

タワーヤード・プロセッサ・フォワーダ形集運材作業 システムのシミュレーションによる検討

櫻井 倫*・岩岡正博**・酒井秀夫*・小林洋司*

Studies on Yarding and Hauling System of Mobile-yarder, Processor, and Forwarder with Simulation Methods

Rin SAKURAI*, Masahiro IWAOKA**, Hideo SAKAI* and Hiroshi KOBAYASHI*

1. はじめに

林道から離れた伐区を対象にタワーヤード集材を行う際、伐区近くまで道路を開設する場合がある。この時開設する道路は林道あるいは作業道など選択肢が幾つかあるが、その一つにトラックの進入が不可能な、一時的な集材路がある。この場合、タワーヤードの最大到達距離の範囲内で道路の作設延長距離を比較的自由に計画することができる。

本論文では、タワーヤードで集材し、プロセッサで造材、集材路上をフォワーダで林道まで運材する作業システムを想定し、シミュレーションモデルを構築して作業コストを予測し、集材路の適切な作設延長距離について考察を行った。

集材作業システムに関するシミュレーションを用いた研究としては、小林らのトラッククレーンに関する研究⁵⁾をはじめ多くの研究がある^{15, 18)}。しかし、これまでの研究は単独の機械についてシミュレーションを行ったものが多く、複数の機械を用いたものは少い。本研究では、複数の機械の動作の可否を作業人数によりコントロールすることで作業チーム全体のシミュレーションを行い、作業人数の違いによる集材路の適正作設延長距離について検討を行った。

2. シミュレーションモデルの構築

1) シミュレーションモデルの概要

本研究では、図-1 に示すタワーヤード・プロセッサ・フォワーダを用いた作業システムを想定した。

シミュレーションモデルは、タワーヤード、プロセッサ、フォワーダについて、それぞれの作業をモデル化し、各モデル間は条件変数を用いて結合した。パラメータおよび条件変数としては表-1 に示すものを用意した。

各作業は従来の研究と同様、要素作業の組合わせによって表現した。観測された作業時間の分布から理論式を求め、乱数を理論式に代入することにより作業時間を推定するものとした。作業

* 東京大学大学院農学生命科学研究科森林科学専攻

Department of Forest science, Graduate school of Agricultural and Life Sciences, The University of Tokyo.

** 東京農工大学農学部地域生態システム学科

Department of Regional Ecosystem, Faculty of Agriculture, Tokyo University of Agriculture and Technology.

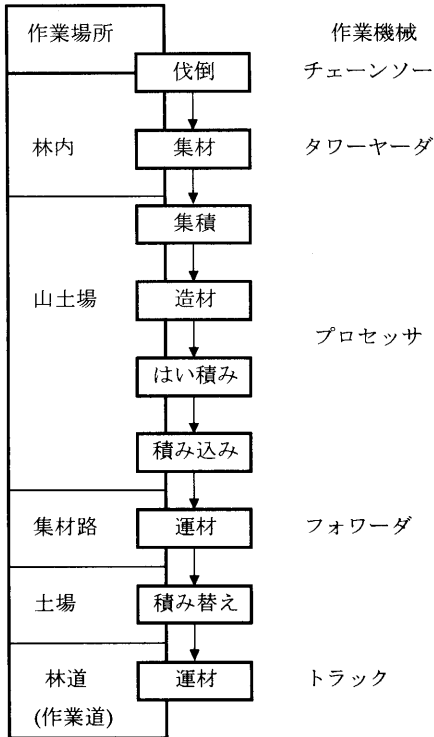


図-1 想定する作業システム

Fig. 1. Flow chart of operation system for simulation.

時間の理論式は、米田らの指摘¹⁷⁾のとおり、対数正規分布に従うものとして近似した。なお、適合度の χ^2 検定により5%有意で適合性が棄却された場合には、1次または2次の回帰式を求めた。

また各作業間の同期は、時刻により表現した。条件変数の一つとして「現在時刻」を定め、各作業ごとに「現在行っている要素作業が終了する時刻」を記録しておき、現在時刻が要素作業の終了時刻になったら、次の要素作業に移るものとした。なお、「待機状態」に入った場合は1秒ごとに次の要素作業に移ることができるかどうかを照会した。待機中の経過時間はその機械の稼働時間としては計上せず、エンジンを切った状態であると見なした。

作業のシミュレーション終了後、各機械の稼働時間および全作業時間、作業工程、コストを計算した。

作業班の人数として2人~4人を想定し、作業人数による機械の稼働・休止の変化を図-2のように設定した。

2) タワーヤーダ集材作業のモデル化

低規格の集材路に進入可能な小型タワーヤーダのモデルとして、RME-200T (O社製)の既往の作業時間観測データを用いることにした^{1,4,7)}。作業時間

分布が明らかな要素作業に関しては、作業時間を求める確率密度関数を計算した。搬器の走行時間および横取り、巻き上げ時間に関しては距離を説明変数とした回帰式が求められているので、それを適用した。その他の要素作業時間については、1サイクルあたりの平均作業時間を用いた。

要素作業の構成および流れは図-3に示すとおりである。なお、トラブルなどのその他の作業については発生回数と観測された全要素作業数から発生確率を求め、一つの要素作業が終了するごとに発生するかどうかを判定した。

表-2は実際に観測された作業時間の分布から求めた理論式である。これらの理論式から推定される作業時間分布と観測された作業時間分布について検証した。一例として荷掛け作業について図-4に示した。

サイクルの流れは、はじめに集材の対象となる伐倒木の位置を乱数により決定し、「荷掛け」作業終了時に「伐倒木」から1を減じ、「荷外し」作業終了時に「集材木」に1を加える。1サイクル終了時に「伐倒木」が1以上残っていれば次のサイクルへ移り、0ならばタワーヤーダ集材作業は終了とした。

3) プロセッサ造材作業のモデル化

プロセッサ造材作業は、RN-45プロセッサ(N社製)と、KP-40プロセッサ(S社製)について

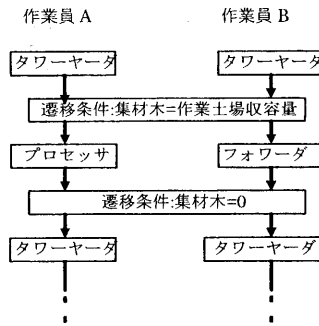
表-1 シミュレーションに用いたパラメータおよび条件変数
Table 1. Parameters and condition variables used in simulation

項 目	単 位	説 明
現在時刻	秒	作業開始からの経過時刻
伐区奥行	m	
伐区幅	m	
伐倒木密度	本/ha	集材の対象となる伐倒木の密度
作業人数	人	
林道と伐区の距離	m	
タワーヤード集材距離	m	タワーヤードのスパン長
集材路作設延長	m	
作業土場収容量 (集材木)	本	作業土場に収容できる集材された材の数
作業土場収容量 (玉切材)	玉	作業土場に収容できる造材された材の数
伐倒木	本	伐区内に残っている集材対象となる伐倒木の数
集材木	本	タワーヤードにより集材され、作業土場にある材の数
搬器動距離	m	タワーヤード元柱から搬器までの距離 搬器は伐倒木に最も近くなる位置に置く
横取り距離	m	搬器から集材する伐倒木までの横取り距離
材長	m	集材木 1 本 1 本の樹高
材径	cm	集材木 1 本 1 本の元口径
採材長	m	プロセッサで 1 玉を採材する長さ
処理済材	玉	プロセッサで造材された、作業土場にある玉材の数
材積	m ³	処理済材 1 本 1 本の材積
荷台材数	本	フォワーダの荷台に積まれた材の玉数
荷台材積	m ³	フォワーダの荷台に積まれた材の合計材積
荷台容量	m ³	荷台に積載可能な最大材積
出材積	m ³	フォワーダにより運材され、巻立てられた材の合計材積
タワーヤード稼働時間	秒	
プロセッサ稼働時間	秒	
フォワーダ稼働時間	秒	

