

枝打ちと芽かきによるセンダンの高品質材生産に関する研究

横尾, 謙一郎

<https://hdl.handle.net/2324/4784686>

出版情報 : Kyushu University, 2021, 博士 (農学), 課程博士
バージョン :
権利関係 :

博士論文

枝打ちと芽かきによるセンダンの高品質材生産に関する研究

九州大学大学院生物資源環境科学府

環境農学専攻サステイナブル資源科学教育コース

木質資源理学研究室

横尾 謙一郎

枝打ちと芽かきによるセンダンの高品質材生産に関する研究

横尾謙一郎

The production of high-quality sendan (*Melia azedarach* Linn.) wood with pruning and bud pruning.

目 次

第 1 章 序論	1
第 2 章 センダン幼齢林における枝の形態および枝打ちが材への巻込みと変色に与える影響	9
2-1 はじめに	9
2-2 材料と方法	9
2-2-1 調査地	9
2-2-2 枝打ち後の巻込みおよび変色の発生状況	11
2-2-3 密度試験地における枝径と着生高	12
2-2-4 解析方法	13
2-3 結果	14
2-3-1 枝打ち後の巻込み状況および材の変色発生率	14
2-3-2 植栽密度が枝径と着生高に与える影響	16
2-4 考察	20
2-4-1 枝打ちによる巻き込みと材の変色	20
2-4-2 枝の形態と枝打ち時期	21

第3章 芽かきがセンダン幼齢木の成長と幹曲りに与える影響および

芽かきの時期・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・24

3-1 はじめに・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・24

3-2 材料と方法・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・24

3-2-1 試験地・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・24

3-2-2 芽かきおよび調査方法・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・26

3-2-3 解析方法・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・28

3-3. 結果・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・28

3-3-1 樹高と肥大成長・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・28

3-3-2 芽の発生時期と発生高・・・・・・・・・・・・・・・・29

3-3-3 最大矢高およびその出現高・・・・・・・・・・・・34

3-4. 考察・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・37

3-4-1 樹高と肥大成長・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・37

3-4-2 芽の発生時期と発生高・・・・・・・・・・・・・・・・37

3-4-3 芽かきによる幹曲りの抑制・・・・・・・・・・・・39

第4章 芽かきしたセンダンにおける木材性質の樹幹内変動・・・・41

4-1 はじめに・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・41

4-2 材料と方法・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・41

4-2-1 実験方法・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・41

4-2-2 解析方法・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・44

4-3	結果と考察	44
4-3-1	成長特性	44
4-3-2	気乾密度	46
4-3-3	曲げ弾性率と曲げ強さ	53
4-3-4	材の利用における芽かきの有効性	58
第5章	芽かきしたセンダン林分における現存量の推定	60
5-1	はじめに	60
5-2	材料と方法	60
5-2-1	試験地および供試木	60
5-2-2	測定方法	65
5-2-3	解析方法	67
5-3	結果	69
5-3-1	芽かきしたセンダンの各器官への現存量配分	69
5-3-2	相対成長関係による林分の現存量の推定	72
5-3-4	考察	77
5-4-1	現存量の配分が直径成長量に与える影響	77
5-4-2	相対成長関係による各現存量の推定	80
5-4-3	木材利用を考慮した幹材積の推定精度	81
第6章	総合考察	84
	要約	87

謝辭	92
引用文獻	93
Summary	99

第 1 章 序論

我が国の木材の自給率は 2002 年の 18% から 2015 年には 33% まで回復し（林野庁 2020）、国産材の利用が進みつつあるが、スギ（*Cryptomeria japonica*）およびヒノキ（*Chamaecyparis obtusa*）など針葉樹の利用が中心であり、家具等に使う広葉樹用材は輸入に大きく依存している（全国天然木化粧合単板工業協同組合連合会 2017）。しかし、優良な天然広葉樹材の世界的な減少や熱帯林保護政策のために、広葉樹原料の安定供給が困難になりつつある。こうした背景を基に近年、国内ではこれまで積極的に利用されてこなかった未利用広葉樹に注目が集まるようになってきており、特に早生樹に対する期待が高まっている（全国天然木化粧合単板工業協同組合連合会 2017）。早生樹は、産業植林では、高い成長速度（年平均成長速度 15 m³/ha 以上）で工業用の丸太が生産され、植栽から 20 年以内に収穫されるものと定義されており、主要な樹種としてユーカリグランディス（*Eucalyptus grandis*）を中心とした熱帯産および温帯産のユーカリ類、アカシアマングウム（*Acacia mangium*）、メリナ（*Gmelina arborea*）、ファルカタ（*Paraserianthes falcataria*）、ポプラ類（*Populus spp.*）があげられている（Cossalter and Pye-Smith 2003）。我が国では、松村（2005）が、国内で植栽されている早生樹を日本産早生樹として定義しており、セン

ダン (*Melia azedarach*), チャンチンモドキ (*Choerospondias axillaris*) に加え, 外来種のユリノキ (*Liriodendron tulipifera*) とユーカーリ数樹種をあげている。その中でもセンダンは, 高級材として高値で取引きされているケヤキ (*Zelkova serrata*) やキリ (*Paulownia tomentosa*) の木目に似ているため, その代替材として家具材および建築材として利用されている (林 1969; 宮島 1994)。

暖帯の落葉広葉樹であるセンダンは, 東アジアから東南アジアにかけて広く分布しているが, 世界的に広く植栽されるようになり, 2019年時点で, 同種が存在する国は 111 ヲ国に達している (CABI 2019)。我が国では, 本州の伊豆半島以西, 小笠原, 四国, 九州 (沖縄を含む) に分布し (林 1969), 成長が極めて早いことから, 熊本県では造林に適した広葉樹として推奨されており, 15~20 年の短伐期施業による用材の生産が期待されている (熊本県林業研究指導所 2015)。センダンの生産目標は市場調査の結果から末口径 30 cm 以上かつ長さ 4 m の直材とされているが (宮島 1994), 一般にみられるセンダンの樹形は樹幹の低い位置で分岐するため, 直材の生産が困難とされてきた。そこで, 熊本県では, センダンの通直材生産のための選抜育種 (家入 1998) や幹曲りの抑制を目的とした施業試験 (横尾 1997) を実施することになった。

センダンを含む広葉樹の幹曲がりの評価については, 日本農林規格

(Japanese Agricultural Standard, 以下, JAS 規格) における広葉樹素材の規格を基準としており, 4 つの等級に分けられている (農林水産省 2007)。本規格によると広葉樹の幹曲がりには最大矢高で評価され, 直径の 10% 以下が 1 等, 10~20% が 2 等, 20~40% が 3 等, 40% 以上が 4 等と区分されている。センダンでは, 末口径 30 cm 以上が生産目標とされているので, 上記の基準で区分すると最大矢高は 1 等で 0~3 cm, 2 等で 3~6 cm, 3 等で 6~12 cm, 4 等で 12 cm 以上と区分され, この基準を用いて幹曲がりが評価されている。これまで, 広葉樹の幹曲がりを抑制する施業として, イヌエンジュ (*Maackia amurensis*) (青砥 1990), クリ (*Castanea crenata*) (横尾・福山 1997) およびケヤキ (吉野・前田 1998) などで高密度植栽による効果が検討されている。センダンで, 3,000, 5,000 および 7,000 本/ha の 3 段階の植栽密度試験を実施したところ, 2 等と評価された個体の割合はそれぞれ, 8, 10, および 16% と植栽密度が高いほど多く, 植栽密度を高くすることによって, 幹曲がりの抑制効果が高まることが認められている (横尾 2010)。しかし, 1 等の個体は全くみられなかったため, 高密度植栽による幹曲がりの抑制には限界があることも明らかになっている。

幹曲り抑制を目的とした保育技術のひとつに枝打ちがある。植栽密度 3,000 本/ha で育成されたセンダンを対象にした研究では, 1 等の個体はなく, 2 等も全体の 10% 以下であり, 枝打ちでも通直材の生産に

は不十分であることが示されている（横尾ら 2014）。

また、枝打ちを実施すると、枝打ち後の節から変色が発生することがある（段林 1993, 1994）。材部の変色は、原木丸太の品質や材価を下げる要因となる（例えば藤森ら 1984）。枝打ち後の材部の変色の例をみると、スギおよびヒノキでは、枝打ち時の枝径と変色発生率に関する報告が多くある（例えば、兵藤 1979；竹内 2002）。例えば、スギでは、枝径が 1 cm 以上になると変色発生が明瞭に増加するという報告や（宮地・那須 1978）、枝径 2 cm 以下では、枝の太さと変色発生率にほとんど関係は認められなかったという報告がある（藤森ら 1984）。

一方、広葉樹における枝打ちが変色に及ぼす影響に関しては、スギおよびヒノキと比べると少ないものの、いくつかの報告がある（例えば、小島 1996；小谷ら 2003）。例えば、枝径と巻込み期間や腐朽との関係について、ケヤキでは、自然落枝した場合に比べ、枝打ち後の節における変色の発生率が約 2 分の 1 に軽減されたこと（段林 1993）、枝径 3 cm 以下であれば枝隆（枝打ちされた枝の基部）が 3 年以内にほぼ巻込みが完了し（橋詰 1988）、材の腐朽も少ないこと（谷本 1990）が報告されている。また、ブナでは、枝径が 2～3 cm 程度までは、幹腐れ等の被害が小さいことが報告されている（谷本ら 1989）。センダンにおいても、材に変色や腐朽が入れば原木としての商品価値を失ってしまうため、これらが生じないような枝打ちする枝の径ならびに、

その適期を明らかにすることが必要である。

以上のように、センダンに対して幹曲りを抑制し、無節材を生産する施業を新たに検討する必要がある。まず、枝打ちについて検討を行うが、近年、センダンに対する有効な方法として「芽かき」施業（横尾 2017）が注目されている。本施業は、芽が枝になる前に取り除けば、幹曲りを抑制できると考えられ、開発されたもので、頂芽のみを残して、脇芽をすべて取り除くことから、植栽密度に関係なく単木単位で通直材を生産できる技術である（横尾 2017）。芽かきは春期の芽かき（以下、春芽かき）と夏期の芽かき（以下、夏芽かき）の 2 通りに分けられる。ただし、これまで芽かきされたセンダンの樹幹形に関する研究では幹が外見上通直になることが確認されているが（横尾 1997）、幹曲りとして定量的に評価した報告はなかった。本研究では、芽かきがセンダンの肥大成長および幹曲りに与える影響について検討した。

センダンの木材性質については、枝打ちされた個体の気乾比重、縦圧縮強さの樹幹内変動を調べた報告があるものの（松村ら 2006）、芽かきしたセンダンの木材性質およびその樹幹内変動については不明であった。また、松村ら（2006）は同じ母樹から育成した 17 年生センダンでも half-sib 間の気乾比重には差がみられたと報告しており、木材性質への遺伝の影響が大きいと考えられる。

現在、センダンに対して、熊本県では、肥大成長が早い系統の選抜

を進めており，選抜した系統の苗を植栽し，芽かきを実施している（熊本県林業研究指導所 2015）。しかし，芽かきをしたセンダン材の気乾比重や曲げ強度など木材の性質を各系統で比較した例は他県を含めみられない。

そこで，本研究では，芽かきしたセンダンの成長特性，木材性質およびそれらの特性への遺伝的な影響を明らかにするため，3クローンのセンダンの成長特性および木材性質の樹幹内変動を調べた。

また，現在，全国では用材生産を目的としたセンダン林は芽かきをすることを前提に造成されている。今後は，センダン林の造成および芽かきによる通直材の計画的な生産に加え，安定供給体制を確立し，市場への販路拡大を図るためには正確な材積情報の整備が不可欠である。しかしながら，センダンの幹材積を算出する際は，現在でも『立木幹材積表－西日本編－（日本林業調査会 1970）』でケヤキおよびクヌギ（*Quercus acutissima*）等の樹種が主な対象となっている九州地方の広葉樹Ⅰ類の幹材積式が用いられている。すなわち，この幹材積式を用いた場合，センダンにおける適切な材積量の算出が出来ないことが懸念される。したがって，将来的なセンダン材の利活用を推進していくにあたり，センダンの幹材積式の整備が重要かつ急務であると考えられる。

センダンでは芽かきにより必要な枝下高を確保できるので（横尾

1997, 2004), 林分単位で市場の需要を満たした通直材の生産・供給体制の確立が期待され, 用材として利用できる幹の材積を評価する手法の開発が必要となる。その方法が確立されれば, 用材に利用できない幹の部分, 枝および葉は, バイオマス燃料等といった他用途へ利用可能な現存量としての推定が可能となる。

本研究では, 芽かきを実施したセンダン林において, 幹, 枝および葉の現存量を測定し, 相対成長式を導き出した。特に, 幹の現存量のうち, 芽かきによって用材生産が可能な部分からも相対成長式を導いた。また, これまで芽かきによって生産目標となる末口径 30 cm 以上, 長さ 4 m の通直材に仕立てた時の目安となる胸高直径の情報がないため, 用材の末口側の伐採部位に当たる地上高 4.2m の部位の幹直径が 30 cm に達した時の胸高直径についても検討した。さらに, 今回センダン用として求めた幹材積の相対成長式とこれまで使われてきた広葉樹 I 類の幹材積式とを比較し, その有効性について検討した。一方, センダンは植栽後に適切な密度管理をしないと, 枝が枯れ上がり, 幹の肥大成長が抑制されてしまうため, 生産目標とされる末口径 30 cm 以上の用材を短期に育成することが難しい (横尾 2010)。そのため, 芽かき実施後に, 枝の枯れ上がりがみられた個体の各器官の現存量の地上高分布を調べ, 幹の直径成長を持続しやすい現存量の階層分布および適切な間伐時期についても議論した。

以上，本論文は，センダンを対象にして枝打ちが材に与える影響，芽かきが幹曲りと成長，木材性質の樹幹内分布に与える影響および幹材積の推定手法を明らかにすることを目的とした。そして，センダンの育成から用材として利用が可能な幹の木材性質および幹材積式の推定まで，木材生産過程全般にわたって体系的に検討した。

第2章 センダン幼齡林における枝の形態および枝打ちが材への巻込みと変色に与える影響

2-1 はじめに

本章では，節や変色がない長さ4 mの通直材を生産目標とするセンダンの施業指針を提示するため，センダンの幼齡林において，枝打ち時の枝径と枝打ち後の枝基部の巻込み年数および変色の有無との関係を調べた。次に，植栽密度が枝の着生高およびその径に与える影響について調査した。これらの結果から，枝打ちによる枝基部の巻込みを促進させるとともに変色の発生を抑制できる適切な枝打ちの枝径と時期および植栽密度について検討した。

2-2 材料と方法

2-2-1 調査地

調査は熊本県上益城郡甲佐町の熊本県林業研究・研修センター舞の原試験展示園（北緯：32°42'18"，東経130°45'50"，標高：30 m，地形：平地，土壤型：B1_D，年平均気温：16.4 °C，年平均降水量：2,019 mm）で実施した。当該地において，熊本県内で選抜された55本のセンダンの母樹（家入1995）のうち成長がよかった母樹3本から採取した種子を混ぜて生産した2年生苗（平均苗高：1.4 m）を用

いて、1995年3月に枝打ち試験地および植栽密度試験地を設定した。

枝打ち試験地の植栽密度は3,000本/haで、調査個体数は林縁木を除く36本（6行×6列）とした（図2-1）。植栽密度試験地は横尾

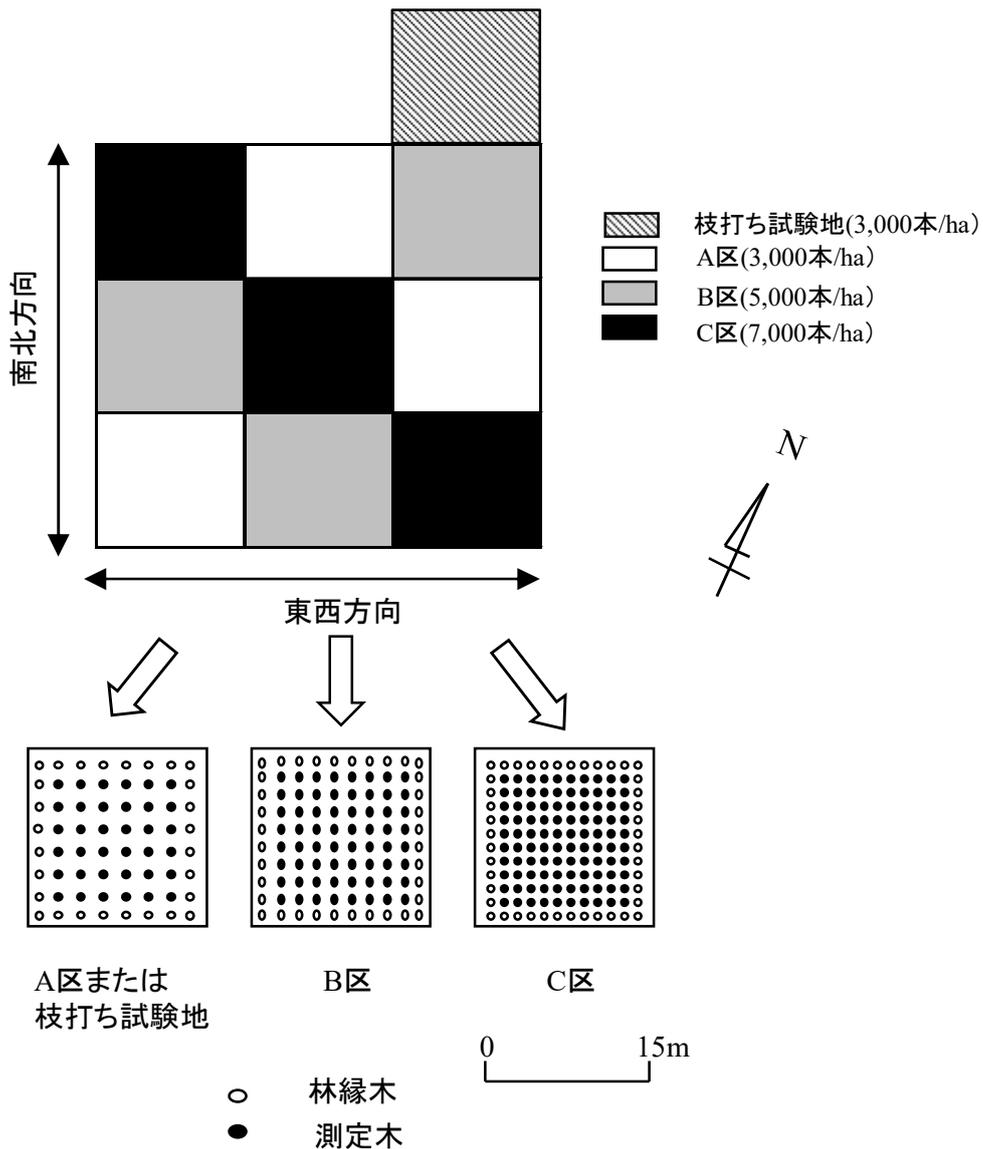


図 2-1 試験地の基本設定

(2010) のとおりで、植栽密度は 3,000 本/ha (A 区), 5,000 本/ha (B 区) および 7,000 本/ha (C 区) の 3 段階に設定されている。各

密度区の面積は 15 m×15 m (225 m²) とし、密度区の各辺に沿った林縁木は調査対象から除外した。したがって、各密度区における調査木の本数は、A 区が 36 本 (6 行×6 列)、B 区が 64 本 (8 行×8 列)、C 区が 100 本 (10 行×10 列) である。なお、各植栽密度の反復数は 3 回とし、東西方向および南北方向といった試験地内の立地間差の影響を排除するため、合計 9 プロットを図 2-1 のようにラテン方格となるように配置した。

2-2-2 枝打ち後の巻込みおよび変色の発生状況

枝打ち試験地においては、植栽後 3 年目の成長休止期である 1998 年 3 月に枝打ちを行った。枝打ちした高さは、伐採高 (0.2 m) や玉切り時の余尺を考慮し、将来 4 m の直材を採材するのに十分な範囲である伐採高から地上高 4.5 m までとした。対象範囲内に着生していた生枝および枯枝をすべて枝打ちした。枝打ちにはノコを使用し、生枝は

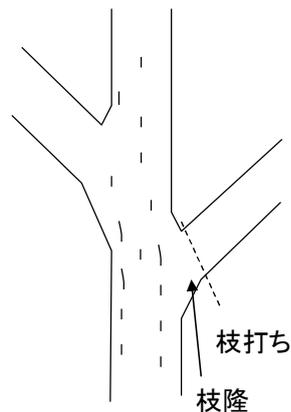


図 2-2 センダンの枝打ち方法

枝隆を残す方法で行った（図 2-2）。枯枝は自然落枝しているものもあったが，枝の基部は残っていたため，生枝と同様の方法で枝打ちを行った。なお，植栽前の苗には着生枝がなく，主幹のみであったことから，枝打ちした枝はすべて植栽後に発生したものとみなした。

枝打ち 4 年後の 2002 年 1 月に，枝打ち試験区内から調査対象木 8 本（平均樹高 $10.0 \text{ m} \pm 0.3 \text{ m}$ ，平均胸高直径 $8.9 \text{ cm} \pm 0.7 \text{ cm}$ ）を地上高 0.2 m で伐採し，伐採高から地上高 4.5 m までの幹を 1 m 毎（最上部のみ 1.3 m ）の丸太に切り分けた。次に，その丸太をミカン割り（加納ら 1959, 1966）で 8 片に分割し，節解析を行い，巻込みに要した年数および変色の発生状況を記録した。

2-2-3 密度試験地における枝径と着生高

密度試験地において，植栽後 3 年目の成長休止期である 1997 年 11 月～1998 年 3 月に，地上高 $0.2 \sim 5.2 \text{ m}$ における幹に着生する生枝および枯枝の本数を幹長 1 m ごとに計数するとともに，それらの地上高（以下，着生高： H_B ）ならびに直径（以下，生枝径および枯枝径： B_D ）を立木の状態で測定した（図 2-3）。また，同範囲において幹長 1 m ごとの最下部の幹直径の測定も行った。枝が太くなると枝隆部が大きくなるため，枝径の測定位置は付け根から 2 cm の位置とした（図 2-3 の B_D ）。枝の着生高は測桿を用いて cm 単位で，幹直径（2 方向）および枝径はデジタルノギスを用いて mm 単位で測定した。

なお，調査時における林分密度は植栽密度が高い区ほど減少しており，平均樹高は A 区が B 区および C 区に比べ有意に高く ($p < 0.05$)，平均胸高直径は植栽密度が低い区ほど有意に大きかった ($p < 0.05$) (表 2-1，横尾 2010)。

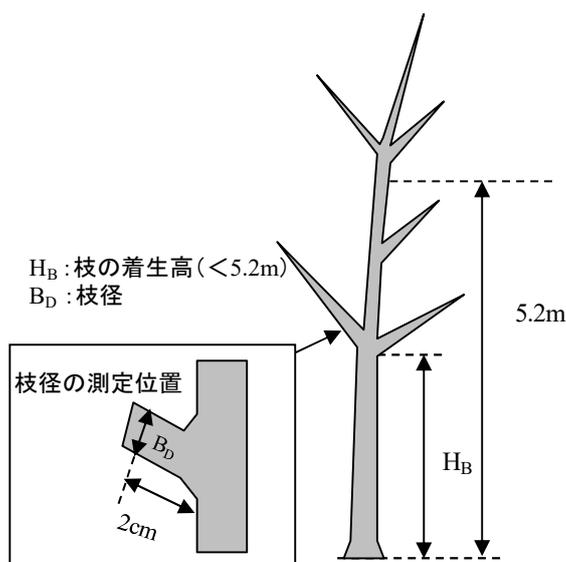


図 2-3 枝の着生高と枝径の測定方法

表 2-1 植栽後 3 年目の成長休止期におけるセンダン植栽密度試験地の状況

密度区	林分密度 (本/ha)	平均樹高 (m)	平均胸高直径 (cm)
A区	2,861	7.9 ± 0.6^a	7.9 ± 1.5^a
B区	4,583	7.5 ± 0.8^b	6.6 ± 1.5^b
C区	5,787	7.5 ± 0.9^b	5.9 ± 1.6^c

林分密度は 3 ブロックの平均値を示す。平均胸高直径，平均樹高，平均枝下高は平均値±標準偏差を示す。異なるアルファベットは密度区間で有意差があることを示す。(Tukey の HSD 検定による多重比較， $p < 0.05$)

2-2-4 解析方法

密度試験地における生枝および枯枝の着生数および枝径については，個体当たりの値を用いて，植栽密度およびプロットを因子とした

分散分析（ANOVA）を行った。着生数や枝径に植栽密度の有意な効果が認められた場合は、植栽密度区間で Tukey の HSD 検定による多重比較を行った。

各植栽密度区について、生枝径を応答変数、幹直径を説明変数とする直線回帰を行った。植栽密度によって回帰直線が異なるかどうかを調べるため、幹直径と植栽密度の交互作用が生枝径に与える影響（傾きの違い）を検定した（ANOVA）。傾きが有意に異ならなかった場合、切片の差の検定を行った（ANCOVA）。

これらの統計解析には、統計ソフト R3.4.1（R Development Core Team2017）を用いた。

2-3 結果

2-3-1 枝打ち後の巻込み状況および材の変色発生率

生枝の枝打ち後の巻込み状況および変色の発生状況を枝径別にみると、枝径 2 cm 未満では、枝打ち 1 年後までに全ての枝基部の巻込みが完了し、材面の変色の発生は認められなかった（図 2-4（A）、表 2-2）。枝径が 2～3 cm では、巻込みが完了した割合は枝打ち 1 年後で 77.8%、2 年後で 100.0% となり、材面の変色の発生率は 77.8% と枝径 2 cm 未満と比較して大幅に増加した（図 2-4（B）、表 2-2）。枝径が 3 cm 以上では、巻込みが完了するまでに 3～4 年を要し、変色の発生は

