短 報

スギ人工林の疎密度と林内の光環境の関係

—人工林の混交林誘導のための目安として—

小山 浩 正^{1,*}・林 直 哉¹・高 橋 教 夫¹

小山浩正・林 直哉・高橋教夫：スギ人工林の疎密度と林内の光環境の関係—人工林の混交林誘導のための目安として—, 森林計画誌 42: 81 ~ 86, 2009 林内に更新した広葉樹を利用してスギ人工林を針広混交林へ誘導するには、適切な光条件を実現するための間伐強度の目安が必要である。本研究では、山形県内の30林分を対象に毎木調査と林内光環境の調査を行った。林内の相対光量子束密度 (rPPFD) は、立木本数、林分材積、胸高断面積合計が高くなるほど低下したが、収量比数 (Ry) との相関が特に強く、 $rPPFD=100\exp(-3.47Ry)$ という関係式を得た。この式から、広葉樹の更新を促すのに必要とされる相対散乱光 10% 以上を実現するには Ry が 0.66、さらに成長した広葉樹の生育が持続できる 15% 以上にするには Ry を 0.56 以下に維持する必要があると推定された。このような疎な密度管理は、長伐期による優良大径材生産とも矛盾しないと考えられ、公益的機能と木材生産の両立に貢献すると考えられた。

Hiromasa KOYAMA, Naoya HAYASHI and Norio TAKAHASHI: **The relationship between stand density of Sugi stand and light condition at its forest interior —as a guide for leading the artificial forests to mixed forests with invaded hardwoods—**, Jpn. J. For. Plann. 42: 81–86, 2009 To facilitate regeneration of hardwood seedlings at the understories of artificial forests, light condition suitable for seedling emergence and growth should be provided through appropriate opening at canopy layer. We examined the relationships between the several indices as stand density and light intensity at forest interior in 30 Sugi stands. Although, rPPFD showed significant negative correlations with all indices including stem density, stand volume and total basal area, Ry (yield index) was the best determinant with the highest value of R^2 . Thus we employed the equation estimating rPPFD using Ry. With this equation, it was suggested that Ry should be maintained at 0.65 to provide 10% of rPPFD under which regeneration of hardwood species could occur. Furthermore, to provide 15% of rPPFD to sustain continuous growth of these seedlings, Ry should be less than 0.55. Maintaining at such lower density would also be suitable for management of high-aged stands, thus it seems that the method promoting species diversity at artificial stands not always conflict with timber production.

I はじめに

近年、スギをはじめとする人工林を針広混交林へ誘導する施策が指向されている (林野庁, 2006)。そのためには、広葉樹の苗木を植栽する方法も考えられるが (長濱・福村, 2002)、人工林の下層には広葉樹の稚樹が天然に更新している場合が多く (清野, 1990; 横井・山口, 1998; 小谷・高田, 1999; 長谷川・平, 2000; 小山, 2002; 鈴木ら, 2005; 横井, 2005)、これらの生育を促して、混交林へ誘導するのが最も効率的な方法と言える (今ら, 2007)。ただし、人工林の林床には必ず広葉樹が更新しているわけではなく、そ

の種組成や本数密度は林分により様々である (長池, 2000)。こうした広葉樹の更新状況は、林内の光条件 (小谷・高田, 1999) や種子供給源となる近接広葉樹林からの距離 (UTSUGI *et al.*, 2004)、林分の地形 (Iro *et al.*, 2004)、過去の施業履歴や土地利用の違い (長谷川, 1991; 横井・山口, 2000; 杉田ら, 2003; Iro *et al.*, 2004) など、複数の要因の影響を受けている。これらの要因の中で、林内の光環境は、上層木の密度管理を通じて唯一制御可能なものと言える (今ら, 2007)。

実際に、上層が閉鎖した林分に対して間伐を実行すると、林床の光環境が改善されて広葉樹が増加した事

* 連絡・別刷請求先 (Corresponding author) E-mail: hkoyama@tds1.tr.yamagata-u.ac.jp

1 山形大学農学部生物環境学科 Department of Biological Environment, Faculty of Agriculture, Yamagata University, Wakaba-machi 1-23 Tsuruoka, Yamagata 997-8555, Japan.

