

林業の低コスト化・高生産性化に向けて —シミュレーションプログラム構築による考察—

No.10 吉村 博幸

はじめに

我が国の林業は安価な輸入材との競争等により、国産材の価格が著しく下落し、現在はピーク時の3割程度の水準となっている。また、戦後に植栽された人工林が利用期を向かえつつあるものの、木材価格が低いこと等から利用が進まず、国産材の国内消費シェアは2割程度で推移している。

一方、森林資源を取り巻く情勢は、世界的に木材需要が増加し、主要な木材輸出国が自国の森林資源確保のため輸出規制を始めている。また、木材は環境にやさしい資源、エネルギー源として今後利用拡大が期待されている。

このような状況の中、木材生産を低コスト化・高生産性化し、国内の森林資源の利用を推進するため、高密路網と高性能林業機械等を組み合わせた作業システムの導入が推進されてきた。しかしながら、作業員と機械が最適に配置されていない、機械の性能を活かしきれていないなどの理由から、作業システム導入の効果が十分発揮されていない状況が見受けられる。

そこで、作業員と機械の配置を最適化するシミュレーションプログラム等を構築し、事業着手前の段階で最適な作業日程を出力するとともに、作業日程と作業内容の調整過程を可視化することにより、作業進捗の把握とこれを踏まえて作業システムを最適に調整する手法について考察を行った。

第1 研究方法

先行研究として、平成20年度専攻科研修生である石塚紀子氏が伐採から集材までの作業について簡易なシミュレーションプログラムを構築している。その内容は、作業現場の条件を入力すると予め決められている作業システムで作業員の手待ち時間が最も少ない日程を出力するものであった。

本研究では、石塚氏が構築したシミュレーションプログラムを基に、シミュレーションの範囲を作業路作設を含む入山から下山までに拡張するとともに、作業の進捗状況に応じた日程調整や、これらと連動して費用の試算を行うプログラムを構築した。

1 シミュレーションの対象とする作業システム

本シミュレーションの対象作業は、高密路網と高性能林業機械等を組み合わせた作業システムによる定性間伐及び列状間伐である。

作業システムは林野庁が実施した「平成19年度国有林間伐推進コンクール」表彰事例及び日本林業技士会が実施した「平成19年度低コスト作業システム構築事業報告書」を参考に、チェンソー・油圧ショベル・ザウルスロボ・グラップル・プロセッサ・ハーベスタ・フォワーダを選定し、これらを組み合わせた作業システム（図-1）とした。

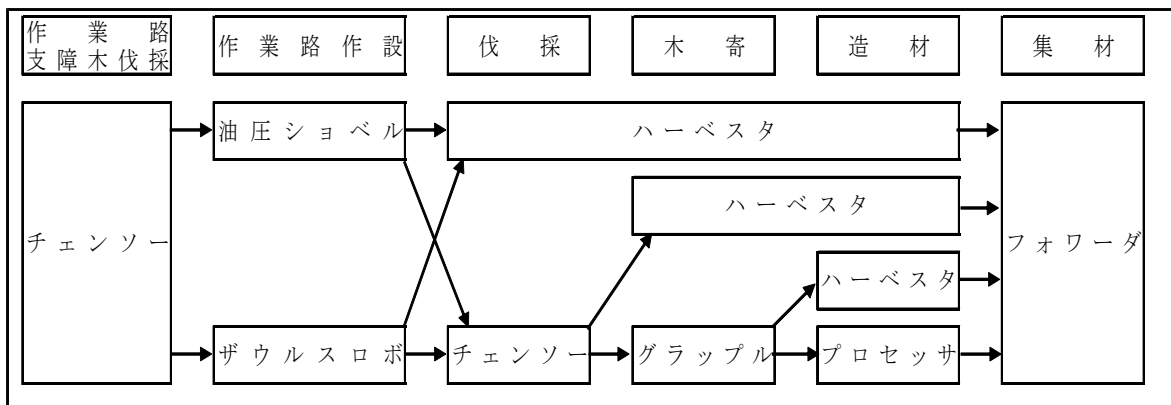


図-1 シミュレーションの対象とする作業システム

2 構築したシミュレーションプログラム

構築したシミュレーションプログラムは、以下の3つである。

- ・事業着手段階で作業員と機械の配置を最適化する「日程管理シミュレーション」
- ・事業の進捗に合わせて日程を調整する「チューニングシミュレーション」
- ・延べ作業員数や事業期間から人件費や機械運行経費等のコストを算出する「費用シミュレーション」