すべての枝打ち後の材面で確認された。

なお、枯枝についても、巻込みに要する年数および変色の発生は、生枝と大きな差異はなかった（表 2-2）。

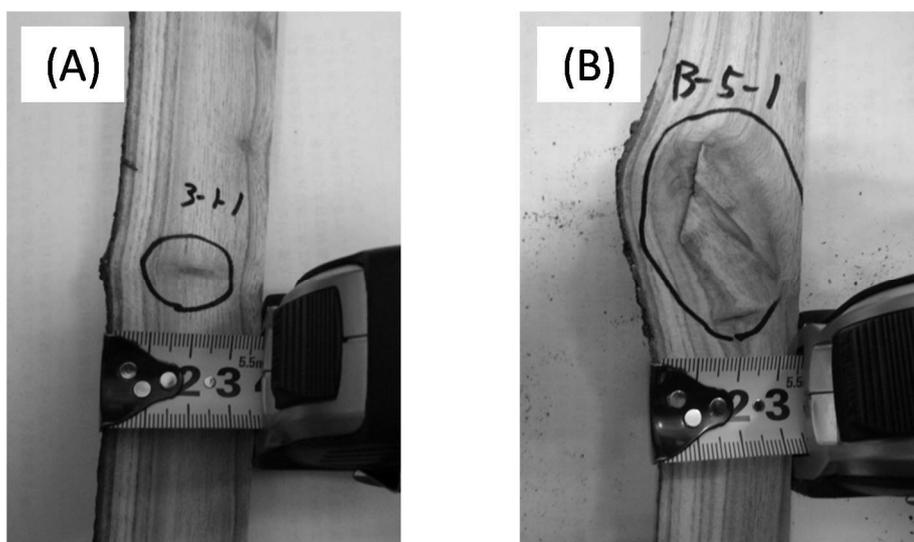


図 2-4 センダンにおける枝打ち後の巻込みおよび材面の変色の発生状況
(A) 変色なし, (B) 変色あり

表 2-2 枝打ち後の各枝階級における巻込み状況および変色発生率

	枝径 (cm)	処理数	巻込み完了(%)				変色発生率 (%)
			1年後	2年後	3年後	4年後	
生枝	0~1	2	100.0				0.0
	1~2	2	100.0				0.0
	2~3	9	77.8	100.0			77.8
	3~4	6	83.3	83.3	100.0		100.0
	4~5	4	0.0	75.0	100.0		100.0
	5~6	4	0.0	50.0	75.0	100.0	100.0
枯枝	0~1	22	100.0				0.0
	1~2	4	100.0				0.0
全体		53					

処理数（サンプル数）は測定対象木 8 本の合計。「巻込み完了」は巻込みが完了した枝数の割合を示す。

2-3-2 植栽密度が枝径と着生高に与える影響

植栽後 3 年目における地上高 0.2~5.2 m に着生した個体当たりの生枝数は 0.8~1.7 本、枯枝数は 8.9~10.0 本の範囲にあり、枯枝の割合が高かった (図 2-5)。生枝数は、植栽密度による有意な効果がみられ ($p < 0.001$)、A 区および B 区が C 区に比べ有意に多く ($p < 0.05$)、枯枝数は、植栽密度による影響は認められなかった ($p > 0.05$) (図 2-5)。

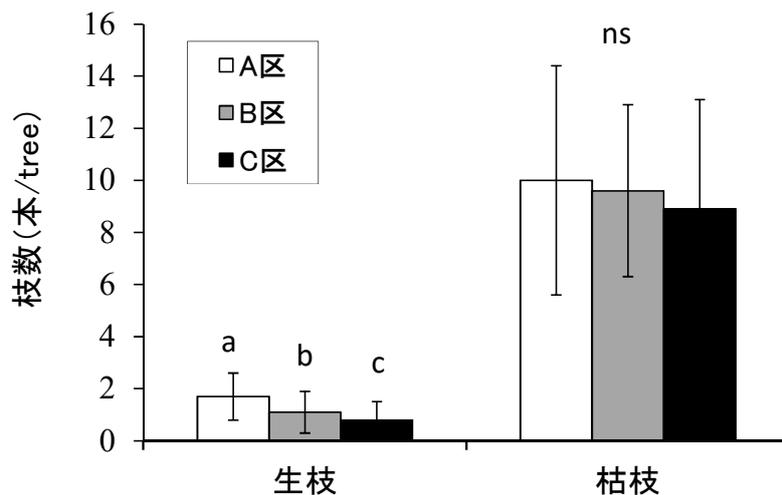


図 2-5 植栽 3 年後の各密度区における 1 個体当たりの生枝数と枯枝数

エラーバーは標準偏差を示す。異なるアルファベットでは有意差があることを示し (Tukey の HSD 検定による多重比較, $p < 0.05$)、ns は有意差がないことを示す (ANOVA, $p > 0.05$)

各密度区における調査個体の樹高は、いずれも植栽時が 1.2~1.7 m、植栽 1 年後が 3.2~3.7 m にピークをもつ分布を示した (図 2-6)。一方、植栽 3 年後における全枝 (生枝+枯枝) の着生高は全密度区とも 2 つのピークをもつ分布を示した (図 2-7)。すなわち、1 つ目のピーク

クは全密度区とも 1.2～1.7 m であり，この着生高は植栽時の樹高と同じ範囲であった。また，2つ目のピークは A 区で 2.7～3.2 m，B 区および C 区で 3.2～3.7 m と植栽 1 年後の樹高とほぼ同じであった。特に，各密度区とも，植栽時の樹高の 90% 以上を占めていた 1.2～1.7 m に（図 2-6），総枝数の約 50% が分布していた。

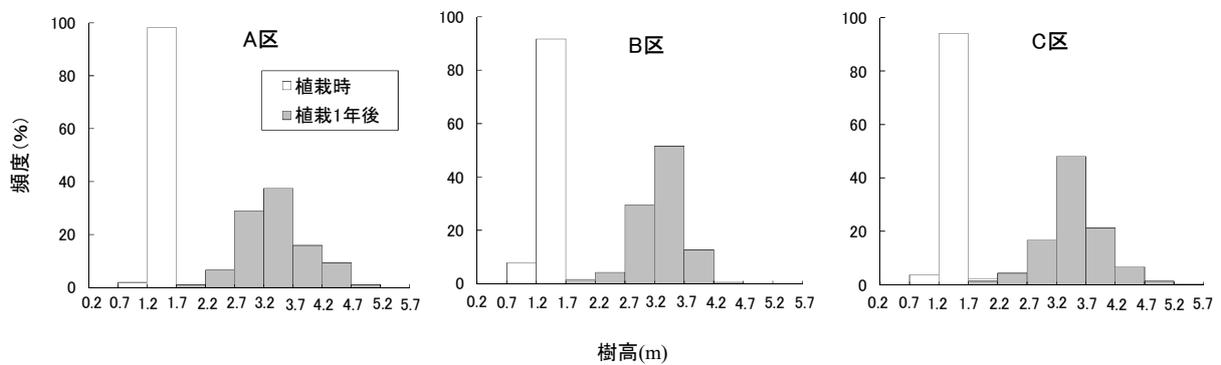


図 2-6 各密度区における植栽時と植栽 1 年後の樹高の相対頻度分布

枯枝の本数割合を着生高のピーク別にみると，地上高が低いほうから 1つ目のピークでは各密度区とも 90% 以上と非常に高く，2つ目のピークでも，76%（B 区）～83%（C 区）の範囲にあり，各密度区とも幹の上部まで枯枝の割合が高かった（図 2-7）。

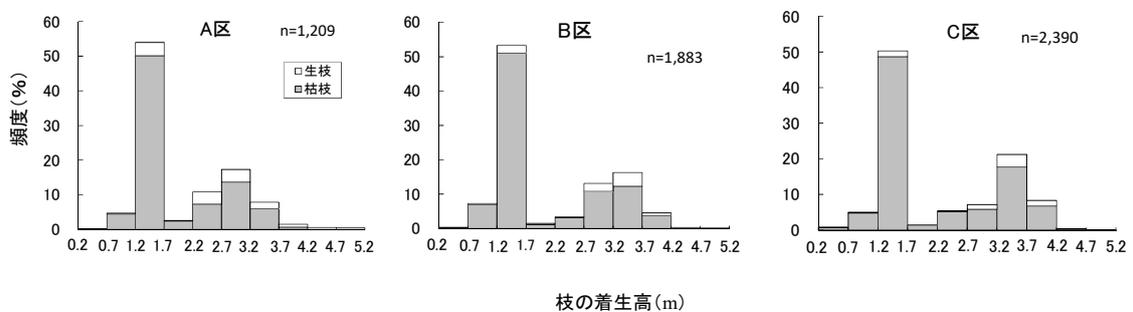


図 2-7 各密度区における枝の着生高の相対頻度分布

枝径階別の生枝の本数は，A区で2～5 cm，B区およびC区で2～4 cmの頻度が高かった（図 2-8）。平均生枝径は，A区（3.6 cm ± 1.4 cm）とC区（3.1 cm ± 1.1 cm）との間に有意差が認められた（ $p < 0.01$ ）。一方，枯枝では各密度区とも1 cm未満が50%以上を占めた。平均枯

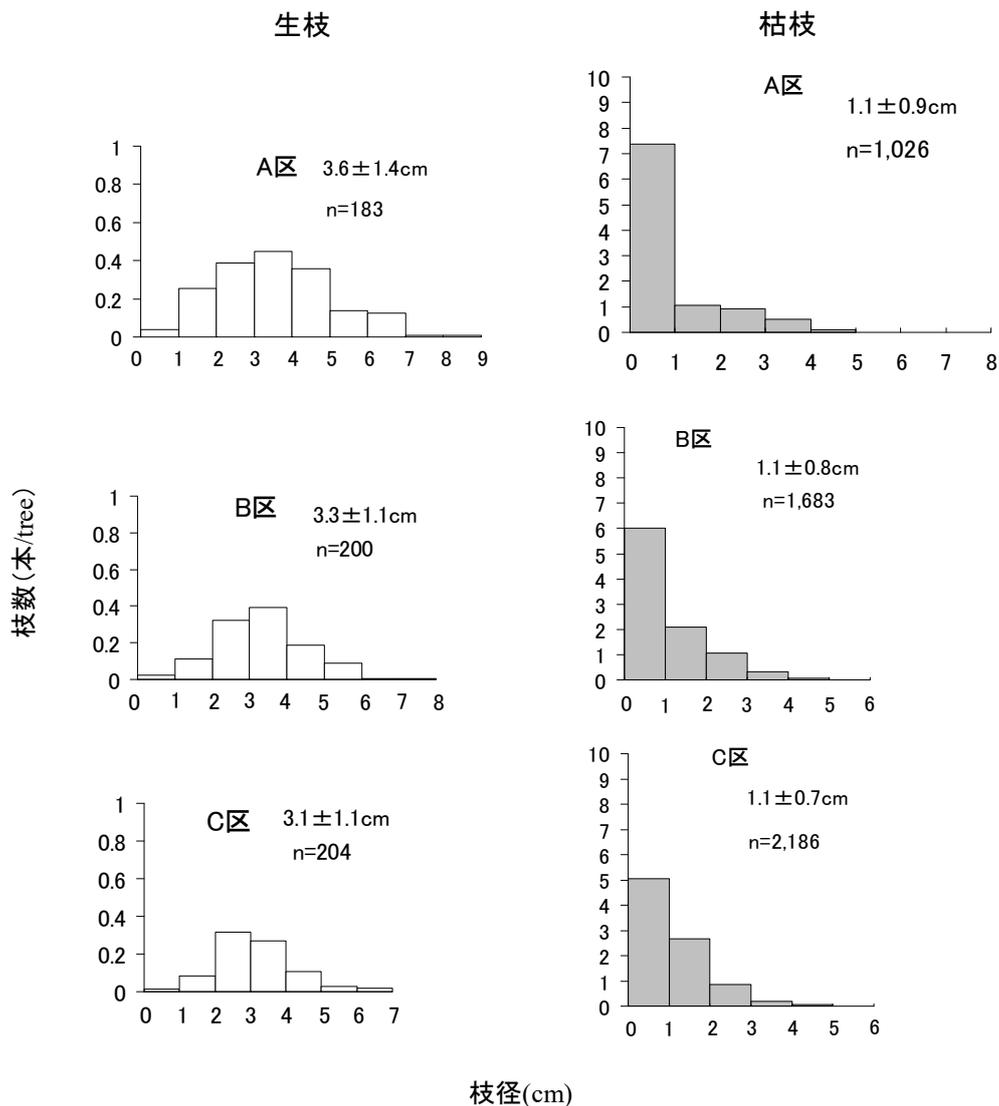


図 2-8 各密度区における生枝径と枯枝径の頻度分布

図中の数値は平均値±標準偏差を示す。また n は調査した総枝数を示す。

枝径は、各密度区とも 1.1 cm と密度区間に差はなかった ($p > 0.05$)。枝打ち試験における枝径 2 cm 以上で変色の割合が高くなる結果から、1 個体あたりの枝径 2 cm 以上の生枝本数を調べたところ、A 区、B 区および C 区でそれぞれ 1.5 本、1.0 本および 0.7 本と植栽密度が低い区ほど有意に多かった ($p < 0.05$)。枝径 2 cm 以上の枯枝本数は、A 区、B 区および C 区でそれぞれ 1.5 本、1.4 本および 1.1 本と C 区が他の区と比べ有意に少なかった ($p < 0.05$)。総枝数に対する枝径 2 cm 以上の割合は A 区が 26%、B 区が 23% および C 区が 19% と植栽密度が低いほど高かった。

次に、長さ 1 m の幹の下部（元口）における直径とその幹に着生する生枝径との関係をみると、各密度区とも、幹直径が太くなるにつれて生枝径も大きくなる有意な正の直線関係を示した ($p < 0.01$) (図 2-9)。生枝径に幹直径と植栽密度の交互作用の影響は認められなかったことから ($p = 0.965$)、幹直径と生枝径の直線関係における傾きには植栽密度による差異はないことが示された。一方で、切片は植栽密度で有意に異なった ($p < 0.01$)。なお、植栽密度が最も低い A 区では、B 区および C 区より幹直径および生枝径が大きい範囲まで広く分布していた。

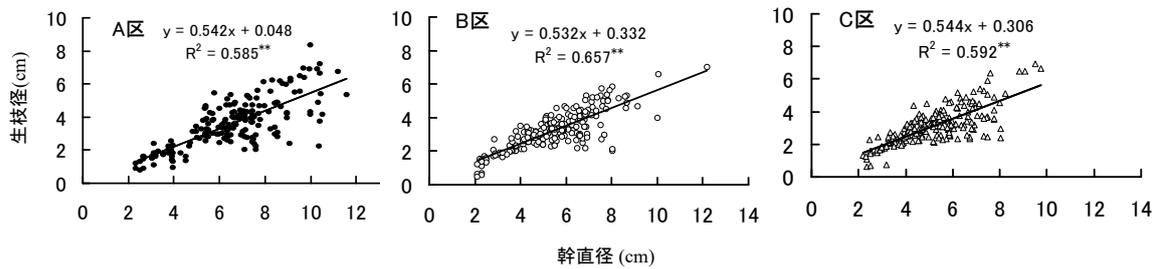


図 2-9 各密度区における幹長 1m ごとの幹直径(最下部)と着生する生枝径との関係

** $p < 0.01$.

2-4. 考察

2-4-1 枝打ちによる巻き込みと材の変色

枝打ち試験において、生枝径によって枝基部の巻き込み年数が異なっており、枝径 2 cm 未満だと 1 年であったが、それ以上だと数年必要であった(表 2-2)。また、生枝の枝打ち後における材面の変色発生についても、枝径 2 cm 未満だと確認されなかった(図 2-4(A), 表 2-2)。

ケヤキおよびブナでは、枝径 2~3 cm 以上で枝打ちすると枝基部の巻き込みに 3 年以上を要し、材面の変色の発生が多いとされる(橋詰 1988; 谷本 1990; 谷本ら 1989)。センダンでもこれらの樹種と同様に、枝径 2 cm 未満が変色の発生を抑制する、すなわち、枝打ちの効果を発揮する基準となると考えられる。また、ケヤキでは、枯枝を放置しておくとも自然落枝により、変色の発生率が枝打ちをした場合と比較して約 2 倍になるとされ(段林 1993, 1994)、その大きな要因が入皮と

される（藤森ら 1984；富田 1980）。センダンにおいて自然落枝後の入皮による変色が生じることはこれまで確認されており（未公表データ）、仮に今回の調査で枝打ちしなかった場合、ケヤキと同様にセンダンでも入皮による変色が生じた可能性がある。以上のことから、センダンの枝打ちは、生枝および枯枝ともに枝径が 2 cm に達する前に完了させることが重要だと考えられる。

2-4-2 枝の形態と枝打ち時期

植栽密度試験地におけるセンダンの樹高は、植栽 1 年後で 3.3～3.5 m、植栽 2 年後で 5.7～5.9 m に達した（横尾 2010）。センダンの 4 m の直材生産が目標であるならば、伐採高や余尺を考慮すると樹高が 4.5 m 以上必要であり、植栽 2 年後には樹高がそれ以上に達する。センダンの地上高 0.2～5.2 m の主幹に着生する生枝数と枯枝数を合わせた総枝数は 10 本前後であり（図 2-5）、枝の着生高には 2 つのピークがみられ、それぞれ植栽時および植栽 1 年後の樹高の分布域、すなわち梢端部付近であった（図 2-6, 2-7）。このような枝の着生をセンダンが示すのは、各年の成長初期に梢端部付近に枝が集中して発生し、同年中に伸長する幹には枝の発生が少ないためと考えられる。したがって、本試験地のように成長が良好な立地に植栽されたセンダンに対して枝打ちが必要となるのは、樹高が 4.5 m 以上となる植栽 2 年後で、その対象本数は 10 本程度である。

ところで、自生地における単木のセンダンの胸高直径は、約 20 年間成長量が持続する（横尾 2002）。しかしながら、今回の植栽密度試験地における胸高直径の成長量は、植栽 1 年後には高密度区ほど減少し、植栽 2 年後にはすべての密度区で大幅に減少した（横尾 2010）。また、生枝数は植栽密度が低いほど多い傾向を示したが（図 2-5）、総枝数に占める枯枝数の割合は各密度区とも 85% 以上と高い割合を占めていた（図 2-7）。これらのことは、本植栽密度試験地では、枝の旺盛な成長により早くから林冠が閉鎖した結果、胸高直径の成長が鈍化するとともに、生枝が枯れ上がったことにより枯枝の割合が高くなったと推察される。すなわち、早期に林冠が閉鎖する密度でセンダンを植栽することにより、小さい枝径で枝の枯れ上がりを生じさせ、枝打ちの作業負担を低く抑えるとともに、変色の発生を抑制することができると考えられる。

スギやヒノキでは、幹直径が太くなるにつれて着生している枝径は頭打ちになる傾向が報告されているが（竹内 2002）、若齢のセンダンでは幹直径が太くなくても生枝径は頭打ちにならず、直線的に大きくなる傾向を示した（図 2-9）。本植栽密度試験地の各密度区における植栽 2 年後の平均胸高直径は 4.7～6.4cm であり、かつ 4cm 以上の個体が多かったため（横尾 2010）、植栽 2 年後に 1 回目の枝打ちをすると胸高付近を中心に枝径 2cm 以上の枝が多くなる可能性が高い。すなわ

ち、センダンの生枝は幹の成長とともに太くなるので、枝打ち後に変色が生じない枝径が 2 cm までの時期、つまり幹直径が概ね 4 cm（図 2-9）に達するまでに枝打ちを完了させておくことが重要と考えられる。

各密度区とも総枝数に占める枝径 2 cm 以上の枝の割合は 19～26% であり、枝径 2 cm 以上の枝数は植栽密度が高い区のほうが少なかった（図 2-8）。このことから、植栽密度を高くすると枝の成長を抑制する効果があると考えられる。さらに、センダンでは、植栽密度が 5,000 本/ha 以上と高いほうが幹曲りを抑制する効果が高いことが明らかにされている（横尾 2010）。

以上のことから、成長が良好な適地に植栽することを前提として、長さ 4 m の変色が生じていない通直なセンダン材を生産する施業について整理すると、植栽密度は林冠が早期に閉鎖しかつ枝の成長および幹曲りを抑制することが期待される 5,000 本/ha 以上が望ましく、枝径が 2 cm に達する前と考えられる植栽 1 年後にすべての枝を対象に初回の枝打ちを実施する事が重要である。また、植栽 2 年後の成長休止期に余尺ならびに作業コストを考慮すると、地上 4.5 m まで着生する枝を対象に枝打ちを行う必要がある。

第3章 芽かきがセンダン幼齢木の成長と幹曲りに与える影響およ

び芽かきの時期

3-1 はじめに.

本章では，センダンの芽かき実用化のために，複数の家系（3 クローン）を用いてセンダンの芽かき試験を行い，芽かきの回数が幹曲りの抑制効果や樹高・直径成長に対する影響について検討した。さらに，芽の発生数・着生位置についても検討を行い，適切な芽かきのタイミングについても検討を行った。

3-2 材料と方法

3-2-1 試験地

調査地は，熊本県上益城郡甲佐町の熊本県林業研究・研修センター舞の原試験展示園（北緯：32°42'18"，東経 130°45'50"，標高：30 m，地形：平地，土壌型：B1_D，年平均気温：16.4 °C，年平均降水量：2,019 mm）である。熊本県内で選抜された幹の通直性が高かった 55 個体のうち（家入 1997），成長が良好だった 3 個体から組織培養で育苗した 3 家系（以下，クローン 1 型，18 型および M 型）の 1 年生苗（平均苗高 25.9 cm，平均地際径 4.6 mm）を 2001 年 3 月下旬に植栽した。前述のようにセンダンは高密度で植栽しなくても芽かき

により樹幹形を通直にできるので（横尾 1997），植栽密度を約 1,100 本/ha（植栽間隔 3 m）とし，各クローンを 3 反復，合計 9 プロットをラテン方格となるよう配置した（図 3-1）。

さらに，対照区として各クローンに 6 本（2 行×3 列）ずつ，隣接地に同じ密度で植栽した（図 3-1）。なお，試験地の外周には隣接するプロットと同じクローン苗を植栽し，林縁木とした。施肥は，IB 化成 S1 号（全国農業協同組合連合会：N:P:K=10:10:10）を植栽時に 250 g/本，植栽 2 年目および 3 年目の 4 月にそれぞれ 500 g/本および 1,000 g/本で施用した。

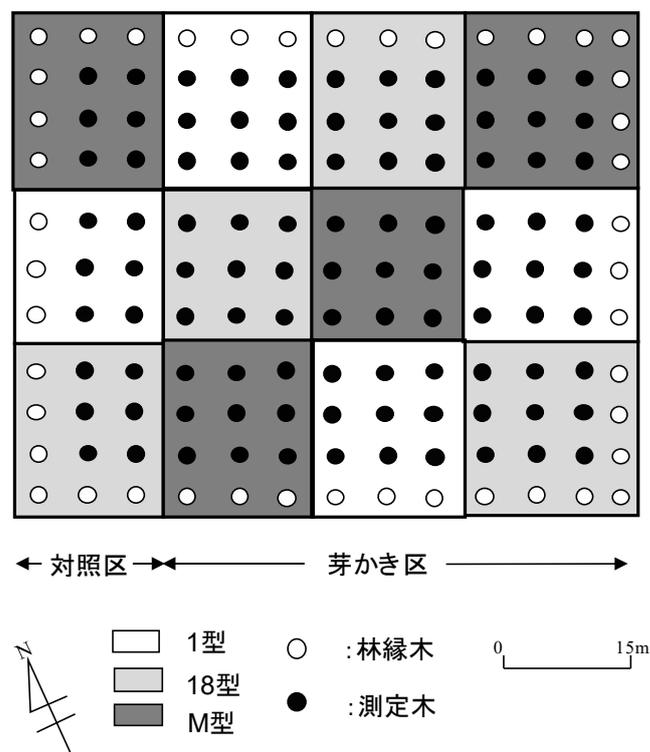


図 3-1 試験地の基本設定

3-2-2 芽かきおよび調査方法

1年生時および2年生時に樹高および胸高直径を測定した。植栽1年目は2001年4月中旬から9月下旬まで、植栽2年目は2002年4月から8月までの各月の中旬と下旬に芽かきを行った。各年4月の中旬に行った1回目の芽かきは、頂芽以外のすべての脇芽を取り除き、頂芽が発生せず脇芽のみの場合は、最も上部の脇芽のみを残して、それよりも上部の幹を切り落とす方法で実施した(熊本県林業研究指導所 2015)。2回目以降の芽かきは、前回の芽かき以降に発生した脇芽だけを取り除いた。なお、芽かきの実施高は、4 m材を生産目標としているため(宮島 1994)、収穫時の伐採高(0.2 m)および余積を考慮して地上高4.2 m以上(概ね4.5 mまで)とした。芽かきは芽の付け根から手指でかぐ方法を用いたが、付け根が木化したものは剪定鋏を使用して切断した。なお、芽かき時に芽の着生高の測定も同時に行った。

樹高、芽の着生高は測桿で1 cm単位、胸高直径はノギスを用いて東西および南北の直交する2方向を1 mm単位で測定し、その平均値を用いた。

センダンの幹曲がりには幹長4 m当たりの最大矢高を用い、芽かきが終了した2年生時に最大矢高とその出現位置(以下、最大矢高出現高)を測定した(図3-2)。最大矢高は4 mのスチール製の直線ポールを根張りの影響の少ない地上高0.3 mから4.3 mの幹にあてて5

mm 単位で，最大矢高出現高は測桿を用いて 1 cm 単位で測定した
(図 3-2)。

なお，芽については，まず植栽 1 年目および 2 年目における 1 個
体当たりの総発生数（単位は本/tree）のクローン間差を比較した。
次に，成長期（4～9 月）における各月の上旬から中旬および中旬か
ら下旬に発生した芽をそれぞれ各月の前半および後半に発生した芽
とし，成長期における 1 個体当たりの芽の発生数のクローン間差も
比較した。また，前年幹から発生した芽を「春芽」，当年幹から発生
した芽を「夏芽」と定義し，各芽の発生した高さについて，地際部
から 4.5 m まで 0.5 m 毎の分布をクローン毎に記録した。

