

機械作業システムにおける労働生産性の予測

西山 嘉寛

Productivity-Simulator for Machinery logging systems

Yoshihiro NISHIYAMA

要 旨

西山 嘉寛：機械作業システムにおける労働生産性の予測 岡山県農林水産総合センター森林研究所研報26：1-18 (2010) 2007～2009年度，県内の森林組合や民間事業体が実施した伐出作業について工程調査を実施し，これを元にして機械作業システムによる間伐の作業効率と生産性を予測するシミュレーターを作成した。さらに実用性を検証するため，シミュレーターによる予測値と現実伐区の実際の作業効率，出材量，労働生産性を比較してその乖離度を解析した。その結果，本シミュレーターでは，少ない入力項目で労働生産性等を予測できるとともに，多くの情報を提供できることが示された。一方で，出材量（樹種間），労働生産性については実際値と予測値に乖離する事例もみられた。今後，立木の直径階分布をさらに正確に求めて出材量の予測精度を高めるとともに，労働生産性を左右する作業の段取りや機械の故障に伴うトラブル等に起因する作業の遅れについても評価する必要があること等，新たな改良点が明らかになった。

キーワード：列状，定性，高性能林業機械，機械作業システム，労働生産性

I はじめに

岡山県では林業における生産性向上と労働強度の軽減を図るため，1997年度以降，主に林産事業の分野で高性能林業機械の導入が図られている（岡山県農林水産部 2010）。その結果，県内には，先進的に機械化に取り組み，低コスト化を実践し，全国的にも知られた民間事業体が育っている（黒瀬 2006）。これに加え，2004年10月に岡山県北部を中心に発生した台風第23号により，スギ及びヒノキ人工林で甚大な風倒木被害が発生したが，その後の災害復旧（2004～2008年度）に当たっては，高性能林業機械が積極的に導入されたことから，より機械化が進んでいる。

一方，スギ及びヒノキ人工林における保育作業（間伐）について，岡山県では2008年度から2012年度までの5カ年で岡山県地球温暖化防止等による間伐推進5カ年計画を策定し，県下で30,000haの間伐目標を掲げている（岡山県農林水産部 2010）。

このような動きの中で，森林の整備や木材産業の効率化に必要な路網と高性能林業機械を複数組み合わせた「機械作業システム」（以下 作業システム）による間伐は，県内外で積極的に導入されてきた（前田林業株式

会社編 2008，島根県中山間地域研究センター 2000，兵庫県立農林水産技術総合センター森林技術センター 2010，河野 2009）。

作業システムによる間伐の推進に合わせ，誰にでも簡単に間伐コストや収益を把握できるように，これまでも各機関で間伐コストを試算するソフトが開発され，公開されているものもある（木村 2000，佐保ら 2005，水田ら 2007）。ただし，これらは各地域の実情に沿って作成されているため，北近畿や中国地方を対象とする，いわゆる同一の密度管理図を用いるエリアを対象としたものではなかった。

全国を網羅したソフトとしては，間伐コストの算出のためのソフトiCOSTがある。また，これをさらに進化させ，小班レベルで間伐から主伐を見通した収支を予測するパソコン用プログラムFORCASが森林総合研究所等により開発され（林野庁ほか 2009），一般にも提供されている。ただし，両ソフトについては，入力時の煩雑さや入力項目が多いため，森林組合等現場では普及されにくい側面もあったものと推察される。

別の側面として，間伐コストの算出については，地況，林況及び作業方法毎に現場での作業効率が大きく異なる

ことから、非常に予測が難しく、その誤差も大きいと予想される。逆に、労働生産性については、間伐コストに比べて予測値と実際値とのバラツキが小さく、かつ、その予測精度は一般的に高いと考えられることから、現場における事業者の能力を客観的に把握する上で最も適する因子であるといえる。

そこで、現場で作業する前段階として、作業システムを導入した場合、各工程毎の作業効率と労働生産性について着目し、これを予測するシミュレーションソフト（以下 シミュレーター）を作成した。

またシミュレーターの実用性を検証するため、この予測結果と、現実伐区の実材積、労働生産性等の調査結果を比較し、予測値と実際値との乖離度についても分析したので、ここに報告する。

なお、本研究は2007～2009年度の3カ年、単県試験研究課題「施業困難地における最適作業システム判定方法の確立」の中で取り組んだものであり、その成果の一部は、2009年10月に徳島市で開催された第60回日本森林学会関西支部日本森林技術協会関西・四国支部連合会合同大会及び2010年10月に島根県で開催された第61回日本森林学会関西支部日本森林技術協会関西・四国支部連合会合同大会においてそれぞれ口頭発表した内容を含む（西山 2009, 2010a）。

II シミュレーターの流れと方法

1 出材量予測のための解析

(1) 立木における胸高直径階別間伐本数の予測

胸高直径階別間伐本数の推定については、3種類のパラメータの数値によって分布が多様に変化するワイブル分布を適用する手法がよく知られている（田中ら 1992）。

そこで、林分収穫予想表作成（西山ら 2002, 牧本ら 2005）のために収集した林分データ（スギ109データ、ヒノキ217データ）のうち、スギでは、収量比数（以下 R_y ）が0.80未満の林分データを76事例、 R_y が0.80以上0.90未満の林分データを25事例、 R_y が0.90以上の林分データを8事例の計109データについて、ヒノキ人工林では、 R_y が0.80未満の林分データを123事例、 R_y が0.80以上0.90未満の林分データを62事例、 R_y が0.90以上の林分データを32事例の計217データについてそれぞれワイブル関数を当てはめた。

$$y = (c/b) \cdot (x/b)^{c-1} \cdot \text{EXP}(-(x/b)^c) \quad (1)$$

ただし $x = \bar{D} - a$

\bar{D} : 平均胸高直径

a: 位置のパラメータ

b: 尺度のパラメータ

c: 形のパラメータ

その上で、本シミュレーターでは、まず入力された林齢、平均樹高及び立木密度から得られる R_y の数値より、 R_y を0.80未満, 0.80以上0.90未満, 0.90以上の3パターンのいずれかに区分し、立木における胸高直径階分布について、(1)式で表すワイブル分布の確率密度関数の各パラメータを決定し、求められたワイブル関数に直径階の幅（2 cm）を乗じて推定直径分布とした。

(2) 胸高直径階別樹高の予測

各胸高直径階ごとの樹高を予測するため、上記(1)で得られたヒノキ人工林の林分データのうち、林分内の個体ごとの樹高及び胸高直径データが得られている37林分データについて、林分ごとに対数式で近似した。次に、平均樹高と対数式の係数(a)との関係を調べた。

$$y = a \cdot \ln(x) + b \quad (2)$$

ただし x : 胸高直径 (cm)

y : 樹高 (m)

(3) 細り表を用いた出材積の算定

スギ及びヒノキの細り表は、鈴木ら（1999）により提案された相対幹曲線式を使用した。

$$\text{スギ} \quad y = 2.01909x - 1.95113x^2 + 0.85429x^3 \quad (3)$$

$$\text{ヒノキ} \quad y = 1.84028x - 1.49254x^2 + 0.58931x^3 \quad (4)$$

ただし $y = d_i / D$

$$x = (1 - h_i / H)$$

D: 胸高直径 (cm)

H: 樹高 (m)

d_i : 任意の相対位置における上部皮内直径 (cm)

h_i : 任意の相対位置における高さ (m)

上記の相対幹曲線式により、各胸高直径に対して、任意の高さにおける上部皮内直径が計算できることから、1番玉から最大3番玉まで、末口の皮内径が最低14cm以上で、かつ材長が4mで採材できる場合は4m、3mで採材できる場合は3mとして採材することとした。これを、順次、2番玉、3番玉へとシフトするようにシミュレーターに組み込んだ。

2 作業システム構築のための工程調査

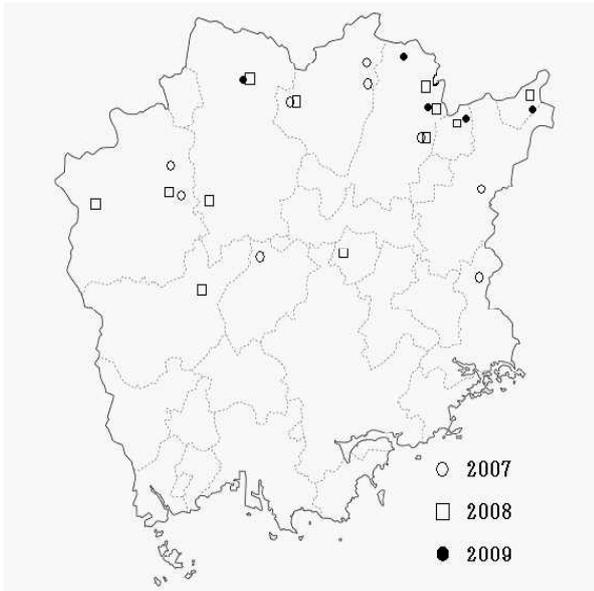


図-1 工程調査の実施箇所

岡山県中北部のスギ、ヒノキ人工林で実際に間伐及び

搬出作業を行っている施行地28カ所について、2007～2009年度の3カ年、工程調査を実施した(図-1、表-1)。

伐採方法は、一部、定性間伐を除き、列状間伐が中心であった。列状間伐は、保安林等の制限がない場合は50%間伐(4残4伐等)、保安林等の制限がある場合は33%間伐(4残2伐等)であった。

林分調査は、20×20mの標準地プロットを設け、同プロット内の全立木本数をカウントするとともに、各個体ごとの樹高及び胸高直径をそれぞれ測定した。立木の樹高は、測高機(ティンバーテック製 VERTEXⅢ TRANSPONDER T3)で0.1m単位、胸高直径は輪尺または直径巻尺(KINGDOM TAPE)で0.1cm単位でそれぞれ測定した。

工程調査に際し、列状間伐を実施した林分においては、伐採、集材(木寄せ)及び造材の各工程のサイクルタイムをいずれも伐採1列分としたが、定性間伐を実施した林分については、伐採木10本を基本とした。

集材(搬出)については、空走、積み込み、運搬(積荷)及び荷下ろしといった一連の作業を1サイクルタイムとした。

表-1 機械作業システムによる工程調査箇所の一覧

No	調査箇所	樹種	林齢(年)	伐採方法	間伐率(%)	平均樹高(m)	平均胸高直径(cm)	立木密度(本/ha)	工程調査の内容 (伐採 集材(木寄せ) 造材 集材(搬出))	備考
1	新見市菅生	スギ	35	列状間伐	35	15.8	22.8	1,470	伐採	2007 調査
2	新見市菅生	スギ	35	定性間伐	35	16.7	25.0	1,300	伐採	
3	新見市菅生	スギ	35	列状間伐	35	16.1	23.6	1,360	伐採	
4	新見市上熊谷	ヒノキ	35	列状間伐	42	14.4	19.2	1,300	造材	
5	加賀郡吉備中央町福沢	ヒノキ	34	列状間伐	50	14.7	17.9	1,883	集材(木寄せ)	
6	加賀郡吉備中央町上田東	ヒノキ	35	列状間伐	41	15.5	17.5	1,191	集材(木寄せ)	
7	苫田郡鏡野町富西谷	ヒノキ	35	列状間伐	35	13.6	20.9	1,400	集材(木寄せ)	
8	苫田郡鏡野町大町	ヒノキ	35	列状間伐	33	16.2	19.2	1,630	集材(木寄せ) 造材	
9	苫田郡鏡野町岩屋	ヒノキ	41	列状間伐	35	15.4	10.7	1,150	造材	
10	美作市大原	ヒノキ	35	列状間伐	33	16.1	19.9	1,300	伐採	
11	備前市吉永町多麻	ヒノキ	35	列状間伐	50	16.1	19.9	1,350	伐採	
12	苫田郡鏡野町富西谷	ヒノキ	41	列状間伐	50	17.2	19.2	1,600	伐採 集材(木寄せ) 造材	2008 調査
13	津山市市場	ヒノキ	35	列状間伐	33	12.3	22.9	1,037	伐採 集材(木寄せ)	
14	久米郡久米南町中初	ヒノキ	35	列状間伐	50	17.0	19.4	1,558	集材(木寄せ)	
15	新見市上熊谷	ヒノキ	35	列状間伐	50	15.9	22.5	1,400	伐採 造材	
16	新見市上熊谷	ヒノキ	35	列状間伐	33	15.7	21.7	1,480	伐採 造材	
17	高梁市津川町	ヒノキ	36	列状間伐	36	15.8	25.1	1,100	伐採 造材	
18	真庭市阿口	ヒノキ	55	列状間伐	42	15.7	28.3	1,200	集材(木寄せ)	
19	真庭市田羽根	スギ	40-60	定性間伐	33	24.8	43.0	1,350	伐採 集材(搬出)	
20	英田郡西栗倉村大字大茅	ヒノキ	50-60	列状間伐	33	19.6	22.0	1,500	伐採 集材(木寄せ) 造材	
21	津山市阿波	スギ	40	列状間伐	35	22.3	21.7	1,400	伐採 集材(木寄せ) 造材	
22	津山市阿波	ヒノキ	40	列状間伐	33	17.8	19.8	1,500	集材(木寄せ) 造材	
23	津山市加茂町下津川	ヒノキ	50-80	列状間伐	33	21.9	42.8	1,200	伐採 集材(木寄せ) 造材	
24	勝田郡奈義町馬桑	ヒノキ	35	列状間伐	33	14.4	20.0	1,450	集材(木寄せ) 造材	2009 調査
25	真庭市田羽根	ヒノキ	50-70	定性間伐	33	25.0	40.6	1,400	集材(搬出)	
26	真庭市田羽根	ヒノキ	35	定性間伐	33	16.9	20.9	1,500	伐採 造材 集材(搬出)	
27	勝田郡奈義町馬桑	ヒノキ	35	列状間伐	35	13.6	18.3	1,600	伐採 造材 集材(搬出)	
28	津山市加茂町倉見	スギ	52	列状間伐	33	19.8	29.4	1,400	伐採 造材 集材(搬出)	
29	津山市加茂町下津川	ヒノキ	48	列状間伐	33	15.7	23.4	1,300	伐採 集材(木寄せ) 造材	
30	英田郡西栗倉村大字長尾	スギ	35	列状間伐	33	20.5	21.5	1,400	伐採 集材(木寄せ) 造材 集材(搬出)	

