

論文 (Original article)

北海道における地がきダケカンバ更新地の樹高成長と
表層土壌理化学性の関係伊藤 江利子^{1)*}、橋本 徹¹⁾、相澤 州平²⁾、古家 直行¹⁾、石橋 聡¹⁾

要旨

低コスト更新補助作業である地がき(かき起こし)によるカンバ林造成が北海道のトドマツ人工林主伐後の造林選択肢として期待されている。一方で、地がきによる表層土壌の除去は地がき跡地に更新した樹木の成長を抑制する可能性がある。地がきによる土壌攪乱がカンバ類の成長に及ぼす長期的影響を明らかにするため、1970～1990年代に筋状地がきを行った北海道内のダケカンバ更新林17林分を対象に表層5 cm土壌の理化学性を調査し、ダケカンバの成長と土壌理化学性の関係を解析した。20～44年生の地がきダケカンバ林の成長は既報の地がきによらないダケカンバ林より良好であった。調査地である筋状地がき地では地がき帯のみならず残し帯にもカンバ類が更新しており、その樹高成長(地位指数)は地がき帯に更新した林分と有意差がなかった。一般化線形モデルにより地がきダケカンバ林の地位指数は低CN比条件下と斜面中下部で良いことが示された。CN比を除く土壌理化学性に対して地がきによる変化が認められたが、地がきがダケカンバの成長に及ぼす影響は不明瞭であった。地がきによる土壌攪乱は更新カンバ林の長期的な成長に影響を及ぼさないものと考えられた。

キーワード：地がき、地位指数、土壌理化学性、カバノキ属、CN比

1. はじめに

地がき(かき起こし)は1960年代後半以降、北海道で広く行われた更新補助作業である(滝川 1993, 伊藤ら 2018b)。地がきは林床に密生するササを大型機械で根系ごと除去する地表処理で、鉋質土層が露出した地がき跡地にはカンバ類が優占する二次林が更新した(青柳 1983, 滝川 1993, 三好 1996, 梅本 2003)。地がきの多くはササ類に覆われた無立木地の森林化を目的として行われたが(青柳 1983)、近年では製材・合板用材、木材チップ用材、きのこ菌床用おが粉原木としてカンバ材需要が拡大している(嶋瀬ら 2013, 嶋瀬 2014b, 秋津・青木 2018)。さらに北海道では拡大造林期に広く植栽されたトドマツ人工林の主伐・再造林が喫緊の課題であり、低コストの地がきによるカンバ林造成がトドマツ主伐後の造林選択肢として検討されている(伊藤ら 2018b)。

地がきによるカンバ林造成により木材生産機能を高めるためには、更新成功に加えて、その後の良好な成長も要件となる。北海道全域の地がき林分を対象に地がきダケカンバ林の地位指数に影響する環境要因を解析した梅本(2003)は、気候が湿潤で、斜面系列で下部に位置し、雪害の程度が弱いと樹高成長が良いとしている。しかしながら、梅本(2003)は回帰の決定係数は小さい($R^2 = 0.12$)ことに言及し、土壌要因が説明

変数に含まれていないことをその原因のひとつと考察している。土壌要因は地位指数に関与する重要な環境因子とされ(真下 1969, Skovsgaard and Vanclay 2013)、ウダイカンバの地位指数は土壌型・地形・土層の深さでかなりの程度説明できるとの報告もある(塩崎・真田 1990)。そもそも地がきは地表面を重機が走行し、養分豊富な表層土壌を一部除去するという大幅な攪乱を伴う作業である(伊藤ら 2018b)。既往の報告ではウダイカンバの地位指数が下位の地点の B_1 層容積重として 1.08 g cm^{-3} が提示されている(塩崎・真田 1985)。実際の地がき跡地ではこの値を超える表層土壌容積重が散見されており(伊藤ら 2018a)、A層を除去する深い地がきがカンバ類の成長を長期的に抑制することも懸念される。加えて、土壌物理性が適当な立地でのカンバ類の成長には土壌化学性が重要となるため(塩崎・真田 1985)、土壌化学性の損耗を通じた地がきのカンバ成長への影響も明らかにする必要がある。

本研究では、地がきが土壌理化学性の損耗を通じてカンバ類の成長に与える影響を明らかにするため、過去に筋状地がき処理がなされた20～44年生のダケカンバ更新林を対象として、地がきと土壌理化学性の関係、および土壌理化学性と樹高成長の関係について解析した。筋状地がき地の地がき帯(重機によりササ地上部と根茎を一部の土壌ごと排除した幅数 m の帯状区

原稿受付：平成30年10月30日 原稿受理：令和元年6月17日

1) 森林総合研究所 北海道支所

2) 森林総合研究所 立地環境研究領域

* 森林総合研究所 北海道支所 〒062-8516 北海道札幌市豊平区羊ヶ丘7

域)と残し帯(地がき帯と地がき帯の間に設けられた処理を伴わない幅数 m の带状区域)において土壌理化学性の多点調査を行い、土壌理化学性に対する地がきの改変影響を明らかにした。一方、一般化線形モデルを用いて樹高成長の指標である地位指数に対して気象・立地および土壌理化学性の各要因が及ぼす影響を検討し、地位指数に影響する土壌理化学性の種類を明らかにした。以上を合わせて、地がきが土壌理化学性の改変を通じてカンバ類の成長に与える影響の有無について考察した。

