

低植栽密度で造成されたスギ・ヒノキの標準伐期齢を超えた林分の林分構造及び材質(幹形・強度)調査結果について

近畿中国森林管理局 広島森林管理署 堂 蘭 理 一 郎

1 課題を取り上げた背景

我が国の林業は、戦後に植林された人工林が成熟期を迎えており、この成熟した森林資源を循環利用し、林業の成長産業化を実現するため、低コスト化に向けた森林施業技術の確立が喫緊の課題となっています。

このため、近畿中国森林管理局では、伐採、搬出、地拵、植栽、下刈、間伐の各段階で低コスト化に向けた技術を推進するため、コンテナ苗を活用した一貫作業システムの導入、植栽本数の削減等に取り組んでいます(図1)。

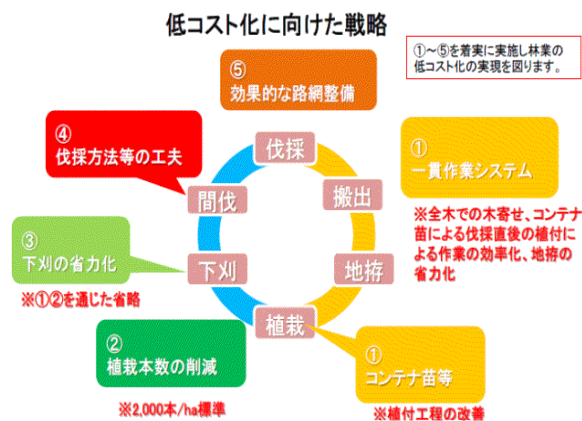


図1 近畿中国森林管理局の重点取組事項

これまで、近畿中国森林管理局では、広島森林管理署の新元重山国有林にあるスギ及びヒノキ植栽本数密度別試験地(1,000本区〔本/ha〕、1,500本区、2,000本区、3,000本区、以下、試験地)の技術開発により、平成14年度研究発表(岩田・村上)では「上位木の平均直径に大差がない、樹高に差がないことからすると、植栽本数を低減させても適切な時期に間伐を行うことにより、収穫時には同程度の材質、材積を収穫できるものと推察できる」との報告等が行われ、この成果等も踏まえて、平成15年度より管内の標準的な植栽本数を2,000本/haとしています。

また、試験地の追加調査も行われ、平成19年度鹿児島大学農学部調査(佐々木)では「形質面で低密度植栽の導入には1,500本/ha以上の植栽密度が大きな欠陥のない密度である」との報告が、平成23年度研究発表(石堂)では「1,500本/haにすることで更なる造林コストの低減も可能ではないか」との報告が行われています。

現在の構造用製材では、強度性能が明確であり寸法安定性が高いことが求められています。平成26年度に試験地(スギ42年生、ヒノキ41年生)で2回目の間伐を実施するにあたり、標準伐期齢を超え利用できる径級に達したことから、強度性能に関する調査をはじめて行うこととしました。

2 試験地の概要(図2、図3)

試験地は、広島県福山市新市町藤尾の新元重山国有林に、スギ試験地が755ろ林小班、ヒノキ試験地が755ち2林小班の谷沿いに細長く設定されています。両試験地は標高約450m、古生層砂岩の中傾斜斜面のDB(d)型土壌に成立しています。昭和47年にスギ、昭和48年にヒノキが、正方形植栽(1,000本区:3.3m×3.3m、1,500本区:2.5m×2.5m、2,000本区:2.2m×2.2m、3,000本区:1.8m×1.8m)で植栽されています。植栽後は、下刈、つる切、枝打、除伐等の作業が行われ、平成10年には保育間伐(1,000本区を除く)が行われています。

なお、試験地は、昭和47年度に「大苗の疎植による地拵、植付、下刈行程の省力化およびその成長観察による大苗導入の実用性の検討」を目的として下刈終了時点まで試験が行われ、さらに平成14年度に「植栽本数密度による林分構造変化の比較検討及び材質への影響と低コスト化に向けた森林造成技術の確立」を目的として平成44年度までの開発期間で試験が行われています。

