

ドングリを使った多摩川流域の 環境モニタリングとスペシメン・ライブラリ

2012年

楊 宗興

東京農工大学大学院 共生科学技術研究院 教授

共同研究者：木庭 啓介（東京農工大学）

久保 遙平

林 貴広

ドングリを使った多摩川流域の環境モニタリングと
スペシメン・ライブラリ

研究代表者：楊 宗興 (Yoh, Muneoki)

共同研究者：

木庭啓介 Koba, Keisuke

久保遙平 Kubo, Yohei

林貴広 Hayashi, Takahiro

1. 緒言

窒素は多くの陸上生態系において植物の成長を規定する制限元素である (Vitousek and Howarth 1991 ; LeBauer and Treseder 2008) 。生態系においては、植物遺体の無機化 (有機態窒素→DON→NH₄⁺)、硝化 (NH₄⁺→NO₃⁻)、植物による可給態窒素の吸収という内部循環によって窒素の供給がまかなわれているが、その量は植物が最大の生長を行えるレベルより少なく、したがって、窒素に欠乏した状態にある。このため、森林から流出する渓流水に無機態窒素はふつうきわめて低濃度しか含まれない。しかし、このような森林生態系において、窒素が過剰化する現象が 1980 年代から知られるようになってきた。これは、大気を経由した窒素沈着物の継続的な負荷のために、可給態窒素の供給力が生態系の窒素要求量を越えて増加した状態であり、窒素飽和と呼ばれる (Aber et al. 1989) 。日本や中国においても窒素飽和状態にある森林の報告が続いており、なかでも多摩川中下流域の森林は日本でも最も窒素飽和が顕著に進行している (Ohrui and Mitchell 1997; Yoh et al. 2001) 。

窒素飽和の進捗に伴い、土壌中での窒素ダイナミクスが変化することにより、植物体の窒素安定同位体比が変化することが予想される。そこでこのことを利用し、窒素過剰の程度を判定する新たな指標として植物体の窒素安定同位体比を利用できる可能性があり、これまで国内外で研究が始まっている。

窒素安定同位体自然存在比 ($\delta^{15}\text{N}$ 値) は以下の式で表される。

$$\delta^{15}\text{N} = \left[\left(\frac{R_{\text{sample}}}{R_{\text{atmospheric N}_2}} \right) - 1 \right] \times 1000 \quad (\text{‰})$$

R_{sample} はサンプルの同位体比 ($^{15}\text{N}/^{14}\text{N}$) を、 $R_{\text{atmospheric N}_2}$ は標準試料である大気中の N_2 の同位体比 ($^{15}\text{N}/^{14}\text{N}$) を表す。 $\delta^{15}\text{N}$ 値は標準試料である大気 N_2 に比較して ^{15}N が含まれているのかを相対的に判断することができる。自然界において窒素循環を形成する物理化学的過程および生物的過程はそれぞれ固有の窒素同位体分別能を示すことが知られている (表 1-1) 。

窒素過剰に伴う窒素循環の変化によって生じる窒素安定同位体比の変化として、従来、植物の $\delta^{15}\text{N}$ 値が上昇すると予想されている。すなわち、1) 可給態窒素の増加に伴い、無機化、硝化が促進、2) 同位体比の小さい NO_3^- が生成されることにより、 NH_4^+ プールに ^{15}N が濃縮、3) また、硝化により生成した同位体比の低い NO_3^- は渓流水へ流亡したり、脱窒などガス化することによって失われる結果、生態系に同位体比の高い窒素が濃縮、4) このことにより植物体の $\delta^{15}\text{N}$ 値は上昇する、という機構が想定されるからである (Garten, 1993 ; Emmett et al. 1998 ; Pardo et al. 2006 ; Craine, 2009 ; Cheng et al. 2010) 。

表 1-1 様々な窒素循環過程における分別係数： α
(Hogberg 1997 より引用。一部改変。)

Process	分別係数： α
窒素無機化	≈ 1.000
アンモニア揮散	1.029
アンモニア、アンモニウム、硝酸の拡散	≈ 1.000
硝化	1.015-1.035
脱窒	1.000-1.033
窒素同化	1.000-1.020
窒素固定	0.998-1.002
植物体内における代謝過程	0.980-1.020

しかし一方、Tateno et al. (2005)はブナの葉の $\delta^{15}\text{N}$ 値を正味の硝化速度が小さい斜面上部と正味の硝化速度が大きい斜面下部で比べて、下部の $\delta^{15}\text{N}$ 値の方が低いことを報告している。また、Takebayashi et al. (2010)は中部から関東にかけて窒素可給性（窒素沈着量や渓流水中の NO_3^- 濃度）の増加に伴ってヒノキ針葉の $\delta^{15}\text{N}$ 値が低下することを明らかにしている。そして、これらの変化が生ずるのは、可給態窒素が増加とともに硝化が活発になると、土壤中に同位体比の低い（軽い） NO_3^- が多量に生成され、植物はそのような軽い NO_3^- を主として吸収するようになるために同位体比が低下する、という機構が働くからと結論した。

このように窒素飽和、あるいは窒素可給性の大小により植物体の窒素安定同位体比がどのように変化するかという肝心の点においても、まだ相異なる理論が両立している段階にあり、その指標としてはまだ明確に確立されていない。

そこで本研究では、窒素過剰化に伴い植物体の窒素同位体比がどのように変化するかを明らかにすることを目的とした。また、その試料としては、これまで用いられてきた植物葉に加え、ドングリを用い、その利用可能性を確立することを目指した。葉は樹木の上方についており、高枝切りハサミ等を使用しても入手しにくいのに比べ、ドングリは、林で拾うことで簡単に採取できる。また、取り扱いが容易であることから、将来的に、一般市民や小学生などの協力を得て、広範な試料回収も期待できる。ドングリの $\delta^{15}\text{N}$ 値と窒素飽和の関係性を明らかにすることで、窒素飽和のモニタリング試料としてのドングリの可能性を検討した。また、地域的に、これまで窒素飽和の程度が典型的に変化することがわかっている多摩川流域に加え、それ以外の複数の地域でも葉とドングリの測定を行い、窒素飽和の地域性と同位体比変動機構を検討した。

2. 方法

2.1 調査

本研究では植物試料として、ドングリとその生葉を採取した。ドングリとはブナ科植物の果実の総称である。花が咲いたその年にドングリが成るもの（一年成）と、花が咲いたその翌年にドングリが成るもの（二年成）がある。本研究で対象としたミズナラ（学名：*Quercus crispula*）とコナラ（学名：*Quercus serrata*）はどちらも落葉樹でドングリは一年成である。コナラは北海道西南部、本州、四国、九州に分布し、日当たりのよい山野に自生する。ミズナラは北海道、本州、四国、九州に分布し、山地から亜高山帯にかけて自生する。

本研究ではミズナラの調査地域として3つ、コナラの調査地域として3つ、合計6つの調査地域を選定した（図 2-1）。6つの調査地域の渓流水の硝酸濃度は7.1~155.7 μ Mの範囲である。以下、それぞれの地域について記述する。また、表 2-1 に各地域の標高、年平均気温、年平均降水量、年間の無機態窒素沈着量、渓流水のNO₃⁻濃度を示す。

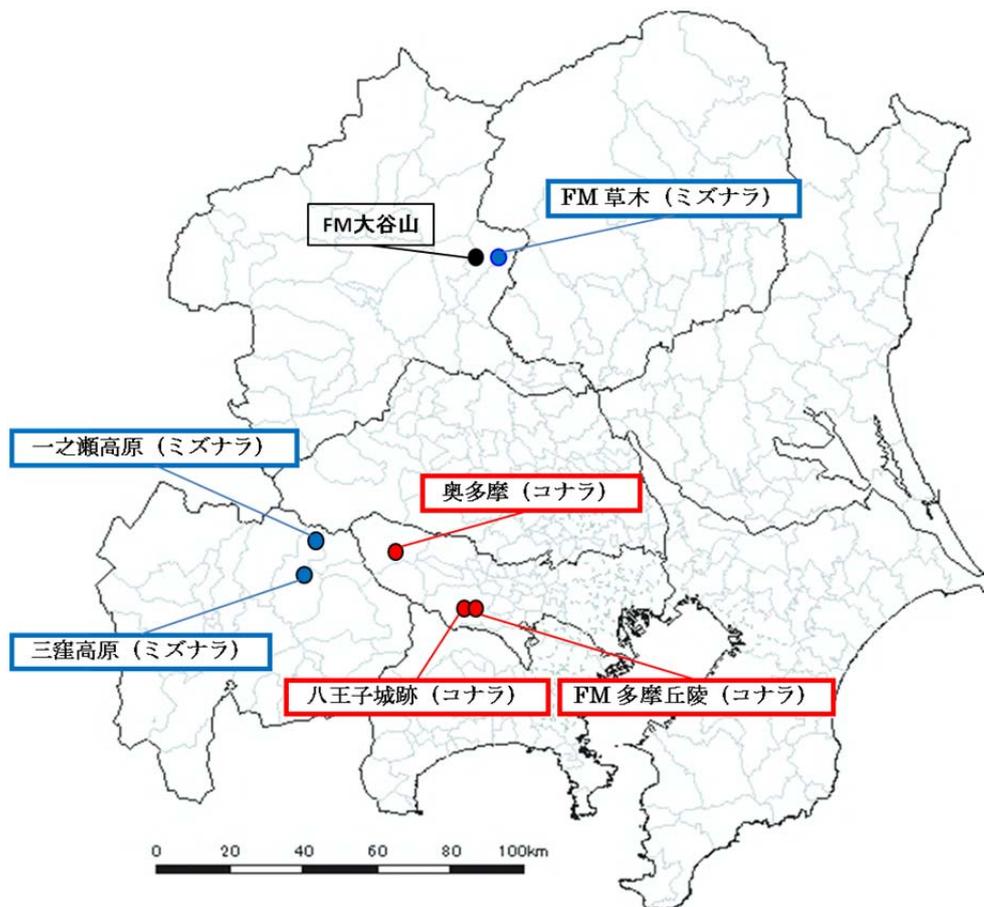


図 2-1 調査地域

2.1.1 三窪高原、一之瀬高原（対象樹種：ミズナラ）

三窪高原も一之瀬高原も山梨県北東部の甲州市に位置する。渓流水の硝酸濃度は他の調査区に比べて低く、三窪高原が $7.1 \mu\text{M}$ 、一之瀬高原が $11.9 \mu\text{M}$ であった。



