

# 植栽密度の違いが 11 年生スギ、ヒノキの 成長と応力波伝播速度に及ぼす影響<sup>†1</sup>

袴田哲司<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>農林技術研究所 森林・林業研究センター

## Stress Wave Propagation Velocity of 11-year-old Japanese Cedar and Cypress

Tetsuji Hakamata<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>Shizuoka Res. Inst. Agric. and For. For. and For. Produc. Res. Cent.

### Abstract

To clarify the tree growth, wood quality, height, diameter at breast height (DBH), and stress wave propagation velocity (SWPV: a wood quality index) of different tree species, weeding method and tree-planting density were investigated. According to the statistical analysis, weeding method was not significantly affected by the height, diameter, or SWPV. However, tree-planting density and tree species were significantly affected by these three traits. In Japanese cedar (*Cryptomeria Japonica* D. Don.), average height of 3000 trees/ha was tallest among all planting densities. The average DBH and SWPV of trees with 3000 trees/ha density were significantly smaller and larger than that of trees with 1000 or 1500 trees/ha density, respectively. Correlation coefficients between DBH and SWPV showed significant relationship,  $r = -0.533$ . In Japanese cypress (*Chamaecyparis obtusa* Sieb. et Zucc.), average height of trees with 3000 trees/ha density was tallest among all planting densities, which was significantly greater than that of trees with 2000 and 1500 trees/ha densities. The average DBH and SWPV of trees with 2000 and 3000 trees/ha densities were significantly smaller and larger than that of trees with 1000 trees/ha density, respectively. Correlation coefficients between DBH and SWPV was  $r = -0.416$ .

キーワード：樹高，胸高直径，応力波伝播速度，植栽密度，線型モデル

## I 緒 言

静岡県では、成熟した森林資源を有効に活用するとともに、偏った林齢の平準化を図り、木材生産を持続的に進めていくために、2018～2020 年度にかけて「低コスト主伐・再造林事業」を展開してきた。2015 年度からは花粉発生源対策促進事業も継続しており、この中でも主伐とその後の再造林を進めている。これらの事業が行われている中で、労働生産性を向上させて素材生産の効率を

高める必要がある一方で、再造林の低コスト化も不可欠であるため、これまでの調査研究や県の事業による実証等を踏まえて、再造林にかかる経費について試算した<sup>4)</sup>。これにより地拵え、苗の植栽、獣害対策、下刈り方法などのさまざまな手法の組み合わせで再造林経費の低コスト化を目指す必要があることが明らかになったが、苗木代と植栽経費の削減を図り、間伐経費も下げることができ低密度植栽も重要な方法として挙げられる<sup>7)</sup>。造林の低コスト化に植栽の低密度化がキーワードになることが紹介されているように<sup>14)</sup>、3000 本/ha 程度が標準的な植

†1 静岡県林業技術センター：平成 12 年度（2000）業務成績報告

†2 静岡県林業技術センター：平成 17 年度（2005）業務成績報告

†3 静岡県農林技術研究所森林・林業研究センター：平成 29 年度（2017）静岡県農林技術研究所成績概要集（森林・林業編）

栽密度とされている中で<sup>7)</sup>、これよりも低い密度で植栽した場合の収益性についても全国各地で検討されてきた<sup>8)12)</sup>。

このように、再造林の低コスト化の手段として低密度植栽の期待が高まる一方で、将来の木材の利用を考えた場合、植栽密度が立木の成長や材質にどのような影響を与えるかを認識しておく必要がある。植栽密度と諸形質の関係は、これまでの調査研究である程度は明らかになっている。例えば、オビスギでは、約2000~2800本/haが望ましい密度であると報告されており<sup>2)</sup>、ヒノキでは1500本/ha以上の密度ならば、欠陥がないとされる<sup>13)</sup>。