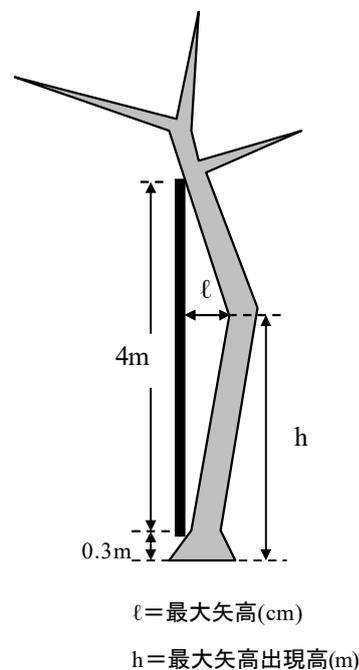


図 3-2 最大矢高の測定方法

芽かきによる幹曲がりの抑制効果は、最大矢高 3 cm 以下、すなわち JAS 規格で 1 等が得られる割合について、処理間およびクローン間で評価した。また、最大矢高出現高と 1 年生時の樹高との位置関係についても検討した。

3-2-3 解析方法

樹高、胸高直径、最大矢高および芽の発生数は、個体当たりの値を用いて、東西方向のブロック、南北方向のブロック、クローンおよびプロットを因子としたラテン方格法(鷲尾1997)による二元配置の分散分析(ANOVA)を行った。樹高、胸高直径、最大矢高、芽の着生数にクローン間の有意な効果が認められた場合は、クローン間で Tukey の HSD 検定による多重比較を行った。これらの統計処理には、統計ソフト R3.4.1 (R Development Core Team 2017) を用いた。

3-3 結果

3-3-1 樹高と肥大成長

植栽時、1 年生時および 2 年生時における各クローンの樹高および胸高直径の成長結果を表 3-1 に示す。

植栽後の芽かき区および対照区における平均樹高は 1 年生時がそれぞれ 2.37~2.59 m および 2.93~3.11 m、2 年生時が 5.91~6.17 m および

表 3-1 芽かき区および対照区における樹高および胸高直径

		系統	植栽時	1年生時	2年生時
樹高(m)	芽かき区	1型	0.26±0.06 ^a	2.59±0.45 ^a	6.17±0.54 ^a
		18型	0.25±0.07 ^a	2.37±0.53 ^a	5.91±0.44 ^a
		M型	0.25±0.07 ^a	2.57±0.51 ^a	6.04±0.82 ^a
	対照区	1型	0.28±0.02 ^a	3.11±0.10 ^a	6.42±0.16 ^a
		18型	0.29±0.02 ^a	2.95±0.13 ^a	6.11±0.20 ^a
		M型	0.27±0.05 ^a	2.93±0.21 ^a	6.18±0.22 ^a
胸高直径(cm)	芽かき区	1型		3.19±0.75 ^a	6.16±0.68 ^a
		18型		2.99±0.87 ^a	6.00±0.60 ^a
		M型		3.20±0.83 ^a	5.98±0.72 ^a
	対照区	1型		3.65±0.44 ^a	9.50±0.83 ^b
		18型		3.57±0.36 ^a	9.26±0.55 ^b
		M型		3.68±0.45 ^a	9.23±0.85 ^b

樹高，胸高直径は平均値±標準偏差を示す。
異なるアルファベットでは有意差があることを示す。(Tukey の HSD 検定による多重比較， $p < 0.05$)

6.11～6.42 m と旺盛な成長を示した (表 3-1)。樹高については，クローン間および処理区間に有意な差は認められなかった (表 3-1)。

胸高直径は，1年生時は芽かき区が 2.99～3.20 cm，対照区が 3.57～3.68 cm と処理区間およびクローン間で有意な差がみられなかったが，2年生時は芽かき区が 6.00～6.16 cm，対照区が 9.23～9.50 cm と対照区が芽かき区に比べ有意に大きかった ($p < 0.05$)。一方，同処理区間ではクローン間に有意な差は認められなかった (表 3-1)。

3-3-2 芽の発生時期と発生高

春芽は，植栽 1 年目が 1 型，18 型および M 型でそれぞれ 2.7，2.4 および 1.4 本/tree で，1 型が M 型に比べ有意に多く ($p < 0.05$)，植栽 2 年目はそれぞれ 21.0，17.1 および 18.8 本/tree と有意な差はみられなかった (図 3-3) ($p > 0.05$)。一方，夏芽は，植栽 1 年目が 1 型，18 型および M 型でそれぞれ 15.0，6.9 および 5.0 本/tree で 1 型が 18 型および M 型

に比べ有意に多く ($p < 0.01$), 植栽 2 年目はそれぞれ 22.4, 25.1 および 12.4 本/tree と 1 型および 18 型が M 型に比べ有意に多かった ($p < 0.01$) (図 3-3)。春芽と夏芽を合わせた総発生数のクローン間差には, 夏芽のクローン間差の影響が大きかった。すなわち, 植栽 1 年目は 1 型, 18 型および M 型で 17.9, 9.3 および 6.4 本/tree で, 1 型が 18 型および M 型に比べ有意に多く ($p < 0.01$)。植栽 2 年目は 1 型, 18 型および M 型でそれぞれ 43.5, 42.2 および 31.2 本/tree で, 1 型および 18 型が M 型に比べ有意に多かった (図 3-3) ($p < 0.01$)。芽かき区における芽の平均発生数の推移についてみると, 植栽 1 年目は 4 月中旬に芽かきを実施した後, 各クローンとも 7 月前半まで芽の発生はわずかであったが, 7 月後半に大きく増加し, 8 月前半まで多い傾向がみられた (図 3-4 (A))。ただし, 8 月後半以降, 芽の発生は大きく減少し, 10 月になると発生は確認されなかった (図 3-4 (A))。芽発生数のクローン間差は, 4 月前半は 1 型が

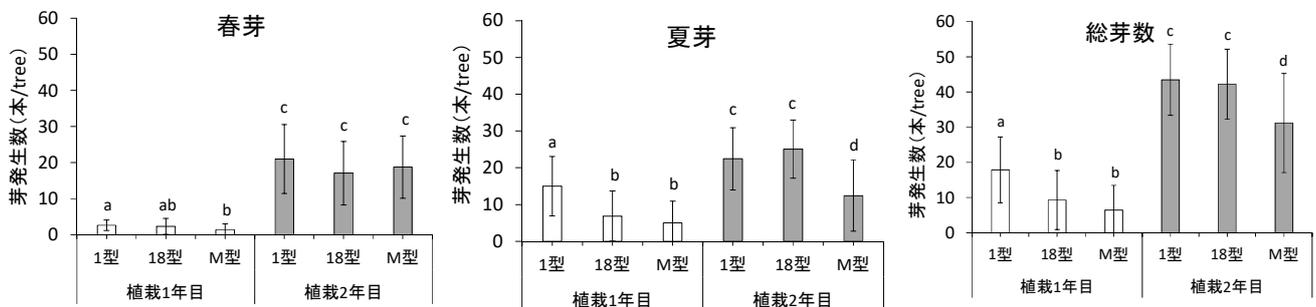
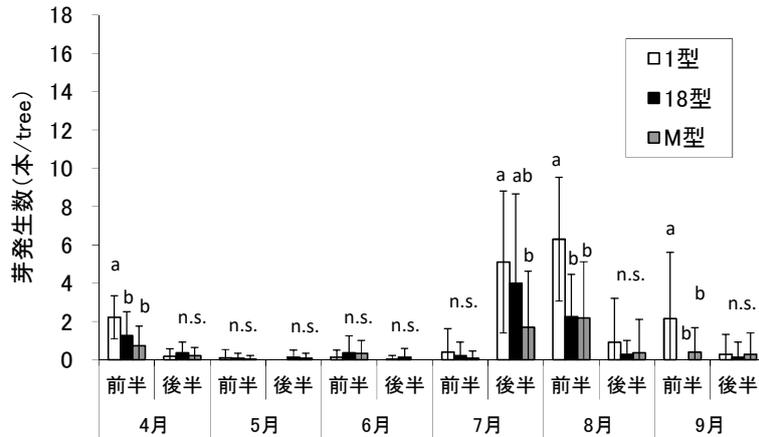
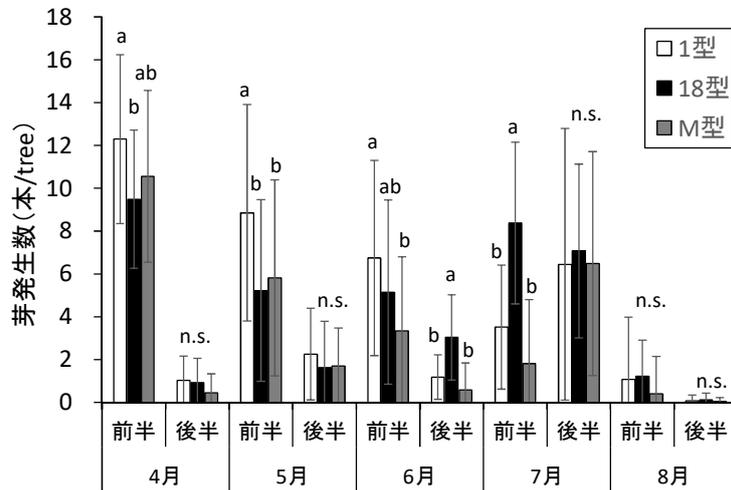


図 3-3 1 年生時および 2 年生時の芽の発生数

エラーバーは標準偏差を示す。異なるアルファベットでは有意差があることを示す。(Tukey の HSD 検定による多重比較, $p < 0.01$)



(A) 植栽 1 年目



(B) 植栽 2 年目

図 3-4 植栽 1 年目および 2 年目の芽発生数の推移

異なるアルファベットでは有意差があることを示し (Tukey の HSD 検定による多重比較, $p < 0.01$), n.s. は有意差がないことを示す (ANOVA, $p > 0.05$)

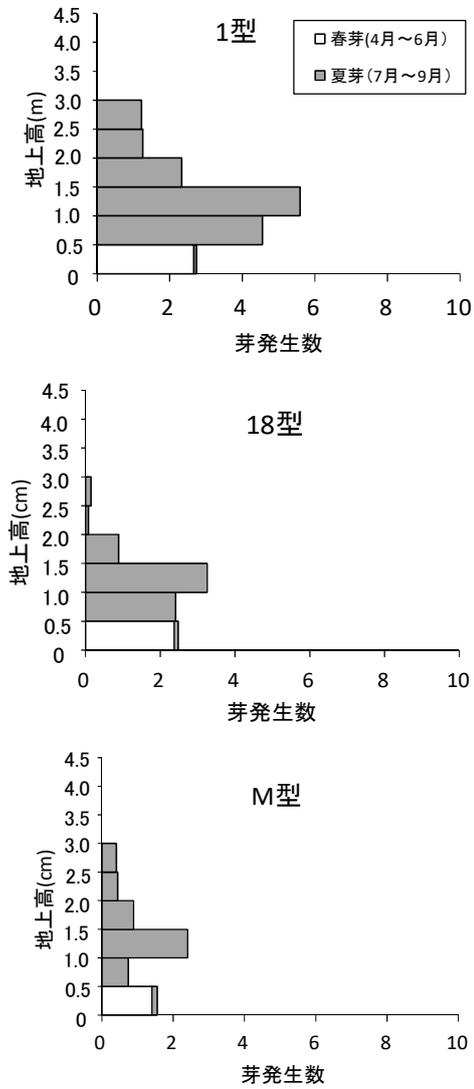
18 型および M 型に比べ、7 月後半は 1 型が M 型に比べ、8 月前半および 9 月前半は 1 型が 18 型および M 型に比べ有意に多かった ($p < 0.01$) (図 3-4 (A))。植栽 2 年目は 3 クローンとも発生のピークが 4 月前半、5 月前半、6 月前半および 7 月前半~7 月後半の 4 回みられた (図 3-4 (B))。ただし、8 月前半以降も芽の発生が多かったが、芽の地上高が 4.5m を超

えた個体が増加したので、9月以降の計測は実施していない。芽の発生数のクローン間差は4月前半から6月前半までと6月後半以降の傾向が異なった。すなわち、4月前半は1型が18型に比べ、5月前半は1型が他の2クローンに比べ、6月前半は1型がM型に比べ有意に多かった($p < 0.01$)のに対し、6月後半および7月前半は18型が他の2クローンに比べ有意に多かった($p < 0.01$) (図 3-4 (B))。

植栽1年目は各クローンとも春芽の発生高は植栽時の幹(以下、前年幹)の梢端部付近の地上高0~0.5 mであった(図 3-5 (A))。一方、夏芽の分布は地上高0~3.0 mと広く分布しており、地上高0~0.5 mではほとんど発生せず、いずれのクローンでも地上高1.0~1.5 mにピークがみられた(図 3-5 (A))。

植栽2年目は芽の展開が始まった4月前半に前年幹の梢端部付近から芽が多く発生した。また、春芽の分布は地上高1.0~3.5 mと植栽1年目に比べ範囲が広く、地上高2.0~2.5 mにピークがみられた(図 3-5 (B))。夏芽は地上高1.5~4.5 mに分布しており、発生数が多い範囲は、1型および18型が地上高2.5~4.5 m、M型が地上高3.0~4.5 mであった(図 3-5 (B))。

(A) 植栽 1 年目



(B) 植栽 2 年目

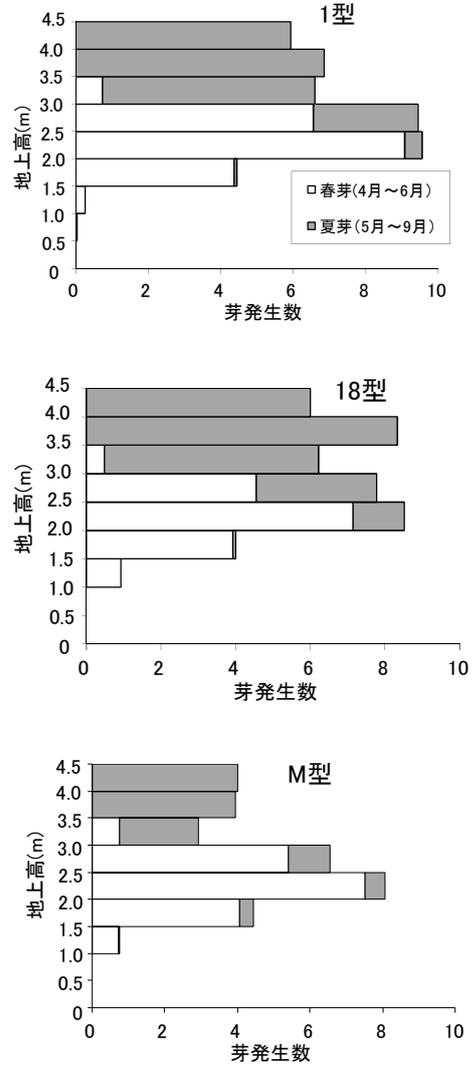


図 3-5 各地上高における芽の発生数

3-3-3 最大矢高およびその出現高

芽かき区と対照区における最大矢高の相対頻度を図 3-6 に示す。最大矢高のクローン別の平均値は、芽かき区は 2.20～2.56 cm、対照区は 11.20～15.33 cm と芽かき区が有意に小さく ($p < 0.01$)、芽かきによる幹曲りの抑制効果が認められた。対照区では 1 型が 18 型および M 型に比べ有意に小さかったが ($p < 0.01$)、芽かき区ではクローン間差は認められなかった (図 3-6)。広葉樹の素材の JAS 規格 (農林水産省 2007) を用いて評価すると、最大矢高 3 cm 以下の 1 等が得られる割合は芽かき区で、1 型、18 型および M 型でそれぞれ 65.4、70.4 および 80.0% と大きな割合を占めた。一方、対照区では 1 等および 2 等は全くみられず、大部分は 3 等または 4 等であった。

最大矢高出現高と 1 年生時の樹高について最小二乗法による一次回帰を求めたところ、芽かき区および対照区ともに決定係数は低かった (図 3-7)。ただし、最大矢高出現高は芽かき区が 1 年生時の樹高の上部および下部にほぼ同程度の個体数で分布していたのに対し、対照区は 1 個体を除き、すべて下部に分布していた (図 3-7)

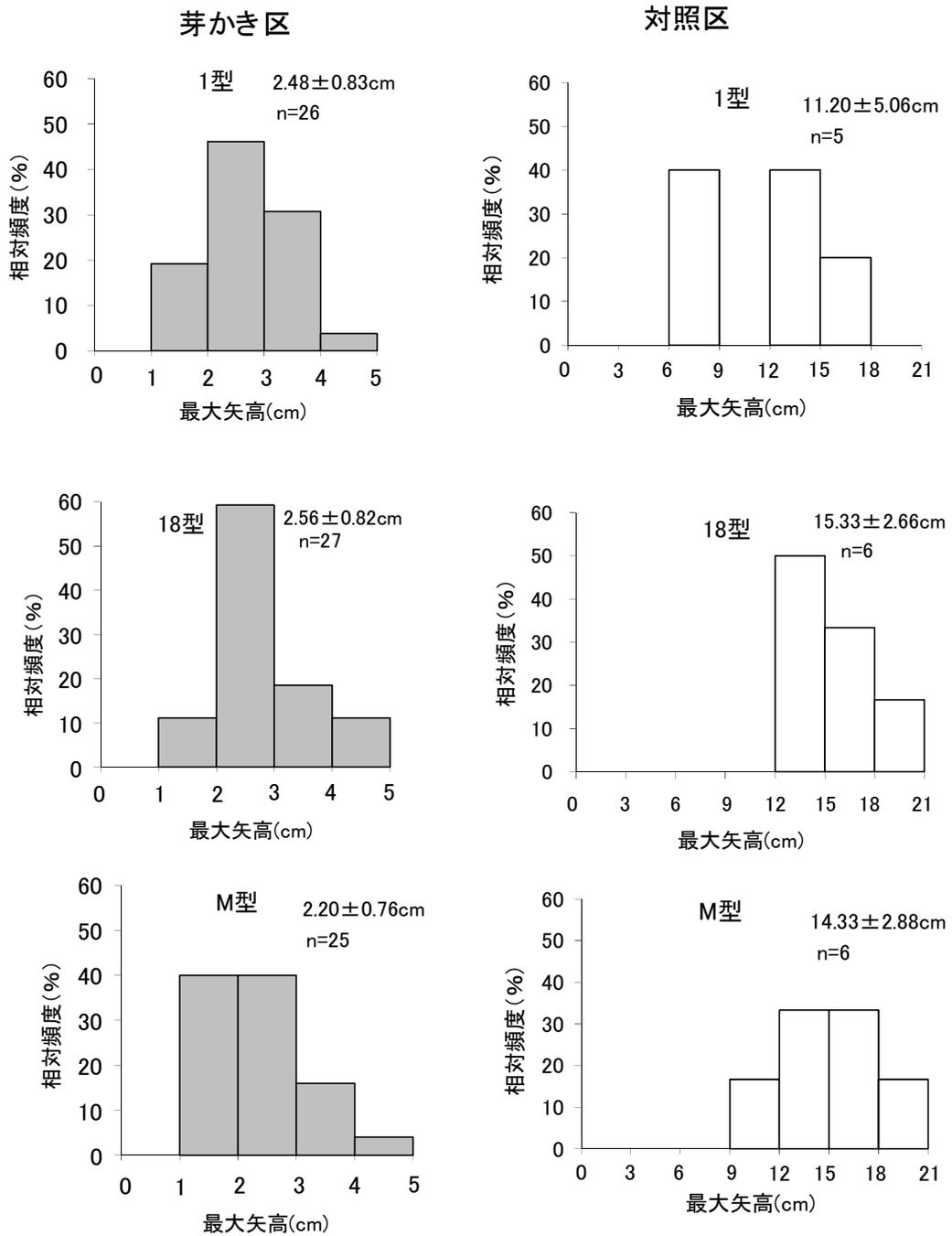


図 3-6 芽かき区および対照区における最大矢高

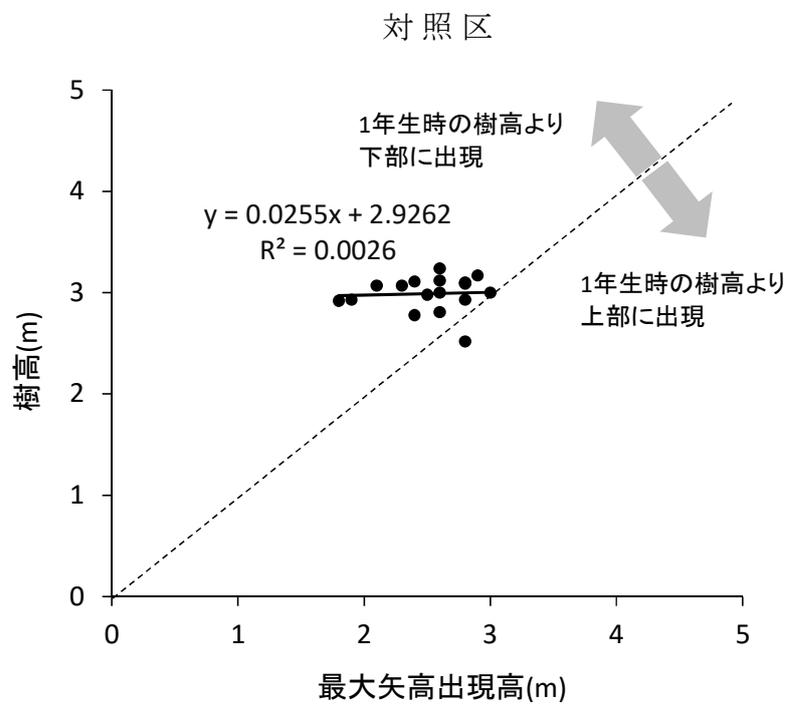
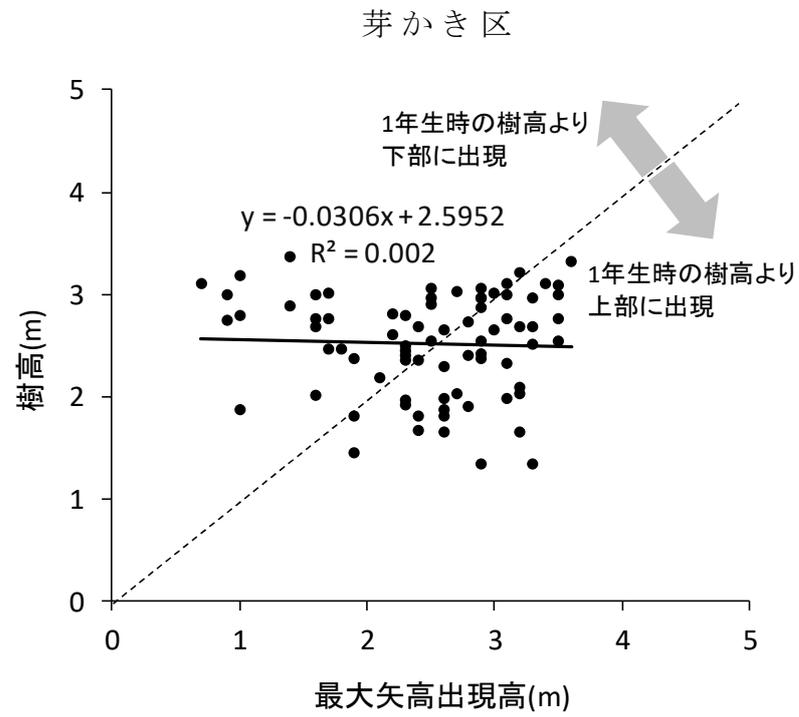


図 3-7 最大矢高出現高と 1 年生時の樹高の関係

3-4 考察

3-4-1 樹高と肥大成長

樹高は、芽かき区および対照区の間で、さらに各処理区内におけるクローン間でも有意な差が認められなかったものの、1年生時は2 m以上、2年生時は3 m以上と旺盛な成長を示し、センダンの成長が極めて早いことが改めて確認された（表 3-1）。胸高直径は、1年生時は両処理区間に有意な差は認められなかったが、2年生時は、対照区が芽かき区に比べ有意に大きかった（表 3-1）。このことは、対照区のセンダンは1年生時に比べ、2年生時に大きく枝を広げたため、肥大成長量に大きな差がみられたと考えられる。

3-4-2 芽の発生時期と発生高

植栽1年目は18型およびM型が1型に比べ、植栽2年目はM型が1型および18型に比べ芽の発生数が少なかった（図 3-3）。これらのことから、M型は他の2クローンに比べ芽の発生数が少ないクローンであると考えられる。芽かきを実施した2年間に限るとM型は他の2クローンに比べて樹高および胸高直径の成長量に差異がなく（表 3-1）、芽かき（芽をかぐ）の回数を減らすことができるクローンであることが明らかになった。枝の発生数については、スギ（植田 1992；竹内 2002）やヒノキ（池本ら 1992）でクローンによって違いがあることが明らかにされており、センダンも同様にクローンによって差があることが示された。1型

や 18 型のように芽の発生数が多い系統は、芽かきの労力は大きいですが、芽かき終了後は直径成長が大きくなると見込まれることから短伐期施業に向いた系統として推奨できるだろう。一方、M 型のように芽の発生数が少ないクローンでも 1 型や 18 型に比べ直径成長量に大きな差がなければ、芽かきを省力化できるクローンとして推奨できると期待される。