モデル化を行った。RN-45 プロセッサは、クランプと枝払いアームの 2 箇所では材を支持し、アームの伸縮駆動により支持した材を送るタイプの簡易プロセッサである (図-5)。また、KP-40 プロセッサはエクスカベータのベースマシンにプロセッサユニットを搭載したワングリッププロセッサであり、玉切装置がチェーンソーではなくサーキュラーソーであった。したがって、KP-40 プロセッサの作業速度は RN-45 プロセッサに比べてかなり早かった。観測データは RN-45 プロセッサが 1997 年 7 月 23・24 日に宮城県登米郡登米町の町有林で調査したものであり、KP-40 プロセッサは 1997 年 2 月 14 日に栃木県大田原営林署管内入小滝国有林で調査したものである¹²⁾。

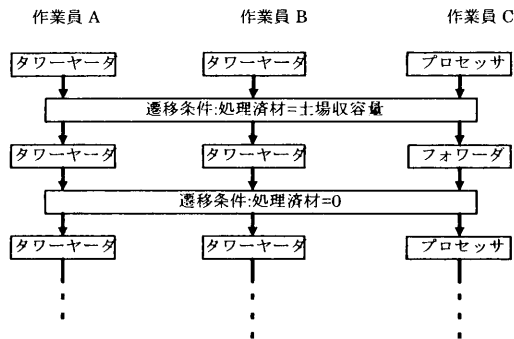
簡易プロセッサは、最大玉切径が小さいことから、しばしば伐倒木の径がプロセッサの処理能力を超えることがあった。このため、図-6 に示すようにサイクルタイムの分布も所要時間の長いサイクル (以下、長サイクル) と所要時間の短いサイクル (以下、短サイクル) に別れており、各サイクルで要素作業の作業時間や流れが異なっているため、それぞれサイクルごとのモデル化を行い、発生確率に従い時間を按分した。長サイクルと短サイクルの発生確率は観測結果の比と同じ 4:7 とした。なお、材が大きい場合等ではチェーンソーにより造材作業を行ったり、材の割れを防ぐために鋸断の一部をチェーンソーにより行う場合があったため、大径木の鋸断は別の要

2人作業

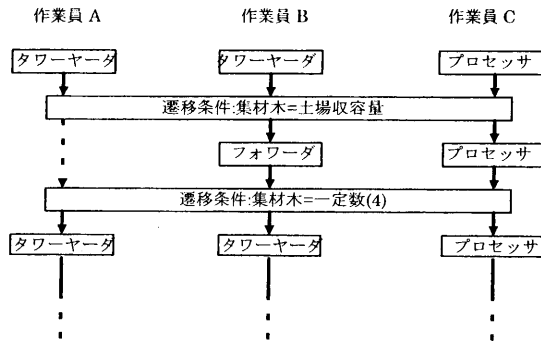


3人作業

(1) 造材にワングリッププロセッサを用いる時



(2) 造材に簡易プロセッサを用いる時



4人作業

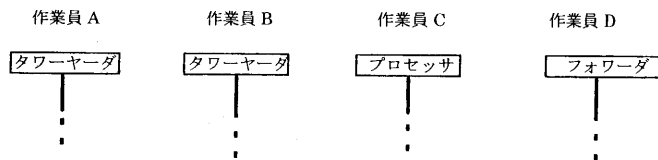


図-2 作業人数による作業の流れの違い

Fig. 2. Flow chart of operators.

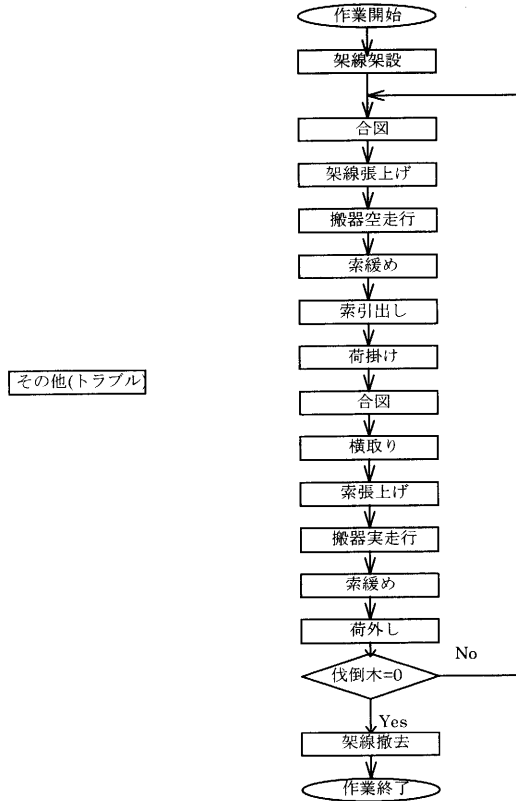


図-3 タワーヤード作業モデルの要素作業と流れ
 Fig. 3. Flow chart of work elements of yarding.

素作業として扱った。

簡易プロセッサ RN-45 およびワングリッププロセッサ KP-40 の作業における観測された各要素作業時間分布から求めた理論式は表-3、表-4 のとおりである。

図-7、8 は、簡易プロセッサおよびワングリッププロセッサについて要素作業の分類および流れ、要素作業間の遷移確率を示したものである。プロセッサ造材作業は、作業の流れの中に分岐を多く含む複雑である。このため、プロセッサ作業のシミュレーションにおいては、観測された作業連結強度から各要素作業間の遷移確率を決定し、これに従って次作業を決定した⁷⁾。なお、玉切り作業について遷移確率を用いると、シミュレーションによる造材玉数が実際の造材玉数よりも少なくなることが報告されているため、造材作業の回数は樹高と採材長から決定した²⁾。いずれのシミュレーションもサイクルの開始時に「集材木」から1を減じ、材長および材径を乱数により決定した。また、1回玉切ると「処理済材」に1を加え、「材長」から「採材長」を減じ、「材径」に0.9を乗じた。また、「採材長」および「材径」から「材積」を決定した。1サイクルが終了後、次のサイクルへ入る。「集材木」が0の場合は、タワーヤード作業が終了していればプロセッサも作業終了となるが、タワーヤードが作業中の場合はタワーヤードが伐倒木を土場に集材するまで待ち状態とした。

4) フォワーダ運材作業のモデル化

運材作業についても、フォワーダの時間観測結果をもとに乱数から作業時間を与える理論式を求めた。観測データはRN-45 プロセッサと同一の現場で用いられたハーフトラックフォワーダRMF-CH (O社製) のものを用いた。

表-2 タワーヤード作業の各要素作業理論式
Table 2. Theoretical formula of work elements time of mobile-yarder

要素作業	理論式
架線架設・撤去 合図	$14.008d_1 + 1831.2$ $e^{N(2.45, 0.652)}$
架線張り上げ	16.8
搬器空走行	$0.81l_1$
索緩め	6.7
索引き出し	$0.59l_2$
荷掛け	$e^{N(2.95, 0.421)}$
横取り	$6.42l_2 + 5.71$
搬器実走行	$1.31l_1$
索緩め	7.6
荷外し	$e^{N(3.13, 0.443)}$
その他トラブル等	161

ただし、
 $N(m, \sigma)$ は平均 m 、標準偏差 σ の正規乱数を与える演算子
 d_1 は架線長
 l_1 は搬器移動距離
 l_2 は横取り距離

