

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

No. 1 石塚 紀子

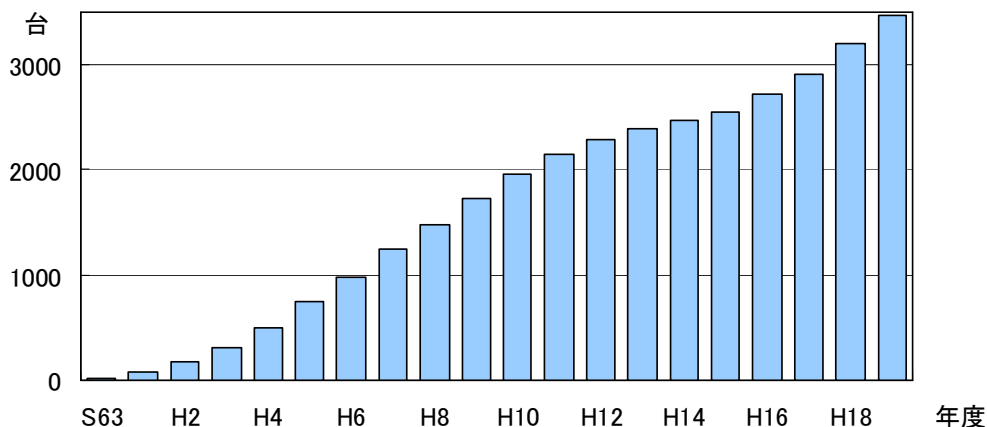
はじめに

森林の保全・整備推進のため路網と高性能林業機械を組み合わせた低コスト・高効率な作業システムの普及が重要である。しかし、高性能林業機械を用いた作業システムでは、各機械の作業能力の違いから手待ち時間が生じ、これが作業システム全体の生産性低下に繋がっている。国有林でも今後このような作業システムに対応していく必要があり、この問題の解決に資するよう、予め各作業の日程を予測し調整するための簡易なシミュレーションを身近なソフトウェアである Excel で作成し、高性能林業機械を用いた作業システムについて考察を行った。

第 1 現状

1 高性能林業機械の普及状況

高性能林業機械の保有台数は増加しているものの、機械の稼働率は低く、素材生産量に占める高性能林業機械を使用した生産量の割合は3割程度である（図－1）、（表－1）。



図－1 高性能林業機械の保有台数 林野庁 HP※国有林野事業で所有するものは除く

表－1 素材生産量に占める高性能林業機械を使用した生産量の割合

平成 12 年	平成 13 年	平成 14 年	平成 15 年	平成 16 年
19.3	20.9	25.4	26.0	29.7

(%)

林野庁 HP※全国の素材生産量に対する素材生産工程に高性能林業機械を一機種以上用いた生産量の割合

高性能林業機械の稼働率が低い要因の一つとして、作業システムの工程間の受け渡しに問題がある。前の作業が遅く、後の作業に手待ち時間が生じる、など工程間の作業速度の差が全体の生産性を下げているのである。

2 作業システムの研究

(1) 作業システムのモデル化

システムダイナミックス手法を用いて、素材生産作業システムのモデル化を行い、作業低コスト化のポイントについて明らかにした研究が行われている。

システムダイナミックスとは図式でモデルの要素間因果関係を記して、ソフトウェアにより数値シミュレーションモデルを自動生成するものである。

システムダイナミックスによる作業システムのモデル化は高い精度で工程を推定可能であるが、そのためには各要素を正確に推定し、現地での条件・進行状況に併せて調整が必要となる。