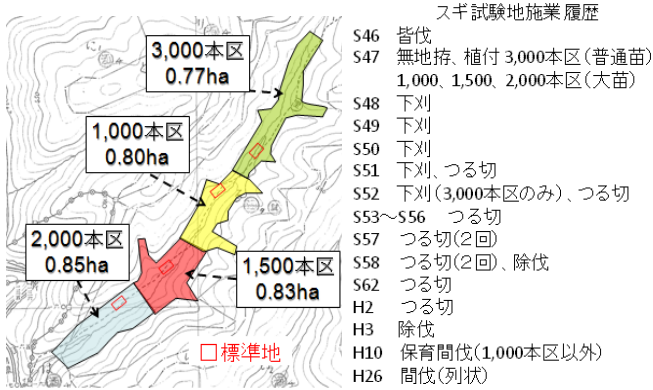


図2 スギ植栽本数密度別試験地の概要

間伐前のスギ試験地林況 (H26.9撮影)

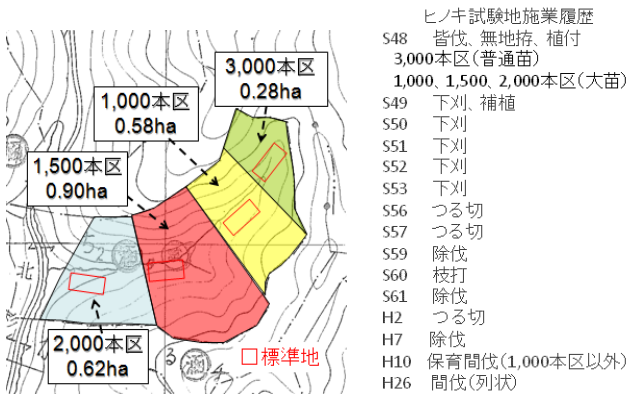
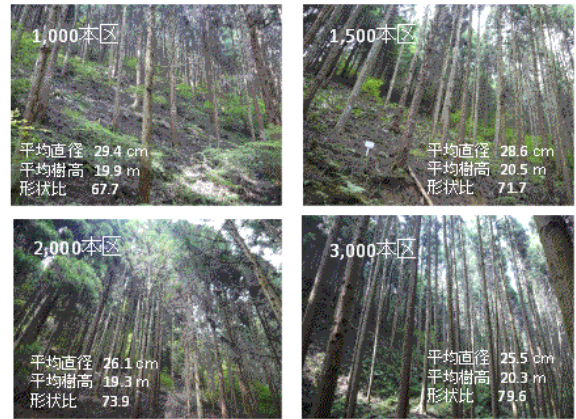


図3 ヒノキ植栽本数密度別試験地の概要

間伐前のヒノキ試験地林況 (H26.9撮影)

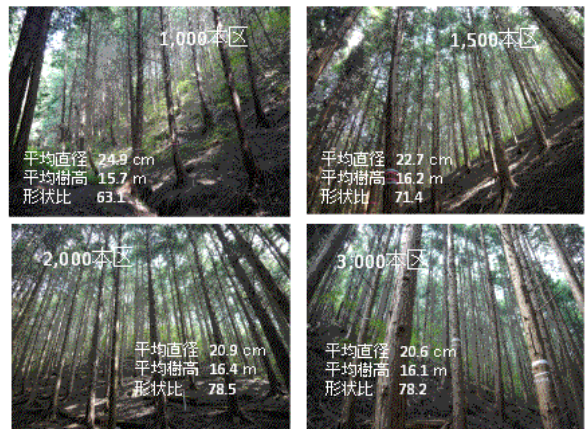


表1 林分調査結果 (H13,H19,H23,H26)

