

保持林業実証実験地における伐採前後の土壤環境の変化

長坂晶子*・山田健四*・速水将人*・長坂 有*

Changes in soil environment before and after logging in the Retention Experiment for plantation FoREstry in Sorachi, Hokkaido (REFRESH) sites

Akiko NAGASAKA*, Kenji YAMADA*, Masato HAYAMIZU*, Yu NAGASAKA*

要旨

森林の伐採は、森林内の窒素循環だけでなく、溪流への窒素流出など、集水域内の物質循環にも大きな影響を与える。保持林業の導入は、伐採による窒素循環に対するインパクトを緩和する効果が期待される。筆者らは、森林土壌中の無機態窒素に着目し、北海道において実施された保持林業実証実験地において、施業前後の土壌中の窒素量を測定し、施業の有無や施業方法の違いによって窒素量がどの程度異なるのかデータ蓄積を図った。リター層下の鉍質土壌の全炭素量、全窒素量の分析から、有機態も含めた窒素全体の量は施業前後で変化していなかったが、無機態窒素を分析したところ、施業後、地温の上昇と併せてアンモニア態窒素 ($\text{NH}_4^+ - \text{N}$) 量の減少と硝酸態窒素 ($\text{NO}_3^- - \text{N}$) 量の増加が認められ、鉍質土壌に貯留されている有機態窒素の無機化から硝化に至る過程が速やかに進行していることが示唆された。保持木の有無や多寡による反応の違いは見られず、表層土壌の窒素動態という観点からは保持林業の特徴は認められなかった。

キーワード：森林土壌、土壤環境、無機態窒素、保持伐採

はじめに

窒素は植物の成長に必要な養分元素のひとつであり、自然界では単体の窒素ガスのほか、有機態（主に固体）・無機態（水溶液もしくはガス）で存在することが知られ、その形態を変化させながら固相、液相、気相を行き来し、生態系を駆動させる要素として重要な役割を担っている。森林生態系においては、窒素は大気や降水等により系外から供給されるほか、落葉落枝（リターフォール）が森林土壌中で分解され、それをふたたび樹木が養分として吸収するといった内部循環型のシステムを持っている。リターに含まれる窒素の大半は有機態として存在している一方で、樹木は水溶性の無機態窒素（主にアンモニア態窒素 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ と硝酸態窒素 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ ）の形態でしか窒素を利用できないため、樹木の養分吸収には、森林土壌中での有機態窒素の無機化、硝化過程が不可欠である（図-1）。

森林の伐採は、樹木による窒素消費量の減少や落葉供給量

の減少、被陰の減少による地表面の日射・温度・湿度などの物理的環境変化をもたらすと予想される。それがひいてはO層（ A_0 層）における有機物の分解促進、有機態窒素の無機化促進など様々な変化を引き起こし、森林内の窒素循環だけでなく、溪流への窒素流出など、集水域内の物質循環にも大きな影響を与えると考えられる。保持林業（柿澤ほか2018）の導入は、上木の一部を残すことでこれらの変化を減少させ、伐採による窒素循環に対するインパクトを緩和する効果が期待されるが、保持林業を物質循環という側面から調査した研究はJerabkova et al. (2011) によるメタ解析の事例等はあるものの、まだそれほど多くはない。そこで筆者らは、森林土壌中の無機態窒素に着目し、北海道において実施された保持林業実証実験地において、施業前後の土壌中の窒素量を測定し、施業の有無や施業方法の違いによって窒素量がどの程度異なるのかデータ蓄積を図ることとした。調査は伐採前年と伐採1年後それぞれ1シーズンの概要把握に留まったが、いくつか施業方法や林相の違いを反映したと思われる結果も得られた

* 北海道立総合研究機構林業試験場 Forestry Research Institute, Hokkaido Research Organization, Bibai, Hokkaido 079-0198

[北海道林業試験場研究報告 第61号 令和6年3月, Bulletin of the Hokkaido Forestry Research Institute, No. 61, March, 2024]

