



Title	カラマツ人工林における除間伐が広葉樹の侵入・成長に及ぼす影響と混交林化の施業指針
Author(s)	岩崎, ちひろ; 渋谷, 正人
Citation	北海道大学演習林研究報告, 69(1), 23-54
Issue Date	2013-01-10
Doc URL	http://hdl.handle.net/2115/52013
Type	bulletin (article)
File Information	RBHUF69-1_003.pdf



[Instructions for use](#)

カラマツ人工林における除間伐が広葉樹の侵入・成長に及ぼす影響と混交林化の施業指針

岩崎 ちひろ¹, 渋谷 正人^{2*}

Influences of thinning on invasion and growth of natural broadleaved trees in *Larix kaempferi* plantations and a management guideline for conversion of the plantations into mixed stands of larch and broadleaved trees

by

IWASAKI Chihiro¹, SHIBUYA Masato^{2*}

要 旨

天然更新した広葉樹によるカラマツ人工林の混交林化を検討するため、北海道内のカラマツ高齢級人工林 13 林分で、広葉樹の種組成、樹齢構成、サイズ構造を調査し、広葉樹の侵入や成長と除間伐歴の関係を明らかにした。さらに、広葉樹の成長に重要な林内照度を維持し混交林化を図るための密度管理シミュレーションを行った。調査林分は収量比数 0.6 未満の疎な林分が多かった。多くの広葉樹が間伐後に更新していたが、肥大成長の変動と除間伐歴には関係はみられなかった。このことから、疎に管理されたカラマツ林では、間伐は広葉樹の更新の契機であるが、成長への影響は大きくないといえる。密度管理シミュレーションでは、80 年生頃に林冠層に達する広葉樹が出現し始め、100 年生頃には林冠層の広葉樹混交率は約 30%となると予測された。以上のことから、混交林化の施業指針として、保育段階では、広葉樹の更新を促すために繰り返し間伐を行うことが必要で、疎仕立てが適しており、収穫段階では広葉樹の成長を促すため、収量比数 0.6 以下での密度管理が必要といえる。これらの管理により、80 年生頃に広葉樹が林冠に達し始め、100 年生頃から相観的にも混交林化すると考えられる。

キーワード: カラマツ, 混交林, 広葉樹, 間伐, 天然更新

2012 年 2 月 27 日受付, Received Feb. 27, 2012

2012 年 11 月 15 日受理, Accepted Nov. 15, 2012

1. 北海道大学大学院農学院環境資源学専攻森林資源科学講座造林学分野
Laboratory of Silviculture, Research Group of Forest Resource Science, Division of Environmental Resources, Graduate School of Agriculture, Hokkaido University
2. 北海道大学農学研究院環境資源学部門森林資源科学分野造林学研究室
Laboratory of Silviculture, Research Group of Forest Resource Science, Division of Environmental Resources, Research Faculty of Agriculture, Hokkaido University *shibuya@for.agr.hokudai.ac.jp

1. はじめに

日本の針葉樹人工林の面積は現在 1,000 万 ha を超え、森林面積の約 4 割を占めている (林野庁 2011)。また、針葉樹人工林では、管理が不十分な林分が増加しており、木材生産機能だけでなく、水源涵養機能や生物多様性保全機能といった多面的な機能の低下が懸念されている。このような背景の下、平成 23 年に決定された森林・林業基本計画では、国土レベルでの森林の多面的機能の発揮のため、針葉樹人工林の長伐期化や針広混交林 (以下混交林とする) 化を含む育成複層林化などの多様な森林整備が目標とされている。

カラマツ (*Larix kaempferi* Carr.) は北海道の主要造林樹種であり、北海道の人工林面積の約 3 割を占める (北海道 2011)。また、カラマツは落葉性のため、常緑性の人工林よりも林内が明るく、草本や木本が侵入・混生しやすいといわれている (千葉 1981、Kitaoka *et al.* 2009)。さらにトドマツ (*Abies sachalinensis* Masters) などに比べ生態的寿命が長い (北海道 1985)、カラマツ人工林は、北海道の針葉樹人工林のなかでは長伐期化し、混交林に仕立てやすいタイプと考えられる。

針葉樹人工林の複層林化あるいは混交林化は、人工林内に苗木を植栽することによっても可能であるが、天然更新した広葉樹を活用することも検討されている (坂上 1985、今ら 2007)。しかし、針葉樹人工林への広葉樹の導入はこれまで広く行われてきたわけではなく、施業技術として開発途上であり (大住 2009)、天然更新した広葉樹を用いた混交林化の施業指針は未確立である。

天然更新による混交林化には、まず広葉樹が人工林内に侵入することが必要である。そして、最終的には広葉樹が植栽木と同程度の樹高に成長し相観的にも混交林となることが求められる。そのため、混交林化に向けた施業指針の確立には、天然更新した広葉樹の種組成、侵入契機、成長過程といった実態を把握することが必要不可欠である。天然更新した広葉樹の種組成や侵入契機などについては、これまでも研究がなされてきた。小山 (2002) は北海道内のカラマツ人工林での調査から、林内に更新した樹種を更新特性で区分すると、遷移後期種や中間種が多く遷移初期種が少

ないこと、種子散布型で区分すると、鳥散布型の種が多いことを指摘している。同じくカラマツ人工林で行われた杉田ら (2003) や花田ら (2006) の調査においても同様の結果が示されており、カラマツ人工林内に天然更新する広葉樹の種組成には、広葉樹の更新特性や種子散布型が影響する可能性が考えられる。また、北海道内のトドマツ人工林で行われた広葉樹の更新に間伐強度が与える影響の調査 (今ら 2007) では、無間伐区に比べ、間伐区で広葉樹の出現種数と個体数が増加し、間伐が更新の契機となっていることが示された。同様に、間伐が広葉樹の更新の契機となっていることが、トドマツ林だけでなく、スギ人工林 (Utsugi *et al.* 2006) やヒノキ人工林 (清野 1990、村本ら 2005)、カラマツ人工林 (花田ら 2006) においても報告されている。さらに、間伐は広葉樹の成長にも影響を与えることが報告されている。野々田ら (2008) は、トドマツ人工林において広葉樹の連年肥大成長量を測定し、広葉樹の肥大成長量は間伐によって増大することを明らかにした。このように、保育作業である間伐は、林分の健全性の維持や植栽木の成長だけでなく、広葉樹の天然更新や成長にも影響するといえる。

一方で、混交林化に関する既存研究は、侵入初期の実生や稚樹段階を対象としたものが多い (石井・井原 1992、Kodani 1999、肥後 2002、村本ら 2005、今ら 2007)。しかし、林齢に伴い、人工林内の広葉樹の種組成は変化することが指摘されている (坂上 1985)。また、針葉樹人工林の混交林化には、広葉樹が成長し上層木となるまでを考慮することが必要であるため、侵入からある程度時間が経過し、広葉樹が成長した段階において、どのような種組成、サイズ構造であるのかを把握することや、その段階まで生残する広葉樹の侵入や成長に対する施業の影響の検討が不可欠である。

本研究では、カラマツ人工林の混交林化に必要な施業指針を検討するため、北海道内の高齢級林分を対象として、人工林内の広葉樹の種組成、樹齢構成、サイズ構造、肥大成長経過を把握し、広葉樹の侵入時期や成長量の変動時期と除間伐歴との関係を明らかにし、カラマツ人工林保育段階における広葉樹の更新・成長動態を明らかにした。さらに、混交林化に必要なカラマツの密度管理に

について検討するため、林分密度管理図を用いてシミュレーションを行い、広葉樹の成長に重要な林内の光環境に焦点を当て、カラマツの収穫段階に必要な施業指針を提示した。

2. 調査地と方法

2.1. 調査地

北海道十勝総合振興局、胆振総合振興局、空知総合振興局内の道有林計 13 林分で調査を行った。これらの林分は、調査時点で 54～61 年生の高齢級のカラマツ人工林であり、除間伐歴が明らかな林分である。各林分の林分名と林況、除間伐歴を表 1 に示した。またカラマツの植栽本数や立地条件を付表 1 に示した。間伐回数は 2～9 回であり（表 1）、伐採率が明らかな林分では、材積間伐率は 12～33%であった。施業記録では、除間伐時に広葉樹が伐採された記録はなかった。

2.2. 林分調査

2010 年、2011 年の 8～10 月に、各林分に方形区（面積 0.08～0.2 ha）を設定して毎木調査を行った。方形区内の樹高 1.3 m 以上の高木類を対象に、樹種を同定し、樹高、胸高直径を測定した。なお、方形区の設定に際しては、ギャップや林縁などは含めないようにした。

測定結果から、中島式材積計算式（北海道 2012）を用いて幹材積を求めた。さらに林分の混みあい方を、北海道地方カラマツ林分密度管理図（林野庁 1999）により検討した。この密度管理図では、上層樹高は、被圧木、枯損木を除いた立木の平均樹高と定義されている。本研究では、各林分で最も樹高が高い個体に比べ、概ね樹高が 10 m 以上低い個体を被圧木とみなし、それらを除外して平均樹高を求め、上層樹高とした。また調査林分に密度管理図が適用可能かを確認するため、各調査林分の等平均樹高曲線からの逸脱度を検討した。等平均樹高曲線からの逸脱度は、密度管理図上で密度と上層樹高から求められる蓄積と実測値の蓄積との誤差率から求めた。密度管理図の等平均樹高曲線からの調査林分の蓄積の逸脱度は、85%にあたる 13 林分中 11 林分で誤差率が±20%以内であった（表 1）。北海道地方カラマツ林分密度管理図（林野庁 1999）における幹材積の推定値は、78%

の林分で誤差率が±20%以内であるとされているため、今回の調査林分においても林分密度管理図は適用可能と判断し、混みあい方の指標である収量比数を求めた。また除間伐歴と、各除間伐時における密度と蓄積が明らかだった 4 林分について、過去の収量比数の推移を求め、調査時の収量比数との関係を検討し、過去の保育経過を明らかにした。

広葉樹の種組成の林分間での類似度を類似度百分率（PS）を用いて検討した（伊藤 1977）。類似度百分率は次の式で表される。

$$PS = \frac{2 \sum_i \min(x_i, y_i)}{\sum_i (x_i + y_i)}$$

（ x_i, y_i は林分 x, y における i 種の個体数）

2.3. 広葉樹の樹齢査定と肥大成長量解析

2.3.1. サンプルング

各林分で、50 個体の広葉樹を選定し、円盤もしくは成長錐サンプルを採取した。円盤を採取した個体は胸高直径が 5 cm 未満であり、成長錐コアを採取した個体は胸高直径が 5 cm 以上である。方形区内の広葉樹が 50 本未満の林分では、すべての広葉樹を対象とした。サンプル採取対象の個体は、各林分で出現した樹種、樹高階から万遍なく選定した。萌芽個体もみられたが、可能な限り、一つの萌芽集団からは 1 個体のみを採取するようにした。また、倒木から立ち上がった枝が個体となっているものや腐朽個体については除外した。

2.3.2. 樹齢査定

広葉樹の更新時期を検討するため、円盤は高さ 0 m、0.3 m で採取し、成長錐コアは 0.3 m で採取した。樹齢は、胸高直径 5cm 未満の個体については高さ 0 m の円盤の年輪数とした。年輪判読は円盤の表面を研磨した後、ルーペを用いて測定した。胸高直径 5cm 以上の個体については、コアの年輪数を測定し、これに高さ 0.3 m まで成長するのに必要な年数を加えて補正し、樹齢とした。この樹齢の補正值は、円盤サンプルを用いて、樹種、林分ごとに高さ 0 m と 0.3 m の年輪数差の平均値

表 1. 林況と除間伐歴

地域	林分名	林齢 ^{※1}	調査面積			カラマツ		広葉樹		優占広葉樹 ^{※3}		広葉樹		広葉樹		除間伐実施 林齢(年)
			面積 (ha)	種類 (ha)	密度 (本/ha)	樹高 (m) ^{※2}	胸高直径 (cm) ^{※3}	種数	密度 (本/ha)	樹高 (m) ^{※2}	胸高直径 (cm) ^{※2}	密度 (本/ha)	樹高 (m) ^{※2}	胸高直径 (cm) ^{※2}	収量比数	
十勝	T1	55	6.72	0.08	411	23.1	28.8	12	Am (31), Qc (20)	900	7.5	7.3	0.62	103	9, 16, 21, 31, 39	
	T2	56	7.84	0.09	413	21.2	26.7	9	Kp (29), Ma (21)	425	6.3	6.8	0.56	101	9, 17, 26, 41, 51	
	T3	57	10.72	0.09	267	28.9	36.6	13	Fm (37), Kp (30)	844	4.8	4.4	0.59	104	15, 28, 36, 42	
	T4	57	10.08	0.09	433	28.3	31.1	16	Kp (27), Cc (25)	2356	5.2	4.1	0.74	96	17, 25, 29, 36, 42	
	T5	58	18.56	0.09	122	29.4	42.2	12	Mo (18), Uq (16), Ap (16)	500	7.9	9.0	0.35	113	11, 13, 17, 19, 24	
胆振	I1	54	4.16	0.1	353	21.0	27.7	16	Tj (31), Fj (30)	2667	6.9	6.6	0.50	113	15, 29, 35, 41	
	I2	56	26.08	0.1	230	29.2	37.6	16	Tm (62), Mk (12)	1610	6.8	6.6	0.54	108	14, 19, 24, 25, 30	
	I3	57	5.92	0.09	422	21.5	27.6	16	Tj (39), Fj (13), Mo (12)	1833	7.5	7.1	0.59	110	18, 19, 29, 38	
	I4	59	20.96	0.1	230	27.8	40.3	17	Tm (27), Mk (12)	1320	7.8	7.6	0.57	121	16, 21, 25, 26, 34	
	I5	61	2.88	0.1	180	29	41.1	8	Mk (58), Tm (31)	780	5.9	6.5	0.48	116	25, 32, 37, 43, 58	
空知	S1	57	11.04	0.2	155	28.2	38.8	6	Mb (77)	175	8.7	12.4	0.39	98	16, 19, 20, 27, 37	
	S2	58	14.4	0.1	370	23.3	30.5	15	Am (39), Tj (27)	1380	7.4	7.7	0.61	113	12, 23	
	S3	59	21.6	0.1	290	24.0	34.1	9	Am (77)	1310	8.4	8.3	0.55	126	3, 13, 20, 24, 31	
					18.2-29.2	21.5-45.1				1.6-17.6	0.5-21.9			42		