3 日程管理シミュレーション

日程管理シミュレーションは、作業現場の情報（図-2）と作業システムの情報（図-3）を入力すると自動的に計算処理し、作業日程を出力するものである。

作業現場の情報として入力する項目は、林小班名、面積、林地傾斜、間伐方法（選択式）、列間距離（列状間伐の時のみ）、伐採率、平均木寄距離、樹種（選択式）、区域内 ha 当たり本数、区域内 ha 当たり材積、平均樹高、平均胸高直径、歩留まり、下層植生（選択式）、既設作業路距離、新設作業路距離、修繕作業路距離、木製構造物量、作業路幅員（選択式）、土質（選択式）、平均採材長（選択式）であり、伐採本数、材積、単木材積、資材量は自動計算される。

作業システムの情報として入力する項目は、作業員数、作業区域間の距離（2つの現場を連続してシミュレーションする場合）、使用する機械の台数、選択した機械ごとに設定している走行距離・旋回角度・集材距離・積載量である。

区域1		1い	林小班
林地情報			
項目	単位	備考	
面積	7	ha	
林地傾斜	16	°	
作業路情報			
項目	単位	備考	
既設作業路(伐区内)	200	m	修繕が必要な作業路の距離
新設距離(伐区内)	1400	m	
修繕距離(伐区内)	200	m	
既設作業路(伐区外)	200	m	
新設距離(伐区外)	200	m	
修繕距離(伐区外)		m	
作業量情報			
項目	単位	備考	
伐採本数	3003	本	
材積	1201.2	㎡	
単木材積	0.4	㎡	
資材量	900.9	㎡	
平均採材長	4	m	

シミュレーションを行った作業現場（仮想）
 面積：7ha 林地傾斜：16°
 伐採方法：列状間伐 列間距離：7m
 伐採率：33% 平均木寄せ距離：12m
 樹種：スギ haあたり本数：1300本
 haあたり材積：520m³ 平均樹高：18m
 平均胸高直径：22cm 歩留まり：0.75
 下層植生：易 既設作業路：200m
 新設作業路：1400m 修繕作業路：200m
 既設作業路（伐区外）：200m
 幅員：3m 土質：礫質土
 平均採材長：4m

図-2 作業現場の情報入力画面

シミュレートを行った作業システム
 作業員数：4人
 作業路支障木伐採：チェンソー4台
 作業路作設：
 油圧ショベル（12t）2台
 伐採：チェンソー4台
 木寄せ：グラップル（12t）1台
 造材：プロセッサ（12t）1台
 集材：フォワーダ（6t）1台

作業員数	4	人	
区域1と区域2間の距離		km	
作業路伐採			
規格	台数		
チェンソー	4		
作業路作設			
規格	台数		
油圧ショベル	2		
チェンソー	4		
伐採			
規格	台数	1い	0
ハーベスタ(伐採・木寄せ)	4	走行距離	走行距離
チェンソー	4		
木寄せ			
規格	台数	1い	0
グラップル	1	走行距離	旋回角度
ハーベスタ(木寄せ・造材)	1	10	90
造材			
規格	台数	1い	0
プロセッサ	1	旋回角度	旋回角度
ハーベスタ(造材)	1	90	180
集材			
規格	台数	1い	0
フォワーダ	1	区内平均集材距離	区外平均集材距離
		積載量	区内平均集材距離
			区外平均集材距離
			積載量