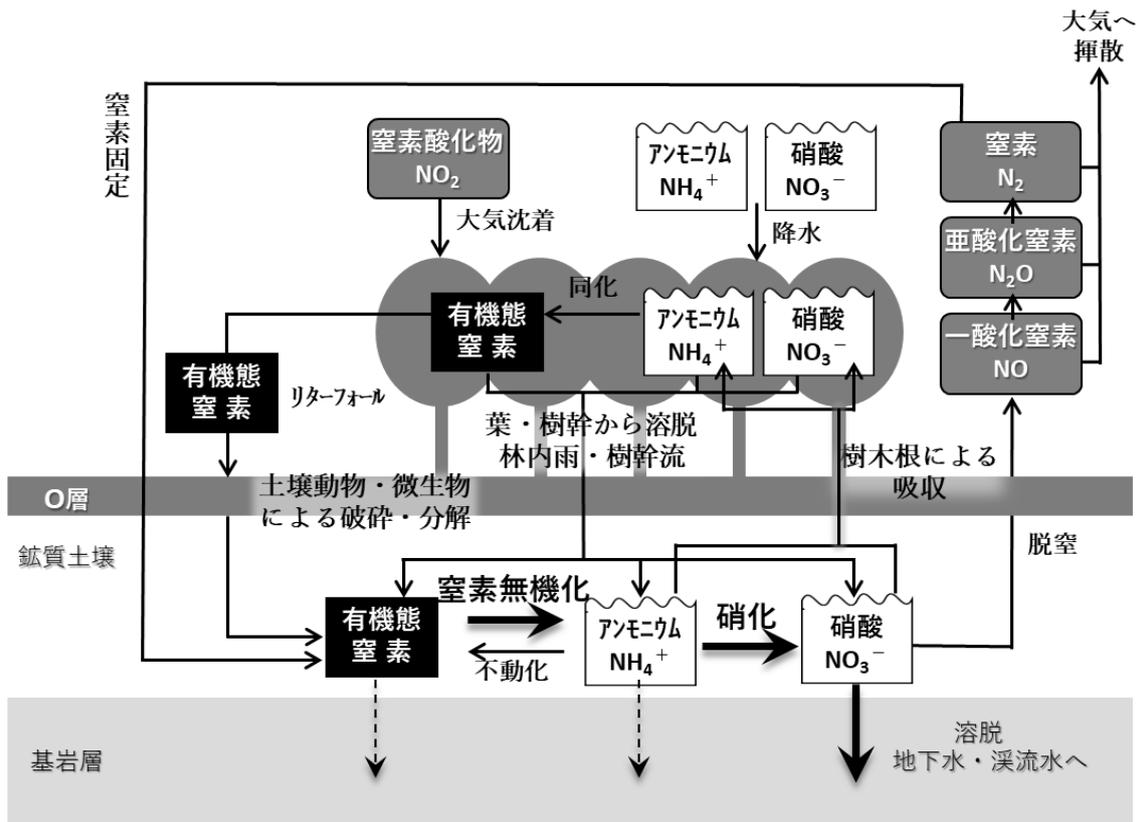


図-1 森林生態系における窒素循環

浦川 (2018) の図を基に作成したもの。本報告では、鈹質土壤中における水溶態の窒素であるアンモニ態窒素 ($\text{NH}_4\text{-N}$) と硝酸態窒素 ($\text{NO}_3\text{-N}$) の動態に焦点を当てて観測を行った。

ため、研究資料として報告するものである。なお、この調査では、窒素の無機化速度を測定するための調査（レジンコア法）も試みたが、調査が適切に実施できなかった可能性があるため、その結果については本報告から除外した。

材料と方法

1. 調査地概要

北海道芦別市、赤平市、深川市にまたがる北海道有林空知管理区に設定した保持林業実証実験地（約5,887ha）において調査を実施した。実験地は第四紀初頭に活動を終了した成層火山とされるイルムケップ火山（標高864m）山麓に位置し、地質は安山岩、デイサイトなどからなる溶岩流・火砕物の互層、火山岩屑（土石流堆積物）で形成されている（河野ら1956；日本地質学会2012）。気候的には北海道日本海側の気候区分に入るため、夏の降雨はそれほど多くないが、冬期は多雪（現地の最深積雪>2m）となり、3月下旬からの融雪増水が顕著である。

当山域では標高200~600m付近まで広くトドマツ (*Abies sachalinensis*) が植林され、高齢の林分では50年を超えている。他方、天然林は標高500m以上ではダケカンバ (*Betula ermanii*) が主体となり、低標高域では沢沿いを中心に、シナノキ (*Tilia japonica*)、ミズナラ (*Quercus crispula*)、イタヤカエデ (*Acer*

pictum)、ハリギリ (*Kalopanax septemlobus*)、ウダイカンバ (*Betula maximowicziana*)、シラカンバ (*Betula platyphylla*)、ハルニレ (*Ulmus davidiana*)、ヤチダモ (*Fraxinus mandshurica*)、オニグルミ (*Juglans mandshurica*) などの落葉広葉樹が残されている。トドマツの生育状況が不成績な林分では、これらの広葉樹が混交する。