1 平成13年度の標準地設定調査						
		林分調査結果(スギ)				
植栽本数密度区分	標準地面積 (ha)	調査本数 (本)	立木密度 (ha/本)	平均直径 (cm)	平均樹高 (m)	材積 (m³/ha)
1,000本区	0.1105	108	977	22.9	16.6	343
1,500本区	0.0903	106	1,174	22.4	17.9	431
2,000本区	0.0777	129	1,660	20.3	17.0	465
3,000本区	0.0595	100	1,681	19.3	17.4	446

2 平成19年度の鹿児島大学農学部調査						
		林分調査結果(ヒノキ)				
植栽本数密度区分	標準地面積 (ha)	調査本数 (本)	立木密度 (ha/本)	平均直径 (cm)	平均樹高 (m)	材積 (m³/ha)
1,000本区	0.1085	101	922	21.1	15.4	258
1,500本区	0.3127	369	1,180	19.1	15.3	275
2,000本区	0.1482	265	1,788	17.8	15.2	372
3,000本区	0.0200	42	2,100	17.1	15.3	403

3 平成23年度の標準地設定調査						
		林分調査結果(スギ)				
植栽本数密度区分	標準地面積 (ha)	調査本数 (本)	立木密度 (ha/本)	平均直径 (cm)	平均樹高 (m)	材積 (m³/ha)
1,000本区	0.01		900	28.4	18.8	
1,500本区	0.01		1,200	28.8	19.7	
2,000本区	0.01		1,600	24.0	18.9	
3,000本区	0.01		2,100	23.1	18.0	

4 平成26年度の標準地設定調査						
		林分調査結果(スギ)				
植栽本数密度区分	標準地面積 (ha)	調査本数 (本)	立木密度 (ha/本)	平均直径 (cm)	平均樹高 (m)	材積 (m³/ha)
1,000本区	0.1385	109	787	29.6±6.7	20.0±2.9	520
1,500本区	0.1225	132	1,078	28.6±7.3	20.5±3.2	703
2,000本区	0.0825	104	1,261	26.1±6.6	19.3±4.0	668
3,000本区	0.0824	105	1,274	25.5±6.7	20.3±2.9	660

5 平成23年度の標準地設定調査						
		林分調査結果(ヒノキ)				
植栽本数密度区分	標準地面積 (ha)	調査本数 (本)	立木密度 (ha/本)	平均直径 (cm)	平均樹高 (m)	材積 (m³/ha)
1,000本区	0.0352	31	881	24.9±4.0	16.5±1.5	355
1,500本区	0.0306	41	1,340	21.0±3.1	17.3±1.2	409
2,000本区	0.0245	46	1,878	18.5±3.5	16.8±1.6	455
3,000本区	0.0198	40	2,020	19.3±3.0	16.5±1.5	507

6 平成26年度の標準地設定調査						
		林分調査結果(ヒノキ)				
植栽本数密度区分	標準地面積 (ha)	調査本数 (本)	立木密度 (ha/本)	平均直径 (cm)	平均樹高 (m)	材積 (m³/ha)
1,000本区	0.01		900	25.2	16.4	
1,500本区	0.01		1,300	22.0	16.6	
2,000本区	0.01		1,500	19.3	15.1	
3,000本区	0.01		2,100	20.2	16.6	

7 平成26年度の標準地設定調査						
		林分調査結果(ヒノキ)				
植栽本数密度区分	標準地面積 (ha)	調査本数 (本)	立木密度 (ha/本)	平均直径 (cm)	平均樹高 (m)	材積 (m³/ha)
1,000本区	0.1067	107	1,003	24.9±4.3	15.7±1.7	398
1,500本区	0.0792	104	1,313	22.7±4.3	16.2±1.7	452
2,000本区	0.0791	130	1,643	20.9±4.4	16.3±1.6	504
3,000本区	0.0737	114	1,547	20.6±4.3	16.1±1.4	448