図-3 作業システムの情報入力画面

(1) シミュレーションの方法、条件設定

シミュレーションの方法、条件設定については以下のとおりである。

ア 作業路作設支障木の伐採作業

作業路作設支障木の伐採作業はチェンソーで実行することとし、工程は林野庁が

実施した「平成16年度立木評価に係る伐出作業標準係数調査事業報告書」を基礎として算出した。

下層植生によって伐採木から次の伐採木までの移動時間が異なることから、移動時間に対し下層植生の密度によって易=1.1、中=1.0、難=0.9の補正係数を乗じることとした。

イ 作業路作設作業

(ア) 油圧ショベル

油圧ショベルによる作業路作設工程は、林野庁九州森林管理局が調査した工程を基礎として、土質と林地傾斜から作業工程を算出し、そこに規格別補正として機械の大きさに応じて6t=0.7、8t=1.0、12t=1.3の補正係数を乗じることとした。

(イ) ザウルスロボ

ザウルスロボによる作業路作設の工程は、先行研究・調査結果がないことから、油圧ショベルの算出方法を流用し、油圧ショベルよりも作業効率が高いと想定して機械の大きさに応じた補正係数をそれぞれ0.9、1.2、1.4とした。

ウ 間伐作業

(ア) チェンソー

チェンソーによる伐採作業の工程は、林野庁が実施した「平成16年度立木評価に係る伐出作業標準係数調査事業報告書」を基礎として、移動時間、伐倒時間、付帯・遅延時間の合計により算出し、移動時間には下層植生によって易=1.1、中=1.0、難=0.9の補正係数を乗じることとした。

(イ) ハーベスタ（伐採・木寄・造材作業）

ハーベスタによる伐採・木寄・造材作業の工程は、林野庁が調査した工程を基礎として、平均胸高直径と仮土場までの移動距離から作業工程を算出し、そこに補正係数を乗じることとした。

・林地傾斜による補正係数：0～10° =1.00、11～20° =1.07、21～25° =1.17、
26° 以上=1.30

・伐採方法による補正係数：列状間伐=0.875、定性間伐=0.7

・作業種ごとの補正：伐採・木寄・造材作業=1.1

(註) ハーベスタについては伐採・木寄・造材作業を一貫して行う場合と、木寄・造材作業または造材作業だけを行う場合が選択できることとしており、全ての作業について同じ工程を使用し作業種によって異なる補正係数を乗じて作業工程を算出することとした。

なお、アームを伸ばして木寄できる範囲は限られ、その範囲から外れた箇所の木寄はウインチによることとなるが、今回はウインチによる木寄作業の工程を計測した資料がない等の理由からウインチ木寄を見込まなかった。

エ 木寄作業

(ア) グラップル

グラップルによる木寄作業の工程は、林野庁が実施した「平成15年度立木評

価に係る伐出作業標準係数調査事業報告書」の極積工程を基礎として、伐採方法別に補正係数（列状間伐=1.0、定性間伐=0.8）を乗じることとした。

(イ) ハーベスタ（木寄・造材作業）

ハーベスタによる木寄・造材作業の工程は、林野庁が調査した工程を基礎として、平均胸高直径と仮土場までの移動距離から作業工程を算出し、そこに補正係数を乗じることとした。

- ・ 林地傾斜による補正係数：0～10° =1.00、11～20° =1.07、21～25° =1.17、26° 以上=1.30
- ・ 伐採方法による補正係数：列状間伐=0.875、定性間伐=0.7
- ・ 作業種ごとの補正係数：木寄・造材作業=0.95

オ 造材作業

(ア) プロセッサ

プロセッサによる造材作業の工程は、林野庁が実施した「平成16年度立木評価に係る伐出作業標準係数調査事業報告書」によって算出した。

(イ) ハーベスタ（造材作業）

ハーベスタによる造材作業の工程は、林野庁が調査した工程を基礎として、平均胸高直径から作業工程を算出し、そこに補正係数を乗じることとした。

- ・ 作業種ごとの補正係数：造材作業=0.85

カ 集材作業

フォワーダによる集材作業の工程は、林野庁が実施した「平成16年度立木評価に係る伐出作業標準係数調査事業報告書」を基礎として、林地傾斜によってカーブやスイッチバックが増減し走行速度に影響を与えることから、林地傾斜による補正係数（0～15° =1.0、16～25° =0.9、26° 以上=0.7）を移動時間に乗じて算出することとした。