一方、静岡県においては、2000本/haで植栽された120年越えの林分も存在するが<sup>10)</sup>、スギやヒノキの成熟した林分での植栽密度と諸形質の関係についての調査事例がなく、若齢期における調査報告があるのみである<sup>11)12)13)</sup>。このような状況において、2010年に異なる密度で植栽された試験林が<sup>6)</sup>、2021年度に11年を経過した。11年は十分に成熟した林分とは言えないが、エリートツリーや特定母樹の選抜実施要領や指定基準では概ね10年生以上が選抜対象とされていることや<sup>14)15)</sup>、秋田県における植栽密度別調査は11年生時に実施されていることから<sup>14)</sup>、表現型の形質を調査する樹齢には達していると考えられる。そこで、当該林分でスギとヒノキの11年生時点の調査を行い、植栽密度と成長や、応力波伝播速度で評価した材質との関係について検討した。

## II 調査地及び方法

### 1 調査地

浜松市天竜区西藤平の民有林で2010年3月にスギとヒ

ノキの裸苗を異なる密度で植栽した試験地を調査対象とした(図1)。当地は標高約230~270mの東北東向き斜面で、土壌型はBc~Bd~Bd(d)~Beである。斜面の上部には植栽当時で3年生のヒノキが1000本/ha、2000本/ha、3000本/haの密度で植栽されており、斜面の下部には2年生のスギが1000本/ha、1500本/ha、2000本/ha、3000本/haの密度で植栽されている<sup>6)</sup>。各植栽密度区において、植栽後2年目の2011年から4年目の2013年にかけて毎年1回の下刈りを全刈りで行った区と坪刈りで行った区に分かれている<sup>6)</sup>。

### 2 調査方法

植栽から11成長期後の2021年1~2月に、各樹種、各植栽密度、各下刈り方法別の試験区において、樹高を測棒で、胸高直径を直径巻き尺で測定した。材質の評価については、概ね10年生以上で指定が行われる特定母樹でも用いられ<sup>16)</sup>、ヤング率との相関が強い応力波伝播速度を用いた<sup>1,9)</sup>。なお、本調査地では、各樹種、各植栽密度において平均胸高直径は10cm以上であったが、スギクローンにおいて応力波伝播速度で平均胸高直径10cm以下でも強度推定が可能であるとされていることから<sup>9)</sup>、スギだけでなくヒノキでもこの指標での評価を試みた。FAKOPP Microsecond Timber(ハンガリー製)を用いて、各個体の地際から70cmの高さとそこから100cm上(地際から170cm)の位置にそれぞれセンサを取り付け、上部のセンサを小型ハンマーで軽く打撃し、1個体につき5回の応力波伝播時間(microsecond/m)を測定した。応力波伝播速度は同機で得られる5回の平均時間をm/sに換算した数値を用いた。

本研究で対象とした試験地において、各個体の配置図がなく、植栽した当時の全個体を特定できない。また、

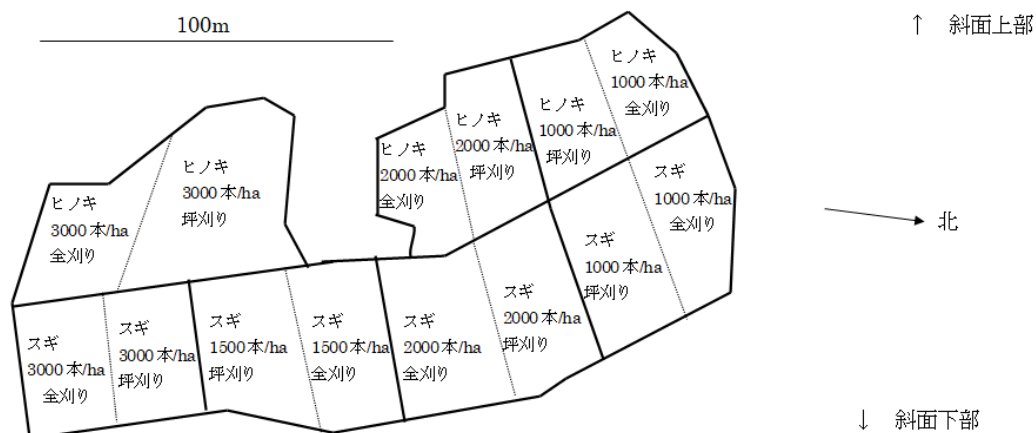


図1 調査地の概略図

伊藤ら(2012)を改変。

<sup>14)</sup> 林木育種センター(2012)エリートツリー選抜実施要領。(平成24年3月27日付け23森林育第350号)最終改正(平成29年3月30日付け28森林育第387号)