注 立木密度は伐採前のha当たり成立本数を示す

伐採から集材（搬出）までの各工程調査については、デジタルビデオカメラレコーダー（SONY HANDYCAM DCR-SR65）により録画し、後日、実験室内において秒単位で解析するとともに、調査箇所、各工程ごとにそれぞれサイクルタイムを算出した。

フォワーダ等による積載量については、土場で末口を輪尺または直径巻尺で2cm括約で測定するとともに（図-2）、材長を2mポールを当てて測定し、末口自乗法により単木材積を求め、最終的に積荷材積を算出した。

フォワーダ等の積載量については、一部、過積載のケースも散見されたことから、最大積載量をスギ・ヒノキとともに、河野ら（2009）が用いた2.625tを参考にして、この値に近い2.6tとした。

作業道・作業路等の路網密度及び平均運搬距離については、現場での聞き取りや森林施業図等の地理情報により求めた。



図-2 土場での計測

3 シミュレーターの概要

シミュレーターは、スギ及びヒノキ人工林における間伐（列状、定性）を対象とし、想定する作業システムは、本県で標準的な全木+短幹による2段階集材方式で、具体的には次のような作業工程を前提としている。

- ① チェンソーによる人力伐木作業
- ② スイングヤーダやウインチ付グラップル等による集材路までの全木集材 {以下 集材（木寄せ）}
- ③ プロセッサやハーベスタによる集材路上での造材作業
- ④ フォワーダ等による集材路から林外土場への短幹集材 {以下 集材（搬出）}

シミュレーターは、各工程毎の生産効率、機械稼働時間、作業日数・工数（人日）等の伐出生産性及び必要経費の試算に係わる因子、生産材の規格別（末口径・長さ）本数及び材積等収入試算に関連した因子の出力を行う。

入力必須項目(林況) ■ この中に数値を入力してください

標準地図座データを人力 ■ 注 自動で抽出 ■ 固定値

樹種	■	スギ:1 ヒノキ:2
林齢	■	年
平均樹高	■	m
平均胸高直径	■	cm
ha当たり成立本数	■	本/ha

入力必須項目(作業条件)

作業方法	■	1:定性間伐 2:列状間伐
列の場合(詳細)	■	1:1列1伐 2:2列1伐 3:2列2伐 4:3列1伐 5:3列3伐 6:3列3伐 7:4列1伐 8:4列2伐 9:4列3伐 10:4列4伐
定性間伐の場合	■	1:間伐(全体) 2:下層間伐 3:上層間伐
間伐率	■	%
面積	■	ha
斜面平均傾斜	■	°
作業路総延長(内訳)	■	m (集材に係る作業路)
幹線	■	m
集材に係る作業路	■	m
路網幅員	■	m
平均搬出距離	■	m (林内の積荷位置から土場までの平均搬出距離)

入力必須項目(採材条件) 中に入力してください

傾斜の有無	■	1:有 2:無
傾斜の程度を入力ください	■	m (例:0 0.5m 1m)
不良木の割合	■	% ※一般的には不良木は10%程度ありますが、間伐手廻れ林は高い
採材方法をください	■	1:4m 2:3m 3:4m採れなければ3m
一番玉	■	1:4m 2:3m 3:4m採れなければ3m
二番玉	■	1:4m 2:3m 3:4m採れなければ3m
三番玉	■	1:4m 2:3m 3:4m採れなければ3m

図-3 シミュレーターの入力画面

以下に予測過程を示す。

(1) 現場条件入力

林況（樹種、林齢、平均樹高、平均胸高直径、ha当たり成立本数）と現場条件（面積、路網延長、平均傾斜）を入力し（図-3）、伐区全体の伐採本数や採材材積、総伐採列数や1列当たりの立木本数と列延長（木寄せ距離）を算出する。

なお、作業条件の中で、工程ごとの人員数、使用機械の種類、上荷・下荷は特に区分していない。また採材長については、前述のとおり、1番玉から最大3番玉まで、末口の皮内径が最低14cm以上で、かつ材長が4mで採材できる場合は4m、3mで採材できる場合は3mとして採材することとした。

(2) 伐木工程予測

列状間伐においては、伐採列1列の伐木にかかる時間を1サイクルとしてサイクル計算を行い、1日当たりの伐採列数を算出し、伐木作業にかかる日数、工数を出力する。

表-2 作業工程毎の作業能率

作業工程	樹種	適応林齢 (年)	作業能率	R ²	備考
伐木	スギ	35年～50年未満 50年以上	$y=3.66X-6.26$	0.559**	x: 平均胸高直径(cm) y: 伐採時間(s)
	ヒノキ	35年～50年未満 50年以上	$y=5.83X-16.33$	0.717**	
造材	スギ	35年～50年未満 50年以上	$y=0.112X^{2.772}$	0.971**	x: 平均胸高直径(cm) y: 伐採時間(s)
	ヒノキ	35年～50年未満 50年以上	$y=5.94X-22.60$	0.787**	
集材1 (木寄せ)	スギ	35年～50年未満 50年以上	(167) 秒/本 (324) 秒/本		スイングヤーダ使用 集材距離が40m以上の場合
	ヒノキ	35年～50年未満 50年以上	167 秒/本 324 秒/本		架設、撤去時間含む
集材2 (木寄せ)	スギ	35年～50年未満 50年以上	185 秒/本 (223) 秒/本		ウインチ付グラブ (ウインチ使用) 集材距離が40m以内の場合
	ヒノキ	35年～50年未満 50年以上	122 秒/本 223 秒/本		移動時間含む
集材3 (木寄せ)	スギ	35年～50年未満 50年以上	(72) 秒/本 92 秒/本		グラブ (ウインチ使用せず) 集材距離(樹高+3m)以内 移動時間含む
	ヒノキ	35年～50年未満 50年以上	72 秒/本 77 秒/本		
集材 (搬出)	スギ	35年～50年未満	(26) m ³ /hr	積込 運搬 積み下ろし 空走時間	
			(3675) m ³ /hr		
			(49) m ³ /hr (5498) m ³ /hr		
	50年以上	(21) m ³ /hr	積込 運搬 積み下ろし 空走		
		(2545) m ³ /hr			
		(33) m ³ /hr (3055) m ³ /hr			
ヒノキ	35年～50年未満	26 m ³ /hr	積込 運搬 積み下ろし 空走時間		
		3.675 m ³ /hr			
		49 m ³ /hr 5.498 m ³ /hr			
50年以上	21 m ³ /hr	積込 運搬 積み下ろし 空走時間			
	2.545 m ³ /hr				
	33 m ³ /hr 3.055 m ³ /hr				

注1. ()内の数値はヒノキで得られたデータを適用した場合を示す
2. **は1%水準で有意であることを示す

(3) 集材(木寄せ)工程予測

伐採列1列の路上までの全木集材にかかる時間を1サイクルとしてサイクルタイム計算を行い、1日当たりの処理列数を計算し、集材作業にかかる日数、工数等を出力する。

スイングヤーダによる列状間伐でのサイクルタイムについて、櫻井ら(2004)は集材距離を用いた一次関数式で近似できることを指摘している。ここでは、グラブ本体のアーム長を考慮し、集材距離が樹高プラス3.0m以内ではグラブ集材(ウインチ使用せず)、集材距離が40m以内ではグラブ(ウインチ使用)、集材距離が40m以上では、河野(2010)の報告と同様に、スイングヤーダ集材となると仮定した。

(4) 造材工程予測

1番玉から順番に採材長を入力して細りを計算し、それぞれの末口径、素材材積を算出する。これを採材条件とし、伐採列1列分の集材木の造材にかかる時間を1サイクルとしてサイクルタイムを計算し、1日当たりの処理列数を算出する。同時に伐採列1列から生産される玉数と素材材積を出力する。造材の際、ハーバスタ、スイングヤーダ等高性能林業機械の機種の違いやバケット容量の違い(0.25m³, 0.45m³)によって採材可能な径級も変わってくる(渡井2010)。ただし、本シミュレータ

一では、平均胸高直径と伐採時間の関係性を求めたため、機種の違いについては考慮していない。

(5) 集材(搬出)工程予測

路上から土場までの短幹集材1往復にかかる時間を1サイクルとしてサイクル計算を行い、1日当たりの往復回数と搬出量を算出し、集材作業にかかる日数、工数等を出力する。

集材(搬出)工程に係る走行速度について、岡ら(2007b)は実車に比べ、空車の方が大きいことを示すとともに、車両幅に対する幅員比率(以下W/D)が大きくなるに従って走行速度は大きいことを指摘している。この中で、W/Dが1.5あれば走行には十分としており、その際の走行速度は空車で1.5m/sec、実車で1.0m/secの範囲にあることも示している。今回の調査でも、幅員はいずれも2.5～3.0mの範囲内で、車両も装輪式フォワーダ(2t積み)、または装軌式フォワーダ(3t積み)が使用されていた。車幅は1.7～2.0mの範囲内で、走行に係る部分ではW/Dは1.0程度であり、ほぼ同様の結果であった。岡ら(2007a)は装軌式フォワーダ(3t積み)が装輪式フォワーダ(2t積み)より、積載能力が高いとともに、縦断勾配における走行速度(空走)に優れていることも指摘しているが、本研究では、両者については特に区分していない。

(6) 作業生産性出力

各工程における算出結果を集計し、伐区全体の工期、工数(人日)、出材積、労働生産性 etc. を出力する。同時に、伐区全体から生産される玉数と素材材積について、規格別(末口径、材長)に出力する。

なお、各工程のサイクルタイムの計算は、当森林研究所(旧岡山県林業試験場)が2007～2009年度に工程調査を実施し、これより得られた推定式を調整して使用した。これらのパラメータのうち、スギの場合、集材(木寄せ)や集材(搬出)の工程においてヒノキのパラメータを代用する等、未収集のパラメータがあり、暫定的に類似するデータを用いることとした(表-2)。

以上、一連のシミュレーターの流れについては、河野ら(2009)が作成したシステムの表示内容を参考とした。

材積計算に当たっては、岡山県におけるスギ、ヒノキ人工林収穫予想表(牧本ら2005)から推定する手法もあるが、今回は、より単木レベルでの幹材積が必要なことから、立木幹材積表(西日本編)(林野庁計画課編2002)のスギ、ヒノキの単木材積式をそれぞれ使用した。

細り計算に当たっては、鈴木ら(1999)の相対幹曲線式を採用した。これに、地上部からの伐採高を組合せ、伐採高を本シミュレーター上で入力することにより、伐採木の位置別の皮内径を算出できるように改良した。実

表－3 労働生産性予測に用いた基礎データ

No	間伐方法	区分	樹種	林齢 (年)	平均傾斜 (°)	施業面積 (ha)	平均樹高 (m)	平均胸高直径 (cm)	立木密度 (本/ha)	路網密度 (m/ha)
1	列状間伐	調査地A	ヒノキ	35	25-30	2.60	13.5	21	1,400	193.5
2	列状間伐	調査地B	スギ	45	25	0.33	18.0	25	1,200	158.1
			ヒノキ	45	25	1.77	16.0	23	1,400	
3	定性間伐	調査地C	スギ	45	25-30	0.74	19.4	26	2,000	298.5
			ヒノキ	45	25-30	0.60	16.3	21	2,000	
4	定性間伐	調査地D	スギ	45	25-30	0.74	19.4	24	2,000	161.8
			ヒノキ	45	25-30	2.35	16.3	18	2,000	
5	定性間伐	調査地E	スギ	45	25-30	4.86	19.4	26	1,400	296.1
			ヒノキ	45	25-30	1.22	16.3	20	1,800	

注. No.3-5の平均樹高は岡山県林分収穫予想表(地位級1~5)の地位級3を参考とした

際に、現場の地形が急傾斜地である場合、地上部の曲り部分の長さが1.0m以上に達するケースも想定される。このような場合では、本シミュレーター入力画面において、伐採高を1.0mと入力することにより、3mまたは4mで採材した場合に得られる玉数がより正確になるとともに、最終的な出材積についてもより現実値に近づき、予測精度も向上すると考えられる。

4 シミュレーター予測と実際との比較検証

列状間伐における労働生産性の検証については、岡山県内の森林組合が実際に行った2伐出事例を対象とし、労務調査による日報の集計と聞き取りにより、生産量調査については伝票の集計により行った(表-3)。ただし、1伐出事例については、工程ごとの工数が不明確であったため、全体の工数、出材積及び労働生産性についてのみ、その検証を行った。

定性間伐における労働生産性の検証については、2008年度、実証課題として真庭普及指導区が調査した結果(岡山県農林水産部林政課 2008)を参考に、本シミュレーターを使用し、その検証を行った。

列状間伐及び定性間伐の各事例について、本シミュレーター画面にそれぞれ数値入力した。その際、本シミュレーターでは、樹種は1樹種しか試算されないため、そ

れぞれの樹種が調査地全体を占めていたと仮定して試算し、その上で、樹種別施業面積の割合に応じて工数、労働生産性について比例配分し、最終的に両樹種を合わせた工数及び労働生産性を算出することとした。

5 間伐シミュレーションによる比較

本シミュレーターを使用し、列状間伐及び定性間伐について、伐採方法や路網密度の違いによって労働生産性がどのように変化するかについて検討した(表-4)。列状間伐については、4残2伐(33%間伐)とした。定性間伐については3種類設定した。まず列状間伐のように立木の胸高直径階分布の割合に応じて間伐を実施した場合(以下 定性間伐)、立木段階で胸高直径の小さい個体から順次、選木・間伐を実施した場合(以下 下層間伐)、立木段階で胸高直径が大きい個体から順次、選木・伐採を行った場合(以下 上層間伐)の3種類である。