(2) 作業システムの最適化

作業システムを最適化するためには、機械ごとの生産性の差をなくしつつ機械の性能を最大限発揮させる必要がある。例えば、グラップルで木寄して、プロセッサで造材する場合、グラップル木寄作業の1日当たりの生産性が60m³、プロセッサ造材作業の1日当たりの生産性が80m³とすると、プロセッサは80m³以上の材が木寄されていなければ性能を十分に発揮できないため、グラップルが2日稼働して120m³の材を木寄した翌日以降にプロセッサ造材が始まることになる。本プログラムでは、このような計算を各工程で行い作業日程を最適化することとした。

(3) シミュレーション結果の出力

シミュレーション結果の出力は図-4のとおりである。

画面上段には作業種ごとの作業開始・終了日・作業日数と生産性、中段にはガント

チャートによる日程表、下段には作業員の配置を表示し、日程表の緑色が作業日、空白は作業休止日である。

なお、上段の表の中の開始日調整の数値を変えることで日程を任意に調整することが可能となっており、図-4（調整後）では、グループでの木寄作業を8日目以降に行うこととして調整を行った。

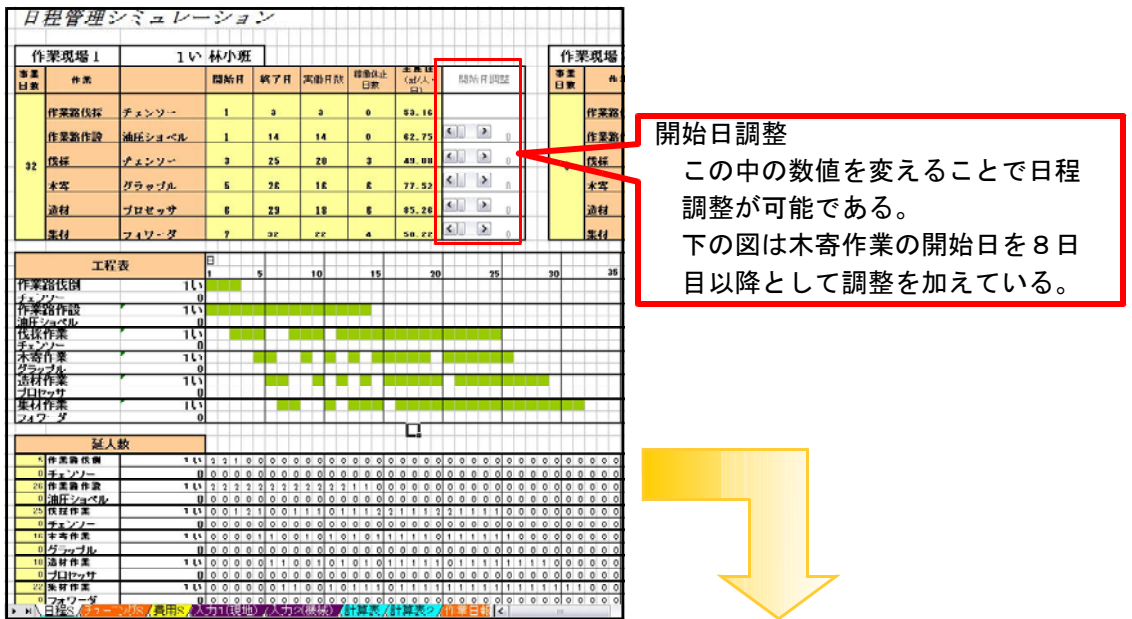


図-4 日程管理シミュレーションの出力画面（調整前）



図-4 日程管理シミュレーションの出力画面（調整後）

4 チューニングシミュレーション

チューニングシミュレーションは、日々の作業結果を反映して、作業日程を最適に調整するとともに、任意に作業員と機械の配置を調整することによる作業日程の変更をシミュレートするものである。作業日報シートに日々の作業結果（各作業に携わった作業員数と実行数量）を入力すると自動的に計算処理し、調整後の作業日程が出力される。

