

成長が早いスギの強度性能を解明

成長に優れた苗木を用いた場合、低密度植栽や下刈り回数の省略により初期保育の低コスト化が期待できる一方で、年輪幅が広くなることなど成長の速さが木材の強度性能に影響を及ぼし、木材の価値が低下することが懸念されます。そこで、成長が早いスギの強度性能を調べた結果、利用上の問題がないことがわかりました。

樹木の成長と木材の強度性能との関係

木材の中で、幹の中心から10～15年輪までの若い時期に形成された部分を未成熟材部と言い、その外側の成熟材部と比較して強度性能が全般的に劣ります。例えば、材料のたわみにくさを示す指標であるヤング率は、未成熟材部の方が成熟材部よりも小さくなります(図39)。成長が早いスギでは、未成熟材部の幹(断面)に占める割合が多くなり、また年輪幅も広くなることから、木材の強度性能が低下する懸念があります。

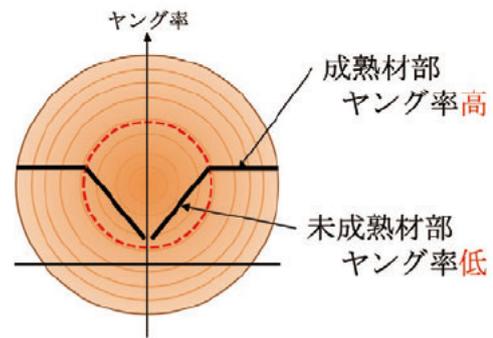


図 39. 横断面におけるヤング率の分布

成長が早いスギ

佐賀県では、スギ精英樹同士的人工交配によりF1個体を作成し、①成長、②材の強度、③雄花量、④挿し木発根率を総合評価してF1個体の選抜を行っています。エリートツリー等の成長に優れた苗木の植栽は始まったところであり、成木が得られないことから、これらのF1個体を中心として佐賀県に植栽された成長の早いスギ(樹齢30年、平均胸高直径26.8cm)を用いて強度試験を行いました。

成長が早いスギの強度性能

成長が早いスギから得られた桝組壁工法用製材(図40;断面寸法38mm×89mm)の強度試験を行った結果、桝組壁工法用製材のヤング率と曲げ強度(破壊時の応力)との間には相関が見られ、曲げ強度はほぼ全ての試験体で基準強度を上回りました(図41)。これにより、成長が早いスギから得られた製材品の強度性能は、利用上問題がないことがわかりました。



図 40. 成長が早いスギから得られた桝組壁工法用製材

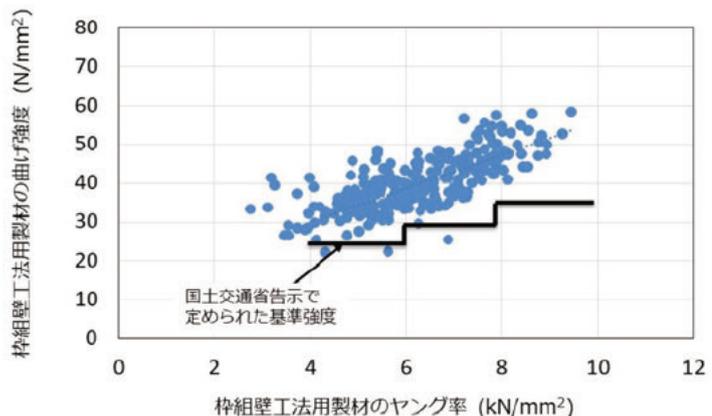


図 41. 桝組壁工法用製材の強度試験の結果

苗木を作る

植えて育てる

計画を立てる

コラム：普及するには川下の視点も大切

佐賀県では、1965年に第一世代精英樹同士の人工交配を開始し、交配の組合せ別に作出した第二世代(F1)の実生個体(約8,500個体)を植栽した林分を設定しました。次に約10年次時点の毎木調査をもとに、成長等の優れた約100個体を選抜し、挿し木増殖した苗を用いて1980年代にクローン検定林を県内6箇所に設定しました。そのクローン検定林の中から成長、材質、雄花着花特性および発根特性に優れた系統(品種)を選抜し、普及を始めています。