時期別による芽発生数は、植栽 1 年目は 4 月前半を除くと 7 月後半と 8 月前半が大部分を占めていたことから (図 3-4 (A))、春期に 1 回と盛夏に 2 回芽かきを行えばよいと推定される。一方、植栽 2 年目は、春期は 4 月前半と 5 月前半、夏期が 6 月前半、7 月全半および 7 月後半の発生数が多く (図 3-4 (B))、芽かきは春期に 2 回、夏期に 3 回行えばよいと推定された。ただし、3 クローンの中で芽の発生数が少なかった M 型では芽かきの回数を減らすこともできると期待される。今回、提案した芽かきの推奨回数は、本試験地のように成長が良好な立地において、今後実施されるであろう芽かき施業の目安になると考えられる。

また、植栽 1 年目の春芽は 1.4~2.7 本/tree で 1 型が M 型に比べ有意に多かったものの (図 3-3)、すべて地上高 0~0.5 m と狭い範囲に分布していたので (図 3-5 (A))、芽かきの労力に大きな差はないと考えられた。一方、夏芽は、地上高 0.5~3.0 m と発生範囲は同じであるが (図 3-5 (A))、5.0~15.0 本/tree で 1 型が 18 型および M 型に比べ有意に多く

(図 3-3), 1 型の芽かきには大きな労力がかかることが明らかとなった。また, 植栽 2 年目の春芽は 17.1~21.0 本/tree で当年の芽の総発生数の約半分を占め(図 3-3), かつクローン間に有意な差がみられず, 地上高 1.0~3.5 m に分布していたため(図 3-5 (B)), 春芽かきの労力に差ないと考えられる。一方, 夏芽の発生数が多い範囲は地上高 2.5~4.5 m と同様であるが(図 3-5 (B)), 1 型および 18 型が M 型に比べ有意に多かった(図 3-3), 高所での作業時間も増えると予想される。このように, 芽の発生数が多いことによる労力および高所作業による安全性を確保は必須となるが, 本試験地のように 2 年間だけの手入れで, センダンの優良な素材を確保できることは画期的な育林技術であると期待される。

3-4-3 芽かきによる幹曲りの抑制

芽かき区における最大矢高の平均値は 2.20~2.56 cm と, JAS 規格(農林水産省 2007)で評価したところ, 対照区では全くみられなかった 1 等の個体が 65.4~80.0%と極めて高い割合で得ることができた。最大矢高出現高は, 芽かき区では 1 年生時の樹高の上部および下部に一樣に分布しており, 分布数も上部と下部で同程度であった(図 3-7)。一方, 対照区では大部分が 1 年生時の樹高より下部に出現していた(図 3-7)。横尾(2010)によると, 芽かきされていないセンダンの最大矢高出現高は, 植栽時や 1 年生時の樹高付近, または植栽時と 1 年生時の樹高の中間付近であった。これと同じ傾向は対照区でみられた

ものの、芽かき区における最大矢高出現高と過去の樹高との関係が明確でなかったのは、芽かきによって過去の樹高付近の幹曲がりが極めて小さくなったためと考えられる。

さらに、芽かき区では、最大矢高の平均値にクローン間差が認められなかったことから（図 3-6）、芽かきは、クローンに関係なく最大矢高を小さくするとともに、ばらつきが少ない一定形状の丸太を生産できる施業であるといえる。さらに芽かきは、枝打ちで生じやすい材の変色の発生を抑制するというメリットもある（熊本県林業研究指導所 2015）。

以上のことから、センダンにおける芽かきは、枝打ちによる材の変色を未然に防ぐとともに幹曲りが少ない高品質な通直材を生産できる最適な施業であることが示唆された。さらに、その施業も植栽後 2 年目まで実施すればよいということであれば、作業コストの面からも非常に期待がもてる。今後は、更なる作業コストの削減を目指し、芽かきの回数を減らした際の幹曲りの抑制効果の変化や他の施業との組み合わせで、より効率的なセンダンの通直材生産における作業工程を開発していくことが急務であろう。

第4章 芽かきしたセンダンにおける木材性質の樹幹内変動

4-1 はじめに

本章では，芽かきしたセンダンの成長特性，木材性質およびそれらの特性への遺伝の影響を明らかにするために，3 クローン（1 型，18 型および M 型）のセンダンの成長特性および木材性質の樹幹内変動を調べた。

4-2 材料と方法

4-2-1 実験方法

試験地の設定，施肥，芽かき等の初期の育成については第3章の試験地および供試木の説明のとおりである。また，直径成長を維持するための保育間伐は，被圧木および自然枯死木を除き，本数間伐率で植栽4年後（2005年1月）に45%，植栽11年後（2012年1月）に22%で実施した。植栽10年目の2010年11月（立木密度480本/ha，平均樹高14.3 m，平均胸高直径22.8 cm）に各クローンから1本ずつ（供試木A～C），植栽16年目の2016年10月（立木密度300本/ha，平均樹高15.6 m，平均胸高直径28.0 cm）に各クローンから2本ずつ，合計9本を供試木として伐採した。なお，伐採時期である10月以降は成長休止期に入り，植栽から10成長期および16成

長期を経過していたので、それぞれの林齢は 10 年生および 16 年生として取り扱うこととした。供試木の伐採時の平均樹高と平均胸高直径は、それぞれ 10 年生時が 13.8 m および 23.5 cm、16 年生時が 17.1 m および 27.1 cm であった（表 4-1）。

表 4-1 センダンの供試木の基本特性.

No.	林齢	クローン型	樹高(m)	胸高直径(cm)
A	10	1	12.6	21.9
B		18	13.7	24.8
C		M	15.2	23.8
平均			13.8	23.5
D	16	1	16.0	23.1
E		1	17.0	27.2
F		18	16.9	28.0
G		18	17.5	31.2
H		M	17.8	29.5
I		M	17.4	23.8
平均			17.1	27.1

供試木からの材料の採取方法を図 4-1 に示す。供試木は、目視により根元から上部に向かって通直な部分までを幹とし、伐採高の 0.2 m から 1 m 毎に玉切りした。ただし、16 年生時の供試木は樹幹解析用の円盤（厚さ 5 cm）を採取した残りの部分（長さ約 95 cm）の丸太を供試した。樹幹解析は、東西および南北の直交する 2 方向の樹皮を含んだ直径および樹皮を除いた直径を mm 単位で記録し、スキャナーで画像データを取り込み、樹幹解析用ソフト stem analyzer（今村ら 2001）を用いて各年の年輪幅を算出した。

次に、採取した丸太を元口側から見て伐採時の北を上面に、髓を

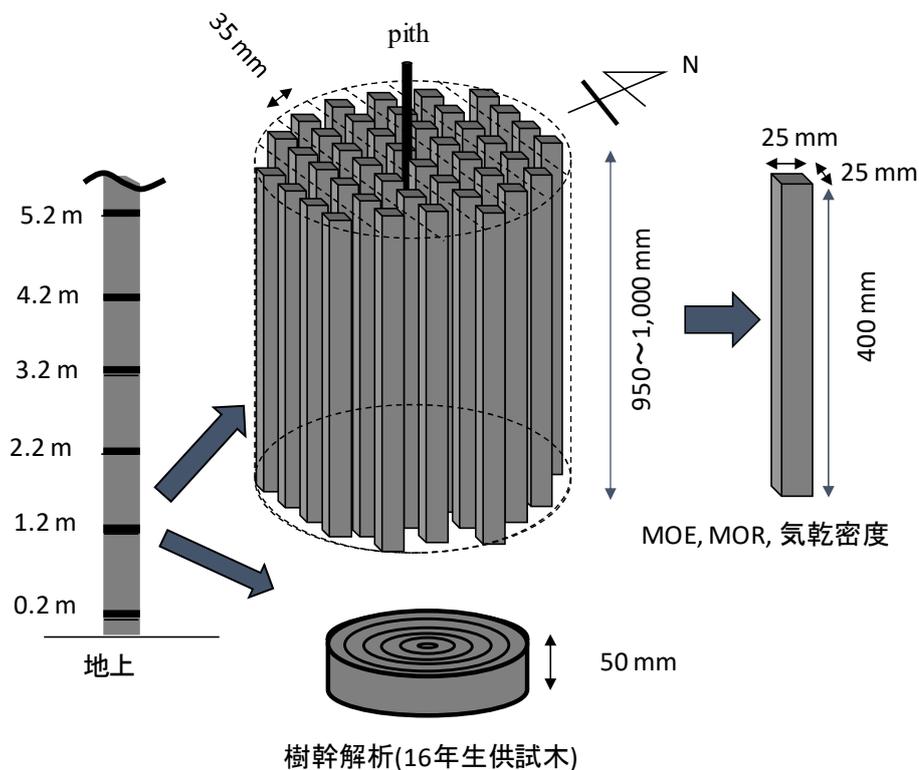


図 4-1 試験体の形状と寸法

中心に厚さ 35 mm で，だら挽きし，1年間屋内で天然乾燥した。さらに，だら挽きした板を伐採時の北から髓を通過して南まで結んだ線から両側に幅 35 mm に連続して製材し，約 6 ヶ月間天然乾燥した。天然乾燥後，節，割れなどの欠点を除いて 25 (R) × 25 (T) × 400 (L) mm の小試験体を作製し，恒温恒湿室内で温度 25°C，湿度 65% で十分な調湿を行った。調湿後，気乾密度を測定した。

次に万能試験機（島津製作所 UH-C100A または島津製作所 AG-1000 kN）を用いて，曲げ試験を実施した。曲げ試験は，支点間距離 350 mm，荷重速度 5 mm/分の中央集中荷重方式で実施した。

4-2-2. 解析方法

各供試木の気乾密度，力学的性質である曲げ弾性率（以下，MOE），曲げ強さ（以下，MOR）の比較については，用材として利用する地上高 0.2～4.2 m の値を用いて一元配置の分散分析を（ANOVA）を行った。これらの要素に供試木レベルで有意な差が認められた場合は，供試木間で Tukey の HSD 検定による多重比較を行った。

気乾密度と MOE および MOR の関係について，気乾密度を説明変数，MOE および MOR を応答変数とする直線回帰を行った。

これらの統計処理には，統計ソフト R3.4.1（R Development Core Team 2017）を用いた。

4-3 結果と考察

4-3-1 成長特性

16年生の供試木 6 個体のうち供試木 E（1 型）の年輪幅の放射方向変動を図 4-2 および図 4-3 に示す。図 4-2 の横軸は髄からの年輪番号であり，年輪幅への形成層齢の影響がわかる。図 4-3 の横軸は樹皮側から数えた年輪番号であり，年輪幅への環境の影響がわかる。図 4-2 から，髄付近の年輪幅は，植栽 1 年目の樹高成長範囲の上部である地上高 2.2 m を除くと，1 年輪目の年輪幅は大きく，2 年輪目に減少する

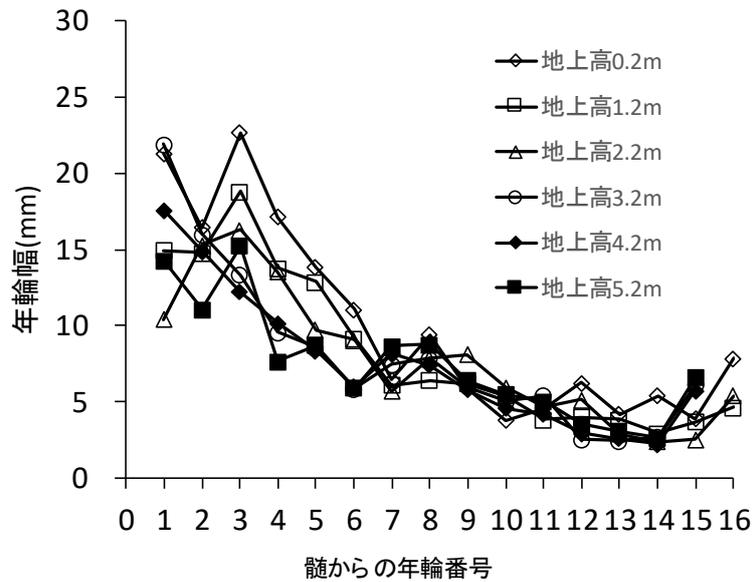


図 4-2 地上高別における髓からの年輪幅の放射方向変動 (供試木 E).

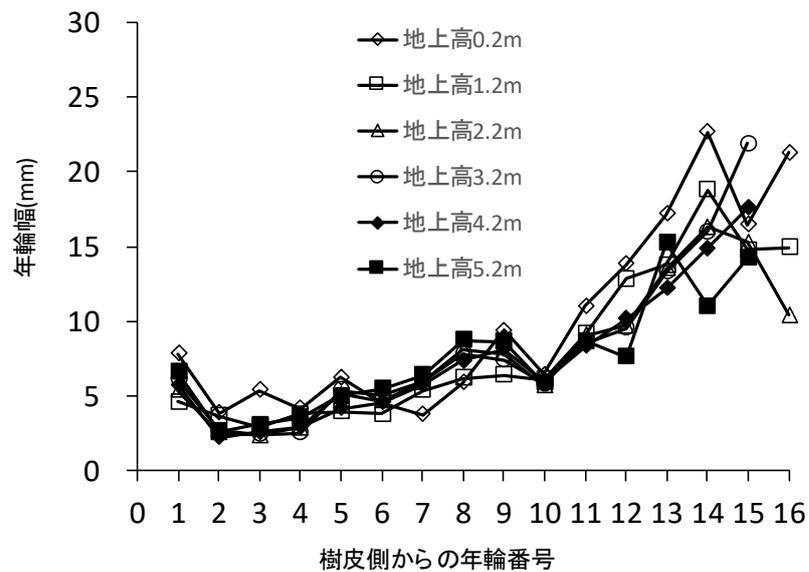


図 4-3 地上高別における樹皮からの年輪幅の放射方向変動(供試木 E).

傾向を示した。また、地上高が低い部分 (0.2~2.2 m) では、芽かき終了後の 3 年輪目で年輪幅が増加したが、4 年輪目以降は減少に転じ、10 年輪目あたりからは、他の地上高と同様に概ね 5 mm 以下で安定す

る傾向を示した（図 4-2）。他の 5 個体においても，成長量および成長期間の変化にわずかの差はみられたものの同様の傾向を示した。図 4-3 から，地上高に関係なく，同じ放射方向変動を示す傾向がみられ，前年または翌年に比べ成長が良好な年（例えば樹皮から 1 年輪目および 8，9 年輪目）には形成層齢にかかわらず，広い成長輪幅となることがわかった。芽かきされていないセンダン（松村ら 2006）やチャンチンモドキ（松村ら 2007）でも同様の傾向が報告されている。一般的にセンダンは植栽年に比べ 2 年目の肥大成長量が大きいが（横尾 2019），芽かきした個体では葉量が少なくなるため，成長が抑制された 2 年輪目が小さかったと考えられる。ただし，3 年輪目以降は，同展示園内の芽かきをされていない 17 年生個体（松村ら 2006）と比較しても初期の直径成長には大きな差はみられず，芽かきをしても，長期的にみると成長量の損失は少なく，幼齢時の肥大成長が旺盛であることが示された。

4-3-2 気乾密度

各供試木で採取した試験体うち，長さ 4 m の直材を採材する時に利用される地上高 0.2~4.2 m の気乾密度のヒストグラムを図 4-4 に示す。図中の白抜き部分が 10 年生または 16 年生のそれぞれにおける全供試木のヒストグラムを示し，黒色部分が各供試木のヒストグラムを

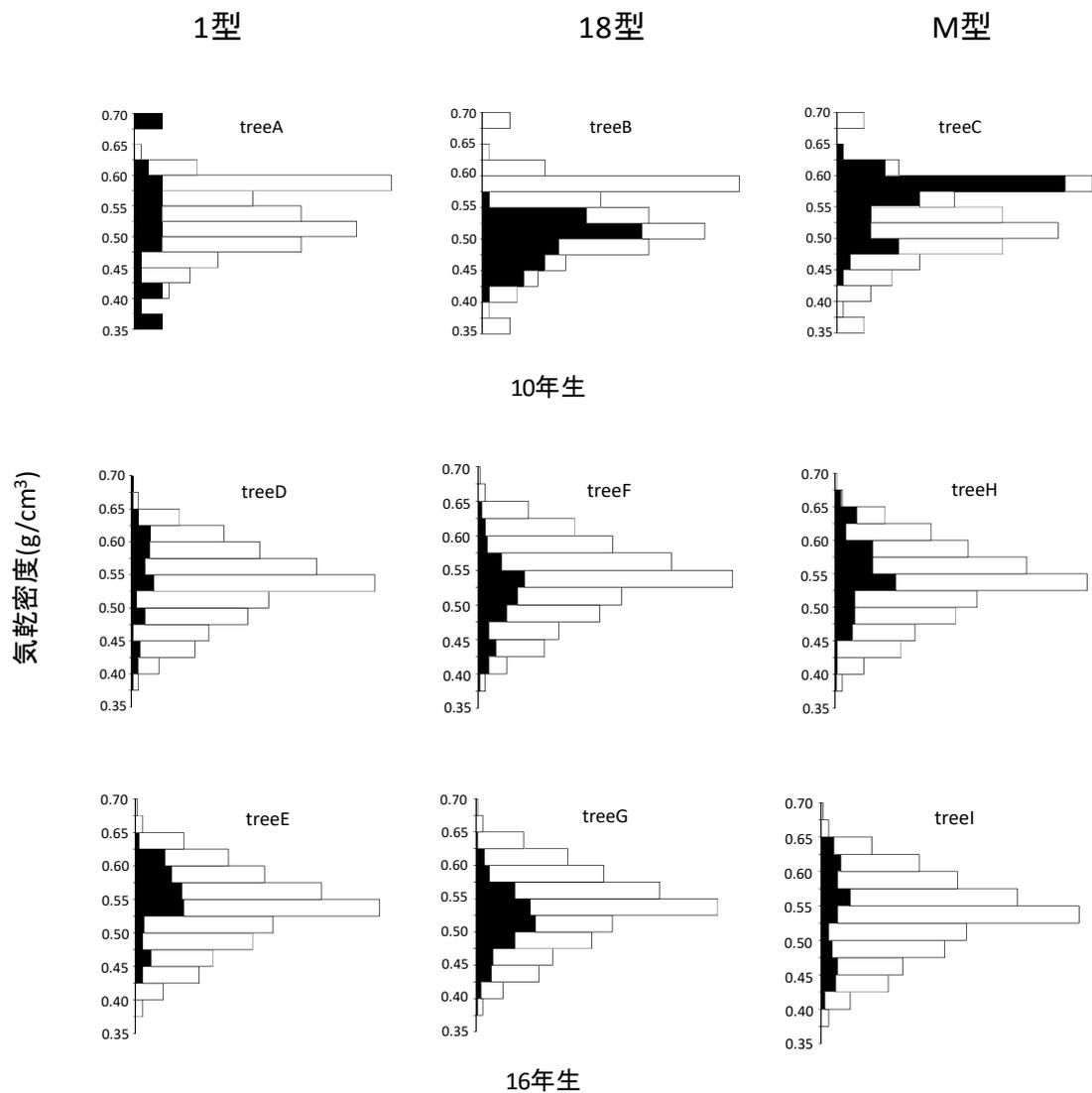


図 4-4 地上高 4.2m までの樹幹における気乾密度のヒストグラム

白抜き部分：各林齢の全供試木のヒストグラム，
 黒色部分：各供試木のヒストグラム。

示す。18 型は M 型と 1 型に比べ低密度側に分布する傾向がみられた。

10 年生の気乾密度は，M 型が 1 型と 18 型に比べ高かった ($p < 0.01$)

(表 4-2)。16 年生の気乾密度は，M 型のうち幹の直径成長が小さか

った供試木 I を除くと，M 型と 1 型が 18 型に比べ有意に高かった

($p < 0.05$) (表 4-3)。また，16 年生における各クローンの 2 個体間で

表 4-2 10 年生センダンの力学的性質

No	林齢	クローン型	試験体数	気乾密度(g/m ³)	MOE(GPa)	MOR(MPa)
A	10	1	37	0.52±0.10 ^b	8.61±2.21 ^b	50.44±20.64 ^c
B		18	66	0.50±0.03 ^b	9.00±1.24 ^b	69.86±10.04 ^b
C		M	75	0.56±0.04 ^a	11.03±1.53 ^a	80.32±12.03 ^a

気乾密度，MOE，MOR は平均値±標準偏差を示す。
異なるアルファベットでは供試木間で有意差があることを示す。
(Tukey の HSD 検定による多重比較， $p < 0.05$)

表 4-3 16 年生センダンの力学的性質

No	林齢	クローン型	試験体数	気乾密度(g/m ³)	MOE(GPa)	MOR(MPa)
D	16	1	71	0.54±0.07 ^a	8.28±1.50 ^d	68.67±18.97 ^c
E		1	117	0.55±0.05 ^a	10.01±1.14 ^b	79.93±12.52 ^b
F		18	111	0.51±0.05 ^c	8.16±0.81 ^d	76.41±11.14 ^b
G		18	150	0.52±0.05 ^{bc}	9.25±1.04 ^c	77.71±10.75 ^b
H		M	132	0.55±0.05 ^a	9.54±0.99 ^c	87.03±14.83 ^a
I		M	81	0.54±0.07 ^{ab}	10.61±1.70 ^a	78.89±19.36 ^b

気乾密度，MOE，MOR は平均値±標準偏差を示す。
異なるアルファベットでは有意差があることを示す (Tukey の HSD 検定による多重比較， $p < 0.05$)

は有意な差は認められなかった ($p > 0.05$)。次に 16 年生供試木における 10 年生時までの部位と 10 年生供試木の気乾密度を比較した結果を表 4-4 に示す。ただし，10 年生供試木の幹の直径成長が良かったため，16 年生は各クローンのうち幹の直径が大きいほうである供試木 E (1 型)，G (18 型) および H (M 型) のみを比較に用いた。16 年生における 10 年生時までの部位は，全体の部位と同様に M 型と 1 型が 18 型に比べ高い傾向がみられた ($p < 0.05$)。また，同一クローン間では，供試木 C が H よりも有意に高く ($p < 0.05$)，M 型のみ供試木間の差がみられたが，1 型および 18 型では差は認められなかった ($p > 0.05$)。供試木を採取した展示園は平坦地にあり，試験林内における土壌水分や養分などの立地差は少ないと推察される。このような環境下で成長し

表 4-4 10 年生センダンと 16 年生センダンの 10 年生部位までの木材性質

No	林齢	クローン型	試験体数	気乾密度(g/m ³)
A	10	1	37	0.52±0.10 ^c
B		18	66	0.50±0.03 ^d
C		M	75	0.56±0.04 ^a
E	16	1	58	0.53±0.05 ^{bc}
G		18	89	0.50±0.04 ^d
H		M	81	0.52±0.04 ^c

気乾密度は平均値±標準偏差を示す。
異なるアルファベットでは供試木間で有意差があることを示す (Tukey の HSD 検定による多重比較, $p < 0.05$)

た供試木にクローン間差が認められたことは、密度に対する遺伝的な影響があることを示唆するもので、選抜育種を進める価値があると考えられる。

図 4-5 に各個体の気乾密度を髓から樹皮側に向かって地上高別に示す。各個体とも地上高に関わらず気乾密度は髓から樹皮側に向かって増加する傾向を示した。ただし、気乾密度は、幹の直径成長が大きい個体 (供試木 B, C, E, F, G および H) は緩やかに増加する傾向を示し、幹の直径成長が小さい個体 (供試木 A, D および I) は急激に増加する傾向を示した。また、各個体の地上高別の平均気乾密度の軸方向変動は、地上高による差は認められなかった (図 4-6)。松村ら (2006) は、枝打ちしたセンダン 3 個体における気乾比重の軸方向変動を調べたところ、地上高が高くなるにつれて緩やかに増加し、低比重領域と

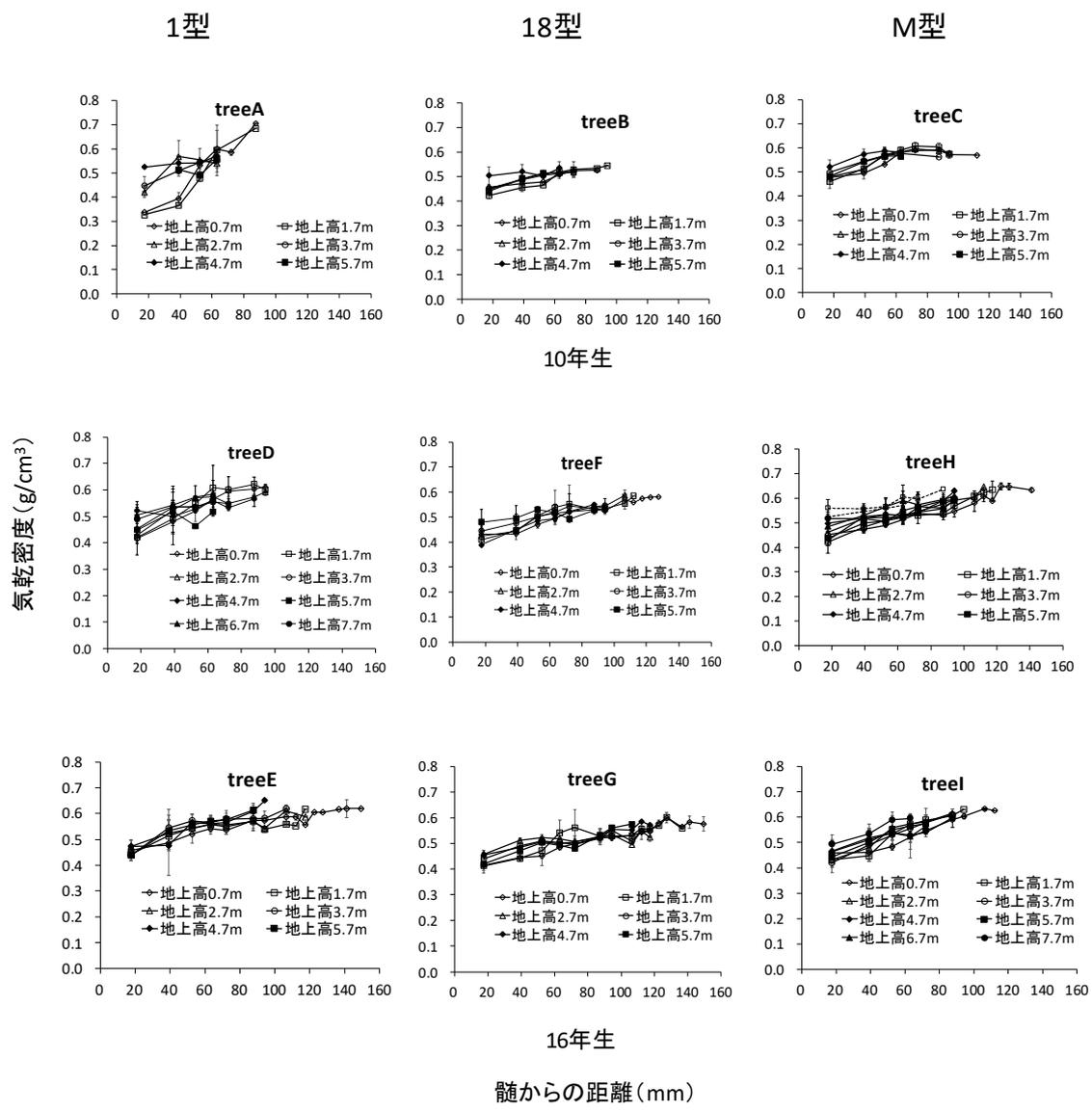


図 4-5 地上高別の気乾密度の髄からの変化

エラーバーは標準偏差を示す。

高比重領域の境界は地上高 2~3m または地上高 3~4m であると報告している。今回、地上高が低い位置と高い位置の平均気乾密度の差がみられなかった原因を調べるために、各個体の気乾密度の樹幹内分布を図 4-7 に示した。各クローンとも地上高が低い部分は、髄付近の気

