

自走式搬器による集材作業システムの検討

永井芳郎*・岩岡正博*・酒井秀夫*
井上公基**・小林洋司*

Study on a Yarding Operation System Using a Self-propelled Hoist Carriage

Yoshiro NAGAI*, Masahiro IWAOKA*, Hideo SAKAI*, Koki INOUE**
and Hiroshi KOBAYASHI*

1. はじめに

1982年頃から普及し始めた自走式搬器は当初、九州地方で導入が進み、続いて岐阜や静岡といった急傾斜地域で導入され、1995年末までに西日本を中心として約1800台が導入されている。林業機械が大型化するなかで、自走式搬器は比較的小形かつ安価であることから、小規模林業を支える機械として重要な役割を担っている。本論文では、自走式搬器を用いた集材作業システムを対象として、現地調査ならびに分析を行い、その作業方法および作業システムについて検討を行った。

2. 調査方法および調査地概要

調査では、静岡県天竜地域に所在する森林作業請負業者を対象とし、会社の経営記録による作業日報調査と現地調査を行った。

調査対象業者は、30才～40才代の従業員8人で構成され、主に伐採搬出作業を請け負っている。本業者の作業システムは、チェーンソーで先行伐倒・造材後、主索を架設し人力木寄せと自走式搬器により集材を行っている。土場ではとびによる桎積み後、トラック運材を行っている。この作業システムは、通常は2人1組の作業班により行われているが、請負量が少なく作業の割り当てがない作業者は、他の班の作業を手伝っている。この場合、土場に近い所から集材作業を進め、その奥で伐木造材を並行するシステムとなっている。また、架設作業に限っては通常、特別な事由がないかぎり作業迅速のため2班で行っている。調査対象とした自走式搬器の仕様を表-1に示す。

作業日報調査は、会社経営記録と基本図を用いて行った。調査項目は、集材作業能率に影響すると考えられる表-2に示す項目である。日報調査結果、集材方法は、いずれも短材集材システムによる下げ荷集材であり、作業種は、間伐、皆伐、風倒木処理に分けられる。なお、表-2の人工数は、1日6時間労働とする。風倒木処理地での伐木造材能率は、伐木造材作業を請け負っていなかったため欠損値となっている。

* 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 Science, The University of Tokyo.

** 日本大学生物資源科学部森林資源科学科

Nihon University, Department of Forest Science and Resources, College of Bioresource Sciences.

表-1 調査した自走式搬器の仕様
Table 1. Specifications of the self-propelled hoist carriage investigated

全長	1850mm
全幅	700mm
全高	1330mm
乾燥重量	375kg
最大巻上げ能力	1380kg
ワイヤ巻込容量	10mm/80m
走行速度	125m/min
走行速度切替装置	自動6段
最大出力	8.5PS/3500rpm
燃料	軽油
燃料タンク容量	12ℓ
無線装置周波数	44/46MHz
無線装置チャンネル数	8

現地調査は、1995年5月31日・6月1・2日（調査地A）、1996年5月25・26・27日（調査地B）、1996年8月5・6・7日（調査地C）に、コンパスによる地形測量と作業時間観測を行った。先山では上下像合致式距離計（東京光学機械社製、距離精度±1%）により、材の巻上げ距離を測定した。また、コンパス測量時にあらかじめ土場からの距離を架線直下に標しておき、集材距離の測定も行った。土場では、集材サイクルごとに材積測定を行った。

調査地Aは、伐区面積2.3ha、33年生スギ・ヒノキ混交林で、目標間伐率30%の定性間伐地である。架設は、林道のヘアピンカーブと沢を横切り、沢沿いに行われた。作業員は、45才の先山作業員（作業経験11年）と、43才の土場作業員（作業経験9年）であった。

調査地Bは、伐区面積9.2ha、57年生と61年生のスギ・ヒノキ混交林と62年生のスギ林で、風倒木処理地であった。調査対象は、この伐区の一部であり、架設は2箇所で行われた。調査を行った架線は、沢と平行な作業道上に架設された。先山作業員は調査地Aと同一で、土場作業員は、観測1日目が調査地Aと同一者、観測2日目が、38才（作業経験15年）であった。

調査地Cは、伐区面積2.03ha、62年生のスギ・ヒノキ混交林で、目標間伐率30%の定性間伐地である。架設は2箇所で行われた。調査を行った架線は、沢と林道を横切り、山頂方向に向かって山腹に架設された。作業員は34才の先山作業員（作業経験13年）と、36才の土場作業員（作業経験2年）であった。調査地の索張りの諸元を表-3に示す。

なお、ここでの中央垂下量、土場上の高さ、最低高は、無負荷の状態では放物線索理論により支間水平距離、支間高低差、原索中央垂下比、索自重から求めている³⁾。

3. 自走式搬器集材作業の作業時間観測結果

1) 要素作業の分類

自走式搬器（以下、搬器と呼ぶ）による集材作業は、以下により構成される。

空搬器走行：無積載の搬器に、土場作業員がリモコン操作によって発進信号を与えて、先山作業員の待つ位置まで移動させる。先山作業員は、自走してきた搬器をリモコン操作によって停止させる。

ワイヤー下げ：停止した搬器の巻込みドラムから、リモコン操作によってワイヤーロープを下ろす。

ワイヤー引出し：材が索直下でない場合には、リモコンを操作してワイヤーロープを引き出しながら歩行する。

荷掛け：引き出されたワイヤーロープの先端にあるフックを、あらかじめ材に巻付けておいたスリングロープに掛ける。

表-2 日報調査結果

Table 2. Summary of daily report

作業種	材積(m ³)	間伐率(%)	最大傾斜(度)	平均傾斜(度)	架設距離(m)	面積(m ²)	DBH	伐道人工	架設人工	人力木寄人工	機械集材人工	集材人工	集材方式	伐道功程(m ² /日・人)	集材功程(m ² /日・人)	総合(m ² /日・人)
皆伐	48,09	100	30	27.5	250	0.60	31.4	7.7	8.0	0.0	4.4	12.4	下げ荷	6.25	3.88	2.39
皆伐	324.04	100	30	25.0	300	1.50	26.5	49.2	19.0	2.1	34.7	55.8	下げ荷	6.59	5.81	3.09
			35	30.0	200	1.00							下げ荷			
間伐	263.74	20	35	32.5	200	0.50	31.4	42.1	23.0	7.1	22.8	52.9	下げ荷	6.26	4.99	2.78
			35	32.5	100	0.40							下げ荷			
			35	32.5	350	1.80							下げ荷			
皆伐	186.26	100	30	25.0	200	1.00	27.0	30.9	10.0	3.8	26.4	40.2	下げ荷	6.03	4.63	2.62
風倒木	90.77	100	30	32.5	300	9.20	36.0	0.0	9.7	0.8	8.1	18.6	下げ荷		4.88	
	85.71	100	35	32.5	256		36.0	0.0	7.0	0.5	6.0	13.5	下げ荷		6.35	
間伐	206.55	30	35	32.5	300	5.32	31.0	31.8	27.7	1.6	21.0	50.3	下げ荷	6.50	4.11	2.52
					250								下げ荷			
					250								下げ荷			
間伐	181.00	25	35	30.0	250	2.03	31.0	40.6	20.1	4.4	16.2	40.7	下げ荷	4.46	4.45	2.23
間伐	72.00	30	35	30.0	200	1.20	31.6	12.6	9.3	6.6	12.1	28.0	下げ荷	5.71	2.57	1.77
間伐	143.00	30	35	30.0	200	1.20	43.1	18.7	15.8	6.2	15.2	37.2	下げ荷	7.65	3.84	2.56
					200								下げ荷			
間伐	143.00	30	35	30.0	300	2.00	29.9	22.5	8.7	4.5	15.3	28.5	下げ荷	6.36	5.02	2.80
間伐	130.24	30	45	33.0	250	2.30	21.4	22.8	10.1	4.5	11.0	25.6	下げ荷	5.71	5.09	2.69
平均	156.20	58	34	30.4	242	2.15	31.4	23.2	14.0	3.5	16.1	33.6	-	6.15	4.63	2.54

(注) 1)材積は、米口集材による
 2)間伐率は、立木本数に対する割合
 3)平均傾斜は、幅をもって表示されていたためスライアンを用いた
 4)最大傾斜は、5度刻み
 5)架設距離は、元柱から先柱までの水平距離

表-3 調査地の索張りの諸元
Table 3. Specifications of the rigging

	調査地A	調査地B	調査地C
支間水平距離(m)	250.4	199.9	178.8
支間高低差(m)	58.4	43.9	64.9
支間斜距離(m)	257.8	204.4	190.3
傾斜角(度)	13	12	20
原索中央垂下比	0.03	0.03	0.03
中央垂下量(m)	7.5	6.0	5.4
元柱高(m)	7.9	8.4	8.0
先柱高(m)	7.7	7.4	8.4
土場位置(元柱からの距離(m))	37.0	5.0	26.0
土場上の索高さ(m)	15.5	8.0	26.0
索の最低高位置(元柱からの距離(m))	105.5	100.0	98.4
主索(mm)	18	18	18
主索自重(kg/m)	1.2	1.2	1.2
走行索(mm)	9	9	9
巻込索(mm)	9	9	9
索の最低高(m)	11.0	6.8	2.6

荷上げ: リモコンを操作してワイヤーロープを巻取り「荷掛け」した材を荷上げる。

実搬器走行: 荷上げが完了した搬器をリモコン操作によって土場方向に進ませる。搬器が土場に到着したら、土場作業者はリモコン操作によって搬器を停止させる。

荷下げ: 停止した搬器から、リモコン操作によって、材をワイヤーロープが弛むまで下ろす。

荷はずし: フックからスリングロープをはずして荷を解く。解き終わったら、スリングロープの一端をフックに掛ける。

ワイヤー上げ: リモコン操作によって、ワイヤーロープを巻取りドラムに巻戻す。

以上の基本的なサイクルの他に、出現回数が少なく不規則に生じる作業がある。土場で桎積み作業を行う際の材の木口をそろえる「土場整理」、荷下げを行うために搬器を少しだけ移動して位置決めをする「土場小移動」、思慮やとびを取りに行ったりするための作業停止（「土場停止」）、偶発的におこる「土場その他」である。一方、先山では、「ワイヤー下げ」や「荷上げ」をスムーズに行うために搬器を少しだけ移動させる「山小移動」、作業者が「荷上げ」前に、安全な場所まで非難する「退避」、偶発的な「山その他」がある。

2) 要素作業時間と作業速度

各調査地の要素作業時間を表-4に、各要素作業ごとのヒストグラムを図-1に示す¹⁾。なお、危険回避のために、巻上げ距離や搬器走行距離が測定不可能となった要素作業は、ヒストグラムのデータから削除した。ヒストグラムの階級値は、スタージェスの公式により決定した。「荷下げ」、「ワイヤー上げ」、「荷上げ」、「ワイヤー下げ」、「実搬器走行」、「空搬器走行」のヒストグラムは、

表-4 自走式搬器集材作業の要素作業時間

Table 4. Operational element time of self-propelled hoist carriage yarding

要素作業	調査地A		調査地B		調査地C	
	要素作業時間(秒)	要素作業割合(%)	要素作業時間(秒)	要素作業割合(%)	要素作業時間(秒)	要素作業割合(%)
実搬器走行	8653	27.03	4534	27.76	6765	31.12
空搬器走行	7759	24.24	3767	23.06	4761	21.90
荷下げ	4096	12.80	2391	14.64	3876	17.83
荷上げ	3948	12.33	2222	13.60	2356	10.84
ワイヤー下げ	2740	8.56	563	3.45	367	1.69
ワイヤー上げ	1969	6.15	653	4.00	1691	7.78
荷掛け	928	2.90	419	2.57	290	1.33
荷はずし	909	2.84	522	3.20	683	3.14
土場整理	260	0.81	95	0.58	258	1.19
ワイヤー引出し	25	0.08	235	1.44	160	0.74
山その他	521	1.63	826	5.06	342	1.57
土場その他	202	0.63	108	0.66	192	0.88
合計	32010	100.00	16335	100.00	21741	100.00

作業速度 (m/sec) から求めた。このときの「実搬器走行」、「空搬器走行」の距離は、観測により得た支間斜距離を用いた。「ワイヤー上げ」の距離は、地面から索までの高さから搬器乾燥重量を鉛直荷重と見なして放物線索理論の単荷重索の公式を用いて求めた垂下量と搬器およびスリングロープの長さを引いた値とした。同様に「荷下げ」の距離は、材の重量と搬器乾燥重量を鉛直荷重とみなして求めた垂下量と搬器およびスリングロープ長より算出した。ワイヤー下げ距離および荷上げ距離は、搬器乾燥重量を鉛直荷重とみなして求めた垂下量と搬器およびスリングロープ長より算出した。なお、材の重量は末口二乗法により求めた材積と生材重量 814 kg/m³ から求めた¹⁵⁾。

自走式搬器集材作業の各工程は複雑に連結しあっているが、要素作業連結強度^{14, 17)}を用いて工程間の連結を忠実に再現することができる(表-5)。

ここで、作業連結強度 C は、要素作業 A の発生度数を O_A、要素作業 A に続いて発生した要素作業 B の度数を O_B として、

$$C = O_B / O_A$$

より、求めることができる¹⁴⁾。

要素作業連結強度から、「ワイヤー上げ」の後に「空搬器走行」が、「土場小移動」の後に「荷下げ」が、「ワイヤー引出し」の後に「荷掛け」が、必ず行われることが分かる。一方、「ワイヤー下げ」の後は、連結する可能性のある要素作業が「荷掛け」、「ワイヤー引出し」、「山その他」など 8 項目もある。また、他の要素作業が最も多く連結してくる要素作業は、搬器の位置を決定するのに行われる「山小移動」である。林内にある様々な障害を頻繁に避ける必要があることがうかがえる。

「ワイヤー上げ」で 1 サイクルが終了すると考えると、後記するように、この要素作業連結強度をシミュレーション構築の基礎とすることができる。

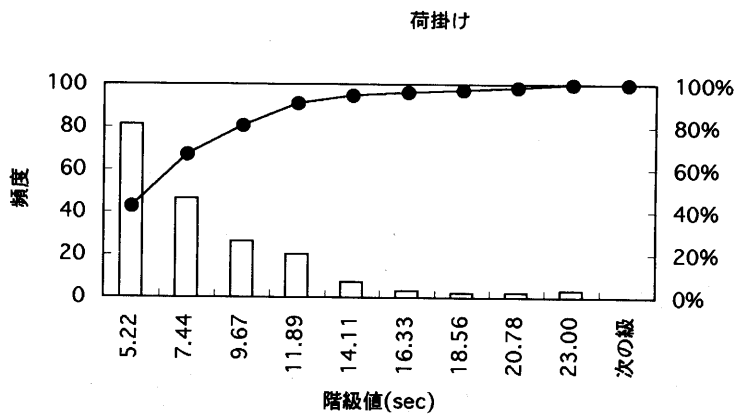
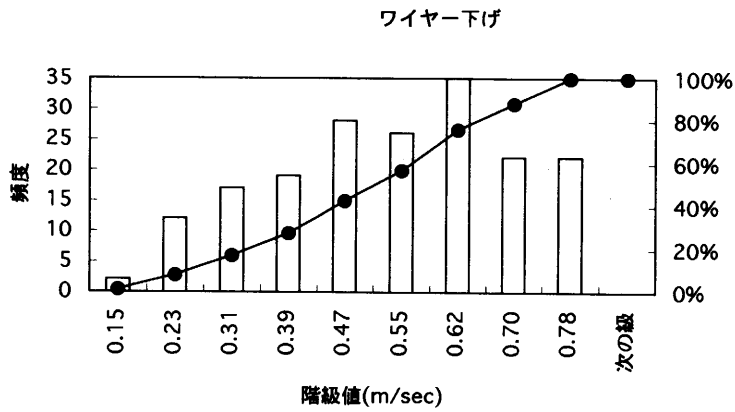
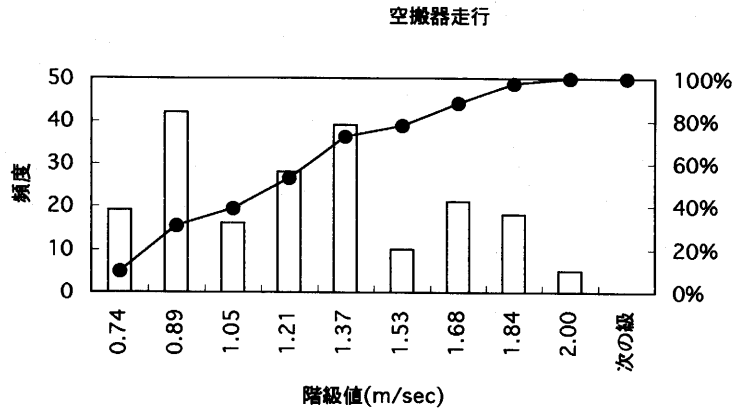


