

連年施肥がウダイカンバの養分状態におよぼす影響

長倉淳子・古澤仁美(森林総研)・伊藤江利子・相澤州平・橋本徹(森林総研北海道)

要旨: 持続的な木材生産のためには施肥による養分管理が有効であるが、養分バランスの偏りが林木成長や樹木生理に悪影響を引き起こす可能性がある。本研究では、1978年から窒素(N)・リン(P)・カリウム(K)の3要素(NPK区)、およびN・Pの2要素(NP区)の連年施肥を続けているウダイカンバ林について成葉と落葉の養分濃度を測定し、施肥が養分状態におよぼす影響を検討した。葉のN濃度は、成葉、落葉ともに対照(無施肥)区に比べ施肥区で高い傾向だった。成葉のK、P濃度に施肥の有無による違いはみられなかった。しかし、落葉のP濃度は施肥区より対照区で低い傾向があった。Kは一般的には落葉前に樹体に引き戻されるが、NPK区では落葉のK濃度が成葉と同程度だった。また、NPK区では成葉、落葉ともにAl、Mn濃度が高かった。連年施肥によって樹体の養分状態に変化が生じ、成長低下が生じる可能性もあることが示唆された。

キーワード: 養分バランス, 施肥, 養分引き戻し, ウダイカンバ, 葉の養分濃度

Abstract: Nutrient management by fertilization is effective for sustainable wood production, but there is a possibility of the nutrient unbalance having an adverse effect on the growth and physiology of trees. To investigate the effect of annual fertilization on the nutrient status of Japanese red birch stands, we measured the nutrient concentrations of mature and senesced leaves in annually fertilized Japanese red birch stands that included three plots (NPK, NP, and control) from 1978. The nitrogen concentration of mature leaves and senesced leaves tended to be higher in fertilized (NPK and NP) plots compared to control (without fertilizer) plot. Fertilization has no effect on K and P concentrations of mature leaves. However, the P concentration of senesced leaves was lower in the control plot than fertilized plots. Although K is generally resorbed to trees before leaves fall, the K concentration of senesced leaves was comparable to the mature leaves in the NPK plot. In addition, the Al and Mn concentrations of both mature and senesced leaves peaked in the NPK plot.

Key words: nutrient balance, fertilization, nutrient remobilization, Japanese red birch, leaf nutrient concentrations

I はじめに

世界的な木材需要の増加を背景として、安定的な木材供給体制の構築が望まれている(10)。繰り返し木材を収穫することによって土壌からは養分が失われ地力が低下するため、木材生産を持続するためには施肥による土壌養分管理が有効である。

養分は樹木の成長に不可欠であるが、量だけでなく、そのバランスも重要である。日本の森林土壌では、主に窒素(N)およびリン(P)の可給性が林木の成長を規定する要因となっており、施肥によって特に造林初期の成長が促進されることが知られている(2)。しかし、特定の養分を施肥することによって他の養分とのアンバランスが生じ、林木の成長や樹木生理に悪影響を引き起こす可能性がある。

カリウム(K)はN、Pとともに3大必須元素であるが、日本の林地ではK施肥の必要性は高くないとされてきた。しかし、成長の早い樹種を植栽した林分では樹木による吸収量も多いため、NとPのみを施肥した場合等には不足しやすいと考えられる。Kは気孔調節に関わる元素であり、その不足は乾燥ストレスに対する耐性を低下させる可能性がある。

本研究では、施肥が樹木の養分状態におよぼす影響を明らかにすることを目的として、植栽5年目から33年間連年施肥(N、P、Kの3要素施肥、およびN、Pの2要素施肥)を受けている37年生ウダイカンバを対象に、成葉と落葉の養分濃度を測定した。

II 材料と方法

北海道札幌市の森林総合研究所北海道支所構内の土壌環境長期モニタリング試験林(北緯43°00′東経141°23′)のウダイカンバ林を試験地とした。ウダイカンバは成長が早く、肥沃で適潤な立地でよく生育し(4)、シラカンバやダケカンバに比べて乾燥に対する耐性や回避性が低い樹種である(6)。試験地では1973年に火入れ地拵えが行われ、1974年4月にウダイカンバが植栽された。植栽間隔は1.2m×1.4m(5952本ha⁻¹)である。1978年からNPK区、NP区、対照(無施肥)区、の3試験区を設置し、毎年1回の施肥を開始した。NPK区は複合肥料マルリンスーパー1号(2009年からはマルリン新特号)、NP区は硫酸アンモニウムおよび過リン酸石灰を肥料として用いた。1978年から2010年までの合計(33回分)施肥量は、NPK区でN-4882、P-1412、K-1863 kg ha⁻¹、NP区