3 調査方法

(1) 直径・樹高等の測定

今回、各試験地内に新たな標準地（スギ試験地 0.08 ～ 0.14ha、ヒノキ試験地 0.07 ～ 0.11ha）を設定し、直径及び樹高を測定しました。直径は、直径巻尺を用いて 0.1 cm 括約で毎木測定しました。樹高は、VERTEX III を用いて 1 m 括約で毎木測定しました。植栽本数密度別の立木密度、平均直径、平均樹高、材積を林分調査結果にまとめました。なお、直径と樹高に関する測定は、これまで複数回実施されていますが、異なる標準地で実施されています（表 1）。

また、間伐終了後に標準地内の残存立木で樹型級区分調査を行いスギ試験地、ヒノキ試験地ともに地位 1 等に該当することを確認しました。

(2) 幹形（細り）の測定

幹形（細り）の測定には、標準地内の間伐（伐採）予定木の中から、試験区毎に主林木の平均胸高直径相当及びその前後の直径級階に該当する個体について、それぞれ 5 本程度（各試験区 12 ～ 15 本）を選定・表示し、伐倒後に測定の部位高（1.2、3.2、4.2、6.2、7.2、8.2、9.2、10.2 m 等）を直径巻尺を用いて 0.1 cm 括約で測定しました（写真 1）。



写真 1 幹形（細り）の測定

(3) 応力波伝播速度の測定

応力波伝播速度の測定には、ファコップ（FakoppTM：ハンガリー、アルナス社製、関西育種場から借用）を用いて、試験区毎の主林木の平均胸高直径相当の 50 個体について行いました。ファコップは本体と 2 つのセンサーからなり、両センサーは一定の距離を持って樹幹の上下方向に取り付け、入力側のセンサーをハンマーで叩いて発生した応力波が、もう一方のセンサーを通り過ぎるのに要した時間をマイクロ秒単位で直読しました（写真 2）。

今回は、地際から 150 cm の位置にスタートセンサー、50 cm の位置にストップセンサーを設置し、1 個体につき樹幹の長径、短径の 2 方向をそれぞれ 3 回ずつ行い、これらを平均して個体ごとの応力波伝播時間としました。応力波伝播速度は、計算により得られた応力波伝播時間をセンサー間の距離で除すことで求めました。



写真 2 応力波伝播速度の測定

音速とヤング率との間には、 $V_e = \sqrt{E/\rho}$ （ V_e ：音速、 E ：ヤング率、 ρ ：材密度）の関係があり、ヤング率は音速の二乗に比例し、ヤング率と立木状態で測ったファコップ音速には正の直線関係が認められています（参考文献：藤澤義武、柏木学、井上祐二郎：ファコップを用いた材質優良個体の非破壊的選抜技術、九州森林研究 56：180-181、2003、藤澤義武、柏木学、井上祐二郎・倉本哲嗣、平岡裕一郎：FAKOPP による立木ヤング率評価手法のヒノキへの応用、九州森林研究 58：142-143、2005）。

4 調査結果

(1) スギの調査結果

① 直径成長

スギの直径成長は、平均胸高直径は 25.5 ～ 29.6 cm で、平成 13 年度標準地調査（平均胸高直径 19.3

～ 22.9cm)と比較して 5.8～ 6.7 cmの増加となっており、林分閉鎖以降の肥大成長は試験区間の大きな違いは見られませんでした。

平均胸高直径の多重比較の結果、2,000 本区及び 3,000 本区が 1,000 本区及び 1,500 本区に対して有意差が認められました (表 2)。

表 2 スギの平均胸高直径

1,000本区	D=29.6 cm、標準偏差=6.7 cm
1,500本区	D=28.6 cm、標準偏差=7.3 cm
2,000本区	D=26.1 cm、標準偏差=6.6 cm
3,000本区	D=25.5 cm、標準偏差=6.7 cm

②幹形 (細り)

