

論 文

南九州のスギ人工林における斜面位置の違いが土壌窒素無機化特性に与える影響

館野 隆之輔^{1,2)}・鈴木 寿仁¹⁾・濱田 肇次¹⁾・日高 謙太¹⁾Effects of slope position on soil nitrogen mineralization in *Cryptomeria japonica* plantations in southern Kyushu, Japan.TATENO Ryunosuke^{1,2)}, SUZUKI Yoshihito¹⁾, HAMADA Tadatsugu¹⁾ and HIDAKA Kenta¹⁾¹⁾ 鹿児島大学農学部生物環境学科

Department of Environmental Science and Technology, Faculty of Agriculture, Kagoshima University, Korimoto 1-21-24, Kagoshima 890-0065

²⁾ 責任著者

Corresponding Author

Received Oct 26, 2009 / Accepted Dec 24, 2009

Summary

The aim of this study was to investigate the effects of slope position on nitrogen mineralization properties in *Cryptomeria japonica* plantations on Volcanogenous Regosol. We measured net nitrogen mineralization and nitrification using *in situ* incubation both on lower and upper slope positions along three slopes in Kagoshima University Takakuma Experimental Forest located on Osumi Peninsula, southern Kyushu, Japan. The soils of the site are Volcanogenous Regosols derived from the recent eruption of the volcano, Mt. Sakurajima, in 1914. Many previous studies on black soils and brown forest soils reported that nitrogen mineralization and nitrification were different between upper and lower slope positions. However, at this study site, there were no significant differences in nitrogen mineralization between upper and lower slope positions. Soil carbon and nitrogen accumulation, soil carbon to nitrogen ratio and soil pH were significantly different between upper and lower slope positions, however the differences might be not large enough to make differences in soil nitrogen mineralization patterns. As soil formation proceeded, differences in the environmental conditions such as soil water content among slope positions may affect soil-plant interactions including nutrient uptake of forest trees, decomposition processes, organic matter accumulation pattern, composition of soil fauna and microbes, which may eventually make differences in nitrogen mineralization patterns along a slope. However, in immature soils like our study site, there were no significant differences in nitrogen mineralization patterns among slope positions probably due the early stage of soil formation.

Key words : topography, slope position, nitrogen mineralization rate, nitrification rate, soil CN ratio

キーワード : 地形, 斜面位置, 窒素無機化速度, 硝化速度, 土壌CN比

はじめに

窒素は、森林生態系などの多くの陸域生態系において、植物の生産にとっての制限要因となっている (Vitousek & Howarth, 1991; Elser *et al.*, 2007)。リターフォールなどに

より土壌へ供給された有機態窒素は、そのまま樹木が吸収することは出来ない。有機態窒素は、土壌において土壌動物や微生物の働きにより無機化され、アンモニア態窒素となり、さらに硝化細菌の働きにより硝化され硝酸態窒素となる。低分子の有機態を植物が直接吸収するという報告も

あるが (Näsholm *et al.*, 1998), 多くの有機態窒素は, アンモニア態か硝酸態の無機態窒素となることにより樹木にとって利用可能になる。そのため, これまで多くの研究で, 土壌の窒素供給量の指標として, 窒素無機化量や硝化量などが使われてきた (Binkley & Hart, 1989)。さらに土壌の窒素無機化量は, 森林の純生産量とも相関が見られることが報告されている (Paster *et al.*, 1984; Reich *et al.*, 1997)。

窒素無機化量や硝化量は, 気候帯, 土壌タイプ, 植生タイプなど様々な空間スケールにおいて変化することが知られる (Vitousek *et al.*, 1982; Zak *et al.*, 1986; Garten *et al.*, 1994; Hirobe *et al.*, 1998, 2001; Tokuchi *et al.*, 1999)。一方で, 同一林分内の斜面位置の違いといった小さなスケールにおいても, 窒素無機化特性は大きく変動することが報告されている (Garten *et al.*, 1994; Roy & Singh, 1995; Hirobe *et al.*, 1998, 2001; Tokuchi *et al.*, 1999; Tateno & Takeda, 2003)。例えば Hirobe *et al.* (1998) は, 滋賀県竜王のスギ人工林において, 斜面上部では見かけの硝化が起こらず土壌中の無機態窒素は主にアンモニア態窒素として存在するのに対して, 斜面下部では硝化速度が高く土壌中の無機態窒素は主に硝酸態窒素として存在することを報告している。同様のパターンは, 京都府北部の冷温帯落葉樹林において, 斜面上部に比べて斜面下部では無機化速度も硝化速度も高いが, 斜面上部では見かけの硝化が起こらないことが報告されている (Tateno & Takeda, 2003)。一方で, 同一斜面上の尾根で無機化速度が大きくなる例や (平井ら, 2007) や地形と明瞭な関係が認められない例 (Zushi, 2003) も報告されている。他にも斜面位置に着目した窒素無機化特性の研究は, 国内外の様々な森林タイプにおいて報告されてきた (吉田ら, 1979; 沓名ら, 1988; Garten *et al.*, 1994; 高橋ら, 1994; Roy & Singh, 1995; Enoki *et al.*, 1997; 戸田・生原, 1994; 小柳ら, 2002; Nakanishi *et al.* 2009)。わが国の森林の多くは斜面に成立するため, 斜面位置による土壌条件の違いを生み出すメカニズムを明らかにすることは, 森林を管理する上でも有益な情報を与えると考えられる。