2. 調査地と方法

北海道内の国有林、宗谷・上川北部・上川中部・留萌南部・北空知・空知・石狩管理署管内における 1971～1996 年に筋状地がきを行ったダケカンバ更新林 17 林分を調査地とした (Fig. 1)。地がき作業の仕様や更新状況を含む調査地の諸元を Table S1 に記す。調査は 2015 年 6 月から 2017 年 10 月までの期間に行った。調査時における調査地林分の地がきからの経過年数は 20～44 年であった (Table 1)。北海道内の地がき跡地にはダケカンバ以外のカンバ類(シラカンバ、ウダイカンバ)も出現し、複数種が混在する林分も認められるが(伊藤ら 2019)、本研究ではダケカンバが優占して更新した林分のみを対象とした。ここでダケカンバが優占するとは後述する毎木調査によって樹種別の立木密度と胸高断面積合計の双方においてダケカンバが林分内の最大値を示すこととした。調査地の更新状況(立木密度、平均胸高直径、胸高断面積合計)は Table S1 に記す。調査地林分内に 20 m × 20 m の方形調査枠を設定した(ただし 2 調査地では 10 m × 20 m ないしは 10 m × 10 m, Table S1)。調査枠内の地がき帯・残し帯は

過去の航空写真から地がき列方向を確認した上で現地踏査において数 m 間隔の畝状微地形を特定することによって判別し、現地で地がき帯の分布図を簡易に作成した(地がき帯が現地踏査で判別できなかった SJ-14

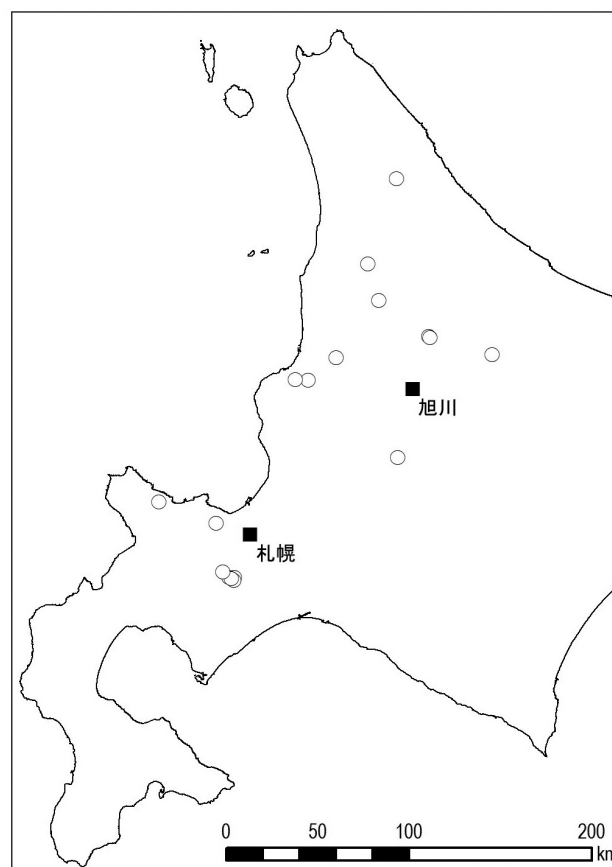


Fig. 1. 調査地の位置
Spatial distribution of the 17 study stands across Hokkaido, northern Japan.

Table 1. 調査地の更新状況と土壌理化学性

Attributes of birch regeneration and soil physicochemical properties for study plots following soil scarification

更新位置	調査地名	調査時 林齢 [年]	上層高 [m]	地位指数 [m]	収量比数	TC [g kg ⁻¹]		TN [g kg ⁻¹]		C/N		BD [g cm ⁻³]	
						地がき帯	残し帯	地がき帯	残し帯	地がき帯	残し帯	地がき帯	残し帯
地がき帯	AKh-3	44	18.7	20.5	0.89	79.7	132.8	6.03	10.93	13.2	12.1	0.41	0.56
	SJ-7	39	13.5	16.1	0.72	116.9	141.6	8.68	9.98	13.7	14.4	0.30	0.39
	AKc-2	37	11.5	14.3	0.66	76.7	119.1	5.47	8.72	13.7	13.5	0.34	0.56
	SJ-8	37	13.7	17.0	0.48	145.9	197.3	9.48	11.95	15.6	16.7	0.28	0.32
	AKh-2	34	16.2	21.5	0.89	97.7	137.4	7.15	10.60	13.7	13.1	0.42	0.55
	AS-1	31	14.1	20.3	0.70	73.3	100.8	5.63	8.08	13.1	12.5	0.38	0.51
	ARs-3	24	11.5	20.8	0.42	26.6	52.0	2.05	3.73	12.9	13.8	0.59	0.82
	ARs-7	20	10.0	21.7	0.47	50.7	128.7	3.25	8.15	15.9	15.8	0.31	0.58
残し帯	SJ-1	41	16.4	18.9	0.89	129.1	129.2	8.55	8.57	15.2	15.3	0.37	0.38
	SJ-11	38	15.8	19.3	0.93	75.3	101.3	6.23	8.30	12.1	12.3	0.51	0.63
	SA-1	33	14.9	20.4	0.73	54.8	135.2	3.95	7.68	13.8	16.6	0.44	0.55
	SJ-5	31	14.5	20.9	0.94	120.4	137.1	8.17	9.65	14.8	14.3	0.37	0.42
	AKS-3	30	11.0	16.3	0.62	52.2	114.5	2.77	6.02	18.7	19.2	0.53	0.77
	ARs-2	30	8.8	12.9	0.45	26.2	86.0	1.75	4.40	15.0	19.3	0.59	1.07
全面更新	SY-2	31	12.7	18.2	0.73	43.6	66.2	3.35	4.88	12.8	13.5	0.63	0.78
	AKh-1	28	12.3	19.3	0.57	44.6	58.7	2.63	3.20	17.6	18.6	0.59	0.75
地がき帯不明	SJ-14 ¹⁾	39	16.7	19.9	0.74	145.8	170.2	10.33	12.45	14.2	13.7	0.33	0.38

