

東京大学秩父演習林における標高に沿った土壌特性と 環境要因の関係

執行宣彦^{*1}・梅木 清^{*2}・平尾聡秀^{*3}

Relationships between soil properties and environmental factors along
elevational gradients
in the University of Tokyo Chichibu Forest

Nobuhiko SHIGYO^{*1}, Kiyoshi UMEKI^{*2} AND Toshihide HIRAO^{*3}

要旨

森林土壌の生態系機能を維持管理する上で、土壌特性と環境要因の関係を理解することは重要である。急峻な地形を有する秩父演習林では、その土壌特性が植生のみならず、標高や傾斜度、曲率などの地形によって規定されると考えられる。そこで、本研究では、深度別の土壌特性（pH、全炭素量、全窒素量、CN 比）と、植生（樹木の種多様性、針葉樹率）および地形（標高、傾斜度および斜面方位、曲率、累積流量）の関係を報告し、土壌特性に対する各環境要因の相対的重要性を調べた。土壌 pH は土壌が深くなるにつれ上昇し、標高と樹木の種多様性は有意な負の関係を示していた。土壌特性と各環境要因の関係を線形混合モデルにより解析した結果、表層土壌の pH については標高と植生が最も重要な変数であった。一方で、深度 10-20 cm と 20-30 cm の全窒素量においては、南側で流速が小さい場所で多くなる傾向が示され、地形が標高や植生より土壌特性に強い影響を及ぼし得ることが明らかとなった。これらの結果から、森林の土壌特性に対する局所的な地形や標高に沿った植生変化の重要性が示唆された。

キーワード：土壌 pH・土壌窒素量・土壌 CN 比・冷温帯林・亜高山帯林

Abstract

It is important to understand the relationship between environmental factors and soil properties in managing the ecosystem functions of forest soils. In the University of Tokyo Chichibu Forest

*1 東京大学大学院農学生命科学研究科附属演習林

The University of Tokyo Forests, Graduate School of Agricultural and Life Sciences, The University of Tokyo

*2 千葉大学大学院園芸学研究科

Graduate School of Horticulture, Chiba University

*3 東京大学大学院農学生命科学研究科附属演習林秩父演習林

The University of Tokyo Chichibu Forest, Graduate School of Agricultural and Life Sciences, The University of Tokyo

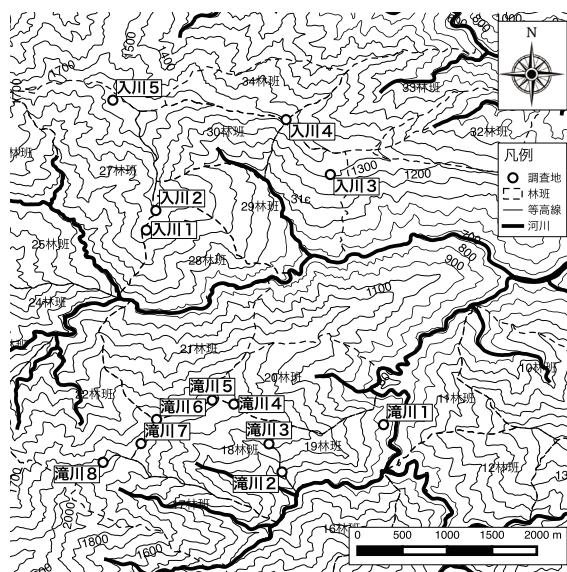
(UTCF), located in a steep mountainous region, soil properties are prescribed by topographic factors such as elevation, slope, and curvature as well as vegetation. In this study, we investigated soil properties (pH, total carbon contents, total nitrogen contents and CN ratio) for each depth, and vegetation (tree diversity and the proportion of coniferous trees) and topography (elevation, slope, aspect, curvature and flow accumulation) in UTCF, and examined the relative importance of environmental factors to soil properties. Soil pH increased with depth and tree diversity showed a significant negative correlation with elevation. In topsoil layers (0-5 cm and 5-10 cm), elevation was the most important variable in explaining soil pH, based on analyses of linear mixed models. On the other hand, total nitrogen content in the 10-20 cm and 20-30 cm depths increased toward sites with south facing slopes and low flow rate, where these topographic variables have stronger influences than elevation and vegetation. These results suggested the importance of local topographic factors and vegetation changes to soil properties along elevational gradients.