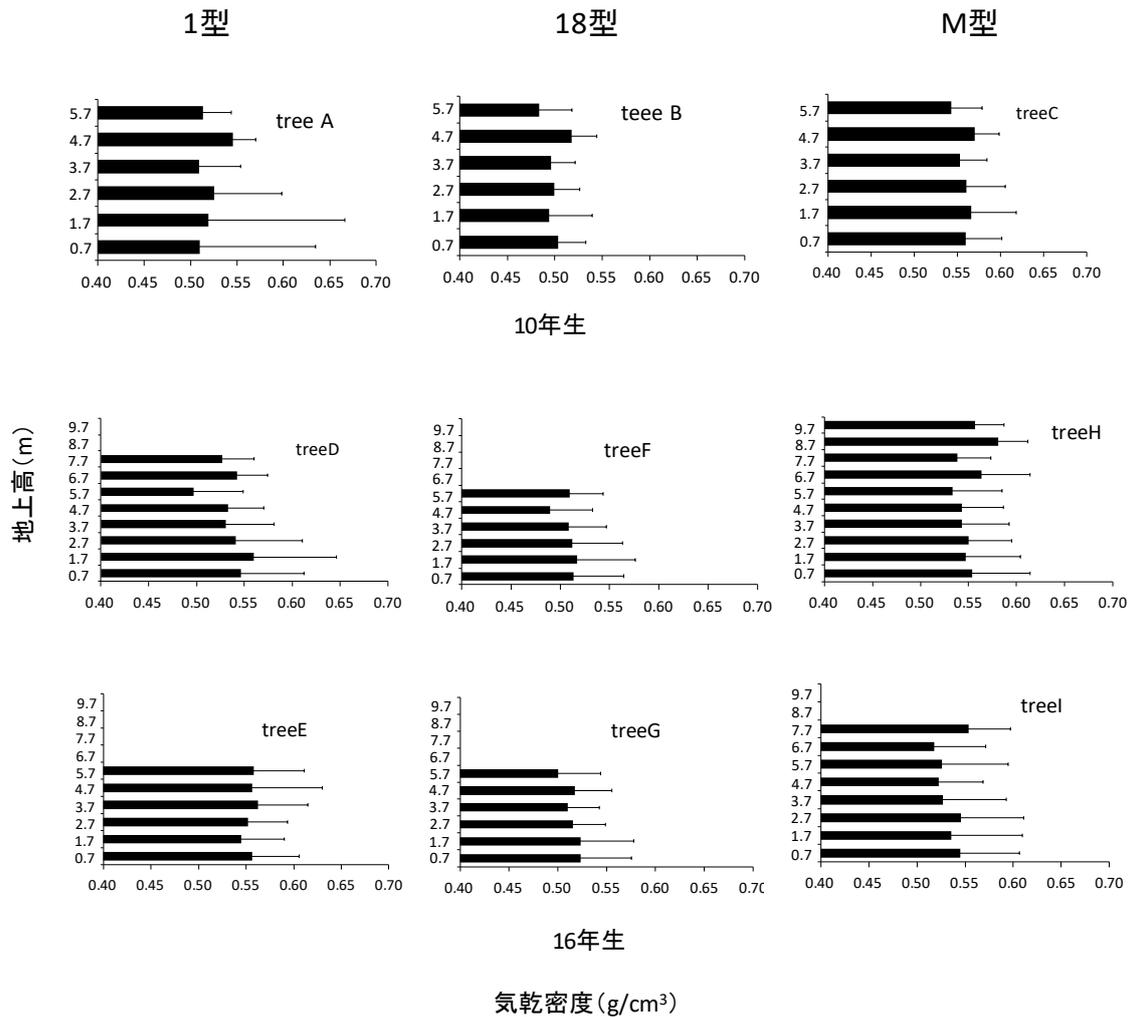


図 4-6 平均気乾密度の軸方向変動

エラーバーは標準偏差を示す。

乾密度が小さく、樹皮側に向かって増加する傾向がみられた。特に、16年生における1型とM型では、幹の直径が小さい供試木（供試木DおよびI）は大きい供試木（供試木EおよびH）に比べ、髓付近の気乾密度が低くても、樹皮側に向かって大きく増加する傾向がみられ、初期の肥大成長が小さい個体でも伐期を延長すれば密度が

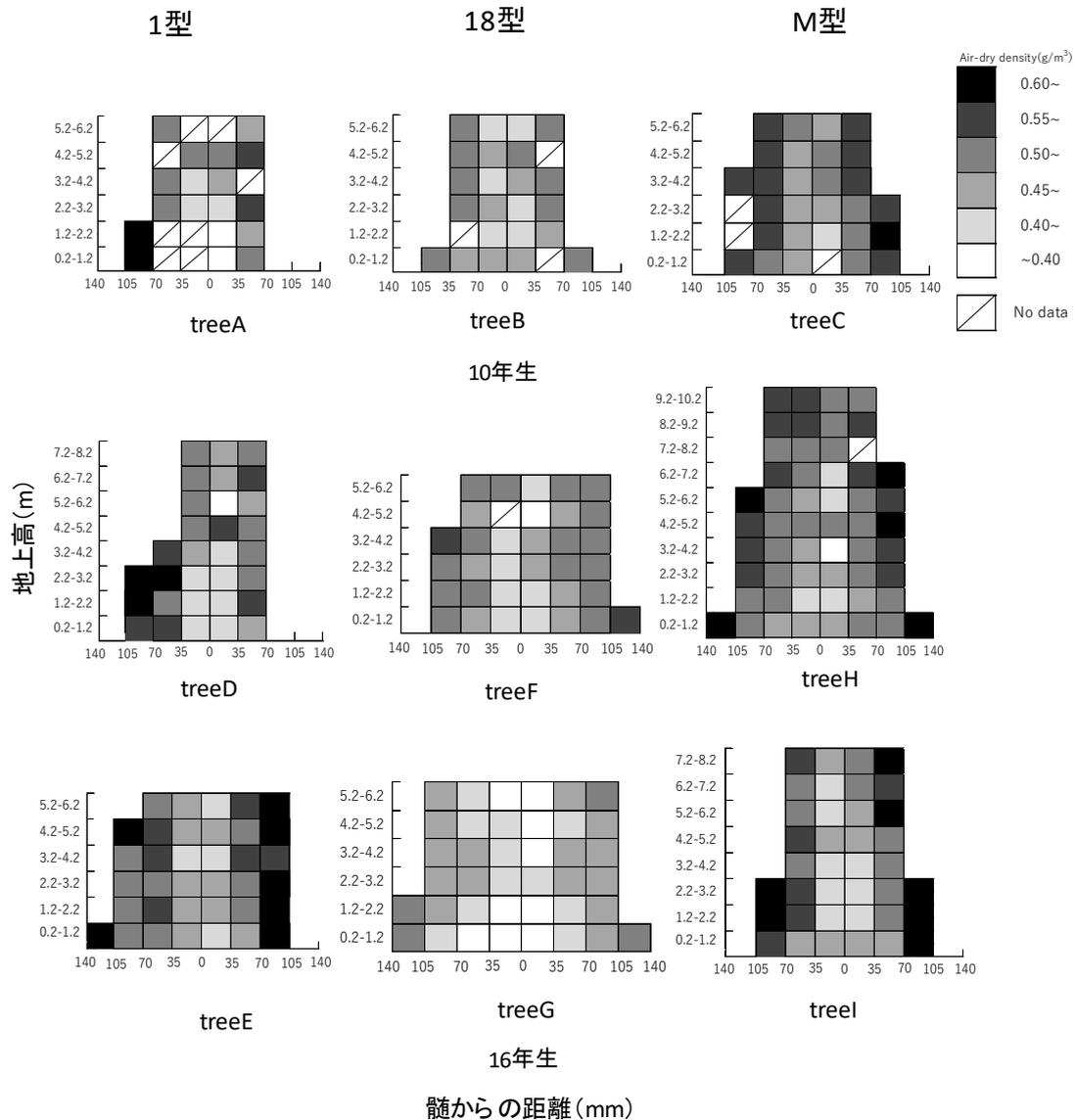


図 4-7 樹幹内における気乾密度の分布

高い材が得られることが示された。ただし，樹幹内の密度差が大きい材となってしまいうため，密度が均一な材を得るには長期間の伐期の延長が必要になると考えられる。一方，18型は1型およびM型に比べ肥大成長の大小に関わらず，気乾密度は樹皮側に向かって大きく増加しないため，18型を育成する場合は成長の良い個体のみを残す施業を

行うことが有効であると考えられた。また、今回、地上高によって平均気乾密度に明確な差が認められなかったのは（図 4-6）、地上高が低い部分でも樹皮側に高密度部分が存在し（図 4-5, 4-7）、平均値を大きく増加させたためと考えられる。

4-3-3 曲げ弾性率と曲げ強さ

各供試木の MOE および MOR について、10 年生を表 4-2 に、16 年生を表 4-3 に示した。ただし、各々の特定値は芽かきを実施した高さ 0.2～4.2 m のデータのみを用いた。MOE の平均値は、10 年生の供試木では、1 型（供試木 A）、18 型（供試木 B）、M 型（供試木 C）でそれぞれ 8.61, 9.00, 11.03 GPa と M 型が 1 型および 18 型に比べ有意に大きかった ($p < 0.01$)。16 年生の供試木では、1 型が D, E でそれぞれ 8.28, 10.01 GPa, 18 型が F, G でそれぞれ 8.16, 9.25 GPa, M 型が H, I でそれぞれ 9.54, 10.61 GPa とクローン間差が明確ではなかった。ただし、1 型のうち供試木 E は同クローンの他の 2 供試木よりも MOE が明確に高い傾向がみられた。センダンと同じ環孔材であるヤチダモでは、平均年輪幅の増加によって MOE が急激に増加する傾向が認められており（宮島 1979）、センダンの 1 型のうち供試木 E は他の 2 供試木より樹冠を大きく発達させ、林分内の同一クローンの中でも幹の直径成長が最大であったため、MOE が高くなった可能性がある。今後、1 型を植栽する場合は、今回よりも低密度植栽すれば幹の直径成長が

促進され、MOEを高くできる可能性がある。

MORの平均値は、10年生の供試木では、大きいほうからM型（供試木C）、18型（供試木B）、1型（供試木A）の順で有意差が認められたが（ $p < 0.01$ ）、16年生の供試木では、MOEと同様にクローン間差が明確ではなかった。

気乾密度と力学的性質の関係については、地上高0.2～4.2 mの気乾密度とMOEおよびMORの関係について、それぞれ図4-8と図4-9にクローン毎に示した。各供試木において気乾密度とMOEおよびMORとも1%水準で有意な正の相関関係が認められた。芽かきは実施されていないが、ベトナムのセンダンでも同様の傾向が認められており（Doan and Matsumura 2018）、施業方法に関係なく気乾密度が力学的性質に大きな影響を与えることが明らかとなった。以上からも樹幹内の力学的性質について、気乾密度が高い系統を選抜する育種が重要であることが示された。

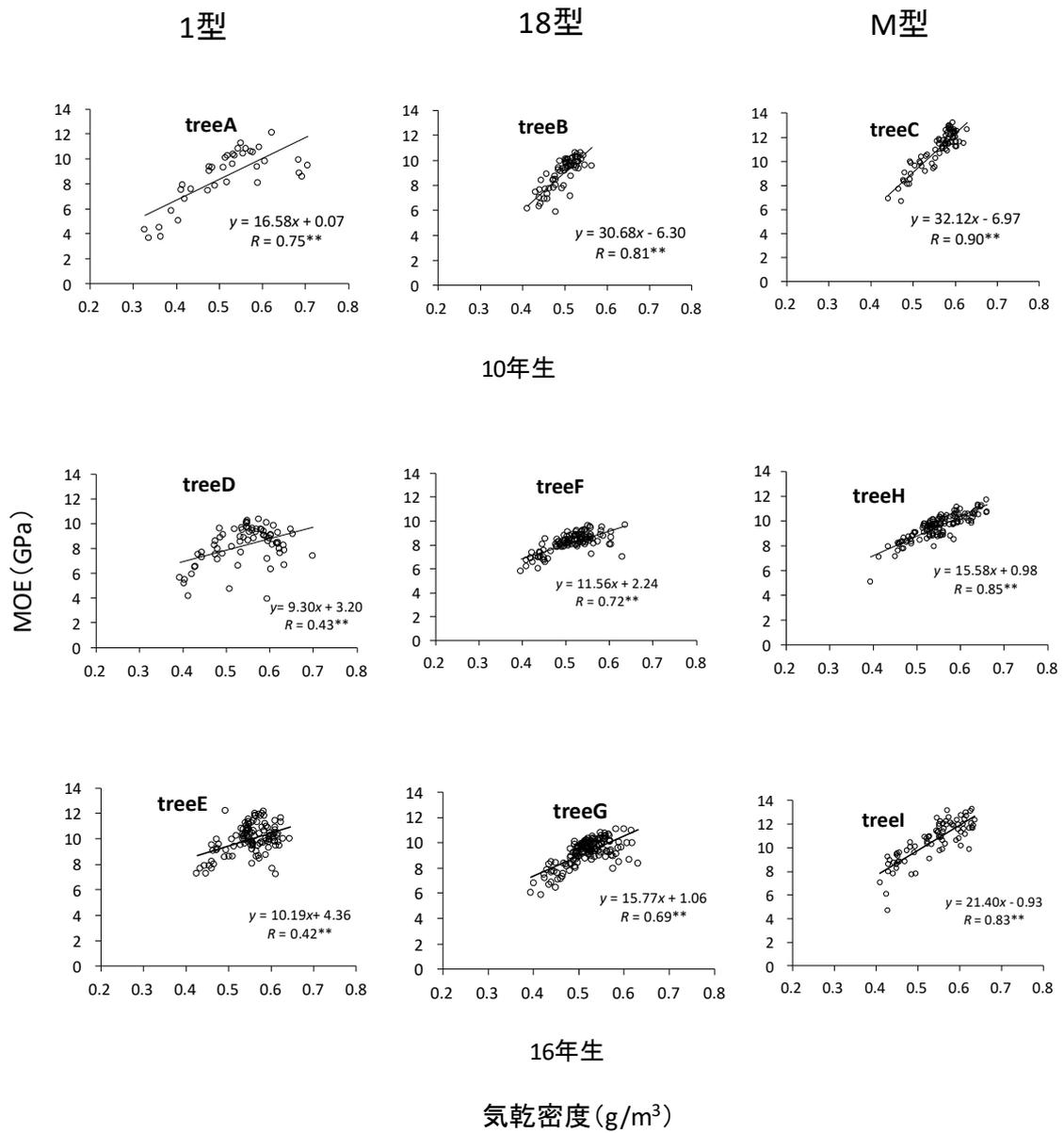


図 4-8 気乾密度と MOE の関係

** $p < 0.01$.

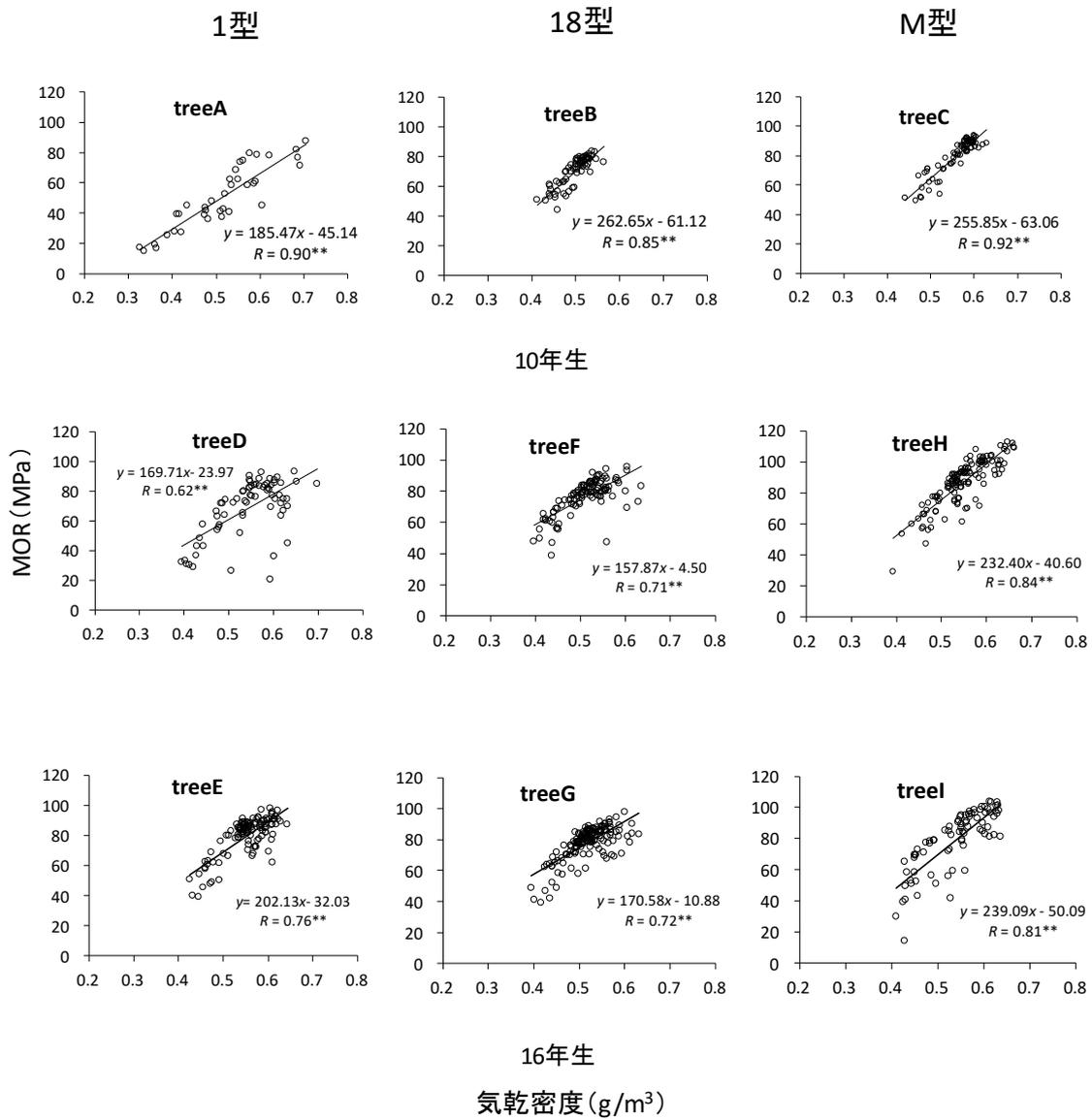


図 4-9 気乾密度と MOR の関係

** $p < 0.01$.

各供試木の MOE および MOR の地上高別の軸方向の変動をそれぞれ図 4-10 と図 4-11 に示す。気乾密度の軸方向の変動（図 4-6）と同様

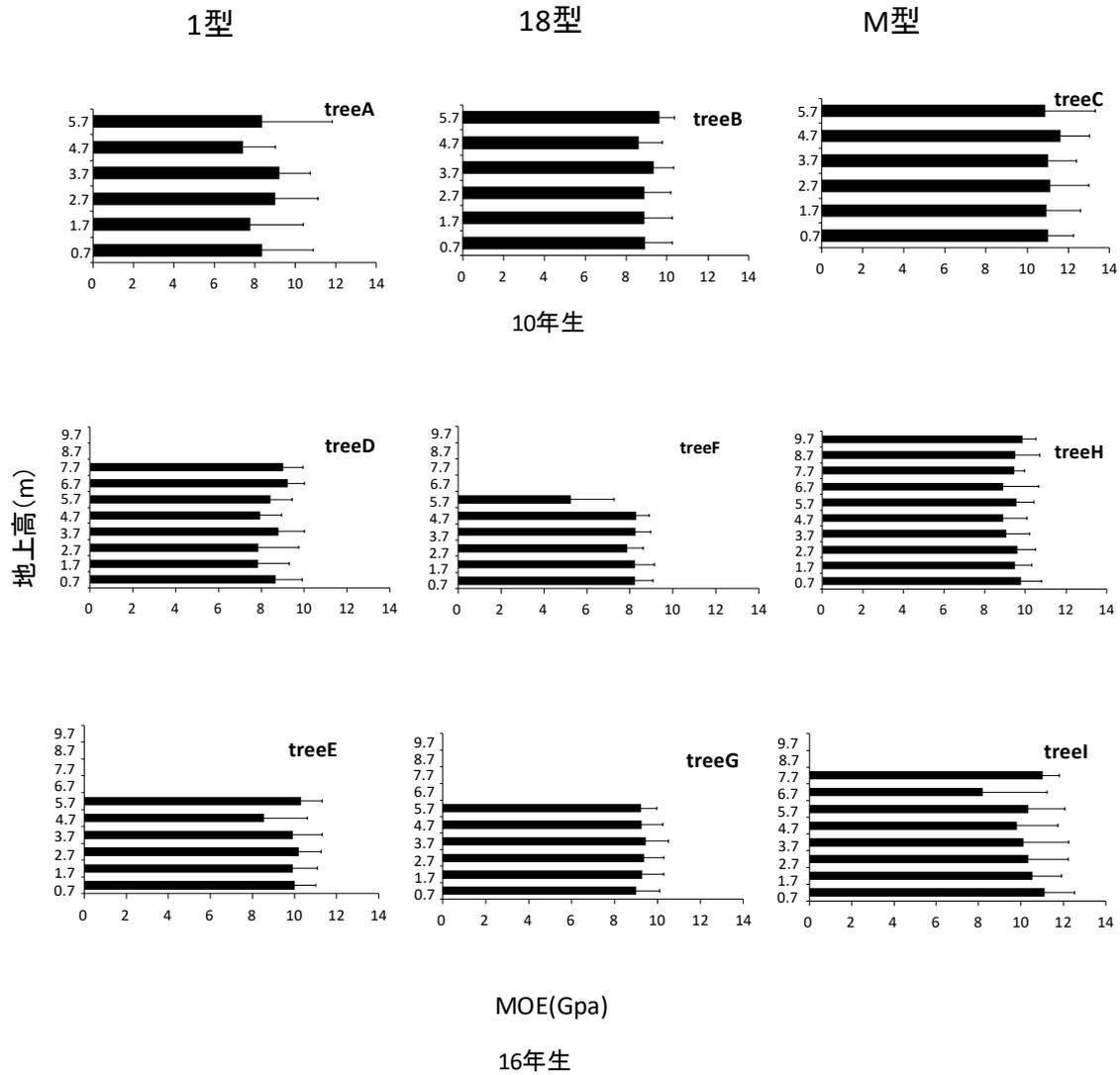


図 4-10 MOE の軸方向変動

エラーバーは標準偏差を示す。

に、地上高による差はみられなかった。以上から、力学的性質が高く、均一な地上高が高い部分の有効利用はもちろんであるが、地上高が低い位置の採材では、力学的性質に応じた利用を検討する必要がある。