チューニングシミュレーションの入力の流れとシミュレーション結果の出力は以下のとおりである。

チューニングシミュレーションの出力画面
(事業着手前)

The screenshot shows a software interface for simulation. At the top, it displays '作業現場 1' (Work Site 1) and '1い 林小班' (1st Forest Class) with a productivity of 8.04 m³/人・日. Below this is a Gantt chart showing the schedule for various tasks: 作業路伐採 (Road cutting), 作業路作設 (Road construction), 伐採 (Cutting), 水害 (Water damage), 造材 (Log production), and 集材 (Log collection). At the bottom, there is a table for '延人数' (Total number of workers) for each task, showing the number of workers assigned over time.

※事業着手段階では、日程管理シミュレーションと同じシミュレーションである。



作業日報 (5日目まで)

日々の作業結果
を入力する。

日	区域 1		1い 林小班		チェンソー	グラップル	ハーベスタ	プロセッサ	フォワーダ
	作業路伐採		作業路作設						
	人数	本	人数	m					
1	2	250	2	180					
2	2	250	2	170					
3	1	130	2	150	1	50			
4			2	140	2	90			
5			2	80	2	100			
6									
7									
8									
9									
10									
11									
12									
13									
14									
15									
16									
17									

チューニングシミュレーションの出力画面
(5日目まで)

作業現場1		1い 林小班				生産性 8.12 m ³ /人・日		作業現場2	
作業日数	作業	開始日	終了日	実績日数	稼働停止日数	生産性	作業日数	作業	
5	作業路伐採	チェンソー	1	3	3	0	49.92	m ³ /人・日	作業路伐採
6	作業路作設	油圧ショベル	1	15	15	0	64.00	m ³ /人・日	作業路作設
7	伐採	チェンソー	3	29	17	5	46.85	m ³ /人・日	伐採
8	木立	グラップル	9	26	16	2	75.00	m ³ /人・日	木立
9	造材	プロセッサ	10	20	10	1	60.45	m ³ /人・日	造材
10	集材	フォワーダ	11	32	22	0	49.48	m ³ /人・日	集材

工程表		日	1	5	10	15	20	25	30	35
14	作業路伐採	1い	■	■	■					
15	チェンソー	0								
16	作業路作設	1い	■	■	■	■	■	■	■	■
17	油圧ショベル	0								
18	伐採作業	1い	■	■	■	■	■	■	■	■
19	チェンソー	0								
20	木立作業	1い	■	■	■	■	■	■	■	■
21	グラップル	0								
22	造材作業	1い	■	■	■	■	■	■	■	■
23	プロセッサ	0								
24	集材作業	1い	■	■	■	■	■	■	■	■
25	フォワーダ	0								

※作業結果が反映されて日程表が赤く表示されると同時に緑色で表示されている日程の6日目以降についても調整されて出力する。



作業日報 (10日目まで)

日	区域1 1い 林小班													
	作業路伐採		作業路作設		チェンソー		グラップル		ハーベスタ		プロセッサ		フォワーダ	
	人数	本	人数	m	人数	m ³	人数	m ³	人数	m ³	人数	m ³	人数	m ³
1	2	250	2	160										
2	2	250	2	170										
3	1	130			1	50								
4			2	140	2	90								
5			2	30	2	100								
6			1	40	2	100								
7			1	30	2	90								
8			1	60	1	50	1	90						
9			1	40	1	50	1	75						
10			1	60	1	30					1	80		

作業システムに変更があった場合は、そのまま入力する
変更点
・作業員1名が6～10日まで休み
・油圧ショベル1台が故障
・グラップルが8日目から稼働



チューニングシミュレーションの出力画面
(10日目まで)

作業現場1		1い 林小班				生産性 7.97 m ³ /人・日		作業現場2	
作業日数	作業	開始日	終了日	実績日数	稼働停止日数	生産性	作業日数	作業	
5	作業路伐採	チェンソー	1	3	3	0	48.82	m ³ /人・日	作業路伐採
6	作業路作設	油圧ショベル	1	12	12	0	61.54	m ³ /人・日	作業路作設
7	伐採	チェンソー	3	27	19	5	46.20	m ³ /人・日	伐採
8	木立	グラップル	8	28	16	5	76.88	m ³ /人・日	木立
9	造材	プロセッサ	10	20	10	3	60.45	m ³ /人・日	造材
10	集材	フォワーダ	11	32	22	1	49.48	m ³ /人・日	集材