※1 林齢は十勝に関しては2010年現在、胆振、空知に関しては、2011年現在のものである。

※2 上段は平均値、下段はデータ範囲(最小値—最大値)を示す。

※3 樹種(相対頻度)を示す。

Am: イダヤカエデ (*Acer mono Maxim.*), Qc: ミズナラ (*Quercus crispula Blume*), Kp: ハリギリ (*Kalopanax pictus Nakai*), Ma: イヌエンジュ (*Maackia amurensis var. buergeri C. K. Schm.*)
 Fm: ヤチダモ (*Fraxinus mandshurica var. japonica Maxim.*), Cc: ミスギ (*Cornus controversa Hemsl.*), Mo: ホオノキ (*Magnolia obovata Thunb.*), Uld: ハルニレ (*Ulmus davidiana var. japonica Nakai*)
 Ap: ヤマモミジ (*Acer palmatum var. nishumurae Makino*), Tj: シナノキ (*Tilia japonica Simonkai*), Fj: アオダモ (*Fraxinus lanuginosa Kodz.*)
 Tm: モイワボダイジュ (*Tilia maximowicziana Shirasawa var. yessoana*), Mk: キタコブシ (*Magnolia kobus var. borealis Sarg.*), Mb: ヤマブツ (*Morus bombycis Kodz.*)
 I5の43~58年の間に1度間伐が行われているが、林齢は不明である。

として求めた。なお、採取した円盤個体数が少ない樹種に関しては、他林分のデータや、清和・菊沢（1989）による当年生実生の伸長量を参考にして補正値を算出した。

2.3.3. 肥大成長量解析

広葉樹の肥大成長経過を検討するため、成長錐コアまたは高さ 0.3 m の円盤の年輪幅をデジタルノギスを用いて測定した。円盤については、最長半径方向の年輪幅を測定した。なお、年輪幅が 0.5 mm を下回る場合については、前後の年輪とまとめて測定し、平均値を年輪幅とした。肥大成長量解析では、各林分で円盤を採取した 10 個体と、成長錐コアを採取した全個体を対象とした。円盤採取個体は肥大成長量が小さく、測定困難な個体が多かったため、測定対象を限定した。

2.4. 肥大成長増大期の定義

人工林内の広葉樹の肥大成長量には経年変動がみられ、間伐による林冠疎開によって肥大成長量が急激に増大する時期があることが知られている（野々田ら 2008）。本研究では、前年の 2 倍以上の肥大成長量を示した年を肥大成長増大期と定義した。この定義には、Antos and Parish（2002）、野々田ら（2008）を参考にした。

2.5. 広葉樹の生態的特性の分類

広葉樹を更新特性に応じて、遷移初期種、中間種、遷移後期種に分類した。また、種子散布型を、風散布型、鳥散布型、動物散布型に分類した。分類にあたり、Kikuzawa（1983）、Koike（1988）、小山（2002）、花田ら（2006）、野々田ら（2008）を参考にした。

また、本研究では、混交林化については、広葉樹が林冠層に達することが必要であると考えた。このため広葉樹の樹高成長が重要な要素となってくる。しかし、高木性の広葉樹であっても、最大樹高が 15 m 程度の種から、30 m 以上となる種まで様々であるため、ある時点の樹高だけでなく、最大樹高などの生態的特性を考慮する必要がある。本研究の対象であるカラマツ林は、地位が高いと上層高が 30 m を超えるため（北海道立林業試験場 2007）、カラマツの林冠層に到達できる広葉樹は概

ね樹高が 25 m 以上に達することができる種と考えられる。そこで将来カラマツとともに林冠層を形成できる樹種を区分するため、最大樹高が 25 m 以上に到達可能な種と到達困難な種に分類した。分類にあたり、矢島（1982）、佐藤（2006）を参考にした。樹高 25 m 以上に到達可能な種には、イタヤカエデ、シナノキ、モイワボダイジュ、ハリギリ、ホオノキ、ミズナラ、シラカンバなどがあり、25 m に到達困難な種には、キタコブシ、アオダモ、ミズキ、ヤマグワ、アズキナシ、イヌエンジュ、キハダなどが分類された（表 3）。

2.6. 混交林化のための密度管理

カラマツ高齢級林分を混交林化するためには、侵入した広葉樹が成長可能な林内環境であることが必要である。本研究では、光環境に着目し、広葉樹が樹高成長可能な林内の明るさを維持する観点から密度管理方法を検討した。その概要を図 1 に示した。人工林の密度管理は収量比数を目安に行うのが一般的である。収量比数は林分の混み具合を表すものであり、間伐によって収量比数を調整することで、林分は目的とする適切な密度に維持される。広葉樹の成長と光量について、過去の研究から、全陽光の 20%以上で多くの種の更新が継続されること（原田 1948）、多くの樹種の稚樹が生育に少なくとも 20~30%以上の陽光を必要とすること（北海道営林局 1984）が明らかとなっている。また、小山（1996）は、カラマツ林における収量比数（ R_y ）と林内相対照度（ RI ）との関係を報告している。これによると、 $R_y=0.6$ のとき $RI=21\%$ 、 $R_y=0.5$ のとき $RI=25\%$ 、 $R_y=0.4$ のとき $RI=30\%$ という関係になっている。本研究では、多くの種の生育に必要な RI : 20~30%を基準として、 R_y を 0.6 以下に維持し、さらに可能であれば R_y を 0.4~0.5 の間に保つ密度管理経路を検討した（図 1）。検討対象として、本研究の調査林分から、 R_y を基準として、やや密な状態の林分（ $T4$: $R_y=0.74$ ）、中庸な密度の林分（ $T1$: $R_y=0.62$ ）、疎な状態の林分（ $T2$: $R_y=0.56$ ）をそれぞれ 1 林分ずつ選択した。林分内の広葉樹のうち、調査時点で最も樹高の高い個体が樹高 25 m に達した時点と、広葉樹がカラマツと林冠層を形成し始めた時点とし、それまでにかかる年数、密度管理経路、

カラマツと広葉樹の樹高の推移を検討した。間伐強度は、出材量が少ないとコストがかさむため、一回の間伐での出材量が $50 \text{ m}^3/\text{ha}$ 以上となるようにした。また、 R_y を一度に大きく変動させるような強度の間伐は林分の風害への抵抗性を低下させるため(水井・畠山 1984)、 R_y の変動幅は $0.1 \sim 0.15$ とした。さらに、北海道版カラマツ人工林収穫予測ソフト(北海道立林業試験場 2010)を用いて地位指数を算出し、カラマツの樹高の推移を把握した。このソフトでは、地位指数の算出に樹高

上位 ha あたり 100 本の平均樹高を上層高 (H_{100}) として用いている。これは、本研究で用いた密度管理図の上層樹高と異なるため、調査林分のデータを用いて H_{100} と上層樹高の関係を求め、収穫予測ソフトで求められる H_{100} を密度管理図に適用できるようにした。 H_{100} と上層樹高の関係(図 2)は、以下の通りである。

$$\begin{aligned} (\text{上層樹高}) &= 1.14 (H_{100}) - 6.00 \\ (R^2 &= 0.91, p < 0.001) \end{aligned}$$

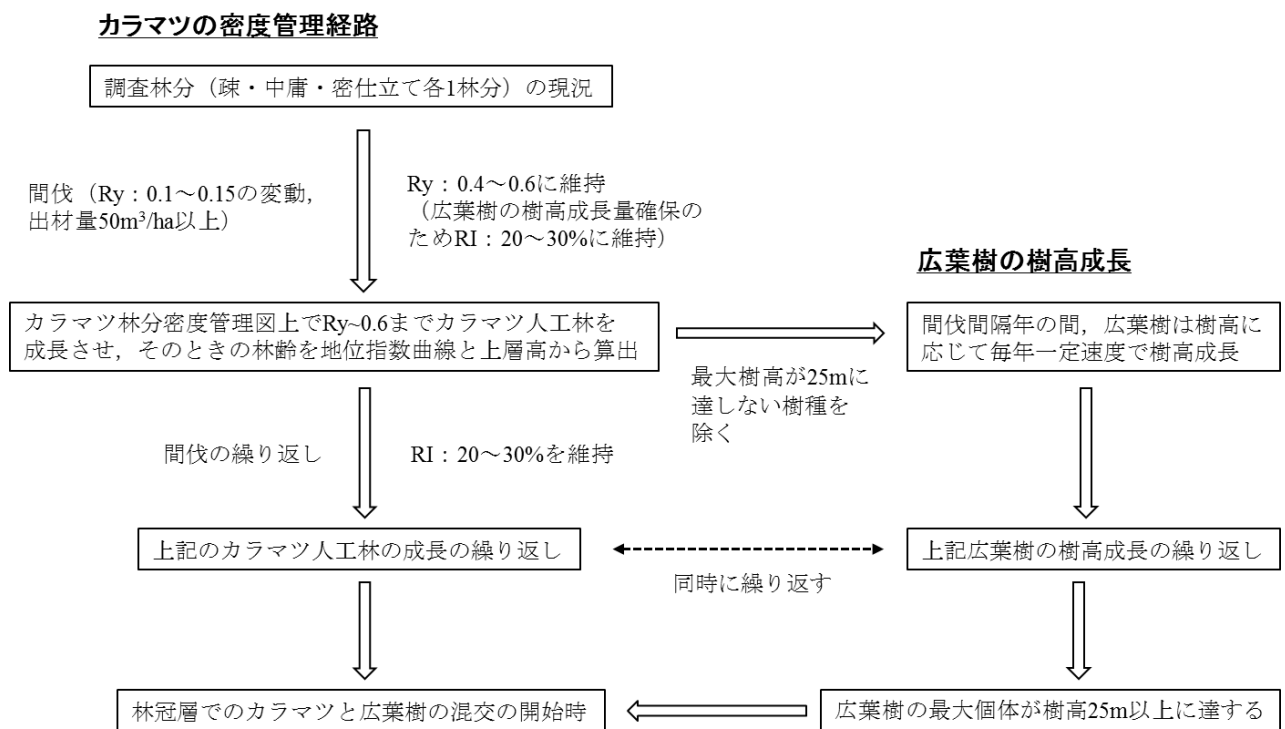


図 1. 混交林化のためのカラマツの密度管理シミュレーションの概要

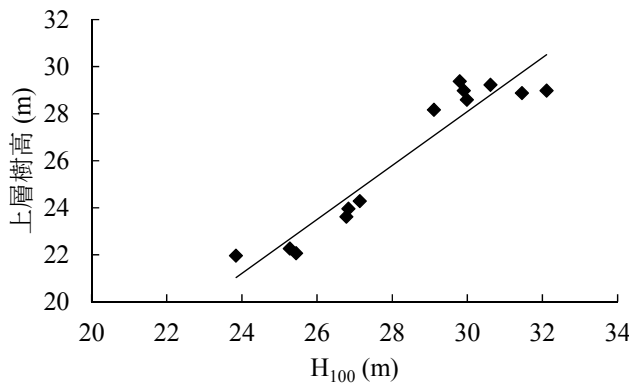


図 2. ha あたり樹高上位 100 本の上層高 (H_{100}) と上層樹高の関係
 回帰直線: $y = 1.14x - 6.00$ ($R^2 = 0.91, p < 0.001$).

広葉樹の樹高成長量は、矢島（1982）から求めた。矢島（1982）は北海道の針広混交林内のミズナラ、ハリギリ、ハルニレ、シナノキ、ウダイカンバの丸太の元口と末口の年輪解析を行い、各丸太の長さ分の成長に必要な平均年数を示している。この結果をもとに、樹高階別の平均樹高成長速度を求め、シミュレーションにおける広葉樹の樹高成長量とした（表2）。なお、矢島（1982）では樹高20.15 m以降のデータがないが、本研究では、20.15 m以上の場合も、樹高成長速度は0.35 m/年とした。本調査地において、各林分で樹高上位100本/haに当たる広葉樹のうち、樹齢査定を行った70個体（樹高：7.7～21.1m、樹齢：24～52年、樹高成長速度：0.17～0.55m/年）の平均樹高成長速度は0.33 m/年であり、矢島（1982）の結果で得られた樹高成長速度の最大値が0.35m/年であったため、表2の値を用いても過大な推定となる可能性は小さく、適切と判断した。また、密な林分のシミュレーションでは、一時的にRIが基準値である20%を下回る19%となったが、この期間についても、成長速度は表2の通りとして樹高を算出した。また広葉樹は枯死しないと仮定した。さらに混交林の林冠を形成できる種のみを対象としたため、各林分で調査時点の樹高は高いが、最大樹高が25 mに達しないアズキナシ、キタコブシ、イヌエンジュ、キハダは、混交林の林冠層を形成しない種として対象から除外した（表3）。

3. 結果

3.1. 林況

林況を表1に示す。カラマツの密度は122～433本/ha、蓄積は228～456 m³/ha、平均樹高は21.0～29.4 m、平均胸高直径は26.7～42.2 cm、収量比数は0.35～0.74であった。広葉樹の密度は175～2667本/ha、平均樹高は4.8～8.7 m、平均胸高直径は4.1～12.4 cmであった。

高木性の広葉樹は全林分で合計34種出現した（表3）。また、出現頻度は樹種によって異なり、最も出現頻度の高かったイタヤカエデとハリギリは13林分中11林分に、次いでシナノキ、キタコブシ、ホオノキ、ミズナラは9林分に、ミズキ、アズキナシ、ヤマモミジは8林分に出現した。また、総個体数では、イタヤカエデが222個体と最

も多く、次いでシナノキが205個体、モイワボダイジュが160個体出現した。

各林分では6～17種の広葉樹が出現した（表1）。種組成は、相対頻度でホオノキ、ハルニレ、ヤマモミジがそれぞれ約2割ずつを占める林分、ヤチダモが4割を占める林分、イタヤカエデが約8割を占める林分など、林分ごとに様々であった（表1）。広葉樹の更新特性別の種数は、遷移初期種が3種、中間種が14種、遷移後期種が15種、更新特性不明の種が2種であった（表3）。各林分内での出現個体数の割合をみると、全林分で中間種、遷移後期種が9割以上を占め、遷移初期種はごくわずかしかなかった（図3）。また、種子散布型別の種数は、風散布型が16種、鳥散布型が13種、動物散布型が4種、散布型不明の種が1種であった（表3）。各林分内での出現個体数の割合は、風散布型が8割以上を占める林分から、鳥散布型が8割以上を占める林分まで、林分ごとのばらつきが大きかった。しかし、いずれの林分でも動物散布型の種は少なかった（図4）。樹高はシラカンバ、ウダイカンバ、ミズナラ、アサダ、ミズキで樹高20 m以上に達している個体がみられた。また、胸高直径は、シラカンバ、ウダイカンバ、ミズナラ、アサダ、ミズキ、イタヤカエデ、ヤマグワで胸高直径20 cm以上の個体がみられた。

広葉樹の種組成には、林分間の類似度に地域性がみられた（表4）。最も類似度の高い林分が同地域内の林分であったのは、13林分中12林分で、多くの林分の類似度百分率はおよそ0.5以上であった。2番目に類似度が高い林分も概ね同地域の林分であった。

