

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 17 日現在

機関番号：82105

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2012～2015

課題番号：24580232

研究課題名(和文) 間伐遅れと窒素飽和の複合作用が森林土壌の炭素蓄積量に及ぼす影響の解明

研究課題名(英文) The influence of the complex effect of delayed thinning and nitrogen saturation on the carbon storage in forest soils

研究代表者

相澤 州平 (Aizawa, Shuhei)

国立研究開発法人 森林総合研究所・北海道支所・グループ長

研究者番号：20353550

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：窒素飽和下の高密度人工林における炭素蓄積の実態解明と間伐の影響予測のため、長期間の施肥により高窒素負荷の環境下にある高密度の壮齢トドマツ、エゾマツ、アカエゾマツ人工林において炭素窒素の蓄積量と循環量を調査し、間伐を行って成長量の変化を調べた。トドマツとアカエゾマツでは施肥により初期成長が促進されて蓄積が増大した。壮齢林段階では施肥による成長促進は認められなかった。また間伐は残存木の成長を増加させたが、高窒素負荷による成長促進効果は認められなかった。土壌pHとリターフォール量を変数とするモデルを開発し、高窒素負荷環境下の土壌炭素蓄積量増加速度は、間伐後は対照区と同等の水準に低下すると予測した。

研究成果の概要(英文)：To clarify the carbon storage in high density artificial forests under nitrogen saturation and to assess effects of thinning on the growth, we surveyed the storage and the cycle of carbon and nitrogen in high density middle-aged conifer stands of *Abies sachalinensis*, *Picea jezoensis* and *Picea glehnii* where long-term fertilization was carried out. In *Abies* stand and *P. glehnii* stand, aboveground biomass of fertilized plots was significantly larger than that of control plots, where the effects of fertilization were limited only in younger growing stage. We concluded that high nitrogen load condition does not increase the carbon storage of aboveground biomass in middle-aged artificial forests. High nitrogen load condition did not increase the increment of growth rate after thinning. By using a model with soil pH and litterfall amounts, we predicted that the carbon accumulation rate in forest soils under high nitrogen load condition would drop to the same level as control after thinning.

研究分野：森林土壌学

キーワード：炭素蓄積 窒素飽和

1. 研究開始当初の背景

人為起源の窒素負荷の増大により森林生態系が窒素過剰に陥る「窒素飽和」現象が社会問題として認知されつつある。炭素吸収源としての植物の成長と炭素蓄積に關与する土壌中の微生物の活動は窒素により強く制限されているため、森林の窒素動態は炭素蓄積量の變動に影響を及ぼす。窒素飽和下の森林の炭素蓄積量はそうでない森林とは異なると考えられる。一方、間伐が必要な森林は国内人工林面積の約6割、640万haに及び、公益的機能の低下が懸念されている。間伐遅れにより自然枯死が発生する状況では森林の炭素蓄積機能は小さくなると考えられる。炭素蓄積機能を向上させるためには間伐により成長量を増加させる必要がある。間伐遅れと窒素飽和という現在の日本の人工林が直面する課題に対処するためには、高窒素負荷の環境における高密度人工林の炭素蓄積、炭素窒素循環の実態と、間伐の影響を解明する必要がある。

2. 研究の目的

(1)高窒素負荷下の高密度人工林における炭素蓄積量と窒素炭素動態の解明

窒素飽和下の高密度人工林における炭素蓄積の実態を明らかにするため、長期間の施肥により窒素過多の環境下にある高密度人工林を対象に、隣接する無施肥の林分と比較することにより窒素負荷が炭素蓄積に与える影響を評価する。

(2)高窒素負荷下の高密度人工林の間伐が成長に及ぼす影響の解明

高窒素負荷下の間伐遅れ林分を間伐した場合の炭素蓄積量の変化を予測するため、上記の調査対象とする人工林において間伐を実施し、間伐後の成長増加を施肥区と無施肥区で比較する。

