

## 切り捨て間伐で還元されたスギ緑葉の分解に伴う林地への窒素供給

誌名	森林立地
ISSN	03888673
著者	平井, 敬三 野口, 享太郎 山中, 高史 金子, 真司 高橋, 正通
巻/号	53巻1号
掲載ページ	p. 17-22
発行年月	2011年6月

## 切り捨て間伐で還元されたスギ緑葉の分解に伴う林地への窒素供給

平井敬三<sup>1,†,\*</sup>・野口享太郎<sup>1,‡</sup>・山中高史<sup>2</sup>・金子真司<sup>1</sup>・高橋正通<sup>1,¶</sup>

<sup>1</sup>森林総合研究所立地環境研究領域・<sup>2</sup>森林総合研究所森林微生物研究領域

切り捨て間伐で林地に還元された枝条は、その多くが地面に触れず離れた状態で存在する点に注目し、間伐後の枝条の分解にともなう窒素動態を調べた。間伐で緑葉として林地に還元された窒素量は84 kg ha<sup>-1</sup>で、その67%が地面に接地せず空中に存在していた。緑葉を入れたリターバッグを空中と地表に設置し、分解速度と分解にともなう土壌への窒素供給量を調べたところ、分解速度は設置後1年間は処理による違いはなかったが、2年後は地表で有意に速かった。残存葉の窒素含有率は設置直後から増加したが、1年後は地表の方が空中より有意に高かった。分解初期には処理に関わらず窒素を取り込み残存葉に存在する窒素量は間伐で還元された窒素量より増加した。残存葉の窒素量の増加は空中では6ヶ月後まで、地表では1年後まで続いた。分解にともなう土壌への窒素供給の開始は地表の方が空中より遅くなった。しかし、地表では1年後~2年後の分解速度が空中より速いため、設置後2年間の土壌への窒素供給量は空中より地表で多く、その割合は64%であった。

キーワード：空中，地表，不動化，リターバッグ

Keizo Hirai, Kyotaro Noguchi, Takashi Yamanaka, Shinji Kaneko and Masamichi Takahashi : Nitrogen supply from decomposing green needle after non-commercial thinning at a sugi (*Cryptomeria japonica*) stand. Japanese Journal of Forest Environment 53:17-22, 2011.

Most of litter returned by non-commercial thinning was existed without contact onto the forest floor. We discussed nitrogen dynamics with decomposing litter after thinning with a focus on the site difference of litter existence in this study. The amount of nitrogen returned by thinning was 84 kg ha<sup>-1</sup> and 67% of them were existed in the air without contact onto the floor. Litterbag containing green needles was installed in the air and on the surface in forest floor, and decomposition rate and nitrogen supply with decomposing of green needles into the soil were investigated. Decomposition rate was not differed among treatments after one year installation but was higher in the surface than the air in two year after. Nitrogen concentration in the remaining green needles was increased from just after installation in both of treatment, and was statistically higher in the surface than in the air. After decomposition, amounts of nitrogen containing in the remaining green needles were gained by immobilization until six month after in the air and one year after in the surface. Nitrogen supply into the soil with green needle decomposition started early in the air compared in the ground. Contribution of nitrogen supply into the soil from green needles installed on the surface during two years was 64%. Because decomposition rate of green needles installed on the surface between one and two year after higher than those of in the air.

Key words : air, ground, immobilization, litterbag

### 1. はじめに

森林のCO<sub>2</sub>吸収機能の発揮が期待されており、京都議定書における吸収量確保のため、いわゆる「間伐等促進法」が2008年に制定された。今後、これによる間伐の促進に伴って、多量の間伐木が発生するが、間伐されても材を搬出利用する従来の利用間伐の他に、間伐木を搬出せず林地に放置する切り捨て間伐の実施にとどまる割合が多くなると考えられる。間伐木は炭素貯留としての機能を持つ(酒井ら, 2008)。養分循環の面からみると、間伐木の分解にともなう養分動態の解明が重要である。切り捨て間伐では幹材が収穫されずに林地に残されるが、樹皮を除いた幹材に含まれる窒素量は経年変化がなく、長期に窒素を保持することが明らかにされている(稲垣ら, 2009)。多くの場合、切り捨て間伐では間伐木から枝が切り落とされず、枝条の多くが地表に接触しないた

め、空中に浮いた状態で存在する割合が通常の利用間伐の場合よりも増加すると考えられる。そのため、このような空中に浮いた状態で存在する枝条は地表に接触した枝条に比べて分解が遅く、分解に伴う土壌中への養分供給のパターンも異なることが予測される。

