

## 連年施肥 40 年目のウダイカンバ林とトドマツ林の土壤養分状態

長倉淳子<sup>1</sup>・古澤仁美<sup>1</sup>・伊藤江利子<sup>2</sup>・橋本徹<sup>2</sup>・梅村光俊<sup>2</sup>

1 森林総合研究所

2 森林総合研究所北海道支所

**要旨**: 連年施肥を行っているウダイカンバ林とトドマツ林から施肥 40 年目に採取した表層土壌 (0-10cm) について、pH、全窒素、全炭素、可給態 P、交換性 Ca、Mg、K、Na、Al 含有量を調べた。その結果、両樹種とも土壌 pH は、施肥区 (NP (窒素+リン酸施肥) 区、NPK (窒素+リン酸+カリウム施肥) 区) が無施肥区より有意に低かった。可給態 P は施肥区で有意に高かった。交換性 Ca と Mg の含有量は無施肥区に比べて施肥区で低かった。交換性 K 含有量はウダイカンバ林ではカリウム施肥をしている NPK 区でも無施肥区より低かったが、トドマツ林ではむしろ施肥区が高く、植栽樹種による違いがみられた。交換性 Al は両樹種とも施肥区で著しく高く、無施肥区の 6~15 倍となっていた。本試験地では pH が 4.5 付近まで低下すると Al が溶出することが明らかとなった。

**キーワード**: 施肥, 養分状態, 土壌酸性化

### Soil nutrient conditions in Monarch birch and Todo fir stands after 40 years of repeated fertilization

Junko NAGAKURA<sup>1</sup>, Hitomi FURUSAWA<sup>1</sup>, Eriko ITOH<sup>2</sup>, Toru HASHIMOTO<sup>2</sup>, Mitsutoshi UMEMURA

Forestry and Forest Products Research Institute (FFPRI), 1 Matsunosato, Tsukuba 305-8687

Hokkaido Research Center, FFPRI, Sapporo 062-8516

**Abstract**: The pH (H<sub>2</sub>O), exchangeable cation (Ca, Mg, K, and Na), and exchangeable Al content of surface soil (0–10 cm) collected from Monarch birch (*Betula maximowicziana* Regel) and Todo fir (*Abies sachalinensis* Fr. Schmidt) stands after 40 years of continuous fertilization were examined. The soil pH (H<sub>2</sub>O) was significantly lower in the fertilized plots (nitrogen + phosphate fertilization [NP] plot and nitrogen + phosphate + potassium fertilization plot [NPK]) than in the non-fertilized plot. Available P increased significantly in the fertilized plots. The exchangeable Ca and Mg contents were also significantly lower in the fertilized plots than in the non-fertilized plots. The exchangeable K content was lower in the fertilized plots, especially in the NPK-fertilized plot, in which the birch stands were cultivated; however, the exchangeable K content was higher in the fertilized plots, in which the fir stands were cultivated. The exchangeable Al content in the fertilized plots was 6–15 times higher than that in the control plots. In this site, Al was leached out when the soil pH (H<sub>2</sub>O) decreased to approximately 4.5.

**Key-word**: fertilization, nutrient status, soil acidification

### I はじめに

温帯の森林生態系では通常は窒素が不足しがちで、窒素が樹木の成長を制限する大きな要因となっている。ところが近年、人間の産業活動を起源として、大気から森林生態系に付加される窒素量が増えている。窒素が過剰になると、樹木や土壌の養分バランスがくずれて、樹木の成長が低下することがある。

近年では森林バイオマスの利用が促進されているが、葉や材を森林生態系外に持ち出すことにより養分が森林から持ち出される。したがって、持続的に森林バイオマスを利用するため、森林への施肥によって養分を補うこ

とも検討されている。施肥は、樹木の成長促進や木材生産量の増加を目的として窒素を主体として森林でも行われるが、林齢や土壌型によって成長促進効果がみられる一方で、施肥を継続することによって、土壌中のミネラルを流亡させ、土壌酸性化を招くおそれもある。

本研究は、森林に対して人為的に特定の養分が長期間にわたり付加され続けると土壌養分状態がどのようにに変化するのかを明らかにすることを目的とし、40 年の長期にわたって連年施肥を受けているウダイカンバ林とトドマツ林の土壌について養分状態を調べた。

