

論文 (Original article)

高知県のヒノキ人工林において間伐が葉量と幹現存量の生産速度に及ぼす影響

稲垣 善之^{1)*}、中西 麻美²⁾、深田 英久^{3),4)}、渡辺 直史³⁾

要旨

高知県の標高の異なる3地域のヒノキ林において、幹現存量間伐率の異なる調査区を合計10カ所設定し、間伐後10年間の葉量と幹現存量の生産速度を明らかにした。葉量はパイプモデルに基づく簡易手法で推定した。幹現存量間伐率が大きいほど林分葉量の増加率は大きい傾向を示し、林分葉量の増加率は低標高の林分で大きかった。対数変換した葉量と幹現存量生産速度について、地域ごとに異なる直線で回帰することができた。直線の傾きは高標高で1.066、低標高の2地域で0.638~0.661であった。これらの関係から幹現存量間伐率に対する葉生産効率(葉量あたりの幹現存量生産速度)の変化を予測した。葉生産効率は、低標高の林分では幹現存量間伐率が大きいほど増加するが、高標高の林分では増加しなかった。間伐による幹現存量生産速度の増加を葉量増加による効果と葉生産効率向上による効果に区分して評価した。葉量の効果はどちらの地域でも幹現存量間伐率が中程度で大きくなったが、葉生産効率の効果は低標高の幹現存量間伐率の大きい林分で大きかった。以上の結果より、葉生産効率は地域による間伐影響の違いを評価するうえで有効な指標であることが示された。

キーワード：葉生産効率、ヒノキ、葉量、幹現存量生産速度、間伐

1. はじめに

ヒノキは日本の代表的な造林樹種である。ヒノキ人工林における間伐は個体あたりの幹現存量の生産速度(SBP)を促進し、良好な形質の材を生産するために必要である(安藤 1982)。ヒノキやスギの人工林では間伐強度が大きいほど林分面積あたりのSBPは低下する(深田 2006, Seiwa et al. 2012, 細田ら 2012)。しかし、環境条件が異なる地域における間伐影響については情報が少なく、間伐後のSBPを規制するメカニズムは未解明である。

森林のSBPを評価する指標として葉生産効率(Foliage efficiency)がある。これは葉現存量または葉面積当たりのSBPを示し、林分の生理特性を評価する上で重要な指標である(Tadaki 1966, 佐藤 1973, Waring 1983)。葉生産効率は針葉樹で落葉樹広葉樹より小さい傾向や(Tadaki 1966, 佐藤 1973, Reich et al. 1995)、林齢の増加に伴って低下する傾向が報告され(四大学合同調査班 1966)、主要な森林における葉生産効率の変化が明らかになった。しかし、間伐が葉生産効率に及ぼす影響についての研究は少ない(Brix 1983, Binkley and Reid 1984, Mitchell et al. 1996, Gspaltl et al. 2013)。その理由の一つとして、常緑樹においては葉量の推定が困難であることがあげられる。一般的に葉量は、伐倒した個体から得られたアロメトリー

式を用いて推定されるが、間伐によるアロメトリー式の変化を伐倒調査で明らかにすることは労力的に困難である。また、成長錘を用いて辺材の面積を測定し、葉面積を推定する方法(Binkley and Reid 1984)があるが、この手法も労力を要する。これらの状況から、環境条件の異なる林分における間伐後の葉生産効率については情報が少ない。ヒノキについては間伐後の葉量の変化についてはいくつかの報告があるものの(宮本ら 2009, Han et al. 2014, 稲垣ら 2018)、葉生産効率に関する情報はほとんどない。

林分葉量を推定する際の困難性は、近年提案された簡易葉量推定手法で低減された(稲垣ら 2015, Inagaki et al. 2020)。この手法は生枝下高における幹の断面積(生枝下幹面積)と葉量に比例関係が認められるという樹形のパイプモデル理論に基づくものである(Shinozaki et al. 1964a, 1964b)。生枝下幹面積と葉量の比例関係は、スギ(四大学合同調査班 1966, Inagaki et al. 2020)やヒノキ(Hagihara et al. 1993, Ogawa et al. 2010, 稲垣ら 2015, Sumida et al. 2018)で成り立つ。また、生枝下幹面積は、樹高、枝下高、胸高直径から推定できるため(Sumida et al. 2009)、簡易な計測で林分葉量を推定することが可能である(稲垣ら 2015, Inagaki et al. 2020)。この簡易手法を用いて多様な環境条件に分布するヒノキ林について適用することで、間伐が

原稿受付：令和2年10月12日 原稿受理：令和3年3月1日

1) 森林総合研究所 四国支所

2) 京都大学フィールド科学教育研究センター

3) 高知県立森林技術センター

4) 高知県中山間振興・交通部

* 森林総合研究所 四国支所 〒780-8077 高知県高知市朝倉西町 2-915

葉生産効率に及ぼす影響を明らかにすることが可能になる。

本研究では、高知県の標高の異なる地域において間伐試験を実施し、間伐後の10年間の葉量とSBPの関係から、間伐に対する葉の生産効率の変化を明らかにした。また、間伐後のSBPの増加について、葉量の増加による効果と葉生産効率の向上による効果に区分してそれぞれの寄与を評価した。これらの結果より標高の異なるヒノキ林において間伐が葉生産効率に及ぼす影響を明らかにすることを目的とする。