図 2-2 三窪高原、一之瀬高原の場所

2.1.2 FM 草木（対象樹種：ミズナラ）

FM 草木（東京農工大学農学部附属広域都市圏フィールドサイエンス研究教育センター、フィールドミュージアム草木）群馬県みどり市東町に位置し、横川を主流とする標高 600 - 1140m、面積 415ha の森林集水域である。FM 草木の中で、標高が高く (850m) ミズナラが生い茂っている場所を FM 草木 (上)、標高が低く (750m) 渓流のすぐ脇にある

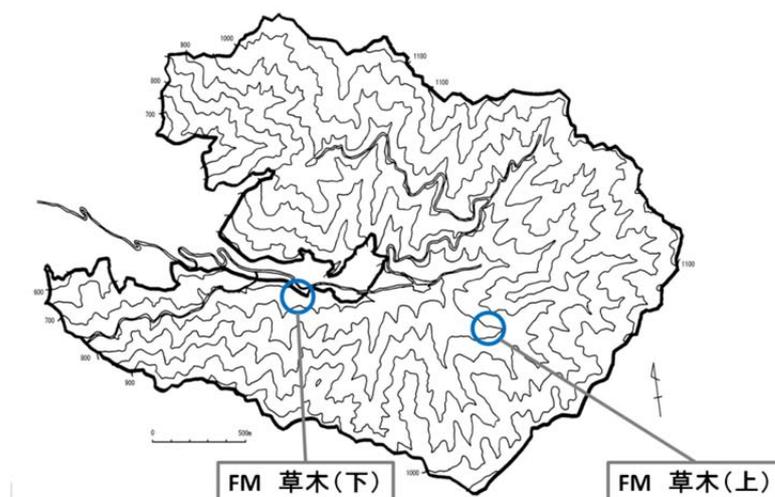


図 2-3 FM 草木内のサンプリング地点
場所を FM 草木 (下) として、2ヶ所でサンプリングを行った。

2.1.3 奥多摩（対象樹種：コナラ）

東京都西多摩群奥多摩町、山梨県北都留群丹波山村、山梨県北都留群小菅村に跨る人造湖である奥多摩湖の湖畔にてサンプリングを行った。この調査区の渓流水の硝酸濃度はサイグチ沢（下図参照）のデータ(62.2 μM)を用いた。



図 2-4 奥多摩のサンプリング地点

2.1.4 八王子城跡（対象樹種：コナラ）

東京都八王子市元八王子町にある八王子城の跡地である。FM 多摩丘陵と同じく、渓流水の硝酸濃度が高い(146.0 μM)。



図 2-5 八王子城跡、FM 多摩丘陵の場所

2.1.5 FM 多摩丘陵 (対象樹種: コナラ)

FM 多摩丘陵 (東京農工大学農学部附属広域都市圏フィールドサイエンス研究教育センター、フィールドミュージアム多摩丘陵) は標高 138 - 184m、敷地面積 12.6ha の森林集水域である。FM 多摩丘陵ではサンプリング場所を 4ヶ所に分けた。タマ 1、タマ 2、タマ 3 は斜面上部の傾斜がほとんどない場所で、タマ斜面は斜面の途中の比較的傾斜が急な場所である。渓流水の硝酸濃度は全調査区の中で一番高い(155.7 μM)。

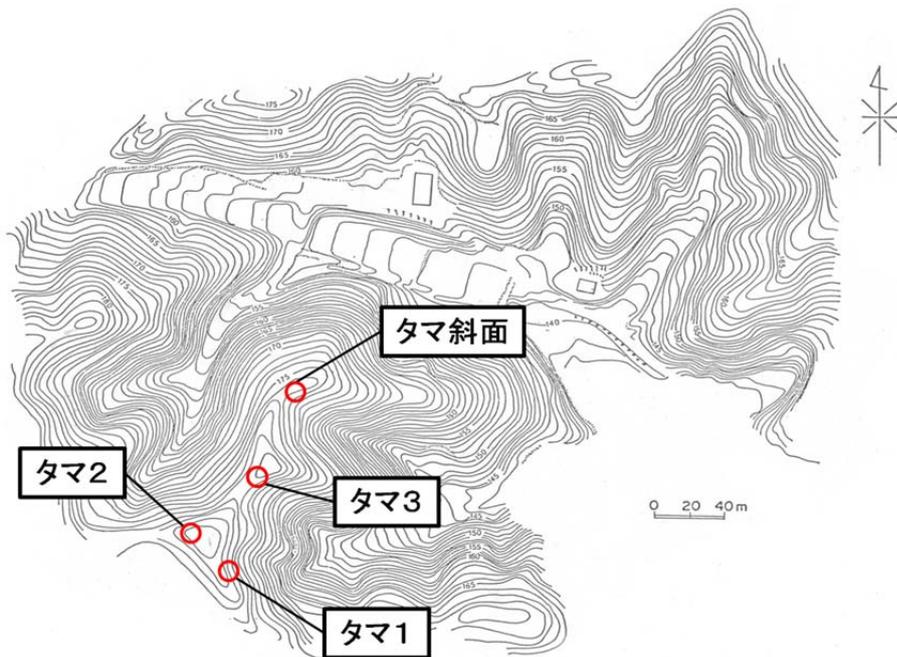


図 2-6 FM 多摩丘陵内のサンプリング地点

2.1.6. 福島

都心からは離れ、窒素制限の条件にあると推測された福島県も試料採取を行った。福島県福島市に近い 3 地点を選定し、それぞれを福島 1、福島 2、福島 3 とした。福島 1 は福島市役所から近い小鳥の森という場所である。福島 2 は福島 1 から直線距離にして約 4km 南下した茶臼森配水池という場所である。福島 3 は国道 114 号と 306 号が交わる近くである。



図 2-7 福島県における調査地点

2. 1. 7. 京都府上賀茂

京都大学附属の上賀茂試験地(京都大学フィールド科学教育研究センター里域ステーション上賀茂試験地)でドングリの採取のみ行った。上賀茂試験地は全国の中でも溪流水中の NO_3^- 濃度が最も低い場所の一つであることが報告されており、また斜面上部では土壌(鈳質土壌0-10 cm)の培養実験で NO_3^- が生成されないことが報告されている(Nakanishi et al. 2009)。調査地はヒノキが優勢している二次林である。サンプリングは斜面上部と下部で、それぞれNakanishi et al. (2009)における‘upper slope’と‘lower slope’の対照区にあたる。この地点の1971-2000年における年間平均気温は14.6℃、年間降水量は1582mmである(Nakanishi et al. 2009)。上賀茂に関するドングリ以外のデータはNakanishi et al. (2009)と竹林(2011)のデータを用いる。

表 2-1 調査地の概要

標高 (m)	年平均気温 (°C)	年平均降水量 (mm)	無機態窒素沈着量 (kg N ha ⁻¹ yr ⁻¹)	渓流水 NO ₃ ⁻ 濃度 (μM)
三窪高原	n. d.	1500-1700 ¹⁾	9.7 ²⁾	7.1 ³⁾
一之瀬高原	n. d.	1500-1700 ¹⁾	9.7 ²⁾	11.9 ³⁾
FM 草木	780-990	9.0 ⁴⁾	1900 ⁴⁾	43.2 ⁴⁾
奥多摩	550	14.3 ⁶⁾	1821 ⁷⁾	62.2 ³⁾
八王子城跡	249	14.8 ⁶⁾	1396 ⁷⁾	146.0 ³⁾
FM 多摩丘陵	158	14.8 ⁶⁾	1396 ⁷⁾	155.7 ³⁾

※n. d. : データなし

- 1) 国土交通省・水資源局 (2002) : 土地保全図 山梨県 付属説明書 1797-1990。
- 2) 古明池・朝来野 (1994) の山梨県一之瀬高原のデータを利用した。
- 3) Fang Y, 未発表のデータを使用した (FM 多摩丘陵は 2006 年 9 月、それ以外は 2010 年 9 月のデータである)。
- 4) 三好 2009 年度修士論文より引用。28 ヶ所の採水点を設け、渓流水の NO₃⁻濃度を測定している。濃度の範囲は 5.7-130.3 μM で、表には平均値を示してある。
- 5) Ohrui and Michell. (1997) の中から、FM 草木の 5 km 西に位置する FM 大谷山のデータを引用した。
- 6) 1998-2008 年における最寄りの気象観測所データの平均値を使用した。最寄りの観測所は奥多摩が「青梅」、八王子城跡と FM 多摩丘陵は「八王子」である。
- 7) 東京都環境科学 HP、2001-2005 年におけるデータの平均値を使用した。奥多摩は「檜原」、八王子城跡と FM 多摩丘陵は「多摩」のデータを使用した。
- 8) Baba M. and Okazaki M. (1995) より引用した。

2.2 サンプルング方法

2.2.1 土壌のサンプルング

採土器と円筒（容積 100ml）を用いて、全ての調査区で鉍質土壌（A 層、0~10cm）を約 5m 間隔で 5ヶ所（奥多摩は 4ヶ所）から採取した。タマ 3 では採土管と円筒を用いずにシャベルを使って目分量で 0~10cm の土壌を採取したので、他のサンプルとは採取した量やサンプルの均質性が異なる恐れがある。そのためタマ 3 の鉍質土壌のデータはそれを考慮して扱うこととする。

土壌サンプルは低温保持して実験室に持ち帰った後、2mm のふるいにかけて根や石を取り除き、5つ（奥多摩は 4つ）の土壌サンプルを均質にするために混ぜた。ふるいにかけて後に 2M KCl 溶液を、生土：2M KCl 溶液=1：10 になるように加え、1 時間 shaker で攪拌（180rpm）した。懸濁液は孔径 0.8 μ m のガラス繊維濾紙（Whatman, GF/F；450°C で 4h 加熱済み）で濾過した後にポリプロピレン製容器に分取した。ここまでの抽出作業を土壌採取後 24 時間以内に行った。抽出液は分析まで冷凍保存（-27°C）した。

また、ふるいにかけて混ぜた後の土壌サンプルを通風乾燥機（65°C、24h）で乾燥させて、後述の土壌の含水率、 δ 15N 値、N 濃度、CN 比の測定に用いた。残りの土壌は、冷蔵庫に低温保存（4°C）しておいた。

2.2.2 葉のサンプルング

土壌をサンプルングした範囲にあるコナラ、ミズナラの木を選び、高枝切りはさみ（3m）を用いて届く範囲でなるべく状態が良い（虫食いが無い、汚れが付いていない）ものを選んで採取した。しかし、どの調査区でもコナラ、ミズナラの樹高が高く、ほとんどが林冠下部の葉であった。