枝条の分解を質的にみると、主要な養分である窒素は落葉の分解にともなって、いわゆる不動化と呼ばれる微生物による取り込みのため、窒素含有率が增加することが一般的である(Berg, 1988; Ono *et al.*, 2009)。したがって切り捨て間伐の際に林地に還元された枝条の存在場所の違いは枝条分解に伴う微生物の取り込みにも影響する可能性がある。量的にみると、40年生以上のスギ壮齢林では、林木に存在する窒素量のうち、葉に存在する窒素量は幹や枝などの器官に比べて最も多い(戸田, 2004)。岩石風化や降水等による供給量が少ない窒素、リン、塩基などの養分は間伐で還元された枝条の

\* 連絡・別刷請求先 (Corresponding author) : 〒020-0123 盛岡市下厨川鍋屋敷92-25 森林総合研究所東北支所  
E-Mail : hirai@ffpri.affrc.go.jp

1 Department of Forest Site Environment, Forestry and Forest Products Research Institute

2 Department of Forest Microbiology, Forestry and Forest Products Research Institute

† 現所属 (Present Address) : 森林総合研究所東北支所; Tohoku Research Center, Forestry and Forest Products Research Institute

‡ 現所属 (Present Address) : 森林総合研究所四国支所; Shikoku Research Center, Forestry and Forest Products Research Institute

¶ 現所属 (Present Address) : 森林総合研究所企画部; Research Planning and Coordination Department, Forestry and Forest Products Research Institute

(2010年7月2日受付, 2011年3月28日受理)

分解によって残存木の成長に必要とされる量の多くが供給される。そのため、枝条の存在場所の違いによる土壌への養分供給量の変化は残存木の成長等にも影響を与える可能性が考えられる。

本研究ではスギ林の切り捨て間伐が養分循環に及ぼす影響を明らかにするため、主要な養分である窒素を対象に、切り捨て間伐によって林地に還元された枝条の存在場所を考慮して空中と地表に緑色部の針葉(以降緑葉とする)を設置し、その後の緑葉の分解過程と分解にともなう土壌への窒素供給量を調査した。

## 2. 研究方法

### 2.1 試験地

試験地は茨城県城里町(旧桂村)の斜面下部から中部の1.0 haに40年生(2004年時)のスギ林が、斜面上部に天然生の落葉広葉樹が分布する約2.3 ha小流域で、斜面上部から下部にかけて乾性から湿性の褐色森林土が分布している(釣田ら, 2005; 平井ら, 2007)。このうち、スギ林では、2003年12月に本数率33%, 材積率で25%の切り捨て間伐が行われ、地上部現存量は229 Mg ha<sup>-1</sup>から159 Mg ha<sup>-1</sup>に減少した。この間伐では下層間伐であり(野口ら, 2009), 間伐により平均樹高は17.4 mから19.4 mに、平均胸高直径は18.2 cmから22.4 cmに変化した(野口未発表)。

### 2.2 間伐で林地に還元された緑葉のバイオマス量と窒素量

本試験地では間伐後、伐採木がそのまま放置されたため、林地での緑葉を含む枝条の分布が一様でなかった。そのため、面積あたりの緑葉分布の割合を、以下に示すライン調査から求めた。ラインはスギ林内の斜面上下方向に全部で5本設置し、うち4本は流域中央付近を流れる溪流を挟み、残りの1本は左岸側のみ設置した(図-1, 表-1)。ラインに沿って0.5 × 0.5 mの方形プロットを連続して設定し、目視によりプロット内の50%以上の面積に緑葉を含む間伐枝条がある場合に「枝条あり区」、50%以下の場合を「枝条なし区」として区分し、それぞれに該当するプロット数を計測した。調査は2004年6月に行った。また、空中と地表に接触して存在する緑葉のバイオマス量と窒素量を推定するため、ランダムに設けた0.5 × 0.5 mの15ヶ所のプロットにおいて、地面に触れて存在する緑葉と空中に浮いて存在する緑葉に分けて採取し、それぞれの乾燥重量(70℃)を測定した。緑葉の平均存在量は空中で2.11 ± 1.47 kg m<sup>-2</sup>, 地表で0.87 ± 0.38 kg m<sup>-2</sup>であった。この存在量にライン調査から得た「枝条あり区」の出現頻度を乗じて間伐で還元された緑葉バイオマ