実証実験では、8通りの実験区（トドマツ人工林伐採区6種、対照区、天然林区）を基本フレームとして3セット合計23箇所の実験区を設定し、伐採区では毎年1セットずつ、3年間で伐採処理を終了できるように計画された（明石ら2017）。本研究では、第2セットの実験区から皆伐区（CC2：対象範囲の全木を伐採）、少量保持区（SS2：人工林内の広葉樹林冠木を約10本/ha保持）、中量保持区（SM2：人工林内の広葉樹林冠木を約50本/ha保持）を選び、このほかに人工林の伐採の効果を検証するための対照区として非伐採トドマツ人工林区（PC：伐採なし）、広葉樹保持の参照とするための対照区として天然生広葉樹林区（NC1：伐採なし）を設定した（図-2、以降、略称表記とする）。またSM2では、トドマツ植栽木と混交する広葉樹が多かったことから、トドマツ主体の地点（SM2-c）と、広葉樹の多い地点（SM2-d）の2タイプを設定した。実験区における伐採作業は2015年5月中旬に実施されたため、2014年6月に伐採前の試料を、伐採作業から1年経

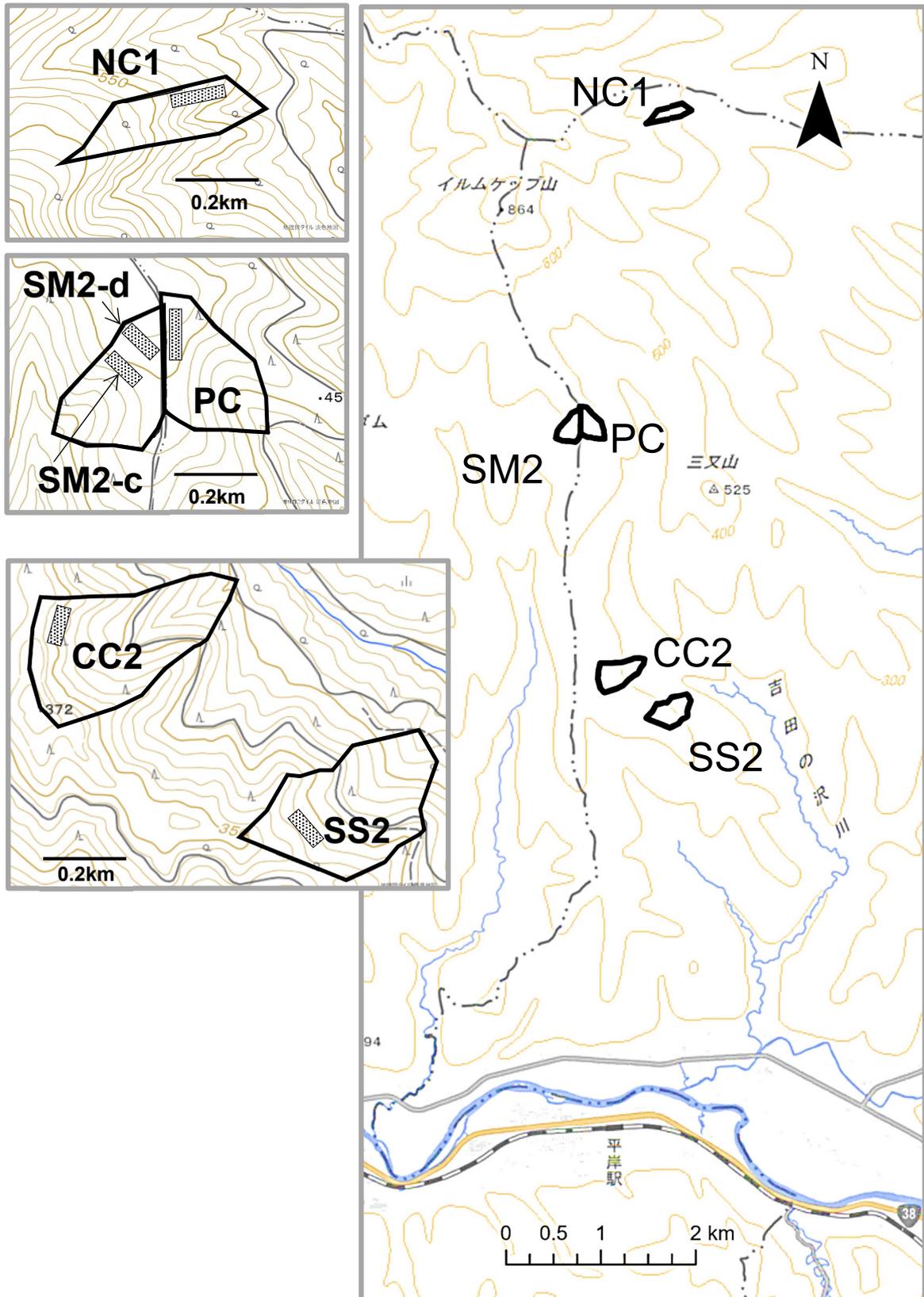


図-2 調査対象流域と土壌試料採取区域の概要

太実線は流域界を表す。土壌試料は、拡大図中に示した□の範囲内で、等高線に沿ってほぼ等間隔に5カ所で採取した。保持伐採プロジェクト全体の実験区の配置は明石ほか(2017)を参照。電子地形図25000(国土地理院)を加工して作成。