Fig. 1

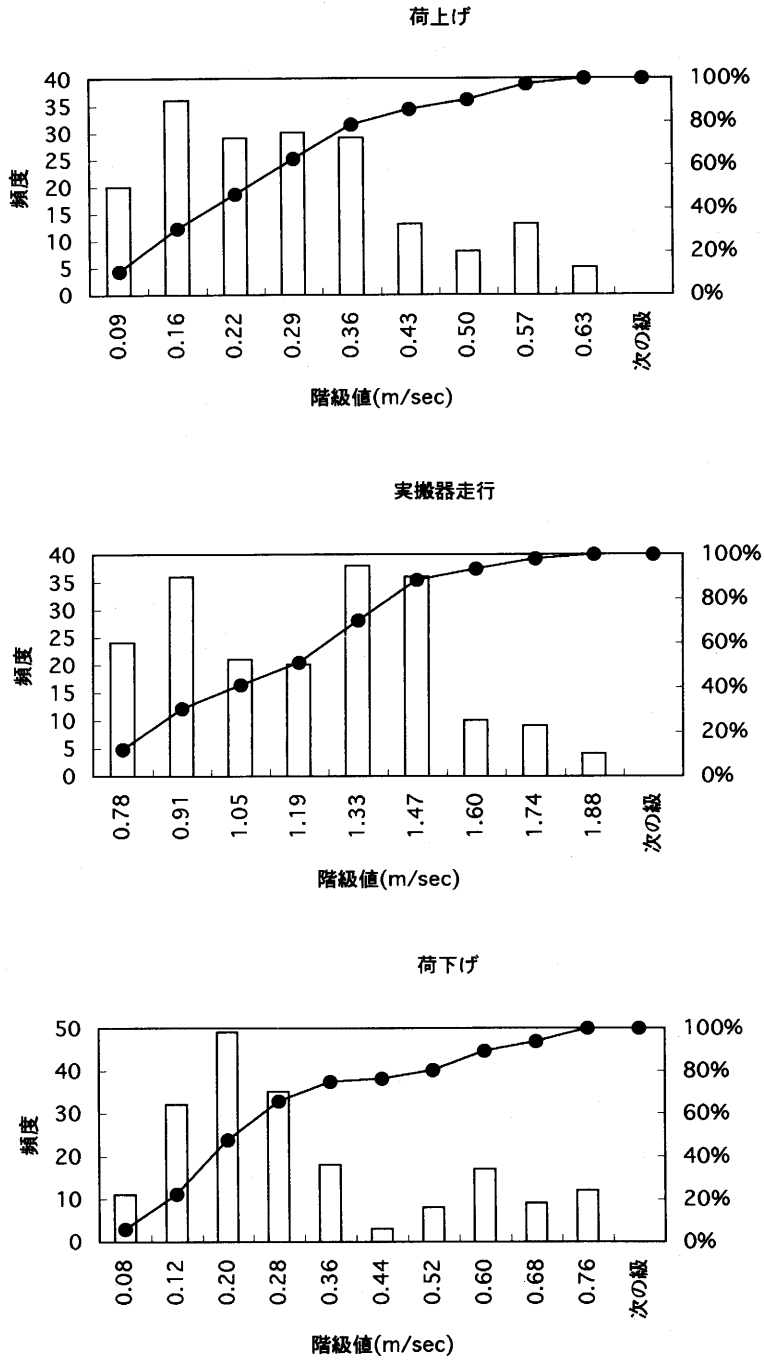


Fig. 1

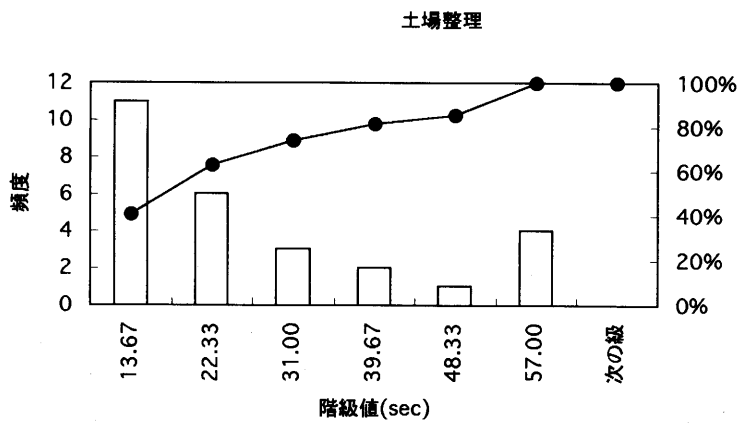
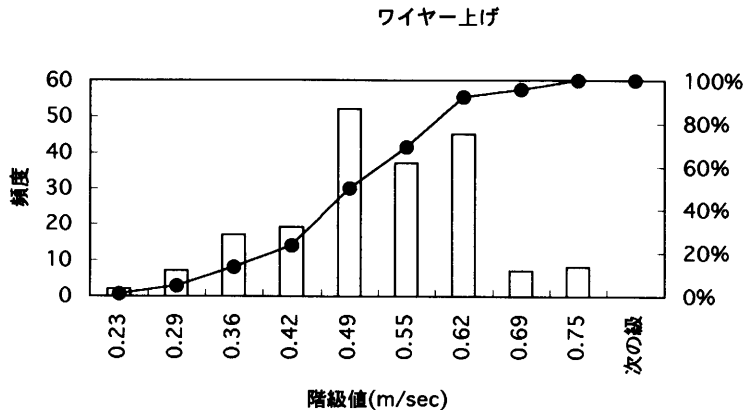
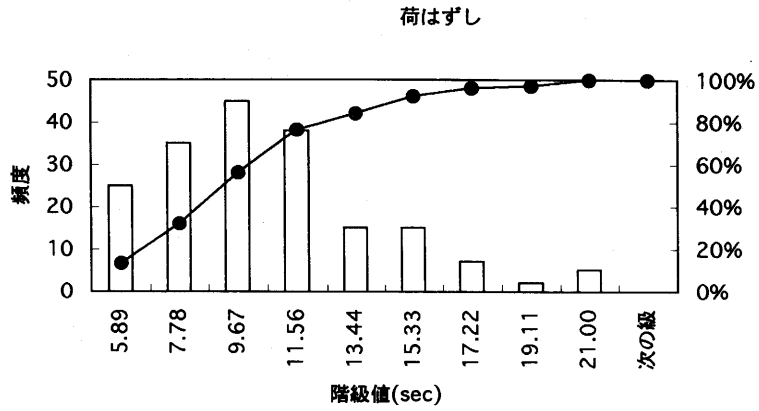


Fig. 1

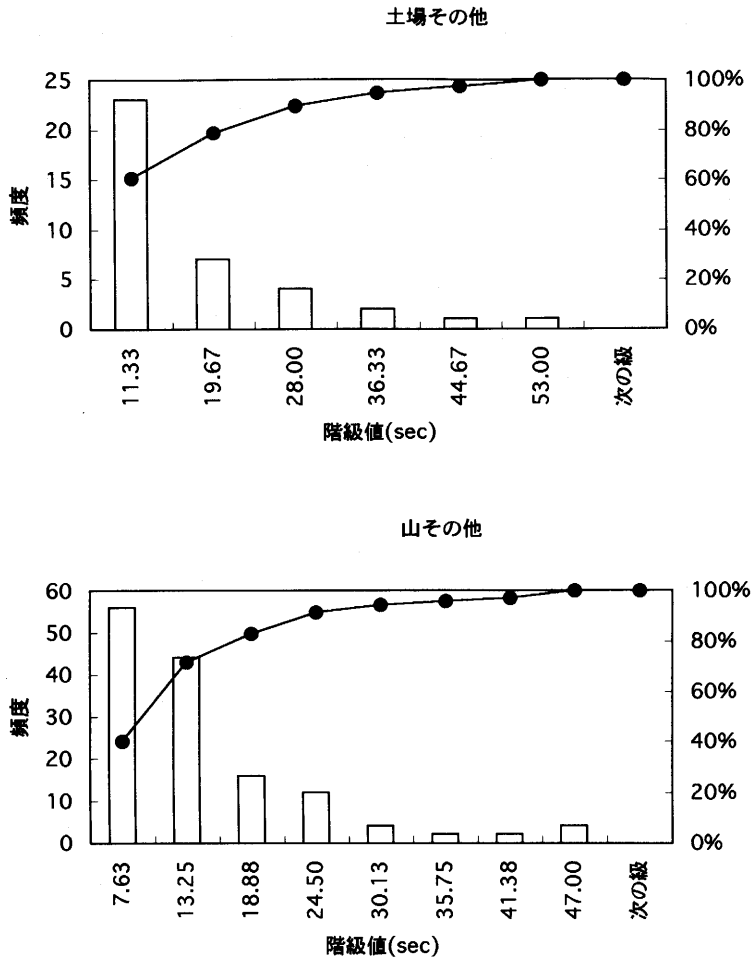


図-1 各要素作業のヒストグラム。

Fig. 1. Histogram of operational element.

3) 作業能率

各調査地の作業能率を表-6 に示す。1 荷当たり材積が大きく、1 サイクル当たりの「実搬器走行」、「空搬器走行」、「ワイヤー上げ」、「ワイヤー下げ」時間が短い調査地 B の作業能率が最も良い。一方、調査地 C は平均集材距離が長く、索傾斜角が大きいため 1 サイクル当たりの「実搬器走行」、「空搬器走行」時間が長く、土場上の索も高いため「荷下げ」、「ワイヤー上げ」時間が長く、作業能率は悪い。また、1 サイクル当たりの燃料消費量も上記の理由から調査地 C が最も多い。

4. 人力木寄せ作業の作業時間観測

1) 要素作業の分類

自走式搬器の主索直下まで材を集積するための人力木寄せは、調査地 A では作業員 2 人が同

表-6 各調査地の作業能率
Table 6. Operational efficiency

	調査地A	調査地B	調査地C
サイクル数	96	54	47
平均集材距離(m)	87.2	110.4	122.9
平均巻上げ距離(m)	14.2	7.2	5.1
燃料消費量(ℓ)	8.6	7.0	7.0
集材本数(スギ)	398	137	113
(ヒノキ)	87	10	0
1本当たり材積(m ³)	0.09	0.20	0.16
1荷当たり材積(m ³)	0.37	0.50	0.40
集材材積(m ³)	35.1	27.0	18.6
作業能率(m ³ /日)	23.7	35.7	18.5

注)作業能率に、架設撤去および人力木寄せ作業は含まない

時に個別に、とびを用いて斜面下方に材を引きよせ、滑落させながら進めていた。対象林地は、最大傾斜が43度と急傾斜であったため、林内移動は困難であったが、木寄せ作業は容易に進められた。

人力木寄せの要素作業は、以下により構成される。

準備: 作業を行う前に道具をそろえたり、作業手順を検討したりする。

歩行: 林内で作業を行わずに歩行する。

木寄せ: とびを用いて材を木寄せする。

まくり: 手で直接、材を持ち上げて木寄せす

る。

枝払い: ナタを用いて、造材し損なった枝を払う。

林床整理: 枝条など作業の障害となるものを除去する。

手待ち: 立ち止まって材が滑落していく様子を確認していたり、次の作業手順を考えたりする。

2) 要素作業時間

両作業者を合わせた要素作業時間を表-7に、要素作業連結強度を表-8に示す。

人力木寄せ作業の要素作業時間は、作業者によって異なっていたが、作業者Aは急傾斜地で、作業者Bは急傾斜地および緩傾斜地で作業を行っていたことによる。緩傾斜地で木寄せを行うには、材を地引きしなければならぬが、急傾斜地では、材が滑落するので地引きする必要がなく、木寄せ時間は短くてすむ。したがって、「木寄せ」の1回当たりの要素作業時間が、作業者Bの方が長くなっている。

要素作業連結強度から、「準備」の後は「歩行」以外には連結しないが、他の要素作業は、「歩

表-7 人力木寄せの要素作業時間

Table 7. Proportion of operational element time of manpower prehauling

要素作業	要素作業時間(秒)	要素作業割合(%)	出現回数	1回当たりの時間(秒)
木寄せ	9552	51.48	146	65
歩行	4054	21.85	151	27
林床整理	2066	11.13	24	86
手待ち	1289	6.95	41	31
準備	740	3.99	2	370
まくり	541	2.92	21	26
枝払い	313	1.69	9	35
合計	18555	100.00	394	-

表-8 人力木寄せの要素作業連結強度

Table 8. The transition probabilities among the operational elements of manpower prehauling

	木寄せ	歩行	林床整理	手待ち	準備	枝払い	まくり	作業始め
木寄せ		70.2%	36.0%	47.6%		33.3%	28.6%	33.3%
歩行	71.2%		44.0%	40.5%	100.0%	22.2%	61.9%	33.3%
林床整理	3.4%	11.3%		2.4%		22.2%		
手待ち	16.4%	10.6%	4.0%				4.8%	
準備								33.3%
枝払い	2.7%		16.0%				4.8%	
まくり	5.5%	6.0%		4.8%		22.2%		
作業終り	0.7%	2.0%		4.8%				

行」および「木寄せ」を中心として、各要素作業が連結していることが明かにされた。

3) 作業能率

作業者Bの木寄せ本数の観測が危険をとめない不可能であったので、作業能率は作業者Aのデータから算出する。

作業者Aは作業時間9286秒で253本の材を木寄せした。このとき、主体作業時間は、「木寄せ」と「まくり」であり全体の94.6%を占めている。「木寄せ」は92回、「まくり」は21回の合計113回出現している。この間に、253本の材を木寄せしたので、木寄せ1回当たり2.24本行っていたことになる。一方、作業者Bの「木寄せ」は54回、「まくり」は0回であることから、仮に1回当たりの木寄せ本数を2.24本とすると、作業者Bは121本の木寄せを行ったものと予測することができる。したがって対象地での、両者を合わせた平均作業能率は、435本/人・日または39.15 m³/人・日となる。

5. 自走式搬器集材作業の統計的分析

集材作業において労働投入量は、作業コスト、作業者への作業の割振り、機械の稼働率、年間の作業量等に関わり、作業計画を立案するうえで重要な要素となる。

労働投入量の予測は、一般には踏査により行われ、出材材積、材の胸高直径、林地傾斜、集材距離、横取り距離、材の状態等から経験的に判断される。特に、小規模皆伐および間伐では、労働投入量の予測に使用できる経費は少ないことから、細密な測量や計測は困難であり踏査者の経験に頼るところが大きい。したがって、経験が乏しい場合、過誤を犯したり、予測に多額の経費を要したりする。ここでは、自走式搬器集材作業に影響を及ぼす要因を明らかにするとともに、踏査によって容易に得られる因子を基に、自走式搬器集材作業に必要な労働投入量を予測することを目的とした統計的解析を試みる。まず、単相関分析により、要素間の相関関係を求めた¹⁾。次に、重回帰分析により、集材人工数および架設撤去人工数を目的変数として、労働投入量を予測する重回帰式を求めた^{1,2)}。