1 本の木から 5 枚の葉を採取、それを 1 サンプルとし、5 本の木から合計 5 サンプルになるように採取した。しかし、奥多摩では 1 本の木から 3 サンプル、三窪高原、草木（下）、タマ 2 では 4 本の木から 4 サンプルしか採取できなかった。また、タマ 3 とタマ斜面では高枝切りはさみが届く範囲に葉がなかったため、風雨等の影響で落下したと思われる落ち葉の中で変色しておらず分解が進んでいないものを選び採取した。その結果タマ 3 では 2 サンプル、タマ斜面では 4 サンプルとなった。

また、多摩丘陵にある高さ 18m のタワーを使用し、コナラの葉を高度別に、4m、9m、11m、13m、15m、17m で採取した。

採取した葉は超純水で表面と裏面を洗って汚れを落とし、乾燥機（65°C、24h）で乾燥させた。

2.2.3 ドングリのサンプルング

土壌と葉を採取した木の周辺に落ちているドングリの中でできる限り状態の良い（虫食いが無い、分解が進んでいない、表面に汚れが無い）ものを選んで採取した。採取し

たドングリは低温保持して実験室に持ち帰った後、超純水で洗い、水気を切った後に果皮（殻）と種子（中身）に分けた。この時、状態の悪いドングリはサンプルから取り除くようにした。殻と中身に分けた後に乾燥機（65°C、24h）で乾燥させた。

5個のドングリを混ぜ合わせて1サンプルとすることにし、1つのサイトにつき5サンプル、合計25個のドングリを採取した。しかし、調査を行った年は全国的にドングリが不作だったこともあり、5サンプル分のドングリを採取できたサイトは、八王子城跡とタマ3、タマ斜面のみであった。草木（上）は1個で1サンプル、草木（下）、一之瀬は2サンプル、三窪、奥多摩、タマ1、タマ2は1サンプルである。特に草木（上）は1個しかドングリが拾えなかったため、データの扱いも参考程度にとどめる。

2.3 分析方法

2.3.1 土壌 pH (H₂O) の測定

まず乾土 10g 相当量の生土に対して水分量が 25ml になるように超純水を加えてかき混ぜて、1 時間以上放置した。その後、校正を行った pH 計（TOA・DKK HM-30G）で測定した。測定は 2 連で行い、その平均値をその地点の pH とした。

2.3.2 NH₄⁺、NO₃⁻濃度の測定

土壌抽出液中の NH₄⁺濃度はインドフェノール青吸光光度法（Keeney et al., 1982）により測定した。吸光度の測定には吸光光度計（SHIMADZU UVmini-1240）を用いた。土壌抽出液中の NO₃⁻濃度は TRAACS auto analyzer (BLTEC) により測定した（Sparks, 1996）。土壌抽出液は 2M KCl で抽出しているため、それぞれの測定に用いたスタンダードは 2M KCl を用いて作成した。土壌抽出液は冷凍保存していたものを、前日から常温で解凍してから測定に用いた。

2.3.3 土壌、葉、ドングリの δ¹⁵N 値 (‰)、N 濃度 (%)、C/N 比の測定

2.2.1、2.2.2、2.2.3 で述べたようにして乾燥させた土壌、葉、ドングリをボールミル（レッチェ MM-200）によって粉碎し、サンプルが均質になるようにした。粉碎試料はガラスバイアルに入れて常温にて保管した。土壌、葉、ドングリの δ¹⁵N 値、N 濃度、C/N 比は自動元素分析計（Thermo Finnigan Flash EA 1112 Conflo III）を接続した安定同位体比測定用質量分析計（Finnigan Delta plus XP）、通称 EA-IRMS を用いて測定した。土壌サンプルと葉サンプルは 2 連で、ドングリサンプルは殻を 3 連、中身を 5 連で測定し、結果には平均値を用いた。スタンダードには、DL-アラニン（δ¹⁵N = -1.7‰）、グリシン（δ¹⁵N = 10.0‰）、ヒスチジン（δ¹⁵N = -8.0‰）を用いた。分析精度は < 0.2‰ である。

2.4 統計処理

ドングリの $\delta^{15}\text{N}$ 値と葉の $\delta^{15}\text{N}$ 値の関係、葉およびドングリの $\delta^{15}\text{N}$ 値と諸要因の関係についてはピアマンの順位相関係数を求めた。また主成分得点と葉およびドングリの $\delta^{15}\text{N}$ 値の関係をピアソンの相関係数から求めた。各調査地で葉の $\delta^{15}\text{N}$ 値とドングリの $\delta^{15}\text{N}$ 値に有意な差があるかどうかを t 検定により求めた。ドングリの $\delta^{15}\text{N}$ 値を様々な要因で説明するために、またどの要因がドングリの $\delta^{15}\text{N}$ 値により強い関係を持っているのかを重回帰分析により求めた。回帰モデルの説明変数は、ステップワイズ法（前進選択）により選択した。さらに、葉およびドングリの $\delta^{15}\text{N}$ 値に関係のある様々な要因を総合的に表すために、主成分分析による主成分の抽出を試みた。全ての統計処理は統計処理ソフトである SPSS を用いて行った。重回帰分析と主成分分析について簡単に説明する。

(a) 重回帰分析

重回帰分析とは多変量解析の一つで目的変数を複数の説明変数により予測する手法である。この手法によりどの説明変数がどの程度目的変数に影響を与えているのかを知ることができる。説明変数を与える影響は説明変数にかかっている係数によって表され、その係数のことを偏回帰係数という。説明変数同士で単位が異なる場合は、標準偏回帰係数を用いる。これは各説明変数内の数値の標準化（平均値 0、分散 1）をした後に重回帰分析を行って求められるものである。求められた係数が有意な係数（ゼロでない係数）かどうかを t 検定により検定される。分析の結果得られた回帰式がどれだけデータに適合しているかを知る指標として R^2 がある。これは決定係数と呼ばれ、データ全体の散らばりと（平均値と観測値の分散）、予測値の散らばり（回帰式上の予測値と平均値の分散）の比をとったもので、0 から 1 の範囲をとる数値である。 R^2 が 1 に近いほどその回帰式の当てはまりは良いと言える。しかし R^2 は説明変数が多ければ多いほど高くなるという性質を持つため、その影響を補正した自由度調整済み R^2 というものが当てはまりの良さの指標として示される。また R^2 は分散分析によりその有意性が検定される。多数の説明変数から回帰式に用いる説明変数を選ぶ方法はいくつかあるが、最も標準的なものがステップワイズ法である。ステップワイズ法とは、説明変数をひとつずつ加えたり削ったりして最適な回帰モデルを選択するものである。重回帰分析では多重共線性という問題がしばしば発生する。独立変数の中に相互に相関係数の高い独立変数のペアがある場合、これらの独立変数の間には多重共線性があるという。多重共線性が発生した場合、わずかな値の変動で予測値が大きくずれてしまうことなどがあるため注意が必要である。多重共線性が発生していないかどうかを確認するための指標に VIF（分散拡大係数）というものがある。厳密な基準値は決まっていないが VIF の値が大きい時（10 以上）には多重共線性の疑いがあるとされる。

(b) 主成分分析

主成分分析とは複数の変数に重みをつけ、出来るだけ情報の損失を少なくして少数個の総合的指標（主成分）に集約する統計的手法である。例えば、主成分を Z 、変数 1 を X_1 、変数 2 を X_2 とすると、主成分 Z は

$$Z=a_1X_1+a_2X_2$$

と表される。主成分分析の目的は主成分 Z が何を表すのか読み取り、分析に用いることである。主成分をもとにケースごと（例えば調査地 1 と調査地 2）の主成分の値がどのようになるか計算したものを主成分得点という。主成分得点を求めることで主成分にもとづいたケースごとの順位を決めることができる。求めた主成分で表現できている元の分散の割合を寄与率といい、主成分の重みを表す固有値をもとに求められる。寄与率が小さい場合には、求めた主成分と直交する方向で、分散最大の「第 2 主成分」を求めていく。最大で、(変数の数-1)個の主成分が抽出されるが、固有値が 1 以上の主成分や累積の寄与率が 80%を超えたところまでの主成分を選択するのが通常である。主成分分析には分散・共分散行列による方法と相関行列による方法の 2 つの方法があるが、変数同士の単位が異なる場合には数値を標準化して分析をする相関行列を用いる。

3. 結果

3.1 土壌の特徴

表 3-1 に各調査区における鉍質土壌 (A 層 0~10cm) の含水率、pH (H₂O) 、全窒素濃度、C/N 比、 $\delta^{15}\text{N}$ 値を示す。表 3-2 に鉍質土壌中の $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 濃度、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 濃度、DIN 濃度、DIN 濃度に対する $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 濃度の割合を示す。なおここでは DIN 濃度を $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 濃度と $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 濃度を足したものとして表している。

含水率は全調査区で 23.4~59.0 % の範囲であった。pH は全調査区で 4.2~6.5 の範囲であった。草木下、奥多摩、八王子は、それぞれ 6.1、6.5、5.6 という他の調査区より比較的高い値を示した。全窒素濃度は一之瀬で 1.1 %、三窪で 1.2 %、その他の調査区では 1.0 % 以下であった。C/N 比は草木下と奥多摩でそれぞれ 8.8、9.8 という他の調査区より比較的低い値を示した。 $\delta^{15}\text{N}$ 値はタマ 3 と奥多摩でそれぞれ 0.3 ‰、1.1 ‰ という相対的に低い値、八王子で 3.9 ‰ という相対的に高い値を示した。

鉍質土壌中の $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 濃度は全調査区で 1.33~8.37 $\mu\text{g N/g dw}$ の範囲で、特にタマ 3 で高い濃度を示している。 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 濃度は全調査区で 0.11~10.71 $\mu\text{g N/g dw}$ の範囲で、特に FM 多摩丘陵の調査区で高い値を示している。タマ 1、タマ 2、タマ斜面を除いた調査区においては、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 濃度が $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 濃度より高い。それは DIN 濃度に対する $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 濃度の割合を見ても明らかである。DIN 濃度は全調査区で 1.44~14.99 $\mu\text{g N/g dw}$ の範囲で、特に FM 多摩丘陵の調査区で高い値である。

