

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 8 月 27 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26292085

研究課題名(和文)高性能林業機械を使った森林伐採が土壌窒素動態および土壌微生物群集に与える影響評価

研究課題名(英文) The effect of clear-cutting using forestry machinery on dynamics of soil nitrogen and microbial community

研究代表者

舘野 隆之輔 (TATENO, RYUNOSUKE)

京都大学・フィールド科学教育研究センター・准教授

研究者番号：60390712

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 12,300,000円

研究成果の概要(和文)：林業機械の踏み付けにより、土壌硬度が高くなるとともに土壌微生物の活性にも影響を及ぼす体積含水率が高くなる傾向がみられたが、地曳や枝条の放置などの影響はほとんどないか、小さかった。また土壌窒素動態への影響は地域によって異なった。さらに作業道の影響が見られる場合でも、10年以内でほぼ解消することが示唆された。

室内培養により、強度の圧密や灌水処理により脱窒反応が起こっていると考えられる土壌窒素動態を示した。しかし、土壌微生物群集の組成は圧密による顕著な影響はみられなかった。さらに広域的な土壌を対象とした培養実験により、圧密処理に対する応答が土壌によっても大きく異なることが示唆された。

研究成果の概要(英文)：Soil compaction by forestry machinery significantly affected on soil hardness and water content, however the effects of logging slash disposal and skid trails on soil hardness and water content were smaller than the effect of forestry machinery. The effects of soil compaction were mitigated within 10 years after clear-cutting.

According to laboratory incubation experiment used larch plantation forest soils at Hokkaido, net nitrification were not occurred in soils with strong compaction and irrigation treatments but occurred in control, suggesting denitrification could occurred probably due to low soil oxygen content by soil compaction and irrigation. However there were no clear effects of soil compaction on microbial community structure. According to laboratory incubation experiment used soils collected from broad area along Japanese archipelago, the response to soil compaction changed widely site by site.

研究分野：森林生態学

キーワード：森林伐採 林業機械 窒素無機化 土壌微生物群集 窒素循環 圧密 室内培養 窒素動態

1. 研究開始当初の背景

現在、我が国は、木材自給率の向上に向けて、林業の構造的な問題点でもあった低生産効率・高コストな体制から脱却すべく、先進的な高性能林業機械を活用した施業が進められている。一方、機械化の推進は林地土壌や下流の環境に大きな影響を及ぼすことが懸念される。森林生態系の持つ様々な機能を維持しつつ利用することは、地域活性化や持続型社会を構築するために不可欠だが、近年行われている先進林業機械を使つての伐採が、森林や流域環境にどのような影響を与えるのかを適切に評価する手法は、未だ開発されていないのが現状である。

森林の伐採影響として、硝酸態窒素をはじめとする養分物質の流亡や土壌環境の劣化などに関して、国内外において古くから多くの研究が行われてきた(例えば Vitousek et al. 1979 *Science*)。森林の伐採に伴う窒素流出には、土壌中の有機態・無機態の窒素形態が影響を与える。土壌の窒素動態には、アンモニア生成や硝酸生成に関わる真菌、細菌や古細菌など、様々な土壌中の微生物の働きが深く関わるが、従来の研究では微生物群集はブラックボックスとして扱われることが多かった。

林業機械の土壌圧密による土壌物理性の改変についても古くから研究が行われてきた(例えば Greacen & Sand 1980 *Aust J Soil Res*)。微生物の生育環境は、土壌物理性によって大きく変化すると考えられるが、林業機械を使った伐採の影響を微生物の観点から評価した研究は近年はじまりつつある段階であり(Hartmann et al. 2013 *ISME Journal*)、微生物群集と土壌窒素動態の総合作用を明らかにした研究例は、国内外を含めほとんどない。土壌微生物は、環境変化に素早く反応すると考えられるため、従来の長期的なモニタリングを用いた影響評価に比べて短期間にその影響を検出することが可能になると期待される。