本調査地は, 南九州の大隅半島に位置し, 1914年の桜島噴火の際の噴出物由来の未熟土からなる地域である。従って表層土壌は他の地域に比べ短い時間しか土壌生成作用を受けていない。未熟土では土壌中の有機物含量が少なく, 窒素無機化速度が低いことも予想される。これまでの多くの研究は, 土壌生成のある程度進行した土壌での報告であり, 未熟土での斜面立地の違いについての窒素無機化特性に関する研究例は非常に少ない。未熟土の場合, 斜面位置の違いにより生まれる窒素無機化特性の差が, 他の土壌タイプと比べて小さいことも考えられる。そこで本研究では, 南九州の火山灰性未熟土の異なる3斜面上に成立するスギ人工林において, 斜面上部と下部といった斜面位置の違いが窒素無機化特性に与える影響を明らかにすることを目的とした。

調査方法

1. 調査地の概要

調査は鹿児島県大隅半島に位置する鹿児島大学農学部附属高隈演習林で行った。高隈演習林は桜島の東側に位置し, 演習林一帯は過去の桜島噴火の際に噴出した火山噴出物が厚く堆積している。特に表層土壌は1914年の大噴火の際の火山噴出物が厚く堆積している。高隈演習林における年平均気温は14 (1999~2004), 平均年降水量は3410mm (1999~2004) である。

高隈演習林内の「6林班I」, 「16林班と」, 「16林班II」の3つの林班内の斜面上部から下部にかけて連続した同一斜面上に生育する34年生(TK1), 46年生(TK2), 56年生(TK3)のスギ人工林において調査を行った。各林班において, 斜面上部と下部にそれぞれ15m×15mの調査区を設置した。調査区の概要を表1に示す。

調査区の施業履歴は, 高隈演習林の森林簿によると, TK1プロットでは2005年2月と2006年1月に除間伐が行われており, TK2プロットでは1978年8月に除伐, 2004年1

表1 調査地の概要
Site characteristics.

林分 (Stand No.)	林齢 (Stand age)	斜面位置 (Slope position)	標高 (Altitude) m	傾斜 (Incline) degrees	斜面方位 (Slope direction)	立木密度 (Density) trees ha ⁻¹	平均胸高直径 (Mean DBH) cm	平均樹高 (Mean height) m	胸高断面積合計 (Total BA) m ² ha ⁻¹
TK1	34	Upper	565	26	南 (S)	978	29.4 ± 3.8	16.2 ± 1.1	67.3
TK1	34	Lower	540	21	南 (S)	889	28.5 ± 3.8	19.8 ± 1.2	57.6
TK2	46	Upper	620	25	南南西 (SSW)	1644	21.8 ± 3.5	13.9 ± 1.4	62.8
TK2	46	Lower	580	40	南南西 (SSW)	1911	22.3 ± 3.5	14.1 ± 1.4	76.6
TK3	56	Upper	640	22	西南西 (WSW)	1600	25.9 ± 5.1	14.9 ± 1.7	87.8
TK3	56	Lower	590	26	西 (W)	1822	26.6 ± 4.6	19.6 ± 1.4	104.2

月に除間伐が行われており、TK3プロットでは1978年6月に除間伐、1996年1月に利用間伐が行われている。その後各調査区とも調査時まで特に施業は行われていない。

各調査区に生育するすべてのスギについて胸高直径と樹高を測定した。調査区の下層植生には、斜面上部下部ともにヤブニッケイ、タブノキ、エゴノキ、ヤブツバキ、アオキ、ネズモチなどの樹種が見られた他、草本類やシダ類などが出現した。

2. 土壌の測定

土壌の窒素無機化および硝化特性を評価するために、本研究ではバリードバッグ法を用いた (Eno, 1960)。2007年6月10日に各調査区から表層0-10cmの鉍質土壌を5ヶ所づつ、100mlの採土円筒2つを用いて採取した。採取した土壌は、現地で根や有機物などを簡単に取り除いた後にポリエチレン製の袋に詰めて埋め戻し、現地の地温で培養を行った。また採取した土壌の一部は培養初期の土壌として、実験室に持ち帰った。1回目の回収は2007年10月12日に行い、その際に初回同様に培養初期の土壌の採取と次の期間のバリードバッグの設置を行った。2回目の回収と設置は2008年2月20日に行い、2008年6月12日に最後の回収を行った。培養期間は1回目が124日間、2回目が131日間、3回目が112日間で、合計で計367日間であった。