表 3-1 各調査区における鉍質土壌の特徴

調査区	対象樹種	含水率 (%)	pH (H ₂ O)	全窒素濃度 (%)	C/N 比	$\delta^{15}\text{N}$ 値 (mean \pm SE ‰)
一之瀬	ミズナラ	51.8	4.9	1.1	13.8	2.4 \pm 0.01
三窪	ミズナラ	57.7	4.6	1.2	14.7	2.7 \pm 0.08
草木下	ミズナラ	36.9	6.1	0.5	8.8	2.2 \pm 0.01
草木上	ミズナラ	59.0	4.6	1.0	19.3	2.1 \pm 0.07
奥多摩	コナラ	23.4	6.5	0.4	9.8	1.1 \pm 0.17
八王子	コナラ	46.8	5.6	0.6	18.5	3.9 \pm 0.20
タマ 1	コナラ	31.7	4.6	0.3	16.2	2.4 \pm 0.02
タマ 2	コナラ	28.1	4.2	0.2	16.2	2.1 \pm 0.03
タマ 3	コナラ	29.7	4.7	0.4	18.5	0.3 \pm 0.14
タマ斜面	コナラ	28.1	4.8	0.2	16.4	2.6 \pm 0.13
福島	コナラ	31.7	4.9	0.6	10.9	1.0 \pm 0.4

表 3-2 各調査区における鉍質土壌中の無機態窒素濃度

調査区	対象樹種	NH ₄ ⁺ -N (μg N/g dw)	NO ₃ ⁻ -N (μg N/g dw)	DIN (μg N/g dw)	NO ₃ ⁻ -N/DIN (%)
一之瀬	ミズナラ	1.33	0.11	1.44	7.7
三窪	ミズナラ	3.56	0.22	3.78	5.9
草木下	ミズナラ	1.53	0.11	1.64	6.7
草木上	ミズナラ	4.06	0.40	4.46	9.1
奥多摩	コナラ	1.38	0.17	1.55	10.9
八王子	コナラ	3.31	0.16	3.47	4.6
タマ1	コナラ	3.32	6.60	9.92	66.6
タマ2	コナラ	1.83	10.71	12.54	85.4
タマ3	コナラ	8.37	6.62	14.99	44.2
タマ斜面	コナラ	1.36	2.37	3.72	63.5
福島1	コナラ	16.3	0.1	16.5	1.1
福島2	コナラ	11.3	ND	11.3	ND
福島3	コナラ	9.2	ND	9.3	ND

※dw: dry weight

3.2 鉍質土壌中の無機態窒素濃度と渓流水の硝酸濃度の関係

渓流水の硝酸濃度と土壌中の無機態窒素濃度の関係をスピアマンの順位相関係数で示す(表 3-3)。有意な関係がみられたものを図 3-1 に示す。NO₃⁻-N 濃度と DIN 対する NO₃⁻-N の割合が渓流水の硝酸濃度と有意な正の相関関係にあった。また有意な関係ではなかったが、DIN 濃度と渓流水の硝酸濃度との間に正の相関関係がみられた

表 3-3 鉍質土壌中の無機態窒素濃度と渓流水の硝酸濃度の関係
(スピアマンの順位相関係数)

	NH ₄ ⁺ -N (μg N/g dw)	NO ₃ ⁻ -N (μg N/g dw)	DIN (μg N/g dw)	NO ₃ ⁻ -N/DIN (%)
Stream NO ₃ ⁻	0.10	0.74*	0.58	0.76*

※ * は有意水準 5% (P<0.05) で有意な相関があることを表す。

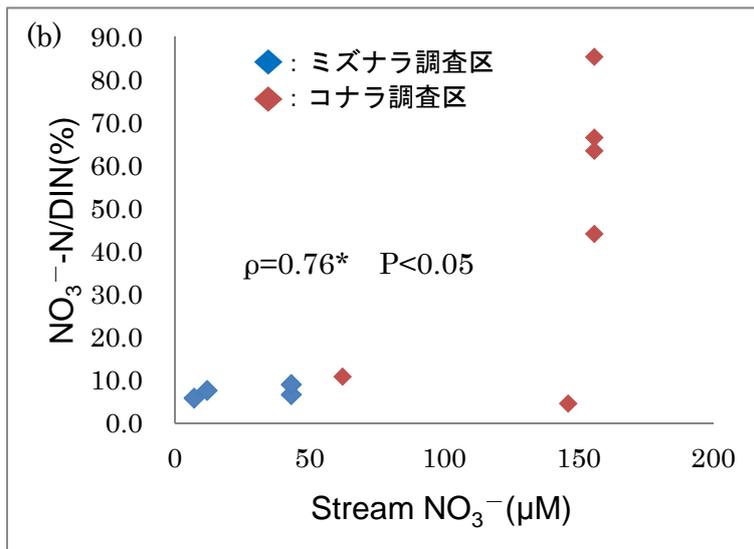
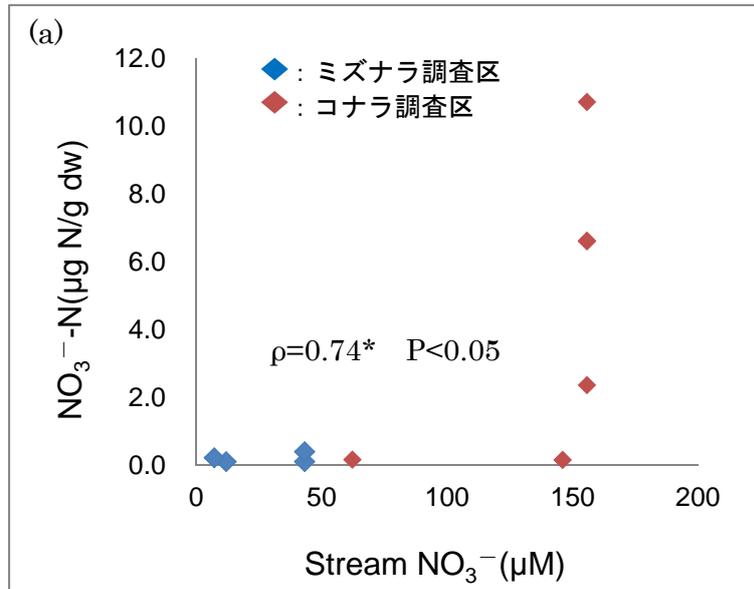


図 3-1 渓流水の硝酸濃度と無機態窒素の関係

(a) 渓流水の硝酸濃度と NO_3^- -N 濃度 の関係

(b) 渓流水の硝酸濃度と NO_3^- -N/DIN の関係

3.3 葉の特徴

各調査地の葉の $\delta^{15}\text{N}$ 値(‰)、全窒素濃度(%)、C/N比を表3-4に示す。ミズナラの $\delta^{15}\text{N}$ 値は-2.7~-1.3 ‰、コナラの $\delta^{15}\text{N}$ 値は-3.4~-0.7 ‰の範囲であった。ミズナラの $\delta^{15}\text{N}$ 値は草木上で一番低く(-2.7‰)、コナラの $\delta^{15}\text{N}$ 値は八王子とタマ3で一番低かった。ミズナラの全窒素濃度は2.0~2.3%、コナラの全窒素濃度は1.7~1.9%の範囲であった。ミズナラのC/N比は19.7~26.6、コナラのC/N比は28.1~32.3の範囲であった。

表3-4の一之瀬と三窪を「山梨」、草木下と草木上を「草木」、タマ1~タマ斜面を「FM多摩丘陵」として、 $\delta^{15}\text{N}$ 値について調査地域ごとにまとめ直したものを表3-5に示す。全調査地域の中で奥多摩の $\delta^{15}\text{N}$ 値が一番高い。次いで山梨、草木、FM多摩丘陵、八王子の順に低い値である。また、FM多摩丘陵の $\delta^{15}\text{N}$ 値は-3.4~-2.5 ‰で、分散(不偏分散)は0.21(n=15)であった。

表3-4 葉の $\delta^{15}\text{N}$ 値、全窒素濃度、C/N比(調査区)

調査区	対象樹種	n	$\delta^{15}\text{N}$ 値(mean±SE ‰)	全窒素濃度 (%)	C/N比
一之瀬	ミズナラ	5	-2.2±0.47	2.1	25.8
三窪	ミズナラ	4	-1.4±0.66	2.0	26.6
草木下	ミズナラ	4	-1.3±0.62	2.6	19.7
草木上	ミズナラ	5	-2.7±0.08	2.3	23.0
奥多摩	コナラ	3	-0.7±0.06	1.9	28.5
八王子	コナラ	5	-3.4±0.26	1.7	32.3
タマ1	コナラ	5	-2.5±0.16	1.9	28.1
タマ2	コナラ	4	-3.3±0.20	1.9	29.3
タマ3	コナラ	2	-3.4±0.05	1.7	31.3
タマ斜面	コナラ	4	-3.1±0.06	1.9	29.7
福島1	コナラ		-4.0±0.0	2.4	20.2
福島2	コナラ		-2.3±0.6	2.6	18.6
福島3	コナラ		-2.6±0.5	2.3	20.6
上賀茂	コナラ		-6.1±0.0	2.3	20.8

※nはサンプル数

表 3-5 葉の $\delta^{15}\text{N}$ 値 (調査地域)

※n はサンプル数

調査地域	対象樹種	n	$\delta^{15}\text{N}$ 値 (mean \pm SE ‰)
山梨	ミズナラ	9	-1.7 \pm 0.41
草木	ミズナラ	9	-2.1 \pm 0.36
奥多摩	コナラ	3	-0.7 \pm 0.06
八王子	コナラ	5	-3.4 \pm 0.26
FM 多摩丘陵	コナラ	15	-3.0 \pm 0.12

3.4 ドングリの特徴

ドングリのデータについてはドングリの中身の測定結果のみを示す。殻は分解などの外部からの影響を中身より受けやすいこと、中身よりも燃えにくく EA-IRMS を用いた測定において良い精度でデータが得られなかったことが理由である。

表 3-6 にドングリの $\delta^{15}\text{N}$ 値 (‰)、全窒素濃度 (%)、C/N 比を示す。ミズナラの $\delta^{15}\text{N}$ 値は-2.2~-1.4 ‰、コナラの $\delta^{15}\text{N}$ 値は-3.5~-0.2 ‰の範囲であった。ミズナラに関しては草木上で相対的に低い値 (-2.2 ‰) を、コナラに関しては奥多摩で相対的に高い値 (-0.2 ‰) を示している。

表 3-6 の一之瀬と三窪を「山梨」、草木下と草木上を「草木」、タマ 1~タマ斜面を「FM 多摩丘陵」として、 $\delta^{15}\text{N}$ 値について調査地域ごとにまとめ直したものを表 3-7 に示す。調査地域で比べてみると、奥多摩で相対的に高い値 (-0.2 ‰) を、FM 多摩丘陵で相対的に低い値 (-2.4 ‰) を示している。また FM 多摩丘陵の $\delta^{15}\text{N}$ 値は-3.5~-2.1 ‰の範囲で、分散 (不偏分散) は 0.22 (n=12) であった。

表 3-6 ドングリの $\delta^{15}\text{N}$ 値、全窒素濃度、C/N 比 (調査区)