(3)モデルによる高窒素負荷の影響の予測と検証

林分の炭素窒素循環をモデル化し、炭素蓄積過程を再現する。モデルによる予測値を実測値によって検証するための観測体制を整備する。

3. 研究の方法

長期間の施肥により高い窒素負荷を受けている高密度人工林において炭素窒素蓄積量の実態を調査した。(研)森林総合研究所北海道支所(札幌市)構内の羊ヶ丘実験林に1973年に植栽された土壌環境長期モニタリング試験林に試験地を設定した。トドマツ、エゾマツ、アカエゾマツ人工林(植栽密度3,906本/ha)を対象に、1978年から毎年施肥を行っている施肥区と、隣接する無施肥区において、樹高、胸高直径、堆積有機物量、リターフォール量、リター分解速度、各部位の炭素窒素濃度、表層土壌の炭素窒素濃度、

表層土壌の温度、水分を測定した。施肥区では林業用の3要素肥料を毎年6月に施用した。現在の毎年の施肥量はN、P、Kがそれぞれトドマツで130、28、54kg/ha、エゾマツ、アカエゾマツで141、31、58kg/haである。

胸高直径は毎年秋に毎木調査を行った。樹高は2010年秋の毎木調査データを2013年秋の伐倒調査時の試料木の樹高により修正して使用した。堆積有機物量は2012年秋に各区6箇所から50cm四方の範囲の堆積有機物を採取し、乾重を測定した。リターフォール量は各区6箇所に直径80cmのリタートラップを設置して月1回収し、部位別に乾重を測定した。冬季(12月~5月)は地表にプラスチック製のかごを設置して回収した。リタートラップに入らない大枝は地表に設置した4m×6mの枠内から回収した。リター分解速度はリターバッグを地表に設置し、1年後に回収して乾重を測定して求めた。リターバッグは林内にネットを張って回収した落葉を風乾し、ナイロンメッシュバッグに封入した。間伐前は2012年12月、間伐後は2013年12月に設置した。表層土壌の温度と水分は、リターバッグを設置した地点の近傍で深さ5cmの土壌中にセンサーを埋設し、データロガーにより30分間隔で記録した。表層土壌は、2013年春の施肥前に各区9箇所の定点で直径5cmの採土器を用いて深さ10cmまで採取した。採取した試料は細土、礫、根に分けて重量を測定した。

地上部現存量と炭素窒素蓄積量は、試料木の部位別乾重、炭素窒素量と、胸高直径の2乗と樹高の積(D2H)との関係式を作成し、毎木調査による胸高直径、樹高データを使用して単木の値を求め、林分全体の量を計算した。試料木の伐倒調査は2013年10月に行った。各区5本のサイズの異なる試料木を伐倒し、幹、枝、葉、枯れ枝に分けて乾重を測定した。

堆積有機物試料、リターフォール試料、伐倒調査の部位別試料、表層土壌試料は微粉砕し、乾式燃焼法により炭素窒素含有率を測定した。

2014年2月に間伐を行った。2列おきに1列を伐採する列状間伐を基本としたが、全層間伐となるよう、また、間伐後の立木の配置が極端に偏らないよう考慮して間伐木を選定した。極端に細い木と立枯木は伐採した。間伐木は林外に持ち出した。2013年10月の伐倒調査時の試料木は間伐木に含めた。

過去に地上部現存量および表層土壌炭素蓄積量調査を行った2002-2003年から間伐前の2013年までのデータを用い、土壌炭素蓄積速度をDNDC(ver9.5)モデルによって推定した。

4. 研究成果

(1)高窒素負荷下の高密度人工林における炭素蓄積量と窒素炭素動態

間伐前の各区の樹高及び胸高直径を図1、

図2に示した。トドマツ、アカエゾマツは樹高、胸高直径とも施肥区が無施肥区より大きかった。エゾマツではどちらも有意差は認められなかった。各区の樹高、胸高直径を北海道の各樹種の収穫表の値と比較すると、トドマツは施肥区で樹高が3等級区分の2等地に相当し、直径は1等地を上回った。トドマツ無施肥区では樹高が2等地と3等地の間、直径は1等地と同等か上回った。アカエゾマツは、施肥区では樹高が中間的な値と同等で直径が上回っていた。無施肥区もやや値が小さいが同様の傾向であった。エゾマツは樹高、直径とも1等地を上回っていた。収穫表の値が主林木を対象にしたものであることを考慮すると、本試験地では無施肥区においても収穫表の対象林分よりも成長が上回っていると推察される。高窒素負荷による成長増大はトドマツ、アカエゾマツにおいて認められ、エゾマツでは認められなかった。樹種による応答の違いとともに、エゾマツでは本試験地の環境がもともと恵まれていたため窒素が制限要因になっていなかった可能性も考えられる。