スギの 1.2 m 部の直径を 1 とした相対上部直径を比較しました。

多重比較の結果、6.2 m 部に 1,000 本区と 1,500 本区とで有意差が認められましたが、他の試験区間及び他の上部直径では有意差が認められませんでした (図 4)。

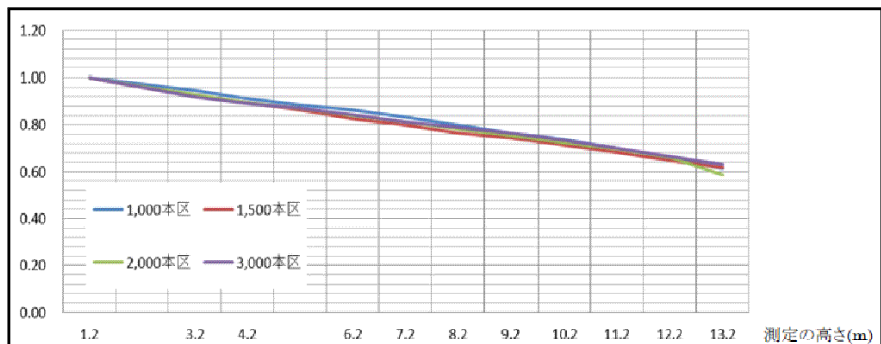


図 4 スギの地上高別 $D_n/D_{1.2}$ の平均 (1.2m 部位の直径を 1.00 とした相対上部直径)

③応力波伝播速度及びヤング率

スギの各試験区の平均音速を比較しました。反復測定が行われていなかった 2,000 本区については 3 反復のある 30 サンプルのみを使用しました。

表 3 スギの平均音速

1,000本区	平均音速 2,962mm/s、標準偏差=290mm/s (n=50、測定対象個体直径30cm)
1,500本区	平均音速 2,990mm/s、標準偏差=202mm/s (n=50、測定対象個体直径29cm)
2,000本区	平均音速 3,180mm/s、標準偏差=209mm/s (n=30、測定対象個体直径26cm)
3,000本区	平均音速 3,169mm/s、標準偏差=187mm/s (n=50、測定対象個体直径26cm)

多重比較の結果、1,000 本区及び 1,500 本区と 2,000 本区及び 3,000 本区との間に有意差は認められませんでした。これらのことから、植栽本数密度が低くなるにつれ直径が大きくなり、応力波伝播速度は低下する傾向が示唆されました (表 3)。

測定した応力波伝播速度から (動的) ヤング率を求め、静的な計測法に比べてこの測定方法の弾性係数の評価は 1 割程度高くなるとされていることから、さらに (動的) ヤング率から 10 % 減じて、(静的) ヤング率の値を推計しました。この結果を機械等級区分毎のヒストグラムにしました。1,500 本区以上では、多くの都道府県が製品品質規格の下限のヤング率基準値としている E70 をほとんど上回っていました。また、1,000 本区でも E70 以上は 78 % ありました (図 5)。

(参考文献：(公財) 日本住宅・木材センター：構造用木材の強度試験マニュアル VI.動的弾性係数の非破壊測定方法：72、2011)

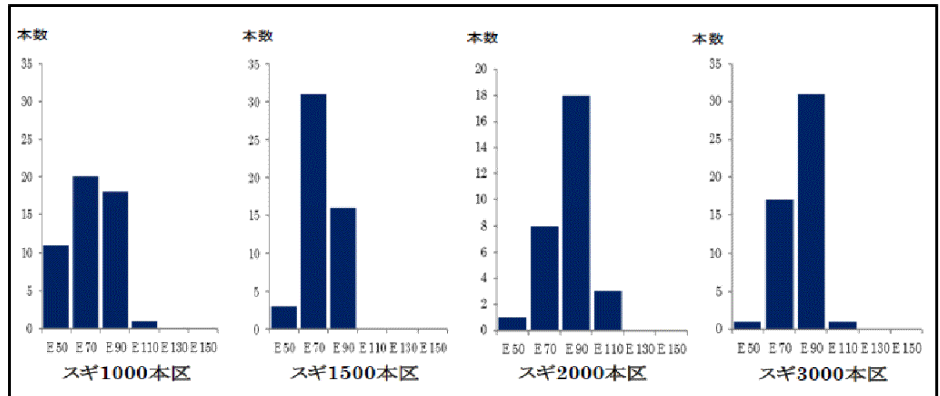


図 5 機械等級区分毎のヒストグラム (スギ各試験区)