<sup>15)</sup> 林野庁(2020)別紙1特定母樹指定基準。(http://www.rinya.maff.go.jp/j/kanbatu/kanbatu/attach/pdf/boju-9.pdf),2022年10月16日閲覧

下刈り時の誤伐や過去に獣害を受けた記録もある<sup>9)</sup>。このため、本調査においては各試験区内で連続的に配置する

任意の19~26個体を調査し、二股、獣害痕、腐れ、こぶなどの外観的形質不良木を除外した通直な個体15~23本についてデータ解析の対象とした(表1)。

表1 調査地の概要

樹種	植栽密度 (本/ha)	下刈り方法	調査 本数	データ解析 対象本数
スギ	1000	全刈り	23	23
		坪刈り	21	17
	1500	全刈り	24	18
		坪刈り	26	23
	2000	全刈り	25	21
		坪刈り	24	22
3000	全刈り	24	21	
	坪刈り	25	20	
	全体		192	165
ヒノキ	1000	全刈り	24	16
		坪刈り	19	15
	2000	全刈り	25	20
		坪刈り	24	20
	3000	全刈り	24	20
		坪刈り	25	20
	全体		141	111

### 3 データ解析

樹種、樹高、胸高直径、応力波伝播速度の3形質をそれぞれ目的変数とした線形モデルで逸脱度分析を行った。その場合の説明変数を樹種、植栽密度、下刈り方法とした。

分析の結果、後述するように下刈り方法は各形質に影響しなかった。そのため、スギとヒノキのそれぞれについて、全刈り区と坪刈り区を合わせた個体数(31~43本)でTukey-Kramerの多重比較検定により3形質それぞれの植栽密度間の比較を行った。佐々木ら(2009)は、各植栽密度の調査本数を31~46本として多重比較を行っているが<sup>13)</sup>、これと同程度の個体数を確保していると判断した。

また、それぞれの樹種について、調査個体の胸高直径と応力波伝播速度の関係としてPearsonの積率相関係数を求めた。

表2 線形モデルによるデータ解析

応答変数	説明変数	逸脱度	自由度	p値
樹高	樹種 (S) ***	615.75	1	$< 2.20 \times 10^{-16}$
	植栽密度 (D) ***	49.96	3	$8.13 \times 10^{-11}$
	下刈り方法 (W)	0.08	1	0.78
	S×D	0.04	2	0.98
	S×W	0.01	1	0.94
	D×W	6.54	3	0.09
胸高直径	樹種 (S) ***	114.06	1	$< 2.20 \times 10^{-16}$
	植栽密度 (D) ***	100.27	3	$< 2.20 \times 10^{-16}$
	下刈り方法 (W)	0.02	1	0.89
	S×D	2.20	2	0.33
	S×W	0.49	1	0.48
	D×W**	15.82	3	0.001
応力波伝播速度	樹種 (S) *	5.12	1	0.02
	植栽密度 (D) ***	78.98	3	$< 2.20 \times 10^{-16}$
	下刈り方法 (W)	1.73	1	0.19
	S×D	5.43	2	0.07
	S×W	1.06	1	0.30
	D×W***	21.34	3	$8.95 \times 10^{-5}$

\*  $p < 0.05$ , \*\*  $p < 0.01$ , \*\*\*  $p < 0.001$

Sはspecies, Dはdensity, Wはweedingを示す。

### III 結 果

#### 1 線型モデルによる解析

線型モデルによる逸脱度分析の結果、下刈り方法は樹高、胸高直径、応力波伝播速度の各形質に影響していなかった。樹種は各形質に有意に影響していたが、応力波伝播速度に比べて ( $p < 0.05$ )、樹高と胸高直径はその程度が大きかった ( $p < 0.001$ ) (表2)。植栽密度も各形質に有意に影響していた ( $p < 0.001$ )。

#### 2 異なる植栽密度によるスギの成長と材質

スギを植栽した 1000 本/ha 区、1500 本/ha 区、2000 本/ha 区、3000 本/ha 区の平均樹高は、それぞれ 10.4m、11.3m、10.7m、11.5m であった。3000 本/ha を標準とした場合、樹高は 1500 本/ha では有意差が認められなかったが、2000 本/ha、1000 本/ha では有意差が認められた。1000 本/ha は 1500 本/ha とも有意差があった。