(2) 伐出作業標準工期の調査

森林国営保険の立木評価に用いる因子として、高性能林業機械による伐出作業システムの標準工期が調査研究されている。

これは、作業システムの機械ごとの生産性を明らかにするためのデータ収集、分析を行い標準係数を作成したものである。

第2 研究方法・結果

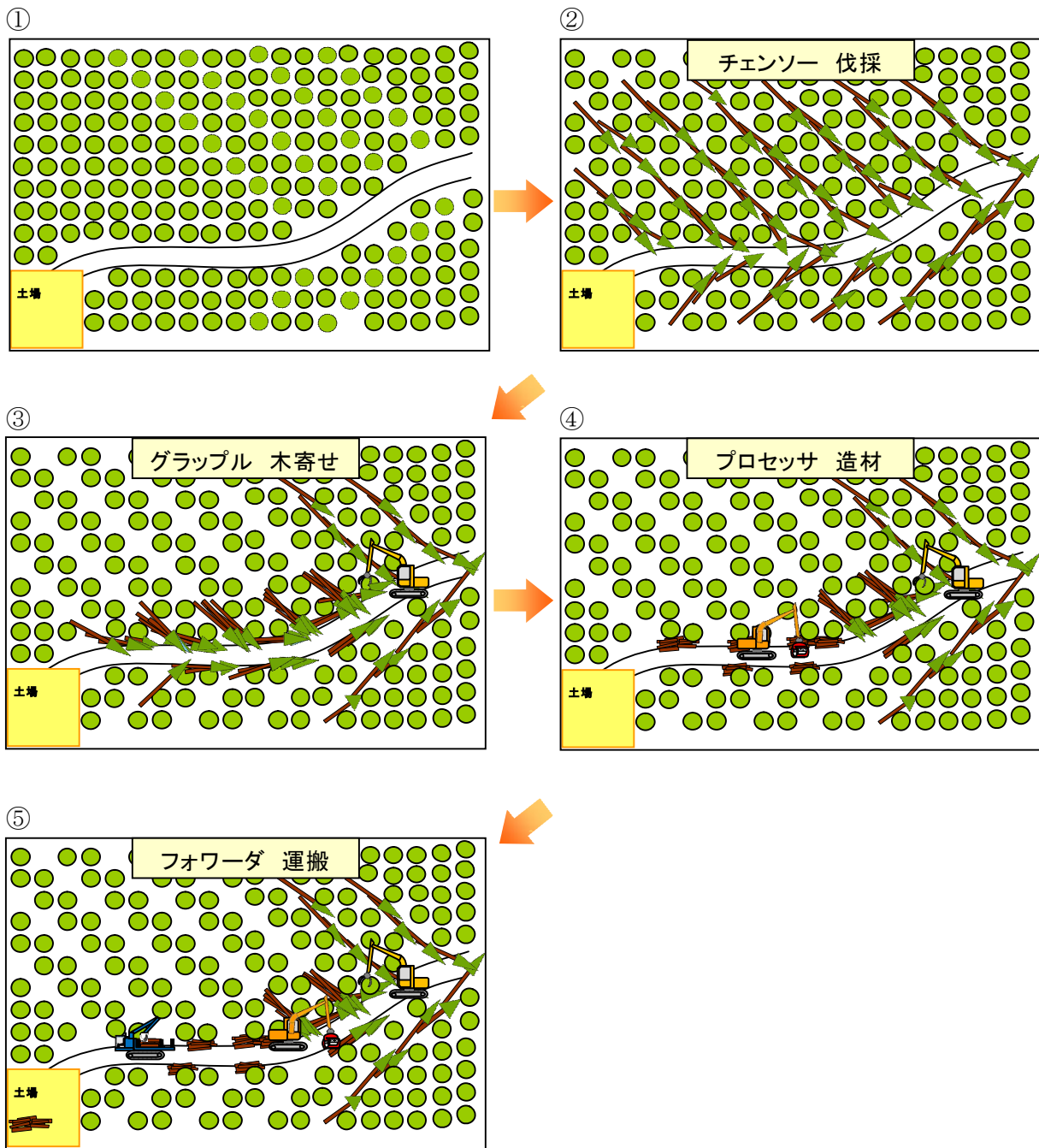
1 シミュレーションに用いた施業方法と条件

- ・列状間伐
- ・全木で木寄せ
- ・範囲は伐採箇所から山土場
- ・既設作業路を使用
- ・機械の稼働時間は1日6時間

2 シミュレーションに用いた作業システム

現在日本で10 m³/人・日程度、又はそれ以上の生産性を確保している事業者の多くが採用している以下の作業システムを用いることにした。

- ・チェーンソーによる伐採(図-2②)。
- ・グラップルにより伐採された箇所から作業路まで、ウインチを使用せず直接木寄せ(図-2③)。
- ・プロセッサにより作業路上で枝払い・玉切り、集積を行う(図-2④)
- ・フォワーダによりグラップルクレーン付きフォワーダで作業路沿いに集積された丸太を山土場まで運搬し、下ろす(図-2⑤)