例が多く報告されている (GUAEIGUATA, 1995; THOMAS *et al.*, 1999; 渡辺ら, 2002; 村本ら, 2005; 花田ら, 2006; UTSUGI *et al.*, 2006; 今ら, 2007; 野々田ら, 2008)。ただし, これらの研究は, 特定の光環境を目標に間伐本数などを調整したものではない。一般に, 広葉樹の更新を促すのに必要な光条件は, 相対散乱光にして最低でも 10% 以上が基準とされている (原田, 1948; 小池, 1988)。したがって, 任意の林分に対して, どの程度の間伐を行えば, この基準に誘導できるのかを推定できる目安が必要である。これには林分の疎密度と林内の光環境の関係を明らかにすることが不可欠である。林分の疎密度の指標としては, 立木密度や林分幹材積, 胸高断面積合計 (以下 BA), 収量比数 (以下 Ry) などが考えられる (清野, 1990)。そこで本研究は, 複数のスギ人工林において毎木調査と林内の光環境の調査を行い, 上記のどの指標が光環境との関係が強いのか確かめた。この結果をもとに, 広葉樹の生育を保証する光条件を実現する密度管理を提案する。

II 調査地と方法

1. 調査地

調査は 2008 年に山形県鶴岡市にあるスギ人工林 30 ヶ所で行った (表-1)。これらの林分の斜面方向は様々で, 斜度は最小 2° の平坦な地形から最大 31° の急峻な斜面上の林分までであった。林分の選定にあたっては, できるだけ幅広い林齢や構造の林分を含むようにした。林齢については, 30 林分の中で森林調査簿や聞き取りにより確定できたのは 20 林分に留まったが, これらの中では 36 年生の壮齢林から 79 年生の高齢林まで存在した。立木本数についても, 最低 75 本/ha から 2,300 本/ha までを含んでいる。

2. 上層木の毎木調査

上層木のスギの林分構造を把握するために各調査林分にプロットを設置して毎木調査を行った。プロットの面積は, 林分の上層木の平均樹高が 20m 未満であった 22 林分では 20m × 20m (0.04ha) とし, 20m 以上であった 8 林分では 30m × 30m (0.09ha) とした (表-1)。

毎木調査は各プロット内の胸高直径 5cm 以上の立木を対象に, 胸高直径 (cm 単位) と樹高 (0.1m 単位) を測定した。樹高の測定には, フォレストバーテックスⅢ (Haglof SWEDEN 社製) を使用した。

3. 相対光量子束密度の測定

林内の光環境を評価する指標として相対光量子束密度 (以下 rPPFD) を採用した (MURAOKA *et al.*, 2001;

村岡, 2003)。測定に際しては, 各林分のプロット内で空間的にまんべんなく散らばるように 50 地点をランダムに選定し, 下層植生の上部 (2.0m) で光量子束密度 (単位は $\mu \text{mol photons m}^{-2} \text{s}^{-1}$) を計測し, 同時に測定した林外における値に対する相対値を百分率で求め, その平均値で評価した。光量子束密度の測定は LI-COR の光量子計 (LI-250 Light-Meter) を用いた。

なお, 先述のように既存の研究から広葉樹の更新を促すのに必要な相対散乱光は 10% 以上と判断したが (原田, 1948; 小池, 1988), これらの光環境は相対照度により評価されており, 近年, 光環境の指標として採用されている光量子束密度とは測定単位や計測している波長域が異なる。しかし, MURAOKA *et al.* (2001) が初夏に針葉樹林内において両者の関係を調べた結果では, 相対照度 = $1.011 \times \text{rPPFD}$ ($R^2=0.995$) であったので, 本研究においても rPPFD で 10% 以上を広葉樹更新の目安として設定しても大きな問題はないと考えた。