2. 方法

1) 調査地

高知県の四万十川流域に位置する津野町の3つの地域(天狗、旧宮、太夫畑)のヒノキ林を対象とした。試験地の概要をTable 1.に示す。天狗(33°28′N、133°00′E)、旧宮(33°26′N、133°10′E)、太夫畑(33°23′N、133°1′E)はそれぞれ標高1150~1280 m、710 m、500~550 mに位置する。国土数値情報の1kmメッシュから求めた年平均気温(MAT)は天狗、旧宮、太夫畑でそれぞれ9.1~9.9℃、12.4℃、13.3~13.6℃であった。年降水量(MAP)は3地点

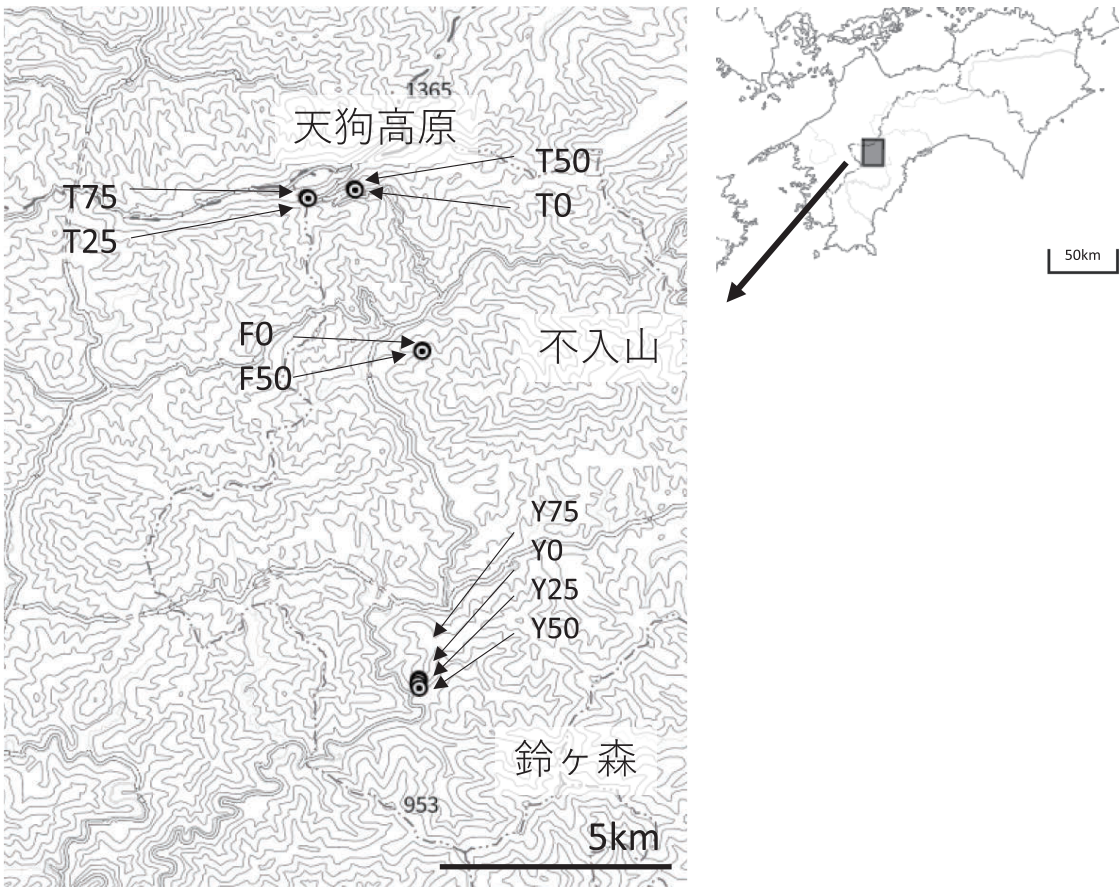


Fig. 1. 調査地の位置
Location of the study sites

Table 1. 調査地域の概要
Summary of study areas

場所 Area	標高 Altitude (m)	年平均気温 MAT (℃)	年降水量 MAP (mm)	方位 Slope direction	傾斜 Inclination (°)	土壌母材 Parent material	土壌型 Soil type
天狗 Tengu (T)	1150-1280	9.1-9.9	3140	SE-SW	30	火山灰	Bl _D
旧宮 Furumiya (F)	710	12.4	3270	NW	30	堆積岩	B _D
太夫畑 Tayubata (Y)	500-550	13.3-13.6	3190	SW	36-40	堆積岩	B _D

で3100 mm 以上であった。調査地の傾斜は30°～40°であった。土壌は、天狗は火山灰を母材とする黒色土 (B_{1p})、旧宮は秩父帯の堆積岩を母材とする適潤性褐色森林土 (B_p)、太夫畑では四万十帯の砂岩泥岩を母材とする適潤性褐色森林土 (B_p) であった (土じょう部 1976)。表層土壌のpHは、天狗、旧宮、太夫畑で、それぞれ4.5、4.7、5.1であり、ヒノキ生葉の窒素濃度は、それぞれ10.0 mg g⁻¹、8.5 mg g⁻¹、9.4 mg g⁻¹であった (Inagaki et al. 2011b)。天狗では土壌の有機物蓄積量が多く窒素が豊富であり、旧宮では土壌の窒素が少なかった (Inagaki et al. 2008)。太夫畑では土壌母材の違いを反映して旧宮よりもpHが高く窒素が多かった。