平均樹高は、スギ、ヒノキともに岡山県林分収穫予想表(牧本ら 2005)を参考に地位級3を選択し、その際の上層樹高の数値を参考とした。

路網密度については、生産性、採算性の両方を考慮して支線集材路と幹線集材路を合わせた適正路網密度は150~200m/haとする報告(河野 2010)を参考にして、

表－4 間伐シミュレーションを行う場合の条件設定

No	樹種	伐採方法	間伐率 (%)	林齢 (年)	施業面積 (ha)	平均樹高 (m)	平均胸高 直径(cm)	立木密度 (本/ha)	路網密度 (m/ha)	幅員 (m)	平均搬出距離 (m)
1	スギ	列状間伐 (4残2伐)	33	40	3.0	18.5	25	1,500	200	3.0	300
2		定性間伐	33	40	3.0	18.5	25	1,500	200	3.0	300
3		定性間伐 (下層間伐)	33	40	3.0	18.5	25	1,500	200	3.0	300
4		定性間伐 (上層間伐)	33	40	3.0	18.5	25	1,500	200	3.0	300
1	ヒノキ	列状間伐 (4残2伐)	33	40	3.0	16.0	20	1,500	200	3.0	300
2		定性間伐	33	40	3.0	16.0	20	1,500	200	3.0	300
3		定性間伐 (下層間伐)	33	40	3.0	16.0	20	1,500	200	3.0	300
4		定性間伐 (上層間伐)	33	40	3.0	16.0	20	1,500	200	3.0	300

注.スギ及びヒノキにおける定性間伐(No.2)の方法はともにワイプル分布に準じた伐採を示す

表-5 スギ人工林へのWeibull関数の適用

No	市町村	林 齢 (年)	立木密度 (本/ha)	上層樹高 (m)	平均胸高 直径(cm)	収量比数 (kg)	Weibull分布			R ²		
							a	b	c			
1	新見市	神郷町釜村	24	1,650	11.3	14.2	0.591	4	11.39	2.55	0.951	**
2	新見市	千屋	33	1,550	16.0	22.7	0.744	12	12.27	2.65	0.840	**
3	新見市	千屋井原	45	1,550	16.0	23.3	0.744	4	21.53	2.65	0.983	**
4	新見市	菅生	31	1,200	18.0	26.6	0.716	18	8.65	2.35	0.970	**
5	新見市	大佐上刑部	120	440	36.3	81.9	0.725	50	38.06	2.24	0.898	**
6	新見市	菅生	31	1,900	18.0	19.9	0.867	14	6.04	2.75	0.992	**
7	新見市	神郷釜村	4n	1,900	18.6	25.3	0.882	14	12.68	2.65	0.978	**
8	真庭市	黒杭	11	2,600	5.3	6.8	0.387	2	4.52	3.22	0.969	**
9	真庭市	粟谷	29	2,000	9.5	12.8	0.570	4	8.86	3.19	0.994	**
10	真庭市	蒜山中和	46	1,750	15.0	18.0	0.752	10	8.31	2.88	0.995	**
11	真庭市	見明戸	20	1,000	11.1	20.6	0.304	12	0.17	2.00	0.006	**
12	真庭市	見明戸	22	1,300	11.6	21.9	0.526	12	8.99	2.92	0.959	**
13	真庭市	見明戸	25	1,200	15.5	22.7	0.641	14	9.00	2.98	0.995	**
14	真庭市	椹西	36	1,450	18.3	23.8	0.787	16	7.64	2.88	0.969	**
15	真庭市	蒜山上徳山	39	1,050	17.4	23.9	0.653	14	10.21	2.77	0.991	**
16	真庭市	美甘	37	1,300	16.0	23.9	0.684	16	8.35	2.67	0.992	**
17	真庭市	見明戸	26	1,100	16.1	24.1	0.630	16	9.43	2.98	0.974	**
18	真庭市	美甘	36	1,350	16.0	24.2	0.697	16	8.34	2.57	0.978	**
19	真庭市	椹東	49	900	21.1	24.2	0.697	14	11.84	2.87	0.802	**
20	真庭市	蒜山下見	46	1,050	19.0	24.4	0.697	12	13.82	2.77	0.940	**
21	真庭市	椹東	36	1,300	19.0	26.2	0.769	14	12.90	2.60	0.876	**
22	真庭市	美甘	36	1,250	17.0	26.3	0.701	16	10.92	2.87	0.989	**
23	真庭市	神代	34	1,350	18.0	28.3	0.755	12	17.55	2.77	0.994	**
24	真庭市	山久世	84	600	24.1	36.4	0.630	16	22.86	2.48	0.984	**
25	真庭市	上河内	90	330	34.9	37.4	0.610	20	18.17	2.34	0.981	**
26	真庭市	若代	85	440	34.1	41.4	0.690	22	19.72	2.32	0.972	**
27	真庭市	月田	94	430	36.1	43.7	0.720	26	20.05	2.33	0.991	**
28	真庭市	曲り	130	220	43.0	64.1	0.590	48	16.71	2.17	0.930	**
29	真庭市	余野下	31	1,500	18.5	26.8	0.804	14	13.67	2.63	0.976	**
30	真庭市	江川	不明	1,300	21.0	27.7	0.616	16	11.13	2.57	0.832	**
31	真庭市	椹東	25	1,300	21.9	30.0	0.838	16	15.08	2.50	0.822	**
32	真庭市	椹西	39	1,100	19.6	23.4	0.872	12	11.81	2.10	0.782	**
33	真庭市	古呂々尾中	83	670	36.0	46.9	0.860	26	22.67	2.00	0.989	**
34	津山市	加茂町河井	41	1,600	17.3	21.9	0.793	10	13.06	2.38	0.861	**
35	津山市	上横野	46	1,500	16.2	24.0	0.739	14	10.97	2.88	0.999	**
36	津山市	阿波村	不明	1,370	16.5	24.5	0.717	12	13.55	3.05	0.851	**
37	津山市	加茂町宇野	44	1,150	18.1	24.7	0.704	18	7.04	2.78	0.979	**
38	津山市	阿波村	不明	1,350	17.5	26.5	0.741	18	9.00	2.95	0.986	**
39	津山市	阿波村	60	975	23.8	27.7	0.782	16	12.39	2.78	0.995	**
40	津山市	阿波村	60	675	24.0	33.9	0.664	20	15.12	2.68	0.964	**
41	津山市	阿波村	60	675	24.0	33.9	0.661	20	15.32	2.58	0.990	**
42	津山市	阿波村	不明	950	20.1	34.1	0.691	24	11.88	2.45	0.644	**
43	津山市	加茂町宇野	60	660	24.3	38.3	0.700	18	10.38	2.66	0.660	**
44	津山市	加茂町宇野	69	950	23.8	38.3	0.776	18	24.68	2.58	0.983	**
45	津山市	加茂町物見	00	730	27.7	40.0	0.760	20	21.61	2.20	0.896	**
46	津山市	加茂町宇野	92	300	31.2	44.3	0.530	28	17.24	2.24	0.986	**
47	津山市	加茂町宇野	66	342	27.1	44.7	0.496	28	19.72	2.25	0.868	**
48	津山市	阿波村	90	340	29.1	47.4	0.530	30	18.88	2.15	0.927	**
49	津山市	加茂町宇野	90	270	33.1	47.8	0.530	32	17.14	2.15	0.977	**
50	津山市	阿波村	90	300	29.0	49.7	0.490	30	19.53	2.16	0.974	**
51	津山市	加茂町倉見	77	520	35.2	54.9	0.770	36	20.68	2.15	0.974	**
52	津山市	加茂町物見	131	200	38.8	56.1	0.494	36	18.18	2.14	0.666	**
53	津山市	加茂町物見	140	400	37.6	65.3	0.710	48	17.24	2.18	0.900	**
54	津山市	加茂町河井	41	1,700	17.0	21.4	0.804	14	7.75	2.48	0.983	**
55	津山市	加茂町宇野	69	1,050	24.0	37.7	0.813	20	18.81	2.38	0.955	**
56	津山市	加茂町宇野	60	1,125	22.9	27.2	0.813	14	14.34	2.58	0.960	**
57	津山市	阿波村	60	1,125	23.7	27.2	0.830	14	15.14	2.51	0.973	**
58	津山市	加茂町物見	75	1,140	28.0	34.2	0.890	18	17.66	2.17	0.969	**
59	津山市	加茂町宇野	69	1,050	24.5	37.7	0.820	22	17.01	2.30	0.990	**
60	津山市	加茂町物見	75	1,150	28.0	34.6	0.910	18	18.54	2.13	0.961	**
61	津山市	加茂町物見	84	1,030	26.9	34.2	0.900	18	16.47	2.11	0.981	**
62	津山市	加茂町物見	64	1,300	31.0	33.9	1.000	16	10.81	2.07	0.890	**
63	津山市	加茂町宇野	80	1,040	30.4	36.7	0.920	20	18.62	2.30	0.988	**
64	津山市	加茂町物見	75	1,030	29.6	37.0	0.910	20	17.85	2.31	0.970	**
65	鏡野町	羽出	30	2,800	10.7	12.6	0.743	6	6.60	3.25	0.987	**
66	鏡野町	上斎原	53	1,800	16.0	21.9	0.794	12	10.84	2.78	0.938	**
67	鏡野町	奥津	46	1,950	13.7	25.7	0.744	8	18.18	2.40	0.965	**
68	鏡野町	羽出	34	1,550	14.5	25.8	0.694	14	12.52	2.48	0.971	**
69	鏡野町	杉	46	1,500	16.2	27.3	0.739	18	9.95	2.95	0.971	**
70	鏡野町	富西谷	78	460	20.4	27.8	0.460	12	17.86	2.68	0.980	**
71	鏡野町	上斎原	55	1,350	19.0	29.6	0.782	16	13.81	2.38	0.983	**
72	鏡野町	百谷	80	440	22.4	44.6	0.490	24	22.62	2.20	0.989	**
73	鏡野町	百谷	138	480	37.9	78.8	0.776	46	34.09	2.18	0.886	**
74	鏡野町	羽出	47	1,650	18.5	25.2	0.835	14	11.80	2.40	0.958	**
75	鏡野町	上斎原	45	1,450	19.6	25.9	0.821	16	10.71	2.29	0.976	**
76	鏡野町	上斎原	42	1,600	19.4	25.7	0.848	14	11.80	2.40	0.935	**
77	鏡野町	上斎原	41	1,800	16.2	19.8	0.800	8	12.84	2.38	0.932	**
78	鏡野町	越畑	88	1,080	23.7	30.5	0.820	16	16.05	2.40	0.985	**
79	美作市	西山寺	82	380	23.9	44.4	0.470	30	15.70	2.37	0.971	**
80	美作市	右手	不明	2,200	5.9	8.5	0.384	2	6.82	3.28	0.995	**
81	美作市	右手	不明	1,500	14.1	16.5	0.669	10	6.58	3.08	0.897	**
82	美作市	右手	不明	1,600	14.2	22.8	0.695	14	8.59	3.06	0.994	**
83	美作市	右手	不明	1,550	16.3	23.3	0.753	14	10.14	2.98	0.987	**
84	美作市	右手	85	425	25.1	33.6	0.528	20	14.64	2.88	0.972	**
85	美作市	右手	88	340	25.1	52.0	0.460	26	26.78	2.44	0.953	**
86	美作市	右手	不明	1,900	16.7	23.3	0.852	14	10.26	2.68	0.978	**
87	美作市	野原	35	1,410	19.6	26.0	0.812	10	17.40	2.68	0.980	**
88	美作市	右手	不明	1,700	22.8	25.4	0.939	10	16.21	2.58	0.942	**
89	美作市	右手	不明	1,600	22.6	23.5	0.917	16	7.86	2.26	0.995	**
90	美作市	真殿	不明	1,600	23.5	25.9	0.934	12	14.62	2.68	0.969	**
91	西粟倉村	大茅	不明	1,800	10.8	17.2	0.598	10	8.04	2.88	0.956	**
92	西粟倉村	大茅	不明	2,100	11.4	18.6	0.677	10	8.72	2.88	0.972	**
93	西粟倉村	長尾	不明	1,600	17.0	21.0	0.784	10	12.41	2.98	0.967	**
94	西粟倉村	影石	不明	1,300	15.1	22.0	0.655	14	0.40	2.00	0.806	**
95	西粟倉村	長尾	不明	1,500	17.8	24.1	0.785	18	6.98	2.48	0.972	**
96	西粟倉村	影石	不明	1,700	16.6	26.2	0.793	16	10.10	2.68	0.965	**
97	西粟倉村	大茅	79	400	23.4	36.0	0.479	24	13.07	2.44	0.997	**
98	西粟倉村	大茅	79	310	23.3	36.8	0.400	22	18.47	2.54	0.984	**
99	西粟倉村	影石	88	440	25.6	40.0	0.520	20	21.36	2.26	0.985	**
100	西粟倉村	影石	90	380	27.1	45.7	0.530	26	21.94	2.28	0.982	**
101	西粟倉村	大茅	88	320	25.2	51.3	0.450	34	19.26	2.28	0.954	**
102	西粟倉村	影石	120	350	35.6	56.8	0.638	22	36.73	2.14	0.990	**
103	西粟倉村	影石	98	240	39.4	59.0	0.560	42	18.09	2.10	0.984	**
104	西粟倉村	大茅	不明	1,600	20.5	24.2	0.873	14	10.72	2.28	0.970	**
105	西粟倉村	大茅	不明	1,800	18.3	19.0	0.858	10	8.67	2.48	0.977	**
106	西粟倉村	影石	不明	2,600	13.6	18.9	0.836	10	9.50	2.68	0.993	**
107	西粟倉村	影石	不明	2,000	18.4	22.0	0.893	10	14.90	2.38	0.965	**
108	西粟倉村	影石	不明	2,100	17.2	22.2	0.877	8				