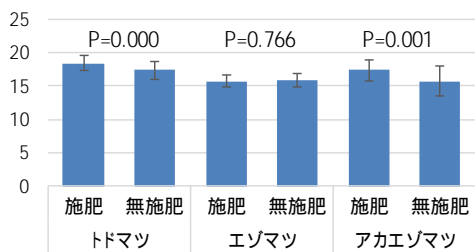


図1 試験区毎の平均樹高(m)

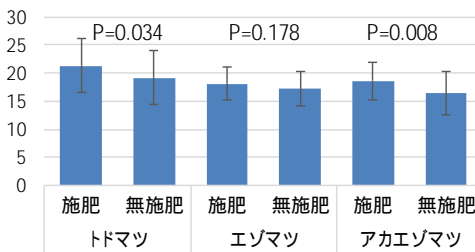


図2 試験区毎の平均胸高直径(cm)

試験区毎の地上部現存量を図3に示した。いずれの樹種でも現存量は幹が大きく、全体に占める幹の比率はトドマツで80%前後、エゾマツで75%前後、アカエゾマツで70%前後であり、トドマツとアカエゾマツでは施肥区の方が無施肥区より幹の割合が大きかった。枝と葉の割合はほぼ同様で、6~10%前後であった。葉の現存量はトドマツでは施肥区より無施肥区の方が大きく、アカエゾマツでは施肥区の方が無施肥区よりわずかに大きかった。林分葉量をリターフォールで割った葉寿命推定値はトドマツの施肥区で3年、無施肥区で5年、エゾマツで3年、アカエゾマツで3~4年であった。枯枝の現存量はアカエゾマツ>エゾマツ>トドマツの順で、枯死した枝が幹に付着している時間の差を反映していると考えられる。地上部現存量全体では、アカエゾマツでは施肥区が無施肥区より大き

かったが、トドマツでは差が小さく、エゾマツはわずかに無施肥区が大きかった。

炭素含有率は樹種、部位、処理による差が小さく、いずれも50%前後であった。従って、炭素蓄積量の傾向は現存量と同様であった。窒素の含有率は樹種、部位によって異なっていた(図4)。幹の窒素濃度は非常に低く、トドマツで0.15%、エゾマツ、アカエゾマツで0.1%前後であり、エゾマツ、アカエゾマツでは施肥区が無施肥区より1割程度高かったがトドマツでは逆に4%程度低く、差の絶対値、割合とも小さいこともあり施肥の影響は不明であった。葉の窒素濃度は高く、トドマツ、エゾマツで1.5~1.7%前後、アカエゾマツで1.1~1.2%であった。エゾマツ、トドマツでは施肥区が無施肥区より8%程度高かったがアカエゾマツでは逆に1割ほど低く、施肥の影響は不明であった。高窒素負荷によって各部位の窒素濃度が高くなる傾向は認められなかった。葉の窒素濃度が高く、葉の現存量がトドマツでは無施肥区の方が大きかったことから、地上部の窒素量はトドマツでは無施肥区の方が大きく、いずれの樹種も施肥区と無施肥区の差は小さかった(図5)。

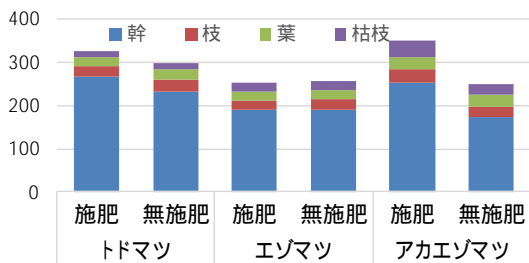


図3 試験区毎の地上部現存量(Mg/ha)