ス量を求めた。さらに、間伐で還元された緑葉バイオマス量に緑葉中の窒素含有率(後述)を乗じて、間伐による緑葉の窒素還元量を求めた。

### 2.3 緑葉分解試験

リターバッグによる緑葉の分解試験を行うため、2004年3月に林地に還元された緑葉を採取して実験室に持ち帰った。持ち帰った緑葉は風乾後、長さ5 cm程度に切りそろえ、乾重で10 g, 窒素量として115.3 mgをナイロン製のバッグ(以降リターバッグ)に詰めた。メッシュのサイズは1 mmである。2004年4月、リターバッグをスギ林斜面の3ヶ所のプロットの地表と空中に設置した。これら3ヶ所のプロットのサイズは5 × 5 mで、いずれも斜面中部にあり、土壤型はB<sub>D</sub>型である。地表への設置(地表区)は地表に接して置いたリターバッグの四隅を針金で固定し、斜面下方への移動を防いだ。空中への設置(空中区)は約1 mの間隔に打ち込んだ二つの杭の間を針金で結び、リターバッグの一辺をクリップで針金に止めて地面に触れないように設置した(図-2)。

### 2.4 分解試料の回収と処理

リターバッグは設置約3ヶ月後(2004年7月), 6ヶ月後(2004年11月), 1年後(2005年5月), 2年後(2006年4月)に各プロットのそれぞれの処理区から、5個ずつ回収した。本研究では設置期間中に2 mm以下に細くなった緑葉は分解したものとした。そのため回収試料は2 mmメッシュの篩を用いて選別し、メッシュ上に残った試料を70℃の熱風乾燥器で乾燥後、重量を測定した。設置時にリターバッグに入れた量とメッシュ上に選別されて残った量との差を分解量として、分解速度を求めた。また、間伐で林地へ還元された緑

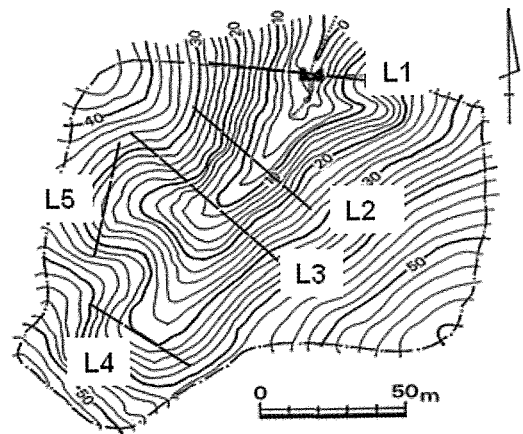


図-1. 枝条出現頻度測定用の設置ライン  
L1~L5は設置したライン番号を示す。

表-1. 間伐で還元された枝条の地表での分布割合

ライン番号	L1	L2	L3	L4	L5	出現割合
位置	左岸-右岸	左岸-右岸	左岸-右岸	左岸-右岸	左岸	平均(SD)
総プロット数(A)	104	108	166	138	106	
枝条あり区数(B)	25	27	57	26	22	
枝条あり区割合(B/A)	0.24	0.25	0.34	0.19	0.21	0.25(0.06)
総距離(m)	52	54	83	69	53	

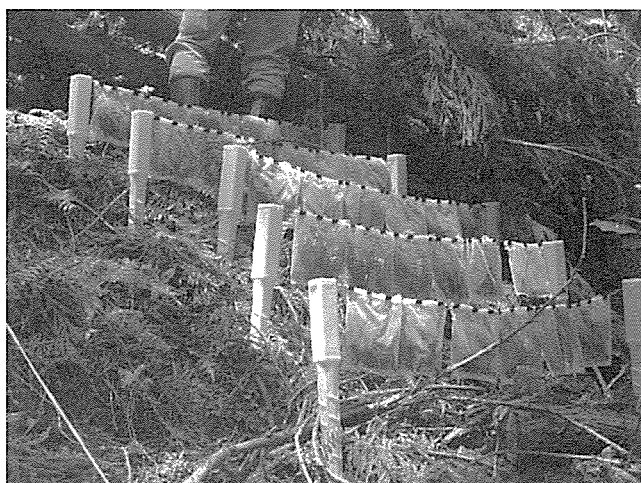


図-2. 空中へのリターバッグの設置状況

葉に含まれる窒素量と各回収時に分解せず残存した緑葉中に含まれる窒素量の差から、緑葉分解に伴って土壌へ供給される窒素量を処理区毎に求めた。なお、2 mm以上の残存緑葉中の窒素および炭素含有率は70℃での乾燥後に微粉碎した試料をNCアナライザーNC-900(住化分析センター、東京)で定量した。