培養初期とバリードバッグ内の培養後の土壌を2mmのふるいを用いて根や有機物を取り除いた後に湿重で4gを取り分け、40mlの2N-KClで1時間振とう抽出した。抽出液のアンモニア態窒素と硝酸態窒素の濃度を、スルファニルアミド・ナフチルアミン法とインドフェノール法を用いて測定した。また培養初期と培養後の土壌の含水率を測定し、乾土1kgあたりのアンモニア態窒素現存量と硝酸態窒素現存量を算出した。無機化量と硝化量は、培養前後の差から算出した。

残った土壌は、80の乾燥機で72時間以上乾燥させ全炭素・窒素およびpHの分析用試料とした。土壌の全窒素濃

度、全炭素濃度をNCアナライザー (SUMIGRAPH NC-22F, 住化分析センター, 大阪) で測定した。また土壌pHについては、10gの土壌を1NのKClおよびイオン交換水50mlで1時間浸透した後にガラス電極pHメーター (HORIBA D-51, 堀場製作所, 京都) を用いて測定した。

細土率を測定するために、各調査区から表層0-10cmの鉍質土壌を5ヶ所づつ、100mlの採土円筒2つを用いて採取した。2mmのふるいで細土を篩別後、80の乾燥機で72時間以上乾燥させた後に重量を測定した。細土率から1ヘクタールあたりの炭素蓄積量、窒素蓄積量、窒素無機化量および硝化量を算出した。

3. 統計解析

斜面位置および林分による全炭素濃度、全窒素濃度、炭素蓄積量、窒素蓄積量、土壌CN比、pH、窒素無機化速度、硝化速度、窒素無機化量、硝化量の違いを明らかにするために二元配置の分散分析を行った。統計解析は、統計ソフトSPSSを用いて行った (SPSS Inc., Chicago, IL, USA)

結 果

1. 土壌炭素・窒素およびpHの斜面位置による違い

各調査区的全炭素濃度、全窒素濃度、炭素蓄積量、窒素蓄積量、土壌CN比およびpHを表2に示す。6調査区的全炭素濃度は、16.32~21.86g kg⁻¹の範囲にあり、平均は19.62g kg⁻¹であった (表2)。6調査区的全窒素濃度は、0.95~1.50g kg⁻¹の範囲にあり、平均は1.18g kg⁻¹であった (表2)。二元配置分散分析の結果、全炭素濃度・全窒素濃度ともに斜面位置による有意な差が見られた (表3)。また全窒素濃度に関しては、林分間による有意な差が見られた (表3)。

6調査区の炭素蓄積量は、13.39~19.27t ha⁻¹の範囲にあり、平均は15.93t ha⁻¹であった (表2)。6調査区の窒素蓄積量は、0.78~1.10t ha⁻¹の範囲にあり、平均は0.96t ha⁻¹であった (表2)。二元配置分散分析の結果、炭素蓄積量・

表2 表層土壌 (0-10cm) の理化学性
Chemical properties of surface soils (0-10cm).

林分 (Stand No.)	林齢 (Stand age)	斜面位置 (Slope position)	n	全炭素	全窒素	炭素蓄積量	窒素蓄積量	C/N	pH(KCl)	pH(H ₂ O)
				(Total C) g kg ⁻¹	(Total N) g kg ⁻¹	(C accumulation) t ha ⁻¹	(N accumulation) t ha ⁻¹			
TK1	34	Upper	5	21.86 ± 2.82	1.50 ± 0.28	15.24 ± 3.70	1.05 ± 0.31	14.7 ± 1.3	5.1 ± 0.3	6.1 ± 0.2
TK1	34	Lower	5	20.72 ± 4.79	1.21 ± 0.25	15.31 ± 4.17	0.89 ± 0.22	17.0 ± 0.4	5.3 ± 0.1	6.2 ± 0.0
TK2	46	Upper	5	21.01 ± 3.21	1.19 ± 0.21	19.27 ± 3.20	1.10 ± 0.22	17.7 ± 0.8	5.1 ± 0.2	6.0 ± 0.2
TK2	46	Lower	5	16.85 ± 3.30	0.98 ± 0.17	13.39 ± 2.66	0.78 ± 0.13	16.7 ± 0.8	5.4 ± 0.1	6.3 ± 0.1
TK3	56	Upper	5	20.97 ± 5.11	1.26 ± 0.28	17.55 ± 4.29	1.05 ± 0.24	16.7 ± 0.8	5.1 ± 0.2	6.1 ± 0.1
TK3	56	Lower	5	16.32 ± 2.54	0.95 ± 0.15	14.84 ± 3.07	0.87 ± 0.17	17.1 ± 0.3	5.7 ± 0.2	6.2 ± 0.3

表3 斜面位置と林分の違いが土壌の理化学性と無機化特性に与える影響についての二元配置分散分析の結果
The results of 2-way ANOVAs.