成長の早い新しい品種を普及するため2018年に、ユーザーである林業・木材業関係者への説明会を始めましたが、年輪幅が広くなり木材としての価値が低くなるとの見解から、あまり良い反応は得られませんでした。山で木を育て収穫する林業と木材として加工し販売する木材産業は、川上と川下と言われるように別の視点を持って仕事や研究が進められてきており、川下から求められる材質という点で、品種の性能を示すデータが十分でないことを痛切に感じた瞬間でもありました。ちょうどその頃に本研究がスタートし、幸運にも材質評価のパートを佐賀県のクローン検定林の材料で担うことになりました。

強度試験から得られた結果から、成長が優れたスギの製材品の強度性能は、利用上問題ないこと^(P.22)を示すとともに、品種間で強度性能が大きく異なるというものでした(図43)。これらの試験結果と製材品を準備し、再度、関係者への説明会を開催したところ(図42)、強度性能への不安は和らいだようで、新しい品種への期待の声が聞かれるようになりました。このように、川上と川下の両者がお互いの視点を理解して開発を進めることが大切なことなのです。



図42. 製材品見学会における非破壊での強度測定の様子

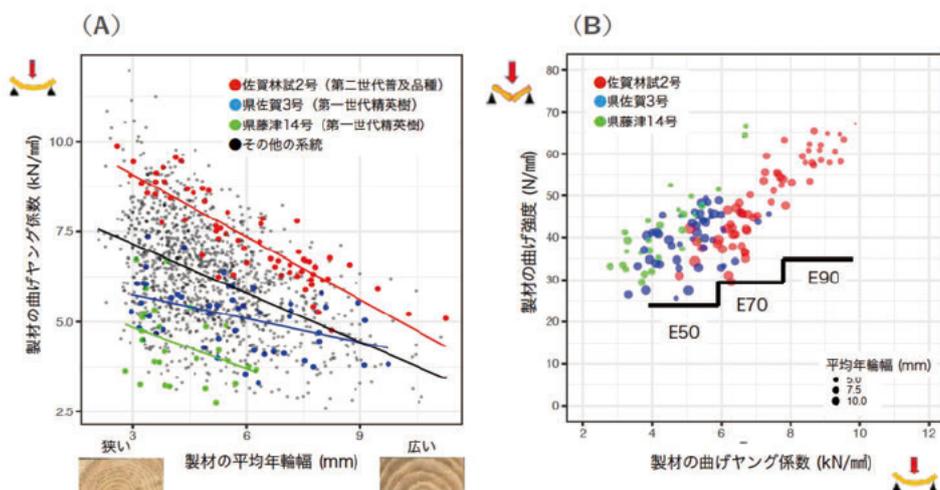


図43. 各スギ品種での製材品の年輪幅と曲げヤング係数の関係(A)および曲げヤング係数と曲げ強度の関係(B)

3 階建ての施業計画支援ツール I-Forests の開発

エリートツリー等を用いた施業支援する3種類のツール；I-Forestsを開発しました。TWI等の情報から苗木の初期成長を推定し図化するI-Forest.GE。森林簿や航空機レーザー計測の情報を基に計画立案を支援するI-Forest.FV。植栽地の下刈りの要否を判断するI-Forest.CA。これらのツールを上手に活用することにより、再造林コストの削減に寄与できます。