表-9 単相関分析結果
Table 9. Correlation coefficients

単相関	間伐率 (%)	面積 (ha)	平均傾斜 (度)	最大傾斜 (度)	材積 (m ³)	DBH (cm)	架設距離 (m)	架設本数 (本)	架設撤去 (人工)	人力木寄せ (人工)	自走搬器 (人工)	集材 (人工)	伐木造材 (人工)
間伐率	1.00												
面積	0.26	1.00											
平均傾斜	*-0.61	0.45	1.00										
最大傾斜	-0.49	0.15	*0.67	1.00									
材積	0.10	0.17	-0.01	0.04	1.00								
DBH	-0.10	0.17	0.12	-0.37	-0.17	1.00							
架設距離	-0.10	0.51	0.50	0.03	0.60	0.23	1.00						
架設本数	-0.16	0.33	0.45	0.00	*0.62	0.31	*0.96	1.00					
架設撤去	-0.28	0.34	0.40	0.04	*0.67	0.19	*0.81	**0.81	1.00				
人力木寄せ	**0.74	-0.49	0.21	0.28	0.03	0.14	-0.22	-0.04	0.04	1.00			
自走搬器集材	0.20	0.00	-0.32	-0.14	*0.91	-0.22	0.39	0.43	0.47	0.05	1.00		
集材	-0.13	0.09	0.05	-0.01	*0.92	-0.01	*0.65	*0.70	**0.79	0.21	**0.89	1.00	
伐木造材	-0.21	-0.36	-0.17	0.06	*0.78	-0.38	0.25	0.31	0.55	0.29	**0.77	**0.78	1.00

注)無相関の検定 * : 5% ** : 1%

1) 単相関分析

表-2 の日報調査結果から求めた単相関分析結果を表-9 に示す。1%の有意水準で相関がある組み合わせとして、間伐率と人力木寄せ人工，出材材積と自走式搬器集材人工，出材材積と集材人工，出材材積と伐木造材人工，架設距離と架設本数，架設距離と架設撤去人工，架設本数と架設撤去人工，架設撤去人工と集材人工，自走式搬器集材人工と集材人工，自走式搬器集材人工と伐木造材人工，集材人工と伐木造材人工が得られた。また，5%の有意水準で相関がある組み合わせとして，間伐率と平均傾斜，平均傾斜と最大傾斜，出材材積と架設本数，出材材積と架設撤去人工，架設距離と集材人工，架設本数と集材人工が得られた。また，間伐率と平均傾斜，人力木寄せ人工は，負の相関であった。

2) 重回帰分析

ア. 集材人工数

踏査時に予測可能な間伐率，出材材積，材の胸高直径，最大傾斜，平均傾斜，架設本数，架設距離，伐区面積を説明変数として，これらの組み合わせから，集材人工数および架設撤去人工数を目的変数とする重回帰式を求める。なお，説明変数に対しては変数増減法（変数選択の F 値は F-in, F-out とともに 2.0）により変数選択を行った。

その結果，得られた重回帰式は，

$$y_1 = 0.1605x_1 - 0.1185x_2 - 0.7393x_3 + 41.64$$

x_1 : 出材材積, x_2 : 間伐率, x_3 : 最大斜面傾斜

この重回帰式の説明変数間に高い相関はなく，偏回帰係数の符号と目的変数との単回帰係数の符号は一致しており，多重共線性は発生していない。重相関係数は 0.97 であり，分散分析の結果から 1% の有意水準で予測に役立つといえる。

この重回帰式から求めた理論値と観測値の残差は -6.66 から 4.94 までの幅がある。自走式搬器による集材作業を 2 人 1 組として，これを日数に直すと 3.3 日短縮から 2.5 日延滞までの幅を持つことになる。

イ. 架設撤去人工数

同様に分析を行った結果，得られた重回帰式は，

$$y_2 = 0.0272x_4 + 4.728$$

x_4 : 架設距離

重相関係数は 0.81 であり，分散分析の結果から 1% の有意水準で予測に役立つといえる。

この重回帰式から求めた理論値と観測値の残差は -4.18 から 10.58 までの幅がある。自走式搬器による架設撤去作業は，一般的に 4 人 2 組であるので，日数に直すと 1.0 日短縮から 2.6 日延滞までの幅を持つことになる。

3) 考察

自走式搬器による短材集材システムは，前述の重回帰式により集材の場合，-3.3~2.5 日，架設撤去の場合，-1.0~2.6 日の範囲で労働投入量を予測できるとの結果を得た。同じ 1 人工の差でも，作業規模が小さければ，その相対誤差は大きくなる。特に，自走式搬器は，往々にして作業規模が小さいので注意が必要である。今後，この労働投入量の精度について，さらに検討する

必要がある。また、偏相関係数は、出材材積、間伐率、最大斜面傾斜の順で高いことから、踏査を行う際には、出材材積の見積もりが最も重要となる。したがって、間伐率も正確に把握する必要がある。

6. シミュレーションモデルによる自走式搬器集材作業方法の検討

1) シミュレーションモデルの構築

自走式搬器による集材作業人工数は、重回帰分析により集材材積、間伐率、最大斜面傾斜から予測可能であるという結果を得た。しかし、他の地域の現場に適応しうるとは限らず、また作業システム決定の際に、踏査者が必ずしも最良の作業システム、作業方法、索の架設位置を選択するとは限らない。ここでは、上記の検討結果から、作業能率に影響を及ぼすと考えられる索の架設位置、造材方法、斜面傾斜、集材方法を変化させ、その作業能率について、シミュレーションモデルを構築することにより最適な作業方法および作業システムを見出すことにする。

ア. 自走式搬器集材作業

自走式搬器集材作業では、架線位置が要素作業時間に大きく影響を及ぼす。架線位置の影響を受ける要素作業として、「空搬器走行」「実搬器走行」「ワイヤー上げ」「荷下げ」「ワイヤー下げ」「ワイヤー引出し」「荷上げ」がある。「空搬器走行」「実搬器走行」は集材距離が、「ワイヤー上げ」「荷下げ」は土場における索の高さが、「ワイヤー下げ」は集材地点における索の高さが、「ワイヤー引出し」は材から索直下までの距離が、「荷上げ」は集材地点における材と索の距離が、それぞれ影響を及ぼす。したがって、これらの距離に対して、各要素作業時間を算出することにより、架線位置に対する作業能率を予測することができる。

いま、図-2 に示すように、辺の長さ X, Y , 斜面傾斜 θ の矩形伐区モデルを想定し、3次元直交

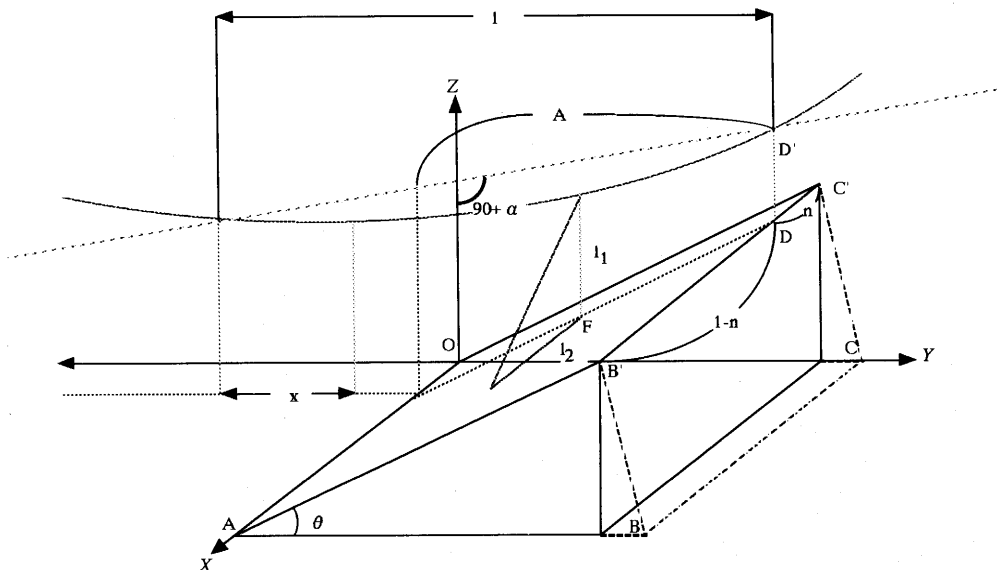


図-2 傾斜方向に索を1本架設する場合.

Fig. 2. Rigging location straight up the slope.

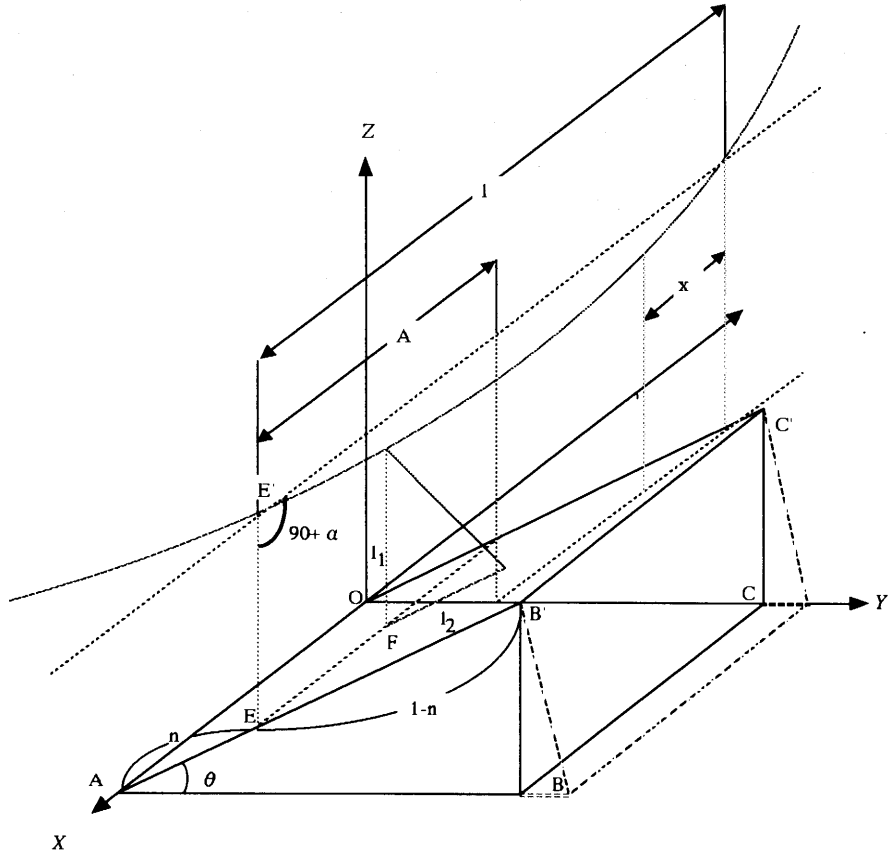


図-3 等高線方向に索を1本架設する場合。

Fig. 3. Rigging location parallel to the center line.

座標系において長さ X の1辺が x 軸に接し、長さ Y の1辺が yz 平面内に位置するようにおき、高さ H の先柱から傾斜角 α で放物線索^{3,4)}を架設したときの各距離を求めることにする。また、先山作業では、作業員の歩行距離が最短となるように横取り作業を行うものとして各距離を以下のように定義する。

材から索直下までの距離： 放物線を斜面上に真上から投影したときにできる投影線から材への垂線。

集材地点における索の高さ： 前述の投影線上の点とその真上にある放物線との距離。

集材地点における材と索の距離： 集材地点における放物線から材までの距離。

土場における索の高さ： 土場地面からその真上にある索までの距離。

集材距離： 集材地点から土場までの支間斜距離。

この伐区に、傾斜方向に索を1本架設する場合(図-2)、等高線方向に索を1本架設する場合(図-3)、伐区に対して対角線上に索を1本架設する場合(図-4)の3通りの架設状況を想定する。

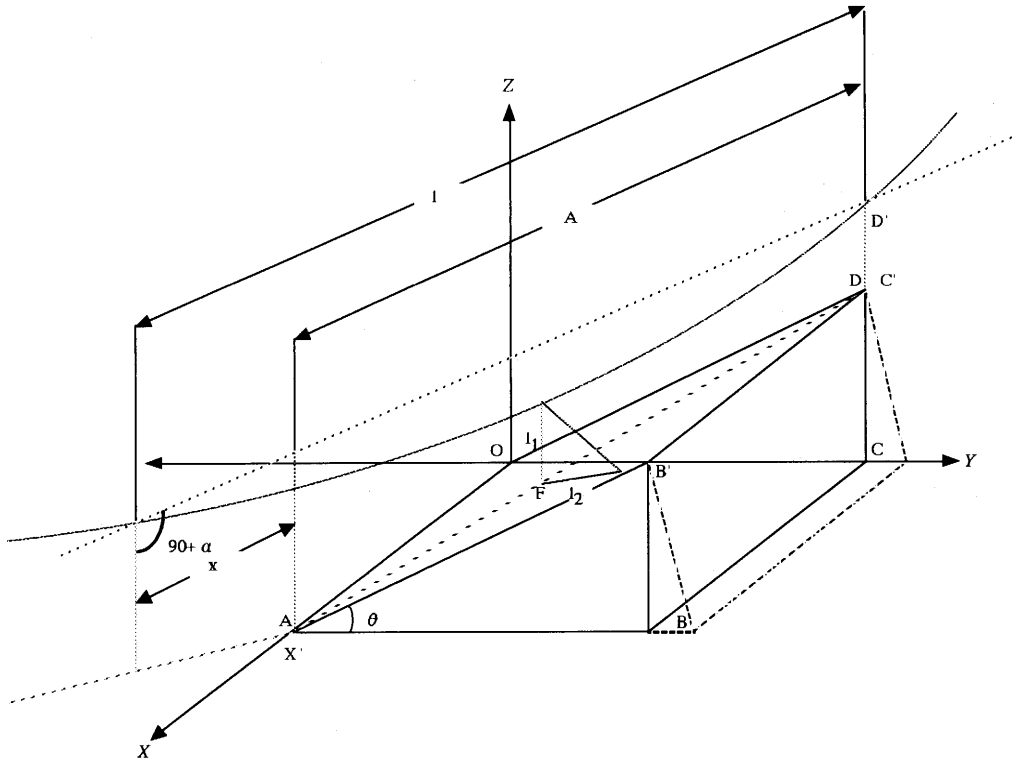


図-4 伐区に対して対角線上に索を1本架設する場合。
Fig. 4. Rigging diagonally located for the cutting area.