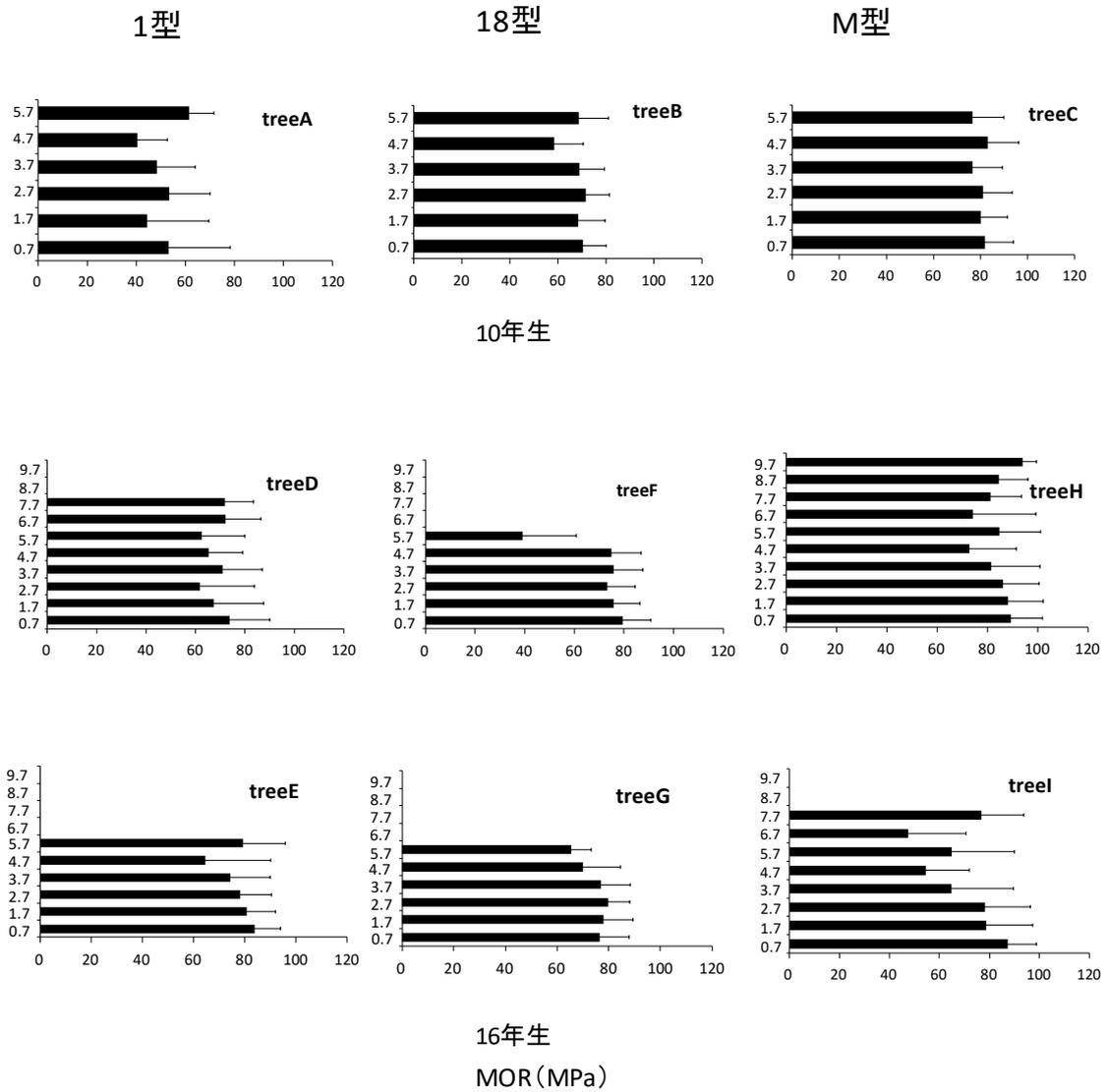


図 4-11 MOR の軸方向変動

エラーバーは標準偏差を示す。

4-3-4 材の利用における芽かきの有効性

センダンは生産目標を 4 m の直材としていること、さらに脚立等を使った芽かきが可能な地上高は 4.5 m までとしている。今回、幹の地上高は各供試木で、0.2 m から最大 6.2~10.2 m までと 4.5 m 以上の部

位からも小試験体を採取したところ、芽かきを実施していない地上高 4.5 m 以上の材においても、気乾密度、MOE および MOR の平均値に地上高による差はみられないことが分かった。ただし、地上高 4.5 m 以上の幹は節が多いこと、第 3 章で報告したとおり太枝由来の節があると変色が発生し、腐朽に発展することを考慮すると、用材として使うのは歩留りが低く、効率的な用材生産は困難である。また、広葉樹林では枝が枯れ上がり、枝下高が 8 m 以上になると幹の直径成長が抑制され、大径材の生産が不可能であると報告されている(横井 2000)。以上から、センダンの大径材を 20 年以内の短伐期施業で生産するには、芽かき実施上限の地上高 4.5 m の直上部で太枝を張らせ、傘型の樹形(横尾 2002)に仕立てるのが有効であると考えられる。

第 5 章 芽かきしたセンダン林分における現存量および材の利用を

考慮した幹材積の推定

5-1 はじめに

センダンにおける材積式の整備にあたり、各器官における現存量の把握が必要である。広葉樹では、これまでブナ (*Fagus crenata*) (只木ら 1969) およびシラカンバ (*Betula platyphylla*) (高橋ら 1974) 等で、相対成長関係により幹、枝および葉などの各器官における現存量が推定されており、センダンの現存量もこれらと同様の手法で推定できると考えられる。

そこで、本章では、3 クローン (1 型, 18 型および M 型) の芽かき試験地において、芽かき実施した後に、枝の枯れ上がりがみられた個体の各器官の現存量の地上高分布を調べ、芽かきしたセンダンの幹材積式の整備を行った。また、短伐期での用材生産を目標とするために、芽かき終了後、幹の直径成長を持続しやすい現存量の階層分布および適切な間伐時期についても議論した。

5-2 材料と方法

5-2-1 試験地および供試木

試験地の設定、施肥、芽かき等の初期の育成については第 3 章の

試験地および供試木の説明のとおりである。

芽かき区では植栽3年目以降，対照区では植栽1年目以降，被圧木または枯死木が発生した。そこで，第4章でも述べたとおり幹の直径成長を維持するため，被圧木および自然枯死木を除伐後に，芽かき区および対照区では，4年生時（2005年1月）にそれぞれ本数密度45.2%および44.0%で，11年生時（2012年1月）にそれぞれ本数密度22.3%および22.1%で間伐を実施した（図5-1，5-2）。ただし，10年生時にも木材性質の樹幹内変動を調べるために，芽かき区

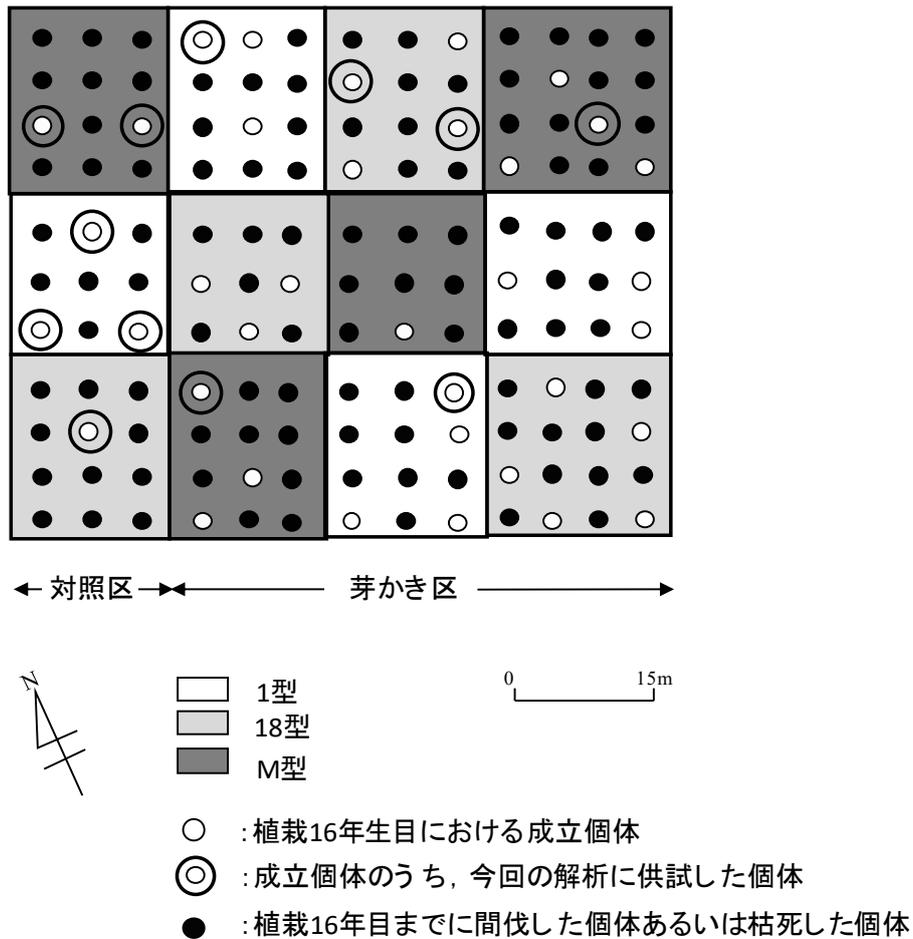


図 5-1 試験地の基本設定

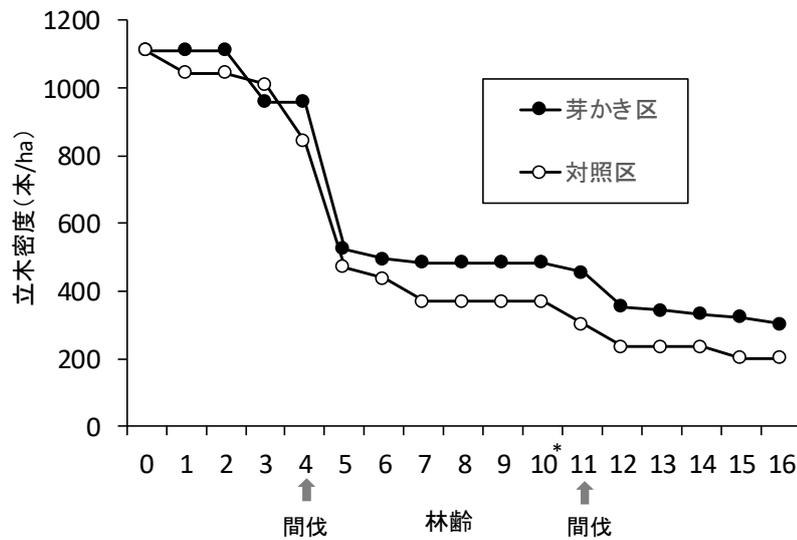


図 5-2 芽かき区および対照区における立木密度の推移

*木材性質の樹幹内変動を調べるために一部伐採

から 3 本（第 4 章の供試木 A～C），対照区から 2 本伐採を行った（間伐率でそれぞれ 6.3% および 18.2%）。植栽から 16 年目の 2016 年 10 月に各クローン 2 個体ずつ，合計 6 個体（第 4 章の供試木 D～I で本章では供試木 No.1～6）を供試木とし伐採した。なお，伐採時期である 10 月以降は成長休止期に入り，植栽から 16 成長期を経過していたことから，供試木は 16 年生として取り扱った。また，今回は 3 系統を供試したが，林分全体の現存量を推定することを目的としたため，本論ではクローン間の比較は行わなかった。

伐採時における芽かき区の立木密度は 303 本/ha で，平均樹高は 15.6 m，平均枝下高は 6.9 m，平均胸高直径は 28.0 cm であった。このうち，供試木の平均樹高は 17.1 m，平均枝下高は 6.9 m，平均胸高

直径は 27.1 cm であった（表 5-1）。No.1 および No.6 は枝が高くまで枯れ上がり，枝下高はそれぞれ 8.6 m および 8.2 m と高く，胸高直径はそれぞれ 23.1 cm および 23.8 cm と 6 個体の平均値に比べて小さかった（表 5-1）。なお，2 回目の間伐後，芽かき実施範囲である地上高 4.2 m 以下に後生枝が発生した個体が供試木 No.3 を含めて 6 本

表 5-1 芽かき区および対照区における各供試木の概要

No.	クローン名	樹高(m)	枝下高(m)	樹冠長率(%)	幹の分布高(m) ^{*1}	胸高直径(cm)	末口径(cm) ^{*2}	
芽かき区	1	1型	16.0	8.6	46.3	8.6	23.1	18.9
	2	1型	17.0	5.7	66.5	5.7	27.2	23.9
	3	18型	16.9	5.6	66.9	5.6	28.0	22.4
	4	18型	17.5	6.2	64.6	6.2	31.2	25.9
	5	M型	17.8	6.8	61.8	10.2	29.5	24.2
	6	M型	17.4	8.2	52.9	8.2	23.8	20.5
平均(標準偏差)		17.1(0.6)	6.9(1.3)	59.8(8.4)	7.4(1.9)	27.1(3.2)	22.6(2.6)	
対照区	7	1型	15.5	8.6	44.5	2.9	23.2	21.4
	8	1型	15.0	2.9	80.7	2.9	25.5	23.1
	9	1型	14.6	2.6	82.2	2.6	24.7	23.1
	10	18型	16.0	6.4	60.0	3.0	32.9	29.0
	11	M型	15.8	6.1	61.4	2.9	26.7	24.6
	12	M型	17.3	8.6	50.3	3.0	32.5	30.8
平均(標準偏差)		15.7(0.9)	5.9(2.6)	63.2(15.5)	2.9(0.1)	27.6(4.1)	25.3(3.7)	

樹冠長率(%)=((樹高-枝下高)/樹高)×100, ^{*1} 幹の分布高は，図 5-3(A)および(B)の幹(通直部分)までの高さとした。

^{*2} 芽かき区は地上高 4.2 m, 対照区は幹の通直部分の最上部を測定部位とした。

(芽かき区の生存本数の 20%) みられた。ただし，後生枝の径は小さく，発生数もわずかであったので，枝下高は後生枝を除く力枝の位置とした。一方，対照区の立木密度は 202 本/ha と芽かき区よりも低かったが，平均樹高は 15.7 m，平均枝下高は 5.9 m，平均胸高直径は 27.6 cm と芽かき区の全立木または供試木と比べ有意な差はみられなかった（表 5-1）。

芽かき区における供試木は，目視により地表から上部に向かって通直な部分を幹とした（図 5-3 (A)）。枝については，幹から発生し

たもの（図 5-3（A）の枝 1）および幹の通直部分より上の部分は、
 径の大小を問わずすべてを枝とみなした（図 5-3（A）の枝 2 および
 3）。

さらに、芽かきをしていない個体の幹材積と比較するために、対
 照区の全個体である 6 本は、伐採せずに立木状態で解析に供試し
 た。ただし、対照区の 4 供試木（No.7, 10, 11 および 12）の幹の通
 直部分より上は分岐した枝が枯れ上がったものである。そこで、対
 照区の幹も、芽かき区と同様に、目視により地表から上部の通直な
 部分までとし、今回、通直部分より上の幹の曲がり部分は幹材積の
 評価の対象外とした（図 5-3（B））。

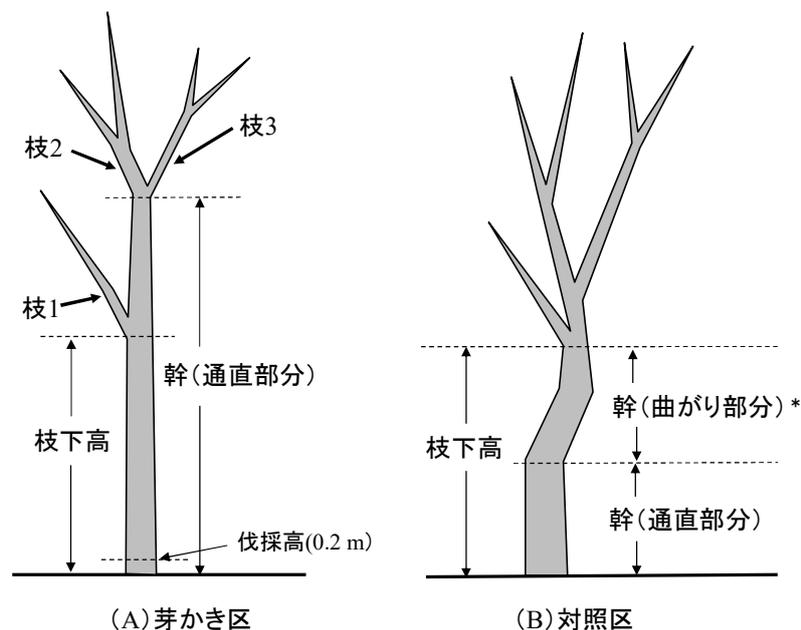


図 5-3 芽かき区（A）における各器官の区分方法および対照区（B）
 における幹の区分方法

*本研究では幹材積の評価の対象外とした。

5-2-2 測定方法

樹高および枝下高は，伐採した供試木は巻尺を，その他の立木では VertexIII（Haglof 社製，スウェーデン）を用いて測定した値とした。ただし，樹高は樹冠の最も高い枝の先端とし，毎年測定した。伐採した供試木の胸高直径および末口径は，後述の樹幹解析の円盤の北方向に印を入れ，東西および南北の直交する 2 方向の平均値とした。対照区を含むその他の立木の胸高直径は，輪尺で測定した東西および南北の直交する 2 方向の平均値とした。

伐採した供試木は，伐採高（0.2 m）から高さ 1 m の階層毎（以下，各階層）に，野外で幹，枝および葉に分けて，重量計（KL-10，KUBOTA，大阪，または EP60KA，A&D，東京）で生重量を測定した。なお，地表から伐採高（0.2 m）の部位については，地際から切り直して，生重量を測定した。また，各階層における幹の元口側から樹幹解析用の円盤（厚さ約 5 cm）を採取した。樹幹解析は，東西および南北の直交する 2 方向の樹皮を含んだ直径および樹皮を除いた直径を mm 単位で記録し，スキャナーで画像データを取り込み，樹幹解析用ソフト stem analyzer（今村ら 2001）を用いて，各供試木から得られたすべての円盤を積み上げて，各年の幹材積を算出した。

また，対照区では，地上高 0.2 m から 1 m ごとの幹直径および通

直部分の最上部の幹直径（表 5-1 の末口径）を輪尺で 2 方向（東西および南北の直交する 2 方向）測定し，その平均値から，芽かき区同様の手法で幹材積を算出した。

芽かき区から得られた供試木の各階層における枝および葉のサンプルは，生重量を測定後，実験室（熊本県林業研究・研修センター，熊本市中央区黒髪）に持ち帰り，丹下（1999）の基準に従い，乾燥機（FC-612，ADVANTEC，東京）を用いて 85℃で葉は 2 日間，枝は 4 日間乾燥させた後に重量計（PB1502-S，METTLER TOLEDO，東京）で乾重量を測定した。幹サンプルは樹幹解析用の円盤として画像データに取り込んだ後に乾燥しやすいように小割して，同温で 6 日間乾燥させた。その後，同重量計で小割りした樹幹片全部の重量を測定した。各階層における幹，枝および葉の乾重量は，それぞれの生重量にサンプルの乾重量と生重量の比率を乗じて算出した。各階層における枝のサンプルの材積は，乾燥前にすべてのサンプルの枝の基部側と先端側の長径および短径から断面積を算出し，両断面積の平均と枝長から算出した。各階層における枝のサンプルの総生重量と総材積の比率を生枝の比重とし，各階層における枝の総生重量にその比重を除して算出した枝材積を合計して全階層，すなわち供試木 1 個体の枝材積とした。

5-2-3 解析方法

供試木の樹高（ H , m）、胸高直径（ D , cm）と幹、枝および葉の現存量の関係を以下の相対成長式を用いて求めた。

$$Y = AX^h \quad (1)$$

ただし、 Y は各現存量、 X は D^2H などの変数、 A および h は係数を示し、 Y と X の値を対数変換して、最小二乗法による一次回帰により A と h を決定した。また、回帰式の当てはまりの評価には決定係数（ R^2 ）を用いた。これらの値の算出には Excel2016（Microsoft）を使用した。

供試木の胸高直径と樹高または枝下高（ H_B , m）から求めた D^2H または D^2H_B に対する幹の乾重（ W_S , kg）（以下、通直部幹乾重）と材積（ V_S , m^3 ）（以下、通直部幹材積）、枝の乾重（ W_B , kg）と材積（ V_B , m^3 ）、葉の乾重（ W_L , kg）の相対成長式を求めた。ただし、幹乾重および幹材積は伐採高（0.2 m）から上部の部分を用いた。枝および葉に関しては樹高の代わりに、樹冠長（樹高から枝下高を引いた値： $H-H_B$ ）を用いた場合についても検討した。さらに、伐採高から芽かきした階層（地上高 0.2~4.2 m）が通直材としての原木利用が可能な範囲となるので、地上高 0.2~4.2 m までの幹乾重（ $W_{S4.2}$, kg）（以下、4.2 m 幹乾重）および幹材積（ $V_{S4.2}$, m^3 ）（以下、4.2 m 幹材積）を算出し、相対成長式を求めた。また、対照区の 6 本の幹材積についても、芽かき

した供試木と同様の方法で相対成長式を求めた。

次に、供試木を含む芽かき区の全体の樹高、胸高直径および樹冠長から求めた相対成長式を用いて林分の現存量を推定した。

供試木の樹幹解析から得られた1～15年生時の幹材積において、各年の樹高および胸高直径を用いた相対成長式についても検討した。求めた相対成長式を用いて芽かき区における全個体の各年の樹高および胸高直径から、各年の林分の幹材積の推定を試みた。ただし、樹幹解析に用いた円盤の径は、成長初期の胸高直径に比べ大きく、樹皮も厚いことが観察されているが、樹幹解析から得られる各年の幹材積は樹皮を含んでいない。そこで、6本の供試木について、1～16年生時に測定した胸高直径（東西および南北の直交する2方向の平均値）と樹幹解析から得られた各年の樹皮なし胸高直径（東西および南北の直交する2方向の平均値）の差から各年の樹皮厚を推定した。次に、樹幹解析から得られた各年の樹皮なし胸高直径と推定した樹皮厚の関係から得られた回帰式を用いて、それぞれの地上高における各年の樹皮を含む各階層の幹直径を推定し、通直部幹材積および4.2 m 幹材積を算出した。

さらに、これらの幹材積の推定値と九州地方における広葉樹Ⅰ類の胸高直径5～50 cm 時における幹材積式（日本林業調査会 1970）で推定した値と比較した。

5-3 結果

5-3-1 芽かきしたセンダンの各器官への現存量配分

芽かき区の供試木の平均樹高は1年生時が2.1～3.1 m、2年生時が

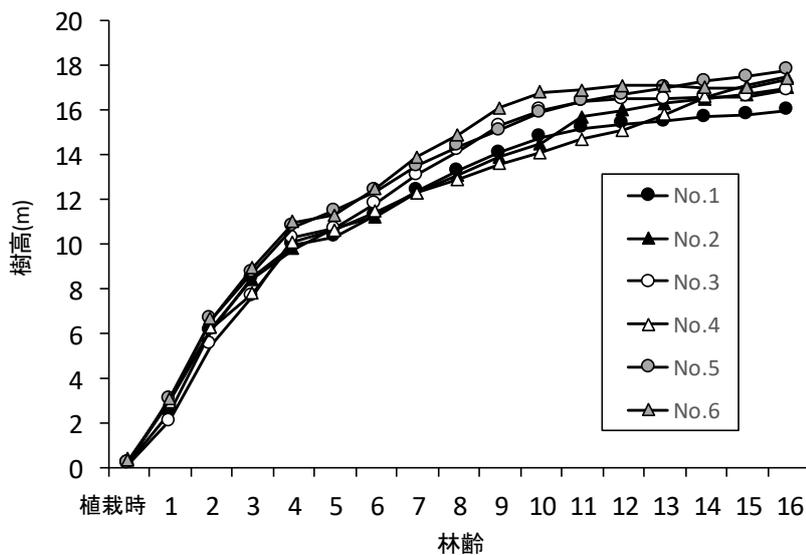


図 5-4 芽かき区の供試木の樹高の推移

5.5～6.7 m と旺盛な成長を示し、植栽 2 年目までに芽かき実施高の 4.2 m を超えた (図 5-4)。また、樹高が約 10 m に達した 4 年生時までは、ほぼ一定の成長を示し、それ以降は成長量が減少した (図 5-4)。芽かき区における樹皮を除く胸高直径の年間成長量は、すべての供試木で 5 年生までは概ね 2 cm 以上であったが、それ以降は減少し、10 年生時以降は 1 cm 以下と大きな成長抑制がみられた (図 5-5 (A))。一方、対照区の年間成長量は 1～3 年生時が大きく、2 年生時が 4.5～6.3 cm でピークであった (図 5-5 (B))。しかし、成長量は 3～5 年生

時に急激に減少し，林齢によっては芽かき区を大きく下回る個体もみられた（例えば供試木 No.11 の 5 年生時および 7 年生時）。

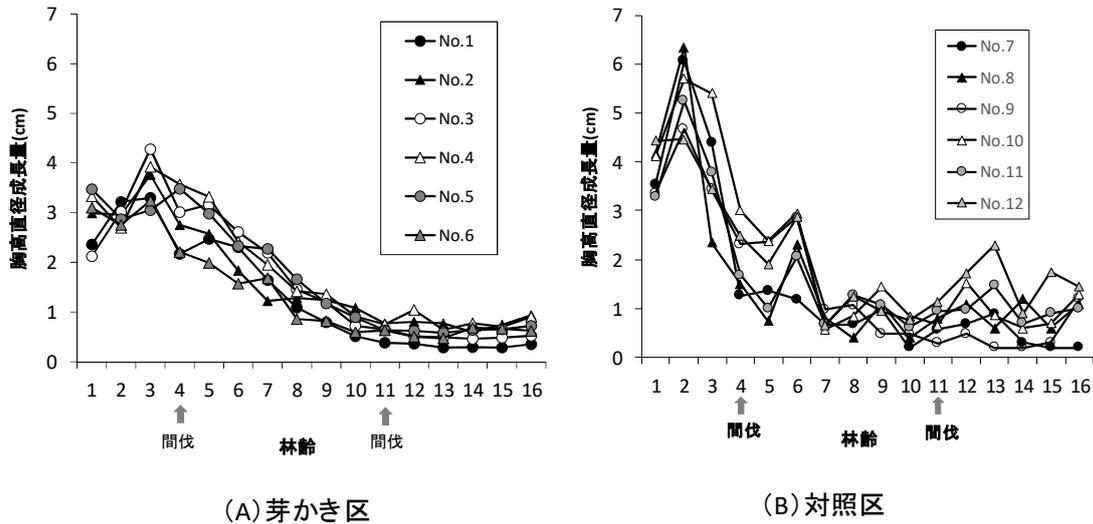


図 5-5 芽かき区および対照区の供試木の胸高直径成長量の推移
樹幹解析から得られた樹皮を除いた胸高直径成長量。X 軸は林齢とした。

芽かき区の幹の最上部の高さ（図 5-3 (A) の幹（通直部分）の最上部）は 5.7～10.2 m と芽かき実施高 4.2 m よりも高く，No.5 を除き，枝下高と同値であった（表 5-1，図 5-6）。一方，対照区の通直部分の最上部の高さ（図 5-3 (B) の幹（通直部分）の最上部）は，2.6～3.0 m で，No.8 および No.9 では枝下高と同値であった（表 5-1）。芽かき区の利用材利用範囲（0.2～4.2 m）における幹の乾重（ $W_{s4.2}$ ）は 71.2～139.9 kg と供試木によって異なっていたが，すべての供試木で最下部の階層（0.2～1.2 m）の値が大きかった（図 5-6）。