調査区	対象樹種	n	$\delta^{15}\text{N}$ 値 (mean \pm SE ‰)	全窒素濃度 (%)	C/N 比
一之瀬	ミズナラ	2	-1.5 \pm 0.00	0.7	60.6
三窪	ミズナラ	1	-1.5	0.5	89.2
草木下	ミズナラ	2	-1.4 \pm 0.00	1.1	38.8
草木上	ミズナラ	1	-2.2	0.9	45.8
奥多摩	コナラ	1	-0.2	1.0	41.6
八王子	コナラ	5	-1.8 \pm 0.08	0.9	51.1
タマ1	コナラ	1	-3.5	0.7	66.7
タマ2	コナラ	1	-2.9	0.7	61.4
タマ3	コナラ	5	-2.3 \pm 0.09	0.8	56.7
タマ斜面	コナラ	5	-2.1 \pm 0.07	1.2	36.9
福島1	コナラ		-2.0 \pm 0.8		
福島2	コナラ		-2.6 \pm 0.5		
福島3	コナラ		-1.6 \pm 0.8		
上賀茂	コナラ		-6.7 \pm 0.1		

※ 三窪、草木上、奥多摩、タマ1、タマ2はサンプル数が1なので標準誤差 (SE) を示していない。nはサンプル数。

表 3-7 ドングリの $\delta^{15}\text{N}$ 値 (調査地域)

調査地域	対象樹種	n	$\delta^{15}\text{N}$ 値 (mean \pm SE ‰)
山梨	ミズナラ	3	-1.5 \pm 0.00
草木	ミズナラ	3	-1.7 \pm 0.27
奥多摩	コナラ	1	-0.2
八王子	コナラ	5	-1.8 \pm 0.08
FMタマ丘陵	コナラ	12	-2.4 \pm 0.13

※奥多摩はサンプル数が1なので標準誤差 (SE) を示していない。nはサンプル数。

3.5 葉の $\delta^{15}\text{N}$ 値とドングリの $\delta^{15}\text{N}$ 値の関係

葉とドングリを関係を表 3-8、表 3-9、図 3-2(a) (b) に示した。

表 3-8 には各調査区における葉およびドングリの $\delta^{15}\text{N}$ 値の平均値を表 3-4 と表 3-6 をもとにまとめ直したものである。各調査地で葉の $\delta^{15}\text{N}$ 値とドングリの $\delta^{15}\text{N}$ 値がど

れだけ違うのかを示すために、右端に葉の $\delta^{15}\text{N}$ 値からドングリの $\delta^{15}\text{N}$ 値を引いた値の絶対値を載せた。またドングリのサンプル数が1つしかない調査区（三窪、奥多摩、タマ1、タマ2）を除いた調査区でt検定を行い、各調査区内で葉の $\delta^{15}\text{N}$ 値とドングリの $\delta^{15}\text{N}$ 値に有意な差があるかどうか確認した。有意な差があったものには「*」マークを数字の右上につけた。八王子、タマ3、タマ斜面で有意な差があった。

表3-9には葉の $\delta^{15}\text{N}$ 値とドングリの $\delta^{15}\text{N}$ 値のスピアマンの順位相関係数（ ρ ：ロー）を示した。コナラを対象とした調査区（奥多摩、八王子、FM多摩丘陵）を「コナラ」、ミズナラを対象にした調査区（一之瀬、三窪、草木上、草木下）を「ミズナラ」、コナラとミズナラを区別しないで一緒にしたものを「コナラ+ミズナラ」と表記してある。これ以降は、「コナラ」、「ミズナラ」、「コナラ+ミズナラ」という表記を上記の意味で扱うこととする。表3-8のコナラ調査区ではドングリの $\delta^{15}\text{N}$ 値と葉の $\delta^{15}\text{N}$ 値の相関係数は小さく、有意な相関はない。ミズナラ調査区ではドングリの $\delta^{15}\text{N}$ 値と葉の $\delta^{15}\text{N}$ 値の相関係数は1に近いが、有意な相関はない。コナラ調査区とミズナラ調査区を合わせたコナラ+ミズナラ調査区では相関係数が0.69で、有意な相関がある（ $P=0.028$ ）。

図3-2(a)はコナラ調査区とミズナラ調査区におけるドングリの $\delta^{15}\text{N}$ 値と葉の $\delta^{15}\text{N}$ 値の関係を図示したものである。図3-2(b)はコナラ+ミズナラ調査区における同様の関係を図示したものである。ミズナラ調査区でもコナラ調査区でもドングリの $\delta^{15}\text{N}$ 値と葉の $\delta^{15}\text{N}$ 値は正の相関関係にある。最小二乗法による回帰直線の傾きはミズナラ調査区で約0.4、コナラ調査区で約0.7であった。コナラ+ミズナラ調査区では最小二乗法による回帰直線の傾きは約0.6であった。

表3-8 葉およびドングリの $\delta^{15}\text{N}$ 値

	対象樹種	$\delta^{15}\text{N}$ 値(mean±SE ‰)		葉 - ドングリ
		葉	ドングリ	
一之瀬	ミズナラ	-2.2±0.47	-1.5±0.00	0.7
三窪	ミズナラ	-1.4±0.66	-1.5	0.1
草木下	ミズナラ	-1.3±0.62	-1.4±0.00	0.1
草木上	ミズナラ	-2.7±0.08	-2.2	0.5
奥多摩	コナラ	-0.7±0.06	-0.2	0.5
八王子	コナラ	-3.4±0.26	-1.8±0.08	1.6**
タマ1	コナラ	-2.5±0.16	-3.5	1.0
タマ2	コナラ	-3.3±0.20	-2.9	0.4
タマ3	コナラ	-3.4±0.05	-2.3±0.09	1.1**
タマ斜面	コナラ	-3.1±0.06	-2.1±0.07	1.0**

※値は全て平均値±標準誤差で示してある

**は有意水準1%（ $P<0.01$ ）で有意な違いがあることを表す。

表 3-9 ドングリの $\delta^{15}\text{N}$ 値と葉の $\delta^{15}\text{N}$ 値のスピアマンの順位相関係数 (ρ : ロー)

		葉 $\delta^{15}\text{N}$ 値
コナラ (n=6)	ドングリ $\delta^{15}\text{N}$ 値	0.09
ミズナラ (n=4)	ドングリ $\delta^{15}\text{N}$ 値	0.94
コナラ+ミズナラ (n=10)	ドングリ $\delta^{15}\text{N}$ 値	0.69*

※ * は有意水準 5% ($P < 0.05$) で有意な相関があることを表す。n はサンプル数

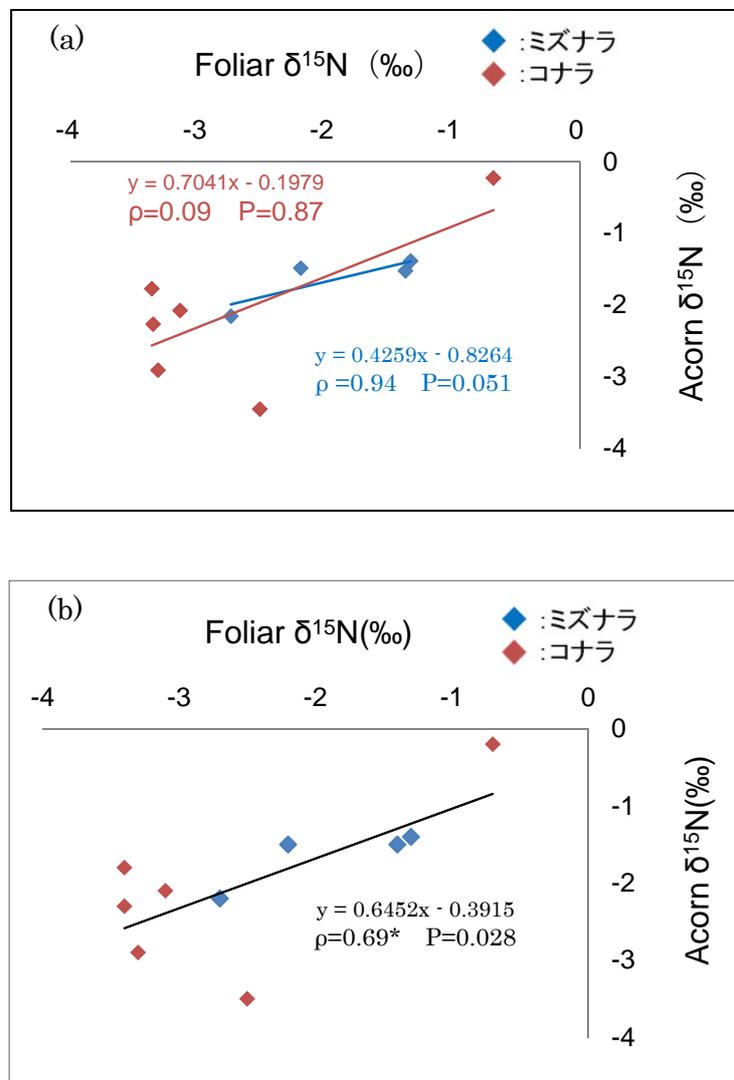


図 3-2 ドングリの $\delta^{15}\text{N}$ 値と葉の $\delta^{15}\text{N}$ 値の関係

(a) 樹種の区別をした場合のドングリの $\delta^{15}\text{N}$ 値と葉の $\delta^{15}\text{N}$ 値の関係

(b) 樹種の区別をしない場合のドングリの $\delta^{15}\text{N}$ 値と葉の $\delta^{15}\text{N}$ 値の関係

3.6 葉およびドングリの $\delta^{15}\text{N}$ 値と諸要因の関係

土壌の様々な要因と葉およびドングリの $\delta^{15}\text{N}$ 値の関係をスピアマンの順位相関係数として表 3-10 に示す。コナラ調査区に関しては、ドングリの $\delta^{15}\text{N}$ 値と有意な相関関係にあるのは、 $\text{NO}_3^- \text{-N/DIN}(\%)$ で、葉の $\delta^{15}\text{N}$ 値と有意な相関関係にあるのは CN 比である。ミズナラに関しては葉の $\delta^{15}\text{N}$ 値やドングリの $\delta^{15}\text{N}$ 値と有意な相関関係にある土壌要因はなかった。コナラ+ミズナラ調査区に関しては、ドングリの $\delta^{15}\text{N}$ 値と有意な相関関係にあるのは pH(H_2O)、CN 比、 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 濃度、DIN 濃度、 $\text{NO}_3^- \text{-N/DIN}$ で、葉の $\delta^{15}\text{N}$ 値と有意な相関関係にあるのは、CN 比である。コナラ+ミズナラ調査区においてドングリや葉の $\delta^{15}\text{N}$ 値と土壌の様々な要因との間に有意な相関関係が多い。コナラ+ミズナラ調査区において、ドングリの $\delta^{15}\text{N}$ 値と有意な相関関係があったものを図 3-3 (a)-(e) に示す。