図ー 2 シミュレーションに用いた作業システム

3 作業時間を規定している因子の選定

先行研究を参考に標準的な係数を選定し生産性を算出した。標準的な係数がないものについては他の機械のものや条件が限定されているものを応用した。

標準的な係数は作業時間に影響する事業地や機械の因子から一本当たりの処理時間を算出し、一日当たりの生産性に反映するものである。

グラップル 木寄せ					
生産性	6.00124 m ³ /時		6 t	走行距離 /	5 m
	$3600 \cdot \omega / T$				
サイクルタイム T	101.98 秒/回	単木材積 ω	0.17 cm	伐区内全作業路距離 l_0	790 m
	$T_1+T_2+T_3+T_4+T_5$	伐木本数	5,400 本	平均木寄せ距離	15 m
<hr/>					
旋回時間		走行時間		荷掴み時間	
T_1	8.50 秒	T_2	17.75 秒	T_3	6.73 秒
	$t_{1,1}+t_{1,2}=(1/v_{1,1}+1/v_{1,2})$		$t_{2,1}+t_{2,2}+t_{2,3}$		$= a_{3,1}e^{b_{3,1}\omega}$
$t_{1,1}$	空旋回 3.8 秒	$t_{2,1}$	空走行 8.47458 秒		$a_{3,1} = 6.64$
	$= r/v_{1,1}$		$= l/v_{2,1}$		$b_{3,1} = 0.063$
$v_{1,1}$	空旋回速度 23.8 deg/秒	$v_{2,1}$	空走行速度 0.59 m/秒		$b_{3,1} \cdot \omega = 0.01411$
$t_{1,2}$	実旋回 4.7 秒	$t_{2,2}$	実走行 8.77512 秒		
	$= r/v_{1,2}$		$= l/v_{2,2}$		
$v_{1,2}$	実旋回速度 19.0781 deg/秒	$v_{2,2}$	実走行速度 0.57 m/秒	遅延時間	T_4 15.1 秒
	$= a_{1,2}e^{b_{1,2}\omega}$		$= a_{2,2}e^{b_{2,2}\omega}$		
	$a_{1,2} = 22.27$		$a_{2,2} = 0.59$		
	$b_{1,2} = -0.91$		$b_{2,2} = -0.206$		
	$b_{1,2} \cdot \omega = -0.1547$		$b_{2,2} \cdot \omega = -0.0349$		
旋回角度 r	90°	$t_{2,3}$	0.49591965 秒	引き寄せ時間	T_5 53.9 秒
(木寄せ一本当りの旋回角度)			$= l_{02,1}/v_{2,1}$		$y = 1.06a + 38$
			$l_{02,1}$		
			=作業路往復距離/伐木本数		

図－４ 木寄せの生産性計算シート

※緑色の欄は係数

(3) プロセッサ造材時間

プロセッサの造材時間は、旋回時間、荷掴み時間、送材時間、玉切り時間、枝条整理時間、走行時間の合計からなる（図－５）。

旋回時間は旋回角度・単木材積、荷掴み時間は荷掴みとセット時間からなり単木材積の影響を受ける。送材時間は材送り時間と枝払い時間からなり樹種・樹冠長率・樹高・胸高直径の影響を受ける。玉切り時間は鋸断時間・位置決め時間からなり平均玉切り長・樹高・胸高直径、走行時間は走行距離の影響を受ける。

旋回角度はグラップルと同様に90°とし、走行距離は作業路の往復距離とした。

プロセッサ造材 生産性 $3600 \times \omega / T$	6.8 m ³ /時	樹種	スギ	樹高 L	17 m	平均玉切り長 Lc	4 m	伐木本数	5,400 本
サイクルタイム T $T_1+T_2+T_3+T_4+T_5+T_6$	90.56 秒/回	樹冠長率 b	30 %	胸高直径 D	16 cm	単木材積 ω	0.17 cm	伐区内全作業路距離 L _g	790 m