Keywords: soil pH, total nitrogen contents, soil CN ratio, cool temperate forest, subalpine forest

1. はじめに

森林土壌は炭素の貯蓄源としてだけでなく、落葉落枝などの有機物の分解、植物が利用可能な栄養塩の循環、水質の保全、土壌生物に対する生息場所の提供、埋土種子の貯留など、多様な生態系機能をもっている。そのため、土壌環境の保全を通じた健全な森林生態系の維持と管理には、森林土壌の特性と環境要因の関係を明らかにする必要がある (Schoenholtz et al., 2000)。森林の土壌特性は気候、生物、地形、母材、時間によって決まると考えられてきたが (Jenny 1941)、日本列島の森林は地形的な異質性に富み、多様な植生タイプを有しているという特徴があり (Qian and Ricklefs, 2000)、その土壌特性は特に植生や地形の変化から強い影響を受けていると考えられる。

東京大学大学院農学生命科学研究科附属演習林秩父演習林 (以下、秩父演習林) の栃本地区では、褐色森林土壌が大部分を占めるが、標高 1,700 m 以上では溶脱斑が認められるポドゾル化土壌も出現する (中田, 1987)。そして、亜高山帯のコメツガ林土壌は、山地帯のブナ及びイヌブナ林土壌に比べて、全炭素濃度が極めて大きいことが明らかとなっており (芝本・中島, 1951)、標高とともに変化する植生が土壌特性を規定していると考えられる。その一方、凸凹度などの局所的な斜面地形の変化も、集積する有機物量や流量の変化を引き起こし、土壌特性に影響を及ぼすことが知られている (河田, 1989)。しかし、土壌特性の標高変化に対する植生と地



図－1. 調査地の概況

Fig. 1. Location of study plots.

形の相対的重要性については、十分に明らかにされていない。そこで、本研究では、秩父演習林の天然林において、深度別の土壌特性（pH，全炭素量，全窒素量，CN比）と、植生（樹木の種多様性，針葉樹率）および地形（標高，傾斜度および斜面方位，曲率，累積流量）の変化を記載し，土壌特性に対する各環境要因の相対的重要性を調べた。

2. 方法

調査は，秩父演習林栃本地区における二つの流域で行った。2013年10～11月に，入川流域の標高1,320mから1,743m，滝川流域の標高828mから1,839mにおいて，多様な地形や植生が含まれるように留意して13ヶ所の調査プロット（30m×30m）を設置した（図－1）。各プロットを一辺10mの9つのサブプロットに分け，そのうちプロット中央で十字状に位置する5つのサブプロットで土壌深度0-5，5-10，10-20，20-30cmの土壌を採取した。各土壌深から採取した土壌について，pH(H₂O)をガラス電極法（堀場製作所pHメーターD-51）で測定し，全炭素濃度C(%），全窒素濃度N(%），CN比をCNコーダー法（柳本製作所CNコーダーMT-700）で分析した。なお，pH(H₂O)の測定には生土10gに25mlの純水を加えて懸濁し，30分間放置した土壌溶液を用いた（土壌養分測定法委員会，2002）。また，各プロットの近傍で土壌深ごとに400cm³の採土円筒を用いて土壌を採取し，80℃で72時間以上定温乾燥機を用いて風乾処理を行った。風乾後，礫や根を除いて，乳鉢で団粒を粉碎し，2mmのふるいを通過させて細土量を求めた。全炭素濃度，全窒素濃度と細土量から全炭素量C(Mg/ha)，全窒素量N(Mg/ha)を求めた。

植生については、2012 年 10 月と 2013 年 5 月に、各プロットに出現する胸高周囲長 10cm 以上の樹木を対象として毎木調査を行った。そして、種多様性を Shannon-Wiener の多様度指数 (H') により定量化した。

$$H' = - \sum_i p_i \ln p_i$$

ここで、 p_i は i 番目の種の相対胸高断面積合計である。また、プロットごとに針葉樹の胸高断面積合計 (m^2/ha) の割合 (針葉樹率) を求めた。調査地で優占する針葉樹は、日本列島の冷温帯から亜高山帯でよくみられるツガ (*Tsuga sieboldii*)、コメツガ (*Tsuga diversifolia*)、モミ (*Abies firma*)、ウラジロモミ (*Abies homolepis*) であった。