平均胸高直径はそれぞれ 18.3cm、15.7cm、15.2cm、13.7cm、平均応力波伝播速度はそれぞれ 2284m/s、2392cm/s、2492cm/s、2524cm/s であった。胸高直径、応力波伝播速度は、2000 本/ha では 3000 本/ha と有意差が認められなかったが、1000 本/ha と 1500 本/ha はそれぞれ 3000 本/ha と比べて差があった (図2)。

胸高直径と応力波伝播速度の相関係数は  $-0.533$  であった ( $p < 0.001$ ) (図3)。

#### 3 異なる植栽密度によるヒノキの成長と材質

ヒノキを植栽した 1000 本/ha 区、2000 本/ha 区、3000 本/ha 区の平均樹高は、それぞれ 7.4m、7.7m、8.3m であり、3000 本/ha と 2000 本/ha 以下の密度で有意差が認められた。平均胸高直径は、それぞれ 14.1cm、12.0cm、11.4cm、平均応力波伝播速度は、それぞれ 2283m/s、2623cm/s、2678cm/s であった。胸高直径と応力波伝播速度は 3000 本/ha と 2000 本/ha で有意差が認められず、3000 本/ha と 1000 本/ha で有意差が認められた (図2)。

胸高直径と応力波伝播速度の相関係数は  $-0.416$  であった ( $p < 0.001$ ) (図3)。

### IV 考 察

本調査地におけるスギ 7 年生時の調査結果では、植栽密度や下刈り方法は樹高に影響せず、胸高直径は 1000 本/ha で全刈りした場合が大きかったとされている<sup>9)</sup>。今回の調査は 11 年生時にあたるが、樹高は植栽密度の影響を

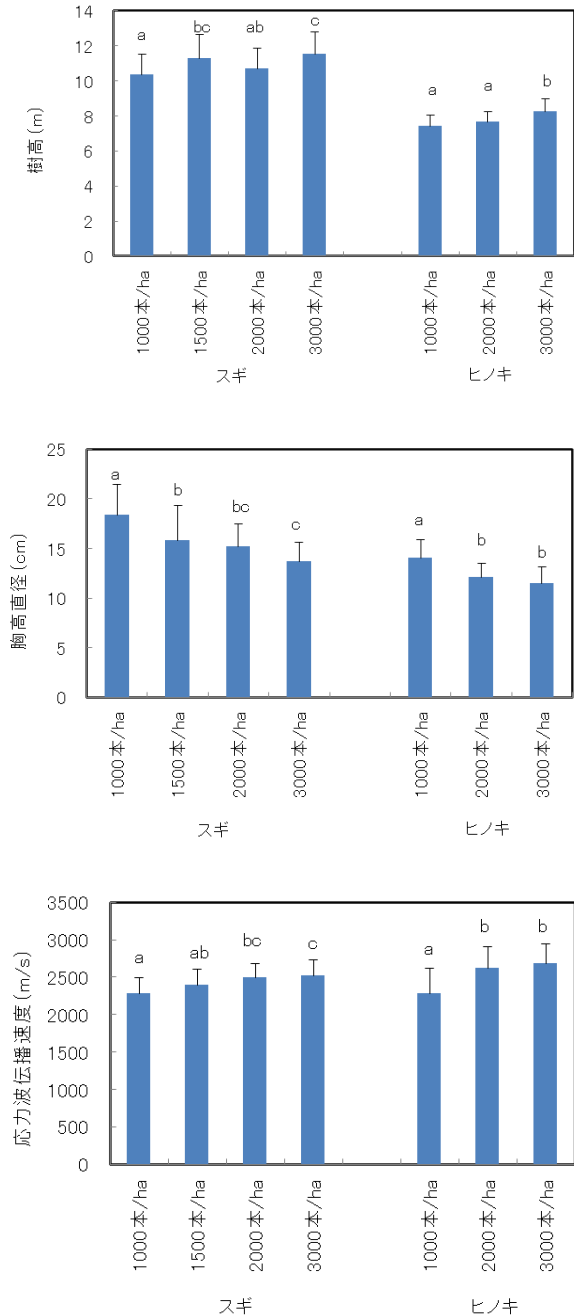


図2 植栽密度別の樹高、胸高直径、応力波伝播速度各形質について、樹種ごとに Tukey-Kramer の多重比較検定を行った。異なるアルファベットに5%水準の有意差有り。エラーバーは標準偏差を示す。