4. 疎密度の指標と林内の rPPFD の関係

上記の毎木調査の結果から, スギ林の疎密度を表す指標として, 林分ごとに本数密度 (本/ha), 林分材積 (m^3/ha), 胸高断面積合計 (m^2/ha) および収量比数を求め, これら 4 つを変数として林内の rPPFD との関係それぞれ以下の指数関数式に当てはめた。

$$\text{rPPFD} = 100 \exp(-ax)$$

ここで, a は係数, x は疎密度を示す 4 つの変数である。これら 4 つの変数のうち, 林分材積と胸高断面積合計は厳密には林分疎密度の指標とは言えないが, 林分の混み合いに応じて変動し, かつ毎木調査等により容易に測定しうる変数であるので, これらの変数が林内光環境と高い相関を得るならば, 施業指針として有用と考えたので, 本研究では広義の意味で疎密度として捉えた。

また, 収量比数については日本林業技術協会 (1999) による人工林林分密度管理図の「裏東北・北陸地方スギ林分密度管理図」を参照して計算した。ただし, この密度管理図に準じて計算を行うと, 5 林分で最多密度線に相当する $Ry=1.0$ を超える林分があった。これらについては, 最多密度に達していると判断して 1.0 とした (表-1)。

III 結 果

1. 林分構造と光環境

各プロットにおける毎木調査の結果を表-1に示す。すでに述べたように立木密度は最小 75 本/ha から最大で 2,300 本/ha であった。平均樹高は 11m ~

表-1 調査地概要

林分 番号	所在 地域名	斜面方向	平均斜面 傾斜角 (°)	プロット 面積 (ha)	林齢 (年)	立木本数 (本/ha)	平均 胸高直径 (cm)	上層木 平均樹高 (m)	林分 材積 (m³/ha)	胸高断面 積合計 (m³/ha)	収量比数	rPPFD (%)
1	朝日	SE	21	0.04	36	2275	22.1	17.7	874.0	98.2	1.00	2.2
2	〃	SE	25	0.04	36	1675	20.7	15.7	484.8	60.3	0.92	4.0
3	〃	E	31	0.04	39	1950	20.1	17.7	495.6	65.9	1.00	2.4
4	〃	E	23	0.04	39	2300	20.5	17.7	613.3	81.2	1.00	2.6
5	〃	E	17	0.09	39	1225	23.3	22.0	475.1	58.0	0.80	2.6
6	羽黒	NE	2	0.04	—	700	32.5	19.3	544.2	59.3	0.78	11.4
7	〃	NE	2	0.09	—	825	35.1	21.0	801.9	81.1	1.00	9.4
8	〃	NW	3	0.04	79	100	33.6	19.1	84.1	9.4	0.12	64.4
9	〃	N	4	0.09	77	75	38.0	26.1	109.3	8.6	0.11	95.2
10	〃	SE	10	0.09	57	733	37.6	22.1	752.1	74.6	0.90	1.1
11	〃	NW	8	0.04	—	1050	25.9	15.7	428.9	55.8	0.82	2.5
12	〃	NW	3	0.04	23	900	28.9	18.6	565.5	64.6	0.86	1.4
13	〃	SW	10	0.04	—	375	27.7	13.6	146.6	23.5	0.34	30.3
14	〃	E	1	0.04	—	1150	23.9	15.7	418.8	53.7	0.8	10.3
15	〃	NE	3	0.04	—	1000	22.1	14.5	290.9	39.6	0.62	8.2
16	庄内	NE	11	0.09	—	644	35.1	23.8	751.6	66.6	0.82	19.4
17	櫛引	NW	5	0.04	—	700	22.8	13.6	199.3	30.2	0.46	20.4
18	〃	NW	8	0.04	—	1075	22.3	13.1	279.0	42.5	0.69	13.2
19	〃	NW	12	0.04	—	1025	20.2	12.7	221.1	34.0	0.56	19.3
20	鶴岡	S	18	0.04	69	1667	21.0	17.5	573.9	64.5	0.95	7.4
21	〃	S	7	0.04	69	1478	22.5	19.8	664.5	65.6	0.93	5.6
22	〃	S	17	0.04	69	1378	21.8	19.3	552.5	61.1	0.8	7.4
23	〃	S	17	0.09	69	1733	21.3	20.8	749.9	69.5	0.98	4.0
24	〃	S	15	0.04	69	1500	20.8	18.9	601.6	62.9	0.89	3.0
25	〃	S	15	0.04	69	1578	23.1	19.2	726.4	75.1	1.00	9.1
26	〃	S	14	0.04	69	1856	19.2	18.5	608.1	64.2	0.93	3.4
27	〃	S	9	0.09	69	1289	23.4	21.4	695.7	63.8	0.87	3.1
28	〃	S	9	0.09	69	1522	21.5	20.8	697.3	65.0	0.91	5.9
29	〃	S	13	0.04	69	1722	18.3	19.0	555.6	56.7	0.82	3.4
30	〃	NE	16	0.04	51	175	22.5	11.9	41.0	7.2	0.11	74.6