樹高分布は、一部の広葉樹がカラマツと同程度の樹高であったが、樹高25 m前後にモードを持つカラマツが上層に分布し、樹高20 m未満の広葉樹が下層に分布する2層の階層構造となっていた（図5）。各林分の広葉樹の中で樹高が高かった種には、シラカンバやホオノキ、シナノキ、ミズナラなど樹高25 m以上に成長できる個体が多くみられた（表5）。

また、胸高直径についても、一部の広葉樹がカラマツと同程度の胸高直径であったが、多くのカラマツが30 cm以上に分布したのに対し、広葉樹は20 cm以下に集中して分布していた（図6）。

表2. 広葉樹の樹高階別樹高成長速度

樹高階 (m) [※]	必要年数 [※]	樹高成長量 (m/年)
6.15~8.95	15.2	0.18
8.95~11.75	19.7	0.14
11.75~14.55	17.5	0.16
14.55~17.35	11.8	0.24
17.35~20.15	8	0.35

[※]矢島 (1982) による。

本研究では樹高20.15 m以降の樹高成長速度も0.35 m/年とした。

表3. 広葉樹の出現状況と生態的特性

種名	個体数	出現林分数	種子散布型	更新特性	最大到達サイズ階 [※]
イタヤカエデ	222	11	風	遷移後期種	高
シナノキ	205	9	風	遷移後期種	高
モイワボダイジュ	160	4	風	遷移後期種	高
キタコブシ	108	9	鳥	中間種	低
ハリギリ	100	11	鳥	中間種	高
アオダモ	97	4	風	遷移後期種	低
ホオノキ	70	9	鳥	中間種	高
ミズキ	54	8	鳥	中間種	低
ミズナラ	47	9	動物	遷移後期種	高
ヤマグワ	46	7	鳥	中間種	低
ヤチダモ	34	4	風	中間種	高
ハルニレ	33	6	風	中間種	高
アズキナシ	32	8	鳥	遷移後期種	低
ヤマモミジ	32	8	風	遷移後期種	低
シラカンバ	16	7	風	遷移初期種	高
イヌエンジュ	14	4	風	遷移後期種	低
エゾヤマザクラ	14	5	鳥	遷移後期種	高
アサダ	13	6	風	中間種	高
ニガキ	12	3	鳥	中間種	低
シウリザクラ	10	4	鳥	遷移後期種	低
ミヤマザクラ	9	5	鳥	遷移後期種	低
キハダ	8	5	鳥	中間種	低
コシアブラ	8	1	鳥	中間種	低
オニグルミ	6	4	動物	中間種	高
サワシバ	6	1	風	遷移後期種	低
ウダイカンバ	5	3	風	遷移初期種	高
ニセアカシア	5	1	不明	不明	低
カシワ	4	1	動物	遷移後期種	高
ハウチワカエデ	4	1	風	遷移後期種	低
オヒョウ	3	2	風	中間種	高
カラコギカエデ	2	2	風	不明	低
ハクウンボク	2	2	動物	遷移後期種	低
ナナカマド	1	1	鳥	中間種	低
バッコヤナギ	1	1	風	遷移初期種	低
計34種	1383個体				

種子散布型と更新特性は、Kikuzawa (1983)、Koike (1988)、小山 (2002)、花田ら (2006)、野々田ら (2008) を参考にした。

[※]樹高25m以上に到達できる樹種を高、25mに到達できない種を低で示す。

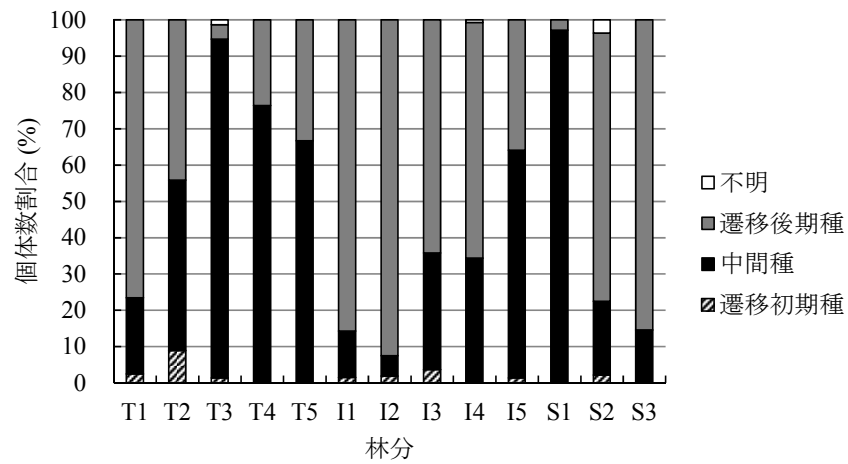


図 3. 更新特性別個体数割合

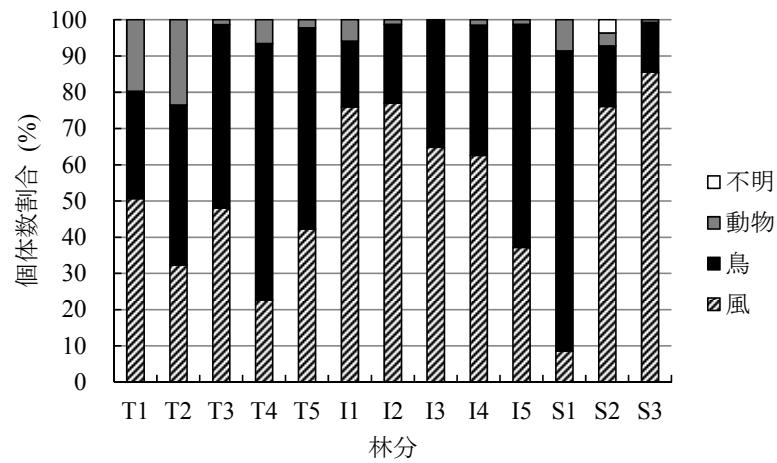


図 4. 種子散布型別個体数割合

表 4. 広葉樹の種組成の類似度百分率

林分名	最も類似度が高い林分	2番目に類似度が高い林分
T1	T2 (0.37)	T4 (0.34)
T2	T1 (0.37)	T3 (0.26)
T3	T4 (0.51)	T5 (0.35)
T4	T3 (0.51)	T5 (0.49)
T5	T4 (0.49)	T3 (0.35)
I1	I3 (0.69)	S2 (0.39)
I2	I4 (0.52)	I5 (0.43)
I3	I1 (0.69)	I4 (0.41)
I4	I2 (0.52)	I5 (0.45)
I5	I4 (0.45)	I2 (0.43)
S1	I4 (0.08)	S2 (0.08)
S2	S3 (0.48)	I1 (0.39)
S3	S2 (0.48)	I1 (0.25)

林分ごとに最も類似度百分率が高い林分と2番目に類似度百分率が高い林分を示す。括弧内は類似度百分率の値を示す。

類似度百分率

$$PS = \frac{2 \sum_i \min(x_i, y_i)}{\sum_i (x_i + y_i)} \quad (x, y \text{ は林分 } x_i, y_i \text{ における } i \text{ 種の個体数})$$

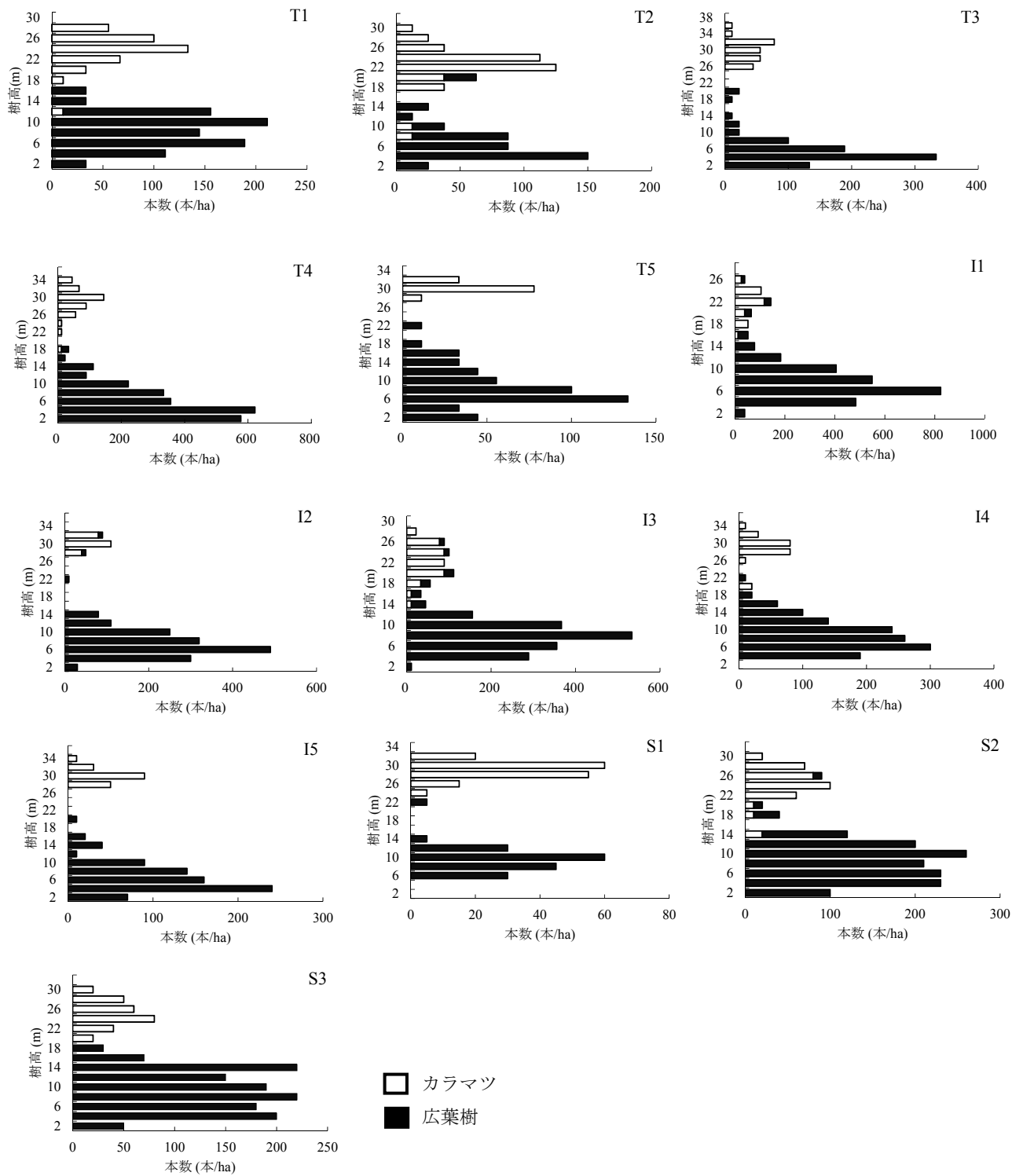


図 5. 樹高頻度分布
 グラフ右上に林分名を示す。

表 5. 樹高上位 100 本/ha の広葉樹と樹高

T1	樹高 (m)	T2	樹高 (m)	T3	樹高 (m)	T4	樹高 (m)	T5	樹高 (m)
シナノキ	15.2	シラカンバ	19.4	ハルニレ	18.5	ホオノキ	16.3	ホオノキ	20.6
シラカンバ	14.6	シラカンバ	18.7	シラカンバ	18.2	ホオノキ	14.8	ホオノキ	17.8
ミズナラ	14.3	カンワ	12.8	キハダ	16.8	ホオノキ	13.9	キハダ	15.4
ミズナラ	12.9	ハリギリ	12.5	ミズキ	13.3	キタコブシ	13.7	ミズキ	15.2
アズキナシ	12.6	イズエンジュ	10.5	ホオノキ	11.7	ホオノキ	13.2	ホオノキ	14.8
アズキナシ	12.3	ミズナラ	8.9	ハルニレ	10.8			ホオノキ	13.8
ミズナラ	11.8	キハダ	8.7	ホオノキ	9.8			ヤチダモ	12.8
ハリギリ	11.5	ミズナラ	7.8	キタコブシ	9.5			キタコブシ	12.6
アズキナシ	11.2			ヤチダモ	7.7			ヤマモミジ	11.3

I1	樹高 (m)	I2	樹高 (m)	I3	樹高 (m)	I4	樹高 (m)	I5	樹高 (m)
エゾヤマザクラ	25.3	シラカンバ	31.3	シラカンバ	25.1	ミズキ	21.5	アサダ	19.6
シナノキ	22.0	シラカンバ	26.1	シラカンバ	22.2	モイワボダイジュ	17.0	キタコブシ	14.4
ミズナラ	20.3	シラカンバ	20.5	ウダイカンバ	20.0	ホオノキ	16.4	キタコブシ	14.3
ウダイカンバ	19.7	ハリギリ	13.7	シラカンバ	19.8	ホオノキ	15.3	シラカンバ	13.9
ウダイカンバ	19.7	モイワボダイジュ	12.8	シラカンバ	17.5	サワシバ	15.2	モイワボダイジュ	13.0
ミズナラ	15.9	シナノキ	12.7	シラカンバ	17.5	キタコブシ	14.9	ハリギリ	12.7
ミズナラ	14.4	シナノキ	12.4	ホオノキ	15.4	キタコブシ	14.8	ミズナラ	12.7
ミヤマザクラ	14.2	ハリギリ	12.3	ホオノキ	14.4	ホオノキ	14.5	キタコブシ	10.8
		モイワボダイジュ	12.2	ホオノキ	14.0	アサダ	14.1	ホオノキ	10.0
		キタコブシ	12.1			ヤマグワ	13.9	モイワボダイジュ	9.8

S1	樹高 (m)	S2	樹高 (m)	S3	樹高 (m)
オニグルミ	21.1	ニセアカシア	25.5	イタヤカエデ	17.6
オニグルミ	13.5	ウダイカンバ	18.6	イタヤカエデ	17.2
ヤマグワ	11.7	ニセアカシア	17.5	ハルニレ	16.4
ヤマグワ	11.0	シラカンバ	16.8	イタヤカエデ	15.5
ヤマグワ	10.9	ハルニレ	16.5	イタヤカエデ	15.5
ヤマグワ	10.7	ハルニレ	13.7	イタヤカエデ	15.2
ヤマグワ	10.3	イタヤカエデ	13.0	イタヤカエデ	15.2
ヤマグワ	10.3	イタヤカエデ	12.7	シナノキ	14.6
ヤマグワ	9.9	ナナカマド	12.5	ホオノキ	14.3
オヒョウ	9.6	ハリギリ	12.5	イタヤカエデ	14.2
オヒョウ	9.6				
ヤマグワ	9.5				
ヤマグワ	9.5				
ヤマグワ	9.5				
ヤマグワ	9.4				
ヤマグワ	8.7				
ヤマグワ	8.6				
ヤマグワ	8.4				
ヤマグワ	8.4				
ヤマグワ	8.2				