## II 材料と方法

**1. 調査地** 森林総合研究所北海道支所（北海道札幌市）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′）のウダイカンバ林とトドマツ林を調査地とした。調査地の年平均気温は 7.4°C (2000~2013 年) (5), 年平均降水量は 1121 mm (2007~2012 年) (溝口未発表) である。おおむね平坦な地形で、標高は 150m, 土壌は適潤性淡黒色土である。1973 年 9 月に火入れ地拵えしたのち、トドマツは同年 10 月に、ウダイカンバは 1974 年 4 月に植栽された。1978 年には無施肥区、窒素・リン・カリウムの 3 要素施肥区 (NPK 区)、窒素・リンの 2 要素施肥区 (NP 区) の 3 種類の処理区を設定し、毎年 1 回春 (5 月下旬から 6 月上旬) の施肥を開始した。各処理区の大きさは、トドマツ林では全処理区で 20m×24m (480 m<sup>2</sup>), ウダイカンバ林の無施肥区は 16.8 m × 18 m (302.4 m<sup>2</sup>), NPK 区は 18.2 × 18 m (327.6m<sup>2</sup>), NP 区は 15.4 × 18 m (277.2m<sup>2</sup>) である。ウダイカンバ林とトドマツ林, NPK 区と NP 区は N, P, K の施肥量がそれぞれ異なる (表-1)。これはウダイカンバとトドマツとで試験開始時に個体あたりの施肥量を変えていたこと、処理区サイズが異なることによる。NPK 区では林業用複合肥料, NP 区では硫酸アンモニウムと過リン酸石灰を肥料として用いた (1)。林業用複合肥料は該当肥料の製造中止に伴い 2 回変更しており、2013~2018 年はマルモリ森林肥料特号 (N : P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> : K<sub>2</sub>O = 20 : 10 : 10) を使用した。トドマツ林の無施肥区と NPK 区は 2013 年に本数で約 4 割が間伐された。各処理区内の樹木について 2007 年以降は毎年秋に胸高直径を測定している。

表-1. 2008 年までの平均年間施肥量, 2009 年からの年間施肥, 1978 年から 2017 年までの合計施肥量

Table 1. Average annual quantity of fertilizer through 2008, annual quantity of fertilizer from 2009, and total quantity of fertilizer from 1978 to 2017.

	NPK区			NP区	
	N	P	K	N	P
2008年までの平均年間施肥量 (kg ha <sup>-1</sup> )					
ウダイカンバ林	150	44	57	182	62
トドマツ林	123	35	47	121	34
2009年からの年間施肥量 (kg ha <sup>-1</sup> )					
ウダイカンバ	110	24	46	152	55
トドマツ林	130	28	54	124	33
1978年から2017年までの合計施肥量 (kg ha <sup>-1</sup> )					
ウダイカンバ林	5662	1580	2182	6984	2435
トドマツ林	4978	1363	1935	4917	1374

**2. 試料** 土壌試料は施肥を開始した 1978 年から 40 年後にあたる 2018 年 5 月 10 日に採取した。前年の施肥 (40 回目の施肥) からおよそ 1 年後である。各試験区 9 地点から、直径 5cm の採土器を用いて、0-10cm の表層土壌を採取した。9 地点は等間隔の格子状に配置した。

**3. 分析** 採取した土壌試料は風乾後、2mm のふるいをとおり分析に供した。土壌 pH(H<sub>2</sub>O) の測定には土 : 水が 1:2.5 (重量比) の懸濁液を用いた。交換性 K, Na, Ca, Mg は風乾細土を 1N の酢酸アンモニウム溶液で抽出後、交換性 Al は 1N の塩化カリウム溶液で抽出後に、ICP 発光分析装置 (Optima8300, PerkinElmer) で定量した。可給態 P はブレイ第二法 (準法) に準じて、風乾細土を 0.03M フッ化アンモニウムと 0.1M 塩酸を含む溶液で抽出後、分光光度計でリン酸の吸光度を測定し定量した。全炭素と全窒素は風乾細土を微粉碎し、乾式燃焼法で測定した。