伐採や搬出などの一連の作業システムは、例えば路網密度が低い傾斜地ではタワーヤーダやスイングヤーダを使った架線系の作業システム、路網密度が高い傾斜地ではハーベスタ・フォワーダを使った作業システム、緩傾斜地ではハーベスタ・フォワーダを活用した作業システムなど、地域ごとに地形要因などの要因だけでなく、林業体系や森林管理方法の歴史性など様々な要因により変化するため、地域間の比較が不可欠である。さらに、気候や土壌母材など土壌窒素動態に影響を及ぼす要因にも地域差が存在する。先進的な林業機械を使った伐採は、全国規模で行われており、伐採影響を適切に評価することが急務である。

2. 研究の目的

本研究は、先進的な高性能林業機械を使った伐採法や従来の伐採法など様々な森林伐採方式が、土壌窒素動態や微生物群集構造にどのような影響を及ぼすかを明らかにすることを目的として行った。

本研究では、特に土壌窒素動態に関わる土壌微生物群集の応答に着目し、環境DNAを用いた微生物群集解析を用いて林業機械による土壌物理性の改変に伴い失われる機能グループや増加する機能グループを特定し、併せて土壌中の無機および有機態の窒素動態がどのように変化するかを明らかにすることにより、機械化による伐採という大きな人為攪乱に対して生態系サービスの中でもとりわけ養分循環や土壌生成、水質浄化などの基盤サービスがどのように反応するのかを評価する手法を開発することを狙いとして行った。

本研究では、先進的な高性能林業機械による森林伐採が土壌窒素動態に与える影響評価を行うために以下の項目についての研究を実施した。

(1) 土壌の物理性および化学性に与える短期的な影響評価

(2) 土壌の物理性および化学性に与える長期的な影響評価

(3) 室内培養実験による土壌物理化学性と微生物群集の相互作用系の解明

3. 研究の方法

3 - 1 作業システムの異なる伐採方法ごとの短期影響評価

北海道：北海道川上郡標茶町虹別の国有林の先進林業機械を用いた小面積皆伐および列状間伐を行ったカラマツ人工林において調査を行った。調査地の施業では、林業機械(ハーベスタ、プロセッサ、フォワーダなど)が用いられた。小面積皆伐区、間伐区のそれぞれに林業機械による踏み付けの見える場所「作業道轍」と見られない場所「非攪乱地」を設け、さらに施業を行っていない「対照区」と併せ5タイプの調査区をそれぞれ4カ所づつ設け、伐採前後の土壌を採取し、無機態窒素濃度やpH、CN含量などの土壌化学性を明らかにした。さらに伐採後の土壌物理性(土壌硬度(山中式土壌硬度計・長谷川式土壌貫入計)、容積重、土壌含水率)を測定した。

鹿児島：鹿児島大学農学部附属高隈演習林のスギ人工林において、施業1年以内の皆伐地と間伐地を調査地とした。両調査

地の施業では、林業機械（グラブ、スイングヤダ、プロセッサ、フォワードなど）が用いられた。各調査地内に、10カ所の測定地点を無作為に選定し、さらに各測定地点周辺に林業機械による土壌圧密を受けた「作業道轍」や間伐地において集材の際の地曳の影響が見られた「地曳跡」、圧密や地曳の影響の見られない「未攪乱地」、さらに伐採後に枝条を置いた「枝条有」などの6タイプの観測地点を設けた。

各観測地点の土壌特性を明らかにするため、土壌物理性（土壌硬度（山中式土壌硬度計・長谷川式土壌貫入計）、容積重、土壌含水率）を測定するとともに、土壌を採取し、土壌化学性（土壌pH、土壌EC、無機態窒素現存量、窒素無機化速度、溶存有機炭素）、土壌微生物特性（微生物バイオマス炭素）の測定を行った。

3 - 2 伐採の長期影響評価

鹿児島大学農学部附属高隈演習林のスギ人工林に、3か所の新規造林地（皆伐後2年、4年、9年）の調査地を設け、短期影響評価と同様に、土壌物理性と土壌化学性を明らかにした。