施業計画支援ツール I-Forests

今回開発した支援ツール (I-Forests) は、植栽前の計画立案を支援する I-Forest.GE および I-Forest.FV と、植栽後の下刈り要否を判断する I-Forest.CA の3つのツールで構成されています (表1)。エリートツリー等の成長の優れた苗木の成長は、地位の高い場所ほど早いことが期待されます。地位は、伐採前であれば林分調査により推定は可能ですが、伐採前樹高等の情報がない皆伐跡地では推定が困難です。また、市町村全域といった広範囲での地位を林分調査により推定するのは、労力・コストを考慮すると非常に困難です。このようなケースに対応するために TWI 等の地形指標から苗木の初期成長を推定する I-Forest.GE を開発しました。また、航空機レーザー計測等による伐採前の測量データがある場合は、I-Forests の中核ツールである I-Forest.FV の活用が有効です。I-Forest.FV は、森林の現況から再造林コストの試算、収穫予想を対話的に行い、植栽密度や下刈り回数の削減といった低コスト・省力的な施業プランの検討を支援します。植栽後の下刈りの要否については、現場の状況によって変わります。そこで、観察時点のスギの樹高、競合植生のタイプや高さから、その年の下刈りの要否を判断する I-Forest.CA を開発しました。これらの3つのツールからなる I-Forests をうまく活用すれば、立地とエリートツリーの特性にあった施業プランの作成と実行、そして修正が可能となります。

表1. I-Forests の各ツールの特徴

ツール名	Browser-based Growth Estimation tool (I-Forest.GE)	GIS-based Forest data Viewer (I-Forest.FV)			Mobile-based Competition Assessment tool (I-Forest.CA)
		森林簿ビューワ	コスト計算	収穫量/収支予測	
動作環境	ウェブブラウザが動作する機器	QGISが動作するPC			スマートフォン タブレット
必要データ	標高データ	森林簿および航空機レーザー計測等の測量データ			現場視察
主機能	<ul style="list-style-type: none"> 苗木や競合植生の成長の推定とマップ化 エリートツリーの成長予測 	<ul style="list-style-type: none"> 地理情報の表示 現在および将来の林況推定 	<ul style="list-style-type: none"> 指定した林分の主伐収入、再造林費用の推定 	<ul style="list-style-type: none"> 伐期齢、間伐方法等の入力による、収穫量と収支の推定 	<ul style="list-style-type: none"> 調査年の下刈り要否を判断

今後の展開

今後は、開発したツールの普及を図るとともに、エリートツリーの特性や立地環境条件に関する新たな研究成果を反映したモデルの精緻化を継続し、またユーザーの意見を聞きながらより使いやすいツールの開発を行っていく予定です。

GIS と連携した施業計画支援ツール (I-Forest.FV)

地域の森林の現況と植栽から収穫に至るまでの人工林施業全体を見渡しながら、主伐収入や再造林コストの試算、収穫予想を対話的に行い、今後の人工林の取り扱いや、植栽密度や下刈り回数の削減といった低コスト・省力的な施業プランの検討を支援するツール (I-Forest.FV) を開発しました。

ツール開発の目的

人工林の主伐によりどの程度の収益が見込めるか？ 再造林の初期コストはいくらで、植栽密度、下刈り回数等の変更によってどのように変化するのか？ 将来的に収穫量はどの程度期待できるのか？といった情報は、今後の人工林の取り扱いや主伐・再造林における施業プランの検討に役立ちます^(P28)。間伐や主伐の収穫予想を目的とした従来のシステム収穫表に幼齢時の樹高成長評価やコスト試算の各種要素を加えることで、主伐～再造林に至る情報を GIS ソフト上で簡単に表示できるツールを開発しました。

森林資源情報や各種地理空間情報を活用

近年では、森林域における航空レーザー測量が進められ、その成果は都道府県等が整備する森林簿等のデータに反映されつつあります。また、様々な地理空間情報の整備と公開も進められています。本ツールではこれらのデータを活用し、地図上の任意の場所をクリックするなどの簡単な操作で、スギやヒノキの人工林や広葉樹林の分布、路網開設状況等に加えて、対象林分の林齢、材積等の情報を表示することができます (図 44)。また、スギ、ヒノキの人工林については、丸太価格、労賃、植栽密度、下刈り回数等をユーザーが設定し、主伐収入と、シカ対策、植栽、下刈り、除伐といった再造林初期の経費を対話的に試算できます。さらに、従来のシステム収穫表と同様に、間伐や主伐のシナリオに応じて収穫量を予測することができます。このような一連の機能により、地域の森林の現況と植栽から収穫に至るまでの人工林施業全体を見渡しながら、今後の人工林の取り扱いや低コスト・省力的な施業プランを検討することができます。