		斜面位置 (Slopeposition)		林分 (Stand)		斜面位置 × 林分 (Slopeposition × Stand)	
		F	p	F	p	F	p
全炭素	(Total C)	4.68	0.04	1.19	0.32	0.51	0.61
全窒素	(Total N)	8.15	0.01	3.44	0.05	0.10	0.91
炭素蓄積量	(C accumulation)	3.82	0.06	0.21	0.81	1.40	0.27
窒素蓄積量	(N accumulation)	5.89	0.02	0.05	0.95	0.30	0.75
C/N	(C/N)	4.88	0.04	7.74	0.003	7.27	0.003
pH(KCl)	(pH(KCl))	18.51	0.0002	1.44	0.26	1.22	0.31
pH(H ₂ O)	(pH(H ₂ O))	6.19	0.02	0.19	0.83	0.52	0.60
窒素無機化速度	(N mineralization rate)						
期間1	(Period1)	0.14	0.71	0.29	0.75	0.36	0.70
期間2	(Period2)	0.18	0.68	1.61	0.22	0.55	0.58
期間3	(Period3)	2.73	0.11	1.78	0.19	1.35	0.28
硝化速度	(Nitrification rate)						
期間1	(Period1)	0.21	0.65	0.36	0.70	0.53	0.60
期間2	(Period2)	0.95	0.34	1.05	0.37	0.73	0.49
期間3	(Period3)	1.27	0.27	2.31	0.13	1.00	0.39
窒素無機化量	(N mineralization)						
期間1	(Period1)	0.33	0.57	0.01	0.99	0.75	0.48
期間2	(Period2)	0.14	0.71	0.80	0.46	0.48	0.63
期間3	(Period3)	2.27	0.15	0.55	0.58	1.92	0.17
硝化量	(Nitrification)						
期間1	(Period1)	0.42	0.52	0.06	0.94	1.01	0.38
期間2	(Period2)	0.98	0.33	0.41	0.67	0.80	0.46
期間3	(Period3)	0.75	0.40	0.50	0.62	1.20	0.32

窒素蓄積量とともに斜面位置による有意な差が見られた(表3)。6調査区のCN比は、14.7~17.7の範囲にあり、平均は16.7であった(表2)。二元配置分散分析の結果、斜面位置と林分によるCN比の有意な差が見られた(表3)。6調査区のpHは、KCl抽出の場合で5.1~5.7で、水抽出で6.0から6.3の範囲にあり、平均はKCl抽出の場合で5.3、水抽出で6.2であった(表2)。二元配置分散分析の結果、水抽出、KCl抽出とともに斜面位置による有意な差が見られた(表3)。

2. 窒素無機化特性の斜面位置による違い

各調査区の期間ごとの窒素無機化速度および硝化速度を表4に示す。2007年6月10日から10月12日の期間1の無機化速度は、0.19~0.35mgN kg⁻¹ day⁻¹の範囲にあり、6調査区の平均は0.30mgN kg⁻¹ day⁻¹であった(表4)。2007年10月12日から2008年2月20日の期間2の無機化速度は、0.04~0.11mgN kg⁻¹ day⁻¹の範囲にあり、6調査区の平均は0.06mgN kg⁻¹ day⁻¹であった(表4)。2008年2月20日から6月12日の期間3の無機化速度は、0.10~0.32mgN kg⁻¹ day⁻¹の範囲にあり、6調査区の平均は0.20mgN kg⁻¹ day⁻¹であった(表4)。二元配置分散分析の結果、すべての期

間において、斜面位置と林分による窒素無機化速度の有意な差は見られなかった(表3)。

硝化速度については、窒素無機化速度とほぼ同様の傾向を示した(表4)。2007年6月10日から10月12日の期間1の硝化速度は、0.18~0.36mgN kg⁻¹ day⁻¹の範囲にあり、6調査区の平均は0.29mgN kg⁻¹ day⁻¹であった(表4)。2007年10月12日から2008年2月20日の期間2の硝化速度は、0.05~0.11mgN kg⁻¹ day⁻¹の範囲にあり、6調査区の平均は0.07 mgN kg⁻¹ day⁻¹であった(表4)。2008年2月20日から6月12日の期間3の硝化速度は、0.12~0.35mgN kg⁻¹ day⁻¹の範囲にあり、6調査区の平均は0.22mgN kg⁻¹ day⁻¹であった(表4)。二元配置分散分析の結果、すべての期間において、斜面位置と林分による硝化速度の有意な差は見られなかった(表3)。また無機化速度に占める硝化速度の割合は、ほぼすべての林分で100%であった。

各調査区の期間ごとおよび年間の窒素無機化量および硝化量を表5に示す。年間の窒素無機化量は、36.3~67.1kgN ha⁻¹の範囲にあり、6調査区の平均は51.8kgN ha⁻¹であった(表5)。二元配置分散分析の結果、すべての期間において、斜面位置と林分による窒素無機化量の有意な差は見られなかった(表3)。また硝化量については、37.2~66.4kgN

表4 表層土壌 (0 - 10cm) の現地培養による期間ごとの窒素無機化速度および硝化速度
N mineralization rate and nitrification rate of surface soils (0-10cm) in each *in situ* incubation period.

