での窒素収支の時間変化をモデル式として定式化するとともに、現地観測データを用いたモデル式の検証および窒素固定機能に及ぼす植生分布の影響評価を行う。

2. 森林流域における全窒素収支のモデル化

2.1 森林内での窒素の流れ

単位面積当たりの全窒素量の収支を表す方程式を提案し、その解から得られる渓流水中全窒素と植生分布との関係について考察するために、まず、図-1 に示すように、森林流域を土壌部と植生部から構成される一つの森林生態系と考え、系内外における単位時間・単位面積当たりの全窒素量の流れを考える。図中、 n_R は、樹冠流・樹冠滴下雨・樹冠通過雨などの形態によって降水が土壌表面に到達することにより系内(土壌部)に供給される降水の中全窒素量を表す。 n_A は、大気中窒素(大部分は窒素酸化物)の土壌表面への付着、窒素固定菌の作用による土壌内への取り込み、土壌中微生物の作用による脱窒やアンモニア揮発などの大気とのやり取りの結果として系内(土壌部)に貯えられる全窒素量を示す。また、渓流水として系外に流出する全窒素量を n_W として示している。一方、系内では、土壌部と植生部との間において、土壌中の無機態窒素が植生の成長のために吸収されたり、植生の落葉・落枝などによって土壌へ有機態窒素が供給されるといった窒素交換が行われている。このため、これらの総和として土壌部から植生部へ供給される全窒素量(以下、植生内窒素蓄積量と呼ぶ)を n_V とする。以上より、土壌部に貯えられる全窒素の増加量 n_S は、次式で表されることになる。

$$n_S = n_R + n_A - n_V - n_W \dots\dots\dots (1)$$

なお、上式は、降雨流出の時間スケールや季節変化の時間スケールよりも長い時間スケールでのみ成立する関係であるため、以下では、こうした影響を無視できるほど長い時間単位(例えば、年単位)を対象として議論を進めることにする。

2.2 土壌中全窒素の時間変化方程式とその解

森林土壌中には数千年もの長い期間にわたって蓄積された膨大な量の窒素が存在すると言われている⁵⁾。こうした土壌中に存在する全窒素量 N_S の時間変化を導くために、土壌中での全窒素収支式(1)に対して、以下に示す3つの仮定を設けることにする。

- 1) 渓流水として流出する全窒素量 $n_W(t)$ は、その時点での土壌中の全窒素量 $N_S(t)$ に比例し、比例係数としての流出率 β は時間的に一定と扱えるものとする。
 - 2) 気候環境が時間的に大きく変化しておらず、降水および大気からの窒素供給量 $n_R(t) + n_A(t)$ を時間に対して独立と扱える。
 - 3) 若い樹木ほど成長率が大きいため、土壌から植生への窒素供給量 $n_V(t)$ は植生の年齢に応じて変化すると考えられるが、ここでは、簡単のため、ある限定された期間内では n_V を時間的に一定と扱えるものとする。
- 2) および 3) の仮定より、式(1)の右辺第1～3項をまとめて

$$n_{RAV} = n_R + n_A - n_V = \text{const. for } t \dots\dots\dots (3)$$

と表せば、式(2)および式(3)より、式(1)は次式のように表される。

$$n_S(t) = n_{RAV} - \beta N_S(t) \dots\dots\dots (4)$$

さて、時刻 t における土壌中全窒素量 $N_S(t)$ は、時刻 $(t - \Delta t)$ での土壌中全窒素量 $N_S(t - \Delta t)$ と Δt の期間内の土壌中全窒素増分量 $n_S(t)\Delta t$ との和として表されるので、

$$N_S(t) = N_S(t - \Delta t) + n_S(t)\Delta t \dots\dots\dots (5)$$

という式が成り立つ。上式において、 $\Delta t \rightarrow 0$ の極限を考えれば、土壌中全窒素量の時間変化を表す方程式が次のように得られる。

$$\frac{dN_S}{dt} = n_S = n_{RAV} - \beta N_S \dots\dots\dots (6)$$

さらに、 $t = t_0$ における N_S を N_{S0} と表すことを初期条件として、式(6)を定数変化法によって解けば、 N_S の解として次式を得る。

$$N_S = \frac{n_{RAV}}{\beta} + \left(N_{S0} - \frac{n_{RAV}}{\beta} \right) e^{-\beta(t-t_0)} \dots\dots\dots (7)$$