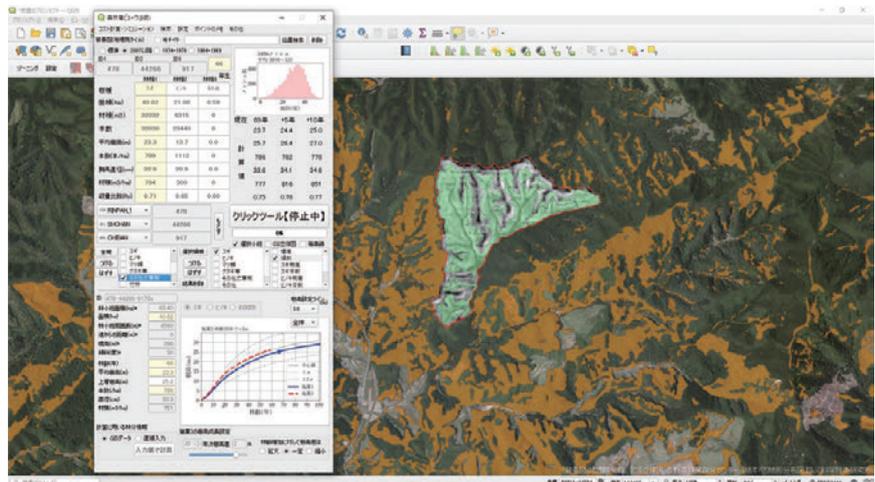


図 44. QGIS のウィンドウで、クリックした林小班内のスギの分布 (緑) と傾斜 (白黒)、周囲の広葉樹林 (橙色) が地図上に示され、林分材積やスギの樹高成長曲線がメインダイアログに表示された様子

今後の展開

本ツールは、無料で高機能な GIS ソフトウェア「QGIS」のプラグインとして動作します。現在、いくつかの市町村等に試用版を提供し、ユーザーの意見を収集しています。将来的には様々な地理空間情報を取り込み、幅広い森林管理ツールとしての展開を想定しています。

苗木を作る

植えて育てる

計画を立てる

初期保育に特化した施業計画支援ツール (I-Forest. GE & CA)

植栽後のスギと競合植生の成長予測は、下刈り要否を判断するうえで重要な点です。そこで、初期保育期間に特化し、地形情報から在来系統と優良系統の苗木の成長量を予測するツールを開発しました。また、植栽後の現場で、実際の競合植生タイプやスギの樹高を入力することで、成長予測や下刈り判断が可能なツールを開発しました。

初期保育期間の成長量を予測する (I-Forest.GE)

I-Forest.GE は、ウェブブラウザ上で利用可能な地形指標に基づいた苗木および競合植生の成長予測ツールです。ウェブサイトにアクセスした後、TWI の geoTIFF 画像を読み込むことで、成長予測モデル^(P.14)に基づく通常苗およびエリートツリー苗の成長予測を图示します(図 45)。さらに、競合植生のタイプ・下刈り頻度を設定することで、苗木の被圧状況の経年変化を推定できるツールです。このツールはウェブブラウザ上で可動するため、パソコンだけでなくタブレットなどでの利用も可能です。またブラウザのキャッシュ利用により、施業現場などオフライン環境での利用も可能です。さらに成長予測モデルの将来的な更新に際し、他の地形情報などの活用にも対応できます。