表-1 土壌試料を採取した小流域の概要と伐採時（2015年）の状況

処理区名	略称	流域概要					試験地設定時の トドマツ樹冠割合 (%)	伐採時（2015年）の情報			
		流域 面積 (ha)	平均 標高 (m)	平均 傾斜 (%)	地質 タイプ*1	林齢*2		施業面積 (ha)	伐採本数 (本/ha)	収穫材積 (m ³ /ha)	作業道密度 (m/ha)
皆伐	CC2	10.9	316	18	1	55	90%	7.9	589	354	319
少量	SS2	10.2	289	16	1	55	89%	7.1	340	271	323
中量	SM2	8.0	485	11	2	51	86%	7.1	770	356	165
非伐採	PC	5.4	478	15	2	50	68%	-	-	-	-
天然広葉	NC1	5.4	534	19	2	-	0%	-	-	-	-

*1 1：堆積岩+火山岩， 2：火山岩

*2 伐採年（2015年）時点の林齢

過した2016年5月に伐採後の試料を採取した。なお、調査対象地域における伐採前（2014年5月～2015年5月）・伐採1年後（2016年5月～2017年5月）の平均気温は7.4℃・7.3℃、期間最高気温は32℃・34℃、期間総降水量は878mm・1110mmであった（AMeDASデータ芦別，気象庁2023）。

伐採区における伐木運材等の施業面積はいずれも7ha程度で、流域面積に対しCC2，SS2で7割，SM2で9割の範囲で実施された（表-1）。皆伐に近い処理のSS2では伐採本数，収穫材積ともに伐採区のかなで一番少なかった一方，SM2では，伐採本数，収穫材積ともに多く，伐採区における立木の伐採本数や収穫材積が必ずしも広葉樹保持本数と対応していないことに留意しなければならないが，伐木運材に関わる作業道密度はCC2>SS2>SM2の順に高く，保持木の多寡と対応していた。伐採作業終了後，集材に引き続き枝条整理として，グラップルローダを用いて植栽予定区域に残存する伐採木の枝や頂部などが除去され，植栽の邪魔にならないよう作業道の周囲に土手状に積むなどの作業が実施された。すべての伐採区で，集材終了後から2か月以内に肩掛け式の刈払機を用いて3m×2m幅で除草が実施され，伐採翌年の5月中旬，トドマツ苗が植栽された。

2. 地温の計測，試料の採取および分析方法

伐採前および伐採1年後の調査時（2014年6月・2016年5月）に，各区の斜面上部で表層リター，およびO層下（A層上部）の鉍質土壌を採取した。具体的には，各実験区で任意に選んだ5地点において，表層リターを50×50cmの範囲で試料として採取し取り除いたのち，0～10cm深の鉍質土壌を採取した。また，採取箇所に自記記録式の温度ロガー（Onset社HOBOペンダントロガー）を埋設し，各年の地中温度を1年間計測した。採取した土壌は現地地で4mmのふるいにかけて後，保冷材を入れたクーラーボックスに入れて実験室へ持ち帰り，化学分析まで4℃以下の冷蔵室で保管し，後述する土壌無機態窒素量の分析に供した。

また5試料のうち3試料については，一部を乾燥器で60℃48時間絶乾させたのち均質になるよう乳鉢ですりつぶし，

CHNアナライザー（CE440，Exeter Analytical, Inc）で試料に含まれる炭素（%C），窒素（%N）の割合を計測した（北海道大学創成研究機構グローバルファシリティセンター機器分析受託サービスによる）。

窒素分析に供する土壌は以下のとおり前処理を実施した。

現地から回収した土壌を葉さじでよく混ぜ，葉包紙上で10.00g秤量した。2M-KCl溶液を100mlずつ入れた300mlポリ瓶に秤量した土壌を入れ，1時間振盪した後，ポリ瓶の上澄み液を5B濾紙（ADVANTEC社製）で濾過した。濾液は100mlポリ瓶に入れ，分析まで冷凍保存した。