で N-5923, P-2038 kg ha⁻¹ である。試験地や施肥方法の詳細は相澤ら (1) に記載されている。

2011 年 7 月 5 日に、測程カメラ (15m) を用いて各試験区の 3 個体から葉を採取した。夏枝が伸びている個体もあったが、春に展開した成葉 (春葉) のうちできるだけ陽葉を 10 枚ずつ選び、分析用試料とした。2011 年 10 月 12~27 日に、成葉を採取した個体と同じ個体から新鮮落葉を採取したが、春葉と夏葉は区別できなかった。2010 年秋の胸高直径は対照区 15.9±6.3cm, NPK 区 20.7±5.9cm, NP 区 22.7±5.7cm, 樹高は対照区 14.7±3.8m, NPK 区 18.1±3.6m, NP 区 19.1±3.7m であった (平均値±標準偏差)。採取した生葉および新鮮落葉は、葉柄を切り取り、一枚ずつ葉面積を測定したのち、蒸留水で表面の汚れを洗い落として、70℃で熱風乾燥した。乾燥重量測定後、個体毎に 10 枚の葉を混ぜて高速粉砕機で粉砕し、養分分析に供した。

葉の窒素 (N) 濃度は、NC アナライザ (NC-900, 住友化学) を用いて測定した。粉砕試料を塩酸と硝酸で湿式灰化した後、ICP 発光分析装置 (Optima4300DV, PerkinElmer) を用いて K, P, カルシウム (Ca), マグネシウム (Mg), アルミニウム (Al), ホウ素 (B), 鉄 (Fe), マンガン (Mn), 亜鉛 (Zn) 濃度を定量した。元素分析計 (FlashEA1112, Thermo Fisher Scientific) を接続した質量分析計 (Delta V, Thermo Fisher Scientific) にて、炭素安定同位体比 ($\delta^{13}\text{C}$) を測定した。

N, P, K は移動しやすい元素で、落葉前に葉から他の部位に再吸収される (7)。再吸収率を次の式を用いて算出し、乾重あたりで示した。

再吸収率 (%) = $100 \times (\text{成葉の濃度} - \text{落葉の濃度}) / \text{成葉の濃度}$

葉面積重, 葉の養分濃度, 養分再吸収率, $\delta^{13}\text{C}$ については、処理区間の違いを一元配置の分散分析で解析した。

III 結果と考察

1. 葉乾重と葉面積の関係 葉面積重 (葉面積あたりの葉乾重=LMA) を処理間で比較すると、成葉では NPK 区で高かったが、落葉では NPK 区で低かった (図-1)。しかし、NP 区の成葉, 落葉, および対照区の成葉では LMA に有意な個体差もあり、処理が LMA におよぼす影響は大きくないと考えられる。同属のシラカンバについて LMA が季節変化し落葉時には低下したという報告があるが (14)、本研究では成葉と落葉の LMA に有意差はなく、葉の乾重と葉面積の関係は落葉前後で大きく変化しなかった。原因のひとつとして考えられるのは、春葉と夏葉の違いである。ウダイカンバには春先に展開する春葉とその後に展開する

夏葉があり、形態に違いがある (5)。本研究で用いた成葉は春葉だが、落葉には両方が混在している可能性がある。

2. 葉の養分濃度 葉の養分濃度を乾重あたりで示した (図-2)。成葉の N 濃度の平均値は、対照区では 28.5mg/g であるのに対し、NPK 区では 32.1 mg/g, NP 区では 31.4mg/g であり、有意ではないが施肥によって高まる傾向がみられた。落葉でも同様で、NPK 区の N 濃度は対照区より有意に高かった ($p=0.0182$)。