2.3 渓流水中全窒素の時間変化

式(2)で仮定したように、渓流水中の全窒素量 n_W は流出率 β と土壌中全窒素量 N_S との積として表されるので、式(7)の両辺に β を乗ずることによって、 $n_W(t)$ は次のように求められる。

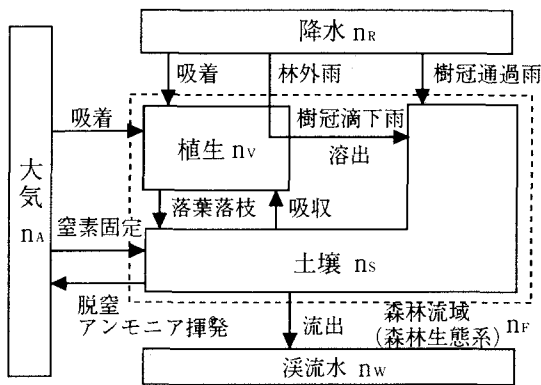


図-1 森林流域における窒素フローの模式図

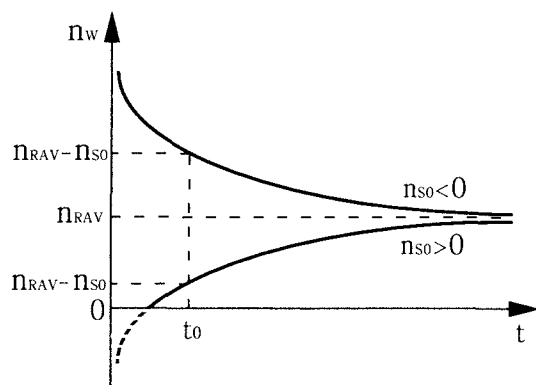


図-2 渓流水中全窒素量 n_W の時間変化曲線

$$n_W(t) = \beta N_S(t) = n_{RAV} - (n_{RAV} - \beta N_{S0})e^{-\beta(t-t_0)} \quad (8)$$

ところで、式(4)より、

$$n_{S0} \equiv n_S(t_0) = n_{RAV} - \beta N_S(t_0) = n_{RAV} - \beta N_{S0} \quad (9)$$

なので、式(9)を式(8)に適用すれば、渓流水中全窒素の時間変化を表す式として、次式が得られる。

$$n_W(t) = n_{RAV} - n_{S0}e^{-\beta(t-t_0)} \quad (10)$$

$n_{S0} > 0$ の場合と $n_{S0} < 0$ の場合について式(10)を図示すると、図-2 のようになる。この結果より、 $n_{S0} > 0$ のときは、 n_W は単調増加となり、 $t \rightarrow \infty$ において n_{RAV} に漸近することがわかる。これに対して、 $n_{S0} < 0$ のときには、 n_W は単調減少となり、 $t \rightarrow \infty$ で同じく n_{RAV} に上方から漸近することになる。

n_{S0} は、式(3)および式(9)より、

$$n_{S0} = n_R + n_A - n_V - \beta N_{S0} = (n_R + n_A) - (n_V + \beta N_{S0}) \quad (11)$$

と表されるので、次の関係が成立するときに渓流水中の全窒素量 n_W が減少することになる。

$$n_R + n_A > n_V + \beta N_{S0} \quad (12)$$

ただし、 $n_V \ll \beta N_{S0}$ という形で式(12)を満足させた場合は、 n_{RAV} の値が大きいままとなるため、 n_W は高い値で漸近してしまうことになる。このため n_W を低い値に収束させるには、 $n_V \gg \beta N_{S0}$ という条件付きで式(12)を満足させることが必要になる。つまり、植林と伐採を短期間で繰り返すなどの積極的な林業経営(施策)によって植生内窒素蓄積量 n_V を高い水準で維持することが、渓流水中の全窒素量 n_W を小さくすることにつながる。

なお、ここでの理論的考察は上述の仮定3)に基づいているが、この仮定を満足できる期間を $(t - t_0)$ と考えることにより、上述の検討結果は意味を持つものとなる。すなわち、仮定3)が満たされなくなった時点 t_0 として、式(10)の時間変化を捉え直せばよい。このように考えれば、植林、成長および伐採などの植生状況の変化に応じて式(10)を適用することにより、渓流水中全窒素量 n_W を適切に推定することが可能になると思われる。