26m, 平均胸高直径は18.3cm～35.1cm, 林分材積は41～874m³/ha, 胸高断面積合計は7.2m²/ha～98.2m²/haであった。これらの林分の収量比数は0.11～1.0で、特に0.85以上が15林分(50%)と極めて密な状態の林分が多かった(表-1)。一方, Ryが0.15以下と極めて疎な林分が3林分(林分番号8, 9, 30)あったが、これらは皆伐に近い状態に、立木がまばらに残されているような立地であった。

図-1に、30林分の本数密度, 林分材積, BA, Ryを変数とした林内のrPPFDとの関係を示した。これら4つの変数とrPPFDの間には、どれも有意な負の相関が得られ(全て:P<0.001), 林分が密になるにしたがい林内の光環境は低下する傾向がみとめられた。ただし、変数の説明力を示す決定係数(R²)には変数間で差が見られ、立木密度(R²=0.35)<林分材積(0.40)<BA(0.64)<Ry(0.70)の順に大きな値を示した。決定係数が最も高い値を示したRyとrPPFDとの関係式は

$$rPPFD(\%) = 100 \exp(-3.47 Ry) \quad \text{式(1)}$$

であった。

IV 考 察

調査を行った山形県庄内地方の30のスギ林では、林内のrPPFDは密なスギ林ほど低い傾向を示していた。特に、BAとRyは、本数や林分材積に比べて決定係数が高かった。林内の光環境は林分葉量と強い関係があるとされており(只木・四井手, 1962; 清野, 1990), BAとRyは葉量と高い相関があることから(橋本・須崎, 1983; 安藤, 1986), このような結果になったと考えられる。さらに、両者の比較では、Ryの方がBAより高い決定係数を示していた。BAには林分の上層樹高が反映されていないのに対して、Ryはこれにも影響を受けるので、林分の発達程度を加味した疎密度を示す指標として適しており、林内の光環境との相関も最も高かったと考えられる。また、Ryはス

ギをはじめとする針葉樹人工林に対する間伐設計（造林事業）や本数調整伐設計（治山事業）において、従来から標準的に利用されているものなので（安藤，1986；長濱・近藤，2006），林内の光環境を目的の条件に誘導するための目安として採用するには都合が良いと言える。すでに，藤森（1989）はスギ林内の相対照度と収量比数の関係を示し，林内の光環境の指標として実用的であるとしているが，近年では光環境はrPPFDで評価すべきものとされており（MURAOKA *et al.*, 2001；村岡，2003），本研究はその点において補強・修正をしたことになる。また，対象林分で他の指標（立木本数，林分材積，BA）と比較検討した結果なので，本研究は収量比数を採用する根拠をより明確したと言える。この結果，本研究ではスギ林のRyと林内のrPPFDの関係として式(1)を得ることができた（図－

1）。これにより，目的とする光環境を実現するのに誘導すべきRyが求まり，任意の林分に対してどの程度の間伐が必要か目安を得ることができる。

ただし，本研究で用いた裏東北・北陸地方スギ林密度管理図（日本林業技術協会，1999）では，Ryが計算上1.0を超えてしまう林分が5つ存在してしまっていた。本研究では，これらの林分は最多密度に達したと考えて便宜上1.0としたが，これについては密度管理図自体の再調整を含めて今後の課題としたい。