落葉の P 濃度は、施肥 (NPK, NP) 区で高く、対照区では低い傾向はあったが、有意差はなかった。このウダイカンバと隣接する 17 年間 NPK と NP を連年施肥したトドマツの当年葉について、施肥開始当初は N, P 濃度に明らかな施肥効果があったものの、処理 10 年前後には差が小さくなったとの報告がある (11)。7 年間毎月窒素添加したスギでも、処理開始後 3 年間は葉の N 濃度が上昇したが、その後は処理間差がみられなくなった (8)。処理年数が増えると、リターからの養分供給や、現存量増加による養分の希釈効果などによって、葉の養分濃度に対する施肥効果は小さくなると考えられる。

落葉の K 濃度には処理間で有意差があり ($p=0.0425$)、NPK 区で高かった。しかし、K 施肥の有無は成葉の K 濃度には影響しなかった。また、NP 区, 対照区ともに、K 欠乏条件下で育成したスギ苗木にみられた葉の N, P 濃度の低下 (9) もみられなかったことから、対照区でも K の供給は不足していなかったと考えられる。

成葉および落葉の Ca 濃度に処理間差はみられなかった。Mg 濃度は施肥区より対照区でやや高い傾向があり、落葉については有意差があった ($p=0.0039$)。前述のトドマツでも当年葉の K, Ca, Mg 濃度に処理による違いがほとんどみられなかった (10)。この試験地では K 施肥による Ca, Mg の相対的な不足は生じていないと考えられる。

Al, Mn 濃度は処理区間に有意差は無かったものの、成葉, 落葉ともに NPK 区で高い傾向があった。施肥開始から 20 年後には NPK 区と NP 区の表層土壌の pH 低下が報告されていることから (12)、土壌酸性化が進んで Al や Mn が溶出し (13)、葉の Al, Mn 濃度が上昇した可能性がある。

葉の養分濃度に対する施肥の効果が成葉より落葉で顕著にみられた。成葉は春葉だが、落葉には春葉と夏葉が混在していることが影響しているのかもしれない。今後は落葉についても春葉と夏葉を選別することが望ましい。

3. 養分再吸収率 N は落葉時に 50% 以上再吸収された (表-1)。N 再吸収率に有意な処理間差はなかったが、施肥区より対照区で高い傾向がみられた。P 再吸収率は個体差が大きく、処理間差はみられなかった。一般的に K は落葉時に再吸収されるが、NPK 区では再吸収されなかった。

対照区とNP区のK再吸収率は26~45%だったが、NPK区では成葉より落葉でK濃度の高い個体もあった。NPK区ではK施肥によってK供給量が樹木の要求量を上回っていたため、再吸収が起こらなかったと考えられる。

4. 炭素安定同位体比($\delta^{13}\text{C}$) 有意差はなかったが、成葉、落葉ともに $\delta^{13}\text{C}$ は施肥区よりも対照区で低い傾向がみられた(図-3)。 $\delta^{13}\text{C}$ は植物の生育期間の積算的な水利用効率の指標であり、植物に水ストレスがかかっているほど高くなるため、施肥区では対照区よりも水ストレスがかかっていた可能性がある。一方で成葉の $\delta^{13}\text{C}$ と窒素濃度には正の相関関係がみられ($p=0.002$)、この関係はしばしばみられることから(3)、施肥による葉の窒素濃度の増加が原因とも考えられる。

IV まとめ

施肥によって葉の養分状態に変化が生じていた。処理間で葉の養分濃度に有意差があった元素はN, K, Mgであり、いずれも成葉ではなく落葉だった。NPK区では落葉時にKが再吸収されず、養分回収率は土壌や樹体の養分状態をよく表す指標となることが示された。

NPK区では葉のAl, Mn濃度が高い傾向があったことから、連年施肥を続け土壌酸性化が進行すると樹体の養分バランスが崩れ、成長の低下が生じる可能性が示唆された。この点について継続した観察・研究が必要と考えられる。

謝辞

養分分析にあたって、森林総合研究所の伊藤優子氏、稲垣善之氏、中下留美子氏、山田毅氏にお世話になった。ここに深く感謝いたします。本研究は独立行政法人森林総合研究所の交付金プロジェクト女性復帰支援課題として補助を受け、一部は同所のエンカレッジモデルによる研究支援を受けた。

引用文献

(1) 相澤州平・伊藤江利子・橋本徹・阪田匡司・酒井寿夫・田中永晴・高橋正通・松浦陽次郎・真田勝 (2012) トドマツ, エゾマツ, アカエゾマツおよびウダイカンバ人工林の37年間の成長経過と施肥の影響. 北森研: **60**, pp.93-99

(2) 藤田桂治 (1977) 成木施肥. 全国林業改良普及協会, 東京, 182pp.