(1) 傾斜方向に索を架設する場合

先柱を伐区の最上端(辺 B'C'上)に架設し、この点を $D(nX, Y \cos \theta, Y \sin \theta)$ ($0 \leq n \leq 1$) とすれば、先柱先端の座標は $(nX, Y \cos \theta, Y \sin \theta + H)$ となる。ただし、 n は先柱の位置を与えるパラメータ。

この点から、 yz 平面に平行で、 xy 平面に角 α をなす放物線は次式で表される。

$$(nX, Y \cos \theta, Y \sin \theta + H) + t(0, -1, -\tan \alpha) - (0, 0, 4(l-t)tf/l^2)$$

t : 係数, l : 支間斜距離

また、放物線上の点の z 座標が、 $Y \sin \theta + H - t \sin \alpha - 4(l-t) \frac{tf}{l^2}$

投影線上の点の z 座標が、 $Y \sin \theta - t \cos \alpha \tan \theta$

で表されることから、放物線の斜面上への投影線から放物線までの索高 l_1 は、次式で表される。

$$l_1 = H - t \sin \alpha - 4(l-t) \frac{tf}{l^2} + t \cos \alpha \tan \theta$$

このとき、伐区内における平均索高 $l_{1 \text{ mean}}$ は、次式で表される。

$$l_{1 \text{ mean}} = \frac{1}{A} \int_0^A \left(H - t \sin \alpha - 4(l-t) \frac{tf}{l^2} + t \cos \alpha \tan \theta \right) dt$$

$$=H - \frac{1}{2} A^2 \sin \alpha - \frac{2Af}{l} + \frac{4A^2 f}{3l^2}$$

ただし、 $A = \frac{Y \cos \theta}{\cos \alpha}$ (A: 索の斜距離のうちで、斜面上に投影可能な距離)

この放物線を斜面上に投影すると、X軸は nX で一定なので、投影線と斜面上の任意の点($u, v, v \tan \theta$)との横取り距離 l_2 は、次式で表される。

$$l_2 = |nX - u|$$

したがって、平均横取り距離 $l_{2 \text{ mean}}$ は、次式で表される。

$$l_2 = \frac{1}{X} \int_0^X |nX - u| du = \frac{X}{2} (2n^2 - 2n + 1)$$

また、材の巻上げは投影線に対して垂直方向に行うことから、材から放物線までの巻上げ距離 l_3 は、次式で表される。

$$l_3 = \sqrt{(nX - u)^2 + \left(Y \sin \theta + H - (Y \cos \theta - v) \sin \alpha - 4(l - Y \cos \theta + v) \left(\frac{(Y \cos \theta - v)f}{l^2} \right) - v \tan \theta \right)^2}$$

したがって、平均巻上げ距離 $l_{3 \text{ mean}}$ は次式で表される。

$$l_{3 \text{ mean}} = \frac{1}{X} \iint \sqrt{(nX - u)^2 + \left(Y \sin \theta + H - (Y \cos \theta - v) \sin \alpha - 4(l - Y \cos \theta + v) \left(\frac{(Y \cos \theta - v)f}{l^2} \right) - v \tan \theta \right)^2} dudv$$

また、土場における索の高さは、次式で表される。

$$l_4 = Y \sin \theta + H - \tan \alpha (L - x) - \frac{4sx(1 - (x/L))(1 + 2n)}{\sqrt{1 + 12k(1 - k)(n + n^2)}}$$

ただし、 $n = p/wL$, $k = x/L$

L: 支間水平距離, x: 元柱からの水平距離, s: 垂下比, p: 鉛直方向の集中荷重,

w: 索自重

また、平均集材距離 $l_{5 \text{ mean}}$ は、次式で表される。

$$l_{5 \text{ mean}} = \frac{(L - x - Y \cos \theta)}{\cos \alpha} + \frac{A}{2}$$

(2) 等高線方向に索を架設する場合

AC'間の点E($X, nY \cos \theta, nY \sin \theta$) (ただし $0 \leq n \leq 1$)のz座標を正の方向にHだけ移動した点E'は、($X, nY \cos \theta, nY \sin \theta + H$)となる。傾きが α で点E'を通り、xz平面と平行な放物線は、次式で表される。

$$(X, nY \cos \theta, nY \sin \theta + H) + t(-1, 0, -\tan \alpha) - (0, 0, 4(l-t)tf/l^2)$$

$$\text{放物線上の点のz座標が } nY \sin \theta + H - t \sin \alpha - 4(l-t) \frac{tf}{l^2}$$

投影線上の点のz座標が $nY \sin \theta$

で表せることから、放物線の斜面上への投影線から放物線までの索高 l_1 は、次式で表される。

$$l_1 = H - t \sin \alpha - 4(l-t) \frac{tf}{l^2}$$

このとき、伐区内における平均索高 $l_{1 \text{ mean}}$ は、次式で表される。

$$l_{1 \text{ mean}} = \frac{l}{A} \int_0^A \left(H - t \sin \alpha - 4(l-t) \frac{tf}{l^2} \right) dt$$

$$= H - \frac{1}{2} A \sin \alpha - \frac{2Af}{l} + \frac{4A^2f}{3l^2}$$

ただし、 $A = \frac{X}{\cos \alpha}$ (A : 索の斜距離のうちで、斜面に投影可能な距離)

この放物線を斜面に投影すると、 Y は $nY \cos \theta$ で一定なので、投影線と斜面上の任意の点 $(u, v, v \tan \theta)$ との横取り距離 l_2 は、次式で表される。

$$l_2 = \sqrt{(nY \cos \theta - v)^2 + (nY \sin \theta - v \tan \theta)^2}$$

平均横取り距離 $l_{2 \text{ mean}}$ は、次式で表される。

$$l_{2 \text{ mean}} = \frac{1}{Y} \int_0^Y \sqrt{(nY \cos \theta - v)^2 + (nY \sin \theta - v \tan \theta)^2} dv$$

$$= \frac{Y}{2} (2n^2 - 2n + 1)$$

材の巻上げ距離は投影線に対して垂直方向となることから、材と放物線との距離 l_3 は、次式で表される。

$$l_3 = \sqrt{(nY \cos \theta - v)^2 + \left(nY \sin \theta + h - (X-u) \sin \alpha - 4(l-(X-u)) \frac{(X-u)f}{l^2} - v \tan \theta \right)^2}$$

平均巻上げ距離 $l_{3 \text{ mean}}$ は、次式で表される。

$$l_{3 \text{ mean}} = \frac{1}{Y} \iint \sqrt{(nY \cos \theta - v)^2 + \left(nY \sin \theta + h - (X-u) \sin \alpha - 4(l-(X-u)) \frac{(X-u)f}{l^2} - v \tan \theta \right)^2} dudv$$

土場における索の高さ l_4 および平均集材距離 $l_{5 \text{ mean}}$ は、次式で表される。

$$l_4 = nY \sin \theta + H - \tan \alpha (L - x) - \frac{4sx(1 - (x/L))(1 + 2n)}{\sqrt{1 + 12k(1 - k)(n + n^2)}}$$

$$l_{5 \text{ mean}} = \frac{(L - x - X)}{\cos \alpha} + \frac{A}{2}$$

(3) 伐区に対して対角線上に索を架設する場合

傾き α の放物線が、点 D' を通り、 $AC'D$ を含む平面内にあるとき、放物線は次式で表される。

$$(0, Y \cos \theta, Y \sin \theta + H) + t(X, -Y \cos \theta, -W) - (0, 0, 4(l-t)tf/l^2)$$

ただし、 $W = \tan \alpha \sqrt{X^2 + Y^2 \cos^2 \theta}$

$$\text{放物線上の点の } z \text{ 座標が } Y \sin \theta + H - \frac{tW}{\sqrt{\frac{X^2 + Y^2 \cos^2 \theta}{\cos^2 \alpha}}} - 4(l-t) \frac{tf}{l^2}$$

$$\text{投影線上の点の } z \text{ 座標が } Y \sin \theta - \frac{tY \sin \theta}{\sqrt{X^2 + Y^2 \cos^2 \theta + W^2}}$$

で表せることから、この放物線の斜面上への投影線から放物線までの索高 l_1 は、次式で表される。

$$l_1 = H - \frac{tW}{\sqrt{\frac{X^2 + Y^2 \cos^2 \theta}{\cos^2 \alpha}}} - 4(l-t) \frac{tf}{l^2} + \frac{tY \sin \theta}{\sqrt{X^2 + Y^2 \cos^2 \theta + W^2}}$$

伐区内における平均索高 $l_{1 \text{ mean}}$ は、次式で表される。

$$\begin{aligned} l_{1 \text{ mean}} &= \frac{1}{A} \int_0^A \left(H - \frac{tW}{\sqrt{\frac{X^2 + Y^2 \cos^2 \theta}{\cos^2 \alpha}}} - 4(l-t) \frac{tf}{l^2} + \frac{tY \sin \theta}{\sqrt{X^2 + Y^2 \cos^2 \theta + W^2}} \right) dt \\ &= H - \frac{AW}{2\sqrt{\frac{X^2 + Y^2 \cos^2 \theta}{\cos \alpha}}} - 2f \left(Al - \frac{2}{3} A^2 \right) + \frac{1}{2} Y \sin \theta \end{aligned}$$

ただし、 $A = \frac{\sqrt{X^2 + Y^2 \cos^2 \theta}}{\cos \alpha}$ (A: 索の斜距離のうちで、斜面に投影可能な距離)

この放物線を斜面に投影すると、投影線と斜面上の任意の点 $(u, v, v \tan \theta)$ との横取り距離 l_2 は、次式で表される。

$$l_2 = \sqrt{(qX - u)^2 + \left(\frac{XY \cos \theta (X - u) + vY^2}{X^2 + Y^2} - v \right)^2 + \left(\frac{XY \sin \theta (X - u) + vY^2 \tan \theta}{X^2 + Y^2} - v \tan \theta \right)^2}$$

ただし、 $q = \frac{uX + Y^2 - vY \left(\frac{1}{\cos \theta} \right)}{X^2 + Y^2}$

平均横取り距離 $l_{2 \text{ mean}}$ は、次式で表される。

$$\begin{aligned} l_{2 \text{ mean}} &= \frac{1}{XY} \iint \sqrt{(qX - u)^2 + \left(\frac{XY \cos \theta (X - u) + vY^2}{X^2 + Y^2} - v \right)^2 + \left(\frac{XY \sin \theta (X - u) + vY^2 \tan \theta}{X^2 + Y^2} - v \tan \theta \right)^2} dudv \\ &= \frac{Y}{3\sqrt{(Y/X)^2 + 1}} \end{aligned}$$

材と放物線との巻上げ距離 l_3 および平均巻上げ距離 $l_{3 \text{ mean}}$ は、次式で表される。

$$l_3 = \sqrt{(qX - u)^2 + \left(\frac{XY \cos \theta (X - u) + vY^2}{X^2 + Y^2} - v \right)^2 + \left(Y \sin \theta + H - qW - \frac{4f}{l^2} q(l - q) - v \tan \theta \right)^2}$$

$$\begin{aligned} l_{3 \text{ mean}} &= \frac{1}{XY} \iint \sqrt{(qX - u)^2 + \left(\frac{XY \cos \theta (X - u) + vY^2}{X^2 + Y^2} - v \right)^2 + \left(Y \sin \theta + h - qW - \frac{4f}{l^2} q(l - q) - v \tan \theta \right)^2} dudv \end{aligned}$$

ただし、 $q = \frac{uX + Y^2 - vY \left(\frac{1}{\cos \theta} \right)}{X^2 + Y^2}$

土場における索の高さ l_4 および平均集材距離 $l_{5 \text{ mean}}$ は、次式で表される。

$$l_4 = Y \sin \theta + H - \tan \alpha (L - x) - \frac{4sx(1-x/L)(1+2n)}{\sqrt{1+12k(1-k)(n+n^2)}}$$

$$l_{5 \text{ mean}} = \frac{(L-x-\sqrt{X^2+Y^2 \cos^2 \theta})}{\cos \alpha} + \frac{A}{2}$$

イ. 人力木寄せ作業

人力木寄せ作業は、地引き作業とつき落とし作業に分類することができる。地引きによる人力木寄せ作業は、既往の研究により以下のように定めることにする¹¹⁾。

1本当たり V_T m³/本の材を1人で最長 L_0 (m), 地引き作業するときの平均作業能率

Ep (m³/人・時) は,

$$Ep = V_T / \{L_0(1/Vp + 1/V_0)/2 \times 60\}$$

ただし, V_0 : 無負荷時上り歩行速度 (m/分)

Vp : 斜面上の木寄速度 (m/分)

となる。ここで

$$Vp = 42.42 - 1.470Fp$$

$$Fp = W(\mu \cos \theta - \sin \theta)$$

$$W = 814 \times l \times Dt^2 \text{ (スギ: 生材重量 814 kg/m}^3\text{)}$$

W : 材の重量 (kg), μ : 材と林地の動摩擦係数, θ : 木寄区間の勾配 (度), l : 材長 (m),

Dt : 末口直径 (m)

とし, $\mu = 1/(k_2 + k_3W)$ において, $k_2 = 1.381$ (末口引き), $k_2 = 1.081$ (元口引き), $k_3 = 0.0041$ (末口引き), $k_3 = 0.0044$ (元口引き) とし, 平均的な丸太の大きさを $l = 4$ m, $Dt = 15$ cm とすると, 上式により

$$W = 73.26 \text{ kg, 末口引き } \mu = 0.59, \text{ 元口引き } \mu = 0.71 \text{ となる。}$$

しかるに現実には, より谷側に近い方を引くことから, 末口引きと元口引きの総和平均を動摩擦係数として使用し, $\mu = 0.65$ とすると

$$Vp = 42.42 - 107.69(0.65 \times \cos \theta - \sin \theta)$$

となる。また, 調査結果より $V_T = 0.09$ m³/本,

$$\text{無負荷時上り速度 (m/分)} = -1.5454x + 76.749 \text{ ただし, } x = \text{斜面勾配 (度)}$$

であったことから, 平均作業能率 Ep (m³/人・時) は,

$$Ep = 0.09 / \{L_0(1/(42.42 - 107.69(0.65 \times \cos \theta - \sin \theta)) + 1/(-1.542x + 76.722))/2 \times 60\}$$

となる。

一方, つき落とし作業は, 丸太が静止状態から解放されたときに滑落するものと仮定すると, $\mu = 0.65$ に対しては斜面傾斜が 33 度以上になると, 丸太の滑落が生じる。したがって, このときの平均作業能率は, つき落とす丸太の本数を n , 丸太 1 本当たりのつき落とし時間 (秒) を T_1 , 歩行時間 (秒) を T_2 とすると,

$$Ep = 3600 n V_T / (T_1 + T_2)$$

で表される。

ここで, 木寄せ作業区域を傾斜方向 (縦) に Y m, 等高線方向 (横) に X m として, この中に一樣に n 本の丸太があると仮定すると (図-5), 丸太 1 本当たりの面積 S , 丸太と丸太の隣接距離

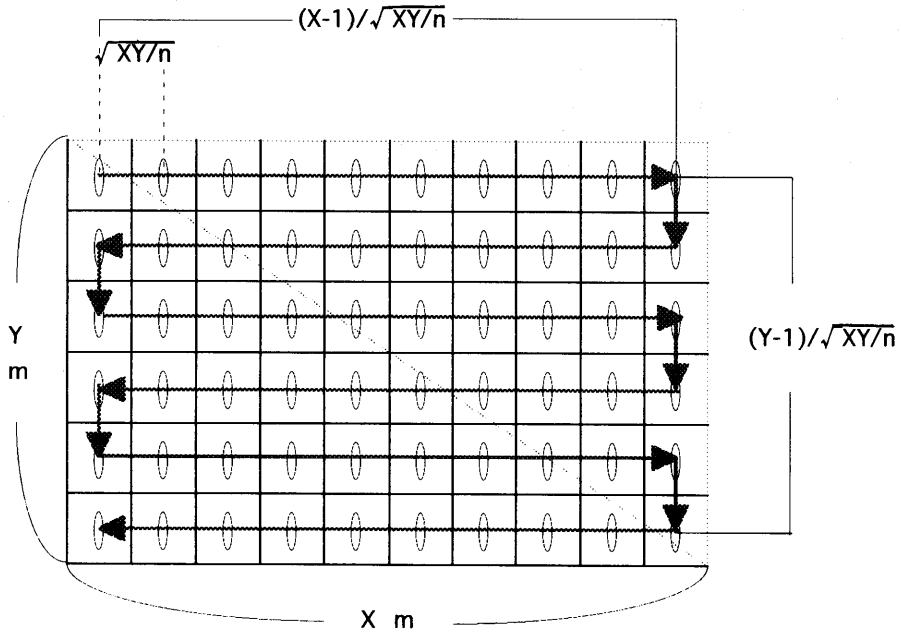


図-5 人力木寄せの作業モデル.

Fig. 5. A simulation model of manpower prehauling.