¹⁾ SJ-14 は更新帯(非更新帯)の値を地がき帯(残し帯)欄に記した。

を除く)。カンバは地がき帯に更新するという調査前の予測に反し、残し帯にもカンバが更新している林分が多数認められた。方形調査枠内の地がき帯および残し帯におけるカンバ更新の有無を現地で確認し、調査地をカンバ更新位置で分類した (Table 1)。調査地とした地がきカンバ更新林 17 林分のうち、地がき帯のみに更新していたのが 8 林分、残し帯のみに更新していたのが 6 林分、地がき帯と残し帯の双方に更新 (全面更新) していたのが 2 林分、地がき帯不明が 1 林分であった。調査枠内の胸高直径 5 cm 以上の生立木について、樹種を同定し、胸高直径を直径巻尺により 1 mm 単位で測定した (毎木調査)。また樹高をノンプリズムレーザー距離計インパルス (レーザーテクノロジー社) を用い 10 cm 単位で測定した。調査枠内の地がき帯および残し帯において、100 ml 採土円筒を使用し、 A_0 層を除去して露出した表層土壌 (鉱質土層の深さ 0 ~ 5 cm) を採取した。SJ-14 では地がき帯に相当する地表面の高低が特定できず、カンバ更新列と列間で土壌試料を採取した。試料は地がき帯、残し帯各 2 列のそれぞれ 2 箇所または 3 箇所から採取した (ただし 2 林分を除く、採取試料数を Table S1 に記す)。

採取した土壌は実験室内に室温で 1 週間以上保管して風乾状態とし、細土、根、礫、腐朽木材片に分けた後に風乾重量を測定した。細土の一部について 105℃ で 24 時間乾燥させ、絶乾重量を測定して乾燥係数を求めた。これらの数値を用いて、土壌物理性の指標として細土容積重 (以下 BD、採土円筒の容積から根・礫・腐朽木材片の体積を除いた細土容積あたりの細土の絶乾重, g cm^{-3}) を算出した。根・礫重量から体積への換算は定法を適用し、石礫の真比重として 2.65 を用いた (河田・小島 1979, 森林立地調査法編集委員会 2010)。土壌化学性指標として全炭素・全窒素含有率 (g kg^{-1})、CN 比を算出した (以下、TC、TN、C/N)。全炭素・窒素分析には vario MAX CN (Elementar, Germany) を用いた。

地がきによる土壌理化学性の変化を明らかにするため、各調査地の土壌理化学性を地がき帯、残し帯間に対応のある t 検定を用いて比較した。地がき帯が現地で判別不能だった SJ-14 のデータは検定から除外した。

各林分の上層高は、方形調査枠内に出現した樹木個体を樹高降順に並べ、樹高の高い個体から 200 本 ha^{-1} に相当する本数までの樹高平均値とした。地がきダケカンバ林の地位指数に影響する環境要因を解析した先行研究である梅木 (2003) において概ね 200 本 ha^{-1} に相当する本数までの樹高平均値を用いて林分上層高を算出しているためこれに倣った。分母となる面積は地がき帯・残し帯の区分を行わず方形調査枠の全面積を使用した。上層高算出の際に地がき帯・残し帯の区分は行わなかった。そのため、地がき帯と残し帯の双方に更新していた林分 (SY-2, Akh-1) の上層高は地がき

帯更新個体と残し帯更新個体の数値が混じったものである。また、先折れや幹曲がり認められた個体および明らかな被圧状態にある下層木は上層高算出に用いなかった。

上層高と林齢から猪瀬ら (1990) の地がきによらないダケカンバ林の地位指数曲線ガイドライン式 (ダケカンバ) を用いて地がきダケカンバ林分の基準林齢を 50 年とする地位指数を算出した。ダケカンバのガイドライン式 (猪瀬ら 1990) を以下に記す。

$$H_x = 23.0018 - 24.6583 \times 0.9805^x$$

ここで x は林齢、 H_x はガイドラインにおける林齢 x における上層高である。

調査林分の混み合い度と地位指数の関係を検討するため、調査林分の収量比数を森林総合研究所「収量比数 R_y 計算プログラム」により算出した。調査した 17 林分のうち 14 林分ではダケカンバ以外の樹種も更新していたが (Table S1)、算出にあたっての樹種別パラメータセットは「北海道国有林ダケカンバ」を適用した。収量比数の算出に用いた上層高は慣例に従って被圧木や枯死木を除いた立木の平均樹高とし、前述の地位指数推定用の上層高とは異なる。また立木密度は被圧木や枯死木を除いた全個体の立木数を方形調査区の全面積で除した値を用いた。

地がきダケカンバ林の地位指数と更新した帯の区分 (地がき帯・残し帯・全面更新) の関係を明らかにするため、更新帯による地位指数の違いを一元配置分散分析 (ANOVA) で解析した。現地で地がき列が判別できなかった SJ-14 は解析から除外した。

地がきダケカンバ林の樹高成長に対する土壌理化学性と立地条件の影響を検討するため、一般化線形モデル (Generalized Linear Model) を用いて解析した。応答変数を地位指数とし、説明変数を土壌試料の理化学性 (TC、TN、C/N、BD)、および立地条件 (標高、最大積雪深、年平均気温、傾斜、斜面方位、地形、地質) とした。土壌理化学性は各林分の土壌理化学性平均値を用いた (Table 1)。平均値は地がき帯と残し帯のそれぞれで別個に行い、一般化線形モデル解析にはカンバの更新が認められた帯から採取された土壌試料のデータのみ、すなわち地がき帯 (残し帯) のみに更新していた林分では地がき帯 (残し帯) で採取した土壌試料のデータを用いた。SJ-14 ではカンバ更新列で採取した試料のデータを用いた。地がき帯と残し帯の双方に更新した林分 (全面更新, $n = 2$) は解析から除外した。これは更新密度が地がき帯・残し帯間で不均一であり、樹高成長の良否と土壌条件の関係を解析するためには、地がき帯・残し帯から立木本数で按分した数の土壌試料を採取すべきであるが、本調査の土壌採取仕様がこれを満たさないためである。立地要因のうち標高と傾斜は現地での測定により、年平均気温と最大積雪深は気象庁 (2002) を用いて値を求めた。斜面方