(3) HANBA, Y.T, MORI, S., LEI, T.T., KOIKE, T., and WADA, E. (1997) Variations in leaf $\delta^{13}\text{C}$ along a vertical profile of irradiance in a temperate Japanese forest. *Oecologia*: **110**, pp.253-26

(4) 林弥栄 (1969) 有用樹木図説 (林木編). 誠文堂新光社, 東京, 4720pp.

(5) 菊沢喜八郎 (1983) 北海道の広葉樹林. 北海道造林振興協会, 札幌, 152pp.

(6) 小池孝良 (1984) 6月におけるカンバ類3種の光合成におよぼす乾燥の影響. 日林北支論: **33**, pp.33-35

(7) LARCHER, W. (2004) 植物生理生態学 第2版 (佐伯敏郎・館野正樹監訳). シュプリンガー・ジャパン, 東京, 350pp.

(8) NAGAKURA, J., AKAMA, A., MIZOGUCHI, T., OKABE, H., SHIGENAGA, H. and YAMANAKA, T. (2006) Effects of chronic nitrogen application on the growth and nutrient status of a Japanese cedar (*Cryptomeria japonica*) stand. *Journal of Forest Research*: **11**, pp.299-304

(9) 長倉淳子・稲垣昌宏・重永英年・三浦寛 (2011) 塩基欠乏条件で育成したスギ苗の養分状態と症状. 関東森林研究: **62**, pp.199-202

(10) 林野庁 (2013) 平成25年度版 森林・林業白書. 全国林業改良普及協会, 東京, 300pp.

(11) 真田勝・大友玲子・真田悦子 (1995) トドマツ肥培林の成長と当年葉の養分濃度 - 施肥17年間の養分濃度の変動 -. 日林論: **106**, pp.223-224

(12) 真田勝・大友玲子・真田悦子 (1997) 林地肥培林における表層土壌の変化 - 植栽から20年のモニタリング -. 日林論: **108**, pp.201-202

(13) 森林立地学会 (2012) 森のバランス. 300pp., 東海大学出版, 東京, 300pp.

(14) 飛田博順・宇都木玄・北尾光俊・上村章・北岡哲・丸山温 (2007) シラカンバ, ハリギリ, ミズナラ樹冠葉のフェノロジー, 光合成特性, 窒素利用. 日林北支論: **55**, pp.65-69

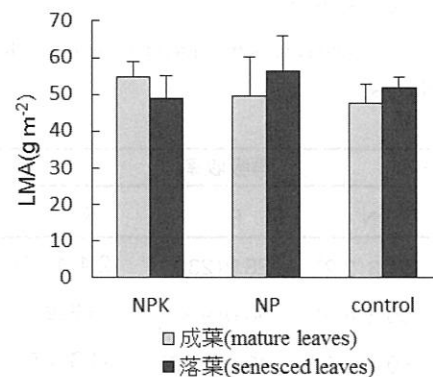


図-1. 各処理区の成葉と落葉のLMA
Fig. 1 Mean LMA (specific leaf mass area) of mature and senesced leaves in the NPK, NP and control plots. Error bars indicate the standard deviation for 3 individuals.