各要素作業について、観測された作業時間から算出された作業時間分布の理論式は表-5のとおりである。

要素作業については図-9に示すように分類した。運材作業は、積載→実走行→下ろし→空走行という流れとして進むため、荷台整理および巻立て材整理は、観測結果から求めた発生確率を用い、乱数によって積載および巻立て作業の間に割り込ませた。一度に攔む材の本数も作業観測で得られた比率から乱数を用いて決定した。まず積載に際しては、材を攔むごとに「荷台材数」に攔んだ本数を加え、「処理済材」から同数を減じた。また、玉毎に記録してある「材積」を「荷台材積」に加えた。「荷台材積」が「荷台容量」を越えたならば、積載を終了して出発準備、実走行に移る。次に実走行後、準備を経て巻立て作業に移る。巻立て作業時は、乱数により決定された攔む本数を「荷台材数」より減じ、「荷台

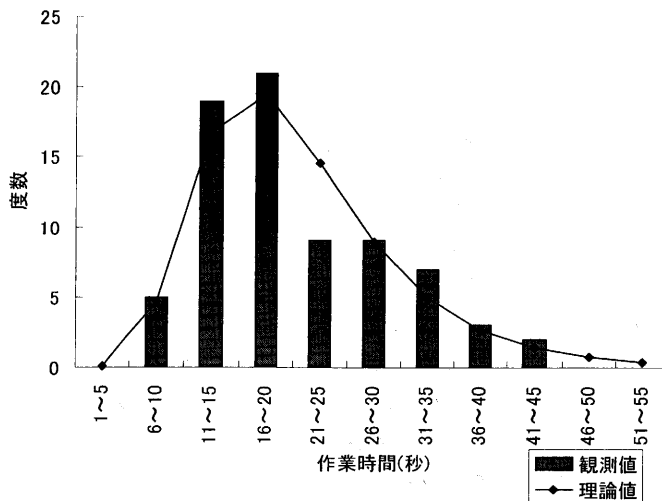


図-4 タワーヤード荷かけ作業の作業時間観測値と理論値

Fig. 4. Sample of histogram of working time.



図-5 RN-45 プロセッサ

Fig. 5. RN-45 processor.

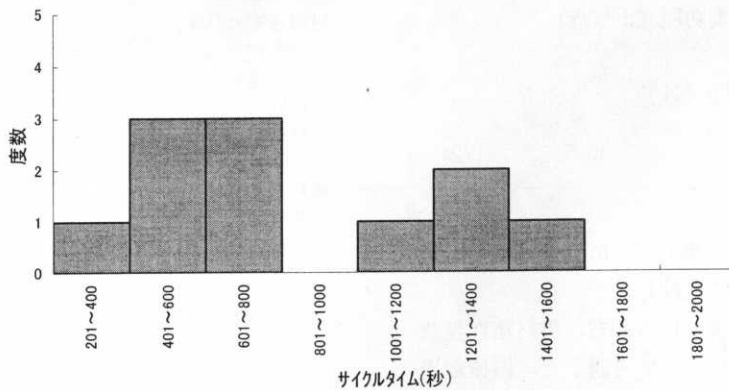


図-6 RN-45 プロセッサのサイクルタイム度数分布

Fig. 6. Histogram of operation by RN-45 processor.

材数」が0になったら巻立て作業は終了とした。終了時に「巻立て材積」に「荷台材積」を加えた。さらに巻立て作業が終了したら空走行に移り、作業土場に到達したら、再び積載作業に入る。「処理済材」が0ならば待ち状態に入るが、プロセッサ作業が終了していた場合はフォワーダ作業も終了とした。

5) 集運材作業の費用計算

全作業の終了後、「現在時刻」「稼働時間」「集材路作設距離」「巻立て材積」より、各機械の作業工期および作業コストを求めた。

作業工期については、次式を適用した。

表-3 RN-45 造材作業における各要素作業の理論式

Table 3. Theoretical formula of work elements time of easy-type processor

要素作業	長サイクル理論式	短サイクル理論式
つかみ作業		$e^{N(3.562,0.671)}$
ウィンチ引き寄せ作業		$e^{N(4.32,0.218)}$
サルカ落とし・捨て切り	$-9x^2+30x+14.25$	$e^{N(3.50, 0.346)}$
チェーンソーサルカ落とし	$-84x^2+254x+62.812$	$85.5x^2+60x+60.625$
プロセッサ造材作業	$e^{N(4.15,0.478)}$	$e^{N(3.72, 0.231)}$
併用造材作業	$96x^2+66.4x+62.8$	$e^{N(4.22, 0.172)}$
チェーンソー造材作業 (梢端部)	$12x^2+62.8x+245.91$	$99x^2+3x+97.75$
残材捨て作業	$212x+50$	$24x+67.667$
その他トラブル等		$e^{N(2.83,0.601)}$
		$15.4e^{2.7307x}$

ただし、 $N(m, \sigma)$ 平均 m 、標準偏差 σ の正規乱数を数を与える演算子
 x は閉区間 $[0, 1]$ 内の一様乱数

$$y_i = \frac{3600V}{t_i} \quad (1)$$

ただし、

y_i : 各機械の作業工期 ($m^3/時$)

V : 出材積 (m^3)

t_i : 機械稼働時間 (秒)

$$Y = \frac{3600V}{T} \quad (2)$$

ただし、

Y : 作業全体の作業工期 ($m^3/時$)

T : 作業所要時間 (秒)

また、作業コストは人件費、集材路作設費

および機械費用について考慮した。機械費用

については機械の維持費や減価償却等の機械損料と燃料・油脂費とを分けて算出した。消耗品費用については一定とし、固定費に含めた¹³⁾。

1日の作業時間を6時間とし、各費用は以下の式で与えた。

$$C_w = \frac{T \cdot M \cdot w}{3600 \times 6} \quad (3)$$

ただし、

C_w : 人件費 (円)

w : 人件費単価 (円/日・人)

M : 作業人数 (人)

$$C_r = r \cdot d_r \quad (4)$$

ただし、

C_r : 集材路作設費 (円)

表-4 KP-40 による造材作業の要素作業理論式

Table 4. Theoretical formula of work element time of one-grip processor

要素作業	理論式
材引き寄せ作業	$e^{N(3.36,0.736)}$
つかみ作業	$e^{N(2.85,0.584)}$
サルカ落とし	$e^{N(0.775,0.841)}$
実旋回	$e^{N(2.12,0.664)}$
造材作業 (最後の玉)	$e^{N(2.39,0.359)}$
残材捨て作業	$e^{N(1.14,0.408)}$
空旋回	$e^{N(2.05,0.65)}$
その他トラブル等	$e^{N(1.92,0.3)}$
	$70.629x+3.019$