2.4 渓流水中全窒素量と植生分布

次に、式(8)または式(10)に基づき、渓流水中全窒素 n_W の場所的な違い、とくに植生分布による相違について考察してみる。

まず、土壌からの流出率 β 、時刻 t_0 における土壌中全窒素量 N_{S0} 、大気からの全窒素供給量 n_A および降水中全窒素量 n_R が場所的に同じ(空間的に均一)⁴⁾と仮定すると、渓流水中全窒素量 n_W に関する場所的な違いは植生内窒素蓄積量 n_V の空間分布に集約される。式(3)を用いて n_V について式(8)を整理すると、次式となる。

$$n_W(t) = -\left\{1 - e^{-\beta(t-t_0)}\right\} n_V + \left\{1 - e^{-\beta(t-t_0)}\right\} (n_R + n_A) + \beta N_{S0} e^{-\beta(t-t_0)} \quad (13)$$

上式右辺第1項の n_V の係数、右辺第2項および第3項は空間に対して独立となるので、それぞれを場所に依らないパラメータとして、

$$\kappa \equiv 1 - e^{-\beta(t-t_0)}, \quad c \equiv \left\{1 - e^{-\beta(t-t_0)}\right\} (n_R + n_A) + \beta N_{S0} e^{-\beta(t-t_0)} \quad (14)$$

とおくと、式(13)は次のように表せる。

$$n_W = -\kappa n_V + c \quad (15)$$

ここで、植生内窒素蓄積量 n_V は樹種ごとの材積 v や成長量 $\bar{\alpha}v$ ($\bar{\alpha}$: 平均成長率) に影響を受けると考えられるため、

$$n_V = \sum_i a'_i \bar{\alpha} v_i + \sum_j b'_j v_j \quad (16)$$

として、各樹種 (i および j) ごとの効果を評価することにすれば、式(15)および式(16)より、次式が導かれる。

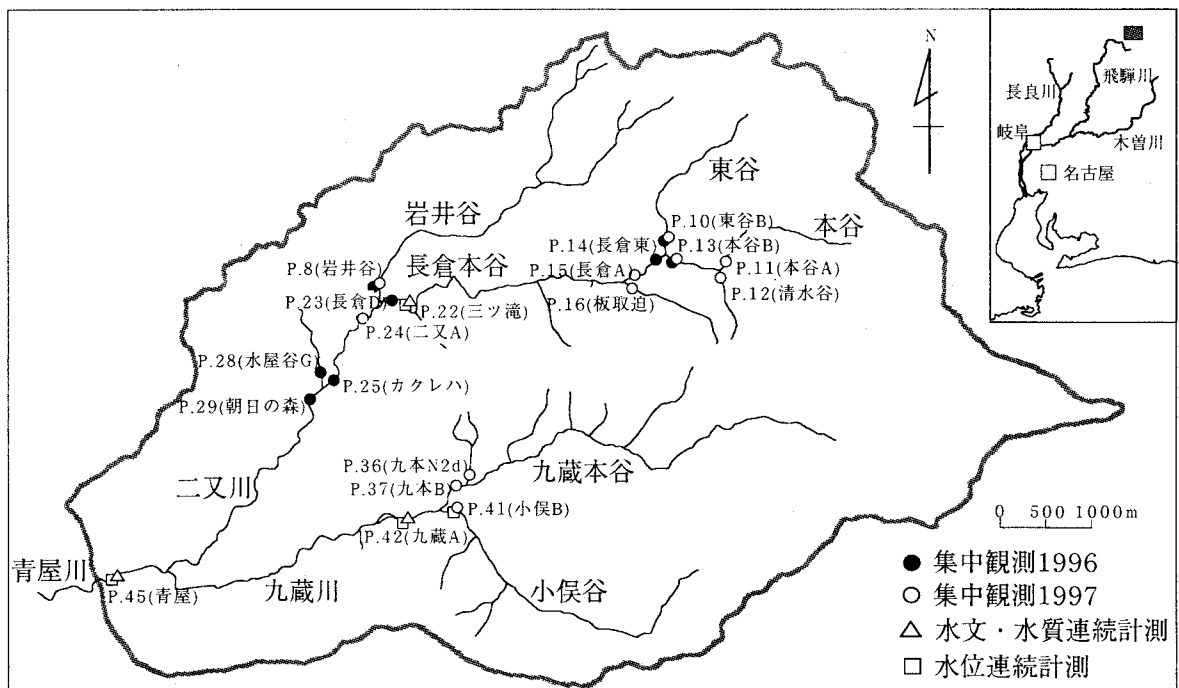


図-3 観測対象流域と水文・水質観測地点

$$n_W = \sum_i a_i \bar{\alpha} v_i + \sum_j b_j v_j + c, \quad a_i \equiv -\kappa a'_i, \quad b_j \equiv -\kappa b'_j \quad \dots \dots \dots (17)$$