原田（1948）および小池（1988）によると，相対散乱光が5%以下ではほとんどの広葉樹が生育できず，極相種を主体とする樹木が健全に生育するには10%前後が確保されていることが必要とされる。式(1)から算出すると，5%以上を維持するには，Ryで0.86以下であることが必要になる。今回調査を行っ

図－1 スギ林の疎密度の指標と林内のrPPFD (%) との関係
a) 立木本数，b) 林分材積，c) 胸高断面積合計 (BA)，d) 収量比数 (Ry)

た林分ではこの条件を満たしていたのは30林分中15林分であった。一方、 $rPPFD \geq 10\%$ を満たすためには $Ry=0.66$ 以下と、さらに疎であることが必要と推定された。また、稚樹は成長にともない呼吸量が相対的に増加するため、物質収支が悪化し数年以内に消失する(橋本・青木, 1996)。このため、稚樹の生存と成長に必要な明るさは、個体が大きくなるにしたがい増大し、樹高3m以上になると相対散乱光で15%を維持する必要があるとされる(小池, 1988)。式(1)からは $rPPFD \geq 15\%$ を実現するには、 Ry が0.55以下であることが必要であることになり、下層の広葉樹の生育を維持するにはかなりの程度で林冠を疎開させなければならないと言える。

一方、 Ry をこれよりさらに低下させて林冠を強く疎開させれば、それに応じて広葉樹の更新が促進されるとは限らないと考えられる。疎開度が大きすぎると高木性広葉樹の生育を阻害する大型の草本が出現する場合があります(水井ら, 1979; 菊沢ら, 1980; 今ら, 2007)。こうした大型草本があると、地表面での照度はむしろ暗くなることがトドマツ林で指摘されている(水井ら, 1979)。本研究におけるスギ林においても、 Ry と下層植生の被度には負の相関がみとめられ、 Ry が0.2以下の極めて疎な林分では大型草本の被度が高く、おそらくこれらに被圧されたことが原因で、他の林分と比べて広葉樹の更新が良好ではなかった(林; 未発表データ)。以上の結果から、混交林の造成を目標とした林分密度の指標としては、0.55から0.65を目安とするのが良いのではないかと考えられる。

山形県林業公社の森林簿データによれば、40年生以上の230のスギ林分について $Ry=0.7$ 前後に最頻値があり、全体の77%に相当する林分が $Ry=0.65$ 以上であった。先述のように式(1)にしたがって広葉樹の更新を促す目安を $Ry=0.65$ 以下とすると、混交林の誘導をめざすには人工林は混みすぎた林分が多いと言える。山形県内の他のスギ林もほぼ同様の傾向にあるであろう。

広葉樹の更新を促すのに光環境が整うことは必要条件ではあるが、人工林内の広葉樹の種組成や個体数はそれだけでなく、最近接広葉樹林からの距離や(UTSUGI *et al.*, 2006)、前歴にも影響を受けるので(長谷川, 1991; 横井・山口, 2000; 杉田ら, 2003; Ito *et al.*, 2004)、間伐で光環境を改善したからと言って、必ず広葉樹の更新が実現するとは限らない。そこで、本研究で $rPPFD=10\%$ が期待できると推定された $Ry=0.65$ 程度までの間伐を実行して必要条件である光条件を改善し、広葉樹の更新が確認できた場所では、次の段階として、更新木が大きく成長しても生存しうる($rPPFD \geq 15\%$ を満たす) $Ry=0.55$ 以下の間伐を施して混交

林への誘導をめざすのが良いのではないかと考える。

現在、スギをはじめとする人工林について、当初設定された主伐期をすぎた高齢林が増えつつあり、長伐期施業も指向されつつある(藤森, 2000; 桜井, 2002)。長伐期施業により良質大径木の生産を目指すには、単に伐期を延長するだけではなく、より疎仕立ての林分密度管理が必要であろう(藤森, 1997; 藤森, 2006)。本研究において示した光環境を $rPPFD$ で10%程度に誘導しうる $Ry \leq 0.65$ の密度管理はスギ林の長伐期施業において充分ありえる疎密度であろう。鈴木ら(2005)は $Ry=0.4$ および0.5で維持された200年生のヒノキ高齢林では、高蓄積でありかつ侵入広葉樹による複層化が進んでいると指摘している。スギ林においても、長伐期施業と公益的機能を発揮する施業は、互いに矛盾するものではなく、疎仕立てで密度管理を行うことで両立できる可能性がある。