オートアナライザーQuAAtro2-HR（BL-TEC社）を用い，採取した鉍質土壌中の無機態窒素（NH₄⁺-N，NO₃⁻-N）を分析した。

結果と考察

図-3に各調査プロットにおける伐採前，伐採1年後の表層リター重を示した。伐採前（2014年）のトドマツ人工林におけるリター重は，NC1を除きどの実験区でもおおむね500g/m²と同程度の値であったが，伐採1年後（2016年）は実験区間で大きく異なり，CC2，SM2-cでは1000～1500g/m²と伐採前の3倍近い量に増えていた。同じ伐採区でも，広葉樹主体のSM2-dではCC2，SM2-cほど増加せず，非伐採のPCと同程度であった。またSS2では伐採前後でほとんど変化していなかった。NC1も2時期の変化は認められず，250g/m²とトドマツ人工林の2分の1程度であった。

施業後（2016年春）の表層リター量が実験区によって量が異なっていた理由として伐採本数の違いが考えられた。リター量に変化が見られなかったSS2は施業面積に対し，実際に伐採した立木の本数がCC2より250本，SM2より430本ほど少なく（表-1），発生した枝条の量が少なかった可能性がある。

図-4に伐採前（2014年6月）と伐採1年後（2016年5月）のA層土壌の炭素（%C），窒素（%N）の割合を散布図に示した。実験区ごとの値を細かく見てみると，2014年のCC2の炭素・窒素の含有率（それぞれ6%，0.3%）に対し，SS2は倍近い値（12%，0.8%）を示すなど実験区ごとに鉍質土壌の