工程表		日	1	5	10	15	20	25	30	35
14	作業路伐採	1い	■	■	■					
15	チェンソー	0								
16	作業路作設	1い	■	■	■	■	■	■	■	■
17	油圧ショベル	0								
18	伐採作業	1い	■	■	■	■	■	■	■	■
19	チェンソー	0								
20	木立作業	1い	■	■	■	■	■	■	■	■
21	グラップル	0								
22	造材作業	1い	■	■	■	■	■	■	■	■
23	プロセッサ	0								
24	集材作業	1い	■	■	■	■	■	■	■	■
25	フォワーダ	0								

※作業日報の情報をそのまま反映し日程を調整する。日程管理シミュレーションと見比べながら事業の進行管理を行うことができる。

5 費用シミュレーション

費用シミュレーションは、日程管理シミュレーションまたはチューニングシミュレーションによって算出された延べ作業員数や事業期間から、人件費や減価償却費等のコストをシミュレートするものである。

算出方法については、社団法人全国林業改良普及協会が発行している「機械化のマネジメント」による計算方法及び各種係数を用いて、機械購入経費、取得経過年数、取得時利率（%）、機械賃貸借料金（1日当たり）、作業員日当、機械運搬経費（1台当たり）、丸太価格（スギ・ヒノキ）を入力することによって計算する。

詳細は以下のとおりである。

(1) 固定費

ア 減価償却費

減価償却費は、 $\text{機械購入経費} \times \text{減価償却費率} / \text{年間稼働日数} \times \text{作業期間} \times \text{台数}$ によって算出する。

なお、取得経過年数が5年以上の場合は減価償却期間を過ぎていることから0となる。

イ 管理費

管理費は、 $\text{機械購入経費} \times \text{管理費率} / \text{年間稼働日数} \times \text{作業期間} \times \text{台数}$ によって算出する。

ウ 資本利子

資本利子は、 $\text{機械購入経費} \times \text{資本利子率} / \text{年間稼働日数} \times \text{作業期間} \times \text{台数}$ によって算出する。

資本利子率は、 $(\text{取得時利率} / 100 \times (1 + \text{取得時利率} / 100)^5 / (1 + \text{取得時利率} / 100)^5 - 1) / \text{耐用年数}$ によって算出する。

(2) 機械運搬

機械運搬は、 $1 \text{ 回当たり単価} \times \text{回数} \times \text{台数}$ によって算出する。

区域1と区域2間の距離が2km以下の場合、重機を自走して現場を移動する。

(3) 変動費

ア 保守・修理費

保守・修理費は、 $\text{保守・修理費率} \times \text{機械購入経費} / \text{年間稼働時間} \times 1 \text{ 日の作業時間} \times \text{作業日数}$ によって算出する。

イ 燃料・油脂費

燃料・油脂費は、 $\text{燃料・油脂単価} \times \text{値動き率} \times 1 \text{ 日の作業時間} \times \text{作業日数}$ によって算出する。

値動き率は、算出方法を引用した「機械化のマネジメント」の発刊時（2001年）と現在の価格差を補正するための係数である。ガソリン及び軽油の販売価格差を補正係数として用いている。

ウ 機械消耗品費

油圧ショベル及びザウルスロボの機械消耗品費は、林野庁九州森林管理局の調査結果による単価を用い、単価×作業日数によって算出する。

上記以外の機械消耗品費は機械消耗単価×材積によって算出する。

なお、フォワーダについては調査結果がないため計上していない。

(4) 人件費

人件費は、(日当+付帯人件費)×延作業員数によって算出する。

付帯人件費は賞与・退職手当・福利厚生費・労災保険等で構成され、日当×0.55によって算出する。

(5) 簡易施設費

簡易施設費は、車庫・休憩舎等の償却費であり、事業期間×単価によって算出する。

(6) シミュレーション結果の出力

費用シミュレーションは、日程管理シミュレーションまたはチューニングシミュレーションによって算出された述べ作業員数や事業期間から費用を算出するとともに、チューニングシミュレーションと連動して日々変化する作業日程に対応した費用を算出する(図-5)。