### 3. 結果

#### 3.1 間伐で還元されたスギ緑葉の存在位置別の量と割合

本研究ではライン調査で行ったプロットにおいて、プロットの50%以上の面積に緑葉枝条が存在する場合を「枝条あり」とした。緑葉が存在する「枝条あり区」の出現頻度は全体の0.25であった(表-1)。また、ランダムなプロットで調査した緑葉の平均存在量は空中で $2.1 \pm 1.5 \text{ kg m}^{-2}$ 、地表に $0.9 \pm 0.4 \text{ kg m}^{-2}$ であった。空中と地表のそれぞれの緑葉存在量と出現頻度(0.25)を乗じて、間伐で林地へ還元された緑葉バイオマス量を求めた。その結果、空中に $5.2 \pm 3.7 \text{ Mg ha}^{-1}$ 、地表に $2.1 \pm 1.0 \text{ Mg ha}^{-1}$ 存在し(表-2)、空中に存在する割合は全体の $67.1 \pm 16.9\%$ であった。また、間伐による林地への還元窒素量は合計で $84.5 \pm 48.0 \text{ kg ha}^{-1}$ で、地表への直接還元された窒素量は $24.5 \pm 11.3 \text{ kg ha}^{-1}$ 、地表に接触せず空中に浮いた状態で還元された窒素量は $59.9 \pm 43.2 \text{ kg ha}^{-1}$ であった(表-2)。

#### 3.2 分解速度

図-3aに緑葉の分解速度を示した。リターバッグ設置後1年間の分解速度は空中区、地表区に違いはなく、1年後の分解率は地表区で $0.46 \pm 0.01$ 、空中区で $0.46 \pm 0.02$ であった。しかし、2年目以降は地表区の分解速度が大きく、空中区との間に差が認められ、設置2年後の分解率は地表区で $0.78 \pm 0.04$ 、空中区で $0.56 \pm 0.04$ となり、地表区で有意( $p < 0.01$ )に重量減少が大きかった。また、残存緑葉の含水率はバッグ回収前の降雨等の気象条件によって左右されるが、常に地表区の方が空中区より高く推移していた(図-3b)。

表-2. 間伐で林地へ還元された緑葉のバイオマス量と窒素量

	バイオマス量 ( $\text{Mg ha}^{-1}$ )	窒素量 ( $\text{kgN ha}^{-1}$ )
空中	5.2(3.7)	59.9(43.2)
地表	2.1(1.0)	24.5(11.3)

平均(SD)

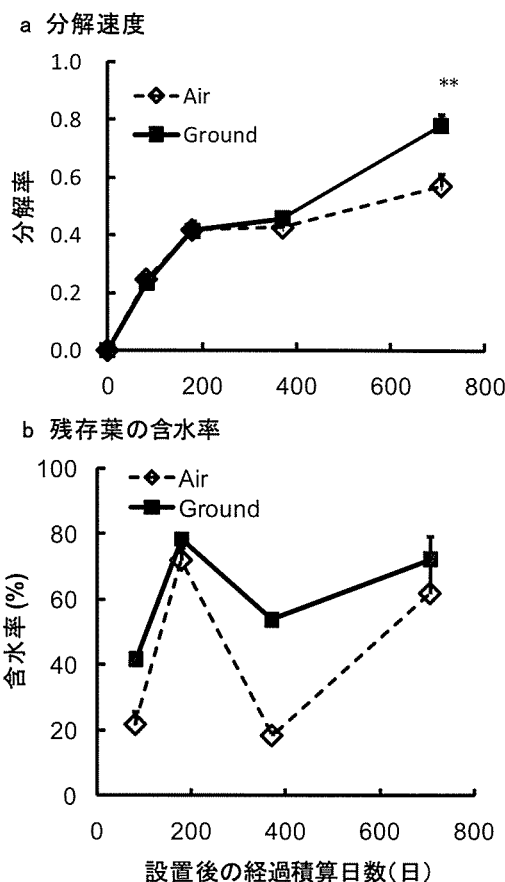


図-3. 間伐還元緑葉の分解速度(a)と残存葉の含水率(b)