以上のように、渓流水中全窒素 n_W を成長量や材積といった植生特性量の関数として表現することにより、植生分布の影響を評価可能になることがわかる。ただし、実際のデータでは、 β , N_{S0} , n_R および n_A が空間的に同じ値となる保証がないため、データ解析および考察において注意を要すると考えられる。

3. 現地観測と植生分布

上述の全窒素収支モデルの適用性を検証するために、岐阜県朝日村内に位置し、近隣での人為的な影響がほとんど存在しないと考えられる木曽川水系飛騨川最上流青屋川流域(約4,500ha)を対象として、現地観測を実施した。なお、この流域内の標高および平均斜面勾配はそれぞれ800.7m～2117.1mおよび0.53である。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、カラマツ(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%)、湿性腐食型弱ポトゾル化土壌(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

図-3は、現地観測対象流域と水文・水質観測地点を示したものである。著者らによる一連の現地観測は1996年5月より2～3週間に1回程度の頻度で定期的に行われている(積雪期を除く)が、ここでは、連続的な流量観測記録が取得された次の3種類の観測を解析対象とする。

- 1) 集中観測1996：1996年9月6日～9日の4日間にわたり、図-3中の●印(8測点)において実施された約3時間間隔の採水および流量計測であり、この期間における流域内平均積算降雨量は75mmであった。
- 2) 集中観測1997：1997年9月21日～26日の6日間にわたり、図-3中の○印(11測点)において実施された2～3時間間隔の採水および流量計測であり、この期間における流域内平均積算降雨量は32mmであった。
- 3) 水文・水質連続観測：1997年9月15日～10月9日の26日間にわたり、図-3中の△印(3測点)において実施された採水(3～12時間間隔)および流量計測(20分間隔)であり、この期間における流域内平均積算降雨量は98mmであった。

なお、図-3には、1997年9月13日～11月27日の75日間にわたり実施された水位連続計測点を□印(4測点)で示してある。

前述の全窒素収支モデルが年単位程度の長期間の窒素変動を表現するものであるのに対し、こうした短期間の観測データでこのモデルを検証するにはかなりの無理があると考えられる。しかしながら、渓流水中全窒素量 n_W