位は現地で測定したのち真北および真東からの角度に分割した数値情報として用いた。地形は斜面上部と斜面中下部の2カテゴリに分類した。斜面上部カテゴリには平衡山腹斜面上部以外に尾根や台地が含まれる。地質は北海道火山灰命名委員会(1982)による火山碎屑物分布図の判読により母材における火山碎屑物の有無を判定した。各調査地の立地条件をTable S1に記す。解析では最小Bayesian information criterion (BIC, Schwarz 1978)を基準として平均的な予測が良好なモデルを選択した(粕谷 2015)。選択された説明変数の効果の大きさを比較するために、各説明要因を尺度化した推定値(平均を0、範囲を2に尺度化した要因に対する係数)を算出した。

統計解析にはJMP ver.10.0 (SAS Inst., Cary, NC)を用いた。

3. 結果

地がき帯と残し帯における土壌理化学性の平均値をTable 2に示す。対応のあるt検定の結果、地がき帯の土壌理化学性は同一林分の残し帯に比べて、TCとTNで小さく、C/Nで差がなく、BDで大きい傾向が認められた(Table 2)。

地がきダケカンバ林の上層高は概ね猪瀬ら(1990)による非地がきダケカンバ林の地位指数曲線中心線で予測される上層高より大きかった(Fig. 2)。猪瀬ら(1990)の式による地位指数中心線の地位指数(基準林齢50年生時の上層高)は13.8mだが、地がきダケカンバ林の地位指数は平均(±SD)が 18.7 ± 2.5 m、範囲は12.9~21.7 mだった($n = 17$)。林齢-上層高の関係と林分の混み合い度の指標である収量比数の間には明瞭な関係は見いだせなかった(Fig. 2)。各林分の上層高、地位指数、収量比数をTable 1に記す。

地がきダケカンバ林分の更新帯別の地位指数をFig. 3

Table 2. 対応のあるt検定による地がき帯と残し帯における土壌理化学性の比較
Soil physicochemical properties in soil-scarified and non-scarified bands and results for paired t-tests.

	地がき帯		残し帯		T_{paired}	p
	平均値	標準偏差	平均値	標準偏差		
TC [g kg^{-1}]	75.9	36.9	114.9	36.8	-6.69	<.0001
TN [g kg^{-1}]	5.32	2.57	7.80	2.66	-7.11	<.0001
C/N	14.5	1.8	15.0	2.4	-1.61	0.129
BD [g cm^{-3}]	0.60	0.20	0.44	0.12	5.75	<.0001

TC, 全炭素濃度; TN, 全窒素濃度; C/N, 炭素窒素比; BD, 細土容積重。

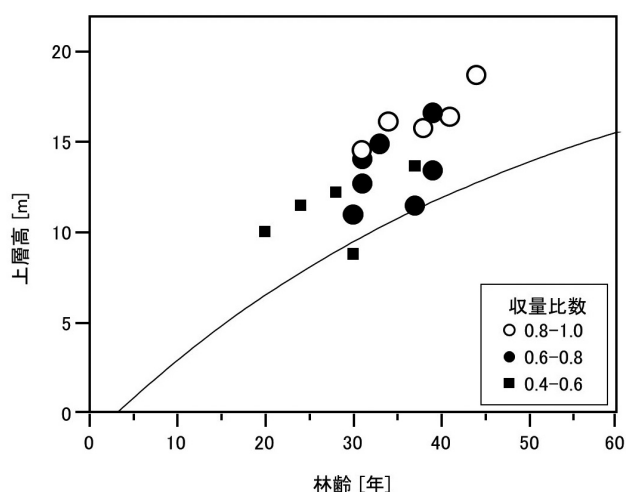


Fig. 2. 地がきダケカンバ林の林齢と上層高の関係
Relationships between stand age and average height of the tallest 200 trees ha^{-1} for scarification-regenerated *Betula ermanii* forests. 曲線は猪瀬ら(1990)による地がきによらないダケカンバ林の地位指数曲線中心線($y = 23.0018 - 24.6583 \times 0.9805^x$)を示す。凡例は収量比数の階級を示す。上層高および収量比数の算出方法は本文参照。

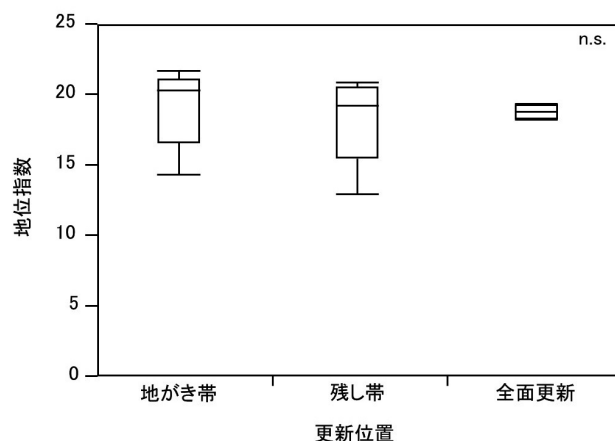


Fig. 3. 更新位置ごとの地がきダケカンバ林地位指数
Site index of birch trees regenerated on soil-scarified, non-scarified, and both bands.

Table 3. 一般化線形モデルによる地位指数に影響する土壌・立地因子
Fixed effects of the final Generalized Linear Model to test
for the effect of soil physicochemical properties and site
environmental factors on site index.