表-6 収量比数 (Ry) が0.80未満のヒノキ人工林へのWeibull関数の適用

No	市町村	林齢 (年)	立木密度 (本/ha)	上層樹高 (m)	平均胸高 直径 (cm)	収量比数 (Ry)	Weibull分布			R ²		
							a	b	c			
1	新見市	大佐大井野	31	2,300	11.0	12.0	0.688	6	6.47	3.38	0.989	**
2	新見市	大佐上刑部	21	2,200	11.0	12.4	0.683	4	9.31	3.38	0.981	**
3	新見市	大佐大井野	35	2,100	11.0	12.7	0.668	8	7.08	3.38	0.994	**
4	新見市	神郷油野	22	1,800	13.8	15.5	0.762	10	5.72	2.98	0.995	**
5	新見市	神郷油野	24	1,900	13.3	15.9	0.756	8	8.63	2.98	0.990	**
6	新見市	哲多町蚊家	31	2,050	11.0	16.1	0.660	2	14.61	2.68	0.852	**
7	新見市	千屋実	23	1,800	9.0	16.8	0.493	6	11.24	2.68	0.989	**
8	新見市	千屋井原	45	2,150	12.0	17.4	0.731	4	14.31	3.18	0.979	**
9	新見市	哲多町大戸	29	1,450	12.0	17.8	0.603	12	5.88	3.18	0.995	**
10	新見市	菅生	25	1,200	12.0	18.6	0.542	10	8.78	3.18	0.964	**
11	新見市	菅生	31	1,000	14.0	18.7	0.743	10	8.40	2.48	0.992	**
12	新見市	哲多町蚊家	49	1,500	14.0	20.4	0.712	12	8.72	2.68	0.986	**
13	新見市	千屋	00	1,700	14.0	21.0	0.762	12	0.14	2.40	0.600	**
14	新見市	神郷釜村	48	1,150	17.5	24.2	0.767	10	16.24	2.98	0.978	**
15	新見市	神郷釜村	46	1,000	16.7	25.9	0.693	18	8.30	2.88	0.990	**
16	新見市	神郷釜村	51	1,250	17.1	27.5	0.779	16	12.38	2.68	0.944	**
17	新見市	大佐長富	85	660	23.1	30.8	0.760	20	11.95	2.31	0.986	**
18	真庭市	黒杭	11	2,600	5.3	6.8	0.310	2	4.52	3.22	0.996	**
19	真庭市	西河内	19	2,900	7.7	11.1	0.694	6	5.33	3.34	0.985	**
20	真庭市	粟谷	29	2,500	9.9	11.3	0.658	4	7.75	3.29	0.994	**
21	真庭市	西河内	24	3,680	9.0	12.4	0.640	6	6.45	3.56	0.992	**
22	真庭市	種	22	2,700	9.9	13.5	0.683	6	8.13	3.18	0.992	**
23	真庭市	種	19	2,100	10.2	13.7	0.620	6	7.91	3.09	0.990	**
24	真庭市	見明戸	22	1,450	9.0	14.0	0.429	8	6.57	3.05	0.987	**
25	真庭市	蒜山上徳山	39	2,020	12.8	14.1	0.752	4	10.44	2.98	0.970	**
26	真庭市	橙東	25	1,650	12.0	16.3	0.645	8	8.81	2.92	0.934	**
27	真庭市	蒜山下見	46	1,700	14.3	17.1	0.766	10	7.41	2.88	0.992	**
28	真庭市	美甘	49	2,100	15.4	17.5	0.792	10	7.95	2.95	0.974	**
29	真庭市	見明戸	25	1,450	10.7	17.9	0.531	14	4.48	2.87	0.995	**
30	真庭市	見明戸	20	1,000	10.3	18.1	0.398	10	7.44	3.05	0.990	**
31	真庭市	蒜山下和	46	1,450	14.7	18.1	0.732	8	11.06	3.18	0.975	**
32	真庭市	粟谷	31	1,500	12.7	18.3	0.650	10	8.76	3.06	0.998	**
33	真庭市	美甘	46	1,700	15.1	18.6	0.799	8	11.14	2.88	0.974	**
34	真庭市	美甘	36	1,500	15.5	18.8	0.776	8	11.43	2.86	0.901	**
35	真庭市	美甘	43	1,600	15.1	19.2	0.780	10	9.75	2.85	0.958	**
36	真庭市	神代	29	1,300	17.0	21.6	0.788	12	9.42	2.98	0.991	**
37	真庭市	美甘	37	1,300	16.0	22.4	0.750	14	8.13	2.86	0.965	**
38	真庭市	原方	85	390	26.1	40.1	0.670	28	11.05	2.33	0.993	**
39	真庭市	清谷	95	310	29.4	42.7	0.610	32	11.00	2.30	0.991	**
40	真庭市	組	92	350	32.2	45.2	0.768	34	10.79	2.43	0.943	**
41	真庭市	清谷	109	200	29.4	46.1	0.540	34	13.12	2.26	0.986	**
42	真庭市	清谷	108	320	31.3	47.2	0.720	32	15.39	2.38	0.954	**
43	津山市	宮	10	1,700	5.2	7.5	0.214	2	6.06	3.00	0.605	**
44	津山市	種	10	2,550	5.9	8.6	0.357	2	7.47	3.28	0.878	**
45	津山市	上横野	29	2,100	12.5	16.0	0.740	8	8.50	2.99	0.967	**
46	津山市	加茂町知和	31	2,050	13.7	17.2	0.798	10	9.30	2.68	0.996	**
47	津山市	加茂町河井	41	1,750	14.5	18.2	0.793	8	11.42	2.48	0.975	**
48	津山市	加茂町宇野	43	1,470	14.8	18.2	0.741	10	8.88	2.88	0.977	**
49	津山市	上横野	28	1,900	14.1	18.3	0.792	8	8.99	2.98	0.994	**
50	津山市	上横野	28	1,800	13.8	18.7	0.762	12	7.67	2.48	0.983	**
51	津山市	上横野	28	1,600	14.7	20.0	0.764	10	11.05	2.88	0.995	**
52	津山市	加茂町下津川	42	1,080	13.1	22.1	0.581	14	8.52	2.46	0.992	**
53	津山市	加茂町下津川	40	1,390	15.5	22.2	0.752	10	11.91	2.48	0.996	**
54	津山市	加茂町宇野	45	1,250	17.6	22.3	0.797	14	9.42	2.78	0.989	**
55	津山市	阿波村	不明	1,575	15.6	23.4	0.795	16	7.90	2.58	0.998	**
56	津山市	上横野	43	1,090	16.9	23.4	0.710	18	7.98	2.58	0.977	**
57	津山市	加茂町公郷	43	1,370	16.9	23.5	0.755	16	8.70	2.66	0.997	**
58	津山市	上横野	45	1,500	15.8	24.3	0.788	16	8.00	2.38	0.950	**
59	津山市	加茂町宇野	45	1,150	18.1	24.7	0.788	18	7.04	2.78	0.979	**
60	津山市	阿波村	64	910	24.2	31.9	0.550	19	15.36	2.24	0.969	**
61	津山市	加茂町宇野	90	340	23.0	32.6	0.546	26	7.62	2.54	0.997	**
62	津山市	東田辺	98	600	25.0	36.2	0.780	22	15.82	2.43	0.986	**
63	津山市	上横野	73	460	28.8	38.0	0.780	24	15.09	2.30	0.986	**
64	鏡野町	羽出	31	2,350	11.0	13.6	0.705	8	5.75	2.88	0.999	**
65	鏡野町	寺和田	24	3,280	10.7	13.9	0.794	6	8.40	2.86	0.994	**
66	鏡野町	竹田	19	1,700	11.8	15.0	0.644	8	6.84	2.78	0.997	**
67	鏡野町	寺和田	25	2,060	12.3	16.8	0.767	10	7.61	2.76	0.998	**
68	鏡野町	上斎原	30	1,450	14.2	17.7	0.710	10	8.11	2.88	0.925	**
69	鏡野町	富巣谷	32	1,800	13.5	18.1	0.748	10	8.61	2.98	0.995	**
70	鏡野町	達藤根知	43	1,500	14.6	18.7	0.739	10	9.73	2.85	0.990	**
71	鏡野町	杉	47	1,550	13.5	20.9	0.699	14	7.27	2.55	0.995	**
72	鏡野町	上斎原	45	1,350	16.0	21.1	0.762	14	8.60	2.88	0.876	**
73	鏡野町	土庄	52	1,700	14.2	22.3	0.761	12	11.61	2.85	0.972	**
74	鏡野町	羽出	35	1,550	14.5	25.8	0.745	14	12.52	2.58	0.970	**
75	鏡野町	竹田	36	695	23.6	32.6	0.793	18	16.37	2.35	0.979	**
76	鏡野町	上斎原	70	450	18.3	33.1	0.490	22	11.64	2.35	0.862	**
77	鏡野町	上斎原	70	520	20.3	33.2	0.610	22	11.78	2.38	0.991	**
78	鏡野町	上斎原	81	360	17.4	36.7	0.399	26	10.34	2.57	0.958	**
79	美咲町	羽仁	21	2,800	11.7	13.1	0.799	6	7.47	2.78	0.999	**
80	美作市	大町	16	2,900	7.3	10.7	0.514	4	6.69	3.08	0.998	**
81	美作市	大町	15	2,100	7.5	11.4	0.433	6	5.92	2.88	0.996	**
82	美作市	古町	21	2,300	10.1	12.0	0.643	6	6.78	3.48	0.994	**
83	美作市	後山	不明	1,750	9.5	13.7	0.517	8	6.10	2.68	0.986	**
84	美作市	右手	不明	1,500	11.4	14.7	0.581	6	8.48	2.78	0.997	**
85	美作市	右手	不明	1,650	11.9	15.2	0.693	8	7.64	2.76	0.967	**
86	美作市	右手	不明	1,800	12.5	15.8	0.717	10	6.00	2.76	0.991	**
87	美作市	右手	不明	1,500	12.5	18.1	0.640	12	6.53	2.56	0.999	**
88	美作市	右手	不明	1,550	15.0	18.2	0.766	10	8.87	2.78	0.906	**
89	美作市	右手	50	1,130	15.7	21.2	0.693	12	10.36	2.48	0.965	**
90	美作市	真神	84	570	22.7	34.9	0.704	18	18.95	2.46	0.864	**
91	美作市	右手	87	290	24.0	36.3	0.522	16	19.83	2.55	0.976	**
92	美作市	右手	85	230	23.3	36.3	0.434	24	13.12	2.42	0.852	**
93	西粟倉村	影石	不明	2,900	8.1	13.3	0.579	6	7.65	3.08	0.995	**
94	西粟倉村	大茅	不明	2,500	10.6	13.4	0.701	6	7.57	2.88	0.993	**
95	西粟倉村	大茅	不明	2,200	11.2	16.7	0.695	8	9.60	2.88	0.994	**
96	西粟倉村	影石	不明	2,100	13.1	17.2	0.778	10	7.79	2.78	0.993	**
97	西粟倉村	大茅	不明	1,700	10.8	18.5	0.588	10	9.41	2.78	0.993	**
98	西粟倉村	影石	不明	2,000	13.8	19.5	0.795	12	7.95	2.88	0.994	**
99	西粟倉村	大茅	79	350	18.4	28.7	0.420	20	9.24	2.46	0.987	**
100	西粟倉村	影石	83	480	24.5	43.1	0.698	22	26.06	2.46	0.871	**
101	勝央町	植月中	18	2,000	9.2	9.4	0.924	2	8.13	3.28	0.991	**
102	勝央町	平	16	3,000	10.7	11.6	0.766	4	7.78	3.28	0.998	**
103	勝央町	田井	15	2,750	10.8	11.9	0.726	4	8.44	3.38	0.996	**
104	勝央町	植月中	22	3,050	10.9	12.4	0.793	6	6.39	3.58	0.999	**
105	勝央町	植月中	18	2,550	11.3	13.7	0.748	6	7.59	2.88	0.993	**
106	勝央町	植月中	35	2,500	9.8	14.7	0.651	6	8.63	2.66	0.996	**
107	勝央町	曾井	33	1,360	16.6	15.9	0.711	8	8.35	2.86	0.996	**
108	岡山市	建部町品田	34	1,650	15.0	19.3	0.786	12	7.95	2.68	0.998	**
109	岡山市	建部町										