(2) ヒノキの調査結果

①直径成長

ヒノキの直径成長は、平均胸高直径は 20.6 ～ 24.9 cm で、平成 13 年度標準地調査 (17.1 ～ 21.1cm)と比較して 3.1 ～ 3.8 cm 増加となっており、林分閉鎖に伴う試験区間の肥大成長は大きな違いが見られませんでした。

平均胸高直径の多重比較の結果、1,000 本区と 1,500 本区、1,500 本区と 2,000 本区とで有意差が認められました (表 4)。

表 4 ヒノキの平均胸高直径

1,000本区	D=24.9 cm、標準偏差=4.3 cm
1,500本区	D=22.7 cm、標準偏差=4.3 cm
2,000本区	D=20.9 cm、標準偏差=4.4 cm
3,000本区	D=20.6 cm、標準偏差=4.3 cm

②幹形 (細り)

ヒノキの 1.2 m 部の直径を 1 とした相対上部直径を比較しました。

多重比較の結果、4.2 m 部から上部に 1,000 本区と他の試験区間で有意差が認められました (図 6)。

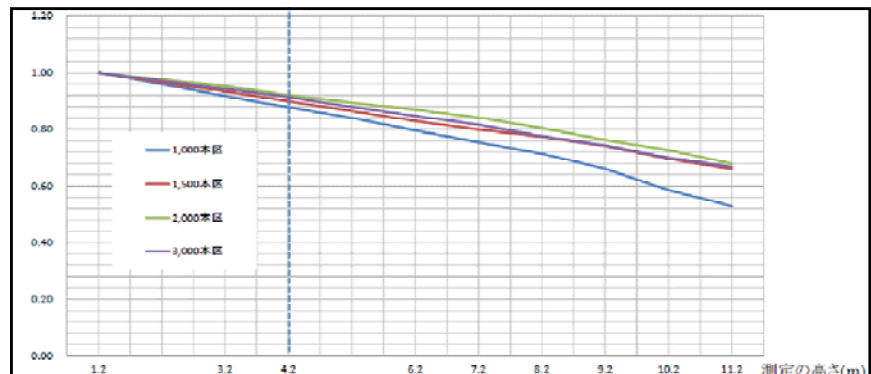


図 6 ヒノキの地上高別 $D_b/D_{1.2}$ の平均 (1.2m 部位の直径を 1.00 とした相対上部直径)

③応力波伝播速度及びヤング率

ヒノキの各試験区の平均音速の測定結果を比較しました。

多重比較の結果、3,000 本区と他の試験区間に有意差が認められました (表 5)。

表 5 ヒノキの平均音速

1,000本区	平均音速3,722mm/s、標準偏差=247mm/s (n=50、測定対象個体直径25cm)
1,500本区	平均音速3,716mm/s、標準偏差=445mm/s (n=50、測定対象個体直径23cm)
2,000本区	平均音速3,785mm/s、標準偏差=255mm/s (n=50、測定対象個体直径21cm)
3,000本区	平均音速4,013mm/s、標準偏差=310mm/s (n=50、測定対象個体直径21cm)

スギと同様に、(動的) ヤング率から (静的) ヤング率の値を推計し、その結果を機械等級区分毎のヒストグラムにしました。1,500 本区ではヒノキの製品品質規格の下限のヤング率基準値である E90 よりも低い値を示すものが 10% ありましたが、1,000 本区を含めて E90 を上回るものがほとんどでした (図 7)。