エラーバーは標準偏差を示す。

\*\* ;  $p < 0.01$

#### 3.3 窒素含有率

リターバッグ設置直後から、分解による重量減少にともなって、残存緑葉の窒素含有率は地表区、空中区ともに設置時より高くなったが、地表区では6ヶ月後以降一定もしくは低下傾向となったのに対して、空中区では2年後まで窒素含有率の増加が続いた(図-4)。設置2年後を除くと、地表区の窒素含有率は空中区より高い傾向にあり、1年後の窒素含有率は地表区で $23.4 \pm 1.5 \text{ g kg}^{-1}$ 、空中区で $20.1 \pm 0.6 \text{ g kg}^{-1}$ と、地表区で有意( $p < 0.05$ )に高かった。

#### 3.4 バッグ中に残存した窒素量

回収時にバッグ中に残存した緑葉量とその窒素含有率から窒素残存量を求めた(図-5)。分解速度とは異なり、分解せずバッグ中に残存した緑葉に含まれる窒素量は一旦増加した後、減少する傾向を示した。ただし、その傾向は処理区により異

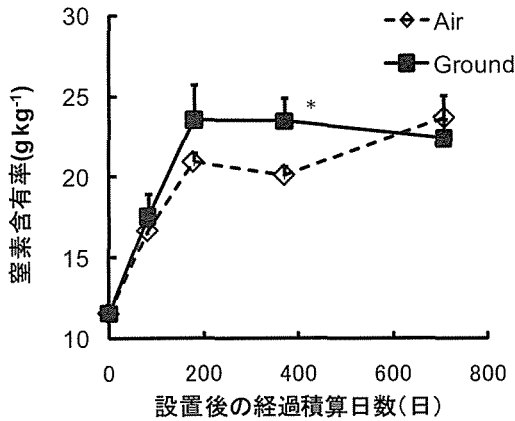


図-4. 分解残存緑葉の窒素含有率変化  
エラーバーは標準偏差を示す。  
\* ; p < 0.05

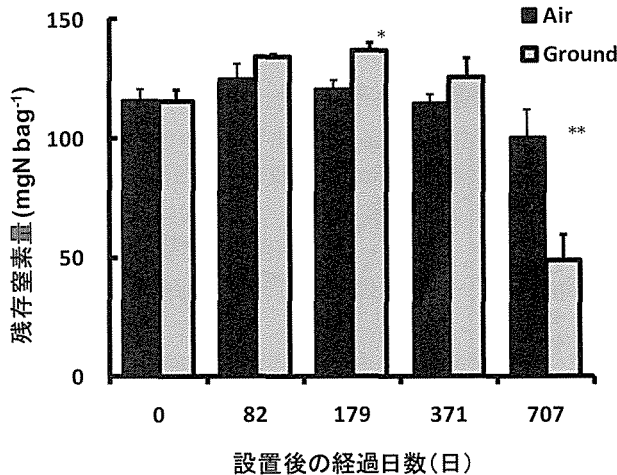


図-5. 分解後にバッグ中に残存した窒素量の変化  
エラーバーは標準偏差を示す。  
\* ; p < 0.05, \*\* ; p < 0.01

なり、残存窒素量の増加は地表区では6ヶ月後まで続いていたのに対して、空中区では3ヶ月後までの短期間に限られていた。

#### 4. 考 察

##### 4.1 分解速度と窒素含有率の変化

本研究では間伐によって供給された枝条の分解とその窒素動態を検討するため、緑葉を対象とした。同じように緑葉が還元される枝打ちでは、林地に還元される量はバイオマスとしてヘクタールあたり8-11 Mg(相場ら, 1985; 生原, 1980; 生原ら, 1985), 窒素量として119-135 kg(生原ら, 1985)であるので、これらに比べると、本研究の値はやや低い。また生原ら(1985)は枝打ち1年後のL層量は間伐直後の1/3に減少するとしており、枝打ちで還元された葉でその大部分が占められると考えられるL層の分解速度は本研究の間伐後1年間の分解速度の46%(図-3a)に比べて大きい。これは分解初期には基質である窒素濃度が高いほど分解は早い