3 - 3 室内培養実験による土壌物理化学性と微生物群集の相互作用系の解明

京都大学北海道研究林標茶区内のカラマツ人工林において、表層0 - 10cmの土壌を採取し、室内培養実験を行った。土壌圧密が窒素動態や微生物群集に与える影響を明らかにするために、林地で採取した土壌に2段階の圧密処理を行い、同時に土壌含水率を2段階に変化させる処理を行い、25℃で30日間の実験室培養を行い、純窒素無機化速度と純硝化速度を明らかにし、さらに培養後の土壌から土壌DNAを抽出し、細菌および古細菌の16S rRNA遺伝子とアンモニア酸化に関わる機能遺伝子（AmoA）の定量PCRを行った。さらに次世代シーケンサーを用いた原核生物群集組成の解析を行った。

また圧密処理の土壌への影響を広域的に比較するために、高隈演習林に加えて、京都大学芦生研究林、茨城県筑波山、高知県高取、北海道大学中川研究林、九州大学宮崎演習林の全国6カ所から土壌を採取し、標茶区土壌で行ったのと同様の強度の圧密処理を施した土壌を1か月間の室内培養を行い、培養前後の無機態窒素の現存量の測定を行った。

4 . 研究成果

4 - 1 異なる伐採方法の短期影響

4 - 1 - 1 土壌物理性に与える影響

北海道における調査では、伐採後の土壌物理性は、圧密を受けた作業道跡で顕著に硬くなるが、皆伐・間伐地ともに直接圧密を受けていない地点では対照区と大きな違いは見られなかった。また土壌の体積含水率は、作業道跡で高くなる傾向が見られた。

鹿児島における調査では、北海道における調査と同様に、皆伐・間伐の両調査地において、土壌の圧密を受けた「作業道轍」や「枝条有轍」の土壌硬度は、土壌の圧密を受けていない「非攪乱地」や「枝条有非攪乱地」のそれよりも、有意に高くなる傾向がみられた。また、土壌の圧密を受けた「作業道轍」や「枝条有轍」では、土壌の圧密を受けていない「非攪乱地」や「枝条有非攪乱地」よりも土壌含水率が高くなる傾向がみられた。

土壌の圧密による土壌の孔隙組成の変化とそれにもなう透水性の低下によって、土壌中に多くの水分が留まることが示唆された。なお、「地曳跡」は、土壌の圧密を受けていない攪乱地の結果に類似していたため、地曳の影響は、表土の攪乱を引き起こすが、林業機械による圧密ほどは、土壌の物理性に影響を及ぼさないことが示唆された。

4 - 1 - 2 土壌化学性に与える影響

北海道における調査では、皆伐地・間伐地ともに作業道轍と非攪乱土壌で土壌化学性の顕著な違いは見られなかった。また鹿児島における調査でも、硝化速度を除く土壌化学性では、攪乱の種類による有意な差はみられなかった。

一方、鹿児島における調査では、皆伐地における硝化速度は、土壌の圧密を受けた「作業道轍」で、土壌の圧密を受けていない「非攪乱地」や「枝条有非攪乱地」よりも低かった。また、「作業道轍」は「枝条有轍」よりも硝化速度が低かった。したがって、土壌の圧密を受け、かつ、有機物の供給が行われない攪乱地では、硝化速度が低下すると考えられた。土壌の圧密によって、土壌の通気性が低下し、酸素濃度が低下するため、微生物の活性が低下したためであると考えられる。また、土壌に対する有機物の供給が減少すると、微生物の活性も低下すると考えられた。

間伐地の硝化速度は、皆伐地と異なり、攪乱地間の有意な差はみられなかった。しかし、間伐地と皆伐地における硝化速度の傾向の違いは、両調査地の地形の違いが影響を与えているかもしれない。間伐地は皆伐地よりも急傾斜なため、土壌やリターなどの有機物の移動が頻繁に起こったことが予想される。そのため、土壌の圧密を受けていない攪乱地に対して、有機物による養分供給がばらつき、結果として、土壌の圧密を受けた攪乱地との差がみられなかったと考えられた。また、間伐地における、「地曳跡」と、土壌の圧密を受けた「作業道轍」や「枝条有轍」および「作業道中央」との間で硝化速度に有意な差がみ