天狗、旧宮、太夫畑のヒノキ林を対象として合計10カ所の調査区 (20 m × 20 m) を設定した (Table 2、深田ら 2009)。間伐前 (天狗、旧宮では2002年、太夫畑では2005年) における林齢は天狗、旧宮、太夫畑でそれぞれ42年生、23年生、35年生であった。天狗では無間伐区および25%、50%、75%の間伐区 (T0、T25、T50、T75)、旧宮では無間伐区および50%間伐区 (F0、F50)、太夫畑では2005年に無間伐区および25%、50%、75%の間伐区 (Y0、Y25、Y50、Y75) を設置した。間伐率は本数間伐率を示す。すべてのサイズからまんべんなく伐採木を選んだ。天狗と旧宮では2002年、太夫畑では2005年の成長期前に間伐を実施した。収量比数は、最多密度 (ある樹高での上限の本数密度) を1としたときの相対的な混み具合を示す指標である (安藤 1982)。間伐前の収量比数は太夫畑で他の2地域よりも大きく、太夫畑では温暖な気象と好適な土

壌条件を反映してヒノキの生育が良好であり、より混み入った状態であった。

2) SBPと葉量の推定

各調査区において、間伐前と間伐10年後にヒノキの胸高直径、樹高、生枝下高を測定した。樹高と生枝下高については、超音波樹高測定器 (バーテックスIII、およびIV、ハグロフ社) を用いて測定した。樹冠長は、樹高から生枝下高を差し引いて算出した。立木幹材積表 (林野庁計画課 1970) を用いて幹の材積を算出した。幹材積に高知県のヒノキ林で推定された容積重 (0.45 g cm⁻³) (稲垣ら 2009) をかけて幹現存量を計算した。本研究では、間伐率を幹現存量間伐率として示す。この間伐率は材積間伐率と等しい。また、測定期間中の生残個体について、期間前後の幹現存量の差を測定年数で割って、幹現存量生産速度 (SBP) (Mg ha⁻¹ yr⁻¹) を算出した。

生枝下幹面積 (AB) (m²)、葉量 (LB) (kg) については、以下の式で算出した (稲垣ら 2015, Inagaki et al. 2020)。

$$AB = A_{1.3} \times (H - HB) / (H - 1.3) \quad \text{式 (1)}$$

$$LB = WL_F \times AB \quad \text{式 (2)}$$

A_{1.3}; 胸高幹面積 (m²)、H; 樹高 (m)、HB; 生枝下高 (m)、WL_F; 比例定数 (kg m⁻²)

WL_Fは、生枝下幹面積あたりの葉量を示す定数であ

Table 2. ヒノキ間伐試験地における立木密度と収量比数
Stand density and relative yield index in the study plots.

調査区 Plot	間伐時林齢 Forest age at thinning (yr)	立木密度 (n/ha)			収量比数 RY index		
		間伐前 Before thinning ρ_{ini}	間伐後 After thinning ρ_0	10 年後 After 10 years ρ_{10}	間伐前 Before thinning Ry_{ini}	間伐後 After thinning Ry_0	10 年後 After 10 years Ry_{10}
T0	42	1025	1025	1025	0.71	0.71	0.80
T25	42	1800	1350	1275	0.79	0.73	0.81
T50	42	875	425	425	0.70	0.50	0.58
T75	42	1475	350	350	0.69	0.31	0.39
F0	23	1850	1850	1700	0.69	0.69	0.82
F50	23	1925	850	850	0.68	0.49	0.64
Y0	35	1450	1450	1425	0.83	0.83	0.88
Y25	35	1700	1275	1275	0.83	0.76	0.81
Y50	35	1525	750	750	0.81	0.64	0.70
Y75	35	1500	375	375	0.88	0.54	0.57

T, F, Y はそれぞれ天狗 (Tengu), 旧宮 (Furumiya), 太夫畑 (Tayubata)、数字は間伐率を示す。

り、地域によって異なる値を示す(稲垣ら 2015, Inagaki et al. 2020)。稲垣ら(2018)は、四国から関東のヒノキ林7地点において、MAT (°C) とWL_Fに正の直線関係が認められること示した。

$$WL_F = 62.23 \times MAT - 107.54 \quad \text{式(3)}$$

この回帰直線とMAT (Table 1) から、天狗、旧宮、太夫畑におけるWL_Fを求めるとそれぞれ、490 kg m⁻²、664 kg m⁻²、733 kg m⁻²であった。調査区内のすべての個体について葉量を推定し、これらを合計して林分葉量を推定した。天狗、旧宮の葉量については、すでに報告したが(稲垣ら 2018)、T25の値は調査データに基づいて再計算した結果を報告する。調査期間の林分あたりの平均葉量(Mg ha⁻¹)は、間伐直後の葉量と間伐10年後の葉量の平均値とした。SBPは、間伐後10年間についての測定であるためこの期間に対応する葉量としては平均葉量を用いることが適切であると考えた。葉生産効率はSBP (Mg ha⁻¹ yr⁻¹)を平均葉量で割って算出した。

3) 幹現存量間伐率に対する葉量とSBPの試算

本研究では、調査地点数が少ないが、地域ごとにいくつかの性質について得られた関係式を用いて、葉生産効率についての試算を行った。幹現存量間伐率に対する葉量増加率(平均葉量/初期葉量)の関係について直線回帰で解析した。共分散分析を実施し、地域と間伐率の交互作用と、地域の影響を解析し、回帰直線の傾きと切片が地域によって異なるかどうかを判断した。地域の影響が有意である場合には地域ごとに回帰式を作成し間伐後の平均葉量を推定した。

対数変換した平均葉量とSBPについて直線回帰で解析

した。共分散分析を実施し回帰直線の傾きと切片が地域によって異なるかどうかを解析した。地域の影響が有意である場合には地域ごとに回帰式を作成しSBPを推定した。統計解析はJMPソフトウェア(ver. 11. 0. 0. SAS Institute)を利用した。