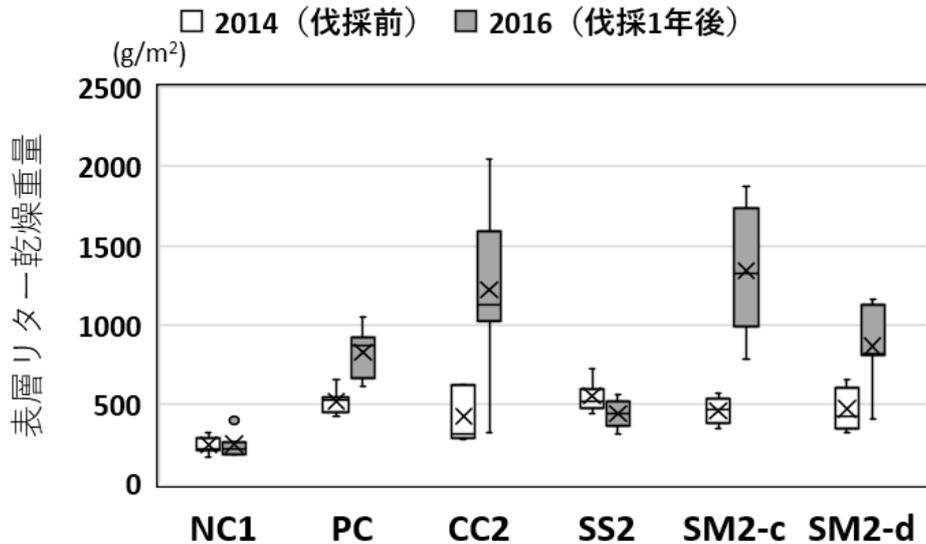


図-3 各調査プロットにおける表層リター量 (g/m²)
 50×50cmの枠を置き採取したもの。
 箱ひげの中の×は5地点の平均値を、横棒は中央値を示す。

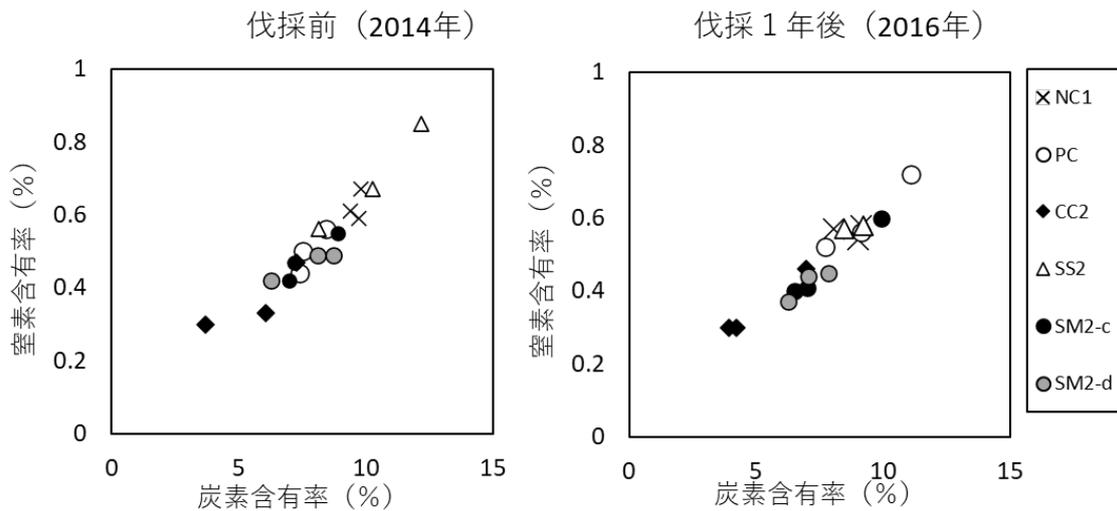


図-4 鈹質土壌 (O層下) の炭素、窒素含有率
 各サイトの試料採取地点5カ所のうち3カ所を任意に選び、採取した鈹質土壌 (O層下) の炭素含有量、窒素含有量を分析したもの。

特性が異なることが示唆された。但し、どの実験区でも伐採前後の変化はほとんど見られなかった。A層土壌については、有機態も含めた窒素全体の量は施業前後で変化していなかった。炭素量・窒素量からC/N比を算出してみると、12.3~18.4の範囲となり、国内で測定された他事例と同程度の値であった(渡邊ほか 2008; 執行ほか 2017)。各年のC/N比の平均値は、伐採前(2014年)が15.6、伐採1年後(2016年)が15.7と2時期で大きな変化は認められず、A層土壌では、伐木運材等、地上部の攪乱の影響はあまり受けていないと考えられた。

図-5に伐採前後の土壌中に含まれる無機態窒素量(kg/ha)を示した。2014年(伐採前年)は、NH₄⁺-Nの値はSS2, SM2-c以外の実験区で1 kg/haかそれ以上の値を示したが、

2016年(伐採1年後)、伐採を実施した実験区では保持木の有無に関わらず1 kg/haを下回った。NC1および広葉樹主体のSM2-d(伐採前)では、NH₄⁺-Nは1.5~2 kg/haとトドマツ人工林実験区より高く、また地点間の値のばらつきがトドマツ人工林実験区より大きかった。一方NO₃⁻-Nは、トドマツ人工林の対照区としたPCでは2時期の違いはほとんど見られず1.3 kg/ha程度であったが、それ以外の実験区では、2016年にNO₃⁻-Nの値が大きくなった。NH₄⁺-NとNO₃⁻-Nの比で見ると特に施業を行った実験区で変化が明瞭で、施業前は同程度もしくはNH₄⁺-Nの割合が高かったが、施業後はNO₃⁻-Nの比率が明らかに高くなっていた。