## III 結果と考察

**1. 林況** 試験地の林況を表-2 に示した。2019 年 11 月に測定した平均胸高直径 (DBH) は、ウダイカンバ、トドマツともに施肥区 (NPK 区, NP 区) が無施肥区より大きかった。この結果は 2010 年時点の報告と同様である (1)。最も DBH が大きかったのは、ウダイカンバ林では NP 区、トドマツ林では NPK 区だった。トドマツ林の無施肥区と NPK 区は 2013 年に間伐されたが NP 区は間伐されなかったため立木密度が高く、過密により肥大成長が抑制されて NPK 区より DBH が小さかった可能性がある。樹高は 2010 年以降測定されていないが、2010 年時点では施肥区が無施肥区よりも高かった。

表-2. ウダイカンバ林とトドマツ林の立木密度, 胸高直径 (DBH), 樹高

Table 2. Tree density, diameter at breast height (DBH), and height in the birch and fir stands.

	立木密度 (本 ha <sup>-1</sup> )	DBH(cm)	樹高(m)
	2019年秋	2019年秋	2010年秋
ウダイカンバ林			
無施肥区	1488	20.4(7.8)b	15.2(3.9)b
NPK区	1129	24.1(6.8)ab	18.1(3.3)a
NP区	1118	26.6(6.6)a	18.5(3.5)a
トドマツ林			
無施肥区	1083	23.1(5.0)B	15.9(1.5)C
NPK区	1041	25.7(5.6)A	16.7(1.1)B
NP区	1604	23.4(5.3)AB	17.5(1.4)A

※DBHと樹高は平均値 (標準偏差)  
異なる英文字間には有意差あり (Tukey, p < 0.05)

2. 土壌化学性 各処理区における 2018 年に採取した表層土壌 (0-10cm) の化学性を表-3, 4 に示した。土壌 pH(H<sub>2</sub>O) (以降, 土壌 pH と記載する) は施肥区 (NPK 区, NP 区) で低く, 特に NP 区で低かった (表-3)。生態系に付加される窒素が増えるにしたがって土壌中の硝化が活発になることが予想されており (8), 施肥区では樹木による吸収量以上の窒素が付加されたことによって硝化活性が高まった結果, 土壌 pH が低下したと考えられる。相澤ら (1) によれば, 土壌 pH は, 施肥 3 年後の 1981 年時点では 5.7~6.1 で森林土壌としては高かったが, 処理に関わらず時間経過にともない低下し, 2007 年にはウダイカンバ林の無施肥区で 5.7, NPK 区で 4.9, NP 区で 4.3, トドマツ林の無施肥区で 5.5, NPK 区で 4.6, NP 区で 4.2 であった。各樹種の処理区ごとに 2018 年と 2007 年の土壌 pH を比較すると, 両樹種とも NP 区は約 4.3 で

ほとんど変わっていないが, NPK 区とトドマツ林の無施肥区は 2007 年より 2018 年で低かった ( $p < 0.05$ )。ウダイカンバ林, トドマツ林ともに施肥区の土壌 pH は, 植物の生育に有害なアルミニウムイオンが溶出するとされる 4.5 以下である (4)。

表層土壌の全炭素含有量, 全窒素含有量, および CN 比はトドマツ林では施肥の影響はみられなかったが, ウダイカンバ林では全炭素含有量も全窒素含有量も NPK 区で多かった (表-3)。

表層土壌の可給態 P 含有量は, 両樹種とも施肥区で有意に高かった (表-3)。ウダイカンバ林では NPK 区よりも NP 区で可給態 P 含有量が多かった。これはウダイカンバ林では NPK 区より NP 区で P 施肥量が多いことを反映しているのかもしれない (表-1)。

表層土壌の交換性 Ca, Mg 含有量は, ウダイカンバ林, トドマツ林共に, 無施肥区に比べて施肥区で有意に低か

表-3. 連年施肥 40 年後のウダイカンバ林とトドマツ林の表層土壌の pH(H<sub>2</sub>O), 全炭素, 全窒素, CN 比, 可給態 P 含有量