無間伐区の葉量、幹現存量間伐率と葉量増加率の関係および平均葉量とSBPの関係を用いて、地域ごとに幹現存量間伐率に対する平均葉量、SBP、葉生産効率の変化を予測した。間伐後の幹現存量生産速度は(SBP_{thin})、基礎生産速度(SBP_{base})、残存木の葉量増加による生産速度(SBP_{lb})と葉生産効率の向上による生産速度(SBP_{effic})の3つに区分することができる(Brix 1983)。

$$SBP_{thin} = SBP_{base} + SBP_{lb} + SBP_{effic} \text{ (Mg ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}) \quad \text{式(4)}$$

SBP_{base}は個体あたりの葉量と葉生産効率が対照区と等しい場合のSBPを示す。SBP_{lb}は残存個体の葉量増加に由来するSBP(葉生産効率は対照区と等しいと仮定する)、SBP_{effic}は葉生産効率の増加に由来するSBPを示す。3つの要素についてはそれぞれ以下の式で算出した。

$$SBP_{base} = SBP_{cont} \times (1 - PT/100) \quad \text{式(5)}$$

$$SBP_{lb} = SBP_{cont} \times (LB_{thin}/LB_{cont}) - SBP_{base} \quad \text{式(6)}$$

$$SBP_{effic} = SBP_{thin} - SBP_{lb} - SBP_{base} \quad \text{式(7)}$$

SBP_{cont}: 対照区の幹生産速度 (Mg ha⁻¹ yr⁻¹)、PT: 幹現存量間伐率(%), LB_{thin}: 間伐区の葉量 (Mg ha⁻¹)、LB_{cont}: 対照区の葉量 (Mg ha⁻¹)を示す。

Table 3. ヒノキ間伐試験地における樹高(H)、生枝下高(HB)、樹冠長(CL)
Mean height, height at crown base and crown length of hinoki cypress in the study plots

調査区	樹高 Mean height (m)				生枝下高 Height at crown base (m)				樹冠長 Crown length (m)				Δ CL/ Δ H
Plots	間伐前	間伐後	10 年後	増加量	間伐前	間伐後	10 年後	増加量	間伐前	間伐後	10 年後	増加量	
	Before thinning	After thinning	After 10 yrs	Increment	Before thinning	After thinning	After 10 yrs	Increment	Before thinning	After thinning	After 10 yrs	Increment	
	H _{ini}	H ₀	H ₁₀	Δ H	HB _{ini}	HB ₀	HB ₁₀	Δ HB	CL _{ini}	CL ₀	CL ₁₀	Δ CL	
T0	14.70	14.70	17.53	2.83	5.99	5.99	8.49	2.50	8.67	8.67	9.04	0.37	0.13
T25	13.10	13.20	16.01	2.81	5.69	5.73	7.58	1.84	7.42	7.54	8.44	0.90	0.32
T50	15.50	15.80	17.92	2.12	6.04	6.06	6.16	0.10	9.50	9.74	11.75	2.02	0.95
T75	11.80	12.10	14.13	2.03	4.22	4.48	5.24	0.76	7.50	7.66	8.89	1.23	0.61
F0	11.00	11.00	14.23	3.23	3.30	3.30	6.60	3.30	7.71	7.71	7.71	0.00	0.00
F50	11.00	10.90	14.21	3.31	3.52	3.20	5.50	2.30	7.51	7.70	8.80	1.11	0.33
Y0	15.89	15.89	17.89	2.00	8.67	8.67	10.38	1.70	7.21	7.21	7.52	0.30	0.15
Y25	14.40	14.37	16.20	1.83	7.45	7.30	8.31	1.01	6.95	7.07	7.89	0.82	0.45
Y50	14.64	15.07	16.90	1.83	6.28	6.42	7.22	0.80	8.36	8.65	9.68	1.03	0.56
Y75	17.35	17.75	18.89	1.13	9.13	9.41	9.57	0.16	8.21	8.34	9.31	0.97	0.86

調査区の略号の説明は Table 2. に示す。

Table 4. ヒノキ間伐試験地における葉量 (LB), 幹現存量 (SB) および幹生産速度 (SBP)
Leaf biomass (LB), stem biomass (SB) and stem production rate (SBP) in the study plots

調査区	葉量 Leaf biomass						幹現存量 Stem biomass						葉生産 効率
	間伐前 Before thinning LB _{ini} (Mg ha ⁻¹)	間伐後 After thinning LB ₀ (Mg ha ⁻¹)	間伐率 Percent removal (%)	10 年後 After 10 yrs LB ₁₀ (Mg ha ⁻¹)	平均 Mean LB _{av} (Mg ha ⁻¹)	増加率 Increase ratio LB _{av} /LB ₀	間伐前 Before thinning SB _{ini} (Mg ha ⁻¹)	間伐後 After thinning SB ₀ (Mg ha ⁻¹)	間伐 率 Percent removal (%)	10 年後 After 10 yrs SB ₁₀ (Mg ha ⁻¹)	SBP (Mg ⁻¹ yr ⁻¹)	SBP / LB _{av} (Mg Mg ⁻¹ yr ⁻¹)	
T0	16.0	16.0	0.0	16.9	16.4	1.03	159.0	159.0	0.0	224.0	6.50	0.396	
T25	19.7	15.8	19.8	18.3	17.1	1.08	190.2	151.9	20.2	224.0	7.21	0.422	
T50	14.9	7.8	47.7	11.3	9.5	1.22	153.6	80.3	47.7	120.9	4.06	0.426	
T75	15.0	4.7	68.8	6.8	5.7	1.23	129.7	39.6	69.5	61.1	2.15	0.375	
F0	16.2	16.2	0.0	18.2	17.2	1.06	85.5	85.5	0.0	156.2	7.07	0.411	
F50	16.9	7.2	57.6	11.2	9.2	1.28	99.6	37.5	62.3	84.8	4.73	0.516	
Y0	19.5	19.5	0.0	21.8	20.6	1.06	188.3	188.3	0.0	253.7	6.54	0.317	
Y25	19.3	14.8	23.0	19.8	17.3	1.17	155.9	121.5	22.1	182.6	6.11	0.353	
Y50	21.9	13.3	39.4	19.7	16.5	1.24	178.9	96.1	46.3	154.2	5.80	0.352	
Y75	22.1	6.2	71.9	10.0	8.1	1.30	218.9	64.8	70.4	100.6	3.58	0.443	