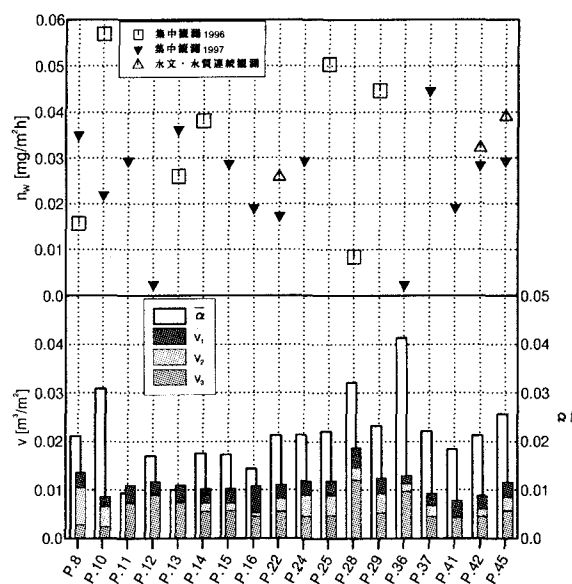


図-4 各観測地点での渓流水中全窒素量 n_W と各観測地点を集水点とする集水域内の樹種別材積 v_k および平均成長率 α

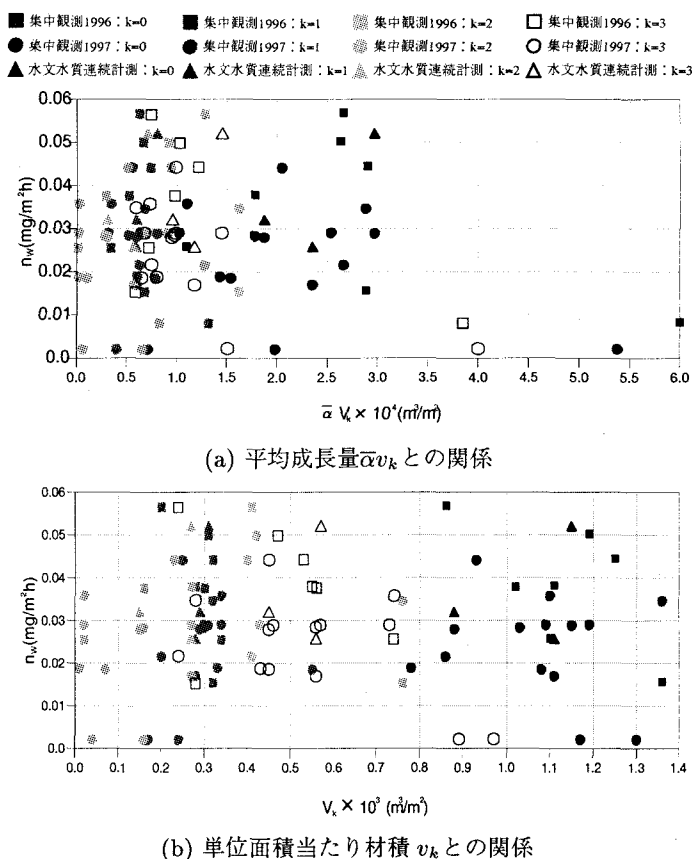


図-5 樹種ごとの植生特性量と渓流水中全窒素量 n_W との関係 ($k=0$: 全樹種, $k=1$: 落葉広葉樹, $k=2$: 落葉針葉樹, $k=3$: 常緑針葉樹)

の場所的相違を植生内窒素蓄積量 n_V を媒介とする植生分布によって評価する上では、観測対象期間が同一ならば、空間的違いに対する考察はある程度まで可能となるとも考えられる。そこで、ここでは、各観測ごとの全窒素負荷量を全期間にわたり積分して得られる単位時間・単位面積当たり全窒素量を考察対象として扱うことにする。図-4の上段は、こうして得られる渓流水中全窒素量 n_W (mg/m³h) を各測点ごとに示したものである。

一方、対象流域内の植生分布特性を明らかにするため、久々野高山営林署より提供された森林管理簿を用いて、国土地理院数値地図情報と同一の 50m メッシュデータとして植生・土壌分布情報を整備した。図-4の下段には、各観測地点を集水点とする集水域内の植生分布情報から算出される樹種別材積 v_k ($k=1, 2, 3$) と平均成長率 α を表す。図中の v_1 , v_2 および v_3 は、それぞれ落葉広葉樹、落葉針葉樹および常緑針葉樹の樹種別材積を示しており、平均成長率は全樹種に関する年間成長率の平均値として求められたものである。

以下では、図-4のように得られた各測点ごとの渓流水中全窒素量 n_W と植生特性量 v_k および α との関係について、前述の全窒素収支モデルを基に考察してみる。

4. モデルの適用性

4.1 植生特性量と渓流水中全窒素との関係

渓流水中全窒素量 n_W に対する植生特性量の影響を評価するためには、前述の式 (17) のパラメータを重回帰分析などにより推定すればよい。ところが、樹種分類を落葉広葉樹、落葉針葉樹および常緑針葉樹の 3 種類にまとめたとしても、有意な推定結果を確保するにはデータ数が不足してしまう。そこで、まず成長量と材積のそれぞれについて主要な影響因子となる樹種を単回帰分析から見いだすことにする。図-5 は、成長量 αv_k および材積 v_k に対する渓流水中全窒素量 n_W の関係を樹種分類ごと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。図-5の (a) の結果より、全樹種の成長量 αv_0 の場合に、他の樹種に比べわずかながら単調現象傾向が強く、渓流水中全窒素量 n_W に対してやや支配的となっているとも考えられる。一方、図-5の (b) では、常緑針葉樹の材積 v_3 に関する単調減少傾向が他の樹種分類に比べて強く、渓流水中全窒素量 n_W への影響が