また、地形については、基盤地図情報数値標高モデル (DEM) 10m メッシュ (国土地理院) から、Quantum GIS 1.8 を用いて、各プロットの標高、傾斜度、斜面方位、断面曲率、平面曲率、累積流量を計算した。なお、断面曲率は斜面に対して平行で、傾斜角を最大にする方向を示し、流速に関わる。正の値をとる場合は地表面がそのセルで凹状になり、負の値をとる場合は凸状になる。平面曲率は傾斜角を最大にする方向と垂直になる方向を示し、流量の収束と発散に関わる。これは正の値をとる場合は、地表面が等高線方向に凸状になり、負の値をとる場合は凹状になる (Mitášová and Hofierka, 1993)。また、累積流量は Mass-Flux 法によって算出した。この方法は、1 つのピクセルを 4 つに分割し DEM の 2 倍の次元を有するグリッドを使用することで、連続的な流水の方向を規定し求めるものである (Gruber and Peckham, 2009)。傾斜度と斜面方位については、次のような 2 つの合成変数を求めた (Stage, 1976)。

$$asp1 = \tan \theta \cos \alpha$$

$$asp2 = \tan \theta \sin \alpha$$

ここで、 θ は傾斜度、 α は北から時計回りの斜面方位である。 $asp1$ と $asp2$ は正負の値をとり、その絶対値が大きいと傾斜度が高い。また、 $asp1$ が正の場合は北側方向を、負の場合は南側方向を示し、 $asp2$ が正の場合は東側方向を、負の場合は西側方向を示す。

標高と地形及び植生との変化を明らかにするため、標高と $asp1$ 、 $asp2$ 、断面曲率、平面曲率、累積流量、多様度指数、針葉樹率のピアソンの積率相関係数を算出した。また、環境要因 (標高、植生、地形) が土壌特性に及ぼす影響を明らかにするため、深度別 (0-5cm, 5-10cm, 10-20cm, 20-30cm) に、線形混合モデルを用いた解析を行った (Zuur et al., 2009)。応答変数は土壌特性 (pH (H_2O), C (Mg/ha), N (Mg/ha), CN 比) とし、説明変数を 8 つの環境変数 (標高, $asp1$, $asp2$, 断面曲率, 平面曲率, 累積流量, 多様度指数, 針葉樹率) とした。これらの環境変数を固定効果、各プロットに含まれる 5 つのサブプロットをランダム効果として、応答変数の確率分布は正規分布に従うと仮定した。なお、環境変数についてはすべて標準化を行った。これらすべての説明変数を組み込んだモデルをデータにあてはめた後、応答変数を最もよく説明する

変数を選択するために、AIC を用いたモデル選択を行った。これらの解析は統計解析ソフト R 2.15.2 (R Development Core Team, 2013) を用いて行った。

3. 結果と考察

各調査地の pH(H₂O), C (%), C (Mg/ha), N (%), N (Mg/ha), CN 比のデータは附表 - 1 に、細土量のデータは附表 - 2 に、環境要因のデータは附表 - 3 に示した。