表-2に各実験区における調査実施年の地温の概要を示し

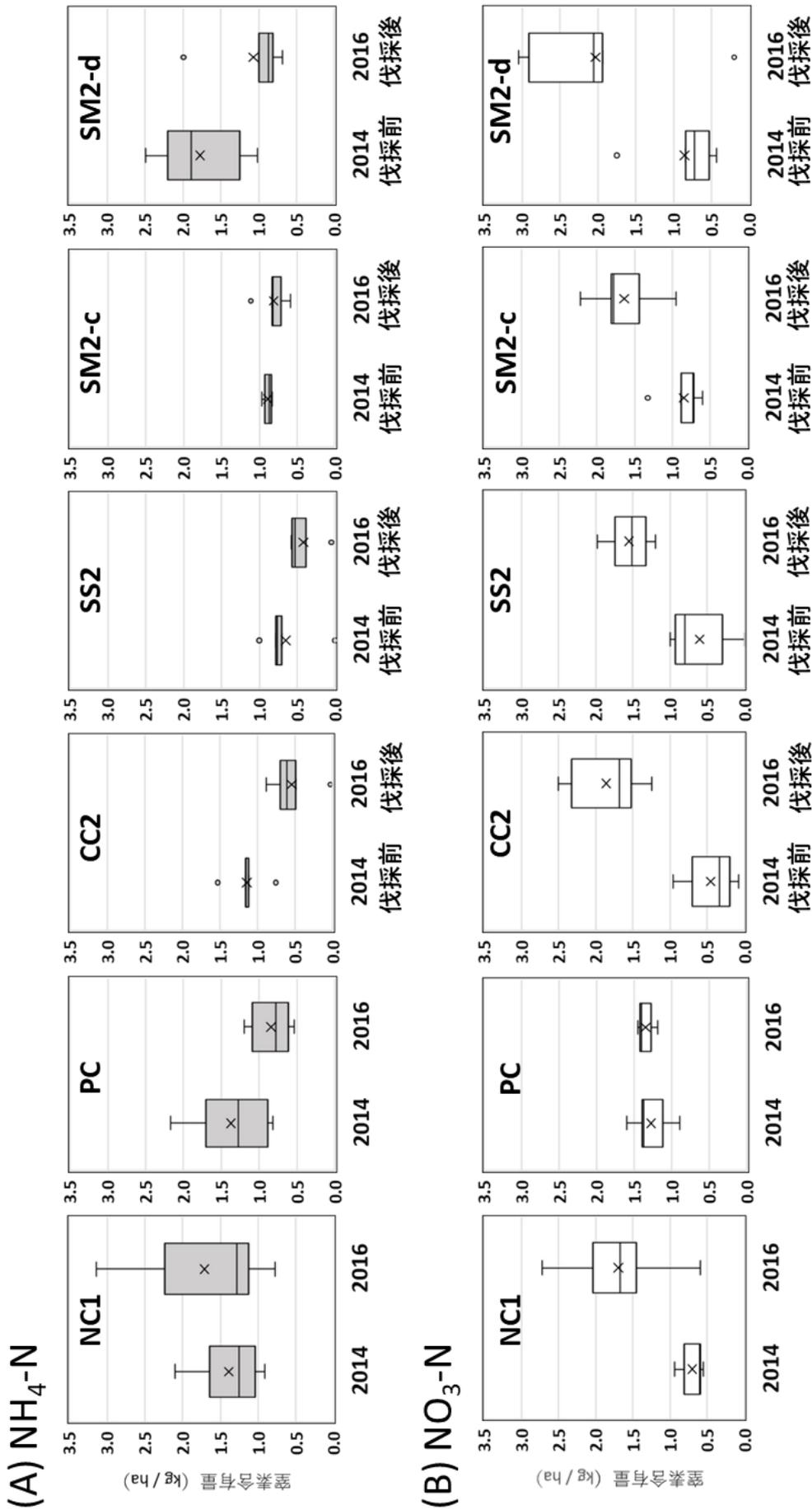


図-5 伐採前年(2014年)と伐採1年後(2016年)の試験地1haあたりの窒素含有量(kg)

上段(A): NH₄-N(アンモニウム態窒素), 下段(B): NO₃-N(硝酸態窒素)

表層リターを除いた鉍質土壌を2M-KCl(塩化カリウム)を加えて振とう, 抽出し, 分析したものを。

試料はそれぞれ, 2014年, 2016年の5月に採取した。

表-2 伐採前 (A) および伐採 1 年後 (B) における各実験区の地温の状況

処理区	土壌採取地点 の斜面方位	(A) 伐採前の地温 (°C)			(B) 伐採 1 年後の地温 (°C)		
		期間平均	期間最大	期間最小	期間平均	期間最大	期間最小
CC2	東南東	7.4	21.4	0.5	9.1	29.7	0.2
SS2	北東	7.5	23.1	0.2	8.3	23.8	0.3
SM2-c	南西	6.4	20.6	0.1	8.4	27.2	0.1
SM2-d	南西	6.9	21.6	0.2	8.5	26.9	0.5
PC	南南東	6.4	21.5	0.2	6.7	20.5	0.3
NC1	南東	6.1	21.2	-0.1	6.6	20.6	0.1

A: 2014年6月20日～2015年5月7日, B: 2016年5月24日～2017年5月17日

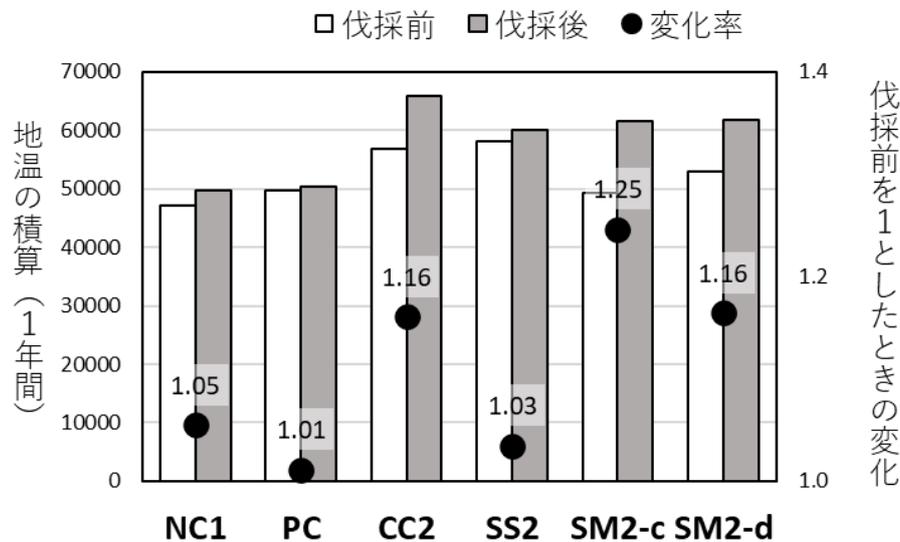


図-6 伐採前後の地温の積算値 (棒グラフ) と変化率 (●)