は、それぞれ

$$S = XY/n \text{ (m}^2/\text{本)}$$

$$\sqrt{XY/n} \text{ (m)}$$

となる。

また、横方向に一行、木寄せするには、 $(X-1)/\sqrt{XY/n}$ (m) 歩行し、縦方向に $Y/\sqrt{XY/n}$ 回行う必要がある。縦方向の移動は1回につき $(Y-1)/\sqrt{XY/n}$ (m) となる。以上のことから、面積 XY の木寄せ時の横方向歩行距離 m_1 、縦方向歩行距離 m_2 は

$$m_1 = n(X-1)/X$$

$$m_2 = (Y-1)/\sqrt{XY/n}$$

となり、全歩行距離 M は、

$$M = n(X-1)/X + (Y-1)/\sqrt{XY/n}$$

となる。

また、横方向への歩行速度 V_y (m/sec)、斜面下方向への歩行速度 V_k (m/sec) は、後述するように現地実験結果から、それぞれ $V_y = -0.0225x + 1.21$ 、 $V_k = -0.0275x + 1.36$ とし、歩行時間 T_2 は、

$$T_2 = (n(X-1)/X)/(-0.0225x + 1.21) + ((Y-1)/\sqrt{XY/n})/(-0.0275x + 1.36)$$

ただし、 x : 斜面傾斜 (度)

とする。

現地調査結果より、平均丸太材積 0.09 m^3 のとき、 T_1 は 28.25 秒であることから、斜面傾斜 33 度以上の場合の平均作業能率 E_p を求めると、

$$\begin{aligned}
 Ep &= 3600nV_T / (28.25n + (n(X-1)/X) / Vy + ((Y-1) / \sqrt{XY/n}) / Vn) \\
 &= 324n / (28.25n + (n(X-1)/X) / (-0.0225x + 1.21) \\
 &\quad + ((Y-1) / \sqrt{XY/n}) / (-0.0275x + 1.36))
 \end{aligned}$$

となる。

ウ. 要素作業時間

土場整理, 荷はずし, 荷掛け: 乱数を用いて図-2 で求めたヒストグラムの累積を定め, その累積に対応する階級値を要素作業時間とする⁷⁾。

土場その他, 土場小移動, 土場停止, 山その他, 山小移動, 山停止, 退避: 出現回数が少なく, データのばらつきが大きいため, 総和平均を要素作業時間とする。

ワイヤー下げ: ワイヤーロープの下がってくる速度は, 等速度運動とみなすことができる⁸⁾。よって, 調査結果を基に求めた

$$y = 1.9869x$$

ただし, y : 時間 (秒), x : 距離 (m)

を用いる (図-6)。

荷上げ: 1 荷の重量 (kg) を 150~199, 200~249, 250~299, 300~349, 350~399, 400~449, 500~549, 550~599 の 8 階級に分類し, この階級ごとに, 重量の総和平均と荷上げ速度の総和平均から荷上げ速度を算出し, この値から 1 荷当たりの重量と荷上げ速度を求めることにする (図-7)。

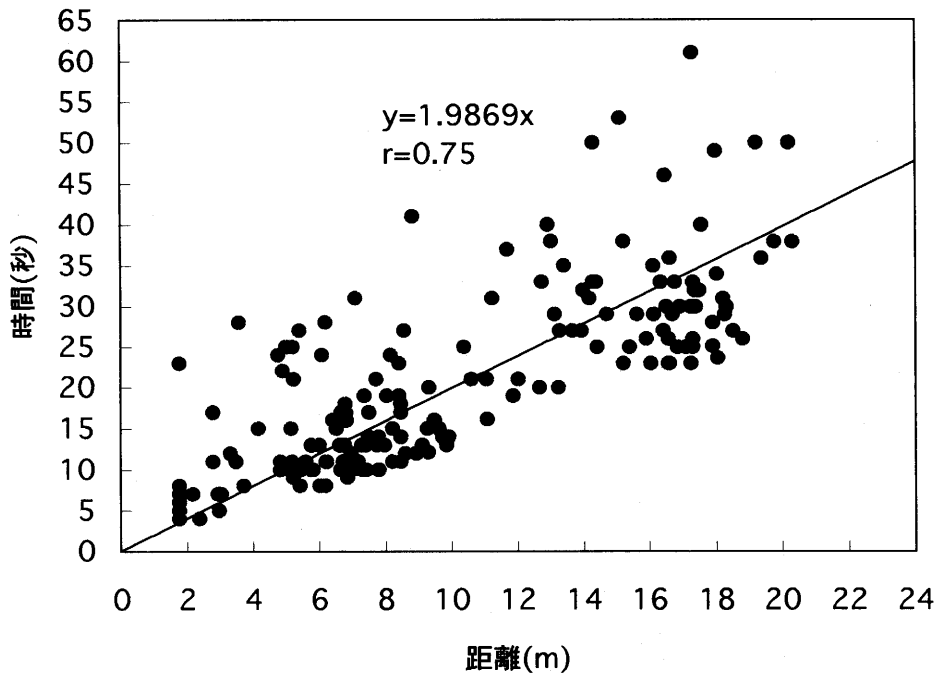


図-6 ワイヤー下げの距離と時間の関係。

Fig. 6. Relationships between the wire-rope pull out distance, x (m), and its time, y (sec).

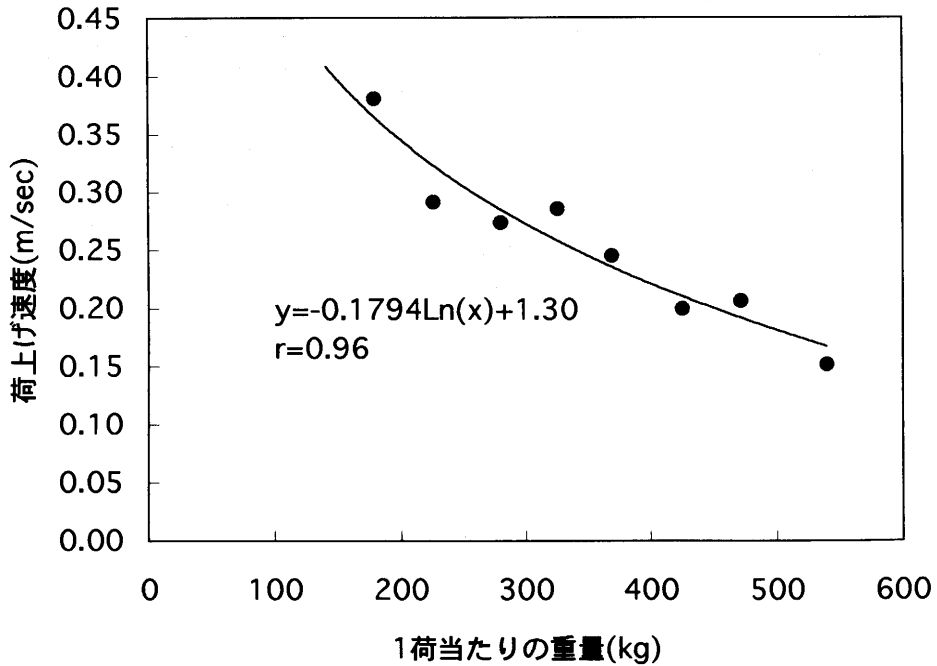


図-7 1 荷当たりの重量と荷上げ速度の関係.

Fig. 7. Relationships between payload, x (kg), and lifting speed, y (m/sec).

本調査の搬器は、油圧モーターにより巻上げを行っており、その機構の特徴として、最大巻上げ能力を超える負荷がかかった場合に、リリーフ機能が働くように設計されている。このとき、作動油は流動するがモーターは回転せず、ワイヤーロープは巻取られない。無負荷の状態から、ワイヤーロープが巻取られなくなるまでの油圧モーターの速度変化は、エンジン出力に基づく油圧の変化、油圧調節機構、および荷重の関係により決定される。これを対数曲線を用いて近似することにし、搬器の最大巻上げ能力時の荷上げ速度が 0 m/sec になることから、図中に示した

$$y = -0.179 \ln(x) + 1.30$$

ただし、 y : 荷上げ速度 (m/sec), x : 1 荷当たりの重量 (kg)

を用いることに決定した。

荷下げ: 荷下げ速度は、その作業距離によって異なり、作業距離が短いとその作業速度は遅く、作業開始直後と終了間際の作業速度は 0 に収束する。したがって、「荷下げ」作業は加速度運動⁹⁾とみなすことができる。よって、調査結果を基に求めた

$$y = 10.1724\sqrt{x}$$

ただし、 y : 時間 (秒), x : 距離 (m)

を用いる (図-8)。

ワイヤー上げ: ワイヤーロープが巻上がる速度は、初速度 0 の等速度運動とみなすことができる。よって、調査結果を基に求めた

$$y = 1.8782x$$

ただし、 y : 時間 (秒), x : 距離 (m)

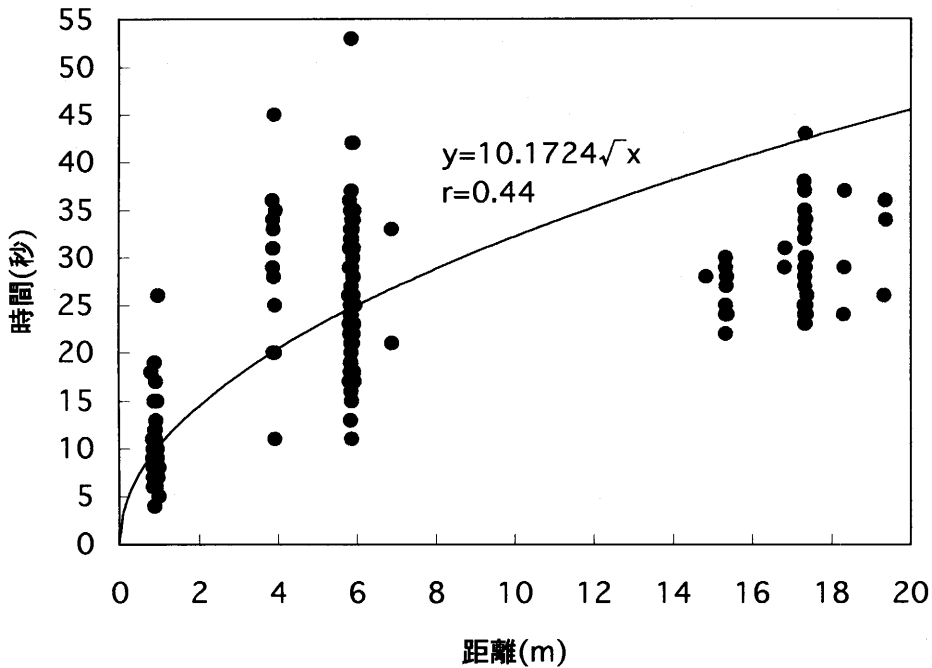


図-8 荷下げの距離と時間の関係。

Fig. 8. Relationships between unload distance, x (m), and its time, y (sec).

を用いる (図-9)。

空搬器走行, 実搬器走行: 「空搬器走行」と「実搬器走行」では, 各作業者の作業場所に向かって搬器が走行してくるとき, 他の作業を行っている場合には, 自走速度にまかせて到着を待つが, 他の作業を行っていない場合には, リモコン操作により走行速度を上げる。この速度に規則性はないので, 平均速度 (空搬器走行 1.1838 m/sec, 実搬器走行 1.1388 m/sec) を作業速度として用いる。

エ. サイクルタイム

作業連結強度に従ってサイクルの工程を決定する。作業連結強度による連結は, 1 サイクル 1 要素作業ごとに 0.0000~0.9999 までの 4 桁の乱数を発生させ, その乱数に対応する作業連結強度により, 次の要素作業を決定する。この要素作業に対して, 上記要素作業時間および作業速度を割り当てる。なお, 作業速度で表される要素作業は, 1 サイクル中に複数回, 同一の要素作業が出現しても, そのサイクル中に行われる全要素作業距離を複数回に分けて作業するものとする。

要素作業連結強度の組み合わせは無限にあり, その組み合わせからシミュレーションの回数を決定することは不可能である。したがって, シミュレーションを繰り返し, 一定の回数をもって収束と考える。ここでは, 後述するように 10^6 回をもって収束とする。このシミュレーションに用いたフローチャート, プログラム, 計算結果を図-10~12 に示す。なお, 作業速度によるものは, その距離に対して個別に求める必要があるため, このプログラムで決定される要素作業時間は, 距離に影響を受けない「土場その他」, 「山その他」, 「荷はずし」, 「荷掛け」, 「土場小移動」,

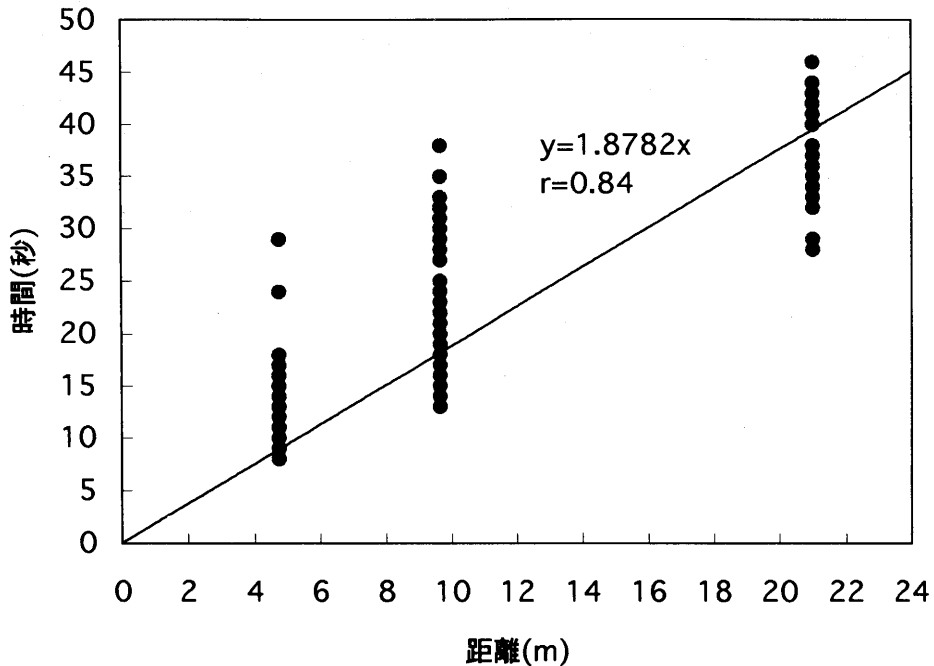


図-9 ワイヤー上げの距離と時間の関係。

Fig. 9. Relationships between the wire-rope roll up distance, x (m), and its time, y (sec).