ただし、 $N(m, \sigma)$ は平均 m 、標準偏差 σ の正規乱数を与える演算子

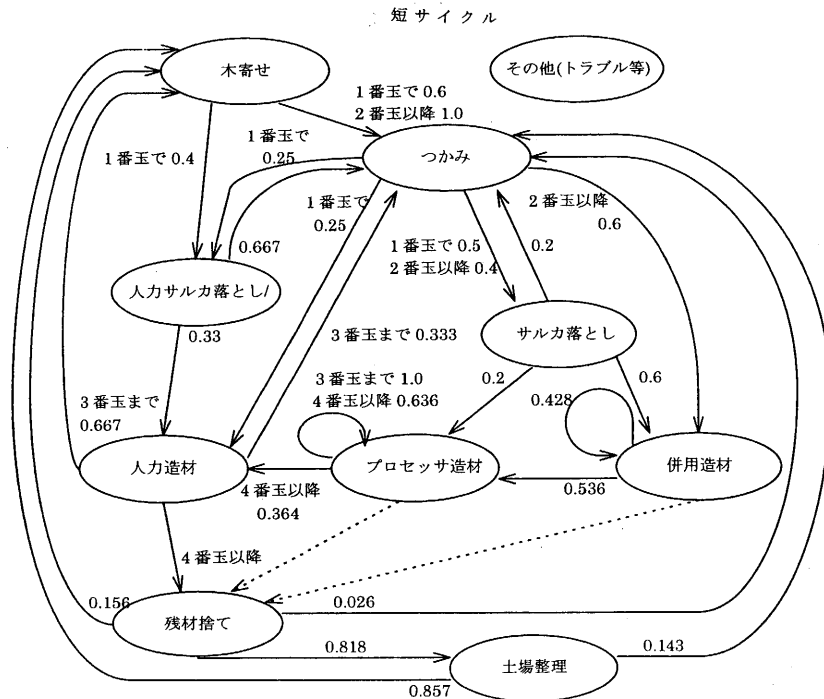
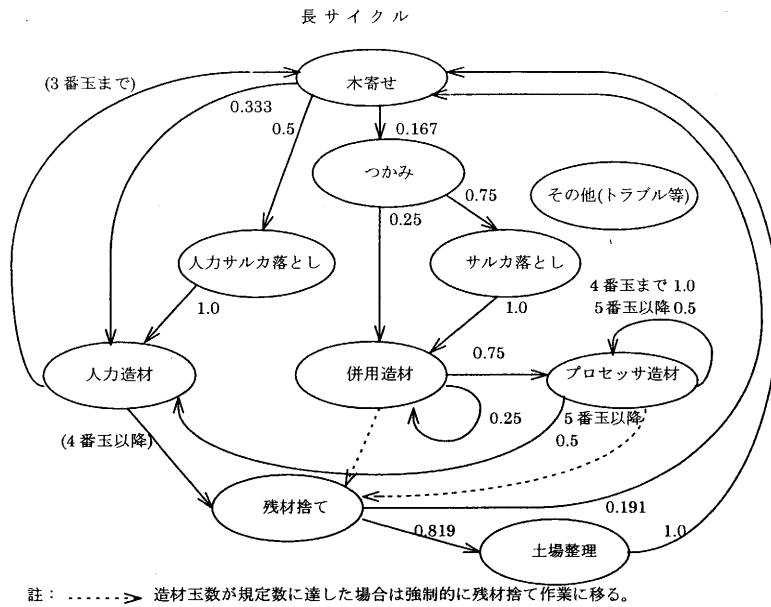


図-7 RN-45 プロセッサの要素作業と流れ

Fig. 7. Flow chart of work elements of RN-45 processor.

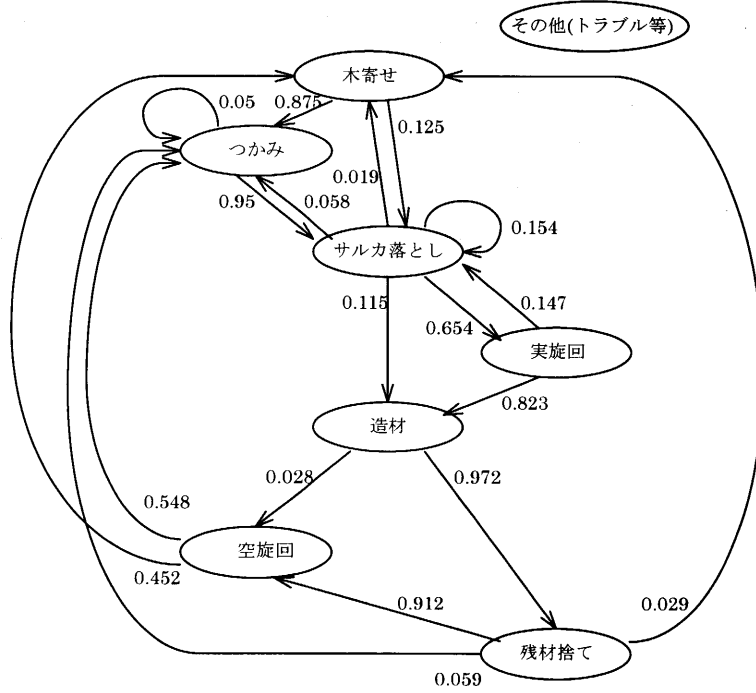


図-8 KP-40 プロセッサの要素作業と流れ
 Fig. 8. Flow chart of work elements of KP-40 processor.

r : 集材路単価 (円/m)

d : 集材路作設延長 (m)

$$M = \frac{P(\alpha + \beta)}{L \cdot A} \times \frac{T}{3600 \times 6} + \frac{P\gamma}{L \cdot A} \times \frac{t_i}{3600 \times 6} \tag{5}$$

ただし,

M : 機械損料 (円/日)

P : 機械購入価格 (円)

α : 減価償却費率

β : 管理費率 (/償却年)

γ : 定期整備・修理費率 (/償却年)

L : 償却年数 (年)

A : 機械の年間稼働日数 (日/年)

$$F = (f \times f_c + O) \frac{t}{3600} \tag{6}$$

ただし,

F : 燃料・油脂費 (円)

f : 燃料単価 (円/l)

f_c : 燃費 (l/時)

表-5 フォワーダ作業の要素作業時間理論式
Table 5. Theoretical fomula of work elements time of forwarder

要素作業	理論式
荷扱い準備	$e^{N(2.67,0.469)}$
選木・積載作業 (1本)	$e^{N(3.24,0.213)}$
(2本)	$e^{N(3.4120,328)}$
荷台整理	$5.2x + 2.15$
走行準備	$33.943x + 12.695$
走行	$\frac{d_r}{e^{N(0.2947,0.2463)}}$
荷おろし・積み上げ作業 (1本)	$e^{N(3.46,0.888)}$
(2本)	$e^{N(3.53,0.0854)}$
材整理	$9.5738e^{0.9092x}$
その他トラブル等	$13.252x^2 + 24.675x + 5.4819$

ただし、
 $N(m, \sigma)$ は平均 m 、標準偏差 σ の正規乱数を与える演算子
 d_r は集材路作設延長

の分布は 5% 有意水準で実際のサイクルタイム分布に適合した。

3. シミュレーションによる集運材作業の計算

1) モデル伐区の概要

前章で構築したシミュレーションシステムを用いて、仮想伐区を対象に、タワーヤード・プロセッサ・フォワーダの作業システムについて検討した。想定した伐区と作業システムを図-10に示す。伐区は奥行 100 m、幅は 1 線で集材できる最大の横取り幅を想定し、60 m の矩形伐区とした。伐区と林道との距離 D は 300 m~800 m を設定し、タワーヤードの最大スパン長は 300 m とした。ここで、 D とタワーヤードのスパン長 d_t 、および集材路の作設延長距離 d_r との間には、次式の関係が成立する。

$$D = d_t + d_r - 100 \tag{9}$$

ただし

$$100 \leq d_t \leq 300$$

$$D - 200 \leq d_r \leq D$$

集材の対象となる伐倒木の密度および材積については、宮城県地方 55 年生のスギ・ヒノキ人工林の間伐材を想定し、300本/ha、伐区全体で 180 本とした。タワーヤードの搬器は、集材対象木から至近になる点まで移動するものとし、横取り時にメインラインと荷上げ索が直交するものとした。伐区の手前にタワーヤード、プロセッサの作業土場を設置して、その先の伐区まではタワーヤードを使って到達補助を行うものとした。

O: 油脂費 (円/時)

$$C_x = M + F \tag{7}$$

ただし、

C_x : 機械費用, $x=t$ (タワーヤード), p (プロセッサ), f (フォワーダ)

$$C = C_w + C_r + C_t + C_p + C_f + C_s \tag{8}$$

ただし、

C : 集材作業コスト

C_s : 消耗品費

各要素の具体的な数値は観測値および文献を用い、一部は機械のカタログから補足した^{3, 6, 9-11, 14, 16)} (表-6)。各作業ごとにシミュレーションを行い、得られたサイクルタイムの分布を実際のサイクルタイムの分布と比較し、妥当性を検証した結果、各作業ともシミュレーションによって得られたサイクルタイム