灰色で示した樹種は、最大樹高が 25m 以上に達する種である。

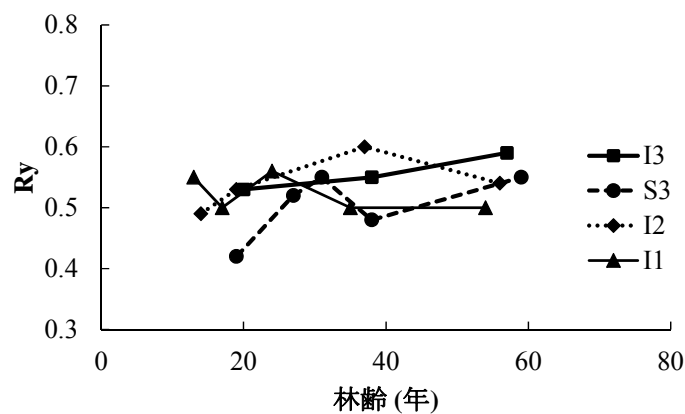


図 7. 過去の収量比数 (Ry) の推移
過去の収量比数は施業履歴より求めた。

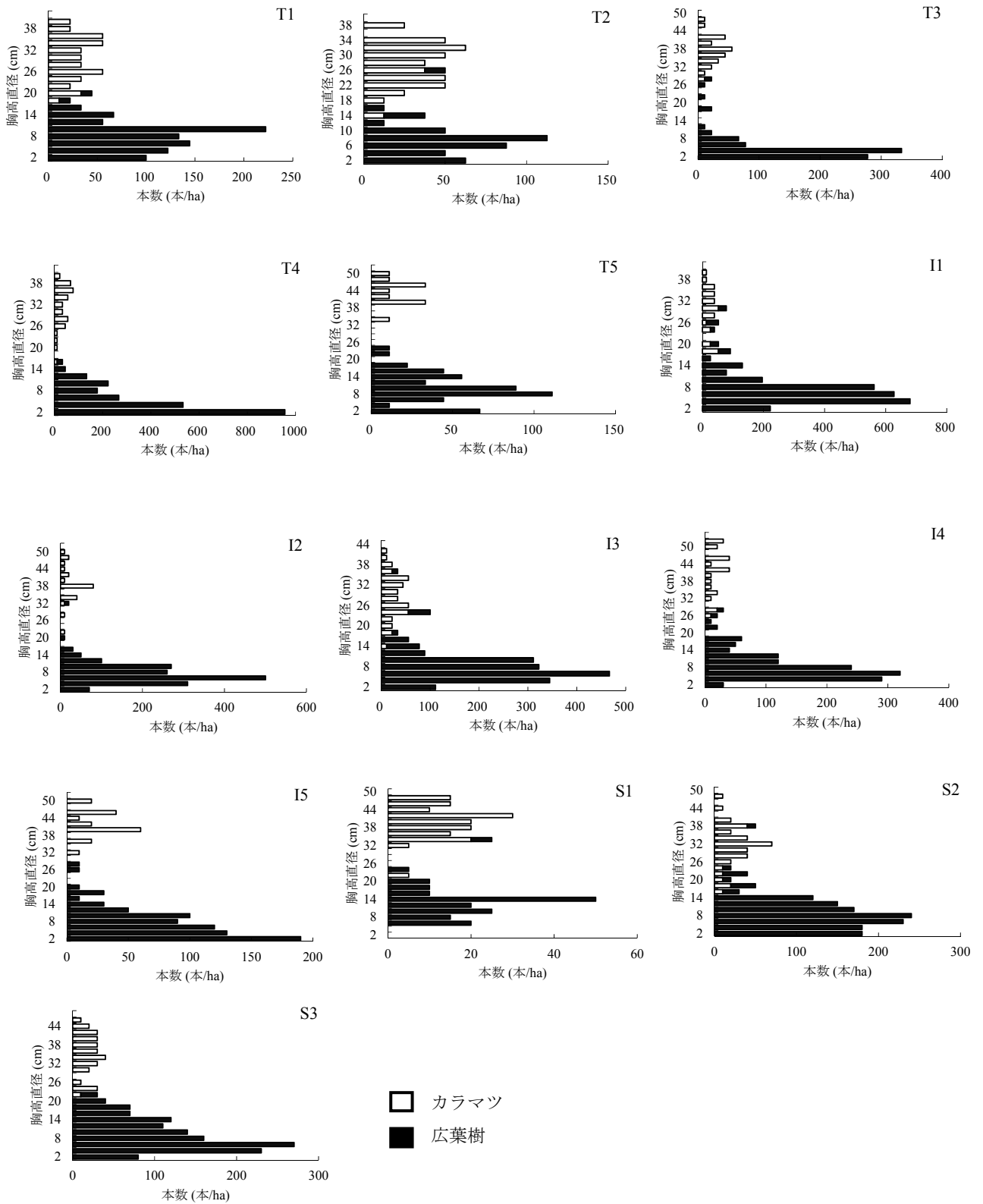


図6. 胸高直径頻度分布
グラフ右上に林分名を示す。

除間伐時の密度と蓄積が明らかな4林分(I1、I2、I3、S3)の収量比数は、本研究の調査時の収量比数とほぼ同程度か、もしくはそれ以下で維持されていた(図7)。

3.2. 樹齢構成

解析した広葉樹603個体のうち、胸高直径5cm未満の個体については7個体が、5cm以上の個体では6個体が腐朽により測定できなかったため、590個体を樹齢解析の対象とした。樹齢解析の結果、広葉樹は6~59年生であり、各林分で最も高齢の個体と若齢の個体との樹齢差はおよそ20~50年であった。更新時期と植栽年との関係を見ると、植栽前に侵入した個体は全林分あわせて2個体とほとんどなく、ほぼすべての個体が植栽後に更新していた。また、植栽後5年間に更新した個体もほとんどみられなかった(図8、9)。間伐年や除伐年と樹齢との関係を見ると、ほぼすべての林分で除間伐年前後に更新する個体が多く、特に、胸高直径5cm未満の個体では、除伐や間伐の翌年に多くの個体が更新しており、その後経年的に更新個体数が減少する傾向がみられた(図8)。胸高直径5cm以上の個体においても、除間伐翌年に多くの個体が更新しているが、5cm未満の個体のように経年的に個体数が減少する傾向は顕著ではなかった(図9)。除間伐年と更新個体数の関係を定量的に把握するため、林分ごとに、胸高直径5cm未満の個体では、除間伐翌年から2年間に更新した個体数が全個体数に占める割合を、5cm以上の個体では、除間伐年とその前後2年間に更新した個体数が占める割合を検討した(表6)。その結果、両方の個体とも、13林分中11林分で全個体数の6割以上がこの期間に更新していた。同様にして、更新特性格、種子散布型別でも除間伐年前後に更新した個体が占める割合を検討した。その結果、更新特性格では、この期間に6割以上の個体が更新していた林分数は、遷移後期種の5cm未満の個体で12林分中11林分、5cm以上の個体では9林分であった。中間種では、それぞれ8林分と11林分であった。遷移初期種は樹齢を把握できた林分が少ないため、検討しなかった。種子散布型別では、風散布型種は、5cm未満の個体で12林分中10林分、5cm以上の個体で13林分中11林分であ

り、鳥散布型種では、それぞれ9林分と10林分であった。動物散布型種は個体数が少ないため、検討しなかった。

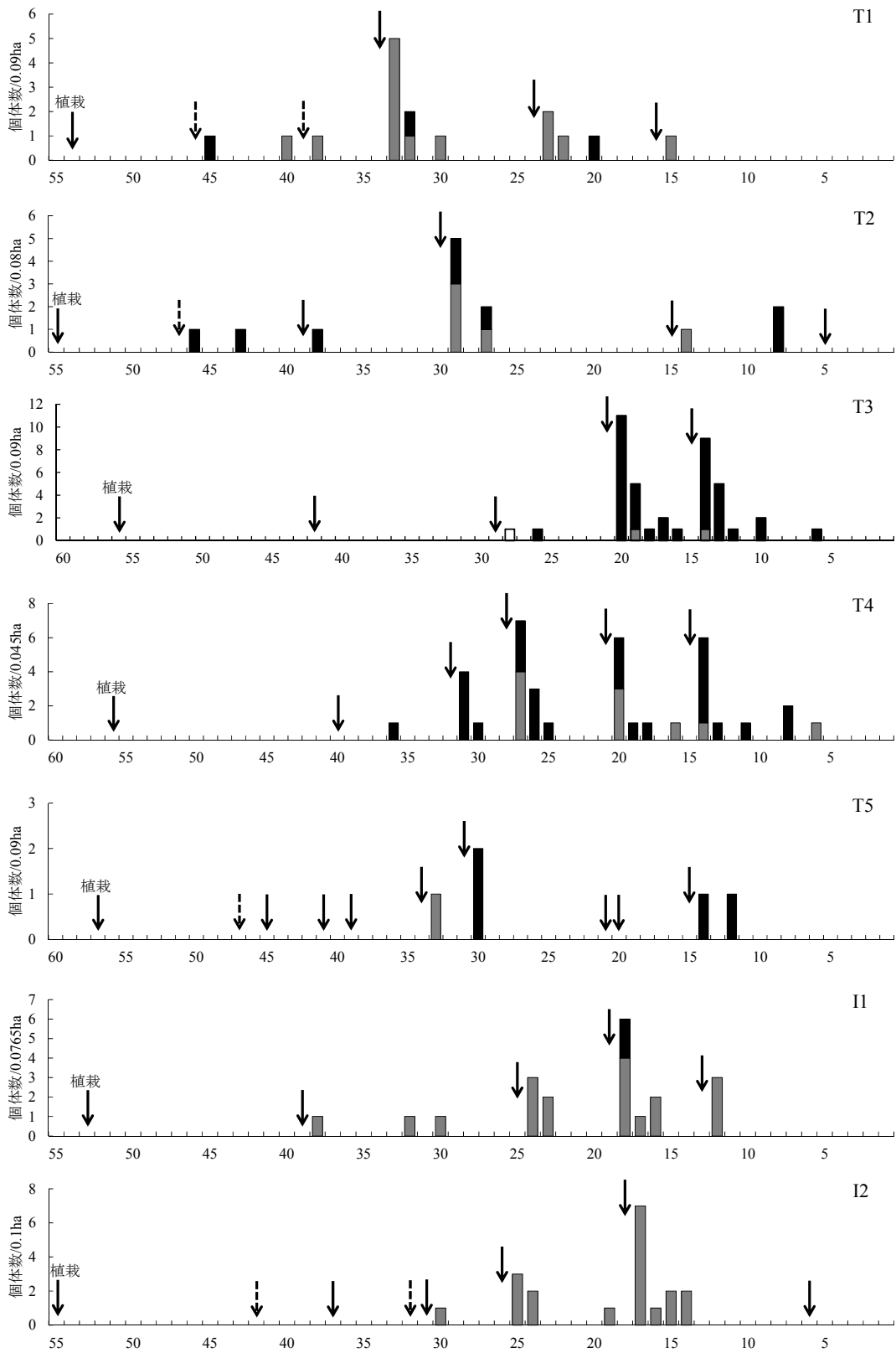
また、樹齢と樹高、樹齢と胸高直径の関係をみると、いずれの林分でもそれらの間に正の相関がみられた(図10、11)。しかし、樹高、胸高直径ともばらつきが大きかった。例えば、T1林分においては、樹高10~11mの個体の樹齢は33~53年であり、胸高直径が10~12cmの個体の樹齢は32~53年であり、それぞれ20年以上の差があった。

3.3. 広葉樹の連年肥大成長量と肥大成長増大期

各個体の連年肥大成長量の平均値は0.4~4.0mm/年であった。また、多くの個体で肥大成長量には変動がみられ、明らかに肥大成長が増大する時期がみられた。肥大成長増大期は、解析対象とした483個体の8割以上の397個体でみられ、多い個体では増大期が7回みられた。また、49年前に増大期となった個体から調査年に増大期となった個体まで時期は様々であった(図12)。年ごとにみると、成長増大を示した個体数は0~9個体と幅があるが、1年あたり1~3個体が増大期となる年がほとんどであった。また、全林分でカラマツ林が15~20年生となる頃から肥大成長増大期となる個体が出現していた(図12)。そして、林齢30年以降から肥大成長増大期となる個体が連続的に出現し、肥大成長増大期は除間伐歴と無関係にほぼ絶え間なく生じていた(図12)。

3.4. 混交林化のための密度管理

密度管理シミュレーションでの R_y 、 RI 、カラマツの蓄積と密度、およびカラマツと広葉樹の樹高の推移を表7、図13に示した。T4林分は調査時に57年生、地位指数は29で、広葉樹が25mに達するまでに、間伐を3回行った。1回目の間伐は57年生時に R_y を0.15下げ、0.74から0.59に、2回目の間伐は5年後の62年生時に、 R_y を0.64から0.54に、3回目の間伐は72年生時に R_y を0.56から0.46に低下させた。広葉樹で最大樹高だったホオノキが25mに到達するのは、密度管理開始から27年後、林齢が84年のときであった。84年生時のカラマツの上層樹高は32.7m、ホオノキの樹高は25.3mと予測され、このシミュレーションの



樹齡 (年、調査年からさかのぼった年数)