た。伐採前の平均地温は6.1～7.5℃, 期間最大値は20.6～23.1℃で, 実験区間のばらつきは1～3℃の範囲であったが, 伐採を実施したCC2とSM2では, NC1, PCと明らかに異なり, 平均で2℃, 最大値で7℃前後上昇し, 施業によって上木が除去された影響が顕著であった。一方SS2では, 林分の大半が同様に伐採対象となっていたにもかかわらず地温が大きく変化していなかった。これを調査期間の積算値としてみると(図-6), NC1, PC, SS2では2時期の変化がほとんどなかったのに対し, CC2とSM2では1.16～1.25倍に増加しており, 伐採後の地温上昇が明瞭であった。伐採に対する地表環境の応答については, 主伐規模の事例ではないが, 南東斜面のほうが伐採による光環境の改善効果が高いこと(村本ほか2005), 斜面方位による光環境の違いが地温上昇に直接的な影響を及ぼしていること(作田・溝上2011)などが報告されている。SS2で地温上昇が顕著に見られなかった要因として, CC2では東南東, SM2では南西斜面で試料採取を実施していたのに対し, SS2は北東斜面で試料採取していたため, 伐採による林冠開放の影響が少なく, 地温が上昇しづらかった可能性が考えられる。

以上, いずれの伐採区においても施業後に NO_3^- -N量の増加, 逆に NH_4^+ -Nは減少傾向を示し, 有機態窒素の無機化から硝化に至るプロセスが速やかに起きていた。伐採後の土壤中 NO_3^- -N量は表層土壌の窒素動態という観点からは保持林業の特徴は認められなかったが, 今回の施業は基本的に主伐に相当する伐採規模であるため, 保持伐採区(SS2, SM2)であっても除去された上木の量が皆伐と大きく変わらず, 伐採に伴う林冠の開放程度が皆伐(CC2)と大きく変わらなかったためと考えられた。

謝辞

北海道水産林務部森林環境局道有林課および北海道空知総合振興局森林室の皆様にはREFRESH プロジェクトへの助力をいただいた。道総研エネルギー・環境・地質研究所の三上英敏氏, 五十嵐聖貴氏, 木塚俊和氏, 鈴木啓明氏には無機態窒素の分析について便宜を図っていただいた。ここに記して深謝する。なお, 本研究は三井物産環境基金研究助成R12-G2-225, R15-0025, JSPS 科研費JP25252030の助成を受けた。

引用文献

- 明石信廣ら 19 名 (2017) トドマツ人工林における保残伐施業の実証実験 (REFRESH) における実験区の伐採前の林分組成. 北林試研報 54: 31-45
- Jerabkova L, Prescott CE, Titus BD, Hope GD, Walters MB (2011) A meta-analysis of the effects of clearcut and variable-retention harvesting on soil nitrogen fluxes in boreal and temperate forests. *Can J For Res* 41: 1852-1870
- 柿澤宏昭・山浦悠一・栗山浩一編 (2018) 保持林業. 築地書館. 東京, 372pp
- 河野義礼・松井和典・清水 勇 (1956) 5 万分の 1 地質図幅説明書 歌志内. 北海道開発庁, 札幌, 52pp
- 気象庁 (2023) <https://www.jma.go.jp/jma/menu/menureport.html>
- 村本康治・野上寛五郎・高木正博 (2005) ヒノキ壮齡林の下層植生におよぼす列状間伐の影響-間伐 5 年後の種組成-. 九州森林研究58: 59-62
- 日本地質学会 (2012) 日本地方地質誌 1 北海道地方. 朝倉書店, 東京, 656pp
- 作田耕太郎・溝上展也 (2011) 帯状伐採された針葉樹人工林における伐採部林縁の微気象環境. 第122回森林学会大会発表データベース K09
- 執行宣彦・梅木 清・平尾聡秀 (2017) 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. 演習林 (東大) 59: 223-233
- 浦川梨恵子 (2018) 土壌窒素動態の空間変動. 柴田英昭 (編) 森林と物質循環. 森林科学シリーズ8. 103-145. 共立出版. 東京
- 渡邊仁志・井川原弘一・大洞智宏・横井秀一・中川一 (2008) 未熟な土壌条件下における若齡針葉樹人工林の炭素・窒素貯留量. 岐阜県森林研研報37: 1-10

Key words

forest soil, soil environment, inorganic nitrogen, retention forestry