「山小移動」、「土場停止」、「山停止」、「土場整理」、「退避」の10項目についての1サイクル中の合計時間である。

収束するためのシミュレーション回数を検討した結果、1サイクル中の「土場その他」、「山その他」、「荷はずし」、「荷掛け」、「土場小移動」、「山小移動」、「土場停止」、「山停止」、「土場整理」、「退避」の合計時間は、 10^6 回で32.30秒となった。1日の作業時間が21600秒であることから、このシミュレーションの誤差を1%以内にするには、誤差を216秒以内に収めればよい。現地調査によれば、1日のサイクル数は、最多で72回であったことから、0.5%以内の精度にするには1サイクル当たり1.5秒の誤差が許容範囲となる。このとき、32.30秒を収束と考えるならば、30.80~33.80までが許容範囲となる。この範囲は、シミュレーション回数が少ない場合でも得られるが、図-12より、 10^4 回未満のときはばらつきが大きいので、 10^4 回以上が妥当であると考えられる。

オ. 1サイクル当たりの集材材積

集材する材積は、スギとして、調査結果と収穫予想表^{13,16)}を用いて、短材の平均末口直径を15cm、長さを4mとし、立木1本当たりの採材本数は4本、間伐本数はヘクタール当たり300本とした。調査結果から1荷当たりの短材本数は、3~6本が妥当であるが、集材機作業では1荷当たり材積が作業能率に大きく影響することから自走式搬器作業でも同様であると考えられる^{9,10)}。したがって、ここでは集材方式の違いによる1荷当たりの材積の格差を少なくするために1荷の本数を便宜上4本とする。このことにより、全幹集材および全木集材の本数は収穫予想表より1本となり、本シミュレーションにおける1荷の重量の違いを少なくすることができる。

カ. 斜面傾斜と歩行速度の関係

調査地 C で歩行速度の実験を行った。実験は、3人の被験者(26才学生, 22才学生2人)を傾斜7~37度の斜面を各方向に10 mから30 m歩行させ歩行時間を測定した。斜面傾斜(x: 度)に対する歩行速度(y: m/sec)を以下の様に回帰することができたので、この式を歩行速度として用いることにする。

登り $y = -0.0258x + 1.28$ ($r = -0.96$)

下り $y = -0.0275x + 1.36$ ($r = -0.95$)

斜め登り $y = -0.0295x + 1.31$
($r = -0.95$)

斜め下り $y = -0.0275x + 1.28$
($r = -0.99$)

等高線(横)方向に歩行
 $y = -0.0226x + 1.21$ ($r = -0.99$)

ただし、y: 歩行速度(m/sec),
x: 斜面傾斜(度)

また、作業者の歩行速度は、ワイヤー引出し速度に影響する。ワイヤー引出し速度は、自走式搬器の荷上げ用ドラムの回転速度にも影響されるため、作業速度は歩行速度とドラム回転速度の遅い方によって決定される。実際にエンジン出力を全開にしてワイヤー引出し速度を測定した結果、最高速度は0.77(m/sec)であった。

キ. 伐区の設定と架設条件

伐区形は、伐区の奥行きと幅の比が、1:0.4の伐区形を想定する¹²⁾。元柱位置は、現地調査結果の総和平均より、伐区の端点から水平距離で25 mの地点とし、土場位置は林道幅を見込んだ5 m地点とする。土場の標高は、索を傾斜方向に架設する場合と対角線上に架設する場合は0 m地点とするが、等高線方向に索を架設する場合は、 $nY \cos \theta$ で表される高さ、すなわち先柱が立っている標高と同じとする。

現地調査結果に基づいて、傾斜方向に索を架設する場合、索の傾斜角は0度、等高線方向に索を架設する場合、および伐区に対して対角線上に索を架設する場合は、索の傾斜角を20度とした。先柱高は8 m、索自重は1.2 kg/m、搬器自重は380 kgとした。

2) 索の架設位置と作業方法に対するシミュレーション

ア. 作業能率

索の架設位置と作業方法ごとに作業時間を比較したシミュレーション結果を図-13に示す。

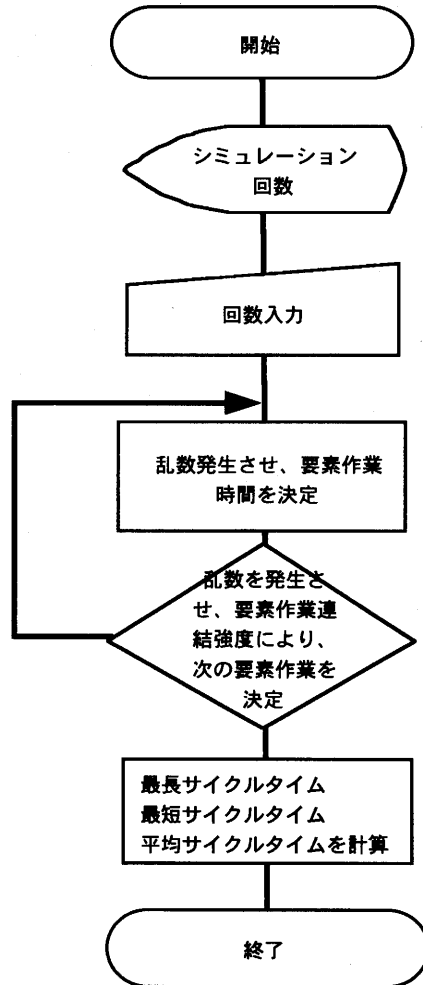


図-10 要素作業時間決定のフローチャート.
Fig. 10. Flow chart of deciding the operational element time.

```

10 CLEAR:DEFINT Y-Z,DIM KYO(18,18),C(10000)
12 OPEN "d:output.dat" FOR OUTPUT AS #2
15 HH=VAL(LEFT$(TIMES,2)):MM=VAL(MID$(TIMES,4,2)):SS=VAL(RIGHT$(TIMES,2))
16 TIME=HH*3600+MM*60+SS
17 RANDOMIZE TIME/2-23400
55 INPUT "サイクルノイズ":YY
60 FOR I=1 TO 18:FOR J=1 TO 18
70 READ KYO(I,J)
80 NEXT J:NEXT I
90 FOR L=1 TO 100
100 REM *** start ***
105 FOR ZZ=1 TO YY
110 N=C*0
115 REM *** 次の要素作業を決定する ***
120 R=RND(1):KYO=0
150 FR=0:FOR I=1 TO 18
170 KYO=KYO+KYO(N,I)
180 IF KYO>R AND FR=0 THEN I=I:FR=1
190 NEXT I
195 REM *** 所要時間の決定 ***
197 I=I
200 GOSUB 700
210 C=C+T
220 IF N=7 THEN 300
230 N=I
240 GOTO 120
300 REM *** 1サイクル終了 ***
305 SUM=SUM+C:C(ZZ)=C
310 AVERAGE=SUM/(ZZ*L)
330 NEXT ZZ
360 REM *** 作業終了 ***
366 MAX=0:MIN=100000!
370 FOR I=1 TO YY
375 IF MAX<C(I) THEN MAX=C(I):MM=I
376 IF MIN>C(I) THEN MIN=C(I):MI=I
377 NEXT I
380 PRINT #2,"平均サイクルタイム",AVERAGE
383 PRINT #2,"最長サイクルタイム",MAX
385 PRINT #2,"最短サイクルタイム",MIN
390 PRINT L
395 NEXT L
400 END
500 REM *** 所要時間が一意に定まるケース ***
530 N1=1:GOTO 700
700 RESTORE 1500
705 R1=RND(1)
710 FOR J=1 TO N
720 FOR K=1 TO 9
730 READ TIME(1,K),TIME(2,K)
740 NEXT K
750 NEXT J
760 FR=0:FOR K=1 TO 9
780 IF R1<TIME(1,K) AND FR=0 THEN FR=1:KK=K
790 NEXT K
800 T=TIME(2,KK)
810 RETURN
1006 DATA 0.0313,0.0.0938,0.0625,0.0.0.3438,0.0.0.0.0.4375,0.0.0.0.0313,0
1016 DATA 0.0.2692,0.0.0.0982,0.3846,0.0.0.0769,0.0.0.0962,0.0.0.0.0192,0.0.0.0577
1026 DATA 0.0356,0.0.5584,0.3044,0.0.0.0.0.0059,0.0.0.0.0.0356,0
1036 DATA 0.051,0.0.0.0.9082,0.0.0.0.0.0102,0.0.0.0306,0
1046 DATA 0.0300,0.0.0.7250,0.0.0.0.0.0200,0.0.0.0.0.2250
1056 DATA 0.00921,0.0.0.0.0.0.0.8235,0.0.0588,0.0.0.0252,0.0.0
1066 DATA 0.0.0.0.0.0.1,0.0.0.0.0.0.0
1076 DATA 0.0.0.0.0.0.0.9848,0.0.0.0051,0.0.0.0102,0.0.0
1086 DATA 0.0398,0.0.0.7711,0.0.0.0.0846,0.0.0.0050,0.0.01.0.0846,0.0.005
1096 DATA 0.0.9746,0.0.0.0.0.0.0510,0.0.0000,0.0051,0.0.0.0152,0
1106 DATA 0.1.000,0.0.0.0.0.0.0.000,0.0.0.0
1116 DATA 0.0.0323,0.0.0.0323,0.8387,0.0.0.0645,0.0.0.0.0.0.0323,0.0
1126 DATA 0.0188,0.0.4366,0.5070,0.0.0.0.0.0.0.0.0.0.0376,0
1136 DATA 0.0.0.25,0.0.0.5,0.0.0.25,0.0.0.0.0.0
1146 DATA 0.0.0.0.2222,0.4444,0.0.1111,0.0.1111,0.0.1111,0.0.1111,0.0
1156 DATA 0.0.0.1,0.0.0.0.0.0.0.0.0
1166 DATA 0.1071,0.0.3214,0.3571,0.0.2143,0.0.0.0.0000,0.0.0.0
1176 DATA 0.0.0.0.0.75,0.0.0.0.25,0.0.0.0.0
1186 DATA 0.0.0.0.0.0.0.0.0.0.0.1,12.39
1196 DATA 0.0.0.0.0.0.0.0.0.0.0.1,16.8
1206 DATA 0.0.0.0.0.0.0.0.0.0.0.1,0
1216 DATA .1337,5.89,0.3209,7.78,0.5615,9.67,0.7647,11.56,0.8449,13.44,0.9251,1
5.33,0.9626,17.22,0.9733,19.11,1.21
1226 DATA 0.4263,5.22,0.6684,7.44,0.8053,9.67,0.9105,11.89,0.9474,14.11,0.9632,1
6.33,0.9737,18.56,0.9842,20.78,1.23
1236 DATA 0.0.0.0.0.0.0.0.0.0.0.0.0.0.1,0
1246 DATA 0.0.0.0.0.0.0.0.0.0.0.0.0.0.1,0
1256 DATA 0.0.0.0.0.0.0.0.0.0.0.0.0.0.1,0
1266 DATA 0.0.0.0.0.0.0.0.0.0.0.0.0.0.1,0
1276 DATA 0.0.0.0.0.0.0.0.0.0.0.0.0.0.1,0
1286 DATA 0.0.0.0.0.0.0.0.0.0.0.0.0.0.1,0
1296 DATA 0.0.0.0.0.0.0.0.0.0.0.0.0.0.1,0
1306 DATA 0.0.0.0.0.0.0.0.0.0.0.0.0.0.1,0
1316 DATA 0.0.0.0.0.0.0.0.0.0.0.0.0.0.1,0
1326 DATA 0.0.0.0.0.0.0.0.0.0.0.0.0.0.1,0
1336 DATA 0.0.0.0.0.0.0.0.0.0.0.0.0.0.1,0
1346 DATA 0.0.0.0.0.0.0.0.0.0.0.0.0.0.1,0
1356 DATA 0.0.0.0.0.0.0.0.0.0.0.0.0.0.1,0
1366 DATA 0.0.0.0.0.0.0.0.0.0.0.0.0.0.1,0
1376 DATA 0.0.0.0.0.0.0.0.0.0.0.0.0.0.1,0
1386 DATA 0.0.0.0.0.0.0.0.0.0.0.0.0.0.1,0
1396 DATA 0.0.0.0.0.0.0.0.0.0.0.0.0.0.1,0
1406 DATA 0.0.0.0.0.0.0.0.0.0.0.0.0.0.1,0
1416 DATA 0.0.0.0.0.0.0.0.0.0.0.0.0.0.1,0
1426 DATA 0.0.0.0.0.0.0.0.0.0.0.0.0.0.1,0
1436 DATA 0.0.0.0.0.0.0.0.0.0.0.0.0.0.1,0
1446 DATA 0.0.0.0.0.0.0.0.0.0.0.0.0.0.1,0
1456 DATA 0.0.0.0.0.0.0.0.0.0.0.0.0.0.1,0
1466 DATA 0.0.0.0.0.0.0.0.0.0.0.0.0.0.1,0
1476 DATA 0.0.0.0.0.0.0.0.0.0.0.0.0.0.1,0
1486 DATA 0.0.0.0.0.0.0.0.0.0.0.0.0.0.1,0
1496 DATA 0.0.0.0.0.0.0.0.0.0.0.0.0.0.1,0
1506 DATA 0.0.0.0.0.0.0.0.0.0.0.0.0.0.1,0
1516 DATA 0.0.0.0.0.0.0.0.0.0.0.0.0.0.1,0
1526 DATA 0.0.0.0.0.0.0.0.0.0.0.0.0.0.1,0
1536 DATA 0.0.0.0.0.0.0.0.0.0.0.0.0.0.1,0
1546 DATA 0.0.0.0.0.0.0.0.0.0.0.0.0.0.1,0
1556 DATA 0.0.0.0.0.0.0.0.0.0.0.0.0.0.1,0
1566 DATA 0.0.0.0.0.0.0.0.0.0.0.0.0.0.1,0
1576 DATA 0.0.0.0.0.0.0.0.0.0.0.0.0.0.1,0
1586 DATA 0.0.0.0.0.0.0.0.0.0.0.0.0.0.1,0
1596 DATA 0.0.0.0.0.0.0.0.0.0.0.0.0.0.1,0
1606 DATA 0.0.0.0.0.0.0.0.0.0.0.0.0.0.1,0
1616 DATA 0.0.0.0.0.0.0.0.0.0.0.0.0.0.1,0
1626 DATA 0.0.0.0.0.0.0.0.0.0.0.0.0.0.1,0
1636 DATA 0.0.0.0.0.0.0.0.0.0.0.0.0.0.1,0
1646 DATA 0.0.0.0.0.0.0.0.0.0.0.0.0.0.1,0
1656 DATA 0.0.0.0.0.0.0.0.0.0.0.0.0.0.1,0
1666 DATA 0.4074,13.67,0.6296,22.33,0.7407,31.0,8148,39.67,0.8519,48.33,1.57,1.5
7.1,57.1,57
1676 DATA 0.0.0.0.0.0.0.0.0.0.0.0.0.0.1,6.16

```

図-11 プログラムリスト。

Fig. 11. Program list.

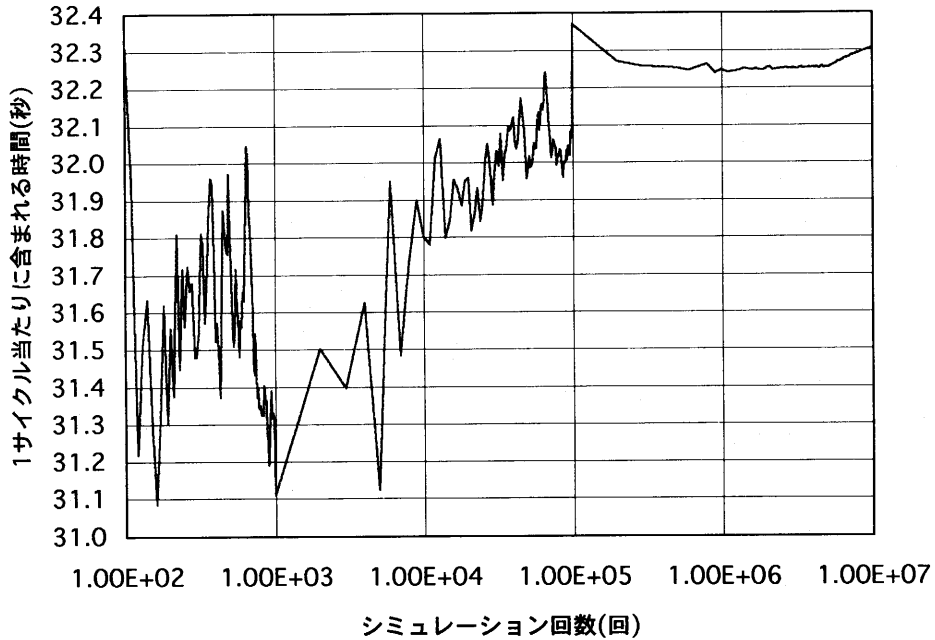


図-12 シミュレーション回数と時間の収束.

Fig. 12. Relationship between the number of simulation repeat and calculated cycle time.