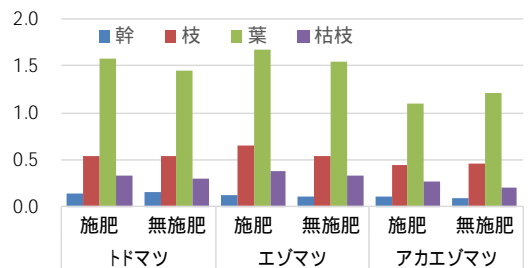


図4 試験区毎の窒素濃度(%)

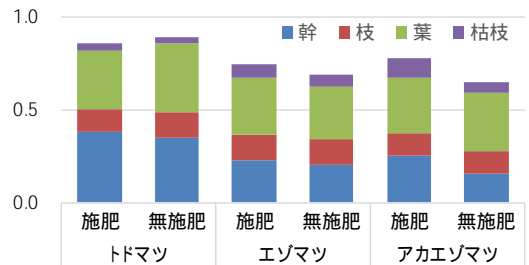


図5 試験区毎の窒素量(Mg/ha)

堆積有機物量はトドマツ、エゾマツでは施肥区が無施肥区より大きく、アカエゾマツでは差が小さかった。リターフォール量も同様の傾向であったが、トドマツ、エゾマツにおける施肥区と無施肥区の差は堆積有機物量の差より小さかった。堆積有機物量をリター

フォール量で割った値はリターの平均的な滞留時間と考えることができるが、この値はトドマツ、エゾマツでは施肥区の方が無施肥区より大きかった(図6)。高窒素負荷下ではトドマツ、エゾマツではリターフォール量が増加し、分解速度が低下するため、堆積有機物量が増加すると考えられる。一方、リターバッグの残存率は0.6~0.7で施肥区の方が無施肥区より小さく、高窒素負荷により分解速度が低下するという傾向は見られなかった。

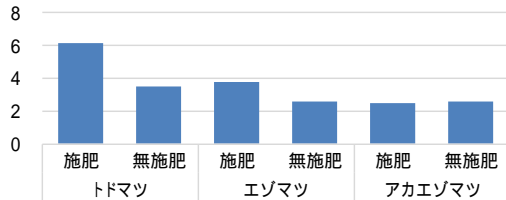


図6 堆積有機物量の滞留時間(y)

表層土壌の地温はトドマツ、エゾマツでは施肥区の方が無施肥区より冬季の温度が高く夏季の温度が低かった。堆積有機物量が多いほど地温の変化が小さくなったと考えられる。土壌水分は融雪期の4月に高くなり、7月頃に低くなる季節変動を示した。トドマツでは堆積有機物量が多い施肥区で土壌水分が多かった。エゾマツ、アカエゾマツでは無施肥区で土壌水分が多く、堆積有機物量との関係は不明であった。土壌水分は地形の影響を受けるため、アカエゾマツの施肥区は周囲よりやや高いことが水分の差に影響している可能性があり、施肥との関係は不明瞭であった。

表層土壌の炭素窒素濃度は施肥区の方が無施肥区より高かった。ただし、細土容積重は施肥区の方が無施肥区より小さいため、表層10cmまでの炭素窒素蓄積量は施肥区の方が多いいえなかった。表層10cmまでの炭素蓄積量は約52~58Mg/ha、窒素蓄積量は約3.0~3.7Mg/haであった。地上部、堆積有機物、表層土壌を合計した炭素蓄積量は約190~250Mg/ha、窒素蓄積量は約3.9~5.3Mg/haで、トドマツ、アカエゾマツでは施肥区の方が無施肥区よりやや多かった(図7)。

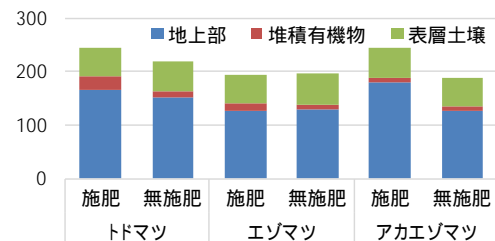


図7 試験区毎の炭素蓄積量(Mg/ha)