旋回時間 T ₁	11.59 秒	荷揚げ時間 T ₃	18.9 秒	送材時間 T ₄	19.5 秒	玉切り時間 T ₅	27.6 秒	枝条整理時間 T ₆	12.5 秒
$t_{1,1}+t_{1,2}=(1/v_{1,1}+1/v_{1,2})$		$t_{3,1}+t_{3,2}$		$t_{4,1}+t_{4,2}=L/v_{4,1}+L/L_c(a_{4,2}D^{b_{4,2}}+a_{4,3})$		$t_{5,1}+t_{5,2}$			
t _{1,1} 空旋回	5.4 秒	t _{3,1} 荷揚げ時間	11.89 秒	t _{4,1} 材送り時間	11.6 秒	t _{5,1} 鋸斯時間	2826816 秒		
$\omega/v_{1,1}$		$= a_{3,1}e^{b_{3,1}\omega}$		$= L(1-b)/v_{4,1}$		$= a_{5,1}D^{b_{5,1}}(intL/L_c)$			
v _{1,1} 空旋回速度	16.6 deg/秒	a _{3,1}	11.00	v _{4,1}	1.03 m/s	a _{5,1}	0.012		
		b _{3,1}	0.46			b _{5,1}	1.47		
t _{1,2} 実旋回	6.2 秒	b _{3,2} (ω)	0.0782	t _{4,2} 枝払い時間	8.0 秒	D ^{b_{5,1}}	58.9		
$\omega/v_{1,2}$		t _{3,2} セット時間	7.0 秒	$= L*b/v_{4,2}$		v _{2,1} 空走行速度	0.69 m/秒		
v _{1,2} 実旋回速度	14.6 deg/秒			v _{4,2}	0.640034	a _{4,2} e ^{b_{4,2}D}			
$= a_{1,2}e^{b_{1,2}\omega}$				a _{4,2}	1.84	t _{5,2} 位置決め時間	24.8 秒		
a _{1,2}	16.6			b _{4,2}	-0.066	$= a_{5,2}(intL/L_c)$			
b _{1,2}	-0.76			b _{4,2} *D	-1.056	a _{5,2}	6.2		
b _{1,2} (ω)	-0.1292								
旋回角度 r	90°								
(造材→本当りの旋回角度)									

図－5 造材の生産性計算シート

※緑色の欄は係数

(4) フォワーダ運搬時間

フォワーダの運搬時間は走行時間と積込み・荷下ろし時間からなるものとした(図－6)。

走行時間は平均運搬距離と空荷時走行速度・積載時走行速度の影響を受ける。積込み・荷下ろし時間は積載量の影響を受ける。

フォワーダ運搬 生産性 $3600 \times V_f / C_y$	6.25 m ³ /時	空荷時走行速度 v ₁	4 km/時	伐区内平均作業路距離 L ₁	50 m
サイクルタイム C _y A+T ₁	2881.20 秒/回	積載時走行速度 v ₂	2 km/時	伐区外作業路距離 L ₀	0 m
		積載量 VF	5 m ³		

走行時間 T ₁	135.00 秒	積込み・荷下ろし時間 A	2746.2 秒
$L(1/v_{1,1}+1/v_{2,1})$		$t_{1,1}+t_{1,2}+t_{1,3}+t_{1,4}$	
L 平均運搬距離	50.00 m	t _{1,1} 積込み等準備時間	270.00 秒
$= L_1+L_0$		t _{1,2} 積込み時間	1268.4 秒
v ₁	1.111111 m/秒	$= (a_1 \times V_f + b_1) \times 60$	
v ₂	0.555556 m/秒	a ₁	2.32
		b ₁	9.54
		t _{1,3} 荷下ろし等準備時間	390.00 秒
		t _{1,4} 荷下ろし時間	817.8 秒
		$= (a_2 \times V_f + b_2) \times 60$	
		a ₂	1.34
		b ₂	6.93

図－6 運搬の生産性計算シート

※緑色の欄は係数

4 Excel の設定条件

参考書を参考に Microsoft Office Excel 2003 によるシミュレーションを作成した。

シミュレーション作成に当たっての要点は、作業員と機械両方に待ち時間が生じている手待ち時間のうち作業員の手待ち時間を無くすことである。このため、先行する作業に追いついたときは十分な材が供給されるまでの間、作業員は別の作業に移る設定とした。

工程計算では以下の条件を設定した。

- ・シミュレーションの時間単位は 1 日単位
- ・各作業に要する日数は間伐材積を各機械の 1 日の生産性で除した数
- ・機械の台数はチェーンソーには制限を設定せず、グラップル・プロセッサは各一台、フォワーダは 1 台又は 2 台を選択
- ・主に I F 関数を用いて「先行作業が始まり、次の作業の 1 日分の処理量が貯まってから次の作業を開始する。1 日分の処理量が無くなったら、他の作業に移る又は作業しない。」等の条件を設定
- ・歩留まりは造材工程で差し引く
- ・計算出力範囲は 200 日以内の事業日数