ので(大園・武田, 2006), 施肥がなされていた生原ら(1985)の窒素濃度は本研究に比べて高いことが原因と考えられた。

本研究ではリターバッグ設置後初期の1年間には設置環境による分解速度に違いはなかった(図-3a)。これは分解に用いた緑葉は本試験地から採取しているので、分解基質に違いはないこと、分解初期には糖類などの可溶性成分や低分子化合物などの水溶性成分の分解が主であるため(Ono, *et al.*, 2009)であると考えられた。一方で、設置2年後の分解は地表区の方が早く進んだ(図-3a)。2年目以降はセルロースやヘミセルロースなどの分解が進行するため(Berg *et al.*, 1982), スギ葉内部の物理的な分解に寄与する土壤動物や微生物などの侵入が容易な地表の方が早く分解が進んだと考えられた。また、これら地表と空中における分解速度の違いには水分状態の違いも影響するが、乾燥し易い空中に比べて地表では水分条件が良好なため(図-3b), 2年目以降の分解が進んだと考えられた(図-3a)。

リターの分解過程で窒素不動化には土壤中の微生物による窒素の取り込みが関係するので、本研究で地表区の窒素含有率の増加が空中区よりも大きくなった原因はリターの地面接触の有無の影響が大きいと考えられた。一方、今回の結果から地表とともに空中に設置した緑葉でも、分解にともなって窒素含有率は上昇していた。スギ林ではリター分解に伴って特異的にF1層で窒素固定活性が現れる(Nioh and Haruta, 1986)。空中区ではスギ緑葉は地表に接しておらず、微生物による窒素不動化の影響はほとんどなく、窒素含有率の増加は空中での窒素固定によると考えられる。このように、本研究では空中と地表に試料を設置したことで、実際に現地で窒素固定が起こることが間接的に確認できた。

##### 4.2 緑葉の分解に伴う土壌への窒素供給量

リターバッグ設置後、分解にともなって緑葉の重量減少は速やかに進行するのに対して(図-3a), 残存葉の窒素含有率は増加する(図-4)。同じ期間での窒素含有率の増加率は分解速度の増加率より大きいことから、分解初期の3ヶ月間はいずれの処理区においても残存窒素量は増加していた(図-5)。それ以降の存在窒素量は空中区では3ヶ月後に、地表区では6ヶ月後に最大値を示し、この間に取り込んだ窒素の放出を開始した。相場ら(1983)は枝打ちで落とされたスギ生葉の窒素残存率は6ヶ月頃まで増加し、それ以降減少したとしている。本研究の地表区での結果はこれと一致していた。また、6ヶ月後の窒素の残存量は設置時に比べて120%-140%に達するとしている(相場ら, 1983)。間伐で林地に還元された緑葉に含まれる窒素量を100とした場合、本研究では6ヶ月後の残存率は地表区では約120%でほぼ同じ値であるが、空中区では100%程度で、相場ら(1983)より値はやや小さい。このようにリターバッグを用いて同量の緑葉を異なる場所に設置した結果は、外部から窒素を取り込む期間や量は緑葉が存在する場所によって異なり、空中区の方が地表区に比べて短く、量的に少ないことを示している(図-5)。しかし、今回の切り捨て間伐で還元された緑葉のバイオマス量や窒素量は存在場所によって異なり、空中区の方が地表区より

多い(表-2)。そこで、間伐で還元された緑葉の空中と地表での存在量の違いを考慮して、空中区と地表区の処理区毎に面積あたりの窒素供給量(Nsd) (kgN ha<sup>-1</sup>) を以下の1)式により求めた(図-6)。

$$Nsd = Nrt - Ned \quad 1)$$

ここで、Nrtは間伐で還元された窒素量 [緑葉存在量 × 緑葉窒素含有率] を、Nedは各回収時の残存窒素量 [(間伐で還元された緑葉量 × 重量残存率(1 - 分解率)) × 残存葉の窒素含有率] を示し、この差が窒素供給量(Nsd)となる。したがって、ここでの窒素供給量は分解試験開始時(リターバッグ設置時)から各回収時まで供給された積算窒素量を示す。

土壌への窒素供給はリターバッグ中の残存窒素量の変化で見られたように、空中区で早く始まり、地表区で遅かった(図-6)。空中では6ヶ月後～1年後の間に、地表区では1～2年後に切り捨て間伐で還元された窒素が土壌へ供給され始めた(図-6)。これらの時期は分解初期に取り込んだ窒素の放出を開始した時期に比べて、空中区では3ヶ月程度、地表区では6ヶ月程度遅くなっていた。ただし、空中区では地表区より早く6ヶ月後以降に窒素供給が開始されたが、この期間の供給量は少なく、地表区では間伐直後よりも多くの窒素が残存していたので、林分全体としての窒素供給は1年後以降に始まった。1～2年後の窒素供給量はいずれの区でも増加し、ヘクタールあたり空中区では7.9 ± 6.3 kg、地表区では14.1 ± 2.3 kgの窒素が供給されたことになる。特に地表区では1～2年後の間の分解速度の増加が空中区より大きいため(図-3a)、土壌全体への窒素供給に占める地表区の寄与は約64%と大きい。2年間の地表区と空中区からの窒素供給量は合計でヘクタールあたり約22 kgであり、間伐によって還元された緑葉に含まれる窒素量の約26%がリターバッグ設置から1～2年後の間の分解によって供給されたことになる。