傾斜方向に索を架設する場合: この場合は、人力木寄せは行えないので、全木集材と全幹集材、短材集材によって違いが生じてくる。全幹集材、短材集材は、枝条の集材を行わなくてすみ「荷上げ」時間が全木集材より短いので有利である。また、斜面傾斜が急峻なほど、ワイヤー引出し速度が遅くなり、斜面傾斜と索の傾斜角に差が生じ、ワイヤー引出し、荷上げ、荷下げ、ワイヤー巻上げの各距離が長くなることから、作業時間は長くなる。シミュレーションの結果、ワイヤー引出し距離が最短となる $n=0.5$ に架設するのが最も作業能率は良くなる。

等高線方向に索を架設する場合: 全木集材と全幹集材、短材集材を比較すると全幹、短材集材が「荷上げ」時間が短く有利となっている。

$n=0$ (斜面最下部) と $n=1$ (斜面最上部) に架設した場合、各距離はいずれもほぼ同じになる。斜面傾斜 25 度では、 $n=0$ のほうが荷上げ距離が短いため能率は良いが、傾斜が急になるにつれて $n=1$ のほうが、荷上げ時間が短くなるとともに、ワイヤー引出し時間も短くなり能率は向上する。 $n=0.25$ と $n=0.75$ の関係についても同様である。作業能率が最も良いのは、 $n=0.5$ で伐区の中に架設した場合である。特に、斜面傾斜 25 度、30 度のときの作業能率が良い。

人力木寄せ後短材集材を行う場合についてみると、 $n=0, 0.5, 0.25$ のときは、斜面傾斜が急なほど作業時間は短くなる。これは、人力木寄せ作業能率に起因する。本シミュレーションでは、斜面傾斜 33 度のとき、人力木寄せの能率が最も良い。一方、 $n=0.75$ のときは、斜面傾斜が急になると作業能率は悪くなる。これは、人力木寄せ距離が短いため、木寄せ作業時間の短縮よりも、斜面が急になることによりワイヤー引出し速度が低下し、作業時間を延滞させるためである。

架設位置による違いは、斜面傾斜 25 度のとき、 $n=0.75$ が最も作業能率が良く、つづいて $n=$

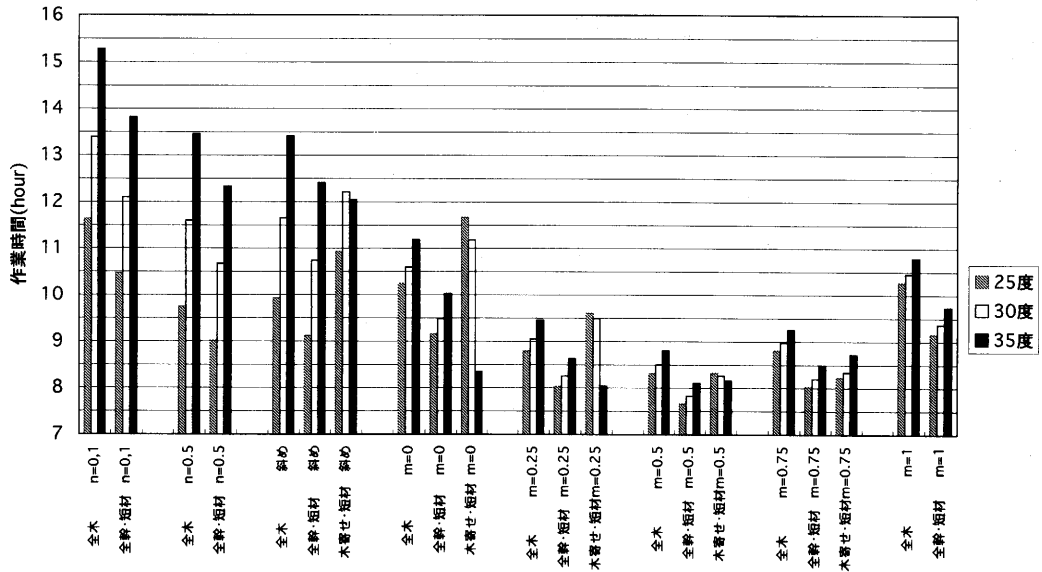


図-13 索の架設位置と作業方法による作業時間の比較。

Fig. 13. Operational efficiency for the rigging location and the yarding method.

0.5, $n=0.25$, $n=0$ となる。斜面傾斜 30 度のときは, $n=0.5$ のときが, 斜面傾斜 35 度のときは, $n=0.25$ のときが最も作業能率が良い。これは, 斜面傾斜が緩い場合には, 人力木寄せ作業を行わない方が作業能率が良いことを示唆しており, $n=0$, $n=0.25$ のとき斜面傾斜 25 度, 30 度では人力木寄せを行わないほうが能率が良い。急傾斜になると, 人力木寄せ作業能率は良くなるが, 木寄せ距離にも最適距離があり, 斜面傾斜 35 度に対しては $n=0.25$ が最も作業能率が良い。

伐区に対して対角線上に索を架設する場合: 人力木寄せを行わない場合には, 斜面傾斜が大きくなると作業能率は低下する。人力木寄せを行う場合には, 斜面傾斜の影響が大きく 30 度が最も作業能率が悪く, 次いで 35 度, 25 度となっている。傾斜 35 度では, 傾斜 30 度の時よりもワイヤー引出し速度は遅いが, 人力木寄せ作業能率が良いため, 結果として作業能率は向上する。斜面傾斜 25 度, 30 度のときは, 人力木寄せを行わないほうが作業能率は良く, 斜面傾斜 35 度の場合には, 人力木寄せを行ったほうが作業能率は良いという結果となっている。

イ. 架設位置の検討

等高線方向に索を架設する場合の作業能率が良いが, これは索と斜面との距離が短いことに起因する。伐区の外周の任意の地点に土場を設定することが可能であれば, 斜面傾斜 25 度, 30 度の場合には, $n=0.5$ の位置に索を架設して全幹集材・短材集材を行うのが作業能率は最も良く, 斜面傾斜 35 度の場合には, $n=0.25$ の位置に索を架設して, 人力木寄せ後に短材集材を行うのが作業能率が最も良いという結果となっている。

等高線方向に索を架設できない場合には, 斜面傾斜が 25 度, 30 度の場合には, 最大傾斜方向に $n=0.5$ で索を架設して, 全幹集材, 短材集材を行うのが作業能率は良い。斜面傾斜が 35 度の場合には, 伐区に対して対角線上に索を架設して, 人力木寄せ後に短材集材を行うのが作業能率は良い。これは, 急傾斜地では木寄せ能率が良いことによる。しかし, 対角線上に索を架設する

場合、斜面傾斜が30度で人力木寄せ後に集材を行うと、最も能率が悪い作業方法となっているので、索の架設位置と斜面傾斜について十分注意を払う必要がある。

ウ. 能率的な作業方法の検討

形状比が1:0.4の伐区では、上記のように斜面傾斜25度、30度のときは索を等高線方向に架設して $n=0.5$ とし、全幹および短材集材を行うのが最も作業能率が良い。斜面傾斜35度になると、索を等高線方向に $n=0.25$ の位置に架設して、人力木寄せ後に短材集材を行うのが作業能率が良い。また、下げ荷集材作業では、斜面傾斜25度、30度のときでは、索を傾斜方向に $n=0.5$ の位置に架設するのが最も作業能率が良く、斜面傾斜35度では、索を対角線方向に架設して人力木寄せ後に短材集材を行うのが作業能率が良い。すなわち、緩傾斜地の場合は、ワイヤー引出し距離や荷上げ距離が最短となるように、伐区の中心に索を架設するのが作業能率は良く、急傾斜地の場合は、伐区に対して対角線上に索を架設して、人力木寄せ後に短材集材を行うのが作業能率は良い。このように、斜面による作業方法の選択が要求される。

しかし、伐区の形状比が変化すると作業能率も変化する。例えば、索を等高線方向に架設する場合、伐区の形状比を1:0.8(伐区長100m, 伐区幅80m)にして $n=0.5$ に架設すると、作業能率は図-13の $n=0$ の全幹・短材集材または木寄せ後短材集材と $n=1$ の全幹・短材集材を加えることにより求めることができ、人力木寄せ後に短材集材を行うのが最も作業能率が良いということになる。なお、索の架設高さや斜面傾斜の関係に対しては、各距離が変化するので斜面傾斜ごとに最適な作業方法を一般的に定めることは困難である。また、実際の作業現場では、必ずしも十分な広さの土場を確保できるとは限らず、集積できる材の長さも制限され、短材集材システムを選択せざるをえない場合もある。十分な広さの土場が確保できるのであれば、造材工程まで考慮し、土場での造材にプロセッサ等の機械を導入して、作業システム全体としての高能率化を検討することが可能である。

3) シミュレーションモデルの現地への適用

ア. 適用方法

シミュレーションモデルを今回の調査地に適用して、モデルの適合度を確認しながら、最適な作業システムの検討を行った。

伐区および材の位置の決定: シミュレーションモデルを実際の作業現場へ適用するには、伐木または伐木造材後の材の位置を予測する必要がある。材が伐区内に一様に分布するものと仮定すれば、伐区の地形を再現することにより、材の位置を決定することができる。伐区の地形を再現する方法として、ここでは、数値地形モデル(D.T.M)を用いることにする。このD.T.Mにより歩行距離や木寄せ能率、木寄せ方向の決定に必要な材の空間座標と斜面傾斜方向を求めることができる。最急地形勾配と斜面傾斜方向は、次式により求められる^{5,6)}。

$$\text{最急地形勾配: } S = \tan^{-1} \sqrt{a^2 + b^2}$$

$$\text{斜面方位 (東方位から): } \theta = \tan^{-1} \left(\frac{b}{a} \right)$$

ただし

$$a = \frac{Z_{i,j} + Z_{i+1,j} - Z_{i+1,j+1}}{2D}, \quad b = \frac{-Z_{i,j} + Z_{i+1,j} + Z_{i,j+1} + Z_{i+1,j+1}}{2D}$$

z は、各グリッドの標高、 D はグリッド間隔

本シミュレーションでは、メッシュ間隔を 10 m の D.T.M をコンパス測量の結果より作成した。

1 荷の材積： 現地の材は 33 年生スギで、平均胸高直径 27.53 cm であった。平均長 3.89 m、平均末口直径 15 cm、材積 0.09 m³ に造材され、総出材材積が 130.24 m³ であったことから、短材

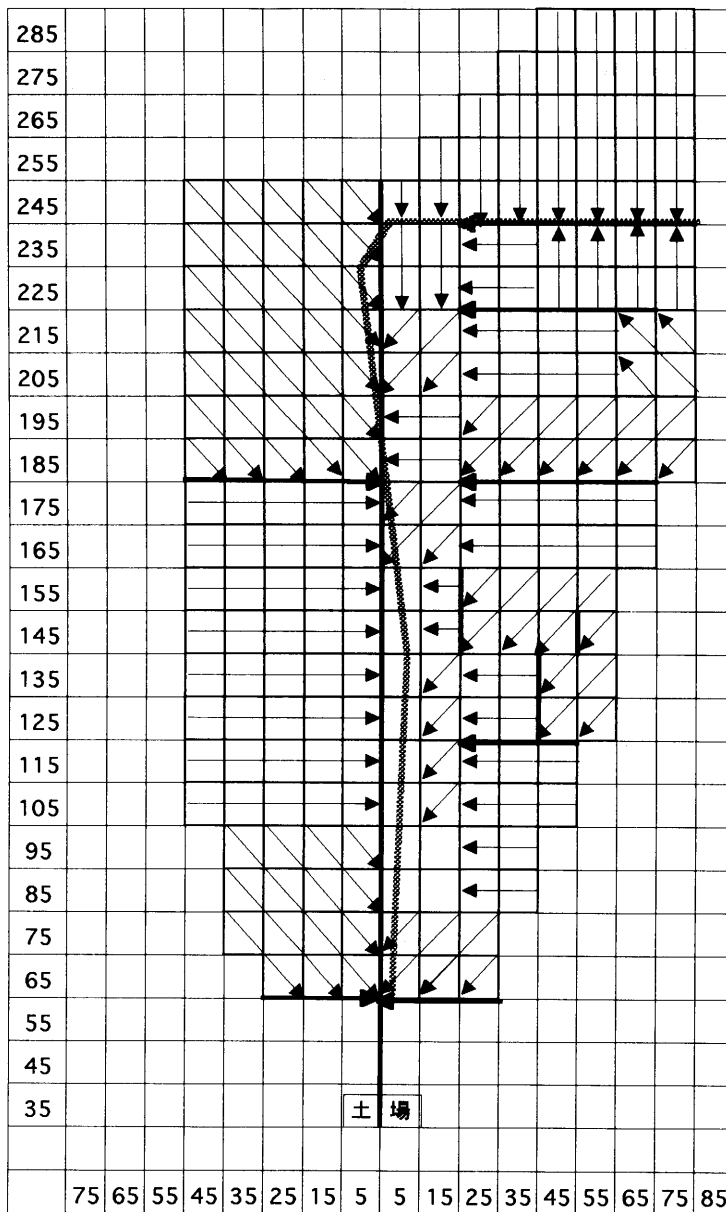


図-14 人力木寄せ方向.

Fig. 14. Direction of manpower prehauling.

本数は1,477本となる。樹高は収穫予想表から20.63m、採材本数は5本、生材比重は814kg/m³とする。全木材の材積等の推定も収穫予想表による。

自走式搬器集材作業における各距離の決定方法：「荷下げ」、「ワイヤー上げ」の各距離は、シミュレーションモデルと同様に求めた距離を用いた。「ワイヤー引出し」距離は、索を真上から林地へ投影した線から材までの斜距離を用いた。「ワイヤー下げ」、「荷上げ」の各距離は、D.T.Mの各グリッドの重心と索との距離を用いた。「空搬器走行」、「実搬器走行」距離は、人力木寄せを行わない場合には、平面図において索に接するグリッド数を重みとした平均距離により求めた。人力木寄せを行う場合には、木寄せ後の材の位置を重みとした平均距離により求めた。

人力木寄せ作業における各距離の決定方法：人力木寄せは、グリッドを8方向に分割して、最大傾斜方向に最も近い方向に行うものとする。本シミュレーションでは、傾斜が33度以上のとき、材は静止状態から解放されると滑落するものとしているので、33度以下の場所から33度以上の場所へ材を移動させれば材は滑落するものとする。1グリッド内での最長木寄せ距離は、木寄せ方向が縦、横、斜めのいずれの場合も便宜上10mとした。調査結果から求めた材の木寄せ方向を図-14に示す。

造材作業能率の決定方法：チェーンソーによる伐木造材作業能率は、既往の研究により決定した¹⁸⁾。このときの各係数は調査地Aの調査結果から、胸高直径27.53cm、採材玉数4玉、樹高20.63m、斜面傾斜33度、歩行速度0.36m/s、作業対象値の面積23,000m²、立木本数987本、末口平均径15cm、足場の良否は悪とした。間伐本数は296本であったことから1日の実働時間を6時間(21600秒)として、立木1本当たりの作業時間に296/21600を乗ずることにより、各作業時間は以下ようになる。

$$\text{短材伐木造材時間} = \sum_{i=1}^{24} S_{fi} \times 296 / 21600 = 15.8 \text{ 日}$$

$$\text{短材伐木時間} = \sum_{i=1}^{10} S_{fi} \times 296 / 21600 = 7.8 \text{ 日}$$

$$\text{短材造材時間} = \sum_{i=11}^{24} S_{fi} \times 296 / 21600 = 8.0 \text{ 日}$$

$$\text{全幹材造材時間} = \left(\sum_{i=1}^{24} S_{fi} - S_{f11} - S_{f13} - S_{f14} - S_{f15} - S_{f23} - S_{f24} \right) \times 296 / 21600 = 4.5 \text{ 日}$$

$$\text{全幹材玉切り時間} = (S_{f11} - S_{f13} - S_{f14} - S_{f15} - S_{f23} - S_{f24}) \times 296 / 21600 = 3.7 \text{ 日}$$

$$\text{全木材伐木造材時間} = \sum_{i=1}^{24} S_{zi} \times 296 / 21600 = 9.7 \text{ 日}$$

$$\text{全木材伐木時間} = \sum_{i=1}^{10} S_{zi} \times 296 / 21600 = 2.6 \text{ 日}$$

また、プロセッサによる造材能率は既往の研究から、全幹材、全木材ともに41.5m³/日・人とした¹⁷⁾。

イ. 適用結果および作業システムの検討

調査地Aのシミュレーションの計算結果を表-10, 11, 図-15に示す。

実際の作業では、人力木寄せは4.5人工であったが、シミュレーションによる予測結果では、4.6人工となった。また、人力木寄せを行った場合の自走式搬器集材作業は、11.0人工であった