なお、参考として出力される損益計算に木材の運搬費は入っていない。

入力項目		計算結果	
項目	単価	数量	金額
油圧ショベル	15,000,000	1	15,000,000
ザウルスロボ	15,000,000	1	15,000,000
グラップル	15,000,000	1	15,000,000
ハーベスタ	15,000,000	1	15,000,000
プロセッサ	15,000,000	1	15,000,000
フォワーダ	15,000,000	1	15,000,000
チェンソー	15,000,000	1	15,000,000
簡易施設経費	42,919	1	42,919
作業員日当	20,000	1	20,000
労務費(ヒノキ)	14,000	1	14,000

項目	金額
労務費	3,472,000
賃借料	0
固定費	2,182,000
変動費	1,070,038
機械運搬費	250,000
簡易施設費	84,000
計	7,038,041

項目	金額
木材(組)	8,000
丸太	8,782,000
計	9,782,000

項目	金額
油圧ショベル	15,000,000
ザウルスロボ	15,000,000
グラップル	15,000,000
ハーベスタ	15,000,000
プロセッサ	15,000,000
フォワーダ	15,000,000
チェンソー	15,000,000
簡易施設経費	42,919
作業員日当	20,000
労務費(ヒノキ)	14,000

図-5 費用シミュレーションの入力及び出力画面

第2 研究結果

シミュレーションプログラムを構築したことにより以下のことがわかった。

- 1 日程管理シミュレーションにより作業日程の調整過程を可視化することで、作業手順がわかりやすくなり、日々の作業内容の把握が容易になった。
- 2 チューニングシミュレーションにより作業の進捗状況を管理することで、作業システムの中でどの工程が作業の進捗に影響を及ぼしているのかを客観的に捉えられるようになった。さらに、作業の遅れを取り戻すための対策を立て、事業を計画的に完了するための検討が容易になった。

第3 考察

生産請負事業への本プログラムの導入により期待される効果を以下のとおり考察した。

- 1 国有林野事業にとっては、請負事業体から提出された事業計画の妥当性を検証することや請負事業体との情報の対等な共有化が可能になり、事業の適切な進行管理をすることができる。また、森林整備事業や木材生産事業の間伐事業に係るコストの透明性が確保されることが期待できる。
- 2 また、請負事業体にとっても、事業着手段階で作業員と機械の最適な配置や、作業の進捗に応じた作業システムの最適化が容易となり、効率的・合理的な日程管理が可能となる。

以上のことから、より低コスト・高生産性で利益率の高い施業が期待できる。

第4 まとめ

本プログラムの導入により期待される効果を発揮させるためには、実際の現場の実状をプログラムに反映し、シミュレーションの精度を高める必要がある。そのためには現場の作業データを収集、分析していくことが不可欠である。

また、これらによって蓄積されたデータを開示することで事業の透明性を確保し、木材生産事業に改革を促すことが期待される。

最後に、本研究を進めるにあたりご指導いただいた皆様にこの場を借りて、深く感謝申し上げます。

参考文献

1 研究発表集

- (1) 石塚紀子(2008)「高性能林業機械による作業システムの工程最適化に関する考察」、養成研修専攻科48期 課題研究成果報告書

2 行政機関の調査報告書等

- (1) 林野庁「平成19年度 国有林間伐推進コンクール」
- (2) 林野庁「平成15年度 立木評価に係る伐出作業標準係数調査事業報告書」
- (3) 林野庁「平成16年度 立木評価に係る伐出作業標準係数調査事業報告書」
- (4) 日本林業技士会「平成19年度 低コスト作業システム構築事業報告書」

3 書籍

- (1) 社団法人 全国林業改良普及協会(2001)「機械化のマネジメント」