R^2 (Adj. R^2)	RMSE	F	p	係数 [尺度化した推定値] t 値, p 値	
				C/N	地形 ¹⁾
0.423 (0.327)	2.25	4.4	0.0370	-0.69 [-2.44] -2.45, 0.0306	-1.17 [1.17] -1.96, 0.0733

¹⁾ 斜面上部の値を記す。斜面中下部の値は絶対値が同じで正負が逆の数値である。

に示す。地がき帯に更新した林分と残し帯に更新した林分の間に地位指数の有意な差は認められなかった ($p = 0.8349$, ANOVA)。

一般化線形モデルによる解析では地がきダケカンバ林の地位指数を説明するモデルとして C/N と地形を予測変数とするモデルの BIC が最小となった (Table 3)。BIC 最小モデルの RMSE (誤差の標準偏差) は 2.25 m であり、切片だけのモデル (RMSE = 2.74) と比較して約 0.5 m の推定精度向上が認められ、その効果は有意であった ($p = 0.0370$, Table 3)。モデルによる地位指数予測値と実測値の関係を Fig. 4a に示す。地位指数の予測残差は地位指数が小さい林分で大きい傾向が認められた。C/N の尺度化された推定値は -0.70 であり、これは C/N の値が最小値である 12.3 から最大値である 19.3 に変化した場合に、地位指数の期待値が約 1.4 m 減少することを示す (Table 3)。地形の尺度化された推定値は -1.17 であり、斜面上部では斜面中下部より地位指数の期待値が約 2.3 m 減少することを示す (Table 3, Fig. 4b)。なお C/N と地形の交互作用には有意な説明効果が認められなかった。

4. 考察

4.1 地がきダケカンバ林の成長の良否

地がきダケカンバ林の 20 年生内外の段階における樹高成長は、森林伐採跡地や山火事跡地に成立した地がきによらないダケカンバ林より大きいとされる (梅木 2003)。本研究においても地がきダケカンバ林の上層高は、猪瀬ら (1990) による地がきによらないダケカンバ林の地位指数曲線より上方に位置し、地がきダケカンバ林の成長が地がきによらないカンバ林に比較して劣る傾向は認められなかった (Fig. 2)。梅木 (2003) は 13 ~ 22 年生の地がきダケカンバ林の地位指数 (基準林齢 50 年) は 17.0 ± 2.8 m で、猪瀬ら (1990) による地がきによらないダケカンバ林の地位指数曲線中心線の地位指数 13.8 m より大きいとしている。本研究の地がきダケカンバ調査林分の地位指数は 18.7 ± 2.5 m であり、猪瀬ら (1990) と梅木 (2003) の双方より大きかった。13 ~ 22 年生で認められた高成長の傾向 (梅木 2003) が、20 ~ 44 年生の段階でも同様かそれ以上

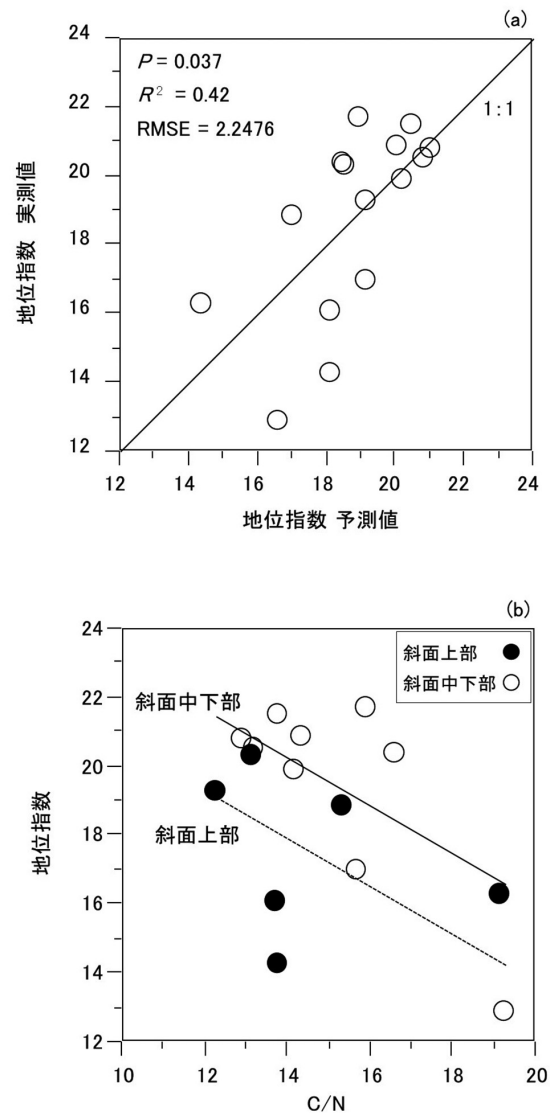


Fig. 4. 一般化線形モデルによる地位指数の予測 (a) 地位指数のモデル予測値と実測値の関係 (b) C/N と地位指数実測値の関係

Scatter plots on the final Generalized Linear Model on site index for scarification-regenerated birch forests. (a) Relationships between model-predicted and measured site index, (b) Relationships between CN ratios and measured site index

(a) 図中に 1 : 1 の直線を記す (b) 図中の直線および点線は地形要因のカテゴリーである斜面中下部および斜面上部における回帰直線を示す。図の凡例により各調査地の地形区分を示す。