表-2 の工程計算表は、上記条件のもとで 200 m³ の材を生産する場合の例である。ここでは、作業員 4 人でチェーンソー以外の機械は各一台とし、各作業の生産性はチェーンソー 18 m³/人・日、グラップル 48 m³/人・日、プロセッサ 72 m³/人・日、フォワーダ 24 m³/人・日で、歩留まりは 70% とした。

表-2 工程計算表

日	チェーンソー				グラップル				プロセッサ				フォワーダ			延べ人数	
	人数	処理材積	処理累計	次工程材積	人数	処理材積	処理累計	次工程材積	人数	処理材積	歩留り材積	処理累計	次工程材積	人数	処理材積		終了材積
1	4	72	72	72													4
2	3	54	126	78	1	48	48	48									4
3	3	54	180	84	1	48	96	96									4
4	2	20	200	56	1	48	144	72	1	72	50	50.4	50				4
5				8	1	48	192	48	1	72	50	100.8	77	1	24	24	3
6				0	1	8	200	56	0	0		100.8	53	1	24	48	2
7								0	1	56	39	140	68	1	24	72	2
8													44	1	24	96	1
9													20	1	24	120	1
10													0	1	20	140	1
11																	0
12																	0

※処理材積は一日の作業が終わった時点での作業量

※次工程材積は処理した材積から次の工程の材積を除した材積

5 シミュレーションの構成

事業地・機械のデータ及び人数を入力値とし、上記方法により作業員に手待ち時間が生じない条件で各作業の開始日、全体の日数、各作業の人数を出力するように設計した。

(1) 入力値

入力シート（図－7）の黄色の欄にシミュレーションをする事業地・機械・人数の条件を入力する。緑色の欄は自動計算される値である。

入力要素について注意すべき点を以下に述べる。

(ア) 事業地の条件

- ・伐採区域と土場が離れている場合は伐区外作業路距離に入力する。
- ・平均木寄せ距離は伐根から作業路までの木を引き寄せる距離の平均とする。
- ・樹種はスギ・ヒノキのどちらかを選択する。

(イ) 作業班人数

- ・人数は2人から20人の範囲とする。

(ウ) 間伐計画

- ・歩留まりは立木から造材後に残る材積割合とする。
- ・平均玉切り長は2・3・4・6mのいずれかを選択する。
- ・伐採列間距離は伐採列幅の中心から次の伐採列幅の中心までの距離とする。

(エ) 機械について

- ・グラップル重量は4tと6tどちらかを選択する。
- ・フォワーダの積載量は積載歩留まりを含む実際に積載する材積とする。
- ・フォワーダの空荷時・積載時走行速度は傾斜や路面の状態に合わせた速度を入力する。

事業地		作業班人数	4人	グラップル 1台	6t		
面積	9 ha	間伐計画		走行距離	5m <small>(引き寄せるときの一本当りの走行距離)</small>		
傾斜	16°			伐採率	30%	プロセッサ 1台	
伐区内平均作業路距離	50m				5,400本 908.6 m ³	フォワーダ	
伐区内全作業路距離	790m			歩留まり	70%	積載量	5 m ³ <small>(積載歩留まり含む)</small>
伐区外作業路距離 <small>(伐採区域と土場が離れている場合)</small>	m				636.0 m ³	空荷時走行速度	4 km/時
平均木寄せ距離 <small>(伐根から作業路までの距離)</small>	15m			平均玉切り長	4m	積載時走行速度	2 km/時
樹種	スギ			列状間伐 伐採列間距離	7.2m	フォワーダ2台あるとき	
ha当たり						積載量	m ³
立木本数	2,000本					<small>(積載歩留まり含む)</small>	
材積	336.52 m ³					空荷時走行速度	km/時
事業地全体				積載時走行速度	km/時		
	18,000本 3,029 m ³						
単木平均							
平均樹高	17m	単木材積	0.17 m ³				
平均胸高直径	16cm	樹冠長率	30% <small>(樹高に対する樹幹冠の割合)</small>				

図－7 事業地条件等の入力シート

(2) 作業日程の出力

作業日程の出力シートでは事業日数、各作業の開始日と各作業の人数を表示する(図-8)。

図-8の上部の表は全体の作業期間である事業日数、グラップル木寄せ作業の開始日、プロセッサ造材の開始日、フォワーダ運搬の開始日、機械が稼働する実働日数、機械が稼働しない稼働休止日数、実働日数と稼働休止日を合わせた作業期間の最終日が終了日として表示される。なお、開始日調整の欄は作業開始日を遅らせるときに入力する。