標高、渓流水の NO_3^- 濃度、窒素沈着量と葉およびドングリの $\delta^{15}\text{N}$ 値の関係をスピアマンの順位相関係数として表 3-11 に示す。コナラ調査区ではドングリの $\delta^{15}\text{N}$ 値と標高および渓流水の NO_3^- 濃度との間に有意な相関関係がみられた。ミズナラ調査区では有意な関係性は見られなかった。コナラ+ミズナラ調査区では葉の $\delta^{15}\text{N}$ 値と有意な相関関係にあるのは窒素沈着量でドングリの $\delta^{15}\text{N}$ 値と有意な相関関係にあるのは標高、渓流水の NO_3^- 濃度、窒素沈着量である。コナラ+ミズナラ調査区において、ドングリの $\delta^{15}\text{N}$ 値と有意な相関関係があったものを図 3-4(a)-(c) に示す。

表 3-10 土壌の様々な要因と葉およびドングリの $\delta^{15}\text{N}$ 値の関係

	含水率 (%)	pH (H ₂ O)	$\delta^{15}\text{N}$ (‰)	N 濃度 (%)	CN 比	NH ₄ ⁺ -N 濃度 ($\mu\text{g N/g dw}$)	NO ₃ ⁻ -N 濃度 ($\mu\text{g N/g dw}$)	DIN 濃度 ($\mu\text{g N/g dw}$)	NO ₃ ⁻ -N/DIN (%)
コナラ	-0.32	0.94	0.09	0.53	0.00	-0.49	-0.77	-0.77	-0.83*
(n=6)	0.20	0.20	-0.12	-0.31	-0.90*	-0.49	-0.15	-0.49	0.20
ミズナラ	-0.95	0.83	0.32	-0.32	-0.95	-0.63	-0.83	-0.63	-0.63
(n=4)	-0.80	0.63	0.40	-0.20	-0.80	-0.40	-0.63	-0.40	-0.80
コナラ	0.07	0.78**	0.11	0.49	-0.65*	-0.49	-0.83**	-0.85**	-0.66*
+									
ミズナラ	0.04	0.38	-0.06	0.31	-0.83**	-0.38	-0.54	-0.60	-0.23
(n=10)									

※ * は有意水準 5% (P<0.05) で有意な相関があることを表す。

**は有意水準 1% (P<0.01) で有意な相関があることを表す。

表 3-11 標高、溪流水の NO₃⁻濃度、窒素沈着量と葉およびドングリの $\delta^{15}\text{N}$ 値の関係

	標高 (m)	溪流水 NO ₃ ⁻ 濃度 (μM)	N 沈着量 (kg N ha ⁻¹ yr ⁻¹)
コナラ	0.85*	-0.85*	-0.66
ドングリ	0.26	-0.26	-0.66
葉	-0.32	0.00	0.00
(n=6)	-0.20	-0.11	0.00
ミズナラ	0.67*	-0.69*	-0.63*
ドングリ	0.61	-0.62	-0.69*
葉			
(n=4)			
コナラ			
+			
ミズナラ			
(n=10)			

※ * は有意水準 5% (P<0.05) で有意な相関があることを表す。

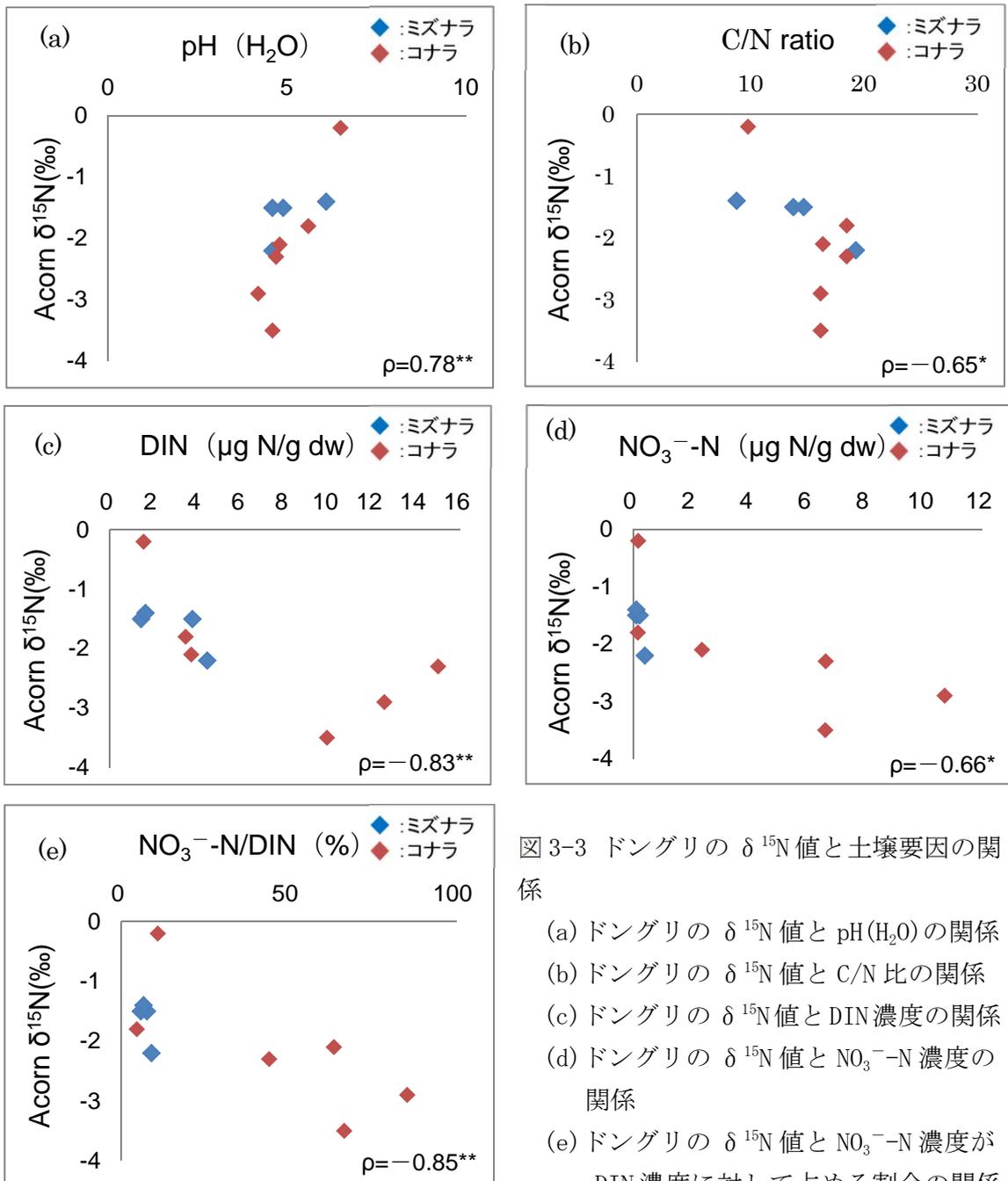


図3-3 ドングリの δ¹⁵N 値と土壌要因の関係

- (a) ドングリの δ¹⁵N 値と pH(H₂O) の関係
- (b) ドングリの δ¹⁵N 値と C/N 比の関係
- (c) ドングリの δ¹⁵N 値と DIN 濃度の関係
- (d) ドングリの δ¹⁵N 値と NO₃⁻-N 濃度の関係
- (e) ドングリの δ¹⁵N 値と NO₃⁻-N 濃度が DIN 濃度に対して占める割合の関係

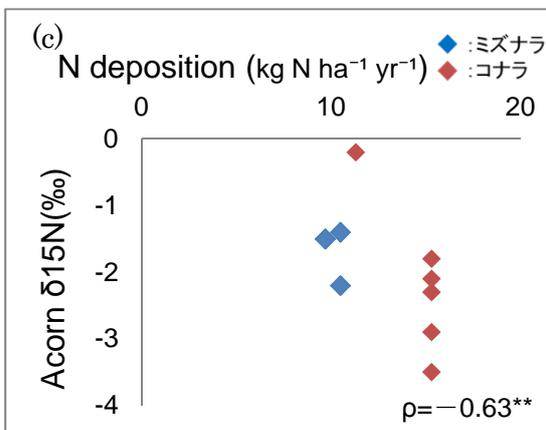
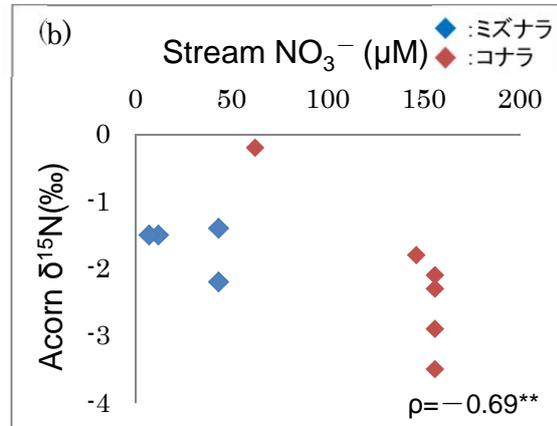
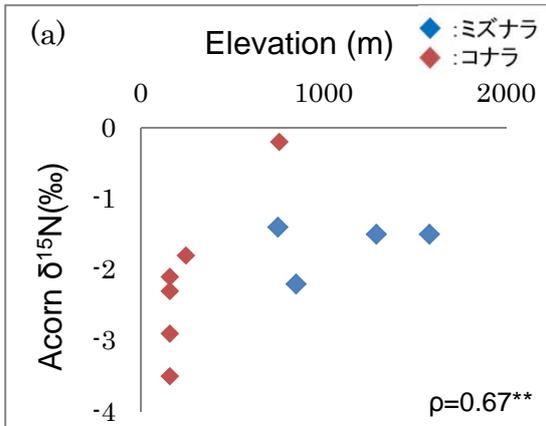


図 3-4

- (a) ドングリの $\delta^{15}\text{N}$ 値と標高の関係
- (b) ドングリの $\delta^{15}\text{N}$ 値と渓流水の NO_3^- 濃度の関係
- (c) ドングリの $\delta^{15}\text{N}$ 値と窒素沈着量の関係