受け、胸高直径は下刈り方法の影響を受けていないという点で同一林分の 7 年生時とは異なる分析結果となった。4 年間の成長により異なる結果になったと考えられるが、7 年生時の調査とすべて同一の個体を測定しているわけではなく、調査本数が異なることも考慮する必要がある。一方、本研究と樹齢が同じ秋田県の 11 年生スギでは、低密度の 1000 本/ha 区で樹高と胸高直径が最も高くなって

いる<sup>10)</sup>。また、宮崎県におけるオビスギの35年生林分における10段階の密度別試験地の結果では、植栽密度が低下するにつれて平均樹高と平均直径が大きくなっており、特に植栽密度と直径成長量との間に強い負の相関が得られている<sup>2)</sup>。これらと比較した場合、本調査では最も植栽密度が高い3000本/haで平均樹高が大きくなっているが、この理由については明確ではない。今後の成長推移を観察し判断する必要がある。それに対し、低密度で胸高直径が大きいことは、他の報告と同様の結果であった<sup>21)</sup>。個体間の競争が少なくなることで直径成長が促進されたというこれまでの考察があるが<sup>10)</sup>、それと同じ理由だと考えられる。

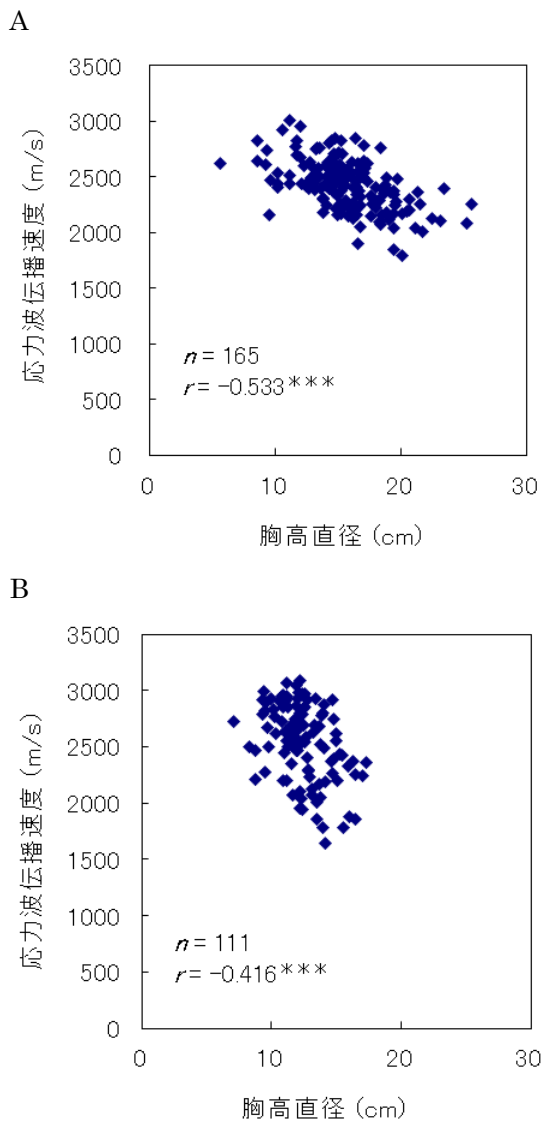


図3 胸高直径と応力波伝播速度の相関関係

A スギ B ヒノキ \*\*\*  $p < 0.001$

応力波伝播速度は材質を評価する一つの指標であり、ヤング率との相関が強いことから<sup>10)</sup>、速度が大きいほど材が変形しにくいことが、本調査ではスギで植栽密度が高くなるにつれて平均応力波伝播速度が高まる傾向がみられ、オビスギの調査結果<sup>2)</sup>と一致していた。この報告には明記されていないが、挿し木林業が盛んな宮崎県であること、挿し木品種のトサアカを植栽していることから、挿し木苗で造林した試験地である可能性が高い。これとスギの実生苗を植栽している本調査地での結果により、挿し木苗、実生苗によらず、同様の傾向になると推察できる。また、本調査で応力波伝播速度と胸高直径に負の相関が認められていることから、高密度の植栽では平均胸高直径が小さくなり、それに伴い応力波伝播速度が大きくなるという妥当性のある結果である。オビスギの調査では、植栽密度3349本/ha区の応力波伝播速度は1122本/ha以上のその他の区と有意差がないという結果であり、3000本/ha台と1000本/ha台の応力波伝播速度に違いがみられない<sup>2)</sup>。一方、本調査の結果からは通常の植栽密度である3000本/ha区は2000本/ha区とは有意差が認められないことから、応力波伝播速度を指標とした材質は通常の植栽密度と比べても大差ないと考えられるが、それよりも低い植栽密度では材質の低下を招く可能性を考慮する必要がある。