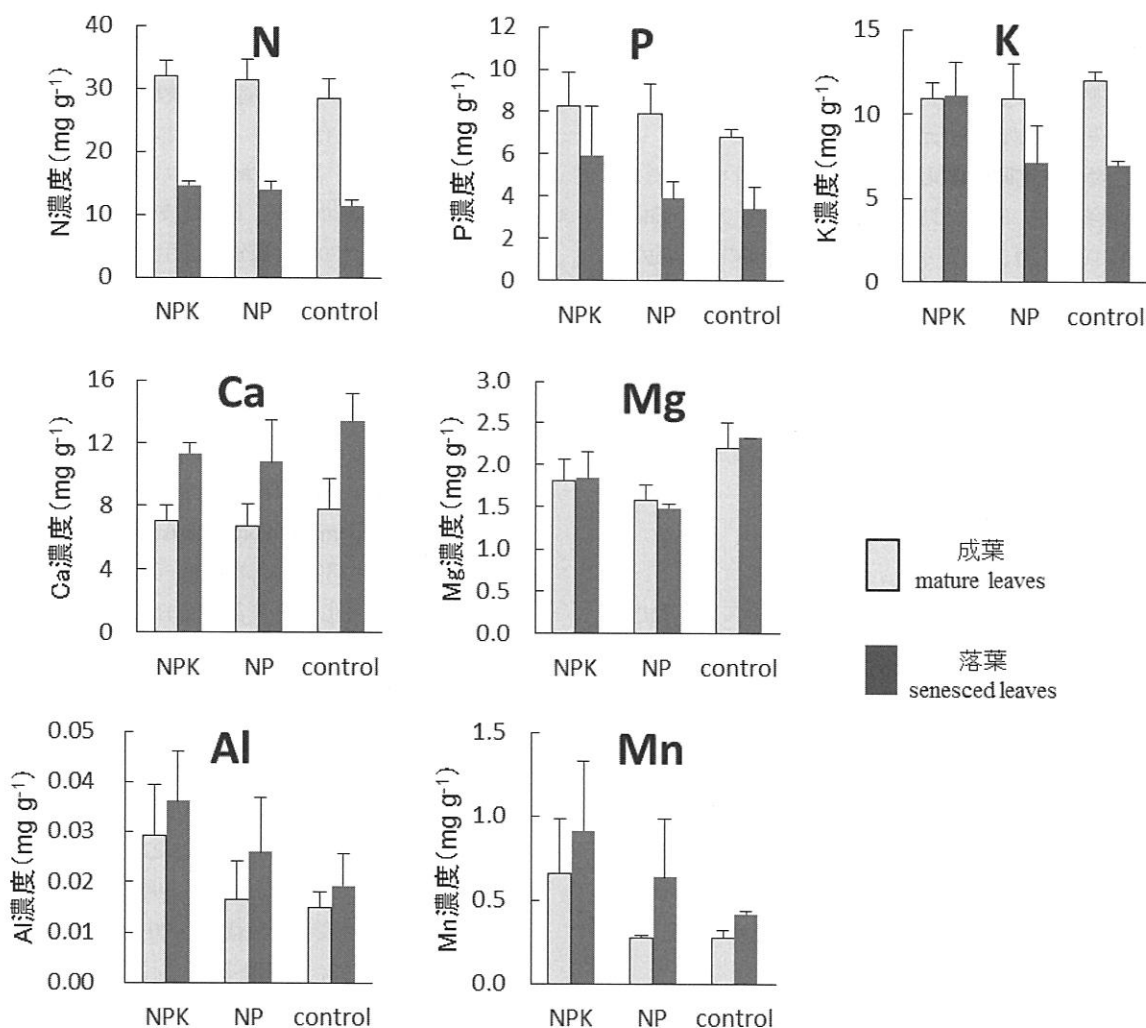


図-2. 各処理区の成葉と落葉のN,P,K, Ca, Mg, Al, Mn濃度
 Fig. 2 Mean concentration of N, P, K, Ca, Mg, Al and Mn in mature leaves and senesced leaves. Error bars indicate the standard deviation for 3 individuals.

表-1. 各処理区の N, P, K 再吸収率
 Table 1. Nitrogen, P and K remobilization rates in the NPK, NP and control plots.

	再吸収率		
	N	P	K
NPK区	54.3(2.2)	28.9(23.7)	-2.4(19.3)
NP区	55.2(6.0)	50.0(9.8)	35.8(9.5)
対照区	59.4(1.5)	49.8(14.0)	41.3(2.6)

注: 平均値(標準偏差)

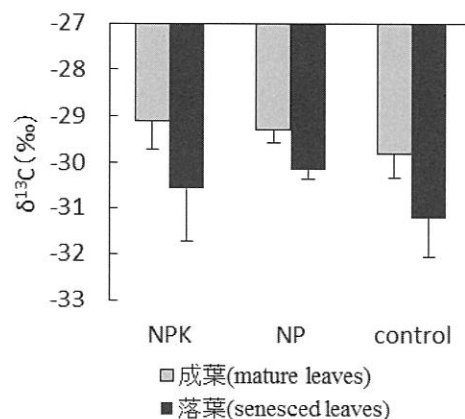


図-3. 各処理区の成葉と落葉の炭素安定同位体比
 Fig. 3 Mean δ¹³C of mature and senesced leaves in the NPK, NP and control plots. Error bars indicate the standard deviation for 3 individuals.