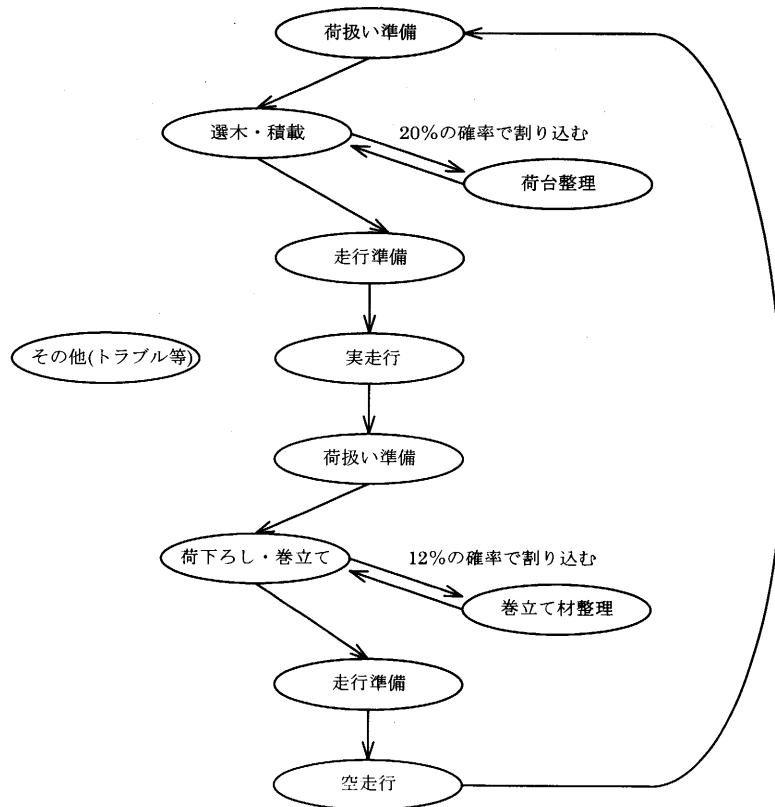


図-9 フォワーダ作業の要素作業と流れ

Fig. 9. Flow chart of work elements of forwarder.

2) シミュレーションによる計算結果

ア. 作業工期

<KP-40 プロセッサを用いた場合>

KP-40 プロセッサを用いた場合の集材路作設延長距離 dr と作業工期との関係を、 $D=300$ m および $D=700$ m の場合について図-11 に示す。図より、2人作業の工期は著しく低く、作業工期は d_t および D の双方に依存している。また、3人作業時と4人作業時の工期は d_t に大きく依存しており、 d_t の増加とともに減少している。しかし、 $D=700$ m で3人作業のとき、 $d_t \leq 120$ m でほぼ一定の工期となることが示された。

<RN-45 プロセッサを用いた場合>

$D=300$ m と $D=700$ m の場合の作業工期を図-12 に示す。図より、作業工期は2人作業においては d_t の減少により増大し、3人作業の場合は D および d_t の双方に影響を受けており、 D および d_t が減少するに従って増大した。また4人作業では、工期はほぼ一定となっているが、 d_t の増加によりわずかずつ減少することが示された。

表-6 コスト計算に用いた数値
Table 6. Values used to find costs

機械\要素	P	α	β	γ	L	A	f_c	O
タワーヤード	18,000,000	0.9	0.35	0.15	5	132	1.8	67
簡易形プロセッサ	14000,000	0.9	0.35	0.15	5	100	2.01	57
シングルグリッププロセッサ	26,000,000	0.9	0.35	0.15	5	100	2.01	57
フォワーダ	11,500,000	0.9	0.35	0.15	5	155	2.96	96

その他, $C_w=17000, C_s=199, r=927, f=78$

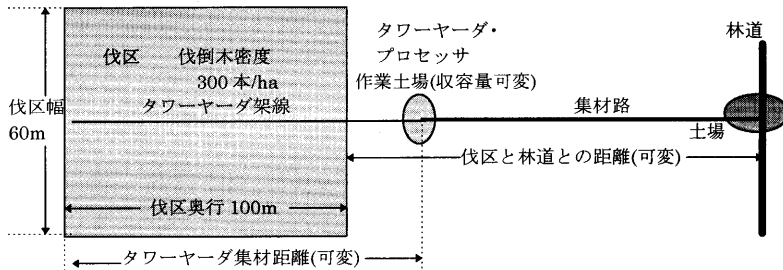


図-10 伐区モデル

Fig. 10. Model skidding area for simulation.

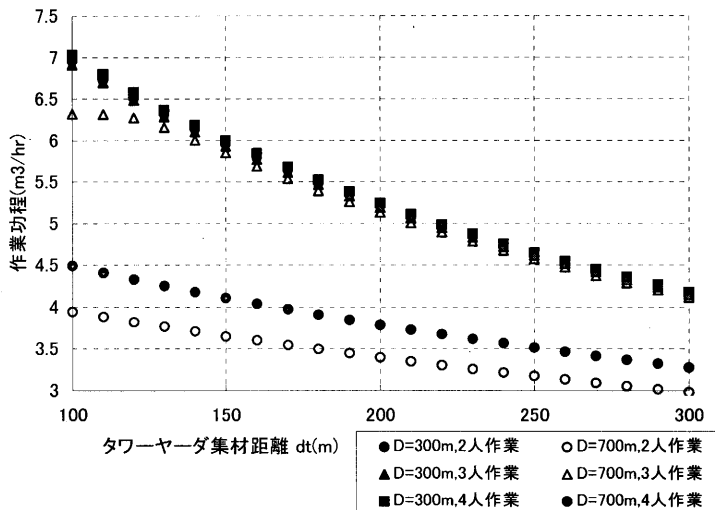


図-11 KP-40 プロセッサを使用した場合の作業工期

Fig. 11. Operational efficiency with KP-40 processor.

イ. 作業コスト

<KP-40 プロセッサを用いた場合>

作業コストの変化を図-13 に示す。作業コストは作業工期と比べ、 D による影響が大きく、作業人数にかかわらず d_i の減少により低減した。しかし $D=700$ m で 3 人作業のときは約 $d_i=120$ m を境に d_i の減少によりコストは増大する傾向が認められた。

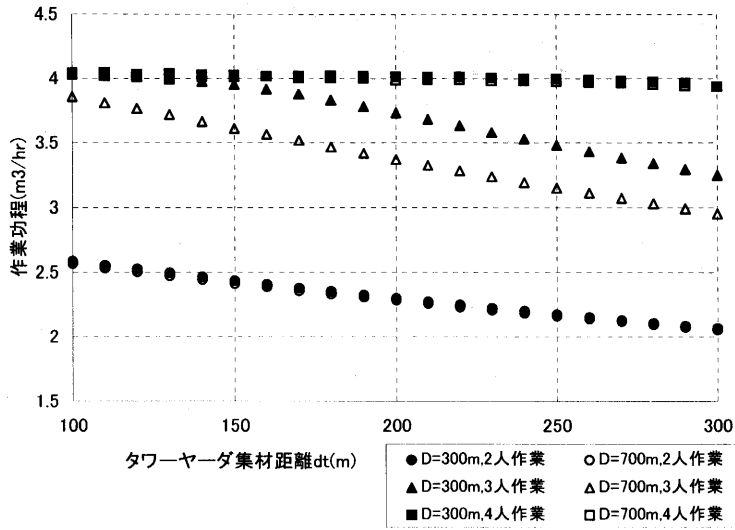


図-12 RN-45 プロセッサを使用した場合の作業工期

Fig. 12. Operational efficiency with RN-45 processor.