3.7 ドングリの $\delta^{15}\text{N}$ 値と諸要因の関係

3.7.1 重回帰分析

表 3-10 および表 3-11、また図 3-3 および図 3-4 に示したように、ドングリの $\delta^{15}\text{N}$ 値と有意な相関関係をもつ要因は多い。その中でどの要因がドングリの $\delta^{15}\text{N}$ 値とより強い関係を持っているのかを明らかにするためにコナラ+ミズナラ調査区を対象にして重回帰分析を行った。ドングリの $\delta^{15}\text{N}$ 値を目的変数とし、ドングリの $\delta^{15}\text{N}$ 値と有意な相関関係にある要因、すなわち土壌 pH(H₂O)、土壌 C/N 比、土壌中の DIN 濃度、土壌中の NO₃⁻-N 濃度、土壌中の DIN に対する NO₃⁻-N の割合、標高、渓流水の NO₃⁻濃度、窒素沈着量を説明変数とした。分析の結果を表 3-12 に示す。

回帰モデルの調整済み決定係数(R²)は 0.769、分散分析による p 値は 0.002 で、ステップワイズ法により選択された説明変数は土壌 pH(H₂O) と標高の 2 つであった。標準偏回帰係数は土壌 pH(H₂O) が 0.725、標高が 0.471 であった。t 検定における P 値は pH(H₂O) が 0.003、標高が 0.022 であった。

表 3-12 にも示してあるように pH (H₂O) 、標高ともに VIF の値は 1.011 なので今回分析では多重共線性は起きていないと言える。重回帰分析の結果を式で表すと以下のようになる。

$$\text{ドングリの } \delta^{15}\text{N 値} = 0.725 \times \text{土壌 pH(H}_2\text{O)} + 0.471 \times \text{標高} \quad (\text{式 3.1})$$

表 3-12 重回帰分析の結果 (目的変数: ドングリの $\delta^{15}\text{N}$ 値)

説明変数	偏回帰係数	標準偏回帰係数	p 値	VIF
切片	-6.851	-	0	-
pH (H ₂ O)	0.872	0.725	0.003	1.011
C/N ratio	-	-	-	-
DIN	-	-	-	-
NO ₃ ⁻ -N	-	-	-	-
NO ₃ ⁻ -N/DIN	-	-	-	-
Elevation	8.14E-04	0.471	0.022	1.011
stream NO ₃ ⁻	-	-	-	-
N deposition	-	-	-	-

3.7.2 主成分分析

ドングリの $\delta^{15}\text{N}$ 値と相関関係にある要因は多い。主成分分析を行うことでそれらの要因を総合的に表せるような主成分の抽出を試みた。選んだ要因は重回帰分析と同様に、土壌 pH(H₂O)、土壌 C/N 比、土壌中の DIN 濃度、土壌中の NO₃⁻-N 濃度、土壌中の DIN に対する NO₃⁻-N の割合、標高、渓流水の NO₃⁻濃度、窒素沈着量である。分析の結果、2 つの主成分が抽出された。抽出された主成分の固有値と寄与率および各要因の主成分得点係数を表 3-13 に示す。また第 1 主成分得点係数をもとに求めた各調査地の第 1 主成分得点を、葉およびドングリの $\delta^{15}\text{N}$ 値と主成分分析に用いた様々な要因とともに表 3-14 に示す。さらに第 1 主成分の解釈をするために、主成分得点と様々な要因との相関関係を調べた。R² が 0.7 以上のものを図 3-5 (a)-(f) に示す。主成分得点と正の相関があったのは DIN 濃度、NO₃⁻-N 濃度、土壌中の DIN に対する NO₃⁻-N の割合、渓流水の NO₃⁻濃度、窒素沈着量で、負の相関があったのは標高であった。DIN 濃度、NO₃⁻-N 濃度、土壌中の DIN に対する NO₃⁻-N の割合、渓流水の NO₃⁻濃度、窒素沈着量の値が大きいと第 1 主成分得点は高くなり、標高が低いと第 1 主成分得点は高くなる。また表 3-13 より、pH(H₂O) が低いとき、第 1 主成分得点は高くなる。窒素飽和が進行していくと、無機化、硝化が促進され DIN 濃度、NO₃⁻-N 濃度は上昇し、渓流水の硝酸濃度も高くなる。以上のことから第 1 主成分はその調査区の窒素(飽和)状況を表すものであると解釈できる。第 1 主成分得点が高いものほど窒素飽和が進行している調査区であるということになる。なお、第 2 主成分はうまく読み取ることができなかった。主成分得点と葉及びドングリの $\delta^{15}\text{N}$ 値の関係を図に表すと図 3-6(a) (b) のようになる。以上より窒素飽和の程度の増大に伴う、生葉ならびにドングリの窒素安定同位体比の低下が明らかである。

表 3-13 主成分得点係数と各主成分の固有値および寄与率

	第 1 主成分	第 2 主成分
C/N ratio	0.11	-0.36
pH(H ₂ O)	-0.11	0.57
DIN	0.16	-0.16
NO ₃ ⁻ -N	0.16	-0.07
NO ₃ ⁻ -N/DIN	0.16	0.01
Elevation	-0.16	-0.35
stream NO ₃ ⁻	0.17	0.23
N deposition	0.17	0.26
固有値	5.4	1.4
寄与率(%)	67.7	17.2

表 3-14 各調査地の第 1 主成分得点と各要因
(第 1 主成分得点の小さい順に並び変えたもの)

調査区	第 1 主成分 得点	ドンダ リ $\delta^{15}\text{N}$ 値(‰)	葉 $\delta^{15}\text{N}$ 値 (‰)	CN 比	pH(H ₂ O)	NO_3^- -N ($\mu\text{g N/g dw}$)	DIN ($\mu\text{g N/g dw}$)	NO_3^- -N/DIN (%)	溪流 NO_3^- (μM)	標高 (m)	窒素沈着量 (kg N ha^{-1} yr^{-1})
草木下	-1.04	-1.4	-1.3	8.8	6.1	0.11	1.64	6.7	43.2	750	10.5
一之瀬	-1.01	-1.5	-2.2	13.8	4.9	0.11	1.44	7.7	11.9	1289	9.7
三建	-0.96	-1.5	-1.4	14.7	4.6	0.22	3.78	5.9	7.1	1579	9.7
奥多摩	-0.95	-0.2	-0.7	9.8	6.5	0.17	1.55	10.9	62.2	757	11.3
草木上	-0.41	-2.2	-2.7	19.3	4.6	0.40	4.46	9.1	43.2	850	10.5
八王子	0.11	-1.8	-3.4	18.5	5.6	0.16	3.47	4.6	146	246	15.3
タマ斜 面	0.62	-2.1	-3.1	16.4	4.8	2.37	3.72	63.5	155.7	158	15.3
タマ 1	1.04	-3.5	-2.5	16.2	4.6	6.60	9.92	66.6	155.7	158	15.3
タマ 3	1.15	-2.3	-3.4	18.5	4.7	6.62	14.99	44.2	155.7	158	15.3
タマ 2	1.46	-2.9	-3.3	16.2	4.2	10.71	12.54	85.4	155.7	158	15.3

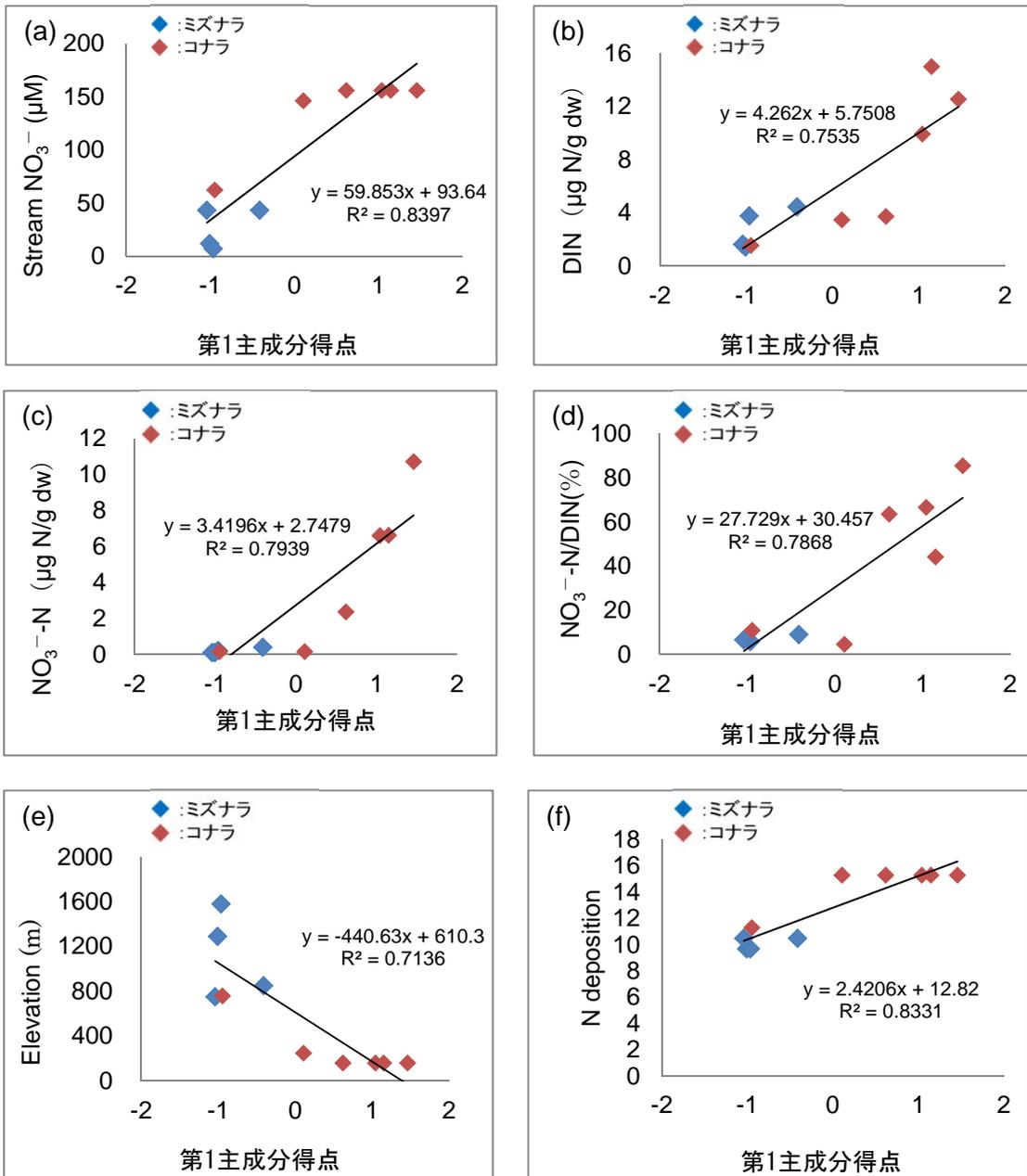


図 3-5 主成分得点と様々な要因の関係

- (a) 主成分得点と渓流水の NO_3^- 濃度の関係
- (b) 主成分得点と DIN 濃度の関係
- (c) 主成分得点と NO_3^- -N 濃度の関係
- (d) 主成分得点と NO_3^- -N/DIN の関係
- (e) 主成分得点と標高の関係