佐々木ら(2009)によると、34年生のヒノキ林分では1000本/ha区から3000本/ha区の間で樹高に有意差がなく、胸高直径は植栽密度が高くなるにつれて大きくなるとされている<sup>13)</sup>。本研究の11年生ヒノキでは、3000本/haと比べて1000本/ha区と2000本/ha区では樹高が有意に低かった。樹齢に24年間の開きがあるため単純な比較はできないが、樹高に関してはスギと同様に他の報告と異なる結果となっているため、今後の成長がどのように推移するかを確認する必要がある。一方、胸高直径は34年生林分と同じ傾向にあり、植栽密度は直径成長に影響する重要な要因であると考えられた。

材質面では、34年生林分の調査で1500本/ha以上の密度ならば無節性や幹形の点で大きな欠陥がないことが示唆されており、1000本/ha区は製材上の条件が不利になると報告されている<sup>13)</sup>。本調査ではヒノキの1500本/haの試験区がなく、材質の指標としては応力波伝播速度を用いている点異なるが、2000本/ha区ならば3000本/ha区と応力波伝播速度に有意差がないため、これまでの林業で採られていた通常の植栽密度での材質と同等であると考えられた。一方、応力波伝播速度と胸高直径の間には負の相関があることから、平均胸高直径が大きくなる低密度の1000本/ha区は平均応力波伝播速度が最も低

い。1000本/haの応力波伝播速度は3000本/haより劣っていることから、1000本/haは材質面では木材利用時の注意が必要であると考えられた。

低密度植栽による造林コストの削減については、複数の報告で論じられている。その中には、木材の品質や地拵え、下刈りに関して植栽密度に関わりなく一定であると仮定して収支を計算している場合もある<sup>12)</sup>。本研究からは、11年生時では植栽密度を2000本/haまで低下させても生育や材質の点から概ね問題ないと考えられる。しかし、それ以上に植栽密度を低下させた場合は材質が劣ることが示唆され、植栽密度により下刈り工程に違いもあることから<sup>9)</sup>、より精度の高い伐採収益と造林・育林経費の関係を求めるのであれば、今後は材質や下刈り工程を加味した試算が必要であると考えられた。また、今回の調査では、枝下高、完満度、枝の本数、下刈り時の誤伐リスク<sup>3)</sup>などは扱っていない。植栽密度と各種形質との関係をより明確にするためには、将来の伐採を迎える時期に、それらの要因を含めて植栽密度と立木の形質の関係について評価を行う必要がある。

本研究では植栽密度により造林木の形質が異なった。このような結果を踏まえて、どの程度の植栽密度で造林するかについて、最終製品の目的として何を重視するかが重要であるとの指摘がある<sup>2)</sup>。将来の木材マーケットだけでなく、山間部の担い手不足も考慮し<sup>8)</sup>、将来の林業経営の目標を明確にした上での技術普及が必要である。

## V 摘 要

スギおよびヒノキを1000本/ha～3000本/haの密度で植栽した試験地で、11年生時の樹高、胸高直径、応力波伝播速度の調査を行い、植栽密度と成長や応力波伝播速度で評価した材質との関係を検討した。

線型モデルによる逸脱度分析の結果、下刈り方法は樹高、胸高直径、応力波伝播速度の各形質に影響していなかった。樹種は各形質に有意に影響していたが、応力波伝播速度に比べて、樹高と胸高直径はその程度が大きかった。植栽密度も各形質に有意に影響していた。