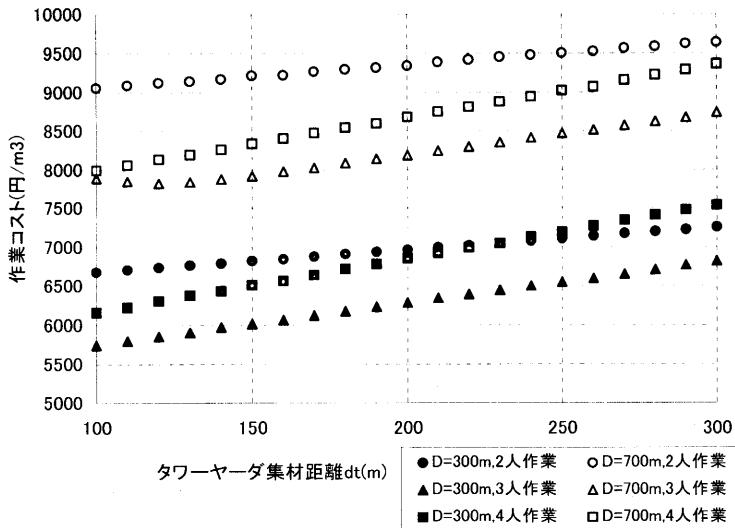


図-13 KP-40 プロセッサを使用した場合の作業コスト

Fig. 13. Working costs with KP-40 processor.

<RN-45 プロセッサを用いた場合>

作業コストを図-14 に示す。作業コストは 2 人作業および 3 人作業では、KP-40 プロセッサ使用時と同様 d_i の減少により低減するが、 $D=300\text{ m}$ の 3 人作業ではほぼ $d_i=150\text{ m}$ を境に d_i の減少により増大した。また 4 人作業では、 d_i の減少により作業コストは増大することが示された。

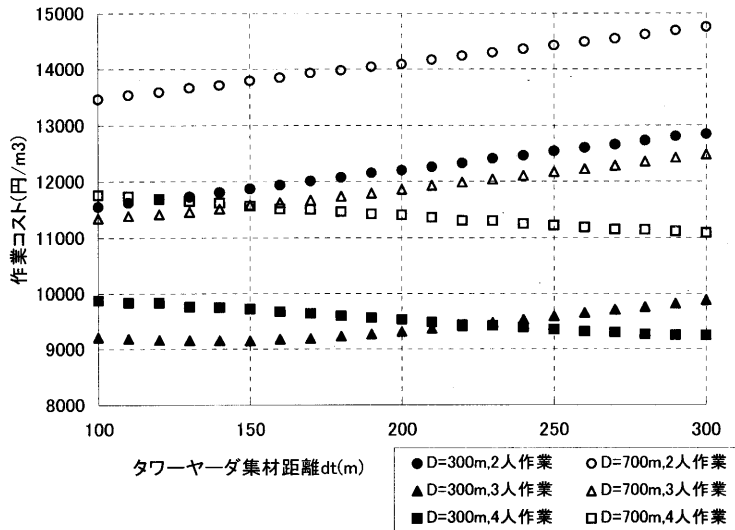


図-14 RN-45 プロセッサを使用した場合の作業コスト
 Fig. 14. Working costs with RN-45 processor.

3) 考察

ア. 作業工程と作業コスト

<KP-40 プロセッサを用いた場合>

図-11 より, d_i が同じならば, 2人作業を除いて作業人数および D に関係なく作業工程はかなり近い値となり, d_i の増加とともに減少している。すなわちタワーヤードが作業全体の作業時間を左右していることが推察される。このことは各作業員の実動時間を示した図-15において, 3人以上の作業ならばタワーヤード作業員(作業員 A, B)の作業時間とシステム全体の作業時間にほとんど差がないことからもうかがえる。

3人作業の場合, 作業員2名(A, B)が常にタワーヤードによる作業を行い, 作業員Cがプロセッサとフォワーダのオペレータを兼任することになり, このため $D=700$ m とフォワーダの走行距離が長い場合, 作業員Cの作業工程が低下し, $d_i < 130$ m においては作業員 A, B の作業工程を下回ることが認められた(以降この d_i を転換点と称する)。また, d_i の変化によるフォワーダの作業工程が受ける影響はタワーヤードの作業工程に比べ小さく, フォワーダの作業時間は架線架設時間とも重複するため, システム全体の作業工程は d_i に関係なくほぼ一定であると見なすことができる。作業工程がほぼ一定ならば作業コストは集材路の作設費用のみに影響を受けることになり, 転換点よりも d_i が小さい場合, d_i が短くなるほど作業コストは増大すると考えられる。この転換点は作業員Cの作業工程に依存し, D が長くなり作業員Cの作業時間が大きくなるほど転換点となる d_i は長くなることが明らかにされた。

また KP-40 プロセッサを用いた作業では, $D=300$ m および $D=700$ m のいずれの場合も3人作業がコスト最小となった。つづいて低コストになるのは4人作業であり, 最もコストがかさむのは2人作業であることがわかった。2人作業では作業に時間がかかりすぎ, また3人作業と4人作業では作業時間がほとんど変わらないため, 人件費の分だけ3人作業の方がコストが低く

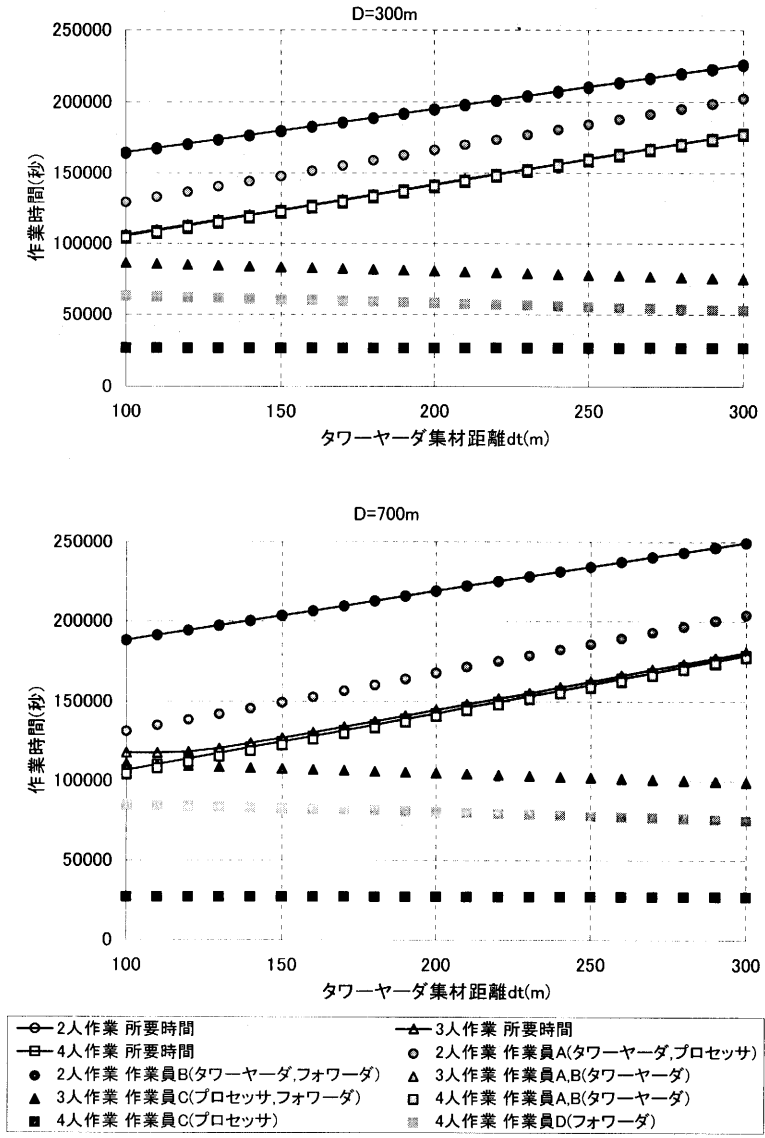


図-15 KP-40 プロセッサを使用した場合の各作業員の各作業時間

Fig. 15. Working time of operators with KP-40 processor.