3.1. 各調査地の土壌特性

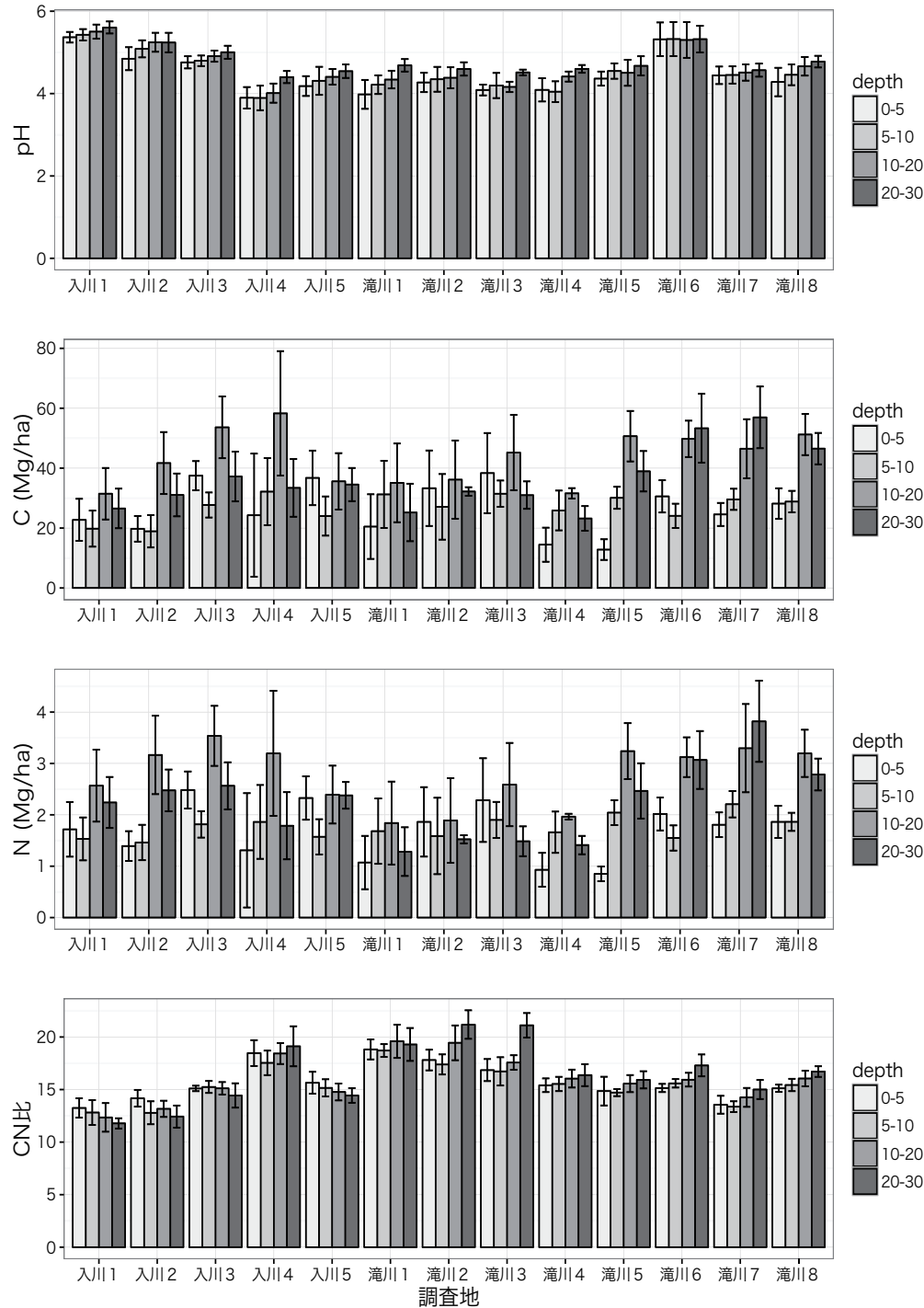
日本列島の一般的な森林土壌は pH 6.0 前後が上限で pH 4.0 前後が下限であり (河田, 1989), pH 5.60 ~ 3.89 を示した本調査地は酸性の土壌環境であった (図 - 2)。また、どのプロットにおいても、深くなるにつれて pH は上昇する傾向が認められた (図 - 2)。C (Mg/ha) および N (Mg/ha) については、深度 0-10cm (0-5cm + 5-10cm) と他深度を比較した場合、深くなるにつれて減少する傾向が認められた (図 - 2)。また、A 及び A₁ 層において、崩積土といったリターの分解が極めて良好な土壌の CN 比は、12~13 が下限で、乾性型土壌では 40~50 が上限であり (河田, 1989), 本研究の結果もその範囲であった (図 - 2)。