スギは、3000本/haの植栽密度で最も平均樹高が大きく、1500本/haの密度とは有意差がなかったが、2000本/ha、1000本/haとは有意差が認められた。平均胸高直径は3000本/haが最も小さく、平均応力波伝播速度は3000本/haが最も大きく、それぞれ2000本/haとは有意差がなかったが、1500本/ha以下の密度とは有意差が認められ

た。胸高直径と応力波伝播速度の相関係数は、 $-0.533$ であった。

ヒノキは、3000本/haの植栽密度で最も平均樹高が大きく、2000本/ha以下の密度とは有意差が認められた。平均胸高直径は3000本/haが最も小さく、平均応力波伝播速度は3000本/haが最も大きく、それぞれ2000本/haとは有意差がなかったが、1000本/haとは有意差が認められた。胸高直径と応力波伝播速度の相関係数は、 $-0.416$ であった。

植栽密度により、造林木の形質は異なるため、将来の林業経営の目標を明確にした上で、植栽時の密度を決定する必要がある。

## 謝 辞

本研究を行うに当たり、天竜森林組合の皆様には、協力をいただいたので、御礼を申し上げます。

## 引 用 文 献

- 1) 藤澤義武・柏木学・溝上展也・井上祐二郎・倉本哲嗣・平岡裕一郎(2005)：FAKOPPによる立木ヤング率評価手法のヒノキへの応用。九森研 58, 142～143
- 2) 福地晋輔・吉田茂二郎・溝上展也・村上拓彦・加治佐剛・太田徹志・長島啓子(2011)：低コスト林業に向けた植栽密度の検討—オビスギ植栽密度試験地の結果から—。日林誌 93, 303～308.
- 3) 福本桂子・太田徹志・溝上展也・岩永史子・吉田茂二郎・寺岡行雄・加治佐剛(2017)：下刈り回数、斜面方位および植栽密度の違いがスギ植栽木の枯死および誤伐に与える影響—鹿児島大学附属高隈演習林を事例として—。森林計画誌 51, 1～7.
- 4) 袴田哲司・平山賢次・大場孝裕・山本茂弘・渡井純・伊藤愛・野末尚希・近藤晃(2019)：省力的手法による主伐後再生林の低コスト化—静岡県における調査研究からの試算。静岡農林技研報 12, 29～40.
- 5) 石栗太・川島麻里・飯塚和也・横田信三・吉澤伸夫(2006)：27年生ヒノキ林における立木の応力波伝播速度と材質の関係。材料 55, 576～582.
- 6) 伊藤愛・綿野好則・袴田哲司・山本茂弘・近藤晃(2015)：植栽密度別試験地における省力的な下刈

- り方法の検討—作業工程と植栽木の初期成長量の比較—。静岡農林技研研報 8, 89~93.
- 7) 松本和馬・小谷英司・駒木貴彰 (2015) : 東北地方における低コスト化再造林の実用化と課題. 東北森林科誌 20, 1~15.
- 8) 三重野裕通 (2019) : 九州の試験地から見えてきた植栽密度と収支の関係. 低コスト再造林への挑戦—一貫作業システム・コンテナ苗と下刈り省力化, 日本林業調査会, 東京, 136~137.
- 9) 宮下久哉・織田春紀・半田孝俊 (2009) : 若齢期におけるスギクロンの材質評価. 木材学会誌 55, 136~145.
- 10) 森下廣隆 (2018) : 健全な森林づくりと林業. 山林 1608, 表紙写真に寄せて.
- 11) 野口麻穂子・和田覚 (2017) : 秋田県における植栽密度の異なるスギ若齢林の林分構造と成長. 日林誌 99, 41~45.
- 12) 太田徹志・高比良聡・中間康介・吉田茂二郎・溝上展也 (2013) : 伐採収益と植栽経費の観点からみた低密度植栽の有効性. 日林誌 95, 126~133.
- 13) 佐々木祐希子・竹内郁雄・寺岡行雄 (2009) : 植栽密度の違いが植栽木の成長に及ぼす影響—ヒノキ 34年生林分における事例—. 九森研 62, 14~17.
- 14) 宇都木玄 (2015) : これからの森林施業の道筋を考える. 山林 1570, 20~29.