に示された。ただし、カンバ類の利用径級は製材合板用材で胸高直径 22 ~ 32 cm (嶋瀬 2014a)、内装材で末口径 20 cm 以上 (嶋瀬ら 2013) ないしは末口径 14 ~ 30 cm (秋津 2016, 秋津・青木 2018, 石川 2018, 古田 2018) とされる。梅木 (2003) の調査林分の最大樹高は約 12 m であり、既報のアロメトリ式 (鮫島 1971) から胸高直径を推定すると 10 cm 未満である。また本研究の地がきダケカンバ林の平均胸高直径も 6.9 ~ 15.4 cm の範囲にあって (Table S1)、いずれも利用径級には至っていない。末口径 24 cm 以上および 14 cm 以上の原木はそれぞれ 70 年生および 50 年生の林分に多く蓄積していると推察されており (大野 2018)、伐期に至るまでの成長の推移を引き続き注視する必要がある。

本研究において地がき地の残し帯に更新したカンバ林の存在が認められた。この残し帯更新カンバ林の状況は、地がきを行っていないはずの立地に更新したという意味において、非地がきカンバ林に類似とも考えられる。梅木 (2003) の結果を適用すれば、残し帯更新ダケカンバ林の地位指数は地がき帯更新ダケカンバ林のそれより低いと予想される。しかしながら、地位指数は更新した帯の種類で有意な差が認められず、残し帯に更新したダケカンバは地がき帯に更新したダケカンバと同等の成長を示した (Fig. 3)。伊藤ら (2019) は残し帯に更新したカンバ林においては深めの地がきが行われたと推測し、その際発生した大量のボサ (林床植生の破断物・堆積有機物・表層土壌からなる有機物と鉱質土壌の不均質な混合物) が残し帯に残置された可能性を指摘している。非地がきカンバ林にはなかったボサの存在が残し帯に更新したダケカンバの良好な成長に寄与したかもしれない。ボサ上における更新の実態およびボサが土壌理化学性および養分循環に及ぼす影響の解明は今後の課題である。

4.2 地位指数に影響する土壌・立地要因

地がきダケカンバ林の地位指数を説明する最も有効な要因は C/N であった ($p = 0.0306$, Table 3)。C/N は有機物分解に関わる物質循環の重要な指標である (Berg and Ekbohm 1983, 武田 1994)。高 C/N の林分では無機態窒素の可給能が小さく、養分条件が劣っていた可能性がある。地形は C/N に次いで有効な説明要因として一般化線形モデルで選択され、斜面上部では斜面中下部より地位指数が低い傾向が示された (Table 3)。一般的に C/N と斜面位置には密接な連関が認められており、C/N は斜面上部で大きく斜面下部や谷部で小さいが (沓名ら 1988, 高橋ら 1994, 菱ら 2010)、一般化線形モデルの結果は、同じ C/N を示す林分であっても斜面上部に位置する林分では斜面中下部に位置する林分より地位指数が低くなることを示唆している (Fig. 4b)。斜面位置の違いは土壌物理性やそれに連関する土壌水分条件の違いにも連関すると考えられる。地がきダケ

カンバ若齢林 (< 20 年生) の成長に影響する環境要因を解析した既往事例では、成長には斜面位置が影響し、土層深が厚くなる斜面下部で成長良好であった (梅木 2003)。また、山火事跡地に更新したウダイカンバ高齢林 (約 90 年生) では、斜面上部で乾燥ストレスの影響により衰退木の出現確率が高いことが示されている (大野 2011)。さらに梅木 (2003) は 5 月から 7 月の降水量と日照時間を用いて算出した気候的乾湿度 (寺澤・薄井 1987) を指標として北海道内の気候条件を地域間で比較し、湿潤な気候条件下で地がきダケカンバ林の樹高成長が良いとしている。このように乾燥がカンバ類の成長を抑制する可能性は斜面スケールおよび北海道内スケールで示唆されており、本研究の結果もこれらの既往研究を支持するものであった。ただし、本研究では林分数の制限により地形は大まかに 2 区分 (斜面上部・斜面中下部) に分類されていた。地形の効果と適切な地形区分についてはより多くのデータにより検証する必要があると考えられる。

4.3 地がきがカンバ類の樹高成長を促進／抑制する可能性

梅木 (2003) は地がきダケカンバ林の成長が非地がきダケカンバ林より良いことを示したが、その理由については明示されなかった。地がきダケカンバ林の表層土壌理化学性を調査した本研究においても、地がきダケカンバ林の成長が卓越する理由については以下に述べる通り明らかにできなかった。本研究では地がきダケカンバ林の地位指数が表層土壌の C/N と連関していることが示唆された (Table 3)。地がきはササ根系を含む表層土壌を堆積有機物ごと除去する作業であり、多量の炭素を系外に持ち出すことで表層土壌の C/N は低下する可能性がある。地がきによる C/N の低減が窒素可給性の向上を通じて樹高成長の促進に寄与したという説明は一見合理的であり、地がき直後の数年は地がき地で無機態窒素量が増加したという既往の報告もある (Ozawa et al. 2001, 柴田ら 2007)。しかしながら、本研究の調査地では他の土壌理化学性 (TC, TN, BD) は地がき帯で増減するのに対し、C/N では地がき帯と残し帯の間に有意な差は認められなかった (Table 2)。これは、C/N における林分ごとのばらつきが非常に大きく (値域 12.1 - 19.3, Table 1)、地がきによる C/N への影響が検出できなかったためと考えられる。本研究の結果からは地がきが C/N 条件の改変を通じて成長促進に寄与したとは言えない。何らかの理由により林分間でもともと大きく異なっていた C/N 条件が更新カンバ類の成長に影響したと考えられるが、地がきカンバ林の成長が非地がきカンバ林より優れる理由の解明は今後の課題である。