枝の分布は，No.5 が枝下高（6.8 m）から幹の最上部である 10.2 m

まで少なく，その上部の階層（10.2～11.2 m）で最も多かったが，他の供試木では枝下高付近から梢端までほぼ一様であった（図 5-6）。今回，胸高直径が小さかった 2 つの供試木（No.1 および No.6）は，高い位置まで枝が枯れ上がり，樹冠長率（ $((H-H_B) / H) \times 100$ ）はそれぞれ 46.3% および 52.9% と他の 4 つの供試木の 61.8～66.9% よりも小さく（表 5-1），枝の乾重も同様に少ない傾向にあった（図 5-6）。ただし，枝下高が低い個体でも一次枝に着生していた二次枝が枯れ上がっており，その落枝痕が多く確認された。

葉の分布は，No.3 では芽かき実施高の 4.2 m 以下に後生枝がわずかに発生したため，樹冠より下部に分布していたが，すべての供試木で梢端部に近い部分に集中して分布した（図 5-6）。なお，葉が集中して分布している部分は No.1～6 でそれぞれ 14.2～16.0 m，12.2～17.0 m，13.2～16.9 m，14.2～17.5 m，14.2～17.8 m，14.2～17.4 m で，樹高に対する割合は 11.3～28.2% と樹冠長率に比べ極めて小さく，梢端部の階層より 1～3 つ下の階層にピークがみられる傾向があった（図 5-6）。

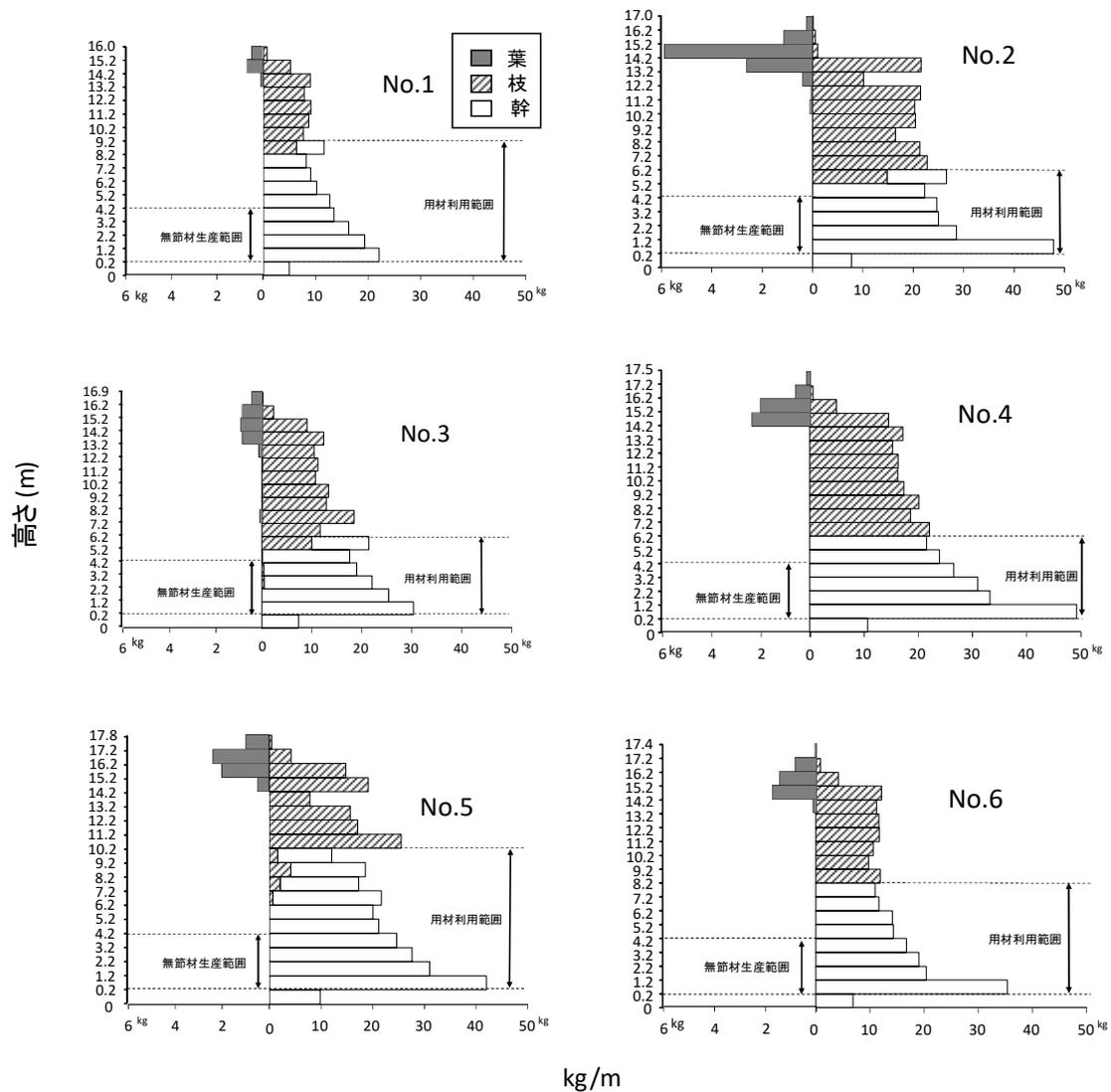


図 5-6 芽かき区の供試木の生産構造図

X 軸は各器官の乾重量。ただし、葉乾重は幹乾重および枝乾重に比べ、小さいので、目盛りを 2kg とした。

5-3-2 相対成長式による林分の現存量の推定

相対成長式における各器官の現存量は、通直部幹乾重 (W_S) が D^2H_B , 通直部幹材積 (V_S) が D^2H および D^2H_B , 枝乾重 (W_B) および枝材積 (V_B) が $D^2(H-H_B)$ を用いた時に高い決定係数を示した ($p < 0.05$, 表

-2)。しかし，葉乾重 (W_L) は， $D^2(H-H_B)$ を用いた時の当てはまりが最もよかったものの，他の器官に比べ，決定係数は低かった ($p>0.05$ ，表-2)。

地上高 4.2 m までの相対成長式は，4.2 m 幹重量 ($W_{S4.2}$) が D^2H ，4.2 m 幹材積 ($V_{S4.2}$) が D^2H ， $D^2(H-H_B)$ および D^2 で高い決定係数を示した ($p<0.01$ ，表 5-2)。なお，地上高 4.2 m における幹直径 ($D_{4.2}$) と胸高直径 (D) の関係は，以下の式で近似できた ($p<0.01$)。

$$D_{4.2}=0.8336D \quad (R^2=0.91) \quad (2)$$

また，対照区 6 本における通直部幹材積 (V_S) における相対成長式を検討したところ， D^2H で高い決定係数を示した ($p<0.01$ ，表 5-2)。

表 5-2 相対成長式における各係数の値

		Y	X	A	h	R ²	
乾重	幹	W_S	D^2H_B	3.51×10^{-3}	1.25828	0.6053*	
		$W_{S4.2}$	D^2H	2.79×10^{-2}	0.87362	0.8169**	
	枝	W_B	$D^2(H-H_B)$	1.74×10^{-2}	0.98280	0.8178*	
	葉	W_L	$D^2(H-H_B)$	5.49×10^{-5}	1.26481	0.5158	
芽かき区	材積	V_S	D^2H	1.47×10^{-4}	0.81634	0.7252*	
			D^2H_B	1.30×10^{-6}	1.46219	0.8096*	
	幹	$V_{S4.2}$	D^2H	3.47×10^{-5}	0.92757	0.9872**	
			$D^2(H-H_B)$	9.47×10^{-4}	0.61099	0.9730**	
			D^2	2.61×10^{-4}	1.02127	0.9709**	
枝	V_B	$D^2(H-H_B)$	2.50×10^{-5}	1.02191	0.7933*		
対照区	材積	幹	V_S	D^2H	2.86×10^{-5}	0.92481	0.9959**

W_S : 通直部幹乾重 (kg), $W_{S4.2}$: 4.2 m 幹乾重, W_B : 枝乾重 (kg), W_L : 葉乾重 (kg), V_S : 通直部幹材積 (m^3), $V_{S4.2}$: 4.2 m 幹材積 (m^3), V_B : 枝材積 (m^3), D : 胸高直径 (cm), H : 樹高 (m), H_B : 枝下高 (m)

** $p<0.01$, * $p<0.05$, ただし，葉の乾重については， $p>0.05$ であったが，決定係数が最も高かった相対成長式を表示した。

幹曲りが多く，通直部分が短い対照区では (図-3, 表-1)， D^2H を用いた通直部幹材積 (V_S) は芽かき区の約 50%，4.2 m 幹材積 ($V_{S4.2}$) の

約 70% と小さかった (図 5-7)。

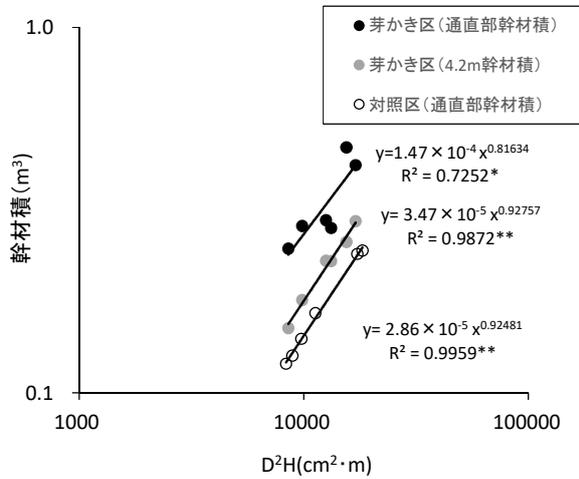


図 5-7 芽かき区および対照区における幹材積と D^2H の関係

** $p < 0.01$, * $p < 0.05$.

次に、高い決定係数を示した相対成長式を用いて本試験地の芽かき区の全個体における現存量の推定を行った(表 5-3)。通直部幹乾重 (W_S) は D^2H_B を用いた時に 54.6 t/ha, 枝乾重 (W_B) は $D^2(H-H_B)$ を用いた時に 35.9 t/ha であった。葉乾重 (W_L) における相対成長式は、前述のとおり他の器官に比べ、決定係数が低かったが ($p > 0.05$), 最も当てはまりがよかった $D^2(H-H_B)$ を用いたところ 1.5 t/ha と推定された。通直部幹材積 (V_S) は D^2H および D^2H_B を用いた時に、それぞれ 103.9 m^3/ha および 118.5 m^3/ha , 枝材積 (V_B) は $D^2(H-H_B)$ を用いた時に 73.4 m^3/ha と推定された。また、4.2 m 乾重量 ($W_{S4.2}$) は D^2H で 34.0 t/ha, 4.2 m 幹材積 ($V_{S4.2}$) は、 D^2H , $D^2(H-H_B)$ および D^2 でそれぞれ 70.8 m^3/ha , 68.1 m^3/ha および 73.0 m^3/ha と大きな差はみられなかった (表 5-3)。

一方、 D^2H を用いた通直部幹材積 (V_S) は、対照区で $24.3 \text{ m}^3/\text{ha}$ となり、芽かき区の通直部幹材積の約 20%、芽かき区の 4.2 m 幹材積の約 30% であった (表 5-3)。

表 5-3 芽かき区および対照区における林分の現存量

		Y		X		
				D^2H	D^2H_B	$D^2(H-H_B)$
芽かき区	乾重	幹	W_S t/ha	54.6		
			$W_{S4.2}$ t/ha	34.0		
	枝	W_B t/ha	35.9			
	葉	W_L t/ha	1.5			
	材積	幹	V_S m^3/ha	103.9	118.5	
		$V_{S4.2}$ m^3/ha	70.8		68.1	73.0
枝		V_B m^3/ha	73.4			
対照区	材積	幹	V_S m^3/ha	24.3		

W_S : 通直部幹乾重 (kg), $W_{S4.2}$: 4.2 m 幹乾重, W_B : 枝乾重 (kg), W_L : 葉乾量 (kg),
 V_S : 通直部幹材積 (m^3), $V_{S4.2}$: 4.2 m 幹材積 (m^3), V_B : 枝材積 (m^3), D : 胸高直径 (cm),
 H : 樹高 (m), H_B : 枝下高 (m)

次に、芽かき区の供試木における各年の樹皮なし胸高直径と算出した樹皮厚の関係は、以下のべき乗式で近似した ($p < 0.01$, $n = 96$)。

$$B = 0.167D^{0.436} \quad (R^2 = 0.62) \quad (3)$$

ここで、 B : 樹皮厚 (cm), D : 胸高直径 (cm) である。

供試木の樹幹解析から得られた各年 (1~16 年生時) の各階層の幹直径に推定した樹皮厚を加えて推定した通直部幹材積 (V_S) および 4.2 m 幹材積 ($V_{S4.2}$) と各年に測定した樹高および胸高直径による相対成長式について、それぞれ D^2H および D^2 を用いて検討したところ、高い精度で適合した ($p < 0.01$, $n = 96$, 図 5-8 (A) および (B))。これらを回帰した相対成長式から芽かき区における過去の林分の通直部幹

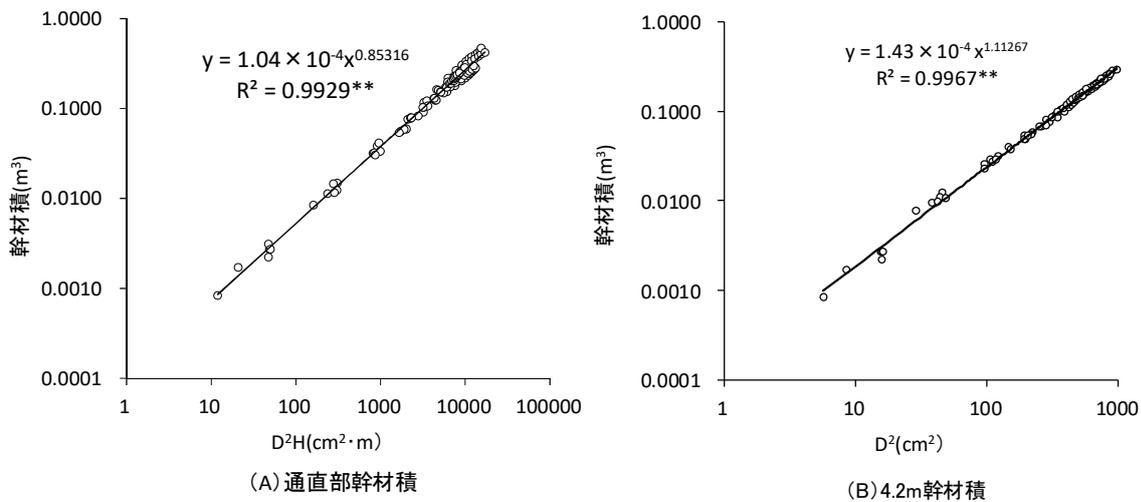


図 5-8 芽かき区の樹幹解析から得られた供試木の過去（1～16年生時）の通直部分の幹材積と D^2H の関係（A）および地上高 0.2～4.2 m までの幹材積と D^2 の関係（B）

材積（ V_s ）の推移を算出すると，2年生時，3年生時および4年生時でそれぞれ $12.1 \text{ m}^3/\text{ha}$ ， $31.5 \text{ m}^3/\text{ha}$ および $49.9 \text{ m}^3/\text{ha}$ となり（図 5-9），1回目の間伐前では年間成長量が $20 \text{ m}^3/\text{ha}$ ほどの旺盛な成長量であったと推定された。また，芽かき区における 4.2 m 幹材積（ $V_{s4.2}$ ）は，2年生時，3年生時および4年生時でそれぞれ $9.1 \text{ m}^3/\text{ha}$ ， $23.4 \text{ m}^3/\text{ha}$ および $34.4 \text{ m}^3/\text{ha}$ となり，年間成長量は 2～3年生時の $14.3 \text{ m}^3/\text{ha}$ が最大であった（図 5-9）。なお，通直部幹材積（ V_s ）と幹の曲り部分を含む九州地方における広葉樹 I 類（日本林業調査会 1970）で推定した幹材積（ V_s ）と比べると，3年生時から差が出始め，11～16年生時における差は $42.8 \sim 49.0 \text{ m}^3/\text{ha}$ まで拡大した（図 5-9）。

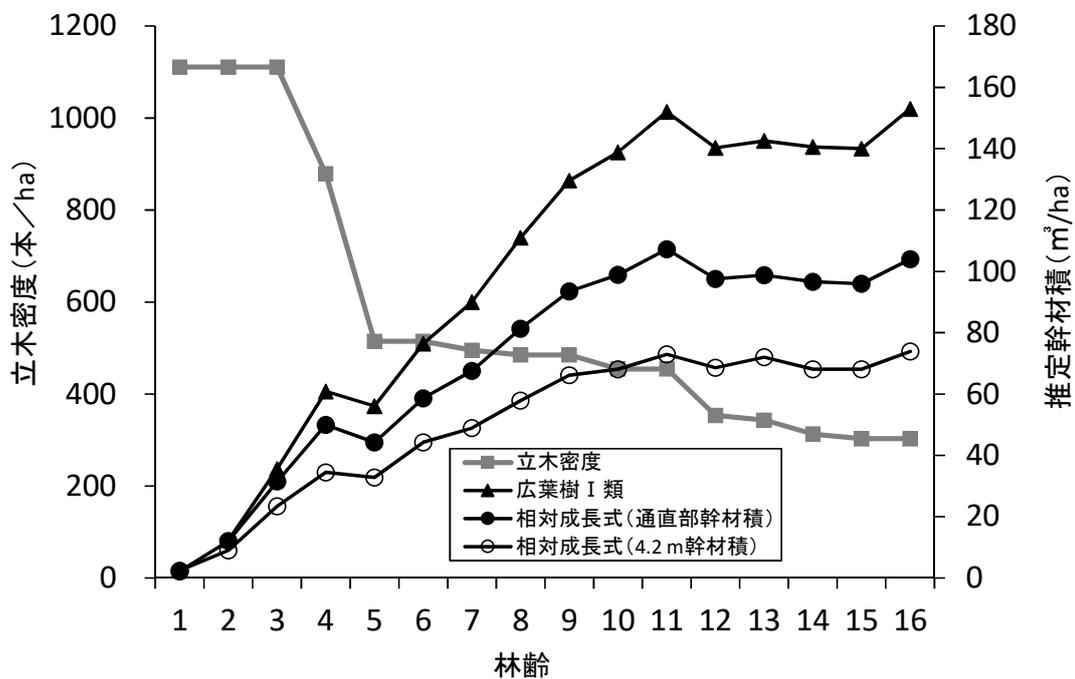


図 5-9 芽かき区の立木密度と幹材積の推移の推定

Y 軸左は芽かき区の立木密度，Y 軸右は広葉樹 I 類および相対成長式を用いて推定した幹材積。ただし，通直部幹材積は D^2H ，4.2 m 幹材積は D^2 を変数とした相対成長式を用いて推定。

5-4 考察

5-4-1 現存量の配分が肥大成長量に与える影響

芽かき区と対照区の胸高直径成長量において，対照区は 2 年生時までは芽かき区を大きく上回っていたが，3 年生時以降は同程度か下回る傾向がみられた（図 5-5 (A) および (B)）。対照区では芽かき区に比べ，枝が早期に成長したために，初期の 3 年間は胸高直径成長量が大きかったが，林冠閉鎖が早かったため，急激に成長量が減少したと考えられる。また，対照区でも 4 年生時と 11 年生時に間伐を実施し，芽かき区よりも立木密度が低かったものの，樹冠長率の平均値は同程

度で（表 5-1）、間伐後の成長量の増加が持続しなかったため（図 5-5（B））、16 年生時における胸高直径は芽かき区との間に差がみられなかったと考えられる。

芽かき区において、枝下高が 5.6～6.8 m の供試木（No.2～5）の胸高直径は 27～31 cm だったのに対し、枝下高が 8 m 以上と枝が高くまで枯れ上がり、枝乾重が少なかった 2 個体の供試木（No.1 および 6）は、胸高直径が 23 cm 程度と平均値よりも小さかった（表 5-1、図 5-6）。横井（2000）は、広葉樹二次林において、胸高直径が小さいうちは枝下高が低いものから高いものまでであるが、胸高直径が大きくなると枝下高の高い個体はみられなくなり、枝下高が 10 m のミズナラ（*Quercus mongolica* var. *grosseserrata*）の胸高直径は 50 cm 程度までしか成長しないと報告している。さらに、枝が高くまで枯れ上がった個体では、間伐を実施して、隣接個体との個体間競争を排除したとしても、樹冠長が短く、樹冠幅も小さいために樹冠の拡張が生じないと考察している（横井 2000）。今回、胸高直径が小さかった 2 個体の供試木（No.1 および 6）も、枝下高が高くまで枯れ上がり、樹冠長率が他の供試木に比べ、小さかった（表 5-1）。このような個体では、隣接木を間伐しても、胸高直径成長が望めず、将来大径木に誘導するのは困難であると考えられる。

ただし、樹冠長率が大きかった他の 4 個体の供試木も 10 年生時以

降の直径成長量が大きく減少していたのは（図 5-5 (A)）、1 回目の間伐率が低かったこと、または 2 回目の間伐時期が遅かったことにより隣接個体との樹冠の閉鎖に伴い、太枝から発生し、葉が着生していた二次枝が枯れ上がって落枝し、葉の分布が梢端部付近の狭い範囲に集中したことが要因になったと考えられる（図 5-6）。枝下高が低く、二次枝が枯れ上がっていない 47 年生（熊本県林業研究指導所 2015）および 36 年生（横尾 2002）の自生の孤立木の例では、20 年生時に達するまで、ほぼ一定の直径成長を示していた。このことから、今回の植栽密度で植栽直後の直径成長量を維持するには、二次枝が枯れ上がったと推察される 2 回目の間伐直後の立木密度（約 350 本/ha）以下に早い時期に調整する必要があると考えられる。そのためには、今回の報告で 4 年生時に実施した 1 回目の間伐率を 65% 程度（立木密度約 960 本/ha を約 350 本/ha に調整）まで上げ、2 回目の間伐の時期も直径成長が 2 cm 前後であった 7 年生時頃に早める必要があると考えられる。あるいは、本試験地のようにセンダンの初期成長が良好な立地では、植栽密度をさらに低くする検討も必要であり、幹材積 (V_s) が一定で増加していた 5~9 年生時の立木密度である 400~500 本/ha 程度（図 5-9）とすると間伐の本数および回数を減らすことも可能である。

また、(2)式より地上高 4.2 m における幹直径 ($D_{4.2}$) は、高い相関

で胸高直径（D）の約 83%と近似されたことから，4 m 材を生産する場合に胸高直径から末口径（地上高 4.2 m の直径）を高い精度で推定できることが示された。つまり，生産目標である末口径 30 cm 以上の 4 m 材を生産するには芽かきを地上高 4.2 m 以上まで実施し，胸高直径を 36 cm 以上に仕立てる必要があることを示している。ただし，16 年生時の胸高直径（表 5-1）およびその成長量（図 5-5（A））から短伐期施業の目標とした 20 年生時までには胸高直径 36 cm に仕立てるには，早急に間伐を実施し，直径成長を回復させる必要がある。

5-4-2 相対成長式による各現存量の推定精度

相対成長式による各器官の現存量は，通直部幹乾重（ W_S ）が D^2H_B ，通直部幹材積（ V_S ）が D^2H および D^2H_B ，枝乾重（ W_B ）および枝材積（ V_B ）では $D^2(H-H_B)$ を用いた時に高い決定係数を示した（表-2）。このことから，通直部幹乾重（ W_S ）および枝乾重（ W_B ）および枝材積（ V_B ）は，樹高（H）と胸高直径（D）に加え，枝下高（ H_B ）を測定すれば精度よく推定できることが明らかになった。特にセンダンの枝は重量で評価されるバイオマス燃料への利用が考えられており，今回導出した枝乾重における相対成長式の利用が有効であるといえる。

なお，今回，葉の乾重（ W_L ）については，いずれの相対成長式を用いても高い決定係数を示さなかったため（表 5-2），今後は，成長期間に落葉した葉量を含めた測定および解析の検討が必要であると考え

られる。

また、4.2 m 幹乾重 ($W_{s4.2}$) は、 D^2H で高い決定係数を示したが、当部分は乾重量で評価されることはないので、後述する地上高 4.2 m 以上の幹部分の乾重を推定する時に利用するのが有効であると考えられる。一方、4.2 m 幹材積 ($V_{s4.2}$) は、 D^2H 、 $D^2(H-H_B)$ および D^2 のいずれでも高い決定係数を示したことから、 D^2 を用いれば用材利用が可能な部分の幹材積を容易に推定できる (表 5-2)。