調査区の略号の説明は Table 2. に示す。

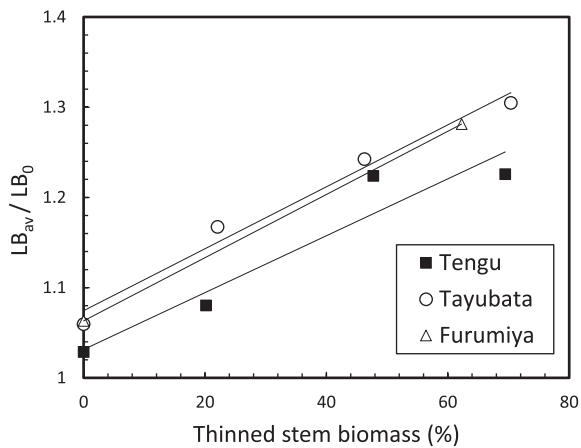


Fig. 2. 幹現存量間伐率に対する葉量増加率 (LB_{av}/LB₀) の関係
Relationship between percentage of stem removal and the ratio of leaf biomass to the initial leaf biomass (LB_{av}/LB₀).

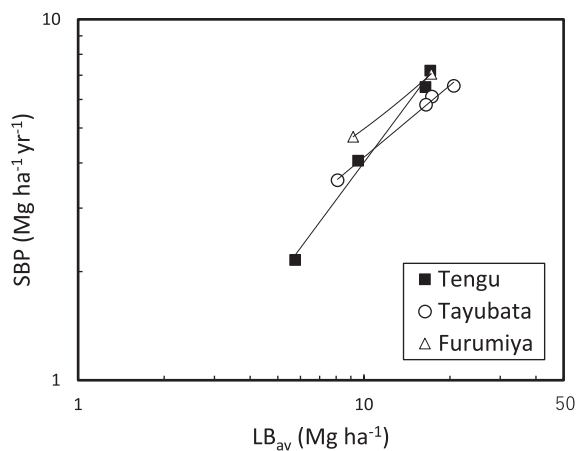


Fig. 3. 平均葉量と SBP の関係
Relationship between mean leaf biomass and SBP

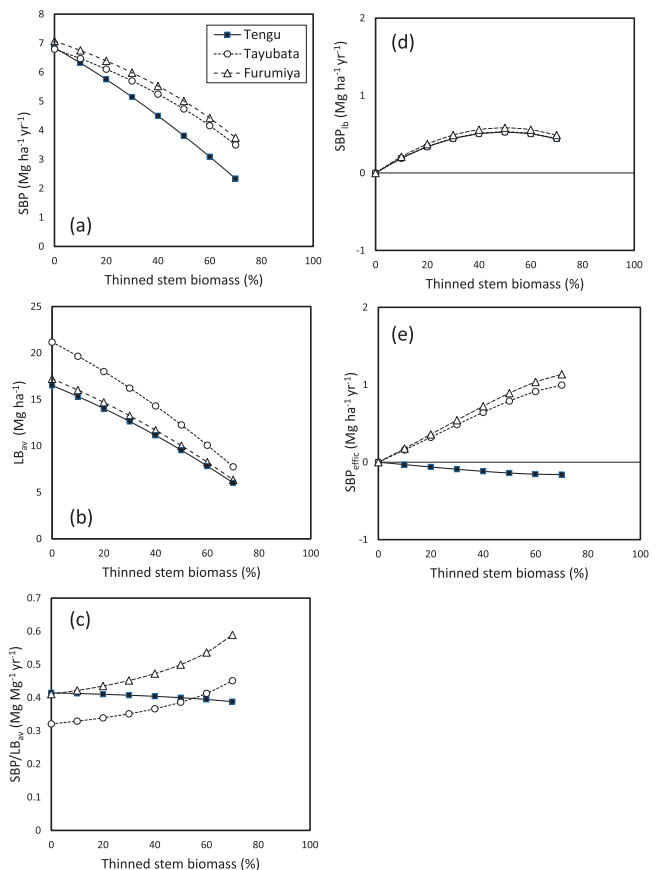


Fig. 4. 幹現存量間伐率に対する葉と幹現存量生産の諸特性
Properties of leaf and stem production in relation to the percentage of stem removal
(a) SBP, (b) 葉量 (LB_{av}), (c) 葉生産効率 (SBP/LB_{av}), (d) 幹生産増加に対する葉量効果 (SBP_{ib}), (e) 生産効率効果 (SBP_{effic})

3. 結果と考察

1) 樹冠長

樹高成長は旧宮>天狗>太夫畑の順であった (Table 3)。旧宮では林齢が若いために樹高成長が大きいと考えられた。天狗は標高が高く厳しい生育環境であるが、樹高成長は小さくなかった。天狗における土壌は火山灰を母材とする黒色土である。ここでは有機物含有量が大きく窒素無機化速度が大きい (Inagaki et al. 2008, 2011b)。ヒノキの樹高成長は葉の窒素濃度が高いほど大きい傾向が認められており (Inagaki et al. 2011a)、天狗における良好な樹高成長は窒素資源が十分であるためと考えられた。