施肥区と無施肥区の成長量、炭素窒素蓄積、炭素窒素循環量を比較すると、樹高、直径、林分あたりの蓄積は樹種によっては施肥区の方が大きかったが、現在の葉の窒素濃度に差はなかった。過去の調査結果とあわせて解

析すると、2003年から2013年までの10年間の蓄積の増加量は施肥の有無による差がなかった。本試験地における高密度のトドマツ、エゾマツ、アカエゾマツ人工林は高い蓄積を持っており、トドマツとアカエゾマツでは施肥の効果が見られたが、施肥による蓄積の増大は成長初期の差によるものであり、過去10年間の成長には施肥の効果が見られなかった。壮齢の高密度人工林において、高窒素負荷の環境は炭素蓄積の増大をもたらさないと考えられる。

(2)高窒素負荷下の高密度人工林の間伐が成長に及ぼす影響

2014年2月の間伐による林分の変化を表1に示した。列状間伐を基本方針としたが、個々の木の状態や径級構成を考慮して間伐木を選定したため、調査対象とした範囲内での間伐率は本数で36~46%、現存量で29~38%となった。径級構成が変化しないよう全層間伐を行ったが、今後の林分の維持を考慮して被圧されている小径木は間伐したため、間伐前に比較して間伐後の平均樹高及び平均胸高直径はそれぞれ0.1~0.6mおよび0.6~1.7cm増大した。

表1 間伐率と間伐前後の立木密度、現存量

樹種	処理	間伐率 %	密度 本/ha		現存量 Mg/ha	
			間伐前	間伐後	間伐前	間伐後
トドマツ	施肥	40	2170	1302	324	206
	無施肥	46	2344	1259	296	186
エゾマツ	施肥	40	2279	1367	251	157
	無施肥	36	2539	1628	255	173
アカエゾマツ	施肥	38	2539	1563	349	251
	無施肥	36	2344	1497	250	178

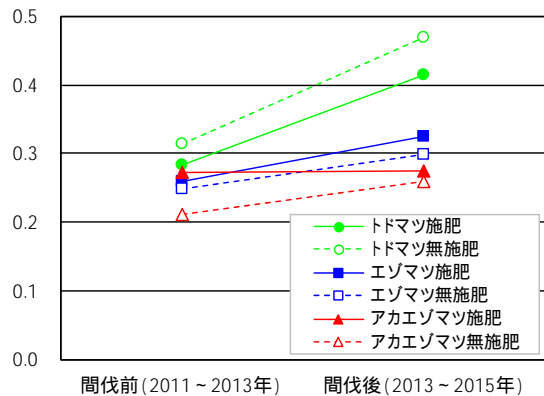


図8 間伐前後の直径成長量(cm/y)

間伐前後の成長量は、年間直径成長量を比較した。2015年の毎木調査時に生存していた木の直径成長量の平均値を用い、間伐前のデータは2011年~2013年の2年間の平均、間伐後のデータは2013年~2015年の2年間の平均とした(図8)。トドマツ、エゾマツでは間伐前より間伐後の方が年間直径成長量は大きかった。トドマツは間伐前後の値はそれぞれ0.25cm/y前後と0.4cm/y前後であり、間伐後は約0.15cm/y増大していた。エゾマツは同じく0.25cm/y前後から0.3cm/y前後

へと約 0.05cm/y 増大した。増大幅はいずれも施肥区、無施肥区で差がなく、間伐への応答は施肥の影響が見られなかった。アカエゾマツは無施肥区では 0.2cm/y から 0.25cm/y へと約 0.05cm/y 増大したが、施肥区では約 0.28cm/y で変化しなかった。高密度人工林を間伐した場合の成長量の増大は樹種によって応答が異なり、トドマツでは成長量増大幅が大きく、アカエゾマツでは小さかった。また、施肥により間伐後の成長量増大幅が大きくなる傾向は見られなかった。間伐後のリターフォール量は炭素ベースで間伐前の 3.3Mg/ha から 2.2Mg/ha へと約 3 割減少した。高窒素負荷の環境は間伐後の成長増加量を増大させる効果はないと考えられる。