られた。このことから、土壤構造の破壊を受けた攪乱地では、硝化速度が増加することが示唆された。

北海道と鹿児島島の調査ともに、微生物バイオマス炭素は、攪乱の種類による有意な差はみられなかった。鹿児島島でみられた皆伐地の「作業道軸」における硝化速度の低下は、微生物バイオマス量とは直接は関係していないと考えられた。同様に、間伐地の「地曳跡」における硝化速度の増加も、微生物バイオマス量とは関係していないと思われる。いずれも、微生物に占める硝化細菌の割合とその活性などが影響していると考えられた。

4 - 2 伐採の長期影響

鹿児島で行った伐採後の経過年数の異なる林分での調査では、3か所の新規造林地(皆伐後2年、4年、9年)において、土壤物理性と土壤化学性に対する作業道の影響を調査した。その結果、皆伐後の経過年数にともない、容積重と土壤水分量に対する作業道の影響は年を経るにつれてなくなり、4年目には差がなくなった。また土壤硝化速度についても、年を経るにつれて、作業道の影響は小さくなり、9年目には差がみられなくなった。窒素無機化速度の多くを硝化速度が占めているため、窒素無機化速度の結果は硝化速度と同じであった。以上の結果より、窒素無機化速度に対する作業道の影響は4年以上9年未満で解消されることが示唆された。

4 - 3 室内培養実験による土壤物理化学性と微生物群集の相互作用系の解明

野外での調査より、圧密処理は土壤体積含水率の上昇を引き起こすことが示唆された。そこで、北海道研究林標茶区のカラマツ人工林で採取した土壤に2段階の圧密処理と土壤体積含水率を2段階に変化させる処理を行い1か月間の室内培養を行った。その結果、軽度の圧密と水添加処理では、純窒素無機化速度と純硝化速度は無処理と違いはなかったが、強度の圧密と水添加処理では、大きく低下する傾向が見られた。特に純硝化速度は強度の圧密と水添加処理により負の値を示し、土壤中の硝酸態窒素が減少することが明らかとなった。しかし細菌・古細菌の16S rRNA遺伝子やアンモニア酸化に関わる機能遺伝子は、処理間で違いが見られたものの、純硝化速度が負となる処理でも一定量が存在した。

以上より、強度の圧密と水添加を行った際にも硝化や無機化プロセスは進行するが、飽和状態となるため脱窒菌により硝酸が嫌氣的に分解され放出されたと考えられる。

次世代シーケンサーによる群集解析では、強度の灌水処理では微生物群集組成が大きく変化したが、強度の圧密処理の影響は小さかった。このことから、硝酸態窒素の動態は

強度の灌水と強度の圧密で同じようなパターンを示すものの、微生物群集組成は必ずしも同じような変化を示す訳ではないことが明らかとなった。また脱窒菌を含むことで知られる主要な綱や目レベルの相対優占度にも処理間の影響はみられなかった。脱窒菌は様々なグループでみられるため、より詳細な機能解析を行う必要があると考える。

さらに全国7カ所の土壤を対象とした圧密土壤培養の広域比較研究では、標茶区のカラマツ林土壤でみられたような硝酸態窒素の顕著な減少が見られない土壤が大半であり、圧密処理に対する土壤応答も土壤によって異なることが示唆された。

4 - 4 まとめ

本研究では、当初の予測通りに施業直後の森林では、林業機械の踏み付けは土壤物理性に顕著な影響を及ぼした。林業機械の踏み付けにより、土壤硬度が高くなるとともに土壤微生物の活性にも影響を及ぼす体積含水率が高くなる傾向がみられた。しかし林業機械の直接的な踏み付けに比べて、地曳や枝条の放置などの影響はほとんどないか、小さかった。