3.2. 標高と地形及び植生との関係

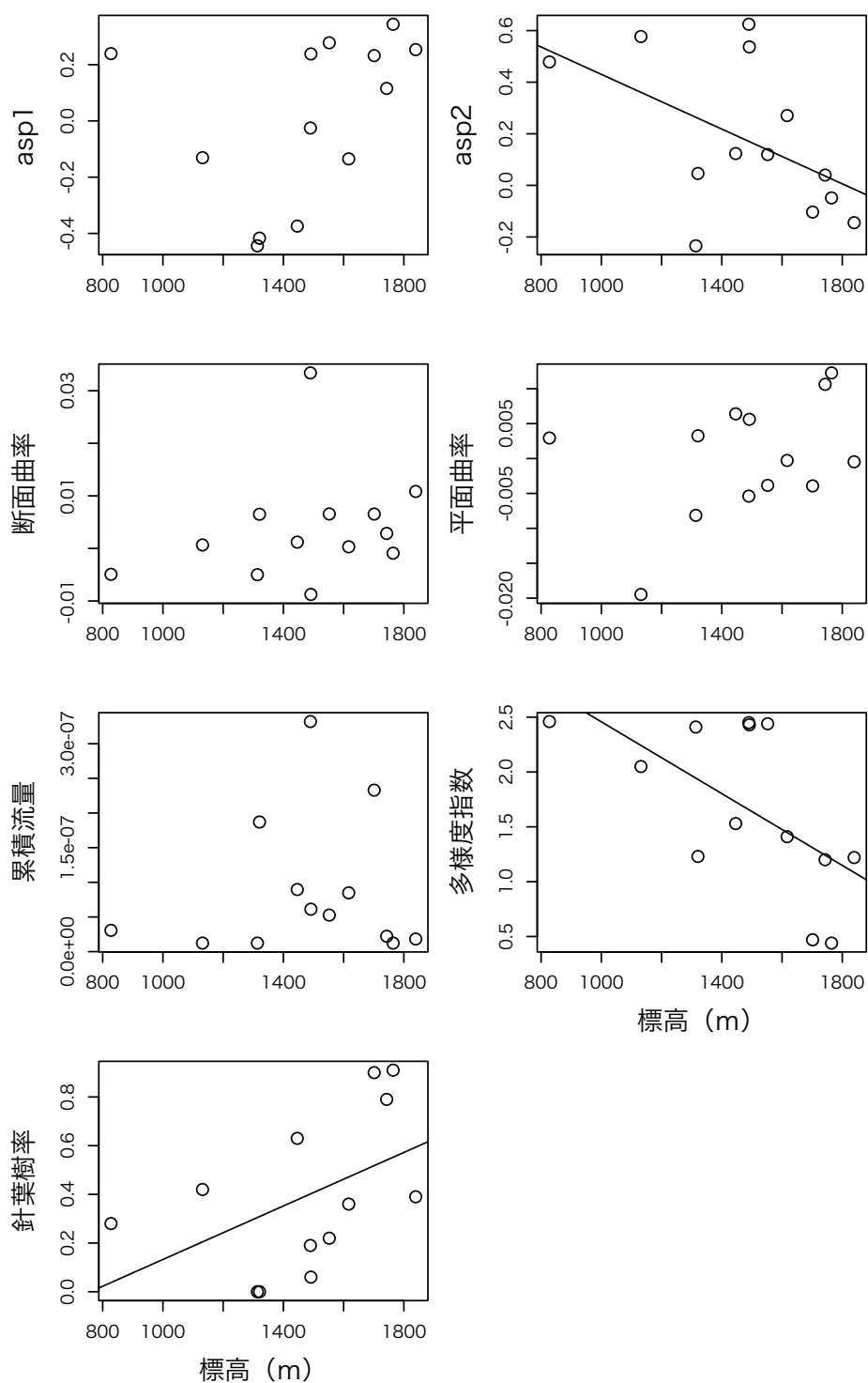
標高はどの地形変数とも有意な相関を示さなかったが (図 - 3), 標高と *asp2* は弱い負の相関を示していた (図 - 3; $r = -0.50, p = 0.08$)。標高と多様度指数は有意な負の相関を示し (図 - 3; $r = -0.61, p = 0.03$)、標高と針葉樹率は弱い正の相関を示していた (図 - 3; $r = 0.48, p = 0.10$)。

3.3. 環境要因が土壌特性に及ぼす影響

深度 0-5cm で、pH(H₂O) に影響する環境要因としてベストモデルに選択されたのは、標高、多様度指数、針葉樹率、pH(H₂O) であり、それぞれ負の関係が認められた (表 - 1)。リターの分解は広葉樹のほうが針葉樹より早く、針葉樹林では広葉樹林より土壌が酸性になりやすいことが知られており (Finzi et al., 1999), 本研究でも同様の影響が示唆された。すべての深度において、標高がベストモデルにとして選択され、pH(H₂O) と強い負の関係があった (表 - 1 ~ 表 - 4)。また、0-5 cm と 5-10 cm では、樹木の種多様性も pH(H₂O) と強い負の関係を示した (表 - 1, 表 - 2)。このことから、各土壌深の pH(H₂O) に対して、標高の上昇に伴う寒冷な気候や植生の変化の影響が、傾斜度などの地形変数より、強い影響を及ぼしていることが示唆された。



図－ 2. 各調査地における pH(H₂O), C (Mg/ha), N (Mg/ha), CN 比 (エラーバーは標準偏差を表す)
Fig. 2. pH (H₂O), C (Mg/ha), N(Mg/ha) and CN ratio at each plot. Error bars show standard deviation.