なると考えられる。

<RN-45 プロセッサを用いた場合>

RN-45 プロセッサを用いた作業では、4人作業における功程の変化から、処理能力が最も低いのはプロセッサであることがわかった。このことは作業人員ごとの作業時間を示した図-16からも裏付けられる。また3人作業においてはタワーヤードのオペレータのうち一人（作業員B）がフォワーダのオペレータを兼任し、この作業員の作業功程が最も低くなるがこの図からわ

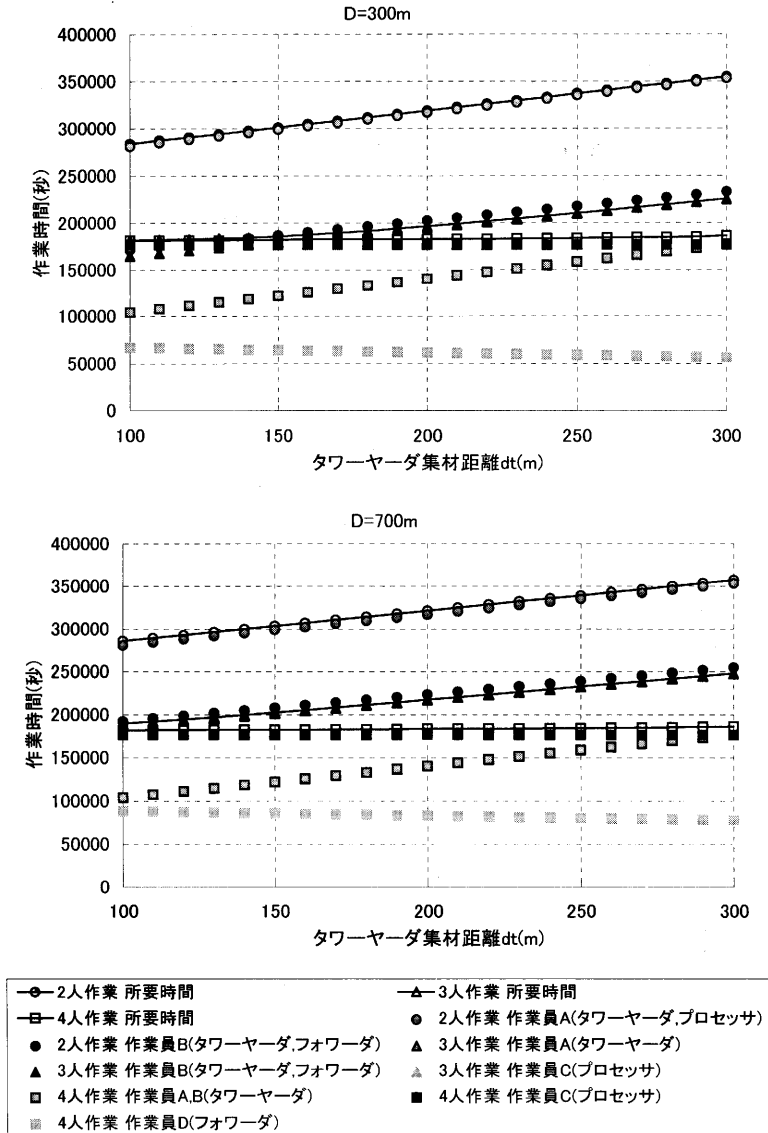


図-16 RN-45 プロセッサを使用した場合の各作業員の作業時間

Fig. 16. Working time of operators with RN-45 processor.

かった。

また KP-40 プロセッサを用いた場合と同様、3 人作業では作業コストの転換点が生じている。KP-40 プロセッサを用いた場合は D が長くなると転換点が現れたが、RN-45 プロセッサを使用した場合は逆に D が短い時点で転換点が現れ、 D が短いほど転換点となる d_i は長くなることが示された。これは作業の流れの違いによるものである。すなわち、図-2 に示したように KP-40 プロセッサを使用した場合と RN-45 プロセッサを使用した場合では作業員の動きが異なっている

表-7 作業コスト最小となる d_i と作業コスト
Table 7. Most profitable length of skidding road and costs

プロセッサの種類 セット人員\D	KP-40		RN-45	
	$D=300$ m	$D=700$ m	$D=300$ m	$D=700$ m
2人作業	100 m, 6676	100 m, 9060	100 m, 11558	100 m, 13459
3人作業	100 m, 5743	120 m, 7826	150 m, 9144	100 m, 11348
4人作業	100 m, 6157	100 m, 7997	300 m, 9247	300 m, 11088

左…作業コスト最小となる d_i (m)

右…そのときの作業コスト(円/m³)

ため、転換点の出現時点と動きが異なると考えられる。

作業人数による作業コストを比較すると、2人作業は常に最も作業コストがかさみ、3人作業と4人作業では d_i が短ければ3人作業、 d_i が長ければ4人作業がより低コストとなることがわかった。また4人作業の場合は他の場合と異なり d_i が増大するほどコストが低下するために逆転現象が生じた。しかし3人作業と4人作業の作業コストがきわめて接近しているのは、タワーヤードオペレータのうち一人がフォワーダの運転をしている間、もう一人のオペレータには仕事がないことなどが原因となっていると考えられる。

またRN-45プロセッサはKP-40プロセッサと比べ作業が極端に遅いため、作業コストがかなりかさんでいる。表-6に示したとおり、プロセッサの単位時間あたりの作業コストはKP-40プロセッサに比べほぼ半額である。しかし、その遅さにより価格の安さは完全に打ち消されており、機械価格が安いから作業コストも安くなるとは言えないことがわかった。

イ. 適正な集材路作設延長

<KP-40プロセッサを用いる場合>

KP-40プロセッサを用いる場合、ほとんどのケースでは d_i が短く、 d_r が長くなると作業コストが低下するので、集材路を伐区に接するまで開設するのが有利となった。ただし、 D が長いと3人作業の場合では d_i が短くなるほど作業コストが増大する転換点が存在した。

伐区までの距離が一定の時に最も低コストとなるのは3人作業であるので、作業人数未定の場合は3人によるチームを投入する事が望ましいといえる。

<RN-45プロセッサを用いる場合>

RN-45プロセッサを用いる場合、コスト最小となる集材路作設延長距離および架線長は以下のように決定された。

2人作業では、KP-40プロセッサを用いた場合と同様に、集材路を伐区まで開設するのが最も有利となった。また3人作業では、KP-40プロセッサの場合とは逆に D が短いときに転換点となる d_i が100m~300m内に存在した。 D が長くなると2人作業の場合と同様、 d_i をできるだけ短くして土場を伐区に隣接させるのが低コストとなった。4人作業の場合は、 d_i が短くなるほど作業コストは上昇するため、 d_i をタワーヤードの最大スパン長に等しくし、 d_r を最短にする事で最も低コストとなった。また D が一定の時に最も低コストとなる作業人数は D が短ければ3人、 D が長ければ4人のセット人員による作業が適していることがわかった。

表-7は以上をまとめて示したものである。

6. お わ り に

本シミュレーションによって、伐区と林道の距離、プロセッサ種別、作業人数と集材路の作設延長との関連が明らかとなり、投入人数・造材作業システムを考慮した集材路の適正作設延長距離の決定が可能となった。同一の作業システムでは基本的に集材路の作設延長を伸ばすことによって作業コストは低減されるが、作業システムや作業条件によってその減少傾向は異なることもあり、また集材路の作設延長距離が同一であっても投入人数やプロセッサの種別により作業コストは大幅に変動することが明らかとなった。このため、一時的な集材路であっても、その作設延長距離の決定にあたっては、コスト計算に基づき、慎重な作業計画の決定が望まれる。