林分 (Stand No.)	林齢 (Stand age)	斜面位置 (Slope position)	期間1 (Period1) 07/6/10 ~ 07/10/12 mgN kg ⁻¹ day ⁻¹	期間2 (Period2) 08/10/12 ~ 08/2/20 mgN kg ⁻¹ day ⁻¹	期間3 (Period3) 08/2/20 ~ 08/6/12 mgN kg ⁻¹ day ⁻¹
窒素無機化速度 (N mineralization rate)					
TK1	34	Upper	0.34 ± 0.32	0.07 ± 0.07	0.32 ± 0.23
TK1	34	Lower	0.35 ± 0.24	0.11 ± 0.06	0.21 ± 0.05
TK2	46	Upper	0.31 ± 0.17	0.05 ± 0.04	0.28 ± 0.12
TK2	46	Lower	0.26 ± 0.20	0.04 ± 0.05	0.10 ± 0.05
TK3	56	Upper	0.19 ± 0.19	0.05 ± 0.04	0.13 ± 0.07
TK3	56	Lower	0.33 ± 0.17	0.04 ± 0.05	0.16 ± 0.10
硝化速度 (Nitrification rate)					
TK1	34	Upper	0.33 ± 0.29	0.07 ± 0.06	0.35 ± 0.22
TK1	34	Lower	0.36 ± 0.25	0.11 ± 0.05	0.23 ± 0.04
TK2	46	Upper	0.30 ± 0.16	0.06 ± 0.04	0.21 ± 0.07
TK2	46	Lower	0.23 ± 0.18	0.05 ± 0.03	0.12 ± 0.05
TK3	56	Upper	0.18 ± 0.17	0.06 ± 0.03	0.17 ± 0.09
TK3	56	Lower	0.34 ± 0.19	0.07 ± 0.05	0.21 ± 0.09

表5 期間ごとおよび年間の表層土壌 (0 - 10cm) の窒素無機化量と硝化量
The amounts of N mineralization and nitrification of surface soils (0-10cm)

林分 (Stand No.)	林齢 (Stand age)	斜面位置 (Slope position)	期間1 (Period1) 07/6/10 ~ 07/10/12 kgN ha ⁻¹	期間2 (Period2) 08/10/12 ~ 08/2/20 kgN ha ⁻¹	期間3 (Period3) 08/2/20 ~ 08/6/12 kgN ha ⁻¹	年間総量 kgN ha ⁻¹
窒素無機化量 (N mineralization)						
TK1	34	Upper	23.6 ± 21.4	6.1 ± 7.1	26.5 ± 21.0	56.1
TK1	34	Lower	30.1 ± 21.2	10.0 ± 5.5	18.3 ± 5.1	58.4
TK2	46	Upper	30.0 ± 14.2	5.5 ± 4.3	31.6 ± 13.1	67.1
TK2	46	Lower	21.9 ± 16.2	4.2 ± 5.5	10.2 ± 6.1	36.3
TK3	56	Upper	18.1 ± 17.5	5.2 ± 4.7	13.6 ± 7.8	36.8
TK3	56	Lower	32.6 ± 15.8	5.1 ± 5.6	18.2 ± 13.4	55.9
硝化量 (Nitrification)						
TK1	34	Upper	23.3 ± 19.1	6.0 ± 5.7	28.6 ± 20.4	57.9
TK1	34	Lower	30.3 ± 22.5	10.7 ± 4.4	20.6 ± 4.2	61.6
TK2	46	Upper	28.3 ± 14.0	6.9 ± 4.1	24.0 ± 8.3	59.2
TK2	46	Lower	19.1 ± 14.4	5.7 ± 3.5	12.3 ± 6.5	37.2
TK3	56	Upper	17.0 ± 15.6	6.8 ± 3.8	17.6 ± 9.7	41.4
TK3	56	Lower	33.4 ± 17.3	9.1 ± 5.8	23.9 ± 12.5	66.4

ha⁻¹の範囲にあり、6調査区の平均は54.0kgN ha⁻¹であった(表5)。二元配置分散分析の結果、すべての期間において、斜面位置による硝化量の有意な差は見られなかった(表3)。各調査区ともに年間の無機化量、硝化量の90から95%程度が、植物の生育期である期間1と期間3に集中していた。

考 察

1. 窒素無機化特性の他地域との比較

本調査地は、鉱物質土壌0-10cmにおける全炭素量と全窒素量は、他の地域と比べても小さかった(堤, 1987)。一般に土壌中の炭素や窒素量が少ない場合に窒素無機化速度が小さくなることが知られている(平井ら, 2006)。しかし本調査地における表層土壌0-10cmにおける1年間の