樹高成長は強度な間伐をした調査区で小さかった。同様の傾向は本調査地を含めた数地点のヒノキ林で報告されている (深田ら 2009)。また、スギの高齢林においても間伐林分で樹高成長が抑制された (正木ら 2013)。これまでは、樹高成長は間伐の影響を受けないと考えられてきたが (安藤 1982)、強度な間伐をした場合には、樹高成長が抑制される可能性がある。樹冠長の増加については、地域における明瞭な差は認められなかったが、間伐率が50%の調査区で大きかった。間伐率が小さい林分では、枯上がりによって生枝下高が増加することによって、間伐率が大きい林分では樹高成長の抑制によって樹冠長の増加が小さくなるため、中程度の間伐で樹冠長が大きくなると考えられた。千葉 (2009) は、間伐後再び林冠が閉鎖するまでは、生枝下高の増加は小さいことを指摘した。しかし、本研究の結果より、樹冠の閉鎖前でも生枝下高はある程度増加した。間伐後においても生枝下高が変化する可能性があることから、生枝下高を考慮して葉量を推定することが重要である。今後、本研究で用いた簡易葉量推定手法 (式 (1)、(2)、稲垣ら 2015, Inagaki et al. 2020) を多くの林分で活用することが望まれる。

2) 葉量とSBP

間伐前の葉量は14.9~22.1 Mg ha⁻¹であり、太夫畑他の地域よりも大きかった (Table 4)。これまでに報告されているヒノキ林の葉量の平均値は14.0 Mg ha⁻¹であり (只木 1976)、本研究の値はこれまでの平均よりも大きい値を示した。

間伐によって本数間伐率と同程度の幹現存量と葉量が減少した (Table 4)。間伐後の10年間の平均葉量は間伐直後の初期葉量の1.03~1.30倍に増加した (Fig. 2)。幹現存量間伐率と葉量増加率には正の直線関係が認められた。また、回帰直線の傾きに有意な差は認められないが (交互作用 $P > 0.05$)、地域によって直線の切片に差が認められ (共分散分析 地域の影響 $P < 0.05$)、高標高の天狗で葉量の増加率が小さかった。

間伐前の幹現存量は、太夫畑>天狗>旧宮の順であった (Table 4)。旧宮は林齢が小さいため幹現存量が小さかった。天狗は、太夫畑よりも林齢が大きい幹現存量はやや小さいため、間伐前のSBPは低いと考えられた。対

数変換した平均葉量とSBPの関係をFig. 3に示す。共分散分析の結果、地域によって直線の傾きが異なった (共分散分析、交互作用、 $P < 0.05$)。回帰直線の傾きは天狗で1.066、太夫畑で0.661、旧宮で0.638であった。直線の傾きが1の時は、平均葉量と幹生産速度が比例関係であることを示し、葉生産効率 (SBP/葉量) が一定の値になる。傾きが1よりも小さい場合には、葉量の低下に伴うSBPの減少が抑制されるため、葉量が少ない林分で葉生産効率が増加する。したがって、天狗では、幹現存量間伐率に対して葉生産効率がほぼ一定であるが、太夫畑と旧宮では、幹現存量間伐率が大きい林分ほど葉生産効率が大きかった。北米のダグラスモミ林分では間伐によって葉生産効率が増加する傾向が報告された (Brix 1983, Binkley and Reid 1984, Mitchell et al. 1996)。樹種間で比較した場合には、葉量が少ないほど葉生産効率や葉量当たりの一次生産は増加する (佐藤 1973, Reich et al. 1995)。これらの結果より、葉量が少ない林分では被陰が少なくなり、葉生産効率が増加することが一般的な傾向であることが示唆される。本研究でも太夫畑、旧宮では間伐区で葉生産効率が増加し、これまでの報告と同様の傾向を示した。一方、天狗では葉生産効率は間伐によって変化しなかった。天狗は高標高に位置しており、台風による落葉が多く (Inagaki et al. 2010)、気象条件が厳しいと考えられる。また、葉生産効率は、施肥によって向上することが示されている (Binkley and Reid 1984)。間伐後には、樹木が利用することのできる窒素資源が増加するが (Inagaki et al. 2008)、天狗では間伐前から窒素資源が豊富な条件であったために (Inagaki et al. 2008, 2011b)、葉生産効率が増加しなかった可能性がある。このように土壌条件が好適であって気象条件が厳しい場合には、間伐による葉生産効率の向上が限定的であることが示唆された。

3) 幹現存量間伐率に対する葉量とSBPの試算

間伐率に対する葉量増加率 (Fig. 2) と葉量とSBPの関係 (Fig. 3) から、地域ごとに幹現存量間伐率に対する葉量、SBP、葉生産効率についての試算を行った。幹現存量間伐率に対するSBPは、幹現存量間伐率が大きいほど低下し、伐採率の大きい林分で天狗と他の2地域の差が拡大した (Fig. 4a)。幹現存量間伐率に対する葉量はどの地域でも同様のパターンで減少した (Fig. 4b)、幹現存量間伐率に対する葉生産効率は、太夫畑と旧宮で増加するのに対して、天狗ではほぼ一定であった (Fig. 4c)。また、葉生産効率の増加は幹現存量間伐率が小さいときには緩やかであるが、幹現存量間伐率の増大とともに急激に増加した。立木密度の異なるダグラスモミ林でも同様の傾向が報告された (Binkley and Reid 1984)。幹生産速度の増加を葉量の効果 (SBP_{le}) と葉生産効率の効果 (SBP_{eff}) に区分すると (Fig. 4d, 4e)、葉量の効果は幹現存量間伐率が中程度で大きくなり、強度な間伐では低下した。一方で、葉生産効率の効果は天狗では常に負の値を示したのに対