図－3. 標高と各環境要因の関係 ($p < 0.1$ ならば回帰直線を示した)

Fig. 3. Relationships between elevation and environmental factors. Regression lines are shown for $p < 0.1$.

表－1. 土壌深 0-5 cm の土壌特性に対する線形混合モデル（ベストモデル）のパラメーター及び AIC

Table 1. Estimated parameters and AICs of the linear mixed model (best model) for soil properties at 0-5 cm in depth.

	切片	標高	<i>asp1</i>	<i>asp2</i>	断面曲率	平面曲率	累積流量	多様度指数	針葉樹率	AIC
pH(H ₂ O)	4.45	-0.48						-0.39	-0.28	44.28
C (Mg/ha)	26.44	-2.08	3.18	0.72	0.89	2.64	11.45	1.42	7.86	471.17
N (Mg/ha)	1.69						0.32			129.54
CN 比	15.71	1.09								209.18

表－2. 土壌深 5-10 cm の土壌特性に対する線形混合モデル（ベストモデル）のパラメーター及び AIC

Table 2. Estimated parameters and AICs of the linear mixed model (best model) for soil properties at 5-10 cm in depth.

	切片	標高	<i>asp1</i>	<i>asp2</i>	断面曲率	平面曲率	累積流量	多様度指数	針葉樹率	AIC
pH(H ₂ O)	4.55	-0.50						-0.23		48.45
C (Mg/ha)	26.99	2.63	-0.38	-2.43	1.37	1.46	-0.54	3.52	1.32	426.97
N (Mg/ha)	1.75				0.14					88.13
CN 比	15.46	0.86		-0.62						203.05

表－3. 土壌深 10-20 cm の土壌特性に対する線形混合モデル（ベストモデル）のパラメーター及び AIC

Table 3. Estimated parameters and AICs of the linear mixed model (best model) for soil properties at 10-20 cm in depth.

	切片	標高	<i>asp1</i>	<i>asp2</i>	断面曲率	平面曲率	累積流量	多様度指数	針葉樹率	AIC
pH(H ₂ O)	4.64	-0.38								31.41
C (Mg/ha)	43.61	0.77	-5.26	-8.31	3.02	-2.05	-6.39	2.34	-3.75	486.46
N (Mg/ha)	2.77		-0.29							163.79
CN 比	16.02	0.91		-1.01			-0.76			223.95

表－4. 土壌深 20-30 cm の土壌特性に対する線形混合モデル（ベストモデル）のパラメーター及び AIC

Table 4. Estimated parameters and AICs of the linear mixed model (best model) for soil properties at 20-30 cm in depth.

	切片	標高	<i>asp1</i>	<i>asp2</i>	断面曲率	平面曲率	累積流量	多様度指数	針葉樹率	AIC
pH(H ₂ O)	4.81	-0.40							-0.15	-1.40
C (Mg/ha)	36.16	-1.81	-6.70	-1.72	7.93	1.21	-3.31	-3.90	-4.94	441.98
N (Mg/ha)	2.25	-0.25	-0.37		0.50					115.07
CN 比	16.55	1.07	-0.34	-1.12			-1.47	-0.84	-0.44	239.24

また、C(Mg/ha)については、すべての環境要因が説明変数としてベストモデルに選択された（表－1～表－4）。一方、土壌深 0-5cm で、N (Mg/ha)に影響する環境要因としてベストモデルに選択されたのは、累積流量のみであり、正の関係を示した（表－1）。土壌深 5-10cm 及び 20-30cm では、断面曲率がベストモデルの説明変数として選ばれ、N(Mg/ha)と正の関係を示した（表－2，表－4）。土壌深 10-20cm 及び 20-30cm では、*asp1* のみがベストモデルの説明変数として選ばれ、N(Mg/ha)と *asp1* は負の関係を示していた（表－3，表－4）。また、土壌深 20-30cm では、*asp1* と断面曲率に加え標高もベストモデルの説明変数として選択され、N(Mg/ha)と負の関係を示した（表－4）。これらの結果は、南側かつ流速が小さい場所で N(Mg/ha)が多くなる傾向にあるということを示している。南斜面では、林冠が受ける日射量が多くなり、樹木の成長速度が増加するため（Stage, 1976）、これに伴うリターフォール量の増加などが土壌微生物の活動を活性化させ、肥沃な土壌環境を形成していると考えられる（河田, 1989）。