土壤攪乱による土壤窒素動態への影響は、北海道の調査地ではみられず、鹿児島島の調査地では硝化速度や無機化速度で影響がみられた。しかし、伐採後の経過年数の異なる調査地での結果より、作業道の影響は、10年以内でほぼ解消することが示唆された。

室内培養により圧密の影響を調べた結果、北海道のカラマツ林土壤では、強度の圧密や灌水処理により脱窒反応が起こっていると考えられる土壤窒素動態を示した。しかし、次世代シーケンサーを使った詳細な微生物群集解析の結果、土壤微生物の群集組成には圧密では顕著な影響を及ぼさないことが示唆された。また広域的な土壤を対象とした圧密処理培養実験では、圧密処理に対する応答が土壤によっても異なることが示唆された。

5 . 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計17件)

Urakawa, R, Shibata, H, Kuroiwa, M, Inagaki, Y, Tateno, R, Hishi, T, Fukuzawa, K, Hirai, K, Toda, H, Oyanagi, N, Nakata, M, Nakanishi, A, Fukushima, K, Enoki, T, Suwa, Y, Effects of freeze-thaw cycles resulting from winter climate change on soil nitrogen cycling in ten temperate forest ecosystems throughout the Japanese archipelago. *Soil Biology and Biochemistry* 74: 82-94, 2014 査読有

Isobe K, Ohte N, Oda T, Murabayashi S, Wei W, Senoo K, Tokuchi N and Tateno R,

Microbial regulation of nitrogen dynamics along the hillslope of a natural forest. *Front. Environ. Sci.* 2:63. doi:10.3389/fenvs.2014.00063 2015 査読有

Urakawa, R, Ohte, N, Shibata, H, Tateno, R, Hishi, T, Fukushima, K, Inagaki, Y, Hirai, K, Oda, T, Oyanagi, N, Nakata, M, Toda, H, Kenta, T, Fukuzawa, K, Watanabe, T, Tokuchi, N, Nakaji, T, Saigusa, N, Yamao, Y, Nakanishi, A, Enoki, T, Ugawa, S, Hayakawa, A, Kotani, A, Kuroiwa, M, Isobe, K, Biogeochemical nitrogen properties of forest soils in the Japanese archipelago. *Ecological Research* 30 (1):1-2. 2015 査読有

Fukuzawa, K, Shibata, H, Takagi, K, Satoh, F, Koike, T, Sasa, K, Roles of dominant understory *Sasa* bamboo in carbon and nitrogen dynamics following canopy tree removal in a cool-temperate forest in northern Japan, *Plant Species Biology* 30: 104-115. doi: 10.1111/1442-1984.12086, 2015 査読有

Wei, W, Isobe, K, Shiratori, Y, Nishizawa, T, Ohte, N, Ise, Y, Otsuka, S, Senoo, K. Development of PCR primers targeting fungal nirK to study fungal denitrification in the environment. *Soil Biology Biochemistry* 81:282-286. doi : 10.1016/j.soilbio.2014.11.026, 2015 査読有

磯部一夫、大手信人、森林の窒素循環研究に対する微生物生態学的アプローチ、*森林立地* 56:89-95.2014 査読有

Urakawa, R, Ohte, N, Shibata, H, Isobe, K, Tateno, R, Oda, T, Hishi, T, Fukushima, K, Inagaki, Y, Hirai, K, Oyanagi, N, Nakata, M, Toda, H, Kenta, T, Kuroiwa, M, Watanabe, T, Fukuzawa, K, Tokuchi, N, Ugawa, S, Enoki, T, Nakanishi, A, Saigusa, N, Yamao, Y, Kotani, A, Contributing factors of soil N mineralization and nitrification rates of forest soils in the Japanese archipelago. *Forest Ecology and Management* 361:382-396, 2016 査読有