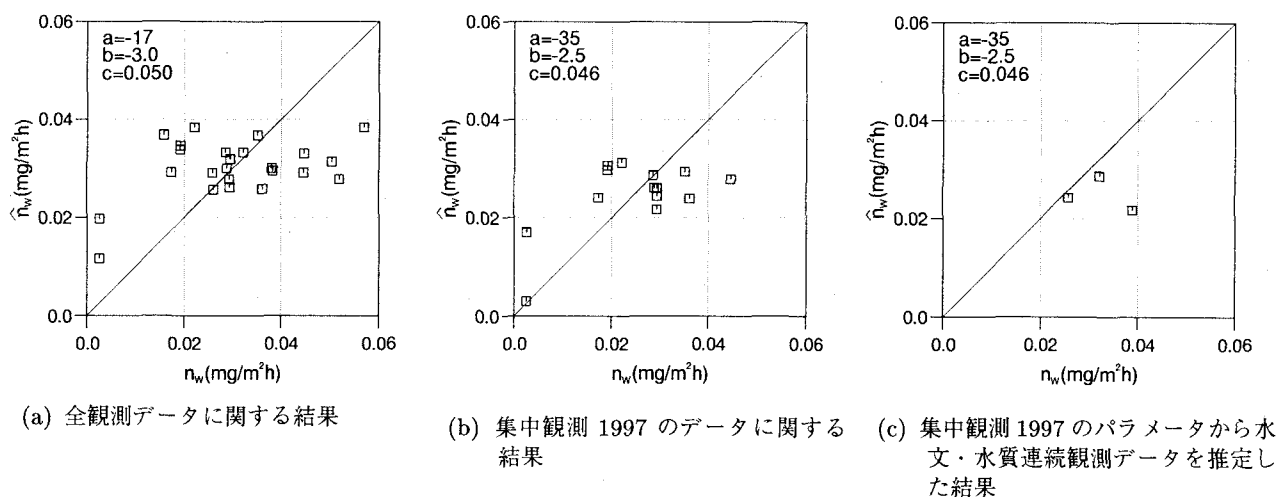


図-6 渓流水中全窒素量 n_W に関する重回帰推定結果の検証

支配的と判断できる。これら両者とも、プロットのばらつきが大きく、明瞭な結果とは言えないものの、短期間の現地観測データから得られた傾向としては興味深いものと思われる。

以上の結果より、渓流水中全窒素量 n_W に対する支配要因として全樹種の成長量 αv_0 および常緑針葉樹の材積 v_3 を採用することにすれば、式 (17) は次のように表示されることになる。

$$n_W = a\alpha v_0 + bv_3 + c \dots\dots\dots (18)$$

4.2 全窒素収支モデルによる渓流水中全窒素の推定結果と考察

式 (18) に基づく渓流水中全窒素量 n_W の推定結果を図-6 に示す。図中の n_W が実測値を、 $\hat{n}_W$ が推定値を表し、式 (18) のパラメータ推定結果も併せて示してある。図-6 の (a) および (b) は、それぞれ全観測データおよび集中観測 1997 のデータに関して、式 (18) による表現の良否を示したものである。式 (18) 中の c を時間に独立なパラメータとして扱っているために、測点ごとの違いを完全には表現しきれていないものの、 $\pm 30\%$ 程度の誤差内で表現できている。一方、図-6 の (c) は、集中観測 1997 のデータから得られるパラメータを用いて水文・水質連続観測における 3 測点での渓流水中全窒素量 n_W を推定した結果を示したものである。これより、時間による相違の影響が入らない場合には、良好な推定結果を得ることができると判断される。

5. 結語

以上、本研究では、森林流域内での窒素収支に及ぼす植生分布の多様性の影響を定量的に評価することのできるモデルを提案するとともに、広範囲な現地森林域での観測結果を用いてモデルの適用性を検証した。データ取得期間が短いために明確な結論付けはできないものの、森林内植生の成長量および材積が大きな集水域ほど植生内部への窒素固定量が多く、渓流水として流出する窒素負荷量が低減される傾向を示すことができた。

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い久々野高山営林署、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) 田村隆雄・吉田弘・端野道夫：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，1998，pp. 229-234.
- 3) 都築克紀・篠田成郎・佐藤嘉則・間野耕司・石川良斗：森林域渓流水中の全窒素濃度と土地被覆状況との関係，土木学会中部支部研究発表会講演概要集，1998，pp. 393-394.
- 4) 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.
- 5) 河田弘：森林土壌学概論，博友社，1989，p. 223.