無機態窒素量は36.3~67.1kg/haと、他地域のスギ林の窒素無機化量と比較しても小さい値ではなかった。例えば群馬県の斜面下部に成立する約80年生スギ人工林で、表層土壌0-10cmにおける1年間の無機態窒素量をシリンダー法で調べた結果53.1kg/haと報告されている(高橋ら, 1994)。また平井ら(2007)では亜寒帯から亜熱帯にかけて、幅広い気候帯の様々な植生で、レジソコア法を用いた表層0-5cmの年間無機化量を調べた結果、8.5~149.8kgN ha⁻¹と報告している。本調査地と同じ暖温帯域に限ると、29.7~149.8kgN ha⁻¹の範囲であった。また和歌山県のスギ人工林において本研究と同様のバリードバッグ法を用いて測定した結果、表層0-50cmの土壌で18.7~45.1kgN ha⁻¹と報告されており(Tateno *et al.*, 2009)、本調査地よりもはるかに小さい。以上のように土壌層位や方法が様々で単純な比較は難しいが、本調査地では全国的な他の森林と比べても必ずしも無機化量が小さい訳ではないと考えられる。このことは、本調査地の土壌は、窒素無機化にとって良好な条件が揃っていることが関連すると考えられる。例えば、土壌有機物のCN比が20以下の時に不動化に対して相対的に無機化が進行すると考えられている(武田, 1994; Toda & Haibara, 1999; Takeda & Abe, 2001)。本調査地の土壌有機物のCN比は、林分により若干の違いは見られたが、すべての林分で斜面上部と下部ともに20以下であった。またpHも全体的に他の地域よりも高い傾向があり、硝化にとって良好な環境であると考えられる。そのため本調査地では、無機化に占める硝化の割合は、ほぼ100%と非常に高かった。他地域でしばしば報告される斜面上部で見かけの硝化がほとんど起こらないという現象が本調査地で見られなかったのは、土壌pHが斜面上部でも十分に高いことが関係すると思われる(Hirobe *et al.*, 1998, Tateno & Takeda, 2003)。

本調査地の土壌は未熟土であり、土壌中の有機態窒素の貯留量は林分により若干の違いはあるが、全般的に他地域に比べ少ないが、窒素無機化量は必ずしも小さくはない。さらにスギの年間窒素吸収量や窒素の内部循環量も他の地域と比べて小さくはない(Tateno *et al.*, unpublished data)。土壌の貯留量にたいして循環量が大きい本調査地のような未熟土では、伐採などに際して、土壌流出や土壌環境の変化が起こらないように工夫する必要があるだろう。

2. 窒素無機化特性の斜面位置による違い

これまで斜面位置により無機化速度が変化する(Enoki *et al.*, 1997)、あるいは無機化速度は一定の傾向はないが、無機化速度に占める硝化速度の割合が変化する(Hirobe *et al.*, 1998; 高橋ら, 1994)、無機化速度も硝化率も変化する(Tateno & Takeda, 2003)などの報告がなされてきた。パ

ターンは様々であるが、斜面位置によって、無機化速度や硝化速度などの無機化特性に何らかの違いみられることが、わが国の森林では人工林と天然林ともに一般的な傾向であると考えられる。しかし本調査地においては、窒素無機化速度、硝化速度ともに斜面位置による違いが見られなかった。

窒素無機化特性の違いには、土壌の全窒素量、土壌pH、CN比、微生物層などが影響することが示唆されている(沓名ら, 1988; 戸田, 1994; Inagaki & Miura, 2002; 平井ら, 2006)。また硝化については、斜面位置による土壌pHやCN比の変化に伴い、硝化細菌の現存量や活性が変化することにより、硝化速度が変化するが示唆されている(沓名ら, 1988; 千原2000; Hirobe *et al.*, 1998)。同一の斜面上での斜面位置の違いにより無機化や硝化などの窒素無機化特性に変化が見られた例のほとんどで、斜面上部では下部に比べて、土壌pHが低く、CN比が高いという結果が併せて報告されている(Hirobe *et al.*, 1998; Tateno & Takeda, 2003)。本調査地では、土壌pHはこれまでの報告と同様に斜面上部で低くなる傾向が見られたが、土壌CN比は斜面位置にたいして一定の傾向を示さなかった。しかし本調査地では斜面位置に関わらずpHやCN比は無機化や硝化にとって良好な条件であったため、斜面位置による無機化特性の違いが見られなかったと考えられる。

本調査地において土壌窒素無機化特性が斜面位置によって違わなかった理由について、既存の多くの報告では、褐色森林土などの土壌生成が比較的進んだ土壌であるのに対して(平井ら, 2006)、本調査地の土壌は火山灰性の未熟土であり、十分な土壌生成作用を受けていないことが関係すると思われる。一般に土壌生成過程において、母材・気候・地形・生物・時間が土壌生成の5つの要素として挙げられるが、同一斜面上の林分にとっては、地形と生物要因以外の要因はほぼ同じであると考えられる。さらに本調査地のような人工林では、植生も同じである。しかし、同一植生でも斜面に沿った土壌環境変化によって落葉の窒素濃度が変化するが知られる(Enoki *et al.*, 1997)。貧栄養な斜面上部で落葉の窒素濃度が低下することにより、落葉の分解速度も遅くなり、さらなる貧栄養な環境を生み出すことが示唆されている(Enoki *et al.*, 1997)。土壌生成が進行するにつれ斜面位置の違いにより、植物の養分吸収量、分解速度、有機物の蓄積様式、土壌動物層、土壌微生物層などの土壌-植生間の相互作用系が変化し、斜面位置の違いが増大していくと考えられる。しかし本調査地では、最近の火山放出物由来の土壌であるため、斜面位置による違いが生み出されるには、土壌生成の時間の経過が短かったことが影響するのではないかと考えられる。しかし本調査