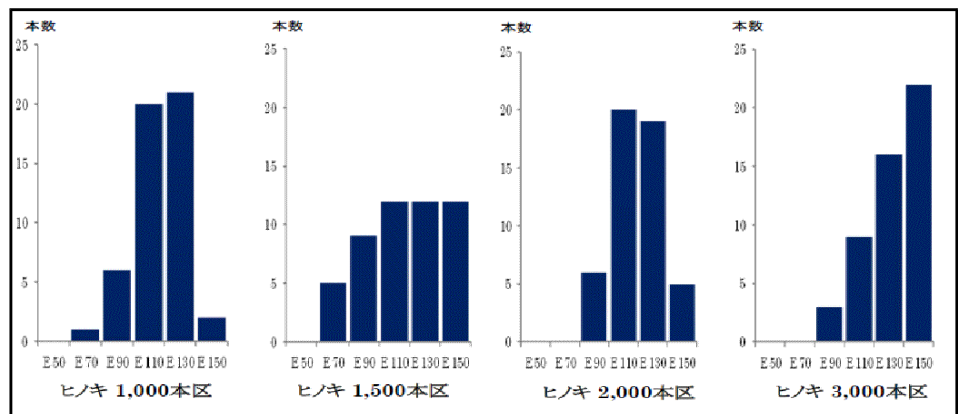


図 7 機械等級区分毎のヒストグラム (ヒノキ各試験区)

5 考察

今回の幹形及び強度の調査結果を踏まえれば、地位の高い箇所に植栽されたスギ林分については、植栽本数密度 1,500 本/ha 以上であれば十分利用可能な木材が生産できることがわかりました。一方で、植栽本数密度 1,000 本/ha については、幹形については問題ないが、強度にバラつきが大きいことがわかりました。強度の高い育種品種を選んで植栽を行えば、植栽本数密度 1,000 本/ha でも利用可能な木材生産が可能と判断されます。

また、地位の高い箇所に植栽されたヒノキ林分についても、植栽本数密度 1,500 本/ha 以上であれば十分利用可能な木材が生産できることがわかりました。一方で、植栽本数密度 1,000 本/ha については、強度的には問題ないが、幹形の変化が大きく、歩留まりが悪いことから木材生産を目指す人工林の造成は回避が適当と判断されます。

なお、今回の試験区はスギ・ヒノキともに地位の高い箇所であり、樹高成長が良好であったことから、低植栽密度でも林分閉鎖が早く、幹形及び強度に悪い影響が出にくい傾向があったのではないかと思います。一方、地位が劣る場合、特に初期 15 年生程度までの期間で肥大成長が抑えられることから、強度的には良い影響が出るのが考えられますが、林分閉鎖の遅れにより幹形の変化が大きくなるという問題が出る可能性が考えられます。このようなことから、地位が中等の箇所（地位 2 相当）で低植栽密度がどのような幹形及び強度になるか検証が必要と思われれます。

また、今回の強度調査は、立木段階でファコップを用いて応力波伝播速度を測定し（静的）ヤング率の値を推計しましたが、丸太段階でのヤング率（縦振動法）及び破壊による静的ヤング率測定による検証も必要と思われれます。

現在、2,000 本/ha 植栽については、各県で民有林への本格導入に向けた調査・研究・検討が行われているところです。平成28年8月には広島県と共催で「2,000本植栽育林技術体系普及研修会」を開催したところ、広島県内の森林組合、県の出先機関のほか、近隣の山口県、島根県からの参加もあり、合計97名の出席がありました。このほか、他県からの現地調査や講師依頼にも対応しているところです（写真3）。

最後に、低コスト化に向けた森林造成技術を民有林に普及させるためには、これまでの研究成果のほか、民有林サイドが最も関心のあるトータルコストや販売価格等のデータについても、収集・分析・整備を行っていくことが必要ではないかと考えます。



写真3 2,000 本植栽育林技術体系普及研修会の様子