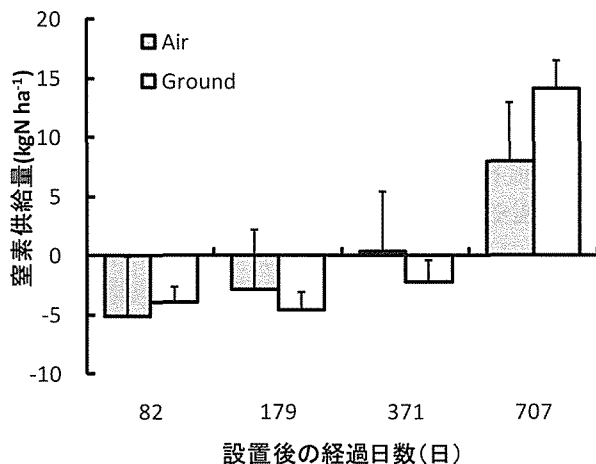


図-6. 分解後の緑葉分解に伴う窒素供給量

エラーバーは標準偏差を示す。

マイナスの値は設置時に比べて窒素を取り込み、増加したことを示す。

### 4.3 窒素供給と循環

本試験地と同じB<sub>D</sub>型土壌で、林齢に近い38年生のスギ林分の葉中の窒素現存量はヘクタールあたり120.0 kgであるので(原田ら, 1972)、本数率で33%の間伐を実施した本研究における85 kgという窒素還元量の値はやや大きい。

本試験地では、リターフォールにより還元される年間窒素量は55-59 kg ha<sup>-1</sup>であり(野口ら, 2009)、年間のリターフォールによる約1.5倍の窒素が緑葉として間伐で還元されたことになる。また、間伐林分でのリターフォールによる年間窒素還元量は32-34 kg ha<sup>-1</sup>である(野口ら, 2009)。間伐で還元された窒素のうち地表区に存在する窒素量は24.5 kg ha<sup>-1</sup>であるので(表-2)、この値は間伐で林地に還元された窒素量とリターフォールによる年間の窒素還元量との差、および間伐しない林分と間伐林分のリターフォールでの窒素還元量の差にほぼ相当する。間伐後には残存木が少なくなるためリターフォール量は一時的に減少する。間伐は年間のリターフォールに比べて多くの窒素を一時的に多量に林地に還元する。しかし、切り捨て間伐で地表に直接還元される窒素量は間伐後にリターフォールで還元される窒素量の減少分に相当する程度に限られ、その多くの窒素を空中に存在させることで、土壌への窒素の供給速度を低下させることになる。

本研究の結果から、切り捨て間伐においては還元された緑葉に含まれる窒素は分解初期の1年間は土壌もしくは空中から多くの窒素を取り込み残存葉中に保持することで、土壌に窒素を放出しないことが明らかになった(図-6)。したがって、間伐によって供給された緑葉は一時的に窒素を葉中に保持した後、窒素を土壌へ供給する機能を持つことを示している。間伐で還元された緑葉の67%が存在する空中では、分解初期に取り込んだ窒素を土壌へ供給開始する時期が地表よりも相対的に早い(図-5)。一方、存在割合の小さい地表での窒素供給は開始時期が空中より遅れるものの、間伐1年後～2年後の間に多量の窒素を土壌へ供給する。このように、切り捨て間伐で林地に還元される枝条は空中と地表という場所の違いによりその存在量が異なっていた。また、存在場所と量的な違いを考慮して空中と地表に緑葉を設置して分解とそれにとりもなう窒素動態を検討した結果、分解速度やそれにとりもなう窒素供給パターンや量が空中と地表で大きく異なることを明らかにできた。これら本研究の結果は、枝条の管理を人為的に行うことで土壌への窒素供給速度を変化させる可能性を持つことを示している。