(3)高窒素負荷林分における土壌炭素蓄積過程のモデル化

壮齢の高密度人工林における炭素蓄積に対して施肥が及ぼす影響は限定的であった。林分炭素蓄積の約 7 割を占める地上部現存量の増加には寄与せず、表層土壌 0~10cm における蓄積炭素量にも施肥による差異は認められなかった。施肥の影響はリターフォール量の増大として現れた。リターバッグ分解試験では予想に反して高窒素林分における初期分解速度の低下は認められなかった。しかし無施肥区と比較して堆積有機物量が多いトドマツとエゾマツの施肥区では、2002~2013 年の間の土壌炭素蓄積速度が低い傾向が認められた。また、表層土壌の pH は植栽木の成長に伴って低下したが、施肥区では無施肥区より pH 低下が顕著であった。

これらの結果を踏まえて、土壌炭素蓄積過程をモデル化した。施肥処理は pH の低下 (5.6 から 4.4~4.8 に低下) とリターフォールの増大 (無施肥区の 1.1~1.3 倍) を介して堆積有機物を含めた土壌炭素蓄積速度を 1.4 倍に増加させると推定された。樹種によっては高窒素負荷が堆積有機物を含めた土壌炭素蓄積速度の増加をもたらすことが示唆された。

間伐後の施肥区では、間伐率に応じて減少したリターフォール量の影響によって、土壌炭素蓄積速度は間伐前の無施肥区と同程度になると予測された。地上部の測定結果では、施肥区と無施肥区で間伐後の成長速度増加量に差が認められなかった。これらの結果から、高窒素負荷環境下の壮齢針葉樹人工林を間伐した場合、地上部、堆積有機物、土壌を含む森林全体の炭素蓄積速度は、窒素負荷が少ない林分と同程度まで減少すると考えられる。この予測は間伐後の pH に変化がないことを仮定したものであり、今後の観測による実証が必要である。本研究ではこれまでの測定値を整理し、試験地の間伐を行った。今後測定を継続することにより予測値の検証が可能となると考えられる。

<引用文献>

北海道林業改良普及協会、北海道主要造林樹種収穫表と成長量に関する資料 第 編、1976、105pp、北海道林業改良普及協会、札幌

相澤州平ほか、羊ヶ丘実験林における 40 年生トドマツ、エゾマツ、アカエゾマツ人工林の地上部バイオマス量と施肥の影響、北方森林研究、63、2015、67 - 68

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 1 件)

相澤 州平、伊藤 江利子、橋本 徹、酒井 佳美、鳥山 淳平、大澤 晃、藤井 創一朗、羊ヶ丘実験林における 40 年生トドマツ、エゾマツ、アカエゾマツ人工林の地上部バイオマス量と施肥の影響、北方森林研究、査読有、63 号、2015、67 - 68

〔学会発表〕(計 1 件)

相澤 州平、伊藤 江利子、間伐と長期間の施肥がトドマツ、エゾマツ、アカエゾマツ人工林の成長とリター量に与えた影響、第 127 回日本森林学会大会、2016 年 3 月 29 日、「日本大学生物資源科学部 (神奈川県・藤沢市)」

6. 研究組織

(1)研究代表者

相澤 州平 (AIZAWA, Shuhei)

国立研究開発法人 森林総合研究所・北海道支所・グループ長

研究者番号：20353550

(2)研究分担者

伊藤 江利子 (ITO, Eriko)

国立研究開発法人 森林総合研究所・北海道支所・主任研究員

研究者番号：20353584

(3)連携研究者

酒井 佳美 (SAKAI, Yoshimi)

国立研究開発法人 森林総合研究所・九州支所・チーム長

研究者番号：40353700

小野 賢二 (ONO, Kenji)

国立研究開発法人 森林総合研究所・東北支所・主任研究員

研究者番号：30353634