本研究を行った山形県では2007年度から森林環境税の導入が始まり、スギ林の公益的機能の向上を目的に施業放棄林分に対して間伐が逐次実行されるようになったが、その際には、本研究で提示した $Ry=0.65$ あるいはそれ以下を目標にすることが、下層植生を確保することで生物多様性を高め、土砂流出等を防ぐとともに、侵入した高木性広葉樹の生育を促すことで混交林への第一歩となると思われる。

本研究をまとめるにあたり、山形県林業公社には森林簿データの提供と解析の許可を頂いた。ここに深く感謝申し上げる。

引用文献

- 安藤 貴 (1986) 同齢単純林の密度管理に関する生態学的研究. 林試研報 **210**: 1~153.
- 藤森隆郎 (1989) わかりやすい林業研究解説シリーズ 複層林の生態と取り扱い. 96pp, 林業科学技術振興所, 東京.
- 藤森隆郎 (1997) 日本のあるべき森林像からみた「1千万ヘクタールの人工林」. 森林科学 **19**: 2~8.
- 藤森隆郎 (2000) 森との共生. 236pp, 丸善, 東京.
- 藤森隆郎 (2006) 森林生態学 持続可能な管理の基礎. 480pp, 全国林業改良普及協会, 東京.
- GUAEIGATA, M.R., RHEINGANS, R., and MONTAGNINI, F. (1995) Early woody incursion under tree plantation in Costa Rica: Implications for forest restoration. Rest. Ecol. **3**: 252~260.
- 花田尚子・渋谷正人・斎藤秀之・高橋邦秀 (2006) カラマツ人工林における広葉樹の更新過程. 日林誌 **88**: 1~7.
- 原田 泰 (1948) 森林と環境 - 森林立地論 -. 205pp,