5-4-3 木材利用を考慮した幹材積の推定

これまでセンダンの幹材積の推定に用いられてきた西日本における広葉樹 I 類の幹材積式 (日本林業調査会 1970) を本林分に適用すると幹材積は $135.5 \text{ m}^3/\text{ha}$ となり、今回の D^2H および D^2H_B を用いて得られた相対成長式で推定した通直部幹材積 $103.9 \text{ m}^3/\text{ha}$ および $118.5 \text{ m}^3/\text{ha}$ (表 5-3) を大きく上回った。また、供試木の樹幹解析から推定した 1~16 年生時における相対成長式 (図 5-8 (A) および (B)) から得られた林分の通直部幹材積 (V_s) と比べても、広葉樹 I 類の値 (日本林業調査会 1970) が上回っており、特に、芽かき終了後にその差は広がった (図 5-9)。これまでセンダンで使われてきた幹材積式と今回の結果との間に大きな差がみられたのは、広葉樹 I 類の幹材積 (日本林業調査会 1970) は、幹の通直部分だけでなく、曲りの部分も含んでいるのに対し、今回の幹材積推定式は用材利用として不可欠な通直な

幹部分のみを用いて開発したものであるからである。また、対照区のように芽かきをしていない林分は、芽かきをした林分に比べ、通直な部分が短くなるため、その差がさらに大きくなってしまうと推測される（図 5-7, 表 5-3）。センダンの用材利用は幹の通直部分のみであり、現在、用材生産を目的に造成されているセンダン林は、芽かき施業を実施するのが前提となっている（熊本県林業研究指導所 2015）。したがって、今回提示した相対成長式を利用することでセンダンの用材として利用できる材積の推定精度の向上が期待できる。

ところで、センダンはケヤキと同様に枝の枯れ上がりによる自然落枝が進むと入皮による変色の発生率が高くなると以前から考えられていたが、第 2 章で報告したとおり枝径 2 cm 以上で枝打ちすると幹の材面に変色が発生しやすいことが確認されている。今回、全供試木で地上高 4.2 m（以下、芽かき最上部）以上の幹に着生していた枝が枯れ上がったため、芽かき最上部から枝下高の間では枯枝による節が発生し、材部の変色が高い割合で発生していると予想された。このことから、芽かき終了後は密度管理を適切に行い、枝の枯れ上りを抑えることで、地上から芽かき最上部まで変色の恐れのない用材生産が可能になるばかりでなく、幹の直径成長も維持できることが期待される。また、センダンの用途は家具材が中心で、幹の通直部分でも節や変色があると利用できないことを考えると、用材として利用できる幹

材積は地上から芽かき最上部までの幹部分とすべきである。以上から、センダンの用材利用材積を精度よく推定するためには、今回、算出した 4.2 m 幹材積式の利用が効率的であると考えられる。なお、用材として利用できない地上高 4.2 m 以上の幹部分は、枝と同様に重量で評価されるバイオマス燃料としての用途が考えられる。

第 6 章 総合考察

本章では、第 2 章から第 5 章までに記述した一連の研究結果とこれまでの知見に基づいて、センダンの育成から利用、さらに利用を考慮したうえでの収量の評価について、総合的に考察する。

第 2 章より、センダンを枝打ちする場合の材面の変色は、枝径 2 cm 以上では 78%、3 cm 以上では 100%みられたが、枝径 2 cm 未満では生枝、枯枝に関係なく確認されなかった。植栽密度試験において、3,000～7,000 本/ha の試験地では植栽密度が高いほど枝の直径成長を抑制する効果が認められており、枝径が 2 cm に達する幹径は 4 cm と推定している。同試験地では、植栽 1 年後の平均胸高直径は 3.2～4.0 cm (横尾 2010) に達していたので、幹直径と枝径の関係から植栽 1 年後の枝径は 2 cm を超えるものも発生する可能性が高い。加えて、枝打ちは、実施前の曲りの影響が残りやすく、通直材の生産には不十分であることが分かっている(日本木材加工技術協会関西支部早生植林材研究会 2014) ので、通直な幹の無節材を生産するのには適していないといえよう。

第 3 章より、芽かきを実施した 3 クロウンの試験林において、2 年生時の幹曲りと成長を検討したところ、系統による差はあるものの、芽かきによって 65～80%の割合で 1 等の個体が得られたことから、芽

かきは幹曲がりを抑制する有効な施業方法であることが明らかとなった。芽かきは芽が木化する前の直径 2 cm 以下で実施するため（横尾 未発表），幹曲がりの抑制だけでなく，変色の防止に大きな効果があると期待される（熊本県林業研究指導所 2015）。ただし，適地にセンダンを植栽し，芽かきを実施する場合の植栽密度は低密度の 400 本/ha（植栽間隔 5 m）としているため，芽かきのタイミングが遅れて，芽が枝になると植栽密度試験の枝（横尾・松村 2019）よりも太枝が発生する可能性がある。緒言で述べた夏芽かきは幹の通直性への影響は小さいものの，夏に発生した芽を芽かきせずに放置すると枝径 2 cm 以上になる可能性があるため，芽の成長に応じた実施回数を提示する必要がある。

第 4 章より，芽かきを実施した 10 年生時および 16 年生時のセンダンの木材性質の樹幹内変動を 3 クローンに分けて調べたところ，すべてのクローンで芽かきによる成長抑制は小さい傾向が認められた。また，両林齢時とも気乾密度にクローン間差が認められ，選抜育種の有効性が示唆された。今後，気乾密度が高い系統はフローリングや机の天板など高い密度が必要とされる材料への利用が有効であると考えられる。また，気乾密度，MOE および MOR は地上高に関わらず，髓から樹皮側に向かって高くなる傾向がみられたものの，肥大成長に関わらず，樹皮側に向かって大きく増加しないクローンがみられた。こ

のようなクローンは出来るだけ大径に仕立て、その性質を利用した木材性質の向上が有効であることが示唆された。

第5章ではセンダンの幹材積を算出する時に使われてきた『立木幹材積表－西日本編－（日本林業調査会 1970）』の九州地方における広葉樹I類の材積式に代わるセンダン独自の材積式の整備と提案を行った。現在、センダンの幹のうち利用されているのは幹の通直部分のみである。芽かきした林分でも広葉樹I類の材積式では過大評価になったことから、通直部分が短い芽かきを実施していない林分または自生している個体では、さらに過大な評価になってしまう。芽かきを実施していない林分における材積式については、別に検討する必要があるだろう。ただし、現在、造成されているセンダン林は用材生産を目的としており、芽かきを実施することを前提としているため、今回整備した材積式の利用が有効であると考えられる。さらに、芽かきを実施した高さに合わせた（今回は地上高 4.2 m）材積の算出も整備したことにより、通直部分でも芽かきした部分と芽かきしていない節が多い部分を分けて材積を算出することが可能となった。つまり、芽かきした部分からは無節の通直な幹が得られるため、付加価値の高い部分とそれ以外の部分に分けた幹材積の計算が可能となった。

また、芽かきを実施していない幹上部および枝はバイオマスとしての利用も考えられるので、本式を利用することで、それらの部分を重

量で評価できる。今後、耕作放棄地など地力が高いセンダン造成地の増加が期待されており、搬出経路が確保されている耕作放棄地における育成が進めば、収穫時に用材用とバイオマス用の材を効率的に搬出できると考えられる。

要 約

早生広葉樹としてセンダンの利用が注目されるようになり、熊本県だけでなく、全国でセンダンが植栽されるようになってきた。同時に幹曲りを抑制する施業である「芽かき」広く実施されるようになった。芽かきの実施に伴い、芽かきのタイミング、系統別の木材性質の解明および正確な幹材積の推定手法の確立が必要となった。

そこで、芽が枝になった時に実施する枝打ちが材に与える影響として枝径と変色の関係を明らかにした。次に、芽かきしたセンダンの芽の発生数と最大矢高の情報から適切な芽かきのタイミングの検討と幹曲りの定量的な評価を行った。さらに、これまで枝打ちされたセンダンでしか報告例がなかった木材性質について、芽かきした複数クローンの樹幹内変動を調べ、クローン間差について検討し、選抜育種の重要性について提言した。最後に、芽かきを実施したセンダン林分の幹材積について、これまで使われてきた「立木幹材積表－西日本編－」の広葉

樹I類の材積式に代わり，幹の通直部分だけでなく，芽かきを実施した部分に限定した材積式の整備を行った。主要な結論を以下に要約する。

(1)センダン幼齢林における枝の形態および枝打ちが材への巻込みと

変色に与える影響

1. 材に節や変色がなく長さ 4 m の通直材を生産目標としたセンダンの管理手法を提示するために，適切な植栽密度および枝打ちの実施時期について検討した。植栽密度 3,000 本/ha のセンダン人工林において植栽 3 年後に枝打ちを行い，その 4 年後に枝打ちした枝基部の巻込みおよび変色の状況を調査した。

2. 枝径 2 cm 未満では，1 年で巻込みが完了し変色は生じなかった。一方，枝径 2 cm 以上では，巻込みに 2 年以上を要し，78～100% で変色が確認された。次に，枝打ちを実施しない 3 段階の植栽密度区（3,000, 5,000 および 7,000 本/ha）を設定し，植栽 3 年後の地上高 0.2～5.2 m における枝の着生状況を調べた。いずれの密度区とも 1 個体当たりの総枝数（生枝＋枯枝）は概ね 10 本であり，着生部位は各年の梢端部付近に集中した。

3. 低密度区では，変色の原因となる枝径 2 cm 以上の割合が高かった。センダンは低密度で植栽すると幹曲りの可能性が高まることから，目的とする材の生産には，植栽密度を 5,000 本/ha 程度とし，樹高が 4.5 m

を超えかつ枝径が 2 cm 未満である植栽後 2 年以内に枝打ちを完了することが重要であると考えられた。

(2)芽かきがセンダン幼齢木の成長と幹曲りに与える影響および芽か

きの時期

1. 芽かきによるセンダンの幹曲がりの矯正効果を検討するために、1,100 本/ha で植栽された 3 クローン（1 型，18 型，M 型）のセンダン幼齢林において，地上高 4.5m まで芽かきを行い，芽の発生数，着生高および 2 年生時における長さ 4m 当たりの幹曲り（最大矢高）を調査した。
2. M 型は他の 2 クローンに比べ芽の発生数が少なく，特に地上高が高い範囲の発生数が少なかったため，芽かきを軽減できるクローンであると考えられた。
3. 最大矢高の平均値は，芽かき区で 2.1～2.6 cm，対照区で 11.2～15.3 cm と芽かきによる幹曲がりの矯正効果が認められた。最大矢高は対照区ではクローン間差が認められたが，芽かき区では認められず，芽かきによってばらつきが少ない通直な形状の丸太の生産ができることが明らかとなった

(3)芽かきしたセンダンにおける木材性質の樹幹内変動

1. 芽かきしたセンダン における木材性質を調べるために， 3 クロウンにおける 10 年生および 16 年生の樹幹内変動を検討した。
2. 直径成長は良好で，樹幹内の木材性質は，10 年生は気乾密度，MOE および MOR で，16 年生は気乾密度でクロウン間差が認められた。気乾密度，MOE および MOR は地上高に関わらず，髄から樹皮側に向かって高くなる傾向がみられたが，地上高別の平均値では大きな変化は認められなかった。成長初期は地上高が低い部分では気乾比重，MOE および MOR が低かったが，地上高が低いほど直径成長量が大きかったため，成長に伴い地上高による差が小さくなったと考えられた。センダンの生産目標は末口径 30 cm 以上，長さ 4 m としており，生産目標のサイズに仕立てることによって，地上高による差が小さい木材性質の材が収穫できる可能性が高いことが示唆された。

(4)芽かきしたセンダン林分における現存量および材の利用を考慮し

た幹材積の推定

1. 芽かきを実施し，長さ 4 m 以上の通直な幹に仕立てたセンダン林の現存量の推定精度を高めるために，16 年生林分において層別刈り取りによる幹，枝および葉の分布を調べ，相対成長関係を検討した。
2. 用材生産に不可欠である通直な幹が長く，枝下高が高い個体は胸高直

径が小さい傾向であった。ただし、枝下高が低い個体でも一次枝に着生している二次枝が枯れ上がったため、葉は上層の狭い範囲に集中して分布しており、10年生以降の幹の直径成長抑制の要因になったと考えられた。

3. 相対成長関係では、これまでセンダンの幹材積の算出に利用されてきた「立木幹材積表－西日本編－」の広葉樹I類の幹材積式は幹の曲り部分を含んでいるため、幹の通直部分および用材として効率的に利用できる芽かきによって仕立てた無節部分（地上高 0.2～4.2 m）の幹材積の相対成長式を求めた。これらの相対成長式は芽かきによる用材生産を目的とした時の幹材積を高い精度で推定するのに有効であると考えられた。

謝辞

本研究の遂行および本論文の作成にあたり，終始懇切なご指導を賜りました九州大学大学院農学研究院 松村順司教授に心から感謝の意を表します。

また，本論文に対し貴重なご意見をいただいた九州大学大学院農学研究院 久米篤教授，古賀信也教授に厚くお礼を申し上げます。

そして，本研究を進めるに際し，ご支援をいただいた九州大学大学院農学研究院 長谷川益己助教，阪上宏樹助教に厚くお礼を申し上げます。

さらに，本論文第 2 章および 5 章の内容の執筆にご支援をいただいた森林総合研究所九州支所の金谷整一博士，統計処理に関するアドバイスいただいた森林総合研究所林木育種センターの武津英太郎博士に心から感謝申し上げます。

おわりに，調査や試験にご協力いただきました熊本県林業研究・研修センターの職員および臨時職員の方々，九州大学大学院生物資源環境科学府環境農学専攻サステイナブル資源科学教育コース木質資源理学研究室および木質材料工学研究室の学生諸氏に心から感謝申し上げます。

引用文献

林野庁（2020）令和元年度森林・林業白書，全国林業改良普及協会，
東京， p.161.

全国天然木化粧合単板工業協同組合連合会（2017）インテリアに適し
た国産早生広葉樹の発掘実施報告書． 97pp

Cossalter.C.and Pye-Smith.C（2003）Fast-wood forestry:Myths and
Realities Center for International Forestry Reasearch
（CIFOR）.Bogor.Indonesia.

松村順司（2005）日本産早生樹の育成と材質．山林 No.1458，大日本
山林会，東京．

林弥栄（1969）有用樹木図説．誠文堂新光社，東京．

宮島淳二（1994）熊本県における広葉樹造林の手引き，啓文社，熊本．

CABI (Centre for Agriculture and Bioscience International) (2019) Invasive
Species 303 Compendium: Chinaberry (Melia azedarach) Datasheet. 304
<https://www.cabi.org/isc/datasheet/33144> (参照：2021年11月30日)

熊本県林業研究指導所(2015)センダンの育成方法 H27改訂版.17pp,
熊本県林業研究指導所，熊本

家入龍二（1998）有用林木遺伝資源植物のバイオテクによる保存と増殖
技術の開発．熊本県林業研究指導所業務報告書 37：17-20

横尾謙一郎（1997）広葉樹の育成に関する研究．熊本県林業研究指導

所業務報告 36 : 17-20

農林水産省 (2007) 素材の日本農林規格. 農林省告示第 1052 号

青砥一郎 (1990) イヌエンジュ幼齡林の生育状況. 日本林学会東北支部会誌 42 : 118-119

横尾謙一郎・福山宣高 (1997) 植栽密度の違いがクリ幼齡木の成長におよぼす影響について—用材生産を目的とした適正な植栽本数の検討—. 日本林学会九州支部研究論文集 50 : 71-72

吉野 豊・前田雅量 (1998) ケヤキ密度別植栽試験—7年めの生育状況—. 森林応用研究 7 : 59-62

横尾謙一郎 (2010) 植栽密度が異なるセンダン幼齡林の成長と幹材の形状. 森林立地 52 : 29-35

横尾謙一郎 (2014) 国産早生樹センダン育林. 第 4 回早生植林材研究会シンポジウム—国産早生樹植林とその可能性—要旨集.

段林弘一 (1993) ケヤキの枝打ちの方法と材の異常変色. 兵庫県林業試験場研究報告 40 : 29-32

段林弘一 (1994) ケヤキ枝打ちの一方法—枝打ち記録と節解析の結果から—. 林業技術 627 : 12-15

藤森隆郎・伊沢浩一・金沢洋一・清野嘉之 (1984) 枝打ちに関する基礎的研究IV—枝打ちに伴う材の変色の発生要因—林業試験場研究報告 328 : 119-143

兵藤博（1979）枝打ち試験－枝打ちに伴う材の異常変色について－.

広島県林業試験場研究報告 14：43-60

竹内郁雄（2002）無節材生産を目的とした枝打ちに関する研究．森林

総合研究所研究報告 382：1-114

宮地信男・那須精明（1978）スギ・ヒノキ造林木における異状変色材

発生の実態調査．高知県林業試験場研究報告 52：48-68

小島正（1996）育林施業体系化試験（I）平成8年度群馬県林業試験場

業務報告：11-12

小谷二郎・片岡久雄・森 吉昭（2003）ケヤキの枝打ちによる枝の巻

き込みと成長に与える影響．石川県林業試験場研究報告 34：7-10

橋詰隼人（1988）多雪地帯におけるケヤキ造林木の生育と枝打ちにつ

いて．日本林学会大会発表論文集 99：441-442

谷本丈夫（1990）広葉樹施業の生態学．創文，東京．

谷本丈夫・前田雄一・横井秀一・樋口洋一（1989）人工林内のブナ二

次林の構造と成長経過．日本林学会大会発表論文集 100：369-372

横尾謙一郎（2017）センダンの育成技術の開発・普及と材の利用につ

いて．山林 1597：28-35

松村順司・井上真由美・横尾謙一郎・小田和幸（2006）高炭素固定能

を有する国産早生樹の育成と利用（第1報）センダン（*Melia azedarach*）の可能性．木材学会誌 52(2).77-82

- 日本林業調査会（1970）林野庁計画課編立木幹材積表－西日本編－
- 横尾謙一郎（2004）合理的・効率的育林技術の開発．熊本県林業研究指導所研究報告 31：14-19
- 家入龍二（1995）林木育種に関する研究．熊本県林業研究指導所業務報告 33：11-13
- 加納孟・枝松信之・蕪木自輔（1959）製材用原木としてのスギ造林木の品質(第1報)釜淵産材の節．林業試験場研究報告 134：49-113
- 加納孟・枝松信之・蕪木自輔・斉藤久夫（1966）製材用原木としてのスギ造林木の品質（第3報）保育形式の異なる造林木の品質．林業試験場研究報告 185：57-197
- R Development Core Team（2017）R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL <http://www.R-project.org/>. 2017年8月2日参照
- 富田ひろし（1980）育林生産技術と変色材発生要因に関する研究．三重県林業技術センター業務報告 18：5-31
- 横尾謙一郎（2002）広葉樹の育成に関する研究．熊本県林業研究指導所業務報告 38：13-15
- 家入龍二（1997）広葉樹の育種に関する研究．熊本県林業研究指導所業務報告書 36：11-16
- 熊本県林業研究指導所(2015)センダンの育成方法 H27改訂版. 17pp,

- 熊本県林業研究指導所，熊本
- 鷺尾泰俊（1997）実験計画法入門（改訂版），日本規格協会、東京
- 植田幸秀（1992）スギの枝密度－確率過程にもとづく枝密度の誘導と精
英樹クローンへの適応－．鳥取県林業試験場研究報告 34：53-70
- 池本 隆（1992）ヒノキの枝形質について（I）－枝密度とクローン変
異－．鳥取県林業試験場研究報告 34：71-80
- 今村光春・光田 靖・吉田茂二郎・今田盛生（2001）樹幹解析支援ソフ
トウェアの作成．日本林学会九州支部研究論文集 54：15-16
- 松村順司，田上美里，緒方利恵，玉泉幸一郎，牟田信次，上脇憲治，
長谷川益己，小田一幸（2007）高炭素固定能を有する国産早生樹の
育成と利用（第2報）チャンチンモドキ（*Choerospondias axillaris*）
の可能性．木材学会誌 53(3)：127-133
- 宮島 寛（1979）日高産アオダモ材の生長と基礎材質．北海道大学農
学部演習林報告 36(2)：421-450
- Doan, V. D., Matsumura, J (2018) Within-stem variations in mechanical
properties of *Melia azedarach* planted in northern Vietnam. J.Wood
Sci.64：329-337
- 横井秀一（2000）用材生産に向けた広葉樹二次林の間伐．山林 1392：
37-44
- 只木良也・蜂屋欣二・棚秋一延（1969）森林の生産構造に関する研究

(XV) ブナ人工林の一次生産. 日林誌 51(12). 331-339

高橋幸男・浅井達弘・菊沢喜八郎 (1974) 名寄のシラカンバ林の現存量について. 北海道林業試験場報告 12. 29-37

丹下 健 (1999) バイオマスの測定. (森林立地調査法, 森林立地調査法編集委員会編, 博友社). 63-64

横尾謙一郎 (2002) センダンの枝性が樹形に与える影響. 九州森林研究 55 : 62-63

Summary

Sendan (*Melia azedarach* L.), an early growing broad-leaved tree, has attracted attention and been planted all over Japan, including Kumamoto Prefecture. The “bud pruning” technique developed by the author has been widely used to control stem crookedness. With this practice, it is still necessary to establish the timing of bud pruning and its effect on wood properties, and a method for estimating stem volume accurately. First, we clarified the relationship between branch diameter and discoloration, and the effect of pruning on the wood. Then, we investigated effects of bud pruning on stem-crookedness and stem growth in young sendan, and suggested frequency and timing for bud pruning. Next, we examined the properties of the wood in the stems of three clones that had previously only been reported for pruned sendan and discussed the importance of selective breeding. Finally, we developed a new formula for stem volume that replaces the standing tree volume table for type-1 hardwoods in Western Japan. An outline of these studies are summarized as follows.

Estimation on the optimal timing of pruning in young Sendan (*Melia azedarach* Linn.) stands.

1. To establish guidelines for the reliable production of straight *Melia azedarach* timber up to 4 m long without knots or discoloration, the relationship between planting density and pruning time was examined. Artificial *M. azedarach* stands (3,000 trees ha⁻¹) were pruned 3 years after planting and the branch stubs were removed completely.

2. This resulted in no discoloration around stubs that were below 2 cm in diameter within 1 year after pruning. However, discoloration occurred in 78–100% of branch stubs greater than 2 cm in diameter, which also required more than 2 years for occlusion. There was an average of approximately ten branches (live and dead) per tree and they were distributed around the top, which was 0.2–5.2 m in height for three planting densities (3,000, 5,000, and 7,000 trees ha⁻¹) without pruning for 3 years.

3. The number of branches above 2 cm in diameter and the proportion of live branches were highest in the low-planting-density stand. These results suggest that the optimal timing for pruning of *M. azedarach* is within 2 years after planting before the diameter of branches and the tree height exceed 2 cm and 4.5 m, respectively. In addition, the optimal planting density of the species is 5,000 trees ha⁻¹ due to the high probability of crooked trunks at

lower planting densities.

Effect of bud pruning on growth and stem-crookedness in young Sendan (*Melia azedarach* Linn.) stands.

1. To investigate the effect of bud pruning on stem crookedness, three sendan (*Melia azedarach* L.) clones (Type 1, Type 18, and M-type) planted at a density of 1,100 ha⁻¹ were pruned to a height of 4.5 m, and bud number and height were assessed. In the second year after pruning, stem growth and stem crookedness per 4-m segment were compared in pruned and control trees. Stem growth was lower in pruned trees than in control trees; however, the differences among clones was not significant in each treatment zone.

2. M-type clones produced fewer buds after pruning than type 1 and 18; this clone may require less labor for bud pruning because it produces fewer buds at the top of the tree.

3. Stem crookedness occurred at heights of 2.1–2.6 cm in pruned trees and 11.2–15.3 cm in control trees, indicating that bud pruning was effective for correcting stem bending. Variation in stem crookedness was greater among control trees than among pruned trees, indicating that bud pruning promoted the production of uniformly straight stems.

Within-stem Variation of Wood Properties in Bud-pruned *Melia azedarach*.

1. We investigated wood properties and variations in the stems of 10- and 16-year-old *Melia azedarach* trees of three clones (Type 1, Type 18, and M-type), to explore the potential of this species.

All three clones had straight stems due to bud pruning. Diameter at breast height ranged from 21.9–24.8 cm in 10-year-old trees and 23.1–31.2 cm in 16-year-old trees.

2. There were significant differences among clones in air-dry density, modulus of elasticity (MOE), and modulus of rupture (MOR) at 10 years, whereas at 16 years, air-dry density, MOE and MOR generally increased from the pith outward in all trees, regardless of elevation, but there were no significant changes in mean values by height. In the early stages of growth, air-dry density, MOE, and MOR were lower at lower elevations, but differences may have been less significant at lower heights because the lower the height, the better the growth of this species. Production targets were set at 30 cm for top end diameter and 4 m straight length, suggesting the possibility of harvesting materials from trees with similar heights, despite other differences, if trees attain target sizes.

Stem volume estimation of Sendan(*Melia azedarach* Linn.) stand subjected to bud pruning.

1. To obtain straight, tall (> 4 m) stems of *Melia azedarach* Linn. for timber production, bud pruning is performed. To estimate the effect of bud pruning on biomass distribution, we applied the stratified clip method to the aboveground parts of a 16-year-old *M. azedarach* stand and determined the allometric relationships among stems, branches, and leaves.

2. Trees with relatively long straight stems and high clear lengths had smaller diameter at breast height (DBH) values. However, in even lower clear-length trees, the secondary branches died, such that leaves were distributed mainly in the upper layer of the crown. This effect may be a factor in the stem diameter growth suppression observed after the 10th year.

3. For *M. azedarach*, however, we used the standing-tree volume table for type-1 hardwoods in Western Japan, which includes the curved part of the stem. Therefore, we derived one allometric equation to estimate the total volume of straight stems and another to estimate the volume of knot-free stems with pruned buds at 0.2–4.2 m in height, which are useful for efficient timber production. These allometric

equations will allow practical calculations of stem volume in bud-pruned *M. azedarach* for forestry applications.