すべての土壌深において、CN 比に影響する環境要因として標高が選択され、いずれも強い正の関係を示していた（表－1～表－4）。土壌深 5-10cm, 10-20cm, 20-30cm では、*asp2* がベストモデルの説明変数として選択され、CN 比と *asp2* が負の関係を示した（表－2～表－4）。また、10-20cm, 20-30cm では、累積流量もベストモデルの説明変数として選択され、負の関係を示した（表－3，表－4）。20-30cm では、標高、*asp2*、累積流量に加え、*asp1*、多様度指数、針葉樹率もベストモデルの説明変数として選択され、いずれも負の関係を示した（表－4）。これまでの研究から、CN 比は有機体や植物遺体の分解速度、有機体窒素の無機化速度と密接に関係していることが知られており（武田, 1994）、pH(H₂O)と同様に、こうした土壌の生態系機能も標高の上昇に伴う寒冷な気候の影響を受けていると考えられる。

4. まとめ

秩父演習林の冷温帯広葉樹林から亜高山帯針葉樹林にわたって、土壌特性と環境要因の関係を整理した。土壌 pH は、傾斜度、斜面方位、曲率、累積流量よりも、標高に伴う植生変化や標高

自体と強い関係をもっていた。また、全炭素量では明瞭な関係性が認められなかったものの、全窒素量は、標高、樹木の多様性、針葉樹率よりも傾斜度、斜面方位、曲率と強い関係をもっていた。CN比は植生よりも地形要因との関係性が強かった。これらの結果から、土壌特性によって関係のある環境要因が異なることや、局所的な地形変化や樹木の多様性の標高変化が森林の土壌特性に影響する重要な要因であることが示唆された。

謝辞

本研究を行うにあたり、秩父演習林の技術職員の方々には試料採取へご協力いただいた。なお、本研究はサントリー天然水の森 東京大学秩父演習林プロジェクト研究助成金の助成を受けて行われた。

引用文献

- 土壌養分測定法委員会（2002）土壌養分分析法 . pp. 29-32., 養賢堂 , 東京 .
- FINZI, A.C., CANHAM, C.D., and VAN BREEMEN, N. (1998) Canopy tree-soil interactions within temperate forests: species effects on pH and cations. *Ecol. Appl.* 8:447-454.
- GRUBER, S., and PECKHAM, S. (2009) Land-Surface Parameters and Objects in Hydrology. pp. 177-194., Elsevier, Amsterdam.
- JENNY, H. (1941) Factors of Soil Formation, A System of Quantitative Pedology. McGraw-Hill, New York.
- 河田弘 (1989) 森林土壌学概論 . 博友社 , 東京 .
- MITÁŠOVÁ, H., and HOFIERKA, J. (1993) Interpolation by regularized spline with tension: II. Application to terrain modeling and surface geometry analysis. *Math. Geol.* 25:657-669.
- 中田誠 (1987) 奥秩父亜高山帯における森林植生と土壌、およびその垂直的成帯性に関する研究 (予報) . 演習林報告 76:87-105.
- QIAN, H. and RICKLEFS, R.E. (2000) Large-scale processes and the Asian bias in species diversity of temperate plants. *Nature* 407:180-182.
- R DEVELOPMENT CORE TEAM (2013) R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria.
- SCHOENHOLTZ, S.H., VAN MIEGROET, H. and BURGER, J.A. (2000) A review of chemical and physical properties as indicators of forest soil quality: challenges and opportunities. *For. Ecol. Manage.* 138:335-356.
- 芝本武夫・中島幸雄 (1951) 秩父演習林の天然林土壌に就いて . 演習林 8:57-65.
- STAGE, A.R. (1976) An expression for the effect of aspect, slope and habitat type on tree

growth. For. Sci. 22:457-460.

武田博清（1994）森林生態系において植物－土壌系の相互作用が作り出す生物多様性．日本生態学会誌 44:211-222.

ZUUR, A.F., IENO, E.N., WALKER, N.J., SABELIEV, A.A., and SMITH, G.M. (2009) Mixed effects models and extensions in ecology with R. pp. 323-341., Springer, New York.

「附表－1～附表－3」については，東京大学学術機関レポジトリ（UTokyo Repository）に掲載しています。

URI:<http://hdl.handle.net/2261/61514>