- 北方民生協会出版部, 札幌.
- 長谷川幹夫 (1991) スギ不成績造林地での下刈り, 除伐が広葉樹の定着に与える影響. 日林誌 **73**: 375~379.
- 長谷川幹夫・平英彰 (2000) 多雪地帯のスギ造林地に侵入した広葉樹の種組成構造の特徴. 日林誌 **82**: 28~33.
- 橋本良二・青木享宏 (1996) 冷温帯コナラ二次林の林冠下で枯死する同種稚樹の炭素収支. 日緑工誌 **21**: 164~176.
- 橋本良二・須崎民雄 (1983) スギ人工林の光合成生産機構に関する研究 (Ⅳ) 立木の光合成. 日林誌 **65**: 408~416.
- 石塚森吉・菅原セツ子・金沢洋一 (1988) 林内照度と広葉樹数種の伸長量. 日林北支論 **36**: 48~50.
- ITO, S., NAKAYAMA, R., and BUCKLEY, G.P. (2004) Effects of previous land-use on plant species diversity in semi-natural and plantation forests in a warm-temperate region in southeastern Kyushu, Japan. *For. Ecol. Manage.* **196**: 213~225.
- 菊沢喜八郎・福地 稔・水谷栄一・浅井達弘 (1980) トドマツ人工林の天然下種更新 (Ⅱ) - 林内更新のための施業指針 -. 北海道林試研報 **18**: 11~23.
- 清野嘉之 (1990) ヒノキ人工林における下層植物群落の動態と制御に関する研究. 森林総研研報 **359**: 1~122.
- 小谷二郎・高田兼太 (1999) スギ人工林の林床での広葉樹の侵入および優占様式. 石川県林試研報 **30**: 1~10.
- 小池孝良 (1988) 落葉広葉樹の生存に必要な明るさとその成長に伴う変化. 林木の育種 **148**: 19~23.
- 今博計・渡辺一郎・八坂通泰 (2007) トドマツ人工林における間伐が広葉樹の天然下種更新に及ぼす影響. 日林誌 **89**: 396~400.
- 小山浩正 (2002) 近自然型森林造成方法の提案 - (Ⅰ) 人工レフュージアとしてのカラマツ林の評価 -. 北方林業 **54**: 193~197.
- 水井憲雄・菊沢喜八郎・浅井達弘 (1979) トドマツ人工林の天然下種更新 (Ⅰ) - 4年間の稚苗の消長について -. 北海道林試研報 **17**: 13~22.
- 村本康治・野上寛五郎・高木正博 (2005) ヒノキ壮齡林の下層植生に及ぼす列状間伐の影響 - 間伐5年間後の種組成 -. 九州森林研究 **58**: 59~62.
- 村岡裕由 (2003) 植物に於ける光環境の評価. (種生物学会編 光と水と植物のかたち 植物生理生態学入門. 文一総合出版, 東京): 215~228.
- MURAOKA, H., HIROTA, H., MATSUMOTO, J., NISHIMURA, S. TANG, Y., KOIZUMI, H. and WASHITANI, I. (2001) On the convertibility of different light availability indices, relative illuminance and relative photon flux density. *Funct. Ecol.* **15**: 798~803.
- 長濱孝行・福村寛之 (2002) 針広混交林の誘導技術に関する研究 - スギ人工林内への広葉樹種植栽試験 -. 九州森林研究 **55**: 48~49.
- 日本林業技術協会 (1999) 人工林林分密度管理図. 全22図 (復刻), 解説書付き.
- 野々田秀一・渋谷正人・斎藤秀之・石橋 聡・高橋正義 (2008) トドマツ人工林への広葉樹の侵入および成長過程と間伐の影響. 日林誌 **90**: 103~110.
- 林野庁 (2006) 森林・林業基本計画. 42pp.
- 桜井尚武編著 (2002) 長伐期林の実践. 173pp, 林業科学技術振興所, 東京.
- 杉田久志・猪内次郎・百目木忠之・田口春孝・岩根好伸・大石康彦・昆健児 (2003) 天然更新によるカラマツ人工林の広葉樹林への誘導 - 小岩井農場山林における事例 -. 東北森林誌 **8**: 1~9.
- 鈴木和次郎・須崎智広・奥村忠充・池田伸 (2005) 高齢級化に伴うヒノキ人工林の発達様式. 日林誌 **87**: 27~35.
- 只木 良也・四井手 綱英 (1962) 林木の競争に関する研究 (Ⅲ) アカマツ幼樹を用いた小型林分での機械的な間伐試験. 日林誌 **44**: 129~139.
- THOMAS, S.C., HALPERN, C.B., FALK, D.A., LIGUORI, D.A., and AUSTIN, K.A. (1999) Plant diversity in managed forests: Understory responses to thinning and fertilization. *Ecol. Appl.* **9**: 864~879.
- UTSUGI, E., KANNO, H., UENO, N., TOMITA, M., SAITOH, T., KIMURA, M., KANOU, K., and SEIWA, K. (2006) Hardwood recruitment into conifer plantation in Japan: Effects of thinning and distance from neighboring hardwood forests. *For. Ecol. Manage.* **237**: 15~28.
- 渡辺一郎・八坂通泰・小山浩正・滝谷美香・大野泰之 (2002) トドマツ人工林の間伐と下層植生多様性. 日林北支論 **50**: 65~67.
- 横井秀一・山口清 (1998) 積雪地帯のスギ不成績造林地におけるスギと広葉樹の生育実態. 森林立地 **40**: 91~96.
- 横井秀一・山口清 (2000) 積雪地帯におけるスギ不成績造林地の取り扱い - スギと広葉樹の成長過程からみた施業案 -. 森林立地 **42**: 1~7.
- 横井秀一 (2005) 広葉樹が混交するスギ不成績造林地における広葉樹の種組成. 岐阜県森林研報 **34**: 23~26.

(2008年5月9日受付)

(2009年4月30日受理)