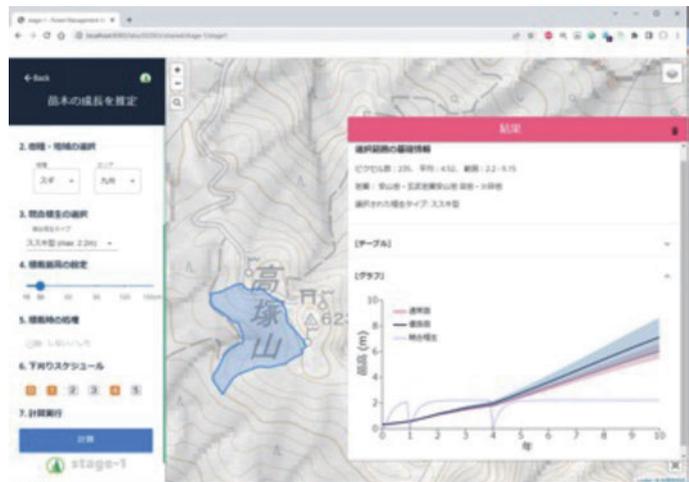


図 45. I-Forests for GE の入出力画面のイメージ

現場で成長予測と下刈り要否を判断する (I-Forest.CA)

伐採前に植栽後の競合植生のタイプを予測することは容易ではありません。また、GIS などを使って事前にスギの成長を予測しても、現場では異なることがあります。I-Forest.CA では、九州地域でのスギの初期成長曲線^(P.16)を用いて、観察時点のスギの樹高、競合植生のタイプや高さを入力することで、その林地における翌年までの成長量を予測し、その年の下刈り要否および終了の判断ができるツールです(図 46)。このツールは、iOS で動作可能で、現場でスマートフォンやタブレットに必要な情報を入力することで、その場所でのスギの成長の良し悪しなどを確認することができます。また、非常に簡単なシステムでできているため、対象地域や系統にあった成長式や競合植生タイプの情報に更新することでより精度の高いシステムにすることが可能です。

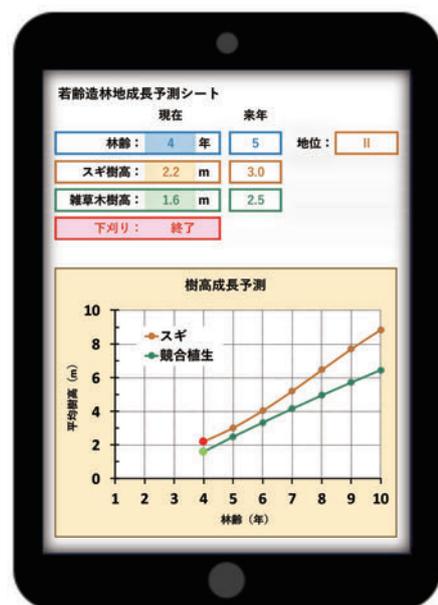


図 46. I-Forests for CA の入出力画面のイメージ

苗木を作る

植えて育てる

計画を立てる

エリートツリーを使った初期保育モデル

エリートツリー等の初期成長の良い苗木は、従来の苗木と比較して、立地を選択することによって、下刈りを1~2回削減することができそうです。一方、初期成長の良い苗木は、樹高に対して樹冠幅が細い傾向があり、現時点ではエリートツリーの活用によって積極的に植栽密度を減らすことは難しいといえそうです。

苗木を作る

植えて育てる

計画を立てる

立地を選んで下刈り回数を削減する

下刈り要否の判断基準は、地位や競合植生のタイプによって異なります^(P.15)。これらの判断基準と九州での在来系統のスギの成長を照らしわせると4~5回程度の下刈りは必要だと考えられました^(P.16)。一方、エリートツリー等の成長に優れた苗木は、立地条件の良い場所（従来のスギでも成長が良い場所）で、その成長能力を最大に発揮でき^(P.13,14)、これらの場所では下刈りを1~2回早く終わらせることができそうです^(P.17)。つまり、I-Forests など^(P.25)を使って地位や伐採前樹高の高い場所などを抽出し、効果的にエリートツリーを活用することがポイントです。しかし、競合植生のタイプは、伐採前から予測することは難しく、植栽後には毎年、樹高や競合状態を観察しながら、その年の下刈りの要否を判断することが肝要です^(P.15,26)。その際に、ススキなどの非木本性か、アカメガシワなどの木本性なのかが判断基準になります^(P.15)。また一貫作業システムなどを組み合わせれば、植栽当年の下刈りを省略できる可能性があります。