表-7 収量比数 (Ry) が0.80以上のヒノキ人工林へのWeibull関数の適用

No	市町村	林齢 (年)	立木密度 (本/ha)	上層樹高 (m)	平均胸高 直径(cm)	収量比数 (Ry)	Weibull分布			R ²		
							a	b	c			
1	新見市	菅生	31	2,250	14.0	17.4	0.839	8	10.57	2.88	0.979	**
2	新見市	神郷釜村	41	1,500	18.1	24.1	0.868	14	11.76	2.58	0.841	**
3	新見市	神郷釜村	47	1,550	17.0	20.7	0.860	12	12.05	2.50	0.960	**
4	新見市	神郷釜村	46	1,300	17.2	27.5	0.958	20	9.35	2.43	0.975	**
5	真庭市	美甘	36	1,600	15.6	18.9	0.800	12	6.44	2.86	0.891	**
6	真庭市	美甘	37	1,550	16.0	19.7	0.805	12	8.20	2.86	0.996	**
7	真庭市	美甘	43	1,900	14.6	18.7	0.813	10	9.43	2.82	0.996	**
8	真庭市	新庄村	40	1,700	15.5	19.7	0.815	10	9.94	2.68	0.992	**
9	真庭市	江川	不明	1,200	18.7	23.0	0.821	14	9.56	2.78	0.995	**
10	真庭市	神代	26	1,450	17.0	20.8	0.821	14	7.13	2.68	0.976	**
11	真庭市	曲り	不明	1,850	15.0	19.4	0.821	12	7.50	2.82	0.983	**
12	真庭市	久世	38	2,100	14.3	17.3	0.831	8	9.13	2.92	0.976	**
13	真庭市	久世	39	2,100	14.3	17.3	0.831	8	9.43	2.98	0.976	**
14	真庭市	曲り	37	1,450	17.3	21.8	0.832	12	10.79	2.68	0.972	**
15	真庭市	美甘	36	2,000	14.7	17.1	0.833	10	7.49	2.85	0.974	**
16	真庭市	悪谷	37	2,250	14.0	15.2	0.839	8	7.22	3.02	0.997	**
17	真庭市	樫東	49	1,150	20.1	22.1	0.850	14	8.57	2.62	0.988	**
18	真庭市	美甘	45	2,150	14.7	10.0	0.854	10	0.20	2.75	0.900	**
19	真庭市	美甘	36	1,950	15.5	18.2	0.856	12	6.16	2.76	0.991	**
20	真庭市	久世	38	1,400	18.6	22.9	0.864	14	9.52	2.68	0.977	**
21	真庭市	久世	38	1,400	18.6	22.9	0.864	12	11.84	2.62	0.984	**
22	真庭市	美甘	43	2,150	15.0	16.2	0.866	8	8.67	2.85	0.993	**
23	真庭市	鹿田	36	1,440	10.0	20.0	0.870	12	0.07	2.60	0.990	**
24	真庭市	木山	37	1,700	18.0	20.4	0.901	10	11.17	2.64	0.978	**
25	真庭市	江川	45	1,850	17.3	20.4	0.903	10	10.80	2.68	0.988	**
26	真庭市	山阪	37	1,980	17.0	18.2	0.912	10	8.85	2.75	0.997	**
27	真庭市	曲り	44	2,050	16.8	17.9	0.915	8	10.46	3.08	0.937	**
28	真庭市	樫西	39	1,000	10.0	20.0	0.909	12	0.16	2.60	0.906	**
29	真庭市	三崎	84	750	32.0	32.0	0.980	20	13.26	2.35	0.984	**
30	真庭市	神庭	82	1,150	34.3	29.5	1.020	18	12.54	2.28	0.990	**
31	真庭市	月田	93	1,000	33.2	36.5	1.060	22	15.89	2.38	0.989	**
32	津山市	加茂町知和	31	2,600	12.2	14.5	0.801	8	7.23	3.08	0.999	**
33	津山市	阿波村	不明	1,650	15.5	21.4	0.806	16	7.61	2.60	0.996	**
34	津山市	加茂町宇野	45	1,600	16.1	21.8	0.819	12	10.76	2.68	0.981	**
35	津山市	加茂町宇野	45	1,600	16.1	18.7	0.819	12	7.90	2.78	0.971	**
36	津山市	阿波村	84	820	22.7	31.9	0.820	18	15.62	2.47	0.994	**
37	津山市	上横野	43	1,900	15.0	18.0	0.829	4	15.10	2.78	0.886	**
38	津山市	加茂町知和	32	2,150	14.1	10.0	0.830	12	6.61	2.95	0.909	**
39	津山市	加茂町知和	32	2,150	14.1	17.7	0.830	8	10.41	2.98	0.968	**
40	津山市	加茂町知和	31	2,250	13.8	16.6	0.831	10	7.47	2.68	0.997	**
41	津山市	加茂町物見	85	900	23.2	31.9	0.860	18	15.19	2.53	0.997	**
42	津山市	加茂町宇野	45	2,000	15.4	17.2	0.860	8	10.07	2.78	0.995	**
43	津山市	加茂町河井	41	1,000	17.3	21.9	0.861	0	14.90	2.70	0.970	**
44	津山市	加茂町宇野	45	1,800	16.3	20.4	0.862	12	9.45	2.78	0.981	**
45	津山市	加茂町宇野	45	1,750	16.7	19.3	0.867	12	8.26	2.78	0.983	**
46	津山市	勝北町大吉	45	1,700	17.0	20.0	0.869	8	13.69	2.73	0.999	**
47	津山市	加茂町知和	32	2,350	14.6	17.3	0.876	10	8.35	2.88	0.993	**
48	津山市	加茂町宇野	45	1,000	17.7	22.9	0.907	16	7.90	2.55	0.997	**
49	津山市	加茂町河井	41	2,850	14.2	16.6	0.915	8	9.97	3.00	0.994	**
50	津山市	加茂町物見	85	810	27.3	29.9	0.920	16	11.53	2.26	0.997	**
51	津山市	加茂町物見	91	1,190	22.2	26.9	0.920	16	11.53	2.23	0.997	**
52	津山市	加茂町物見	82	1,420	20.8	25.9	0.930	16	11.83	2.34	0.997	**
53	津山市	加茂町物見	02	1,060	25.1	32.2	0.950	16	15.20	2.06	0.994	**
54	津山市	加茂町物見	85	1,260	24.0	33.1	0.970	18	15.75	2.31	0.992	**
55	鏡野町	上斎原	42	1,700	15.4	19.3	0.811	10	9.11	2.68	0.969	**
56	鏡野町	遠藤	41	1,850	15.2	18.3	0.829	8	11.83	2.75	0.898	**
57	鏡野町	上斎原	55	2,000	14.7	18.2	0.833	10	8.60	2.78	0.996	**
58	鏡野町	上斎原	55	1,900	15.2	20.8	0.837	10	12.98	2.88	0.608	**
59	鏡野町	岩屋	34	1,870	16.5	18.1	0.880	12	6.34	2.66	0.997	**
60	鏡野町	上斎原	53	1,550	18.3	25.5	0.884	12	13.59	2.63	0.963	**
61	鏡野町	羽出	48	2,200	15.5	18.3	0.897	8	8.63	2.88	0.994	**
62	鏡野町	奥津	47	2,050	16.3	21.4	0.899	8	14.33	2.78	0.965	**
63	鏡野町	富東谷	41	2,400	19.4	19.4	1.020	4	14.07	3.04	0.959	**
64	鏡野町	富東谷	41	2,560	17.4	17.4	0.900	4	13.59	3.00	0.997	**
65	美咲町	中	38	1,710	19.5	20.3	0.908	10	10.81	2.62	0.984	**
66	美咲町	中	30	2,350	16.6	16.6	0.923	8	8.93	2.86	0.976	**
67	久米南町	全間	32	2,550	13.8	13.5	0.868	6	8.30	2.98	0.998	**
68	美作市	右手	不明	1,550	16.3	22.9	0.817	14	9.61	2.58	0.997	**
69	美作市	後山	34	1,330	17.7	22.6	0.819	10	13.70	2.58	0.974	**
70	美作市	後山	不明	1,850	15.0	19.0	0.821	12	7.51	2.78	0.993	**
71	美作市	右手	不明	1,700	17.1	20.6	0.877	12	8.57	2.58	0.930	**
72	美作市	右手	不明	2,300	14.4	18.7	0.862	8	11.35	2.76	0.989	**
73	美作市	右手	不明	2,000	17.2	23.4	0.921	10	13.40	2.58	0.712	**
74	美作市	右手	不明	2,900	15.0	19.1	0.949	8	11.91	2.78	0.985	**
75	美作市	右手	不明	1,550	21.9	22.3	0.977	14	8.57	2.57	0.994	**
76	美作市	右手	不明	1,750	22.2	23.1	1.010	12	14.22	2.62	0.985	**
77	美作市	右手	不明	1,600	23.5	25.9	1.020	12	14.72	2.46	0.977	**
78	西粟倉村	影石	不明	1,000	15.9	27.5	0.811	14	14.08	2.58	0.952	**
79	西粟倉村	長尾	不明	2,000	14.3	20.5	0.816	8	13.57	2.58	0.963	**
80	西粟倉村	影石	不明	2,600	13.6	13.7	0.865	6	8.25	3.00	0.994	**
81	西粟倉村	知社	不明	2,600	14.8	16.3	0.912	8	9.15	2.98	0.993	**
82	西粟倉村	長尾	不明	2,000	17.0	20.6	0.915	12	8.85	2.58	0.986	**
83	西粟倉村	知社	不明	2,000	17.1	19.9	0.916	10	8.93	2.66	0.966	**
84	西粟倉村	知社	不明	2,200	16.3	16.9	0.918	8	9.16	2.98	0.998	**
85	西粟倉村	影石	不明	2,500	15.9	17.6	0.940	8	10.00	2.75	0.989	**
86	高梁市	成羽町坂本	不明	2,200	14.0	14.2	0.833	6	7.80	3.08	0.987	**
87	井原市	矢掛町上高末	23	2,700	12.0	12.8	0.803	4	9.34	2.98	0.998	**
88	玉野市	田井	不明	2,650	12.5	13.1	0.822	2	11.77	3.05	0.994	**
89	玉野市	田井	不明	2,650	12.5	13.1	0.822	2	11.88	3.06	0.958	**
90	玉野市	田井	不明	2,600	13.1	13.2	0.844	2	11.77	3.02	0.963	**
91	玉野市	田井	不明	2,700	13.0	12.9	0.851	2	11.57	3.05	0.923	**
92	岡山市	建部町品田	34	2,900	14.0	15.5	0.913	6	10.13	2.98	0.988	**
93	吉備中央町	黒土	26	2,350	14.4	16.2	0.869	8	8.52	3.03	0.991	**
94	吉備中央町	尾原	89	820	26.1	31.6	0.900	20	12.89	2.23	0.988	**

注:**は1%水準で有意であることを示す

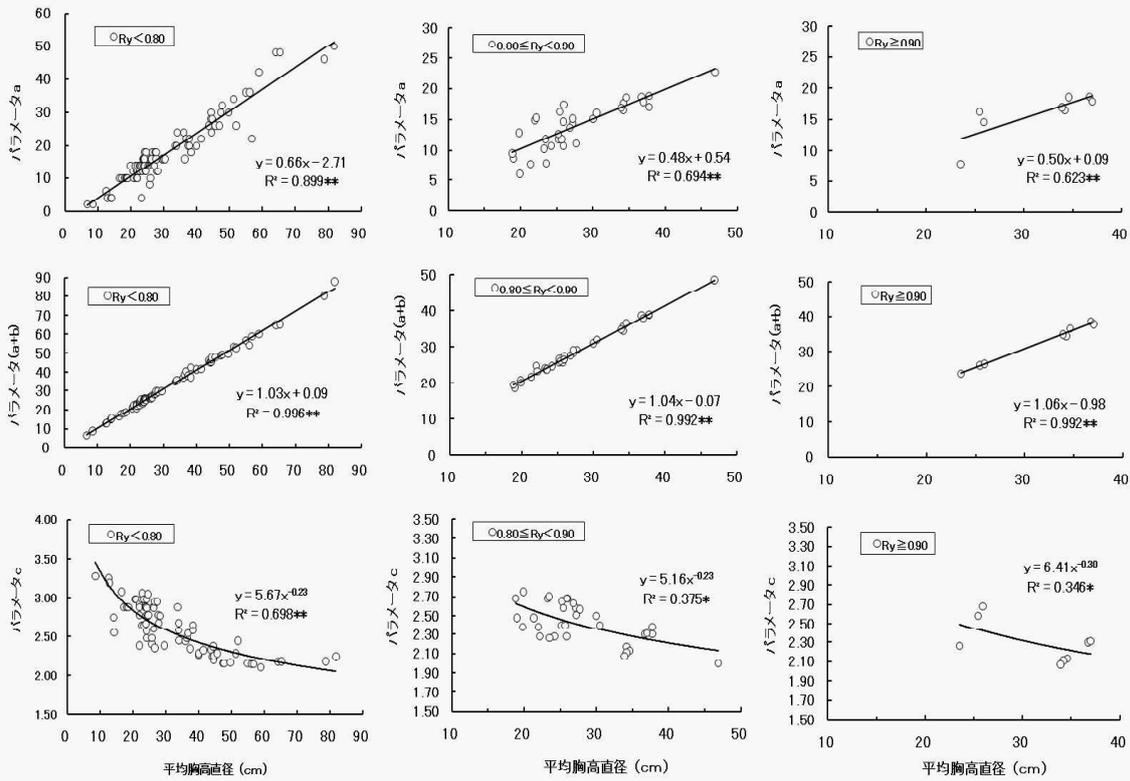


図-4 スギ人工林における平均胸高直径とワイブル関数のパラメータの関係

注 **, *はそれぞれ1, 5%水準で有意であることを示す

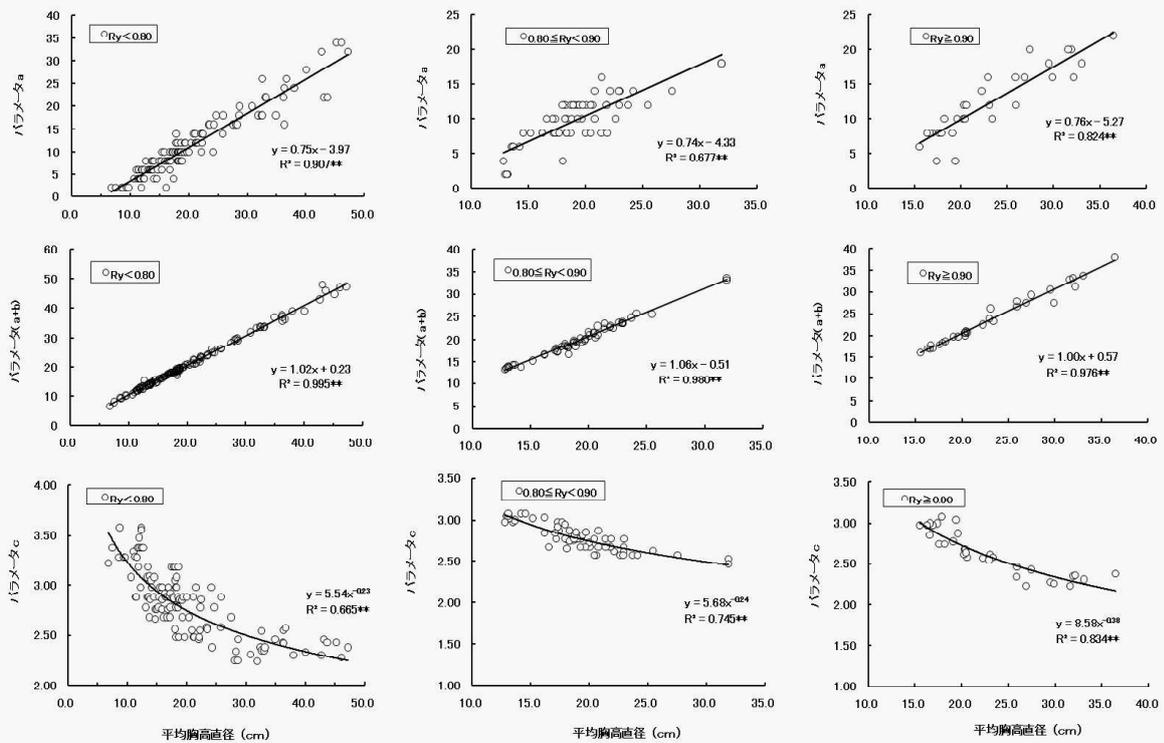


図-5 ヒノキ人工林における平均胸高直径とワイブル関数のパラメータの関係

注 **は1%水準で有意であることを示す

一律に200m/haとし、グラップル（一部、ウインチも併用）集材が可能な作業システムを選択した。林齢及び施業面積については、林齢が40年生では、経費については35年生とさほど変わらないが、35年生に比べ径級が大きく出材積も多いことから、面積増加に伴う収入の増加が著しく、利益に転じるのは2.8haであったとする報告（河野 2010）を参考にして、林齢を40年生、施業面積を3.0haにそれぞれ設定した（表-4）。