一方で、地がきがダケカンバの樹高成長を抑制する証左も見出されなかった。カンバ類稚樹の窒素要求性

は非常に高く（佐藤 1960）、地がきによる表層土壌の排除が土壌化学性の損耗を通じてカンバ成長に影響することが懸念されていた（伊藤ら 2018b）。しかし、TN は地がきにより有意に低下していたにも関わらず（Table 2）、TN は地位指数の説明要因として選択されなかった（Table 3）。また、地がき面土壌の堅密度は更新稚樹の樹高成長と負の関係が認められ（Yoshida et al. 2005）、ウダイカンバの地位指数低下には土壌容積重の増加が影響することが示唆されている（塩崎・真田 1985）。土壌物理性の主要指標である BD は地がきによって増加することから（Table 2, 伊藤ら 2018a, 2018b）、地がきが樹高成長を抑制する可能性が導き出される。しかしながら、本研究では BD は地がきダケカンバ林の地位指数を説明する要因として選択されなかった（Table 3）。カンバ更新帯の平均 BD は $0.52 \pm 0.14 \text{ g cm}^{-3}$ で $0.32 - 0.82 \text{ g cm}^{-3}$ の範囲にあった（Table 1）。この値域内では土壌物理性が樹高成長を抑制する十分条件にはならない、すなわち地がき後の BD がカンバ更新可能な範囲（ $< 0.8 \text{ g cm}^{-3}$ ）であればその後のダケカンバの成長は抑制されないことを示唆している。この結果は地がき強度の指針を策定する上で重要な見解と考えられる。

5. おわりに

地がきは低コストで顕著な更新効果が見込める天然更新技術であり、広大な面積の北海道トドマツ人工林主伐後の造林選択肢として有望である。表土除去による地力減少が懸念されてきたが、 < 20 年生の地がきダケカンバ林の樹高成長を解析した先行研究（梅木 2003）と同様に、 $20 \sim 44$ 年生の地がきダケカンバ林の樹高成長は既報の地がきによらないダケカンバ林より良好であることが示された。本研究の結果は木材生産を目的とした地がきによるカンバ林造成林業の可能性を示唆するものである。一方で、今後地がき作業の拡大が見込まれるトドマツ人工林は、かつての主たる地がき作業地であったササ地よりも低標高に位置することが多く、そこではダケカンバ以外にもシラカンバ・ウダイカンバなど他のカンバ類の更新も期待される。ダケカンバで得られた地がき地の樹高成長に関する知見がシラカンバ・ウダイカンバにも適用できるかどうかは今後の課題である。

謝 辞

本研究は（国研）森林研究・整備機構森林総合研究所交付金プロジェクト（課題番号 201420）の研究成果である。本研究の遂行に当たり、北海道森林管理局各位に多大な協力を頂いた。また森林総合研究所の荒木誠博士に貴重な助言を頂いた。深く感謝申し上げる。

引用文献

- 青柳 正英（1983）道有林の「かき起こし」の実態. 北方林業, 35, 49-53.
- 秋津 裕志（2016）シラカンバによる内装材と家具の開発. 林産試だより, 2016 年 8 月号, 3-4.
- 秋津 裕志・青木 繁尚（2018）シラカンバ材の高度利用. 北方林業, 69, 20-23.
- Berg, B. and Ekbohm, G. (1983) Nitrogen immobilization in decomposing needle litter at variable carbon: nitrogen ratios. Ecology, 64, 63-67.
- 古田 直之（2018）道産カンバ類による単板および LVL の性能評価. 北方林業, 69, 16-19.
- 菱 拓雄・前田 由香・田代 直明（2010）九州大学北海道演習林の天然落葉広葉樹林およびカラマツ人工林における斜面方位に着目した土壌と大型土壌動物の特徴. 九州大学農学部演習林報告, 91, 1-6.
- 北海道火山灰命名委員会（1982）北海道の火山灰. 23pp., 北海道火山灰命名委員会, 札幌.
- 猪瀬 光雄・小木 和彦・佐野 真・眞邊 昭（1990）カンバ類 3 種の上層樹高の成長解析. 日本林学会北海道支部論文集, 38, 198-199.
- 石川 佳生（2018）シラカンバの高付加価値用途への利用可能性について. 北方林業, 69, 12-15.
- 伊藤 江利子・橋本 徹・相澤 州平（2018a）地がきカンバ更新地における表層土壌容積重の回復過程. 北方森林研究, 66, 97-100.
- 伊藤 江利子・橋本 徹・相澤 州平・石橋 聡（2018b）北海道における地がき更新補助作業と今後の課題. 森林立地, 60, 71-82.
- 伊藤 江利子・橋本 徹・相澤 州平・古家 直行・石橋 聡（2019）筋状地がき地におけるカンバ類の更新位置. 森林総合研究所研究報告, 18, 213-218.
- 粕谷 英一（2015）生態学における AIC の誤用：AIC は正しいモデルを選ぶためのものではないので正しいモデルを選ばない. 日本生態学会誌, 65, 179-185.
- 河田 弘・小島 俊郎（1979）生態学研究法講座 30 環境測定法 IV—森林土壌—〔新訂版〕. 共立出版株式会社, 190pp.
- 気象庁（2002）メッシュ気候値 2000. 財団法人気象業務支援センター.
- 沓名 重明・鈴木 道代・仁王 以智夫（1988）同一斜面に植栽されたスギ林の土壌型の相違による窒素の無機化と硝化活性. 日本林學會誌, 70, 127-130.
- 真下 育久（1969）林木の成長に関する環境因子の重要度：国有林の地位指数調査から. 森林立地, 11, 29-32.
- 三好 英勝（1996）道有林におけるかき起こし作業の成果. 北方林業, 48, 105-108.
- 大野 泰之（2011）落葉広葉樹林におけるウダイカンバ成木の衰退の要因解明に関する研究. 北海道林業試験場研究報告, 48, 1-46.