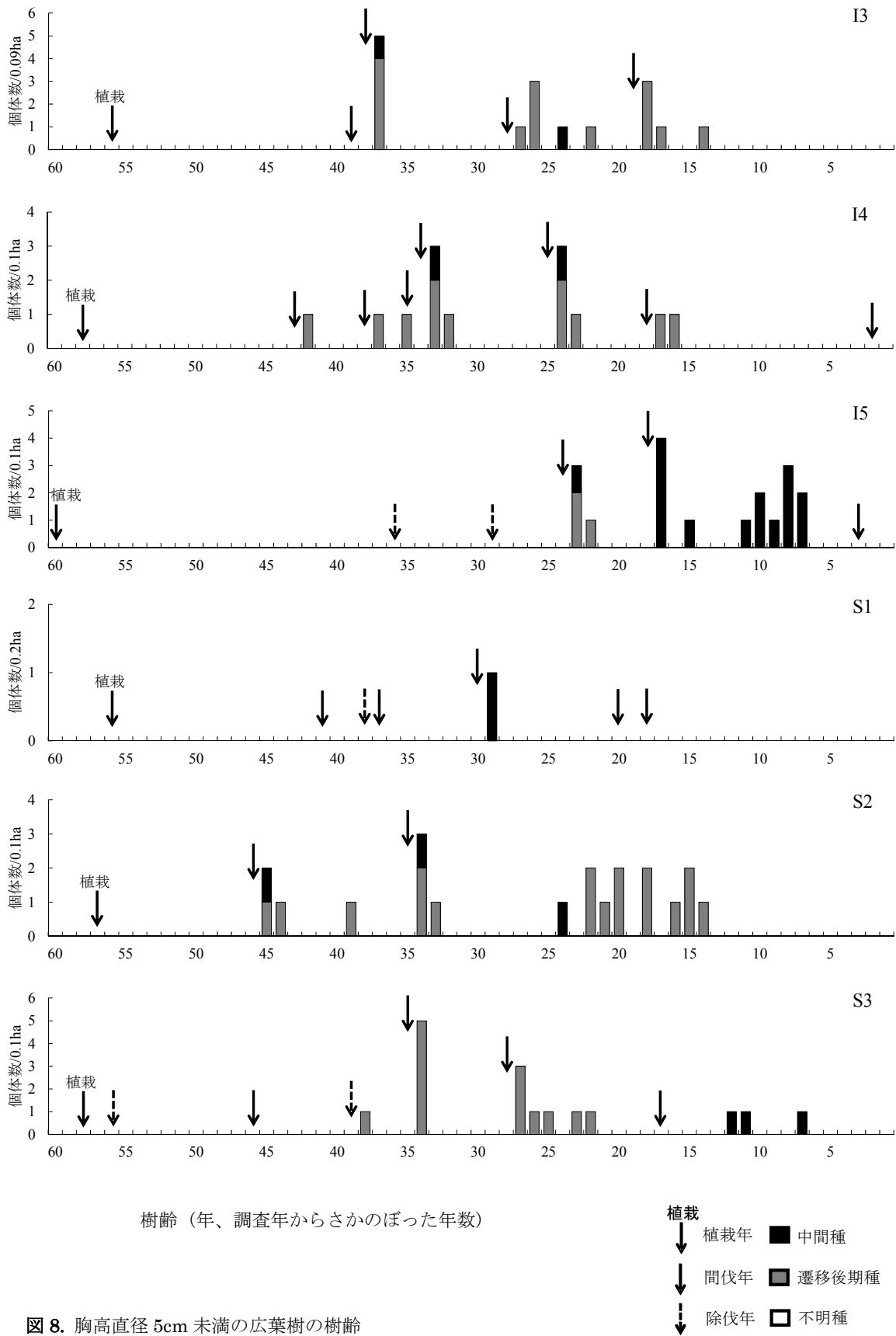
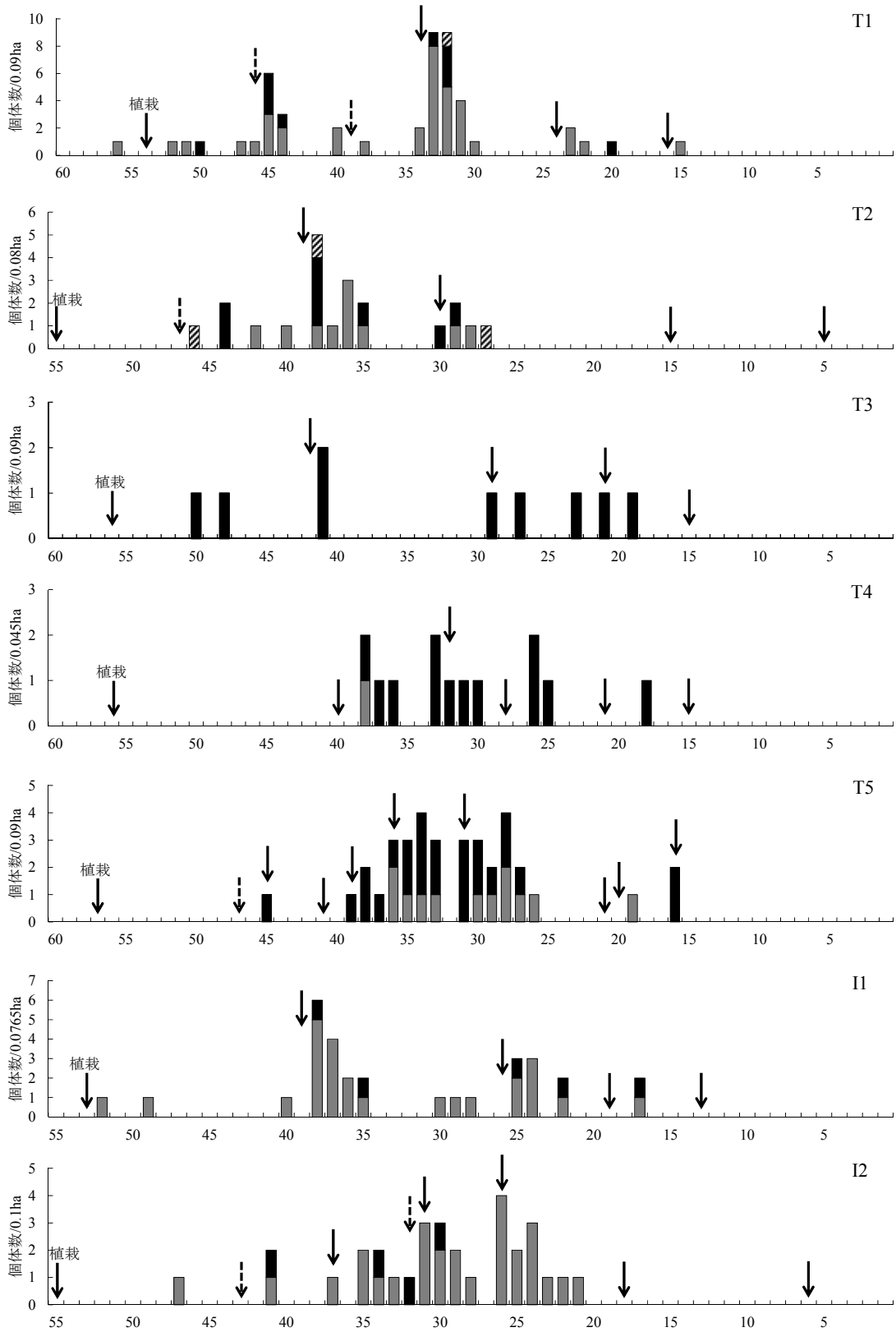


図 8. 胸高直径 5cm 未満の広葉樹の樹齢
 樹齢は高さ 0m で採取した円盤の年輪数である。
 グラフ右上に林分名を示す。



樹齡 (年、調査年からさかのぼった年数)

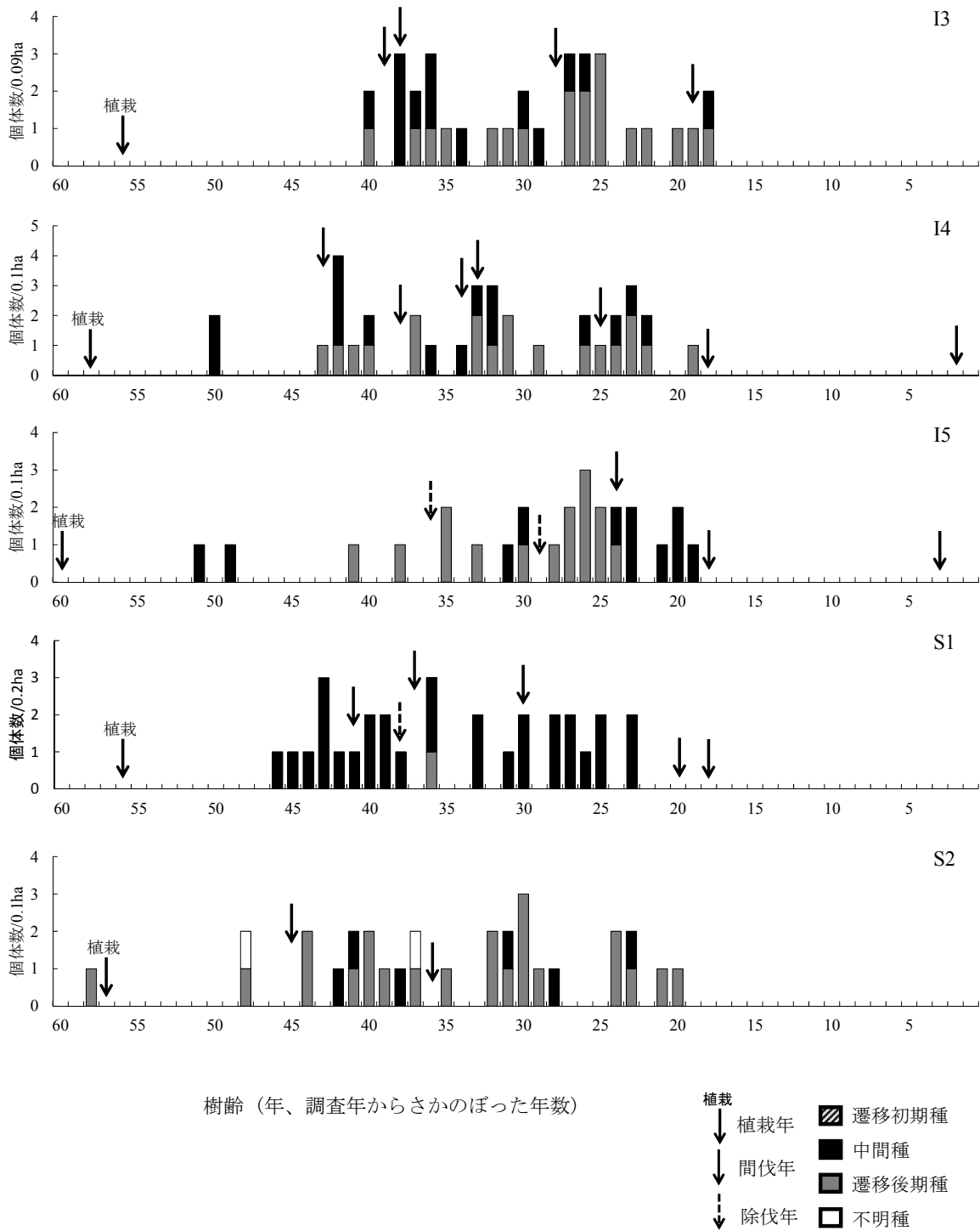


図 9. 胸高直径 5cm 以上の広葉樹の樹齢
 樹齢は高さ 0.3m で採取した成長錐コアの年輪数に 0.3m まで成長するのに要する年数（円盤採取個体から推定）を加えた年数である。グラフ右上に林名を示す。

表 6. 間伐時に更新した個体数の割合

胸高直径5cm未満の個体の間伐後2年間の更新個体数割合(%)		T1	T2	T3	T4	T5	I1	I2	I3	I4	I5	S1
全個体		81	62	78	78	80	80	74	72	92	44	100
更新特性型	遷移後期種	85	80	100	80	100	78	74	86	91	100	—
	中間種	67	50	76	78	75	100	—	50	100	33	100
	遷移初期種	0	—	0	—	—	—	—	—	—	—	—
	不明	—	—	100	—	—	—	—	—	—	—	—
種子散布型	風	83	67	80	86	—	76	79	100	91	100	—
	鳥	50	100	74	78	80	100	60	70	100	33	100
	動物	100	43	100	67	—	—	—	—	—	—	—
	不明	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
胸高直径5cm以上の個体の間伐前後2年間の更新個体数割合(%)		T1	T2	T3	T4	T5	I1	I2	I3	I4	I5	S1
全個体		75	57	78	69	81	63	87	72	82	77	60
更新特性型	遷移後期種	71	50	—	100	67	64	85	58	84	87	100
	中間種	86	63	78	67	88	60	100	92	73	73	59
	遷移初期種	100	67	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	不明	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
種子散布型	風	92	38	75	67	81	64	87	60	83	87	100
	鳥	67	63	80	70	84	50	86	92	88	73	54
	動物	63	80	—	—	0	100	100	—	—	—	100
	不明	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—

更新個体がなかった種群は — で示す。

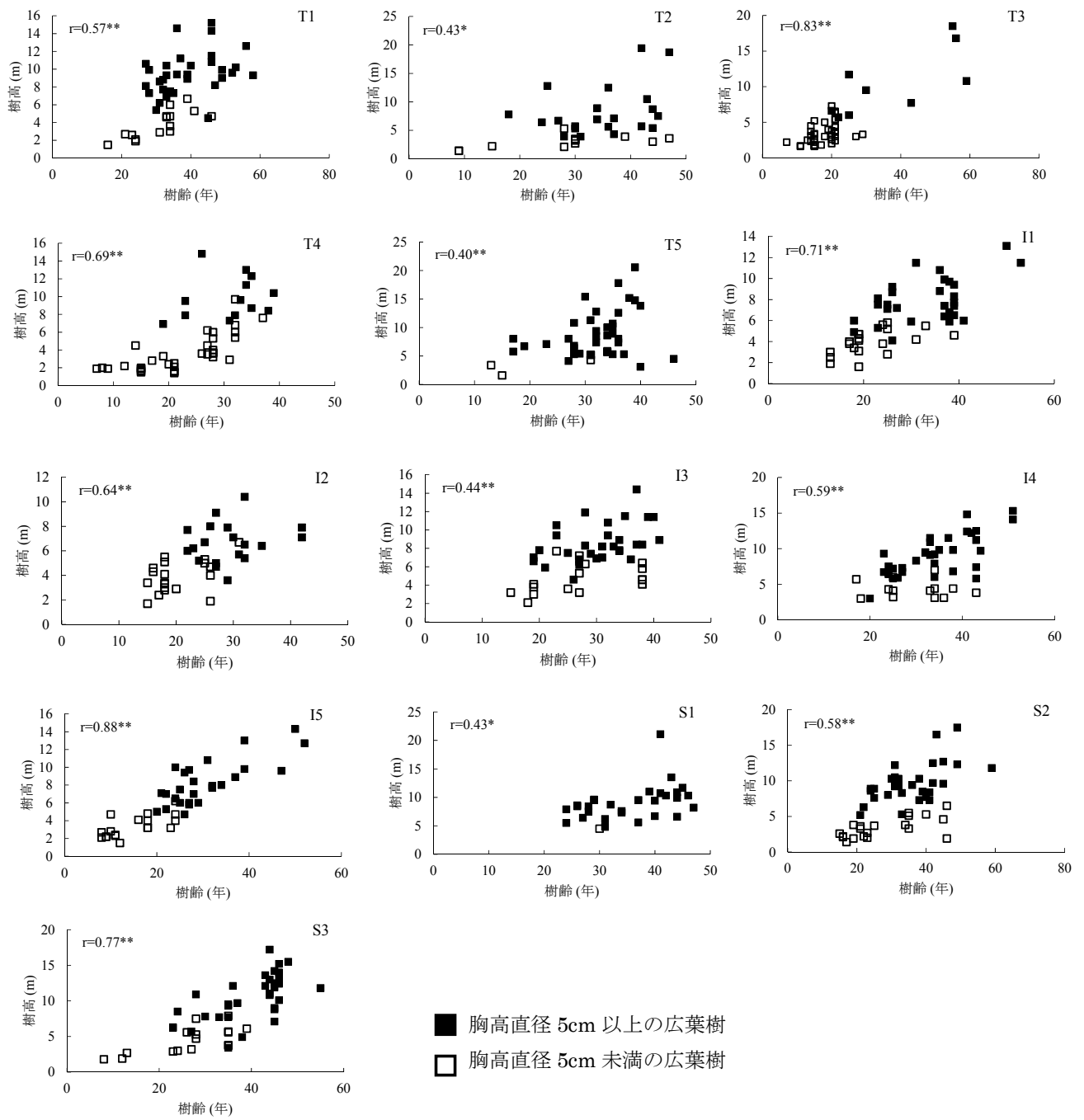


図 10. 樹齢と樹高の関係
 r はピアソンの積率相関係数、
 **は $p < 0.01$ 、*は $p < 0.05$ を示す。
 グラフ右上に林分名を示す。