### 謝 辞

本研究は農林水産技術会議の環境研究および森林総合研究所交付金プロジェクトの「自然循環」(課題番号: 200003)、科学研究費「スギ林切り捨て間伐」(番号18580156)により行われた。なお、立地環境研究領域の森下智陽氏に現地調査の協力を頂いた。また試験地使用と研究遂行に便宜をお借り頂いた関東森林管理局茨城森林管理署および森林技術センターの各位にお礼申し上げる。

## 引用文献

- 相場芳憲・生原喜久雄・川端省三(1983) 地力に及ぼす集約的保育作業の影響(Ⅱ) 生枝打ちで落とされたスギ針葉の分解と養分動態. 日本林学会誌65: 215-219.
- 相場芳憲・生原喜久雄・近藤 晃・池田直弥(1985) 地力に及ぼす集約的保育作業の影響(Ⅲ) 幼齢林での下刈りと施肥および第1回枝打ちによる流出養分量. 日本林学会誌67: 73-81.
- Berg, B. (1988) Dynamics of nitrogen ( $^{15}\text{N}$ ) in decomposing Scots pine (*Pinus silverstris* L.) needle litter, Long term decomposition in Scots pine forests VI. Canadian Journal of Botany 66:1539-1546.
- Berg, B., Hannus, K., Popoff, T. and Theander, O. (1982) Changes in organic-chemical components during decomposition, Long term decomposition in Scots pine forests I. Canadian Journal of Botany 60: 1310-1319.
- 生原喜久雄(1980) スギ施肥林分の栄養均衡に関する研究—北関東地方の秩父古生層地帯について—. 東京農工大学演習林報告16: 1-72.
- 生原喜久雄・相場芳憲・相浦英春・長谷川 敬(1985) スギ枝打ち後のA<sub>0</sub>層の分解にともなう養分動態. 日本林学会誌67: 464-467.
- 原田 洗・佐藤久男・堀田 庸・蜂屋欣二・只木良也(1972) スギ壮齢林分の養分含有量に関する研究. 林業試験場研究報告249: 17-74.
- 平井敬三・野口享太郎・溝口岳男・金子真司・高橋正通(2007) 森林土壌の現地窒素無機化における下層土および季節別の寄与. 森林立地49: 51-59.
- 稲垣善之・吉永秀一郎・山田 毅・篠宮佳樹・鳥居厚志(2009) スギ・ヒノキ人工林において間伐後放置された材の重量減少と窒素放出. 森林立地51: 63-67.
- Niob, I. and Haruta, Y. (1986) Estimation of Amount of Asymbiotically Fixed Nitrogen in the Leaf Litter of Japanese Cedar (*Cryptomeria japonica*). Journal of the Japanese Forest Society. 88:314-319.
- 野口享太郎・平井敬三・高橋正通・相澤州平・伊藤優子・重永英年・長倉淳子・稲垣善之・金子真司・釣田竜也・吉永秀一郎(2009) 北関東のスギ人工林における地上部炭素・窒素動態に対する間伐の影響. 森林総合研究所報告 8: 205-214.
- Ono, K., Hirai, K., Morita, S., Ohse, K. and Hiradate, S. (2009) Organic carbon accumulation processes on a forest floor during an early humification stage in a temperate deciduous forest in Japan: Evaluations of chemical compositional changes by  $^{13}\text{C}$  NMR and their decomposition rates from litterbag experiment. Geoderma 151:351-356.
- 酒井佳美・高橋正通・石塚成宏・稲垣善之・松浦陽次郎・雲野 明・中田圭亮・長坂晶子・丹羽花恵・澤田智志・北条良敬・玉木泰彦・総谷珠美・武田 宏・相浦英春・山内仁人・鳥田博匡・岩月鉄平・山場淳史・山田隆信・前田 一・室 雅道(2008) 材密度変化による主要な針葉樹人工林における枯死木の分解速度推定. 森林立地50: 153-165.
- 大園享司・武田博清(2006) 森林生態系における分解系の働き. (地球環境と生態系, 武田博清・占部城太郎編, 282pp, 共立出版, 東京.) 96-119.
- 戸田浩人(2004) 林地残材の収穫や全木集材が森林生態系の物質循環に与える影響. 森林科学40: 33-38.
- 釣田竜也・吉永秀一郎・阿部俊夫(2005) ポーラスプレート・テンションライシメーター法による土壤水の年移動量の推定. 土壤の物理性 101: 51-56.