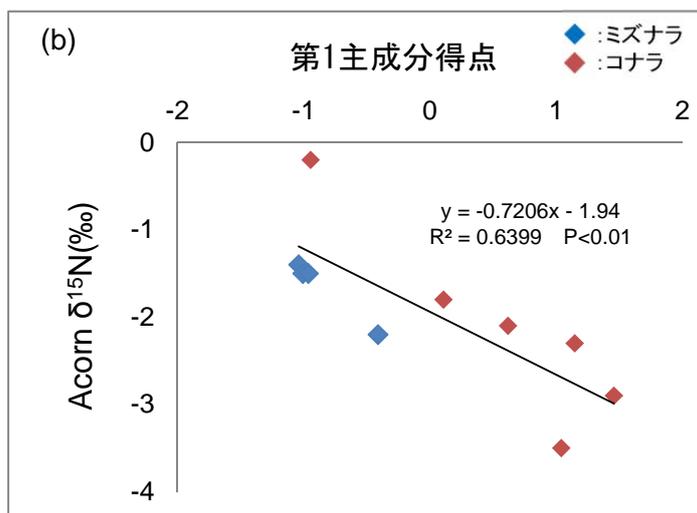
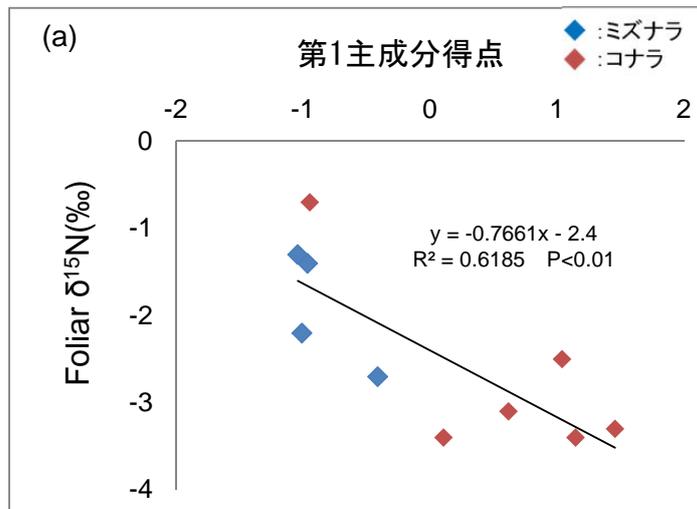


図 3-6 第 1 主成分得点と $\delta^{15}\text{N}$ 値の関係

(a) 第 1 主成分得点と葉の $\delta^{15}\text{N}$ 値の関係

(b) 第 1 主成分得点とドングリの $\delta^{15}\text{N}$ 値の関係

4. 考察

全調査区を対象にしてコナラとミズナラを区別せずに解析を行った場合、葉の $\delta^{15}\text{N}$ 値とドングリの $\delta^{15}\text{N}$ 値の間には統計的に有意な ($\rho = 0.69, p < 0.05$) 正の相関関係が認められた。いくつかの調査区では葉の $\delta^{15}\text{N}$ 値とドングリの $\delta^{15}\text{N}$ 値の間に有意な差がみられたが(表 3-8)、窒素の可給性増大に対して、ドングリの $\delta^{15}\text{N}$ 値は葉の $\delta^{15}\text{N}$ 値と同様の変化を示すことがわかった。

ドングリの $\delta^{15}\text{N}$ 値に対し、多くの要因 (8つ) が有意な相関関係を示した。これらのうち、土壌中の DIN 濃度、土壌中の NO_3^- 濃度、土壌中の DIN に対する NO_3^- の割合、渓流水の NO_3^- 濃度は、窒素飽和ないし窒素可給性の増加に直接関係する因子である。また窒素沈着量はそれを引き起こす外部要因としてやはり窒素飽和に直接的な関係を持つ。また、土壌 pH(H₂O) は NO_3^- の生成がプロトンの生成を伴うことを考えれば理解できる。これまで多摩川流域の渓流水 NO_3^- 濃度が標高に対して明瞭な負の相関関係を示すことはすでに報告されており (Yoh et al., 2001; Yoh, 2001)、標高は多摩川流域の窒素飽和に深く関係する要因である。以上のように、ドングリの $\delta^{15}\text{N}$ 値変化は、窒素飽和に付随するいずれの面に対しても整合的である。また、このことと符合して、主成分分析においても、負の相関関係の第 1 主成分は窒素飽和の状況に相当することが結論された。すなわち、窒素飽和の進行により、ドングリおよび生葉の $\delta^{15}\text{N}$ は低下することが明らかとなった。

従来、窒素可給性の上昇に伴い、窒素同位体比は上昇すると考えている論文が多かった。その根拠としては、1) 可給態窒素の増加に伴い、無機化、硝化が促進、2) 同位体比の小さい NO_3^- が生成されることにより、 NH_4^+ プールに ^{15}N が濃縮、3) また、硝化により生成した同位体比の低い NO_3^- は渓流水へ流亡したり、脱窒などガス化することによって失われる結果、生態系に同位体比の高い窒素が濃縮、4) このことにより植物体の $\delta^{15}\text{N}$ 値は上昇する、という機構が想定されたからであった (Garten, 1993; Emmett et al. 1998; Pardo et al. 2006; Craine, 2009; Cheng et al. 2010)。しかし、これらの研究では、土壌の無機態窒素の窒素安定同位体比までは実測されず、その意味では、必ずしも実証的なレベルで証明されていたわけではない。

これに対し、本研究の結果から、窒素飽和に伴い $\delta^{15}\text{N}$ 値が低下することが明確に立証された。Takebayashi et al. (2010) がヒノキ針葉について示した関係が、落葉広葉樹についても当てはまることが明らかとなった。この同位体比変化は、窒素飽和が進行すると硝化が活発に行われ、 $\delta^{15}\text{N}$ 値の低い NO_3^- が多量に生成され、この $\delta^{15}\text{N}$ 値の低い NO_3^- を主な窒素源として取り込むために植物体の $\delta^{15}\text{N}$ 値が低くなる、という合理的な機構によるものである。ドングリが窒素飽和モニタリングの試料として利用できることが確かとなった。

5. 引用・参考文献

- Aber J, Nadelhoffer K, Steudler P, Melillo JM. 1989. Nitrogen saturation in northern forest ecosystems. *Bioscience* 39:378-386
- Aber J, McDowell W, Nadelhoffer K, Magill A; et al. 1998. Nitrogen saturation in temperate forest ecosystems. *Bioscience* 48: 921-934
- Baba M, Okazaki M, Hashitani T. 1995. Effect of acid deposition on forested catchment in the western Tokyo, Japan. *Water air and soil pollution* 85: 1215-1220
- Craine J, et al. 2009. Global patterns of foliar nitrogen isotopes and their relationships with climate, mycorrhizal fungi, foliar nutrient concentrations, and nitrogen availability. *New Phytologist* 183: 980-992
- Emmett B, Brittain S, Hughes S, et al. 1995. Nitrogen additions (NaNO_3 and NH_4NO_3) at Aber forest, Wales: I. Response of throughfall and soil water chemistry. *Forest Ecology and Management* 71:45-59
- Emmett B, Kjonaas O, Gundersen P, et al. 1998. Natural abundance of ^{15}N in forests across a nitrogen deposition gradient. *Forest Ecology and Management* 101: 9-18
- Erisman J, Vries W. 2000. Nitrogen deposition and effects on European forests. *Environmental Reviews* 8: 65-93
- Cheng, Fang, et al. 2010. Foliar and soil ^{15}N natural abundance provide field evidence on nitrogen dynamics in temperate and boreal forest ecosystems. *Plant Soil* 337: 285-297
- Galloway J, Dentener F, Capone D, et al. 2004. Nitrogen cycles: past, present, and future. *Biogeochemistry* 70: 153-226
- Garten C.1993. Variation in foliar ^{15}N abundance and the availability of soil nitrogen on Walker Branch watershed. *Ecology* 74: 2098-2113
- Hogberg P. 1997. Transley Review No. 95 ^{15}N natural abundance in soil-plant systems. *New Phytologist* 137: 179-203
- Keeney D, Nelson D. 1982. Nitrogen-inorganic forms. Method of soil analysis. Part 2. Chemical and microbiological properties. p.643-698
- LeBauer D, Treseder K. 2008. Nitrogen limitation of net primary productivity in terrestrial ecosystems is globally distributed. *Ecology* 89: 371-379
- Ohnui K, Mitchell M. 1997. Nitrogen saturation in Japanese forested watersheds. *Ecological Applications* 7: 391-401
- Pardo L, Templer P, Goodale C, Duke S, et al. 2006. Regional assessment of N saturation using foliar and root $\delta^{15}\text{N}$. *Biogeochemistry* 80: 143-171
- Takebayashi Y, Koba K, Sasaki Y, Fang Y, Yoh M. 2010. The natural abundance of

^{15}N in plant and soil-available N indicates a shift of main plant N resources to NO_3^- from NH_4^+ along the N leaching gradient. *Rapid Commun. Mass Spectrom* 24:1001-1008

Tateno R, Osada N, Terai M, Tokuchi N, Takeda H. 2005. Inorganic nitrogen source utilization by *Fagus crenata* on different soil types. *Trees* 19: 477-481

Vitousek, P.M. and R.W.Howarth 1991 Nitrogen limitation on land and in the sea: How can it occur? *BIOGEOCHEMISTRY*, 13: 87-115

Yoh M. 2001. Soil C/N ratio as affected by climate: An ecological factor of forest NO_3^- leaching. *Water, Air, and Soil Pollution* 130: 661-666

Yoh, M. E. Konohira and K. Yagi 2001 Regional Distribution of Natural Stream Nitrate in Central Japan. *Water, Air, and Soil Pollution* 130: 655-660

ドングリを使った多摩川流域の環境モニタリングとスペシメン・ライブラリ

(研究助成・学術研究VOL. 41—NO. 301)

著者 楊 宗興

発行日 2012年12月1日

発行者 公益財団法人とうきゅう環境財団

〒150-0002

東京都渋谷区渋谷1-16-14 (渋谷地下鉄ビル内)

TEL (03) 3400-9142

FAX (03) 3400-9141

<http://www.tokyuenv.or.jp/>