表2. 優良系統を使った場合の下刈り削減のイメージ

苗木	立地	下刈りスケジュール (年)					
		1	2	3	4	5	
在来系統		▲	●	●	●	●	
優良系統 (特定母樹 ・エリートツリー)	悪い	▲	●	●	●	●	下刈り回数変わらない
	立地環境 (TWIなど)	▲	●	●	●	-	下刈り1回減
	良い	▲	●	●	-	-	下刈り2回減

植栽密度は議論の余地あり

現在、スギは2,500本/ha程度で植栽されているケースがほとんどです。植栽密度の削減は、林冠閉鎖のタイミングが遅れることがわかりました^(P.19)。しかし、通常の下刈りは林冠が閉鎖する以前に終了するため、植栽密度の削減によって下刈り回数が変わることはないと考えられます。しかし、林冠閉鎖の遅れによって競合植生がより繁茂し、ツル切りの必要性や除伐コストが増加する恐れがあります。また、エリートツリー等の成長の良い苗木の一部では、従来系統より、樹冠幅が狭い傾向がみられました。そのため、現時点において、エリートツリーを活用したとしても積極的に植栽密度を減らすことは難しいといえ、今後エリートツリーの収穫期までの成長を考慮して判断していく必要があります。

再造林コストのシミュレーション

I-Forest.FVのコスト計算機能を使い、下刈り回数、植栽密度等の条件により、再造林費用がどこまで削減可能かシミュレーションしました。その結果、従来から実施されてきた一貫作業システムによる機械地拵えや低密度植栽に加え、エリートツリー等の成長に優れた苗木による下刈り回数の削減によって、再造林コストを3割削減できる可能性があることが分かりました。

再造林コストのシミュレーション

本プロジェクトでは、再造林コストの3割削減を実現するための施業体系の提案を目標に掲げています。再造林コストの削減手法として、人力による地拵えから一貫作業システムによる機械地拵えへの変更、植栽密度の削減、成長に優れた苗木による下刈り回数の削減を取り上げました。植栽密度は、九州地方で多く実施されている2,500、2,000本/ha、及び一部で実施されている1,500本/ha、下刈り回数については、エリートツリーの早い成長^(P.14)と下刈りスケジュール^(P.16)を考慮して2～5回、苗木はスギコンテナ苗としました。

表3にシミュレーション結果の概要を、図47に工程別シミュレーション結果と表4にシミュレーションを行うために使用した費用に関する積算根拠を示しました。従来からよく行われてきた施業モデルAとの比較では、再造林費用を3割以上削減するためには、植栽密度を2,000本/ha以下まで下げることが必要であることが分かりました。下刈り回数は、植栽密度が2,000本/haの場合は2回、1,500本/haの場合は3回以下に削減する必要があることが分かりました。車両系を用いて皆伐を実施し、同時に機械地拵えを行う一貫作業システムの現場が、多く見られるようになってきました。そこで一貫作業システムを想定したモデルB1と比較すると、最最低コストのモデルD3で約35%の削減となりました。これらの結果から、従来から実施されてきた一貫作業システムによる機械地拵えや低密度植栽に加え、エリートツリー等の成長に優れた苗木による下刈り回数の削減によって、再造林コストを3割削減できる可能性があることが分かりました。

表3. 再造林費用のシミュレーション結果（補助金無し）

モデル	植栽密度 (本/ha)	地拵え方法	下刈り回数	費用 (円/ha)	A1との比較 (%)	B1との比較 (%)
A	2,500	人力	5	1,908,000	100	116
B1	2,500	機械地拵え	4	1,710,000	90	100
B2	2,500	機械地拵え	3	1,536,000	81	90
B3	2,500	機械地拵え	2	1,362,000	71	80
C1	2,000	機械地拵え	4	1,587,000	83	93
C2	2,000	機械地拵え	3	1,413,000	74	83
C3	2,000	機械地拵え	2	1,239,000	65	72
D1	1,500	機械地拵え	4	1,465,000	77	86
D2	1,500	機械地拵え	3	1,291,000	68	75
D3	1,500	機械地拵え	2	1,117,000	59	65