し、旧宮、太夫畑では、幹現存量間伐率が大きいほど増大した。以上の結果を総合すると、低標高では、中程度の間伐では葉量の増加の寄与が大きく、強度の間伐では葉生産効率の増加の寄与が大きかった。一方、高標高では強度の間伐で葉生産効率の寄与が小さかった。葉生産効率の寄与は地域による差が大きかった。この結果は、強度な間伐をするほど、気象条件を反映して幹生産速度に差が生じ、地域差が拡大することを示唆する。

高標高では葉生産効率の寄与は負の値を示した。この結果は、Fig. 3において、回帰直線の傾きが1よりもわずかに大きいことを反映した結果である。負の値を示すことの重要性を判断するためには、Fig. 3の回帰直線の傾きについて統計的な解析が必要であるが、本研究においては調査林分数が少ないために、十分な検討はできない。今後多くの調査林分に調査を実施することが必要である。

以上の知見より、地域ごとに葉量と幹生産速度について対数変換後の直線関係で示すことができた。この直線の傾きは地域によって異なっており、地域の気象条件と間伐影響の関係を明らかにするうえで重要な指標となることが示唆された。今回提示した指標は、現地における胸高直径、樹高、生枝下高を定期的に測定することで得ることができる。また、それぞれの地域において、葉量の多い林分と少ない林分を対象とした調査より、地域ごとに葉量—幹生産量の関係を明らかにすることができる。今後の研究では、本研究の手法を多様な環境条件のヒノキ林において適用することで、間伐影響の地域特性を明らかにすることが期待される。

謝辞

本研究における試験地の設定および間伐は、高知県が実施した「四万十の森づくり推進事業」および林野庁委託「森林生態系を重視した公共事業の導入手法調査」により行なわれた。津野町には、町有林に天狗試験地、太夫畑試験地を設置し、調査研究を行なうことを許可していただいた。また本研究の一部は、科学研究費補助金25450224、26450193、17K07840の補助を受けて行われた。ここに記して謝意を表す。

引用文献

- 安藤 貴 (1982) 林分の密度管理. 農林出版, 東京
- Binkley, D. and Reid, P. (1984) Long-term responses of stem growth and leaf-area to thinning and fertilization in a Douglas-fir plantation. *Can. J. For. Res.* 14, 656-660.
- Brix, H. (1983) Effects of thinning and nitrogen-fertilization on growth of Douglas-fir - relative contribution of foliage quantity and efficiency. *Can. J. For. Res.* 13, 167-175.
- 千葉 幸弘 (2009) 間伐に伴う林冠再開鎖までの所要年数. 関東森林研究, 60, 149-150.

- 土じょう部 (1976) 林野土壌部の分類 (1975). 林試研報, 280, 1-28.
- 深田 英久・渡辺 直史・宮田 弘明・山崎 敏彦 (2009) 強度間伐が残存木の成長および材質等に与える影響. 高知森林技術センター研報, 34, 56-83.
- Gspaltl, M., Bauerle, W., Binkley, D. and Sterba, H. (2013) Leaf area and light use efficiency patterns of Norway spruce under different thinning regimes and age classes. *For. Ecol. Manage.* 288, 49-59.
- Hagihara, A., Yokota, T. and Ogawa, K. (1993) Allometric relationships in hinoki (*Chamaecyparis obtusa* (Sieb. et Zucc.) Endl.) trees. *Bull. Nagoya Univ. Forests* 12, 12-29.
- Han, Q.M., Kabeya, D., Saito, S., Araki, M.G., Kawasaki, T., Migita, C. and Chiba, Y. (2014) Thinning alters crown dynamics and biomass increment within aboveground tissues in young stands of *Chamaecyparis obtusa*. *J. For. Res.* 19, 184-193.
- 細田 和男・西園 朋広・佐野 真琴・高橋 興明・光田 靖・家原 敏郎 (2012) 間伐強度の異なるヒノキ人工林における35年間の炭素固定量の比較. 森林計画誌, 46, 1-14.
- 稲垣 善之・深田 英久・野口 享太郎・倉本 恵生・中西 麻美 (2018) 高知県のヒノキ人工林における間伐後の樹冠葉量の変化. 森林応用研究, 27, 1-9.
- Inagaki, Y., Kuramoto, S., Torii, A., Shinomiya, Y. and Fukata, H. (2008) Effects of thinning on leaf-fall and leaf-litter nitrogen concentration in hinoki cypress (*Chamaecyparis obtusa* Endlicher) plantation stands in Japan. *For. Ecol. Manage.*, 255, 1859-1867.
- Inagaki, Y., Miyamoto, K., Okuda, S., Noguchi, M., Itou, T. and Noguchi, K. (2011a) Stem productivity in relation to nitrogen concentration and carbon isotopic composition ($\delta^{13}\text{C}$) in leaves of hinoki cypress (*Chamaecyparis obtusa* Endlicher) plantations in Shikoku district, Japan. *Soil Sci. Plant Nutr.* 57, 710-718.
- 稲垣 善之・宮本 和樹・伊藤 武治・北原 文章・酒井 寿夫・奥田 史郎・野口 麻穂子・光田 靖 (2015) 高知県のヒノキ人工林における樹冠葉量の推定. 森林応用研究, 24, 11-18.
- Inagaki, Y., Nakanishi, A. and Fukata, H. (2011b) Soil properties and nitrogen utilization of hinoki cypress as affected by strong thinning under different climatic conditions in the Shikoku and Kinki districts in Japan. *J. For. Res.*, 16, 405-413.
- Inagaki, Y., Nakanishi, A. and Tange, T. (2020) A simple method for leaf and branch biomass estimation in Japanese cedar plantations. *Trees*, 34, 349 - 356.