表-10 調査地 A の各距離の計算結果

Table 10. Calculated rigging distance at research area A

作業方法	木寄せ後短材	短材集材	全幹集材	全木集材
材重量 (kg)	298	298	358	497
索から地上 (m)	12.03	12.03	12.03	12.03
材から索下 (m)	0.00	36.65	36.65	36.65
材から索 (m)	12.03	31.08	31.08	31.08
平均集材距離 (m)	129.46	137.30	137.30	137.30
土場高さ(材なし)(m)	9.50	9.50	9.50	9.50
土場高さ(材あり)(m)	5.28	5.28	5.26	5.23

表-11 集材作業システムごとの要素作業時間 (hour) と要素作業時間割合 (%)

Table 11. Operational element time for the yarding systems

要素作業	ワイヤー引出し	荷上げ	ワイヤー下げ	空搬器走行	実搬器走行	空搬器上げ	荷下げ	その他	合計
全木集材	17.4(29.6%)	14.0(23.8%)	2.0(3.4%)	9.5(16.2%)	9.9(16.8%)	1.5(2.5%)	1.9(3.2%)	2.7(4.5%)	58.9(100%)
全幹集材	17.4(31.4%)	10.6(19.1%)	2.0(3.6%)	9.5(17.2%)	9.9(17.9%)	1.5(2.6%)	1.9(3.4%)	2.7(4.8%)	55.5(100%)
短材集材	20.9(32.1%)	11.2(17.2%)	2.4(3.7%)	11.5(17.6%)	11.9(18.3%)	1.8(2.7%)	2.3(3.5%)	3.2(4.9%)	65.2(100%)
木寄せ後短材集材	-	4.3(12.0%)	2.4(6.6%)	10.8(30.0%)	11.3(31.2%)	1.8(4.9%)	2.3(6.4%)	3.2(8.9%)	36.1(100%)

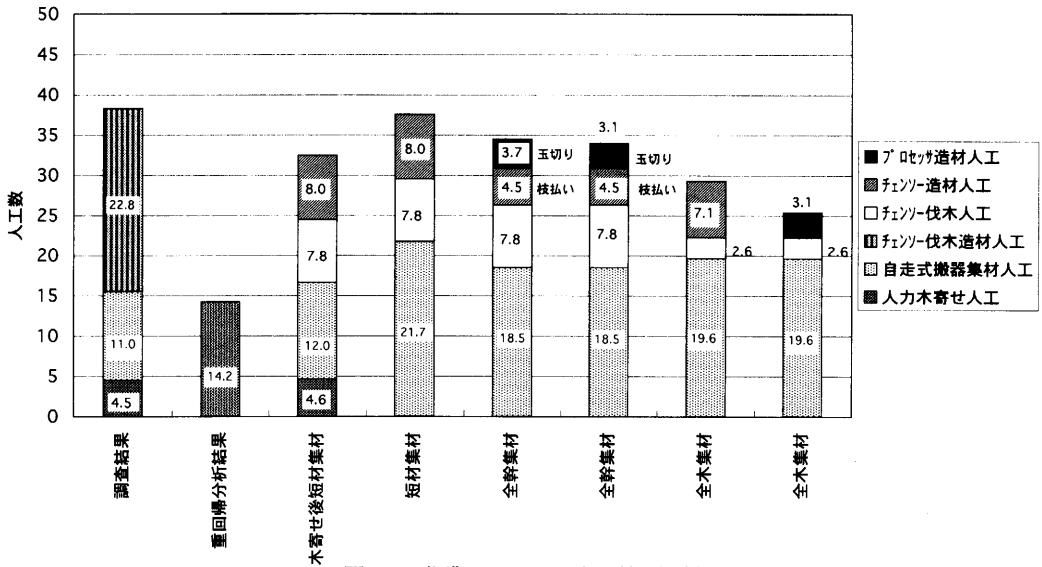


図-15 作業システムと人工数の関係。

Fig. 15. Operational efficiency for the operation system.

が、シミュレーションによる予測では 12.0 人工となった。したがって、実際の集材人工数は 15.5 人工であったが、シミュレーションによる予測では 16.6 人工となった。2 人 1 組で作業を行ったので、全作業時間 46.5 時間に対して 7% の誤差となる。

シミュレーションモデルによる誤差の原因として、調査地 A は距離に影響されない要素作業時間が比較的少なかったのに対して、シミュレーションでは、調査地 A, B, C のデータを用いて

おり、その差異が生じたためと考えられる。調査地 A のデータに基づいて、距離に影響されない要素作業時間について再度シミュレーションを 10^5 回行くと 29.05 秒となり、本シミュレーションモデルで用いた 32.30 秒と 1 サイクル当たり 3.25 秒の差となる。一方、調査データによる誤差として、現地調査時のサイクルよりも調査時以外のほうが 1 荷の集材本数または、短材 1 本当たりの材積が多かったことが考えられる。1 荷の短材本数を 5 本とするとシミュレーションの能率が向上し、実際との差は小さくなる。

また、集材作業システムごとの能率は、人力木寄せ後に短材集材を行うのが最も能率的で 16.6 人工となった。人力木寄せを行わない短材集材は 21.7 人工、全幹集材は 18.5 人工、全木集材は 19.6 人工となった。

同様の作業システムで、1 荷の積載本数を増やすと、シミュレーションによる人工数は少なくなるが、1 荷の材積が増加すると、実際には荷が残存立木間を通過しにくくなったり、荷下ろしに手間取ったり、荷をスリングロープで縛るのが困難になったりすることにより、能率が低下することも考えられるので、今後の検討が必要である。

7. お わ り に

今回の調査地で用いた作業システムの労働投入量は、伐木造材人工数が多い。自走式搬器を用いるような林内での伐倒作業は、現状ではチェーンソーに頼らざるを得ないが、造材作業はチェーンソー以外にもプロセッサを用いることも考えられる。チェーンソーによる造材作業も林内で行うよりは、土場で行うほうが能率は良い。また、伐木作業も林内で造材工程を行う場合には、伐倒方向等、考慮すべき事柄が多く、全木集材に比べて能率が悪くなることが予想される。したがって、造材が行える十分な広さの土場が確保でき、全木集材を行えるのであれば、全木集材後に土場で造材を行うシステムの方が能率は良くなる。なお、この場合、土場での枝条残材も増えるので、これらの処理方法も考慮して作業システムを選択する必要がある。また、本調査機種は、走行速度が 125 m/sec、最大巻上げ能力が 1380 kg であったが、要素作業割合を見ると、荷上げ、空搬器走行、実搬器走行の割合が多かった。したがって、これら要素作業割合を減少させるためには、荷上げ速度と走行速度の改善が望まれる。特に、荷上げ速度の改善は、最大巻上げ能力に余裕があることから容易に可能であると考えられる。また、このことは、集材作業システムに適した自走式搬器を選択する必要があることも示唆している。

今回検討したように、架線の架設状況および土場状況によって能率的な作業システムは異なってくるので、作業前にシステムの全体的な検討を行ってから作業を行えば効率的である。なお、本論文では作業の能率化を第一義としたため、経済性や作業への労働負担、安全性などは考慮していない。今後これらを含めたさらなる検討が望まれる。

最後に、本研究の遂行に際してご協力いただいた天竜フォレスター、ならびに天竜森林組合の方々、東京大学森林利用学研究室大学院生入倉維樹、桜井 倫の両氏に謝意を表す。

要 旨

静岡県天竜地域を対象地として自走式搬器を用いた集材作業システムについて検討した。重回帰分析の結果、短材集材作業に必要な人工数を求める回帰式を出材材積、間伐率、最大斜面傾斜を説明変数として有意水準 1% で得た。さらに、架設撤去に必要な人工数の回帰式を架設距離を

説明変数として有意水準1%で得た。これらを基に作成したシミュレーションモデルを標準伐区(伐区長:伐区幅=1:0.4)に適用した結果によれば、斜面に対して平行に索を架設できる場合には、傾斜が25度、30度では主索を伐区を中心に架設して、人力木寄せ作業を行わずに短材集材または全幹集材を行なうのが最も能率的であった。傾斜が35度では、主索を伐区を中心よりも下部に架設して、架線よりも山側の材は人力木寄せ作業を併用し、架線よりも谷側にある材はそのまま集材を行なうのが最も能率的であった。なお、傾斜が35度で伐区を中心に索を架設する場合には、標準伐区では人力木寄せ作業を行わずに集材するのが能率的であるが、伐区長:伐区幅を1:0.8にすると、人力木寄せ作業を行ってから集材するほうが能率的になる。伐区最上部から最下部方向に斜めに索を架設する場合には、傾斜25度、30度では、伐区を中心に架設して短材および全幹集材を行なうのが能率が良いが、斜面傾斜35度では、人力木寄せ作業を行ってから集材を行なうのが能率的であった。このシミュレーションモデルを既知の現場へ適用することにより、モデルの精度と最適な作業システムの検討を行なった。自走式搬器集材作業および人力木寄せ作業の実測値11.0人工、4.5人工に対して予測値は、それぞれ12.0人工、4.6人工となり、本シミュレーションの精度を確認した。さらに、同一条件下で人力木寄せ作業を行わずに短材集材を行なうものとするると21.7人工必要と予測され、同様に全幹集材システムは18.5人工、全木集材システムは19.6人工と予測された。全木集材の場合、土場で造材が能率的に行なわれるのであれば最も能率的となることが予測された。

キーワード: 自走式搬器, 集材作業システム, シミュレーションモデル, 作業能率

引用文献

- 1) 奥野忠一(1978)応用統計ハンドブック. 827 pp., 養賢堂, 東京.
- 2) 奥野忠一・芳賀敏郎・矢島敬二・奥野千恵子・橋本茂司・古河陽子(1984)統多変量解析法. 299 pp., 日科技連出版社, 東京.
- 3) 加藤誠平(1959)林業用索道設計法. 223 pp., 金原出版, 東京.
- 4) 加藤誠平・堀 高夫(1954)多荷重架空索の張力算定法(第一報)多荷重架空索張力の一般解. 日林誌, **36**, 339-343.
- 5) 上飯坂 實編(1990)林業工学. 180 pp., 地球社, 東京.
- 6) 小林洋司(1982)電算機による林道路線選定の1方法. 林業試験場研究報告, **294**, 137-181.
- 7) 小林洋司・仁多見俊夫・岩岡正博・南方 康・渡邊定元(1990)複層林施業における適正な集材作業システムの構築—トラック クレーンによる集材作業シミュレーション—. 科学研究費研究成果報告書: 105 pp.
- 8) 酒井秀夫・岩岡正博・朴 相俊・小林洋司(1995)ハーベスタ・フォワードによる間伐作業の作業能率. 東大演報, **94**, 29-47.
- 9) 酒井秀夫・上飯坂 實(1980)集材機作業条件の統計的考察(I). 日林誌, **62**, 254-263. (英文)
- 10) 酒井秀夫・上飯坂 實(1980)集材機作業条件の統計的考察(II). 日林誌, **62**, 331-335. (英文)
- 11) 酒井秀夫・上飯坂 實(1985)間伐材木寄せ作業に関する研究. 日林誌, **67**, 82-91.
- 12) 酒井秀夫(1987)合理的集運材方式に基づく長期林内路網計画に関する研究. 東大演報, **76**, 1-85.
- 13) 鈴木 正(1989)天竜地方における長伐期施業林分の本数管理と生長—林分材積表と施業指針—. 41 pp., 静岡県天竜市, 静岡.
- 14) 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. IUFROS3. 04. 02, Goettingen: 112-129.
- 15) 農林水産省林業試験場(1982)改訂3版 木材工業ハンドブック. 1099 pp., 丸善, 東京.
- 16) 林業科学技術振興所(1986)バイオマス変換計画 林地残材の収集・搬送に関する事前評価. 45 pp.

- 17) 林野庁(1992)平成3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調査. 140 pp.
18) 渡辺 茂・白井 明・辻 隆道・桑原正明・柴田順一・上田 実・渡部庄三部・石井邦彦(1971)伐木・造材・集材システムの最適化に関する研究(第I報). 林業試験場研究報告, 235, 1-205.
(1997年4月30日受付)
(1997年9月12日受理)

Summary

This study was undertaken to establish an efficient yarding operation system by field investigation of the yarding system assisted by self-propelled hoist-carriers which is currently employed in the Tenryu District of Shizuoka Prefecture.

In multiple regression analysis, such variables as the cut volume, the thinning intensity and the maximum incline slope emerged with a significance level of 1% using the amount of manpower required for short-wood logging as the dependent variable. The rigging distance showed a significance level of 1% when the amount of manpower required for rigging and dismantling was the dependent variable.

The following findings were obtained in a simulation study with a standard model of cutting ground (length:width=1:0.4). Simulation was at first attempted for grounds where wire-ropes could be set up parallel to the incline slope. On a ground with a slope of 25 or 30 degrees, it is most efficient to pitch wire-ropes through the center of the ground and carry out short-wood or tree-length logging without manual prehauling. On a ground with a slope of 35 degrees, it is most efficient to pitch wire-ropes on the lower side of the center and gather timbers on the lower side of the rig after timbers on the upper side of the rig are manually prehauling. When wire-ropes are pitched through the center on a ground with a slope of 35 degrees, yarding without manual prehauling was efficient on the standard cutting ground. However, if the length/width ratio of the cutting ground is altered to 1:0.8, yarding preceded by manual prehauling becomes more efficient. When wire-ropes are set up obliquely from the highest to the lowest level, it is efficient to pitch wire-ropes through the center and gather short and tree-length logs, if the incline slope does not exceed 30 degrees. On a ground with an incline slope of 35 degrees, yarding preceded by manual prehauling is efficient.

The simulation model was applied to actual cutting fields to assess the appropriateness of the simulation study and to define an optimum yarding operation system. In yarding operations with a self-propelled hoist-carrier system, the amount of manpower required was predicted to increase (12.0 man-days) compared to the amount actually expended (11.0 man-days). The amount of manpower required for prehauling was predicted to increase to 4.6 man-days which was larger than the amount actually expended (4.5 man-days).

If short-wood logging is to be carried out without manual prehauling under the same conditions, the amount of manpower required is estimated to be 21.7 man-days, which means that the yarding efficiency is reduced. Similarly, tree-length logging requires 18.5 man-days and full-tree logging 19.6 man-days. If bucking is efficiently managed at timber yards, full-tree logging assisted by a self-propelled hoist-carrier system would increase its efficiency and would attain the highest efficiency.

Key words: Self-propelled hoist carriage, Yarding system, Simulation model, Operational efficiency

A Line Thinning Operation with a Crawler Type Harvester and Forwarder Combination and Its Impact on the Residual Stand

Masahiro IWAOKA, Kazuhiro ARUGA and Hiroshi KOBAYASHI

The damage to the residual stand caused by a line thinning operation with a tracked harvester and a rubber tracked forwarder was investigated. The examination showed that a greater part of the damage was caused by the harvester operation while the rest of the damage, caused by the tractor and the forwarder operations, was minimal. Sufficient working space for a harvester will be effective in decreasing the number of damaged trees and in lightening the damage. The wider thinning width in existing and wider planting distances in new stands will be effective for this aim.

Study on a Yarding Operation System Using a Self-propelled Hoist Carriage

Yoshiro NAGAI, Masahiro IWAOKA, Hideo SAKAI, Koki INOUE and Hiroshi KOBAYASHI

A yarding system assisted by self-propelled hoist-carriers was studied. A more precise simulation assessment was attempted by taking into consideration the spatial relation between the position of the rig and the timber yards. The results suggested the optimum yarding operation and system differ according to the configuration of cutting grounds, slope incline and the condition of timber yards.