シミュレーション結果の現場への適用

今回は10のモデル(AからD3)を想定し、費用をシミュレーションしました。これから再造林を行う現場で、どのモデルを選ぶのか検討する際に重要なことは、「将来どのような森林に仕立てたいのか」、「植栽地はエリートツリーの適地なのか」ということです。将来の目標林型により施業体系は大きく異なります。特に施業体系に大きく影響を与える植栽密度の設定は重要です。また、エリートツリーを適地以外に植栽した場合、植栽前に期待した初期の樹高成長が得られず、下刈り回数の削減ができないことも考えられます。今回示した施業モデルに限らず、再造林を考える際には、現場の状況を正確に把握することが重要です。

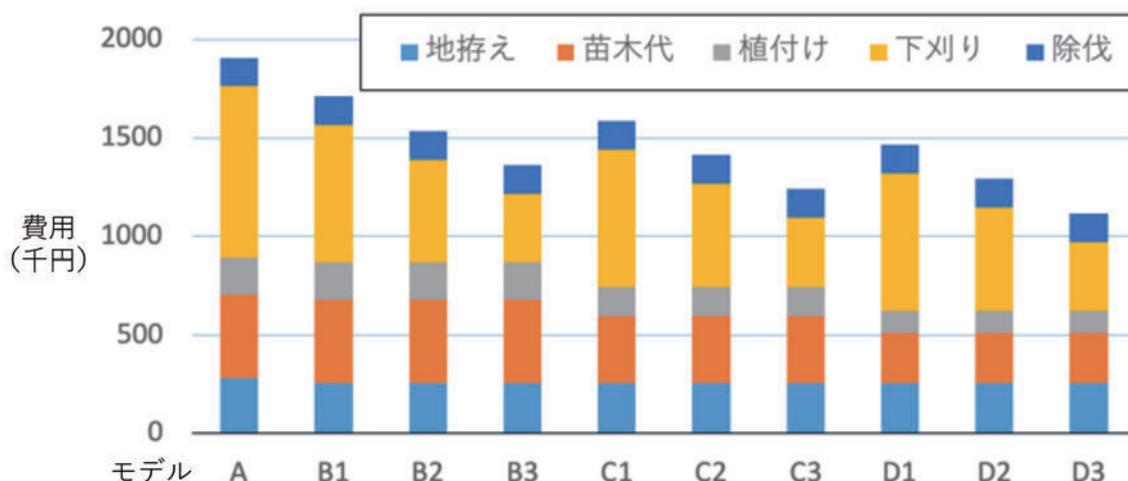


図 47. 再造林費用の工程別シミュレーション結果 (補助金無し)

※除伐コストは植栽密度によらず一定を仮定

表 4. 費用に関する積算根拠

工程	項目	価格	単位	備考
地拵え	人力	285,000	円/ha	注1)費用は千円未満は切り捨て 注2)歩掛については、九州地域で使用されている標準単価の積算根拠を参考とした。
	機械	265,000	円/ha	
苗木	コンテナ苗	170	円/本	注3)費用計算で使用した人件費は下記の通り 普通作業員：18000円/人日 特殊作業員：23000円/人日
		112,000	1,500本/ha	
植付け	コンテナ苗	149,000	2,000本/ha	
		187,000	2,500本/ha	
下刈り		174,000	円/ha	
除伐		146,000	円/ha	

今後の課題

今後は、現場に最適な施業体系の提案ができるよう継続的に現場のデータを収集し、地位に対応した植栽試験の成績に注視する必要があります。特に低密度植栽における除伐やツル伐りの掛かりましについては、新たな研究が必要となります。さらに成林後の樹形や風害等のリスク評価が可能なシステムの構築を目指します。