Table 3. The pH (H<sub>2</sub>O), total carbon, total nitrogen, C:N ratio and available phosphate in the surface soil of the birch and fir stands after 40 years of repeated fertilization

	pH(H <sub>2</sub> O)	全炭素 g kg <sup>-1</sup> soil	全窒素 g kg <sup>-1</sup> soil	CN比	可給態P mg kg <sup>-1</sup> soil
ウダイカンバ林					
無施肥区	5.6(0.1)a	99.5(8.1)ab	6.0(0.3)b	16.4(0.4)a	54.4( 5.0)c
NPK区	4.5(0.1)b	118.4(7.0)a	7.5(0.4)a	15.7(0.2)a	1160.0(139.2)b
NP区	4.3(0.1)c	91.1(2.6)b	5.7(0.1)b	16.0(0.2)a	2622.2(204.0)a
トドマツ林					
無施肥区	5.3(0.1)A	77.1(4.5)A	5.2(0.3)A	14.8(0.4)A	40.2( 2.1)B
NPK区	4.4(0.1)B	88.5(5.9)A	5.6(0.3)A	15.8(0.2)A	1488.9(123.0)A
NP区	4.3(0.1)B	94.3(4.5)A	6.2(0.3)A	15.3(0.2)A	1146.7(115.1)A

※値は平均値 (標準誤差) (n=9)。異なる英文字間には有意差あり (Tukey,  $p < 0.05$ )

表-4. 連年施肥 40 年後のウダイカンバ林とトドマツ林の表層土壌の交換性塩基および交換性 Al 含有量  
Table 4. , Exchangeable bases and exchangeable aluminum (Al) in the surface soil of the birch and fir stands after 40 years of repeated fertilization

	K cmol <sub>c</sub> /kg	Na cmol <sub>c</sub> /kg	Ca cmol <sub>c</sub> /kg	Mg cmol <sub>c</sub> /kg	Al cmol <sub>c</sub> /kg
ウダイカンバ林					
無施肥区	0.65(0.11)a	0.07(0.01)a	12.99(1.84)a	2.39(0.32)a	0.24(0.10)b
NPK区	0.40(0.04)b	0.06(0.01)a	2.68(0.42)b	0.48(0.04)b	4.88(0.41)a
NP区	0.21(0.02)b	0.05(0.00)a	1.85(0.08)b	0.20(0.02)b	5.14(0.15)a
トドマツ林					
無施肥区	0.13(0.01)B	0.12(0.01)A	8.29(0.84)A	1.07(0.09)A	0.73(0.24)B
NPK区	0.26(0.04)A	0.07(0.01)B	1.90(0.42)B	0.23(0.03)B	5.26(0.33)A
NP区	0.19(0.02)AB	0.08(0.01)B	2.32(0.19)B	0.21(0.02)B	5.86(0.21)A

※値は平均値 (標準誤差) (n=9)。異なる英文字間には有意差あり (Tukey,  $p < 0.05$ )

った(表-4)。施肥区の交換性 Ca, Mg 含有量は、無施肥区と比べて、ウダイカンバでは 1/5, トドマツ林では 1/4 程度だった。施肥区における土壌 pH の低下は、酸性の有機酸の生成や過剰な硝酸の流亡に伴う交換性 Ca, Mg の溶脱が主な原因だと考えられる(9)。また、古澤ら(3)は 2015 年 8 月に採取したリター層の乾重が、ウダイカンバ林, トドマツ林共に、無施肥区に比べて施肥区で有意に高かったことから、施肥区ではリター層から放出される有機酸によって土壌微生物活性が抑制され、リター分解が抑制された可能性を述べた。施肥区では土壌酸性化によりリター分解を担う土壌微生物活性が低下したため、リターの分解が遅く、リター中の交換性塩基が土壌に溶出しにくかったと考えられ、このことも施肥区の交換性 Ca, Mg 含有量が低いことに影響している可能性がある。交換性 Na 含有量は、交換性 Ca, Mg, K に比べ低く、ウダイカンバ林では処理区間差がみられなかったが、トドマツ林では無施肥区が施肥区より高かった(表-4)。