さらに路網密度の違いによる労働生産性を検討するため、スギ・ヒノキ両樹種について、伐採方法別（列状間伐、定性間伐）に路網密度をそれぞれ100m/ha、200m/ha及び300m/haに設定した場合の労働生産性を本シミュレーターを使用して算出した。

6 最適作業システムの提案

各工程ごとに最適な高性能林業機械について出力表示する。導入すべき高性能林業機械については、集材工程では集材距離が平均樹高+3m（アーム長を考慮）以内であれば、グラップルを、集材距離が40m以内であればウインチ付グラップルを、さらに集材距離が40mを超える場合にはスイングヤードを選択することとした。

さらに、路網の幅員が3.0m未満、3.0m以上でそれぞれ0.25m³、0.45m³クラスのベースマシーンを選択することとした。ただし、斜面の傾斜が30°を超える場合、平衡斜面における作業路で、クラック又は崩壊件数が急激に増加するという報告がある（西山 2010b）。このことから、斜面の傾斜が30°を超える場合、路網の幅員が3.0m未満に比べ、3.0m以上の場合、崩壊等の危険性がより高まると予想されるため、これを作設しないこととし、路網の幅員に合わせて、ベースマシーンも0.25m³クラスサイズとした。

III 結果と考察

1 立木における胸高直径階分布の予測

スギ及びヒノキ林分の全データについて、ワイブル分布を適用した結果、いずれも決定係数が高く、1%水準で有意であり、直径階別本数の推定が可能であることが示唆された（表-5、-6、-7）。

次に各林分のRy値を算出した上で、0.80未満、0.80以上0.90未満、0.90以上の3パターンのいずれかに区分し、パラメータ(a, b, c)について、林分ごとの平均胸高直径との関係を調べた結果、パラメータ(a)及びパラメータ(a+b)については、スギ、ヒノキ人工林ともに一次式で近似した場合、1%水準で高い相関が認められた（図-4、-5）。

パラメータcについては、スギ、ヒノキ人工林ともに、平均胸高直径との関係について、べき乗式で近似した場合、ヒノキでは、Ry値が0.80未満、0.80以上0.90未満及

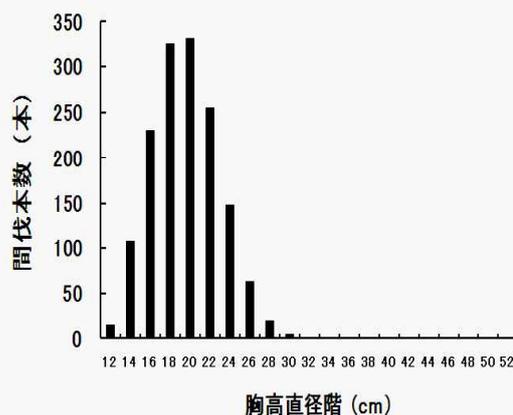


図-6 胸高直径階別間伐本数の予測

び0.90以上のいずれのパターンでも、1%水準で非常に高い相関が認められた。

一方、スギでは、Ry値が0.80未満では、パラメータcと胸高直径の間には、べき乗式で近似した場合、1%水準、Ry値が0.80以上0.90未満及び0.90以上の場合、ともに5%水準でそれぞれ相関が認められた。

以上の結果を元にして、一例として、表-4のヒノキNo.1の事例について試算すると（林齢40年生、施業面積3.0ha、ha当たり立木密度1,500本、平均樹高16.0m、平均胸高直径20cmのヒノキ人工林について列状間伐により33%伐採）、全間伐本数1,500本の胸高直径階別本数は、胸高直径18cm、20cmの個体本数がそれぞれ324、332本を占め、両者合わせて全体の約43%に相当することが予測された（図-6）。このように、頻度分布が最も高い胸高直径階18cm及び20cmを基準として考えた場合、これより胸高直径値が小さい個体が胸高直径値が大きい個体に比べ少ない傾向が認められるが、この一因として、実際の林分では、上層木による被圧等による枯損や既間伐（切り捨て間伐）による下層木の間引き等が行われたことが予想されることから、実際の林分状況を反映しているためと考えられる。

一方、本シミュレーターの特徴として、立木段階で径級ごとの胸高直径分布を求める手法として、間伐対象林分のRy値が0.80未満、0.80以上0.90未満、0.90以上の3パターンのいずれかに該当すれば、それに適したワイブル関数を当てはめ、その結果得られたパラメータ(a, b, c)を割り当てている点にある。つまり、平均胸高直径値を入力すれば高い精度で林分の胸高直径階分布を予測できることを示している。胸高直径階の分布についてワイブル関数を当てはめた事例（田中ら 1992）が知られているが、さらにRy値等、林分状況を示す指標を用いて解析した例はこれまで試みられていない。

また、当該胸高直径階別間伐本数の予測では、入力に必要なデータ（初期値）の数が比較的少なく、逆に得ら

表-8 ヒノキ人工林における樹高と平均胸高直径の関係を解析した林分データ

No	市町村	立木密度 (本/ha)	平均樹高 (m)	平均胸高 直径(cm)	対数式 $y=a \cdot \ln(x)+b$		R ²
					係数 (a)	係数 (b)	
1	西粟倉村 影石	2,900	8.1	13.3	3.36	-0.59	0.579 **
2	西粟倉村 大茅	2,500	10.6	13.4	2.49	4.18	0.701 **
3	真庭市 種	2,700	9.9	13.5	4.34	2.59	0.683 **
4	西粟倉村 影石	2,600	13.6	13.7	4.51	1.89	0.865 **
5	美作市 影石	1,500	11.4	14.7	3.80	1.34	0.581 **
6	玉野市 田井	2,100	11.3	15.4	4.61	-1.14	0.685 **
7	西粟倉村 知社	2,600	14.8	16.3	5.35	-0.02	0.912 **
8	西粟倉村 大茅	2,200	11.2	16.7	3.98	0.07	0.695 **
9	西粟倉村 影石	2,100	13.1	17.2	3.93	1.79	0.778 **
10	西粟倉村 影石	2,500	15.9	17.6	3.64	5.58	0.940 **
11	鏡野町 上斎原	1,450	14.2	17.7	4.97	0.06	0.710 **
12	美作市 右手	1,500	12.5	18.1	4.45	-0.34	0.640 **
13	美作市 右手	1,550	15.0	18.2	3.53	4.77	0.766 **
14	鏡野町 上斎原	2,000	14.7	18.2	4.93	0.52	0.833 **
15	鏡野町 上斎原	1,850	15.2	18.3	5.16	-0.28	0.829 **
16	西粟倉村 大茅	1,700	10.8	18.5	3.44	0.81	0.588 **
17	美作市 右手	2,300	14.4	18.7	3.41	4.52	0.862 **
18	美作市 右手	2,900	15.0	19.1	4.03	3.23	0.949 **
19	鏡野町 上斎原	1,700	15.4	19.3	5.34	-0.26	0.811 **
20	西粟倉村 知社	2,000	17.1	19.6	5.38	-1.26	0.918 **
21	西粟倉村 長尾	2,000	14.3	20.5	5.07	-0.76	0.816 **
22	西粟倉村 長尾	2,000	17.0	20.6	4.02	4.90	0.915 **
23	美作市 右手	1,700	17.1	20.6	4.93	2.34	0.872 **
24	鏡野町 上斎原	1,900	15.2	20.8	5.48	-1.10	0.837 **
25	鏡野町 上斎原	1,350	16.0	21.1	5.10	0.60	0.762 **
26	西粟倉村 長尾	2,000	13.9	21.4	4.61	-0.06	0.799 **
27	鏡野町 奥津	2,050	16.3	21.4	4.80	1.75	0.899 **
28	美作市 右手	1,450	13.6	21.4	5.03	-1.75	0.683 **
29	津山市 加茂町宇野	1,250	17.6	22.3	5.46	0.79	0.797 **
30	津山市 加茂町宇野	1,800	17.7	22.9	6.18	-1.61	0.907 **
31	津山市 阿波村	1,575	15.6	23.4	4.79	0.53	0.795 **
32	新見市 神郷釜村	1,550	17.8	23.7	6.12	-1.33	0.868 **
33	新見市 神郷釜村	1,500	18.1	24.1	5.09	2.12	0.868 **
34	鏡野町 上斎原	1,550	18.3	25.5	4.64	3.19	0.884 **
35	新見市 神郷釜村	1,300	17.2	27.5	4.71	1.72	0.958 **
36	新見市 神郷釜村	1,250	17.1	27.5	5.46	-0.92	0.779 **
37	西粟倉村 影石	1,600	15.9	27.5	4.58	0.89	0.811 **

注1. 表中の対数式x, yはそれぞれ胸高直径, 樹高を示す
 2. **は1%水準で有意であることを示す

れる情報量が多いという利点がある。個体ごとの詳細な毎木データを入力するのに比べ、上記の平均胸高直径値を用いた場合、入力操作は非常に簡単である。

間伐作業を実施している現場において、対象となる全立木個体について胸高直径を測定できればよいが、作業等からその実施は非常に困難である。現実にはこれができないケースでは、標準地を設定し、そこから全体を推測する方法が一般的に行われている。

本シミュレーターを活用すれば、立木段階で林分の胸高直径分布を高い精度で予測できるため、毎木調査を含め、これに係る労力を極力軽減できるメリットがあると考えられる。

2 胸高直径階別樹高の推定

ヒノキ人工林37林分について、林分ごとに各個体の胸高直径と樹高との関係を対数式で近似した結果、いずれも1%水準で高い相関が認められた(表-8)。両者の関係から、胸高直径が増加するのにしたがって、ある一定の樹高までは一定割合で増加するが、これを超えると、増加割合は鈍化することが推定された。

林分ごとに得られた係数(a)について、平均樹高との関係を調べた結果、両者の間には相関が認められ、5%水準で有意であった(図-7)。ただし、林分ごとに

各個体の胸高直径と樹高との関係に比べると、相関は低かった。このことは、施業履歴等の林分管理方法によっても大きく変動することが考えられる。

実際の林分においては、平均胸高直径と平均樹高、または上層樹高のみ与えられているケースが予想される。この結果より、実際に林分の平均樹高及び平均胸高直径の数値のみが与えられているケースにおいては、平均樹高より対数式の係数aを求め、次に対数式より得られていない係数(b)を逆算して求める。これにより、求め

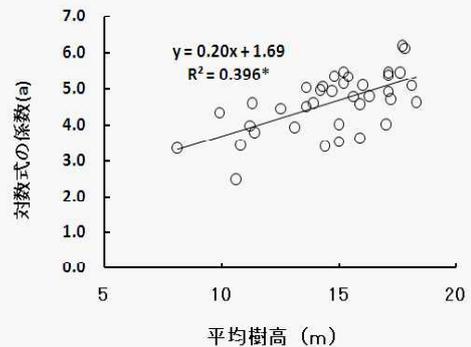


図-7 ヒノキ人工林における平均樹高と対数式の係数(a)の関係

注1. 係数(a)は対数式($y=a \cdot \ln(x)+b$)のaを示す
 2. *は5%水準で有意であることを示す

表-9 労働生産性の実際値と予測値の比較

Nn	区分	樹種	施業面積 (ha)	実 際 値				予 測 値			
				出材積(m ³)		工数 (人)	労働生産性 (m ³ /人・日)	出材積(m ³)		工数 (人)	労働生産性 (m ³ /人・日)
			計	内 訳	計			内 訳			
1	調査地A	ヒノキ	2.60	111	111	40.2	2.8	108	108	28.3	3.8
2	調査地B	スギ	0.33	153	16	37.6	4.1	141	26	22.9	6.2
		ヒノキ	1.77		137				115		
3	調査地C	スギ	0.74	192	116	35.0	5.5	188	130	26.7	6.9
		ヒノキ	0.60		76				58		
4	調査地D	スギ	0.74	233	87	90.5	2.6	231	102	75.7	3.0
		ヒノキ	2.35		146				129		
5	調査地E	スギ	4.86	750	667	120.0	6.3	712	621	108.0	6.6
		ヒノキ	1.22		83				91		