Wei, W, Isobe, K, Nishizawa, T, Zhu, L, Shiratori, Y, Ohte, N, Koba, K, Otsuka, S, Senoo, K. Higher diversity and abundance of denitrifying microorganisms in environments than considered previously. *The ISME Journal* 9:1954-1965. doi : 10.1038/ismel.2015.9, 2015 査読有

館野隆之輔「野外研究サイトから(30)京

都大学フィールド科学教育研究センター北海道研究林」*日本生態学会誌* 65 : 203-209 2015 査読無

Tripathi, BM, Kim, M, Tateno, R, Kim, W, Wang, J, Lai-Hoe, A, Shukor, NAA, Rahim, RA, Go, R, Adams, JM. Soil pH and biome are both key determinants of soil archaeal community structure. *Soil Biology and Biochemistry* 88:1-8. 2015 査読有

Hyodo, F, Haraguchi, TF, Hirobe, M, Tateno, R, Changes in above- and belowground properties of a cool-temperate secondary forest during natural succession. *Journal of Forest Research* 21: 170-177. 2016 査読有

Hishi, T, Tateno, R, Fukushima, K, Fujimaki, R, Itoh, M, Tokuchi, N, Changes in the anatomy, morphology, and mycorrhizal infection of fine root systems of *Cryptomeria japonica* in relation to stand ageing. *Tree Physiology* 37: 61-70. 2017 査読有

Kerfahi, D, Tateno, R, Takahashi, K, Tripathi BM, Cho, HJ, Kim, H, Adams JM. Development of Soil Bacterial Communities in Volcanic Ash Microcosms in a Range of Climates. *Microbial Ecology* 73:775 - 790. 2017 査読有

Urakawa, R, Ohte, N, Shibata, H, Tateno, R, Inagaki, Y, Oda, T, Toda, H, Fukuzawa, K, Watanabe, T, Hishi, T, Oyanagi, N, Nakata, M, Fukushima, F, Nakanishi, A, Estimation of field soil nitrogen mineralization and nitrification rates using soil N transformation parameters obtained through laboratory incubation *Ecological Research* 32 : 279-285. 10.1007/s11284-016-1420-5, 2017 査読有

稲垣善之、館野隆之輔、樹木の成長を支える土壌 *森林科学* 77:7-9 2016 査読無

Inoue, T, Fukuzawa, K, Watanabe, T, Yoshida, T, Shibata, H, Spatial pattern of soil nitrogen availability and the relation to the stand structure in a coniferous-broadleaved mixed forest with a dense dwarf bamboo understory in northern Japan. *Ecological Research* 32:227 - 241. 10.1007/s11284-017-1434-7, 2017 査読有

Watanabe, T, Fukuzawa, K, Shibata, H, Short-term response of *Sasa* dwarf bamboo to a change of soil nitrogen fertility in

a forest ecosystem in northern Hokkaido,
Japan Plants 5:19.
10.3390/plants5020019, 2017 査読有

〔学会発表〕(計25件)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

舘野 隆之輔 (TATEN0, Ryunosuke)

京都大学・フィールド科学教育研究センター・准教授

研究者番号：60390712

(2) 研究分担者

福澤 加里部 (KUKUZAWA, Karibu)

北海道大学・北方生物圏フィールド科学センター・助教

研究者番号：10456824

鶴川 信 (UGAWA, Shin)

鹿児島大学・農学部・准教授

研究者番号：30582738

磯部 一夫 (ISOBE, Kazuo)

東京大学・農学生命科学研究科・助教

研究者番号：30621833

長谷川 尚史 (Hasegawa, Hisashi)

京都大学・フィールド科学教育研究センター・准教授

研究者番号：70263134

(3) 連携研究者

稲垣 善之 (INAGAKI, Yoshiyuki)

独立行政法人森林総合研究所・四国支所・主任研究員

研究者番号：00353590

(4) 研究協力者

今田 省吾 (IMADA, Shogo)

岩岡 史恵 (IWAOKA, Chikae)

中山 理智 (NAKAYAMA, Masataka)

梅田 浩之 (UMEDA, Hiroyuki)