- 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.
- 正木 隆・櫃間 岳・八木橋 勉・野口 麻穂子・柴田 銃江・高田 克彦 (2013) スギ林における壮齢時の間伐は樹高の長期的な成長にどのように影響するか?. 日林誌, 95, 227-233.
- Mitchell, A.K., Barclay, H.J., Brix, H., Pollard, D.F.W., Benton, R. and deJong, R. (1996) Biomass and nutrient element dynamics in Douglas-fir: Effects of thinning and nitrogen fertilization over 18 years. Can. J. For. Res., 26, 376-388.
- 宮本 和樹・奥田 史郎・稲垣 善之・小谷 英司・野口 麻穂子・伊藤 武治 (2009) 間伐から5年が経過したヒノキ人工林の成長と葉面積指数の比較. 森林立地, 51, 21-26.
- Ogawa, K., Adu-Bredu, S., Yokota, T. and Hagihara, A. (2010) Leaf biomass changes with stand development in hinoki cypress (*Chamaecyparis obtusa* [Sieb. et Zucc.] Endl.). Plant Ecol., 211, 79-88.
- Reich, P., Koike, T., Gower, A. and Schoettle, A. (1995) Causes and Consequences of Variation in Conifer Leaf Life-Span. In: Smith W, TM H (eds) Ecophysiology of Coniferous Forests. Academic Press, 225-254.
- 林野庁計画課 (1970) 立木幹材積表 西日本編. 日本林業調査会, 東京
- 佐藤 大七郎 (1973) 陸上植物群落の物質生産 Ia 森林. 共立出版, 東京
- Seiwa, K., Eto, Y., Hishita, M. and Masaka, K. (2012) Effects of thinning intensity on species diversity and timber production in a conifer (*Cryptomeria japonica*) plantation in Japan. J. For. Res., 17, 468-478.
- Shinozaki, K., Yoda, K., Hozumi, K. and Kira, T. (1964a) A quantitative analysis of plant form- the pipe model theory. I. Basic analysis. Jpn. J. Ecol., 14, 97-105.
- Shinozaki, K., Yoda, K., Hozumi, K. and Kira, T. (1964b) A quantitative analysis of plant form-the pipe model theory. II. Further evidence of the theory and its application in forest ecology. Jpn. J. Ecol., 14, 133-139.
- Sumida, A., Nakai, T., Yamada, M., Ono, K., Uemura, S. and Hara, T. (2009) Ground-based estimation of leaf area index and vertical distribution of leaf area density in a *Betula ermanii* forest. Silva Fenn., 43, 799-816.
- Sumida, A., Watanabe, T. and Miyaoura, T. (2018) Interannual variability of leaf area index of an evergreen conifer stand was affected by carry-over effects from recent climate conditions. Sci. Rep., 8.
- 只木 良也 (1976) 森林の現存量—とくにわが国の森林の葉量について—. 日林誌, 58, 416-423.
- Tadaki, Y. (1966) Some discussions on the leaf biomass of forest stands and trees. Bull. Gov. For. Exp. Sta., 184, 135-161.
- Waring, R.H. (1983) Estimating forest growth and efficiency in relation to canopy leaf-area. Adv. Ecol. Res., 13, 327-354.
- 四大学 (北大, 東大, 京大, 大阪市大) および信大 (特別参加) 合同調査班 (1966) 森林の生産力に関する研究 第III報 スギ人工林の物質生産について. 日本林業技術協会育林技術研究会, 63pp.

Effects of thinning on leaf biomass and stem biomass production in hinoki cypress plantations in Kochi prefecture

Yoshiyuki INAGAKI^{1)*}, Asami NAKANISHI²⁾, Hidehisa FUKATA^{3), 4)} and Naoshi WATANABE³⁾

Abstract

Leaf biomass and stem biomass production were measured for 10 years in hinoki cypress plantations that were exposed to different thinning intensities in three areas at different altitudes in Kochi Prefecture. Leaf biomass was estimated using a simple method based on the pipe model theory. The increase rate of leaf biomass and percentage of stem removal were positively, linearly related and the increase rate was lower in the higher altitude area. There was a linear log/log relationship between leaf biomass and stem biomass production, the regression lines for which had slopes of 1.066 in the high-altitude area and 0.638–0.661 in the two lower altitude areas. The foliage efficiency, i.e., stem biomass production per unit of leaf biomass, was predicted from these relationships. Foliage efficiency increased with an increasing percentage of stem biomass removal in the lower altitude areas but not in the high-altitude area. The increase in stem biomass production in thinned plots could be divided into the effects of changes in leaf biomass and foliage efficiency. Leaf biomass had a larger effect in the moderately thinned plots with only small difference between areas, whereas foliage efficiency varied between areas in strongly thinned plots. These findings suggest that foliage efficiency is a useful index for comparing thinning effects between areas.

Key words : foliage efficiency, hinoki cypress, leaf biomass, stem production, thinning

Received 12 October 2020, Accepted 1 March 2021

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

2) Field Science Education and Research Center, Kyoto University

3) Kochi Prefectural Forestry Technology Research Center

4) Department of Hilly and Mountains Areas Development and Transport, Kochi Prefecture

* Shikoku Research Center, FFPRI, 2-915, Asakuranishi, Kochi, 780-8077, Japan; E-mail: yinagaki@ffpri.affrc.go.jp