られた係数 (a) 及び (b) を用いて、各林分ごとの胸高直径階別の樹高を算出する方法を本モデルで適用した。

3 作業効率・労働生産性の比較

各工程調査の結果から得られた作業効率データを元に作成したシミュレーターを用いて、実際の工数集計結果と予測値との比較を行った(表-9)。列状間伐調査地Aの労働生産性は2.8m³/人・日であったのに対し、シミュレーターの予測対象である機械作業システム本体の労働生産性は3.8m³/人・日であり、35.7%の過大値を示した。

今回の調査結果で、実際の生産性に比べ、予測値が大きく、乖離していた原因として、①高性能林業機械のトラブルによるサイクルタイムの遅れ、②伐木工程での枝掛かりによる遅延、③造材時での枝葉片付け等による遅延、④土場での桘積み・手直し作業による遅延が考えられる。特に、今回のケースでは、作業効率についてさらに工程別に解析を行った結果、予測値に比べ、実際値は伐木が60.1%、集材(木寄せ)が77.1%、造材が78.1%、集材(搬出)が77.6%となっており、伐木、集材(木寄せ)、集材(搬出)、造材の順に実際値との乖離がみられた(表-10)。

伐木工程に関しては、4残2伐による列状間伐が現場においては実施されたが、隣木への枝掛かり等による遅

延が考えられる。

造材工程では、使用機種がプロセッサであったため、ヒノキの枝払いに余分な時間を要したこと、さらに枝葉片付け等により遅延したことが大きく影響したと考えられる。この点に関し、本県では、造材工程においては、プロセッサと同様に、ハーベスタの導入が進んでいるが(岡山県農林水産部 2010)、樹種別人工林蓄積量は、スギよりもヒノキの方が多い(岡山県農林水産部 2010)ことから、ヒノキの枝払いに係る作業時間が問題となるが、プロセッサに比べ、ストローク式ハーベスタの方がヒノキの枝払いには優れていることが一因として影響していると考えられる(図-8)。

今回、工程調査の結果から得られた作業効率データは、ハーベスタとプロセッサの両機種を含めた数値であるため、プロセッサ使用の場合では作業効率データの低下により、実際値が予測値を下回っていると考えられる。

集材(木寄せ)工程では、スイングヤードを使用していたが、集材時にワイヤーがドラム内で絡まってしまうトラブルが散見された。このように高性能林業機械のトラブルによる遅延が考えられる。さらに、最大集材距離が30m以内の場所においても、ウインチ付グラブではなく、スイングヤードを使用しているケースがあり、このことも予測値に比べ実際値が下回っていた原因であ

表-10 調査地Aにおける所要工数の予測と実際

区 分	予測生産性			実際の生産性
	スギ伐区	ヒノキ伐区	伐区全体	
生産材(A) m ³		107.8	107.8	110.7
工 数(B) (人日)	伐木	6.96	6.96	11.90
	集材(木寄せ)	10.97	10.97	14.60
	造材	6.08	6.08	8.00
	集材(搬出)	4.31	4.31	5.70
計		28.33	28.33	40.20
作業効率 (A)/(B) (m ³ /人日)	伐木	15.48	15.48	9.30
	集材(木寄せ)	9.83	9.83	7.58
	造材	17.73	17.73	13.84
	集材(搬出)	25.02	25.02	19.42
労働生産性 (A)/(B) (m ³ /人日)		3.81	3.81	2.75

注: ソフトによる出力表示画面を示す



図-8 ハーベスタによる造材作業

ると考えられる。

集材（搬出）工程では、場所によっては、土場に高く積み上げるケースがみられる。このような場合、積み上げ・手直し作業が必要となり、これらに起因する遅延が考えられる。

列状間伐調査地Bにおける労働生産性の予測値は6.2m³/人・日であったのに対し、シミュレーターの予測対象である機械作業システム本体における労働生産性の実際値は、4.1m³/人・日であり、51.2%の過大値を示した。同調査地Bにおける工程別内訳については不明であるため、詳細な解析はできないが、A及びBの両調査地ともに、同一林業事業体によるものであった。両調査地における労働生産性は、実際値に比べ、ともに過大値を示していたが、これは、本シミュレーターのために収集したデータから求められた作業効率に比べ、当該林業事業体による作業効率が低い水準にあると推察される。つまり、当該林業事業体が行っている作業システムは、伐木、造材及び集材工程を中心として、今後さらに改善の余地があることが示唆された。

定性間伐調査地C～Eについて、実際の工数集計結果と予測値を比較すると、その労働生産性は、2.6～6.3m³/人・日であったのに対し、シミュレーターの予測対象である機械作業システム本体の労働生産性は、3.0～6.9m³/人・日であり、予測精度は比較的高いと考えられる。

今後の課題として、本県で工程調査により得られたデータ数は現時点でも非常に少なく、各工程、樹種別のサイクルタイムの予測精度が低いため、データ収集とともに予測精度の向上が挙げられる。

さらに、兵庫県（兵庫県立農林水産技術総合センター森林技術センター 2010）で構築されているシミュレーションモデル（システムダイナミクス理論）のように素材生産作業において材を1本ずつ処理し、次の工程に渡していく方式のモデルを構築し、工程間の待ち時間を的確に表現できれば、どの時点で次の工程に移ればよいか

分かるが、今回、作成したシミュレーターでは工程間の連携を考慮しておらず、このことについても今後の課題である。

本シミュレーターの出力画面から得られる情報量は、直径階級分布、細り表のほか、たとえば出材情報として1番玉4m及び3mの玉数、2cm括約で末口径14、16、18cm等で4m及び3mに採材した玉数等の情報が得られる（表-11）。このように得られた情報については、提案型施業を行う際、いくつかの異なった手法により算出された情報を総合的に判断する一材料として活用すれば、設計する側でもより精度の高い施業プランの作成ができると考えられる。

4 出材量の比較

ヒノキ人工林を対象とした調査地Aにおける実際の出材積は108m³であったのに対し、設定した造材歩留まりに基づくシミュレーターの予測出材積は111m³であり、誤差は2.7%と小さく、予測精度は非常に高かった（表-9）。

施業地全体の84%をヒノキが占める調査地Bでは、実際の出材積は153m³であったのに対し、設定した造材歩留まりに基づくシミュレーターの予測出材積は141m³であり、誤差は9.2%であった。ただし、樹種別内訳をみると、スギでは、62.5%の過大であったのに対し、ヒノキでは16.1%の過小となっていた。

表-11 2cm括約での出材量予測の事例

樹種	末口径 (cm)	1番玉		2番玉		3番玉		計
		4m	0m	4m	0m	4m	0m	
ヒノキ	14	298	291	0	229	0	76	894
	16	229	0	18	188	0	0	435
	18	133	0	3	0	0	0	136
	20	73	0	0	0	0	0	73
	22	3	0	0	0	0	0	3
	24	0	0	0	0	0	0	0
	26	0	0	0	0	0	0	0
	28	0	0	0	0	0	0	0
	30	0	0	0	0	0	0	0
	32	0	0	0	0	0	0	0
	34	0	0	0	0	0	0	0
	36	0	0	0	0	0	0	0
	38	0	0	0	0	0	0	0
	40	0	0	0	0	0	0	0
	42	0	0	0	0	0	0	0
	44	0	0	0	0	0	0	0
	46	0	0	0	0	0	0	0
48	0	0	0	0	0	0	0	
50	0	0	0	0	0	0	0	
52	0	0	0	0	0	0	0	
54	0	0	0	0	0	0	0	
計		736	291	21	417	0	76	1,541

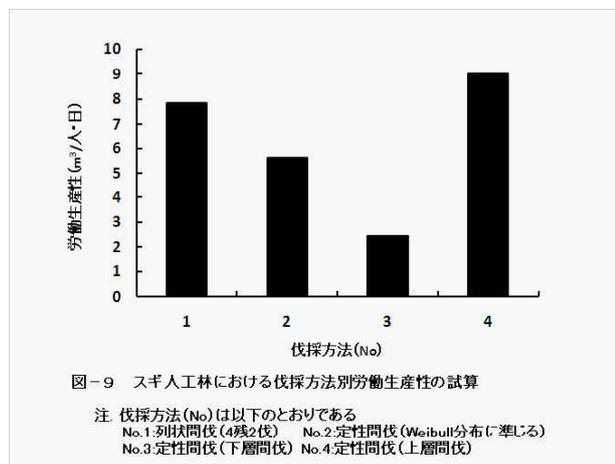
注1. 単位は本数を示す
2. ソフトによる出力表示画面を示す

施業地全体の55%をスギが占める調査地Cにおける実際の出材積は192m³であったのに対し、設定した造材歩留まりに基づくシミュレーターの予測出材積は188m³であり、誤差は1.1%と非常に小さく、予測精度は非常に高かった。ただし、樹種別内訳をみると、スギでは12.1%の過大であったのに対し、ヒノキでは23.7%の過小と相反する結果となっていた。

施業地全体の76%をヒノキが占める調査地Dにおける実際の出材積は233m³であったのに対し、予測値は231m³であり、誤差は0.9%と非常に小さく、予測精度は非常

に高かった。ただし、樹種別内訳をみると、スギでは17.2%の過大であったのに対し、ヒノキでは11.6%の過小であった。

全体の80%をスギが占める調査地Eにおける実際の出材積は750m³であったのに対し、予測値は712m³であり、誤差は5.1%と小さいと推察される。



全調査地のうち、一部、調査地Eでは、スギでは出材積予測値が実際値に比べ6.9%の過小であったのに対し、ヒノキでは逆に9.6%の過大となっていたが、それ以外の調査地B~Dでは、出材積の予測値がスギでは実際値に比べ過大、ヒノキでは逆に過小と全く逆のパターンとなっていた。予測値の出材積が実際値と比較して、スギで過大、ヒノキで過小となっていた原因としては、不良材の割合をスギ・ヒノキともに10%に設定しているが、実際には、スギでは10%よりも高く、逆にヒノキでは10%より低かったことが予想される。

スギは、同一林齢であっても、ヒノキに比べると相対的に個体サイズが大きく、伐倒木1本から3または4mに採材が可能な玉数が多いこと、さらに、今回、作成したシミュレーターでは、余尺分を加味しておらず、その結果として実際より多くの玉数、出材積を得る結果となりやすいこと等を考えれば、調査地B~Dのような結果が一般と考えられるが、この点については、今後、さらに間伐施業データを収集し、検討を行う必要がある。

ただし、全体を通してみると、調査地A~Eにおいて、出材積の予測を行った結果、全体の出材量としては、予測誤差が最も大きい調査地Bでも9.2%であり、それ以外の調査地では、出材量の誤差は5.1%以下に止まっていることから、総合的に判断すると、予測誤差は小さいと考えられる。

5 間伐シミュレーションによる比較

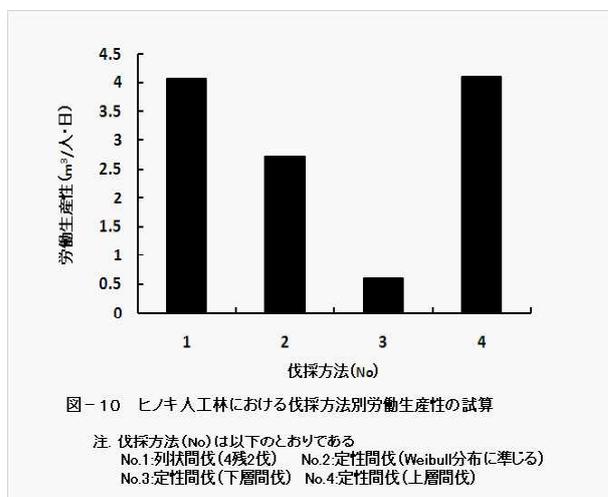
間伐シミュレーションで設定した条件下において、スギ人工林の列状間伐では、その労働生産性は7.9m³/人・日であると試算されたのに対し、定性間伐では5.6m³/人

・日となっていた(図-9)。定性間伐の労働生産性が列状間伐の72%に低下する原因として、主に伐木工程における遅延(かかり木等)が考えられる。加えて本作業システムには含まれていないが、伐採前の選木作業で定性間伐ではさらに一定工数を要することから、両者の差はさらに拡大すると考えられる。

次にスギ人工林の下層間伐による労働生産性は2.5m³/人・日であり、定性間伐における労働生産性の45%まで低下していた。これは、間伐対象木の個体サイズが小さいために末口径が14cm以上で4または3m採材できる玉数が少ないのに反して、伐木から造材工程までは一定の工数を要するため、労働生産性の低下を招いたと考えられる。

一方、スギ人工林の上層間伐による労働生産性は、9.0m³/人・日であり、定性間伐に比べ61%増となった。伐木から造材工程までは定性間伐とほぼ同一工数であるのに対し、出材量が定性間伐や下層間伐に比べ相対的に増大したためである。

この結果、スギ人工林の場合、列状間伐と上層間伐の労働生産性はそれぞれ7.9、9.0m³/人・日であり、伐採方法としては上層間伐の方が列状間伐に比べ、労働生産性の点では優れているが、一般的な定性間伐に比べ、列状間伐の方が明らかに労働生産性が高いことがシミュレーションの結果、明らかになった。



次にヒノキ人工林の列状間伐では、労働生産性は4.1m³/人・日であると試算されたのに対し、定性間伐では2.7m³/人・日となっていた(図-10)。定性間伐の労働生産性が列状間伐の66%に低下しており、スギ人工林以上の低減率を示した。この原因としては、スギ同様、主に伐木工程における遅延(かかり木等)が考えられる。

次にヒノキ人工林の下層間伐による労働生産性は0.6m³/人・日であり、定性間伐における労働生産性の22%まで低下していた。これは、同一林齢の場合、スギ人工林以上に間伐対象木の個体サイズが小さいため、末口

径が14cm以上で4または3m採材できる玉数が極端に少なくなるためと考えられる。

一方、ヒノキ人工林の上層間伐による労働生産性は、4.1m³/人・日であり、定性間伐に比べ56%増となった。スギ人工林同様、伐木から造材工程までは定性間伐とほぼ同一工数であるのに対し、出材量が定性間伐や下層間伐に比べ相対的に増大したためと考えられる。