交換性 K 含有量は、ウダイカンバ林では無施肥区に比べて施肥区で低かったが、トドマツ林では NPK 区が最も高かった(表-4)。無施肥区の交換性塩基をウダイカンバ林とトドマツ林で比較すると、交換性 Ca, Mg, K 含有量はトドマツで低く、特に交換性 K 含有量は、トドマツ林はウダイカンバ林の約 1/5 と低かった。ウダイカンバ林とトドマツ林の土壌で交換性 K 含有量が異なり、施肥に対する交換性 K の応答が異なることは、落葉広葉樹と常緑針葉樹ではリターの質が異なることが原因のひとつだと考えられる。有機化学成分組成の違いにより落葉広葉樹のリターは常緑針葉樹のリターよりも分解されやすい。ウダイカンバのリターはトドマツのリターよりも分解による K の溶出が速いと考えられる。落葉広葉樹のリターの K 濃度は緑葉の 50%程度と高いが、針葉樹のリターは緑葉の 25%以下といわれている(2)。無施肥区の緑葉の K 濃度は、ウダイカンバで 12mg/g (6)、トドマツ当年葉で 7-9 mg/g (7)であった。これらのことから、トドマツ林はウダイカンバ林に比べて K の循環量が小さいため表層土壌の交換性 K 含有量が少なく、NPK 区で施肥による効果のみられたと推測される。

交換性 Al 含有量は、ウダイカンバ林, トドマツ林ともに無施肥区に比べて施肥区で著しく高く、無施肥区の 6~15 倍となっていた(表-4)。土壌 pH が 4.5 付近まで低下すると Al が溶出することが明らかになった。1978 年から 1995 年に毎年秋に採取されたウダイカンバ落葉とトドマツ当年葉の養分濃度変化を調べた結果、施肥区で葉の Mn 濃度(特にウダイカンバ)や Al 濃度(トドマツ)が高まっていた(7)。土壌酸性化による Mn や Al

の溶出が当時から生じていたと考えられる。現時点で、施肥区の樹木に成長の低下はみられていないが、土壌が酸性化し、土壌の交換性塩基含有量が減少しており、交換性 Al の溶出もみられ、葉の養分濃度にも反映されている。したがって、長期にわたる連年施肥は木材生産の増加に有効ではないが、樹木成長や環境へ負の影響をおよぼす可能性があるため、今後も施肥試験を継続し、その影響を調査していきたい。

**謝辞:** 本研究の実施にあたり、現地調査や分析、データ共有等で森林総研北海道支所および森林総研の方々にご協力いただいた。お礼を申し上げる。本研究は JSPS 科研費 17K07866 の助成を受けて行われた。

#### 引用文献

- (1) 相澤州平・伊藤江利子・橋本徹・阪田匡司・酒井寿男・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 60:93-99
- (2) Berg B, McClaugherty C (2004) Plant Litter Decomposition, Humus Formation, Carbon Sequestration., 大園享司訳, 森林生態系の落葉分解と腐植形成, シュプリンガー フェアラーク東京:285pp
- (3) Furusawa H, Nagakura J, Aizawa S, Ito E (2018) Effects of repeated fertilization and liming on soil microbial biomass in *Betula maximowicziana* Regel and *Abies sachalinensis* Fr.Schmidt stands in Japan. *Landscape and Ecological Engineering* 15(1):101-111
- (4) 松本英明(2003) 酸性土壌とアルミニウムストレス. 根の研究 12(4):149-162
- (5) 溝口康子・山野井克己・北村兼三・中井裕一郎・鈴木覚(2014) 札幌森林気象試験地の気象(1999~2008年). 森林総研研報 433:193-206
- (6) 長倉淳子・古澤仁美・伊藤江利子・相澤州平・橋本徹(2014) 連年施肥がウダイカンバの養分状態におよぼす影響. 関東森林研究 65:99-102
- (7) 長倉淳子・古澤仁美・相澤州平・伊藤江利子・橋本徹(2019) 施肥開始から 18 年間のトドマツ針葉とウダイカンバ落葉の養分濃度変化. 関東森林研究 70:73-76
- (8) 柴田英昭 編(2018) 森林科学シリーズ 8 森林と物質循環. 共立出版:198pp
- (9) 高橋正通・真田勝・松浦陽次郎・小根澤久枝(1999) 北方常緑針葉樹の人工林発達に伴う土壌交換性塩基の動態. 日林学術講 110:529