- 大野 泰之 (2018) シラカンバ人工林の生育実態—径級別の原木供給ポテンシャルの試算—. 北方林業, 69, 1-3.
- Ozawa, M., Shibata, H., Satoh, F. and Sasa, K. (2001) Effects of surface soil removal on dynamics of dissolved inorganic nitrogen in a snow-dominated forest. *The Scientific World Journal*, 1, 527-533.
- 鮫島 惇一郎 (1971) 北海道カンバ類の生長. 星 司朗・遠藤 嘉浩・鮫島 惇一郎・鮫島 和子・岩本 巳一郎・宮島 寛・三宅 基夫編 “造林樹種の特性 前編 カンバ類の経営・利用篇”. 北方林業叢書第 48 集, 社団法人北方林業会, 47-72.
- 佐藤 清左衛門 (1960) シラカバ稚苗の栄養試験. 日本森林学会誌, 42, 445-447.
- Schwarz, G. (1978) Estimating the dimension of a model. *Annals of Statistics*, 6, 461-464.
- 柴田 英昭・小澤 恵・佐藤 冬樹・笹 賀一郎 (2007) 森林施業に伴う地表処理が土壌窒素動態に及ぼす影響とそのメカニズム. 日本森林学会誌, 89, 314-320.
- 嶋瀬 拓也 (2014a) 北海道におけるカンバ類製材・合板適材の出現状況—国有林立木公売情報の分析結果から—. 北方森林研究, 62, 21-24.
- 嶋瀬 拓也 (2014b) 先駆樹種の活用による“身軽な”林業の実現に向けて—天然更新力を活かした省力化林業の可能性—. 山林, 1565, 27-35.
- 嶋瀬 拓也・天野 智将・佐々木 尚三・上村 巧 (2013) シラカンバ材の内装材利用に向けた課題と展望. 北方森林研究, 61, 29-30.
- 森林立地調査法編集委員会 (2010) 改訂版 森林立地調査法. 博友社, 284pp.
- 塩崎 正雄・真田 悦子 (1985) ウダイカンバの生長と土壌条件. 北方林業, 37, 261-264.
- 塩崎 正雄・真田 悦子 (1990) ウダイカンバの生長適地. 北方林業, 42, 124-128.
- Skovsgaard, J. P. and Vanclay, J. K. (2013) Forest site productivity: a review of spatial and temporal variability in natural site conditions. *Forestry*, 86, 305-315.
- 高橋 輝昌・生原 喜久雄・相場 芳憲 (1994) スギ・ヒノキ造林地での斜面位置別の表層土壌の窒素無機化量. 森林立地, 36, 15-21.
- 武田 博清 (1994) 森林生態系において植物—土壌系の相互作用が作り出す生物多様性. 日本生態学会誌, 44, 211-222.
- 滝川 貞夫 (1993) 北海道における掻起しによる更新地の現状. 北海道大学演習林試験年報, 11, 62-64.
- 寺澤 和彦・薄井 五郎 (1987) 北海道の 5～10 月における蒸発散能・降水量比の分布と季節変化. 北海道林業試験場報告, 25, 36-49.
- 梅木 清 (2003) 北海道における天然林再生の試み—かき起こし施業の成果と課題—. 日本森林学会誌, 85, 246-251.
- Yoshida, T., Iga, Y., Ozawa, M., Noguchi, M. and Shibata, H. (2005) Factors influencing early vegetation establishment following soil scarification in a mixed forest in northern Japan. *Canadian Journal of Forest Research*, 35, 175-188.

補足電子資料

以下はオンライン版のみの掲載となります。

<https://www.ffpri.affrc.go.jp/pubs/bulletin/452/index.html>

Table S1. 調査地諸元

Attributes of study plots.

Association of soil physicochemical properties following scarification with regenerated birch growth in Hokkaido, northern Japan.

Eriko ITO ^{1)*}, Toru HASHIMOTO ¹⁾, Shuhei AIZAWA ²⁾,
Naoyuki FURUYA ¹⁾ and Satoshi ISHIBASHI ¹⁾

Abstract

Soil scarification is a natural regeneration practice that has been developed as a low-cost birch reforestation technique on Hokkaido, the northernmost island of Japan. Scarification practices may play a significant role in the treatment of *Abies sachalinensis* plantation facing a final cutting period in Hokkaido. Scarification removes forest floor organic matter and surface soil, therefore it has been a concern that it will adversely affect the regenerated birch growth. To clarify the long-term effects of soil disturbance due to scarification on regenerated birch growth, we investigated the physicochemical properties of surface soils (depth: 0 – 5 cm) at 17 scarification-regenerated birch forests treated from the 1970s to the 1990s. Tree height growth of 20 – 44-year-old *Betula ermanii* were higher than in stands regenerated in other ways. In the strip-scarified stands examined in this study, some stands had regenerated along non-scarified lines. There was no significant difference in site index between stands regenerated along scarified lines and these along non-scarified lines. A generalized linear model indicated that site index in scarification-regenerated birch forests was larger in conditions with low CN ratios and lower slopes. Some soil physicochemical properties changed due to soil scarification, while CN ratios did not. The effect of the scarification for the regenerated birch growth was not clear whereas the soil physicochemical properties, except for CN ratios, were different. The results of this study show that soil disturbance due to scarification might not affect long-term birch tree growth in these stands.

Key words: soil scarification, site index, physicochemical soil properties, *Betula* sp., CN ratio

Received 30 October 2018, Accepted 17 June 2019

1) Hokkaido Research Center, Forestry and Forest Products Research Institute (FFPRI)

2) Department of Forest Soils, FFPRI

* Hokkaido Research Center, FFPRI, 7 Hitsujigaoka, Toyohira, Sapporo, Hokkaido, 062-8516 JAPAN; e-mail: iter@ffpri.affrc.go.jp