この結果、ヒノキ人工林における列状間伐と上層間伐の労働生産性はともに4.1m³/人・日であり、同一レベルであるが、一般的な定性間伐と比較すると、列状間伐の方が明らかに労働生産性は高いことがシミュレーションの結果、明らかになった。

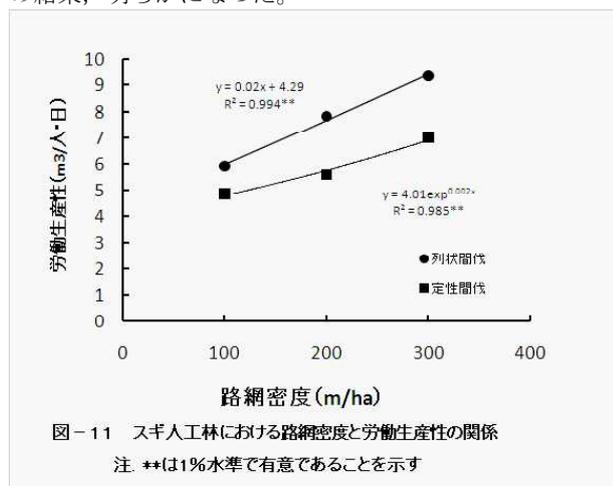


図-11 スギ人工林における路網密度と労働生産性の関係
注: **は1%水準で有意であることを示す

スギ人工林について、路網密度と伐採方法別の労働生産性の関係をみると、路網密度が100~300m/haの範囲では、定性間伐に比べ、列状間伐の方が労働生産性が相対的に高かった(図-11)。列状間伐で路網密度が100m/haの場合の労働生産性を100とした場合、路網密度が200m/ha及び300m/haの労働生産性はそれぞれ133、158へと上昇していた。

ヒノキ人工林について、路網密度と伐採方法別の労働生産性の関係をみると、スギ人工林と同様、路網密度が100~300m/haの範囲では、定性間伐に比べ、列状間伐の方が労働生産性が相対的に高かった(図-12)。列状間伐で路網密度が100m/haの場合の労働生産性を100とした場合、路網密度が200m/ha、300m/haの労働生産性はそれぞれ139、178へと上昇していた。

このように、スギ・ヒノキ人工林ともに、労働生産性を高めるためには、現場の路網密度を高めることが必要不可欠であることが示唆された。路網密度を100m/haから300m/haへと高めることは、スイングヤダからウィンチ付きグラップル、さらにはグラップルへ、いわゆる作業システム(使用機種)の変更を意味するものである。路網密度を高めれば、作業路の開設コストは増加する一方、機械の使用コストや集材に係る工数削減による人件費の圧縮等、コスト削減が可能となる。

以上の点から、今後、作業路作設から搬出までに要する生産コストの検討も急務の課題として挙げられる。

6 最適作業システムの提案

現場に合った最適な高性能林業機械を選択する場合、生産材の径級、路網幅員、斜面の傾斜等が問題になる。

林分状況により、末口の径級が25cm以上を超えるケースでは、造材工程でハーベスタを使用した場合でも、本格的な能力は末口径が25cm程度までであるとする報告があるが(渡井 2010)、今回、作成したシミュレーターでは、林分の立木サイズを考慮した機種選定は行っていない。

斜面の傾斜が30°以上になると、盛土部分の発生とともに、クラックまたは崩壊の件数が急激に増加することが明らかになったことから(西山 2010b)、現地における林地保全及び作業路崩壊防止を第一とし、路網幅員及び斜面の傾斜よりまず機種を選択する手法を用いた(表-12)。

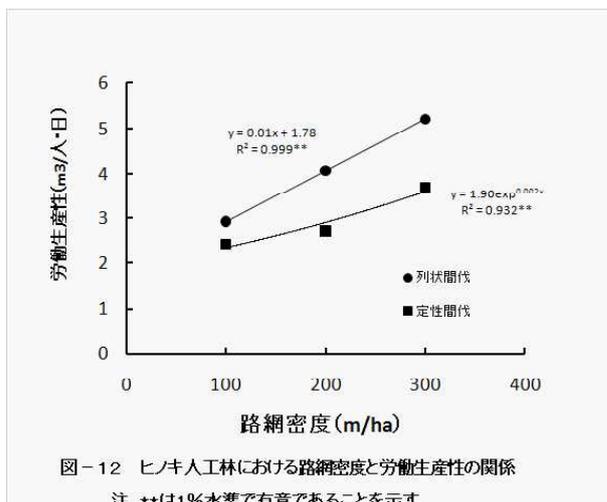


図-12 ヒノキ人工林における路網密度と労働生産性の関係
注: **は1%水準で有意であることを示す

斜面の傾斜が30°以上となるケースでは、路網幅員が3.0m以上で作設されている場合や末口の径級が25cmを超えるケースであっても、導入すべき機種としては0.25m³を選択している。現実問題として、現在、0.45m³クラスの機種導入が増加している状況下であるが、今後、奥山や尾根部に近い間伐施業地が増加し、0.25m³クラスの機種に一部、シフトしていくとともに、このサイズでの新たな機種開発が進むことも予想されることから、伐出作業に係る作業効率の低下を招いたとしても、作業路開設コストの削減や林地保全に寄与するウエートの方が高まると考えられる。

7 シミュレーターの改良と課題

シミュレーターの課題として、以下の改良点が判明した。

①造材歩留まりの設定については、各個体の曲り具合

表-12 最適作業システムの提案

工 程	導入機械等
伐木	チェーンソー
集材(木寄せ)	ウインチ付グラブ
造材	ハーベスタかプロセッサ
集材(搬出)	フォワーダかクローラ
路網密度	最低200~300m/ha以上
ヘースマシン	0.45 クラス

注)ソフトによる出力表示画面を示す

(根曲り・幹曲り)、枝打ち高の状態等によって大きく変動するとともに、本シミュレーターを使用するユーザーの主観にも大きく影響されるため、これらを定量化する手法が必要である。

②標準木(平均木)を基準として予測した径級ごとの頻度分布は、間伐履歴によっては必ずしも現地の林分に当てはまらないケース(標準地より得られた径級ごとの頻度分布とワイブル分布による予測値との間に大きな隔たりがあるケース)が想定されるため、この場合の取扱方法についても検討を要する。

③当該シミュレーターでは、林内に切り捨て状態で放置しないということを前提としており、集材工程までは、間伐木はすべて作業路まで集められている。このため、尾根部等を中心に切捨間伐が部分的にでも実施された場合、本シミュレーター上では、労働生産性、特に造材工程における労働生産性、作業効率とともに過大値が算出される。この問題を解消する方法としては、関係する集材(木寄せ)及び造材工程において、径級ごとの間伐本数から、林内に切り捨てた状態で放置する割合を入力する方法、またはある一定の径級以下は集材しない方法等が考えられる。

④作業段取り、特に材の流れに従って、各工程を連鎖的に動かしていく場合と、本シミュレーターのように各工程について、それぞれ独立して算出された場合とでは、作業効率や労働生産性は異なるため、前者の方法でのシミュレーターの改良が必要である。このことについては、兵庫県立農林水産技術総合センター森林技術センター(2010)のような手法の導入も検討する必要がある。

⑤集材(搬出)作業においては、一部、フォワーダ等による過積載も確認されており、その際の作業効率についても変動することが考えられる。同工程について、本シミュレーターでは適正量(2.6t積み)でのサイクルタイムを求めているが、生産材の重量と材積換算についてはさらに検討を要する。

⑥今回、工程調査より得られた工程ごとの作業効率に

ついては、ヒノキ人工林において得られた数値データをすぎにも適用したケースがあり、今後、工程ごとの作業効率については、さらにデータを収集していくとともに、その精度をさらに高めて行く必要がある。

IV おわりに

本研究は、間伐作業を実施した場合、どれくらいの出材量があるのか、伐採から土場までの搬出にどれくらいの労力(工数)を要するのか、どれくらいの労働生産性があるのかを算出することに重点を置いた。国は、現在、作業システムの導入により、労働生産性を10m³/人・日に向上させるという目標を掲げているが(林野庁編2010)、間伐施業地の林況や作業条件によって、出材量や工数も大きく変動するため、これを数値で算出することは非常に困難であり、今までは現場を熟知した技術者の経験と知識で決められていたと考えられる。仮に、これらの点を数値で示すことができれば、間伐における施業提案を行う際の基礎資料として、森林所有者に対し、より具体的な情報を提供することが可能となる。

また、間伐作業の現場で労働生産性の数値を実際に体感させ、かつ労働生産性を強く意識させることができると期待される。これに合わせて、現在、導入している作業システムについて、作業の改善点を明確にすることで、労働生産性の向上にも寄与すると考えられる。

今回、作成したシミュレーターは、入力項目を極力減らすとともに、マイクロソフト社の表計算ソフトExcel上で利用できるため、行政のみならず、森林組合等においても使いやすいと考えている。間伐コストの算出までは対応していないが、出材積については、径級ごとの丸太本数等の情報も出力表示されており、材価を入力すれば、出材積に対応した販売金額(粗収入)も出力表示が可能となっている。

提案型施業においては、プランを作成する際、たとえば、出材量を例に挙げても、これを算出する方法としていくつかの異なった手法により算出された出材量データを比較検討することができれば、設計する側においてもより精度の高い施業プランの作成・提案が可能になると考えられる。

現在、本シミュレーターについては、県内の認定事業者(森林組合及び民間事業者)に対し、配布を行ったところである。また本県及び兵庫県においては、林業普及指導員を対象とした本シミュレーターの操作研修会を実施したところであり、今後、普及指導の徹底とともに、本シミュレーターの利便性を高めつつ、普及されていくことを望むものである。そのためには、入力因子で他の因子から算出・推定が可能な因子を明らかにして、より一層の入力自動化を進めていく必要がある。さらに、各種推定式のパラメータの検証、作業遅延の評価手法等、

引き続き、本シミュレーターの検証を行うとともに、その改良を随時行い、予測精度の向上を図っていく必要がある。

これらの諸課題については、今後とも課題解消に向けた取り組みを進めていくとともに、用材以外の未利用材を含めた木質バイオマスにも対応したものに改良していく予定である。

参考文献

兵庫県立農林水産技術総合センター森林技術センター (2010) ひょうご「伐採・搬出事業支援システム」の確立～第二世代の提案型施業プラン～調査報告書 . 27pp

河野雄一・満留良文・岡勝・田中良明 (2009) 列状間伐における機械作業システムの生産性予測ソフト作成. 九州森林研究62:59-63.

河野雄一 (2010) 列状間伐における機械作業システムの収支試算ソフト作成. 九州森林研究63:41-45.

木村公文 (2000) 列状間伐シミュレーション. 林業にいがた新潟. 8pp

黒瀬勝雄 (2006) オリジナルの機械と高密度路網による列状間伐の低コスト化ー(有)戸川木材ー. 機械化林業 No. 633. 29-32. (社)林業機械化協会.

前田林業株式会社編 (2008) 林業生産流通革新的取組支援事業. 前田林業株式会社:31pp

牧本卓史・西山嘉寛 (2005) 長伐期林の林分収穫システムの開発. 岡林試研報21:43-52.

水田展洋・水戸辺栄三郎 (2007) 間伐見積シミュレーションソフト. 宮城林試研報. 39-47.

西山嘉寛・阿部剛俊 (2002) 長伐期施業に対応する森林管理技術の研究ー高齢林内における下層植生の現存量の推定と林分収穫予想表の作成. 岡林試研報18:33-66.

西山嘉寛 (2009) 最適作業システムの構築について (I)ー列状間伐における労働生産性の予測ー. 第60回日本森林学会関西支部日本森林技術協会関西・四国支部連合会合同大会研究発表要旨集. 78.

西山嘉寛 (2010a) 最適作業システムの構築について (II)ーソフトの内容についてー. 第61回日本森林学会関西支部日本森林技術協会関西・四国支部連合会合同大会研究発表要旨集. 78.

西山嘉寛 (2010b) 施業困難地における最適作業システムの研究. 岡山県農林水産総合センター森林研究所業務年報50:3-4.

岡山県農林水産部 (2010) 岡山県の森林・林業. 103pp. 岡山.

岡山県農林水産部林政課 (2008) 平成19年度実証課題事業報告書. 91-98.

岡勝・田中良明・吉田智佳史・近藤耕次・佐々木達也・

加利屋義広 (2007a) フォワーダ走行速度に及ぼす路網規格と積載量の影響. 森林学誌21(3):163-170.

岡勝・田中良明・吉田智佳史・近藤耕次・佐々木達也・加利屋義広 (2007b) フォワーダ走行速度からみた集材規格に関する検討. 森林学誌21(4):295-298.

林野庁編 (2010) 平成22年版「森林・林業白書」. 145pp. 全国林業改良普及協会. 東京.

林野庁計画課編 (2002) 立木幹材積表 (西日本編) . 319pp. 日本林業調査会. 東京.

林野庁・独立行政法人森林総合研究所 (2009) 林業新技術ー生産現場への普及に向けてー. 14pp

佐保公隆 (2005) 素材生産コスト予測プログラムの開発ー間伐コスト予測プログラム作成ー. 大分研究センター林試年報No. 47: 2-3.

櫻井倫・姫野光雄・二元隆・仁多見俊夫・小林洋司 (2004) スイグヤード列状間伐における作業システムの連携について. 森林学誌18(4):245-248.

島根県中山間地域研究センター (2000) 低コスト素材生産の実践. 11pp.

鈴木善郎・野上啓一郎 (1999) 長伐期に対応するスギ及びヒノキ細り表. 静林技セ研報27:9-21.

田中正臣・福本通治・藤平拓史 (1992) スギ人工同齢林における林分収穫予想システムの開発 (第1報) Weibull分布による直径分布の予測. 奈良県林試研報 22:1-9.

渡井純 (2010) チェンソーを併用した小型ハーベスタ造材の労働生産性. 機械化林業No. 674: 11-16.