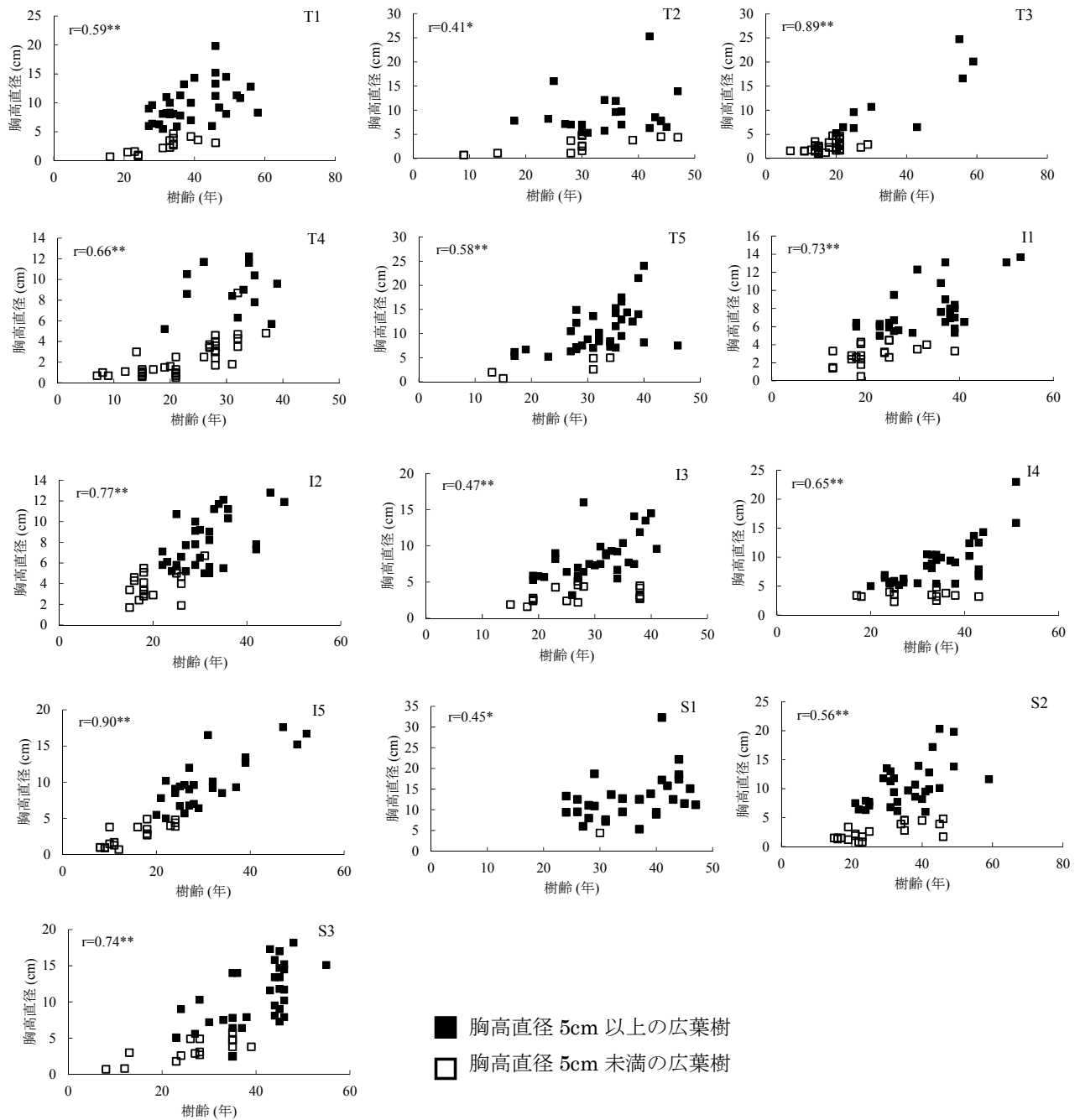
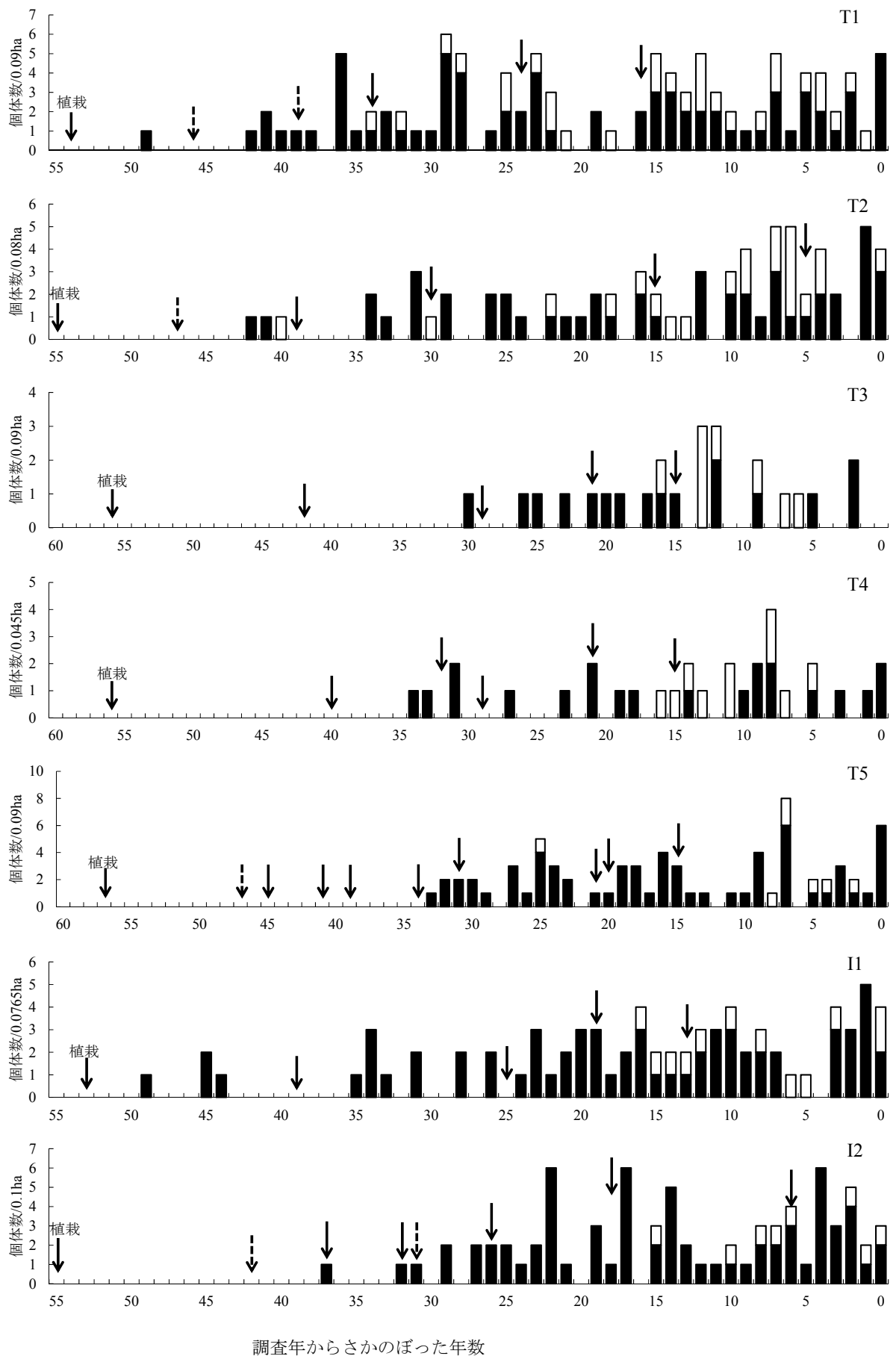


図 11. 樹齢と胸高直径の関係

r はピアソンの積率相関係数、
 $**$ は $p < 0.01$ 、 $*$ は $p < 0.05$ を示す。
 グラフ右上に林分名を示す。



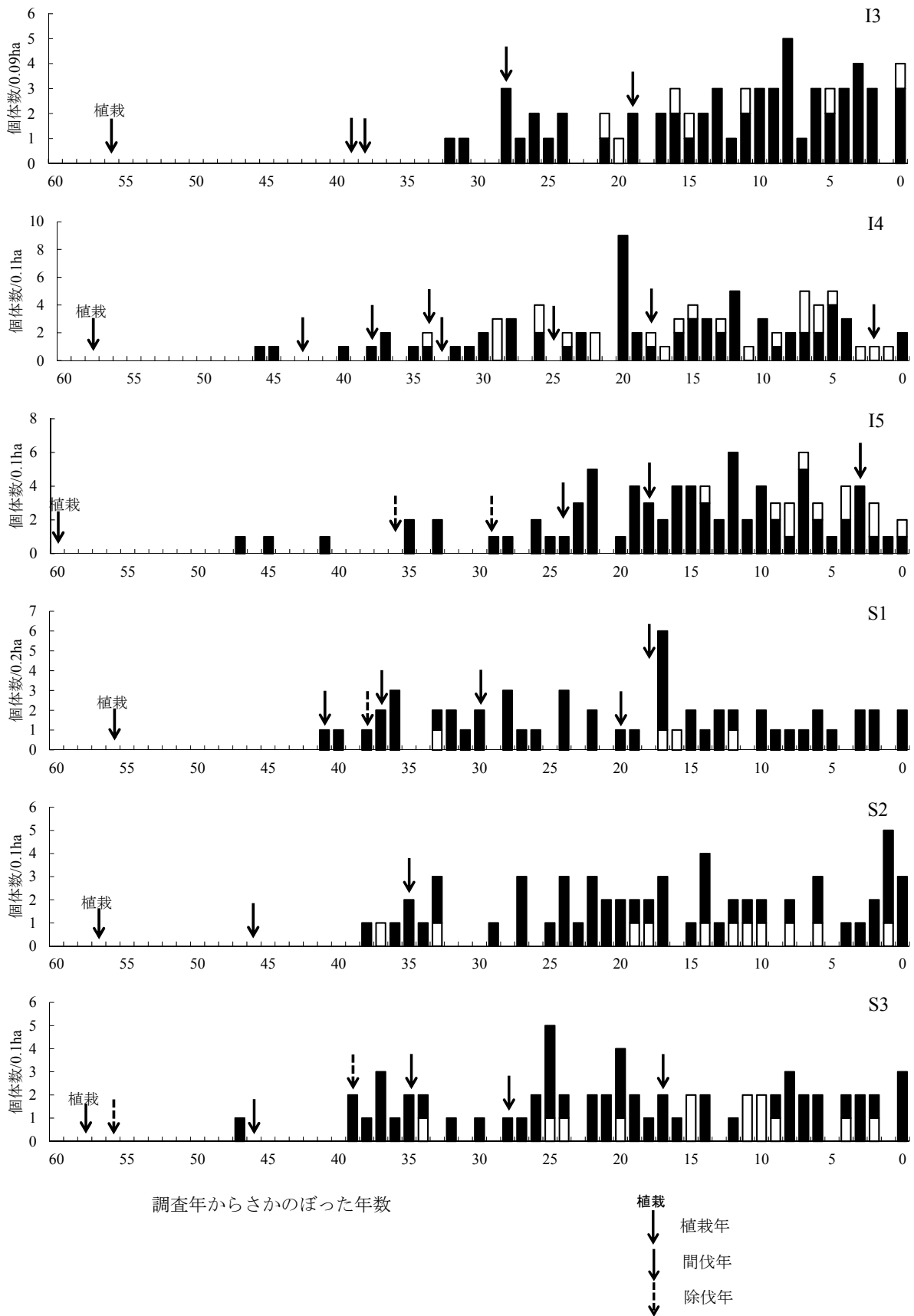


図 12. 肥大成長増大期

縦軸は肥大成長増大期となった個体数を示す。
グラフ右上に林分名を示す。

27年間に上層樹高は3.7 m 成長し、ホオノキは9.0 m 成長した。T1 林分は調査時に55年生、地位指数は24である。間伐は55年生、65年生時に R_y を0.1ずつ低下させ、それぞれ R_y を0.52、0.46とした。広葉樹で最も樹高の高いシナノキは31年後、林齢が86年の時に樹高が25.1 m と予測された。この時のカラマツの上層樹高は26.6 m であり、31年間に上層樹高は3.0 m、シナノキは9.9 m 成長した。調査時に56年生で、地位指数が23のT2林分では、間伐を56年生時に1回行い、 R_y を0.56から0.45に低下させた。広葉樹のうち最大樹高のシラカンバは、シミュレーション開始16年後、林齢が72年のときに樹高が25.0 m となり、この間に5.6 m 成長した。一方、カラマツの上層樹高は72年生時に24.2 m であり、成長量は2.1 m であった。

収量比数が大きく密な林分ほど、間伐強度や頻度が大きく、間伐回数が多かった。密な林分であるT4林分は、1回目の間伐で収量比数を0.15低下させ、さらに2回目の間伐を5年後に行ったが、この間は収量比数を0.6以下に維持できなかった。また、いずれの林分でも、広葉樹が樹高25 m に達する時点までの広葉樹の樹高成長量は、カラマツの上層樹高の成長量の2倍以上であった。