中央の表は作業がある日を緑色で示した工程表である。工程表のなかで間隔が空いている部分は機械が稼働しない日である。

下部の表は延人数と一日ごとの各作業の人数である。

事業日数		開始日	終了日	実働日数	稼働休止日数	生産性 (m/人・日)	開始日調整
30	チェンソー		22	22	0	24	
	グラップル	2	27	26	0	36	<< >> 2
	プロセッサ	4	28	23	2	40.8	<< >> 3
	フォワーダ	6	30	18	7	37.2	<< >> 4
	フォワーダ2	0	0	0	0	0	<< >> 4

工程表	日	1	5	10	15	20	25	30	35
チェンソー		■	■	■	■	■	■	■	■
グラップル		■	■	■	■	■	■	■	■
プロセッサ			■	■	■	■	■	■	■
フォワーダ				■	■	■	■	■	■
フォワーダ2									

延人数		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35		
38	チェンソー	4	3	3	2	2	1	1	1	1	2	1	2	2	1	1	1	2	1	2	2	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
26	グラップル	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	
23	プロセッサ	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	
18	フォワーダ	0	0	0	0	0	1	1	1	0	1	1	0	1	1	1	1	0	1	1	0	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	
0	フォワーダ2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
105	計	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	3	2	3	3	3	1	1	1	0

図-8 作業日程の出力シート
作業日数(上表)、工程表(中表)、作業別人数(下表)

第3考察

1 シミュレーションの評価

作成したシミュレーションは比較する実例が得られなかったため、工程の最適の有無は判断できないが、生産性は先行研究から選定した標準的な係数を使用しているため工程についても大きな差はないと思われる。

2 最適な作業工程

シミュレーションでは、手待ち時間が生じないよう他の作業に移る設定としたため、作業員に手待ち時間はなくなるが、条件を変えてシミュレーションを繰り返したところ、結果として稼働しない機械が出ることもある。

プロセッサのような高価な機械は、投資効果を上げるために稼働率を上げなければならぬ。しかし、人数と作業開始日を調整し、稼働しない日を減らすことは出来るが、日によって人数の大幅な変動が起こる場合や全体の事業日数が延びる可能性がある。

機械が稼働しない日の短縮と事業日数の短縮は両立できない場合があることから事業者がシミュレーションを使用する場合には、どちらを優先させるか機械の状況や人数に合わせコストを比較し決定していくことになる。

3 国有林の製品生産請負事業への応用について考察

国有林では製品生産請負事業の実施にあたり、請負事業者が提出した事業計画で作業日程を提示することが製品生産請負契約書 第3条に定められている。国有林の監督者はその事業計画書が適切であるか確認を行うこととなっており、その際にシミュレーションを活用していくことができる。

まとめ

高性能林業機械を用いた作業システムを推進するためには、発注者と受注者が各作業の手待ち時間を意識した工程管理を行うことが重要である。作成したシミュレーションは Excel を使い、機械と場所の条件を簡易なものとした。今後、地域・作業システムに合わせて発展させていくことでより実用的になり、コストの算出にも応用していくことができる。

そのためには、生産性に結びつく係数が不足しているので情報を収集していくことと、シミュレーションを人の動きや機械の複雑な組み合わせに対応させていくことが課題である。

最後にこの研究は元帝京大学講師小田幸世先生、関係機関の皆様からご指導を頂いた。深く感謝申し上げます。

参考文献

- 1 林野庁「平成18年度 低コスト素材生産作業システムに関する研究報告書（低コスト生産作業システムのモデル化と適用の可能性 仁多見俊夫 東京大学大学院農学生命科学研究科）」
- 2 林野庁（2008）「業務参考資料 低コスト作業システムへの取組と考え方第2版」
- 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 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」
- 5 林野庁「平成9年度高性能林業機械による最適システム開発に関する調査」
- 6 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 事業報告書」
- 7 林野庁（2008）「製品生産請負契約書」
- 8 林野庁（2008）「製品生産事業請負標準仕様書」
- 9 荒木勉・栗原和夫（2007）「Excel で学ぶ経営学入門シリーズIV シミュレーション」、実教出版
- 10 C & R 研究所（2000）「ステップ図解 Excel2000 関数ウラ技テクニック」、ナツメ社