地でもpHの違いが見られるため、今後土壌生成作用が進むにつれて、土壌 - 植物間の相互作用により、斜面位置による環境条件の違いも大きくなり、無機化特性も変化する可能性もある。土壌の生成段階の違いによる斜面に沿った土壌環境の変化について、さらに詳細な研究が望まれる。

本研究においては、土壌の窒素無機化特性には斜面位置による違いは見られなかったが、同一林齢の樹高は他の地域同様に斜面下部で斜面上部より高くなる傾向が見られた(表1)。本調査地においては、少なくとも現段階では無機化特性と森林構造の関連性は見られなかった。今後、未熟土における窒素無機化特性や窒素循環様式と森林の構造や生産性についての詳細な研究が望まれる。

謝 辞

本調査を進めるにあたり、京都大学フィールド科学教育研究センターの徳地直子准教授には、全炭素・全窒素の測定において大変お世話になりました。鹿児島大学高隈演習林の職員の皆さまには、調査区の設営に際して、大変有益な助言を頂きました。鹿児島大学農学部生物環境学科育林学研究室の米田健教授をはじめ学生の皆さんには、野外調査の協力と有益な助言を頂きました。ここに厚くお礼を申し上げます。なお本研究は、科学研究費(19380078, 20780120)の補助を受けて行った。

引用文献

- Binkley D, Hart SC (1989) The components of nitrogen availability assessments in forest soils. *Adv. Soil Sci.*10:57-112
- 千原麻由・小柳信宏・戸田浩人・生原喜久雄 (2000) 森林土壌の窒素無機化に及ぼす土壌微生物層の影響. *森林環境資源科学*38:97 - 106
- Elser JJ, Bracken MES, Cleland EE, Gruner DS, Harpole WS, Hillebrand H, Ngai JT, Seabloom EW, Shurin JB, Smith JE (2007) Global analysis of nitrogen and phosphorus limitation of primary producers in freshwater, marine and terrestrial ecosystems. *Ecol. Let.* 10:1135-1142
- Eno CF (1960) Nitrate Production in the Field by Incubating the Soil in Polyethylene Bags. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 24:277-279
- Enoki T, Kawaguchi H, Iwatsubo G (1997) Nutrient-uptake and nutrient-use efficiency of *Pinus hunbergii* Parl. along a topographical gradient of soil nutrient availability. *Ecol. Res.* 12:191-199
- Garten CT, Huston MA, Thoms CA (1994) Topographic variation of soil nitrogen dynamics at Walker Branch Watershed, Tennessee. *For. Sci.* 40:497-512
- 平井敬三・阪田匡司・森下智陽・高橋正通 (2006) スギ林土壌の窒素無機化特性とそれに及ぼす環境変動や施業の影響. *日林誌*88:302-311
- 平井敬三・金子真司・高橋正通 (2007) 森林土壌における気候帯別の窒素無機化 - 土壌理化学性, 気温, 土壌型による現地窒素無機化速度の推定 -. *森林立地* 49:123-131
- Hirobe M, Tokuchi N, Iwatsubo G (1998) Spatial variability of soil nitrogen transformation patterns along a forest slope in a *Cryptomeria japonica* D. Don plantation. *Eur. J. Soil Biol.* 34:123-131
- Hirobe M, Tokuchi N, Iwatsubo G (2001) Spatial and vertical differences in in-situ soil nitrogen availability along a slope in a conifer plantation forest. *Applied Forest Science* 10:19-25
- Inagaki Y, Miura S (2002) Soil NO₃-N production and immobilization affected by NH₄-N, Glycine, and NO₃-N addition in different forest types in Shikoku, southern Japan. *Soil Sci. Pl. Nut.* 48:679-684
- 小柳信宏・千原麻由・戸田浩人・生原喜久雄 (2002) 斜面位置および樹種の異なる森林土壌の炭素および窒素の無機化特性. *日林誌* 84:111-119
- 沓名重明・本庄真・鈴木道代・仁王以智夫 (1988) 土壌型および樹種の相違による窒素の無機化と硝化活性. *日林誌*70:80 - 85
- Nakanishi A, Inagaki Y, Osawa N, Shibata S, Hirata K (2009) Effects of patch cutting on leaf nitrogen nutrition in hinoki cypress (*Chamaecyparis obtusa* Endlicher) at different elevations along a slope in Japan. *J. For. Res.* 14:388-393
- Näsholm T, Ekballd A, Nordin A, Giesler R, Högborg M, Högborg P (1998) Boreal forest plants take up organic nitrogen. *Nature* 392:914-916
- Pastor J, Aber JD, McLaugherty CA (1984) Aboveground production and N and P cycling along a nitrogen mineralization gradient on Blackhawk Island, Wisconsin. *Ecology* 65:256-268
- Reich PB, Grigal DF, Aber JD, Gower ST (1997) Nitrogen mineralization and productivity in 50 hardwood and conifer stands on diverse soils. *Ecology* 78:335-347
- Roy S, Singh JS (1995) Seasonal and spatial dynamics of plant-available N and P pools and N-mineralization in relation to fine roots in a dry tropical forest habitat. *Soil Biol. Biochem.* 27:33-40
- 高橋輝昌・生原喜久雄・相場芳憲 (1994) スギ・ヒノキ造林地での斜面位置別の表層土壌の窒素無機化量. *森林立地* 36:15-21