4. 考察

4.1. 林況

一般に、針葉樹人工林では収量比数0.5~0.6が疎仕立て、0.6~0.7が中庸仕立て、0.7~0.8は密仕立てとされている。今回調査した林分は、調査時の収量比数では13林分中10林分が疎仕立てもしくはそれ以下、2林分が中庸仕立て、1林分が密仕立てに分類され、全体に疎な状態の林分であったことがわかる（表1）。また、調査時までの密度と蓄積の推移が明らかであった4林分について、密度管理図により過去の収量比数を求めた（図7）。これらの林分では、調査時だけでなく若齢時から収量比数が小さく、疎な状態で維持管理されてきたことがわかる。

各林分で個体数の多い樹種は異なっていた（表1）。一般に人工林内には種子源となる母樹が存在せず、種子は周囲の天然林から供給される。そのため、人工林内の樹種構成の違いには、種子

を供給する人工林周辺の母樹の種組成が異なることが影響しているものと考えられる。

広葉樹の種組成を更新特性別にみると、全林分で中間種と遷移後期種が9割以上を占め、遷移初期種はごくわずかしき出現しなかった（図3）。この結果は、既存研究（小山2002、花田ら2006、今ら2007、野々田ら2008）と一致している。この理由として、強光利用型である遷移初期種にとっては、大きなギャップが生じることのない人工林内の光環境が生残、成長に不適であるのに対し、耐陰性の高い中間種や遷移後期種にとっては生存可能な光環境であることが考えられる。また、種子散布型別にみると、動物散布型の種は少なく、風散布型の種や鳥散布型の種が多かった（図4）。この結果も、既存研究（長谷川・平2000、花田ら2006、野々田ら2008）と同じであり、通常、人工林内には種子の供給源となる母樹が存在しないため、種子散布力の大きい風散布型や鳥散布型の種は侵入できるが、種子散布力の小さい動物散布型の種は侵入が困難であるためと考えられる。

種組成に関して、地域による類似性がみられた（表4）。しかし、地域によらず、調査時点で樹高上位の広葉樹の多くが最大樹高25 m 以上に到達可能な種で占められている林分が多かった（表5）。このことは、比較的疎に管理されたカラマツ人工林では林冠層に到達できる広葉樹が侵入していることが多く、天然生広葉樹を利用して混交林化を図ることができる可能性があることが示されていると考えられる。

図5に示した樹高分布を、林齢41~51年生のカラマツ人工林において調査を行った花田ら（2006）の結果と比較した。花田らの調査では、カラマツは樹高20 m 前後にモードがあり、広葉樹は樹高10 m 以下に多く分布していた。本調査地においても、上層にカラマツ、下層に広葉樹が分布する2層構造になっているという点は共通する。しかし、本調査地ではカラマツの樹高のモードが25 m 前後にあり、花田ら（2006）の調査地よりカラマツの樹高が高いにも関わらず、多くの林分でカラマツと広葉樹が連続して分布していた。つまり、花田ら（2006）の調査地よりも広葉樹の樹高が高くなり、カラマツとの樹高差が小さくなっているといえる。このことから、人工林の林齢の増

表7. 混交林化の密度管理シミュレーションでの林況の推移

T4

地位指数: 29

林齢 (年)		57	62	72	84		
樹高 (m)	カラマツ	29.0	31.2	32.1	32.7		
	樹高の高い広葉樹						
	ホオノキ	16.3	17.6	21.1	25.3		
	ホオノキ	14.8	16.0	18.9	23.1		
	ホオノキ	13.9	14.8	17.2	21.3		
	ホオノキ	13.2	14.0	16.1	19.8		
		間伐前	後	間伐前	後	間伐前	後
	Ry	0.74	0.59	0.64	0.54	0.56	0.46
	RI (%)	16	21	19	22	22	26
	蓄積 (m ³ /ha)	456	362	440	370	398	326
	密度 (本/ha)	433	288	288	217	217	160

T1

地位指数: 24

林齢 (年)		55	65	86		
樹高 (m)	カラマツ	23.6	25.6	26.6		
	樹高の高い広葉樹					
	シナノキ	15.2	17.7	25.1		
	シラカンバ	14.6	17.0	24.2		
	ミズナラ	14.3	16.6	23.6		
	ミズナラ	12.9	14.5	20.5		
	ミズナラ	11.8	13.4	18.1		
	ハリギリ	11.5	13.1	17.4		
		間伐前	後	間伐前	後	
	Ry	0.62	0.52	0.56	0.46	0.46
	RI (%)	19	23	22	26	26
	蓄積 (m ³ /ha)	315	260	310	253	280
	密度 (本/ha)	411	310	310	230	230

T2

地位指数: 23

林齢 (年)		56	72	
樹高 (m)	カラマツ	22.1	24.2	
	樹高の高い広葉樹			
	シラカンバ	19.4	25.0	
	シラカンバ	18.7	24.3	
	カシワ	12.8	15.8	
	ハリギリ	12.5	15.3	
	ミズナラ	8.9	11.2	
	ミズナラ	7.8	10.3	
		間伐前	後	
	Ry	0.56	0.45	0.5
	RI (%)	22	26	26
	蓄積 (m ³ /ha)	253	203	250
	密度 (本/ha)	413	300	300

林齢ごとに、カラマツと樹高の高い広葉樹の樹高 (m)、Ry (収穫比数)、RI (林内相対照度 (%))、カラマツの蓄積 (m³/ha)、密度 (本/ha) を示す。

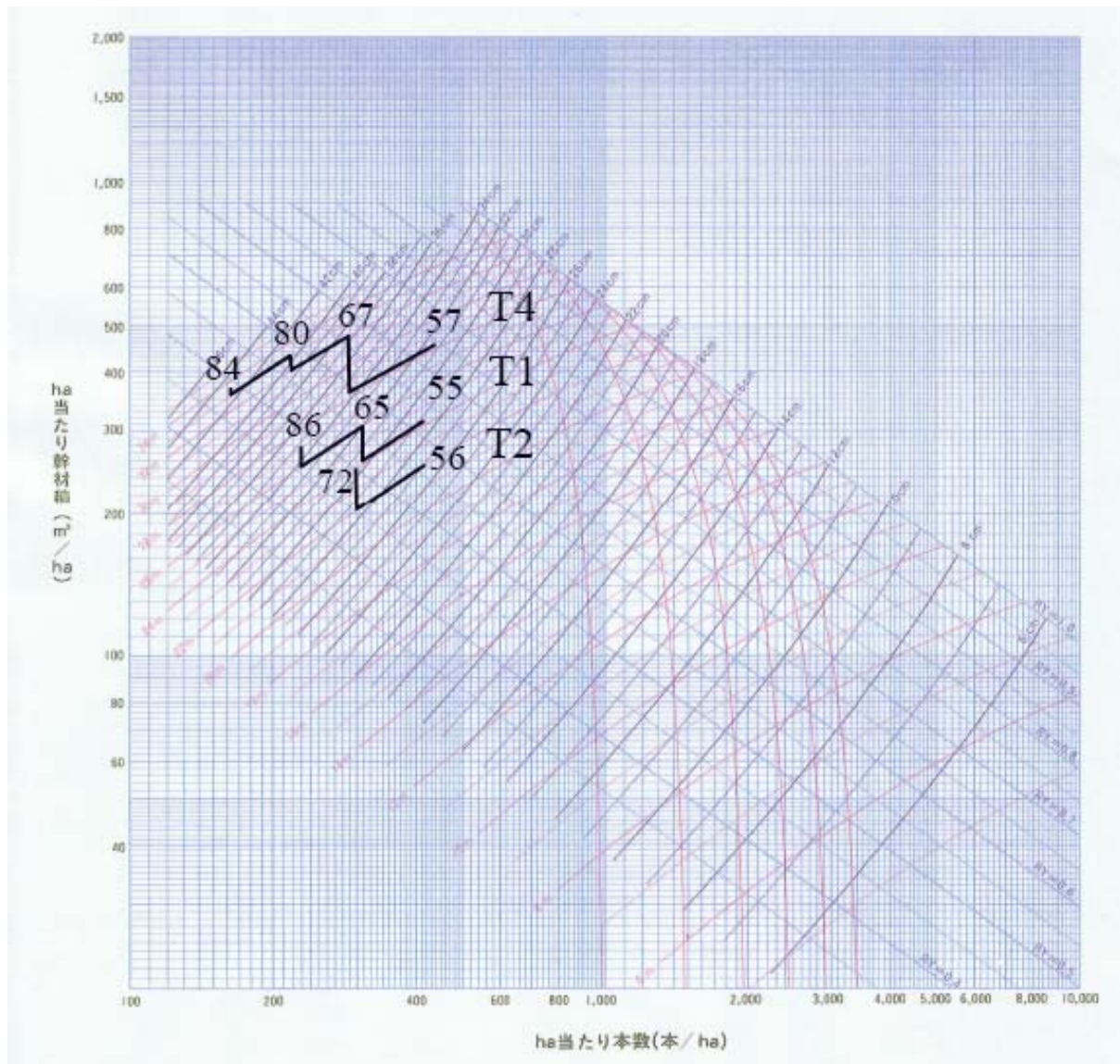


図 13. 混交林化の密度管理シミュレーションでの収量比数 (Ry) の推移
 T4 林分、T1 林分、T2 林分における収量比数の推移を示す。
 図中の数字は林齢を示す。

加に伴い、着実に広葉樹が成長していると考えられる。

4.2. 樹齢構成

植栽前に侵入した広葉樹はほとんどなく、また、植栽後5年間に更新した個体もほとんどみられなかった(図8、9)。この理由として、本調査地では、すべての林分で植栽前に全刈地拵えが行われ、植栽後3~8年間下刈りが行われており、仮に下刈り期間が終了するまでに広葉樹が天然更新したとしても、下刈りにより除去されたことが考えられる。

13林分中11林分で全個体数の6割以上が間伐の前後に更新していた。胸高直径5cm未満の個体では間伐翌年に更新した個体が顕著に多く、5cm以上の個体でも間伐年前後に更新している個体が多かった(図8、9)。5cm以上の個体については、樹高0.3mに達するまでの年数を推定し、サンプルの年輪数に加えて樹齢としているため、推定した樹齢に誤差のある個体も多いと考えられる。しかしながら、多少のずれがあるものの、間伐年前後に更新が集中していることから、間伐は広葉樹の更新の契機となっているといえるだろう。この結果は、既存研究と同じであり(村本ら2005、花田ら2006、Utsugi *et al.* 2006、今ら2007)、その理由として、間伐作業時に林床が攪乱されることや、上木の伐採によって地表面が明るくなることが考えられる。更新特性別、種子散布型別で見ると、遷移後期種と中間種間、風散布型種と鳥散布型種間に更新時期の明瞭な違いはなく、いずれも間伐時期に更新している個体が多かった(表6)。よって、更新特性、種子散布型の異なる種であっても、間伐が重要な更新契機であるといえる。また、一部の林分で間伐が行われていない時期にも多くの個体が更新していた(表6、図8、9)。その一例にS2林分が挙げられる。S2林分は、58年生で間伐回数が2回であり、一般的な施業が行われた場合の半分ほどの間伐回数となっている(表1)。一方で、カラマツの密度は370本/haであり、他の林分と比較して密な林分であるとはいえない(表1)。そのため、S2林分では、野鼠害などの間伐以外の要因により密度が減少した可能性が考えられる。そして、その結果、不定期な林冠の疎開によ

り林内が明るくなり、間伐と無関係に更新する個体が多くみられたと推測される。

樹齢と樹高間、樹齢と胸高直径間に正の相関はあるものの、同齢の個体でも樹高や胸高直径にばらつきがみられた(図10、11)。このサイズのばらつきは、樹齢のみで樹高や胸高直径が決まるのではなく、個体の局所的な周辺環境の影響や樹種の違いによって生じた可能性が考えられる。また、図10は、樹高が高く将来的に優占個体となる可能性の高い広葉樹には、最も初期に侵入した個体だけではなく、その後の間伐によって侵入した個体も含まれていることを示している。これは、間伐を繰り返すことによって混交林化に有効な広葉樹の侵入を繰り返し促すことができることを示している。

4.3. 広葉樹の連年肥大成長量と肥大成長増大期

広葉樹の肥大成長増大期と間伐との間に明瞭な関係がみられなかった(図12)。つまり、今回の調査林分においては、間伐が広葉樹の肥大成長を顕著に促進する効果はみられなかった。この結果は、野々田ら(2008)の結果と反する。その理由として次の2点が考えられる。1点目は植栽木の違いである。野々田ら(2008)の調査地が常緑性のトドマツ人工林であったのに対し、本調査地は落葉性のカラマツ人工林であった。元々、落葉性のカラマツ人工林は他樹種の人工林よりも林内が明るく、草本や木本が侵入・混生しやすい傾向が認められている(千葉1981、Kitaoka *et al.* 2009)。2点目は管理方法の違いである。野々田ら(2008)の調査地の初回間伐は40年生時で、密仕立ての林分であったのに対し、本調査地は、収量比数の小さい疎仕立て状の林分が多かった(表1)。また、複数林分で施業履歴から収量比数の推移を推定したところ、それらの林分は現在の収量比数とほぼ同程度もしくはそれ以下で維持されていた(図7)。つまり、本調査の対象としたカラマツ人工林では、間伐時以外でも広葉樹が成長できるだけの光環境であったために、間伐による顕著な成長促進効果がみられなかった可能性が考えられる。本調査林分に出現した個体の平均肥大成長量は0.4~4.0mm/年であり、野々田ら(2008)の調査林分での広葉樹の平均肥大成長量の0.5~1.5mm/年と比較

して大きかったことから、本調査林分の方が広葉樹の生育に適した環境であったと推測できるだろう。

また、全林分で、林齢が15～20年となる頃から肥大成長増大期となる個体が出現し始め、林齢30年以降では連続して出現していた（図12）。このことが、単に広葉樹の個体数が林齢に伴い増加したことに起因しているのか、あるいは林齢に伴い広葉樹が成長しやすい環境になったことに起因しているのかを検討した。林齢を10年ごとに区切り、その前期までに侵入していた個体が、当該期に肥大成長増大期となる回数の比率を算出した（表8）。その結果、林齢に伴い、肥大成長増大期となる個体の比率が増加する傾向はみられなかった。したがって、肥大成長増大期となる個体が高齢時に連続して出現していたのは、林分内の広葉樹の個体数が増加したためと考えられる。他方で、50年生以上においても、多くの林分で、肥大成長増大期となる個体の比率が若齢時と大きく変化していなかった。このことから、高齢級人工林においても広葉樹が肥大成長できる環境が維持されているといえるだろう。