小型高性能機械と集材路を組合わせた作業システムは今後増加すると考えられる。また、林業就労人口の減少が進む中、小人数・小型規模作業の必要性も増加すると考えられる。そのような状況下でも本研究成果を適用する事により、集材路の作設延長距離を決定することが可能である。

現地調査の実施にあたって御協力をいただいた、登米町森林組合の竹内信男参事をはじめ職員・作業員各位、および林業工学研究所及川良一郎所長に深甚の謝意を捧げる。

要 旨

林道から離れた伐区まで簡易な集材路を作設し、タワーヤード・プロセッサ・フォワーダを用いる集材作業システムにおいて、集材路の適切な作設延長距離を求めるために、作業人数等を考慮したシミュレーションモデルを構築し、検討を行った。

シミュレーションモデルは各作業ごとに独立した理論モデルを作成し、条件変数によって各モデルを制御した。本シミュレーションにおける対象機械はタワーヤード、簡易プロセッサ、ワングリッププロセッサ、フォワーダを取り上げた。また、パラメータである作業人数は2人～4人を想定した。

奥行100m、幅60mの矩形の伐区を想定し、林道から伐区までの距離を300mから800mまで変化させてシミュレーションを行った。造材にワングリッププロセッサを用いた場合、3人による作業が最小コストとなることがわかった。また、集材路を伐区に接するまで作設するほど作業コストは低くなるが、伐区が林道から遠い場合には伐区より手前で集材路を止めた方が作業コストは低くなることがわかった。同様に、造材に簡易プロセッサを用いた場合では、伐区が林道から遠ければ4人作業が最も作業コストが低く、集材路の作設延長距離を極力短くする方法が最小コストを与えた。また伐区が林道に近ければ集材路を伐区近くまで作設して3人作業を行うと最もコストが低くなることがわかった。

キーワード： 集材路・シミュレーション

引 用 文 献

- 1) 阿部鴻文・猪内正雄・佐々木幸敏(1993) モービルタワーヤードによる列状間伐集材作業の生産性とコスト 日林論 104: 849-850.
- 2) 岩岡正博(1997) ハーベスタ・ゴム履帯式フォワーダによる作業システム 平成8年度高性能林業機械による新たな作業システムの確立に関する報告書: 1-19.

- 3) 上飯坂実・神崎康一(1990) 現代の林学2 森林作業システム学 292 pp. 文英堂, 東京.
- 4) 小林洋司・岩岡正博(1994) 急傾斜地における高能率搬出作業仕組みの研究 平成5年度科学研究費補助金研究成果報告書(研究課題番号03454070): 35 pp.
- 5) 小林洋司・仁多見俊夫・岩岡正博・南方 康・渡邊定元(1990) 複相林施業における適正な集材作業システムの構築 日林誌 72(5): 399-405.
- 6) 水戸辺栄三郎(1996) 路網の整備・活用による間伐作業事例 機械化林業 507: 26-31.
- 7) Toshio Nitami, Masahiro Iwaoka, and Hiroshi Kobayashi (1992) A work comparison and system analysis of vehicle harvesting operations using a flexible work time analysis system on PC. Proc. IUFRO S3.04.02 Goettingen: 112-129.
- 8) 朴 相俊・岩岡正博・酒井秀夫・小林洋司(1994) タワーヤードによる間伐作業システムと適正路網密度 東大演報 92: 175-197.
- 9) 林業機械化協会(1992) 林業機械メーカーの抱負 機械化林業 458: 28-42.
- 10) 林業機械化協会(1993) 伐出作業を革新するプロセッサ 152 pp. 林業機械化協会, 東京.
- 11) 林業機械化協会(1996) 林業機械便覧1996 252 pp. 林業機械化協会, 東京.
- 12) 酒井秀夫(1998) プロセッサの理論方程式と標準功程 平成9年度高性能林業機械による最適作業システムの開発に関する調査: 25-35.
- 13) 酒井秀夫(1998) 高性能林業機械による作業システムの生産費 森林学誌 12(3): 203-208.
- 14) 柴田順一・桑原正明(1996) タワーヤードの考え方と作業マニュアル 171 pp. 林業機械化協会, 東京.
- 15) 田坂聡明(1992) 伐出作業機械化の適正規模と合理的作業システムに関する研究 119 pp. 林業工学研究所, 宮城.
- 16) 梅田三樹男・辻 隆道・井上公基(1982) 標準功程表と立木評価 140 pp. 日本林業調査会, 東京.
- 17) 米田幸武・中村英石・辻 隆道・渡部庄三郎・石井邦彦(1963) 林業の標準功程表あてはめに関する研究(その2) チェンソー伐木造材作業の標準資料法による標準時間-I 林業試験場報告書 149: 1-229.
- 18) 周 向陽・藤井禮雄(1997) GPSを応用した集材・造材作業システムのシミュレーション 森林利用研究会誌 10(3): 243-252.

(1998年4月30日受付)

(1999年9月14日受理)

Summary

This study was conducted to calculate the profitable length of skidding roads for on system with mobile-yarder, processor, and forwarder by simulation methods taking into account the numbers of operators, and other factors.

In this simulation system, each component in the models of operations is changeable, and depends on some of the variables. Models are constructed using theoretical formulas of the fragment times, and flows of the work elements. The mobile-yarder, simple processor, single-grip processor, and forwarder operations are simulated. The Number of operators are 2 to 4.

The simulation used a model skidding site size of 100 m×60 m, and the distance from the forest road is between 300 m to 800 m. The longer distance from the site to the forest road and from the site to the mobile yarder the profitable the system with the single grip processor. The profitable number of men is three. For a Simple processor, the profitable length of skidding road, and numbers of operators depend on the distance of the site from the forest road, and the maximum yarding-length for the mobile-yarder.

Key words: Skidding road, Simulation

In vitro Plantlet Regeneration of *Abies firma* from Germinated Seedlings

L-M. VAARIO, Megumi TANAKA and Yuji IDE

Plant regeneration procedures from seedlings without radicles and from hypocotyl segments through adventitious bud were established. De-rooted seedlings developed the maximum number of new needles on SH medium containing 1.0 mg/l BAP and rooted on hormone-free 1/2SH medium containing 0.3% activated charcoal after immersion in 1,000 ppm NAA solution. The frequency of rooting was 63.6%. Adventitious buds were induced on hypocotyl segments on SH medium with 1.0 mg/l BAP and 0.3 mg/l NAA. They grew into shoots on hormone-free 1/2SH medium. Plantlets were successfully obtained by the procedure used in the rooting of de-rooted seedlings.

Studies on Yarding and Hauling System of Mobile-yarder, Processor, and Forwarder with Simulation Methods

Rin SAKURAI, Masahiro IWAOKA, Hideo SAKAI and Hiroshi KOBAYASHI

The length of the skidding road to minimize the skidding cost, for mobile-yarder, processor and forwarder systems were studied by simulation models involving the number of operators and other factors. Simulation is based on a model skidding area of 100 m × 60 m. If the single-grip type processor is used, distance from site to mobile-yarder should be 0 m–40 m with three operators. For a simple type processor, if the site is close to the forest road, distance from site to mobile-yarder should be 0 m–40 m with three operators. If distance are greater, the profitable length of skidding road should be short as possible with four operators.

Anti-Bioluminescent Activity of Coniferous Bark Extracts on MICROTOX™ Test

Sakae SHIBUTANI, Masahiro SAMEJIMA, Yoshimasa SABURI
and Norihisa TATARAZOKO

Anti-bioluminescent activity of bark extractives from six coniferous species was examined by MICROTOX™ test. The most active compound was purified from the *n*-hexane extracts of *A. sachalinensis* and identified as oleic acid.