- 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. 日誌 44: 211-212
- Takeda H, Abe T (2001) Templates of food-habitat resources for the organization of soil animals in temperate and tropical forests. *Ecol. Res.* 16:961-973
- Tateno R, Takeda H (2003) Forest structure and tree species distribution in relation to topography-mediated heterogeneity of soil nitrogen and light at forest floor. *Ecol. Res.* 18:559-571
- Tateno R, Fukushima K, Fujimaki R, Shimamura T, Ohgi M, Arai H, Ohte N, Tokuchi N, Yoshioka T (2009) Biomass allocation and nitrogen limitation in a *Cryptomeria japonica* plantation chronosequence. *J. For. Res.* 14:276-285
- 戸田浩人・生原喜久雄 (1994) 森林土壌中における窒素無機化の反応速度論的解析(I) 林齢・斜面位置・深さ別の窒素無機化特性. 日誌 76:144-151
- 戸田浩人 (1994) 森林土壌中における窒素無機化の反応速度論的解析(II) 土壌の含水率およびpHの違いが窒素無機化過程に及ぼす影響. 日誌 76:540-546
- Toda H, Haibara K (1999) Effects of carbon properties on characteristics of nitrogen mineralization. *Jpn. J. For. Environ.* 41:59-66
- Tokuchi N, Takeda H, Yoshida K, Iwatsubo G (1999) Topographical variations in a plant-soil system along a slope on Mt Ryuoh, Japan. *Ecol. Res.* 14:361-369
- 堤利夫 (1987) 森林の物質循環 東京大学出版会 pp.124
- Vitousek PM, Gosz JR, Grier CC, Melillo JM, Reiners WA (1982) A Comparative Analysis of Potential Nitrification and Nitrate Mobility in Forest Ecosystems. *Ecol. Mon.* 52:155-177
- Vitousek PM, Howarth RW (1991) Nitrogen limitation on land and in the sea: How can it occur? *Biogeochemistry* 13:87-115
- 吉田重明・三宅大浄・仁王以智夫 (1979) 森林土壌中の窒素の動態 (I) 森林表層土における硝化細菌の分布と硝化活性. 日誌 61: 21 - 25
- 吉田重明・春田泰次・仁王以智夫 (1980) 森林土壌中の窒素の動態 (II) 土壌型の異なる2種の天然林土壌中の窒素の無機化と硝化活性. 日誌 62:230-233
- Zak DR, Pregitzer KS, Host GE (1986) Landscape variation in nitrogen mineralization and nitrification *Can. J. For. Res.* 16:1258-1263
- Zushi K (2003) Topographic Variation of Soil Nitrogen Mineralization and Microbial Biomass in Japanese Cedar (*Cryptomeria japonica* D. Don) Stands at Myougodani Watershed, Toyama, Japan. *Soil Sci. Plant Nutr.* 49: 843-851

要 旨

本研究は、南九州の火山灰性未熟土に成立するスギ人工林において、斜面位置の違いが窒素無機化特性に与える影響を明らかにすることを目的として行った。本研究では、南九州の大隅半島に位置する鹿児島大学農学部附属高隈演習林の異なる3斜面上に成立するスギ人工林の斜面上部と下部において、現地培養により窒素無機化特性を明らかにした。本調査地は、1914年の桜島噴火の際の噴出物由来の未熟土が堆積した地域であり、表層土壌は他の地域に比べ短い時間しか土壌生成作用を受けていない。これまで土壌生成のある程度進行した褐色森林土や黒ボク土において行われた多くの研究では、斜面位置の違いにより窒素無機化速度が変化する、あるいは硝化速度や無機化に占める硝化の割合が変化することが報告されている。しかし、本調査地においては、斜面位置の違いは、窒素の無機化特性に影響を与えていなかった。窒素無機化や硝化に影響を及ぼすと考えられる土壌の炭素・窒素蓄積量や土壌CN、土壌pHなども斜面位置による違いは見られたが、無機化や硝化を制限するほどの違いはなかったと考えられる。長期間にわたる土壌生成過程において、斜面位置により水分などの環境条件が変化することにより、植物の養分吸収量、分解速度、有機物の蓄積様式、土壌動物層、土壌微生物層など土壌-植生間の相互作用系に変化を生み出し、その結果として斜面位置による窒素無機化特性の違いが見られるのが一般的だと考えられる。しかし本調査地のような未熟土においては、土壌生成が十分に進行していないために斜面位置による土壌環境の違いが大きくないため、その結果として窒素無機化特性に違いが見られなかったのではないかと考えられる。