4.4. 混交林化のための密度管理

混交林化のための密度管理方法を検討したT4、T1、T2林分では、それぞれ84、86、72年生時に広葉樹が樹高25mに達した（表7）。針葉樹人工林から混交林への移行段階とも位置付けられる長伐期林の主伐期は、カラマツ林では80～100年とされている。今回の結果では、長伐期林の主伐期にあたる約80年生時に広葉樹がカラマツと林冠層を形成し始めるといえる。そして、混交林となるには、その後さらに林冠層での広葉樹密度を高める必要がある。密度管理のシミュレーションをさらに20年程度延長させると、およそ100～110年生時に林冠層の広葉樹密度がT4林分では89本/ha、T1林分では67本/haとなり、林冠層でのカラマツとの混交率がそれぞれ35%、22%になると予測された。最高樹高のシラカンバ以外は樹高が低いT2林分（表7）を除いて、林冠層での広葉樹密度や混交率は林齢とともに高まるといえる。これらのシミュレーションは、広葉樹の樹高成長速度は樹高階ごとに一定であると仮定しているため現実的で

表8. 林分別肥大成長増大期個体の割合

カラマツ林齢(年)	林分名												
	T1	T2	T3	T4	T5	I1	I2	I3	I4	I5	S1	S2	S3
1～10	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
11～20	10.0	15.0	0.0	—	—	5.0	0.0	—	15.0	20.0	—	0.0	10.0
21～30	6.7	7.1	5.0	—	—	3.9	7.5	—	7.3	10.0	—	5.0	5.3
31～40	5.1	4.5	11.4	10.0	12.5	6.9	7.1	2.0	6.3	13.8	6.9	4.7	5.0
41～50	5.5	8.1	3.7	2.3	5.5	4.3	4.3	3.6	5.8	11.1	3.9	3.3	3.0
50<	6.1	8.8	0.9	3.4	5.7	9.3	8.3	5.4	6.4	8.9	4.8	4.3	3.9

カラマツ林の林齢別に、前期までに更新した広葉樹のうち、当該期に肥大成長増大期となった個体数の割合(%)を示す。

はないが、100年生以降には相観的にも混交林化が進むだろうと期待される。

また、シミュレーションの中では、いずれの林分でも広葉樹の樹高成長量はカラマツより大きく、カラマツの樹高に広葉樹が追いつく傾向が予想された(表7)。これは、地位の高いカラマツ林でも50年生以上の高齢級になると樹高がほぼ頭打ちになるのに対し、広葉樹の樹高成長速度は大きいためである。また、シミュレーション開始時に収量比数が大きく密な林分ほど、間伐強度や頻度が大きく、間伐回数が多かった(表7、図13)。密な林分のT4林分は、1回目の間伐で収量比数を0.15低下させており、これは他の林分の収量比数の変動幅が0.1~0.11であることを考えると比較的強度な間伐だったといえる。しかし、1回目の間伐後、収量比数を0.6以下に維持できなかったことから、密な林分では、ある程度収量比数を低下させるまでは、高い頻度や強度で間伐を行わなければ、林内相対照度を高く維持することは困難であるといえる。このことは、混交林化を指向する際に、疎な状態であることで、より容易に混交林化が達成できることを示唆している。

調査時に樹高上位の広葉樹のうち、最大樹高が25mに到達困難な種が多い林分もみられた。例えば、S1林分では樹高の高い広葉樹のほとんどがヤマグワであった。このような林分でも、下層に最大樹高が25m以上に到達できる種が多くあれば、100年よりもさらに時間はかかるだろうが、カラマツの密度管理に加え、広葉樹の除伐などを行うことにより混交林化する可能性はあると思われる。しかし、S1林分は、広葉樹の個体数の約8割がヤマグワで占められているため、密度管理により下層の広葉樹の成長を促進するだけでは混交林化は達成できないと考えられる。このような林分で混交林化を図る場合には、地表処理を行い天然更新を促したり、播種や植栽など天然更新以外の方法で混交林化を行うことが必要となるだろう。

4.5. カラマツ人工林の混交林化の施業指針

カラマツ人工林の混交林化に向けては、まず若齢段階から間伐を繰り返して行い、広葉樹の更新を促すことが必要となる。適宜間伐を行い、適切な密度管理を行うことは、広葉樹の更新だけでな

く、成長に対しても有利であると考えられる。そのため、50年生以下の保育段階の林分では、カラマツ林の健全性の維持、カラマツの成長促進に加え、広葉樹の侵入、成長促進のためにも密度管理を行うことが求められる。また、森林は林齢に伴い樹高が高くなると、風害への累積的な遭遇確率が上昇する(Gardiner and Quine 2000)。混交林化する林分は必然的に長伐期林となるため、林分の耐風性を維持することも考慮しなければならない。浦田(2008)は、カラマツ林の風倒被害を軽減する管理として、収量比数を0.5以下に維持する方法を示している。また、高密度で長期間管理した後に強度の間伐を行い、密度を急激に低下させることは、風害の危険性を高める(中村ら1995)。そのため、若齢段階から疎な管理を行うことは、高齢級林分での風害抵抗性を確保し、林分を維持するためにも欠かせない。

そして、保育段階を終え、収穫段階となる50年生以上の林分で混交林化を考える場合には、広葉樹の成長を促すために林内相対照度を確保するといった視点での密度管理を考慮する必要もある。林内相対照度を20~30%程度に維持できる収量比数0.6以下の密度で管理することで、80年生前後から広葉樹が林冠層に達し始め、さらに広葉樹の成長を促しながら100年生程度まで長期間林分を維持することで混交林化が可能になると考えられる。

謝辞

北海道大学農学部造林学研究室の小池孝良教授、斎藤秀之講師には多くの御助言、御指導をいただいたことを深く感謝いたします。また、樹木生物学研究室の佐野雄三講師、木材工学研究室技術職員の佐々木義久氏には、試料解析にあたりご協力いただきました。深く感謝いたします。

調査地の選定や利用、調査の円滑な実施などにあたり、十勝総合振興局森林室の須藤司氏(現胆振総合振興局)、十勝総合振興局池田分室の大橋徹也氏、胆振総合振興局森林室の佐々木圭司氏、中島勇二氏(現空知総合振興局)、空知総合振興局の岩田明賀氏(現十勝総合振興局)には様々な便宜を図っていただきました。厚く御礼申し上げます。

造林学研究室、森林資源生物学研究室、森林生態系管理学研究室、木材工学研究室内の学生諸氏には調査や試料解析にご協力いただきました。深く御礼申し上げます。

引用文献

- Antos, A. J., and Parish, R. (2002) Structure and dynamics of a nearly steady-subalpine forest in south-central British Columbia, Canada. *Oecologia*, 130: 126-135.
- 千葉宗男 (1981) カラマツ造林学. (所収): 浅田節夫・佐藤大七郎 (編著), カラマツ人工林の保育, 農林出版株式会社, 東京, 127-150.
- Gardiner, B.A. and Quine, C.P. (2000) Management of forests to reduce the risk of abiotic damage - a review with particular reference to the effects of strong winds. *For. Ecol. Manag.*, 135: 261-277.
- 花田尚子・渋谷正人・斎藤秀之・高橋邦秀 (2006) カラマツ人工林内における広葉樹の更新過程. *日林誌*, 88: 1-7.
- 原田 泰 (1948) 森林と陽光. (所収): 原田泰 (著), 森林と環境, 北方民生協会, 札幌, 3-53.
- 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.
- 肥後陸輝 (2002) ヒノキ人工林における広葉樹の侵入・定着過程. 日本林学会大会学術講演集, 113: 550.
- 北海道 (1985) カラマツ人工林の期待収益一長伐期施業のすすめ一. 林業専門技術員調査研究報告書, 59: 1-22.
- 北海道 (2011) 平成 22 年度 北海道林業統計. <http://www.pref.hokkaido.lg.jp/sr/sum/kcs/rin-toukei/22rtk.htm> (2012 年 2 月閲覧)
- 北海道 (2012) 中島式材積計算式. <http://www.pref.hokkaido.lg.jp/sr/srk/hyouka/charact/life-co2-01-2.htm> (2012 年 2 月閲覧)
- 北海道営林局 (1984) ササ生地の天然更新の実態. (所収): 特定地域森林施業基本調査 北海道における天然林施業 (ササ地における天然林施業), 北海道営林局, 123-208.
- 北海道立林業試験場 (2010) 北海道版カラマツ人工林収穫予測ソフト. <http://www.fri.hro.or.jp/syukakuyosoku/syukakuyosoku.html> (2012年2月閲覧)
- 北海道立林業試験場 (2007) カラマツ人工林施業の手引き, 北海道立林業試験場, 美唄, pp. 91.
- 石井勝彦・井原次徳 (1992) ヒノキ造林地内に発生した有用広葉樹について. 日本林学会関西支部論文集, 1: 129-132.
- 伊藤秀三 (1977) 群落の組成研究. (所収): 伊藤秀三 (編), 群落の組成と構造, 朝倉書店, 東京, 1-75.
- Kikuzawa, K. (1983) Leaf survival of woody plants in deciduous broad-leaved forests. 1. Tall trees. *Can. J. Bot.*, 61: 2133-2139.
- Kitaoka, S., Watanabe, M., Watanabe, Y., Koyama, M., Nomura, M. and Sasa, K. (2009) Growth of regenerated tree seedlings associated with microclimatic change in a larch plantation after harvesting. *Landscape Ecol. Eng.*, 5: 137-145.
- 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.
- Kodani, J. (1999) Invasion pattern of nine deciduous broad-leaved species in a snow-damaged *Cryptomeria japonica* plantation. *The Japanese Society of Forest Environment*, 41: 1-6.
- Koike, T. (1988) Leaf structure and photosynthetic performance as related to the forest succession of deciduous broad-leaved trees. *Pl. Sp. Biol.*, 3: 77-87.
- 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: 395-400.
- 小山浩正 (1996) 林内光環境の推定法 (2) 上木指標②カラマツ一. (所収): 林野庁(編), 大型プロ研究成果 9 複層林の造成管理技術の開発, 林野庁, 東京, 10-13.
- 小山浩正 (2002) 近自然型森林造成方法の提案一 (I) 人工レフュージアとしてのカラマツ林の価値一. *北方林業*, 54: 193-197.
- 水井憲雄・畠山末吉 (1984) カラマツ人工林の台風

- 被害と耐風性. 北林試研報, 22: 1-9.
- 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およぼす列状間伐の影響—間伐 5 年後の種組成—. 九州森林研究, 58: 59-62.
- 中村松三・糸屋吉彦・太田敬之・石田秀雄 (1995) スギ人工林の林分構造と台風被害. 日本林学会論文集, 106: 401-402.
- 野々田秀一・渋谷正人・斎藤秀之・石橋 聰・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.
- 大住克彦 (2009) 森林の造成. (所収): 森林総合研究所 (編), 森林大百科事典, 朝倉書店, 東京, 321-346.
- 林野庁 (2009) 人工林林分密度管理図, 日本林業技術協会, 東京, pp. 15.
- 林野庁 (2011) 多様で健全な森林の整備・保全. (所収): 林野庁 (編), 森林・林業白書 平成 23 年度版, 全国林業改良普及協会, 東京, 54-81.
- 坂上幸雄 (1985) 造林地に侵入した広葉樹の樹種数と本数. 北方林業, 37: 1-4.
- 佐藤孝夫 (2006) 新版 北海道樹木図鑑 [増補版]. 亜璃西社, 札幌, pp. 319.
- 清和研二・菊沢喜八郎 (1989) 落葉広葉樹の種子重と当年生稚苗の季節的伸長様式. 日生態会誌, 39: 5-15.
- 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—. 東北森林科学会誌, 8: 1-9.
- 浦田 格 (2008) 風害を軽減するための針葉樹人工林の林分管理指針. 北海道大学農学部森林科学科平成19年度卒業論文.
- Utsugi, E., Kanno, H., Ueno, N., Tomita, M., Saitoh, T., Kimura, M., Kanou, K. and Seiwa, K. (2006) Hardwood recruitment into conifer plantations in Japan: Effects of thinning and distance from neighboring hardwood forests. *For. Ecol. Manag.*, 237: 15-28.
- 矢島 崇 (1982) 針広混交林における主要構成樹種の成長過程に関する研究. 北大演研報, 39: 1-54.

Summary

We investigated species composition, age and tree size of natural broadleaved trees and examined influences of thinning on invasion and growth of the broadleaved trees in 13 *Larix kaempferi* plantations older than 50 years old in Hokkaido. In addition, we simulated density management necessary for conversion of the larch plantations into mixed stands of larch and broadleaved trees. In this simulation, relative light intensity in larch plantations was assumed to be kept favorable for growth of broadleaved trees, and we examined a management guideline to convert larch plantations into mixed stands. Yield indices of most investigated plantations were lower than 0.6. Most broadleaved trees regenerated in two years after thinning. No apparent influence of thinning on diameter growth of broadleaved trees was observed. Therefore, thinning was the chance of regeneration of broadleaved trees in larch plantations. In the simulation for the management guideline, it was expected that broadleaved trees became to be canopy trees about 80 years old in plantation age, and the ratio of broadleaved trees in the canopy layer was estimated to be about 30% at approximately 100 years old. In the management guideline for stand conversion, repeated thinning is necessary for natural regeneration of broadleaved trees in larch plantations, and sparse management is recommended in tending stage of the plantations. Sparse management (yield index < 0.6) is also recommended in harvest stage of the plantations for stand conversion into mixed stands of larch and broadleaved trees. According to this management guideline, broadleaved trees will reach the canopy when larch stands are approximately 80 years old, and the plantations will be mixed-forests physiognomically when plantations are about 100 years old.

Keywords: *Larix kaempferi*, mixed-forests, broadleaved trees, thinning, natural regeneration

付表 1. 調査林分の植栽方法と立地条件

地域	林分名	地拵え方法*	植栽本数 (本/ha)	標高** (m)	斜面傾斜 (°)	斜面方位	土壌
十勝	T1	全刈火入れ	3000	10-30	3	SW	褐色森林土
	T2	全刈火入れ	3000	200-230	5	NW	褐色森林土
	T3	全刈火入れ	3000	130-180	8	N	褐色森林土
	T4	全刈火入れ	3000	100-190	6	N	黒色土
	T5	全刈火入れ	3000	90-230	7	NW	黒色土
胆振	I1	全刈	3000	150-180	5	S	未熟土
	I2	—	3000	100-180	7	NE	褐色森林土
	I3	全刈	3000	120-160	7	SW	褐色森林土
	I4	全刈火入れ	3000	110-180	6	NW	未熟土
	I5	—	3000	70-100	6	S	褐色森林土
空知	S1	全刈火入れ	3000	60-170	15	NW	褐色森林土
	S2	全刈火入れ	3000	150-280	9	SW	褐色森林土
	S3	全刈火入れ	3000	200-280	9	S	褐色森林土

* —：不明。

** 最低-最高。



I4 林分の様子



S3 林分の様子