

タワーヤーダによる間伐作業システムと適正路網密度

朴 相俊*・岩岡正博*・酒井秀夫*・小林洋司*

Thinning Operation Systems with a Mobile Tower-Yarder and a Profitable Forest-Road Density

Sangjun PARK*, Masahiro IWAOKA*, Hideo SAKAI* and Hiroshi KOBAYASHI*

I. はじめに

近年、開発と保全を調和させつつ森林を持続的に利用していくことが世界の森林利用に対する認識であり、環境資源としての森林に大きな期待が寄せられている。森林の持つ様々な機能が十分に発揮されるためには、まず森林が健全に育成されて、森林の管理が適切に行われていなければならない。

日本でも来たるべき国産材時代に対応した林業生産の維持増進を図るため、高性能林業機械による新たな林業の展開とその担い手の確保に向けた様々な取り組みがなされている。

林内路網の整備は高性能林業機械化の促進と表裏一体の関係にある。

本論文では、架線系高性能林業機械として、ランニングスカイライン式等の短スパンの簡易な索張りを使用し、地形が急峻な山岳林を中心に導入されているタワーヤーダによる間伐作業の適切な作業システムと適正路網密度を明らかにすることを目的とし、対象林分、施業方法に違いを持つ集材作業現場において、要素作業時間の分析と集材作業工程の精細な分析を通じて、集材作業の特質、適正横取り距離を分析し、作業土場の間隔、適正路網密度の検討を行った。

なお、本調査は文部省科学研究費補助金一般研究(B)03454070により行ったものである。また、本調査の実施にあたり、多大なご協力を頂いた東大秩父演習林ならびに千葉演習林の職員の方々に謝意を表す。

II. 調査の概要

1. 調査地の概要

調査地の概要を表-1に示す。調査地Aは、東京大学秩父演習林要倉沢1林班い11小班80年生スギ、ヒノキの人工林で、複層林造成を目的とした間伐の集材作業地である。

集材作業は、タワーヤーダの本体を林道端に設置し、先柱を移動して集材した(図-1)。直径別間伐木及び残存木の本数を図-2に示す。伐倒方向は図-3に示すように尾根向きであり、下げ荷全木集材を行った(図-3)。土場ではタワーヤーダの集材作業と並行して、造材、バックホウによる極積み作業を行った。

調査地Bは、東京大学千葉演習林梨の木台43林班C10小班28年生スギ、ヒノキの人工林で、

* 東京大学農学部林学科

Department of Forestry, Faculty of Agriculture, The University of Tokyo.

表-1 調査地と集材作業の概要
Table 1. Summary of study area

項 目	調査地 A	調査地 B
調査地名	東大秩父演習林要倉沢 1 林班い 11 小班	東大千葉演習林梨の木台 43 林班 C10 小班
面 積	0.35 ha	0.67 ha
平均傾斜	37.3°	34.3°
林 種	人工林	人工林
樹 種	スギ, ヒノキ	スギ, ヒノキ
林 齢	80 年	28 年
ha 当たり 立木本数	782 本	1650 本
平均直径	33.4 cm	18.0 cm
平 均 単木材積	0.81 m ³ / 本	0.17 m ³ / 本
ha 当たり 蓄 積	684.4 m ³ /ha	384.8 m ³ /ha
本 数 間 伐 率	74.5%	35.3%
施 業 法	複層林間伐	定性間伐
集材方法	下げ荷全木集材	上げ荷全木集材
集材距離	20~90 m	5~60 m
使用した タワーヤーダ	リョウシン RME-200T	リョウシン RME-200T
造材・植積 作 業 機	チェーンソー・バックホウ	プロセッサ (イワフジ GP30A)

(注) 平均単木材積は間伐木のものである。

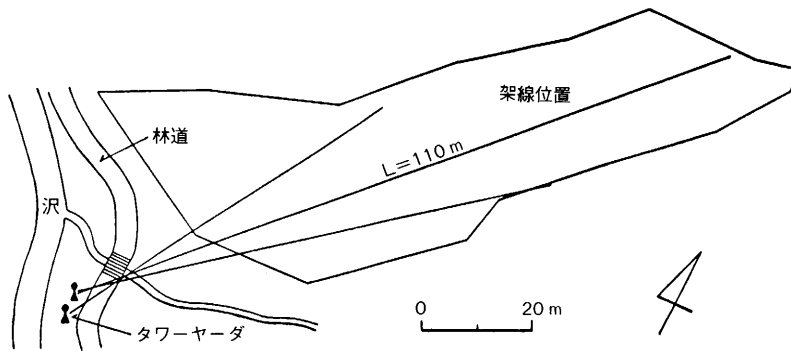


図-1 調査地 A とタワーヤーダおよび架線の位置。

Fig. 1. Study area A and location of Tower-yarder and Skyline.

タワーヤーダによる定性間伐作業を行った。

この調査地は、約 10 m, 20 m, 40 m の 3 種類の横取り幅を設定し、タワーヤーダと先柱を平行移動しながら集材作業を行った。この調査地とタワーヤーダ及び架線の位置を図-4 に示す。直径別間伐木、残存木の本数を図-5 に示す。作業の状況を図-6 に示す。伐倒は沢方向であり、上げ荷

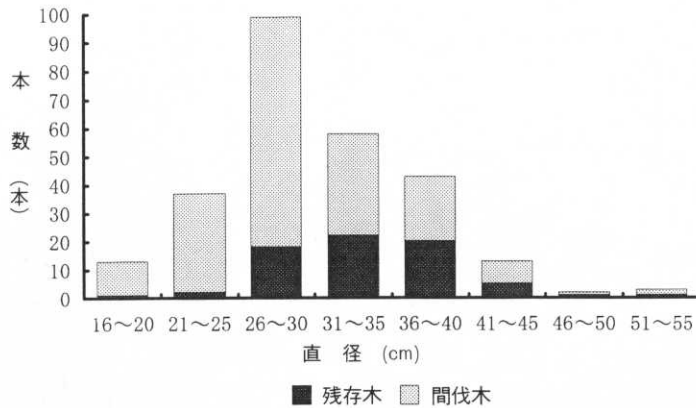


図-2 調査地 A における直径別本数.

Fig. 2. Number of trees by D. B. H. in study area A.



図-3 調査地 A の間伐現場.

Fig. 3. Thinning site of study area A.

全木集材を行った。林道上ではタワーヤーダの集材作業と並行して、プロセッサによる造材及び極積み作業を行った。

2. 調査機械と作業仕組みの概要

使用機械は、調査地 A, B とも及川自動車(株)製のリョウシン・タワーヤーダ RME-200T を用いた。主要諸元を表-2 に示す。

調査に用いられたタワーヤーダの索張り方式はいずれもランニングスカイライン方式である。搬器は、専用搬器 2 種を用意した。一つは非クランプ式搬器 (以下 A 搬器とする。図-7) で、もう一つは手動でホールバックラインをクランプすることによって係留可能なクランプ式搬器 (以

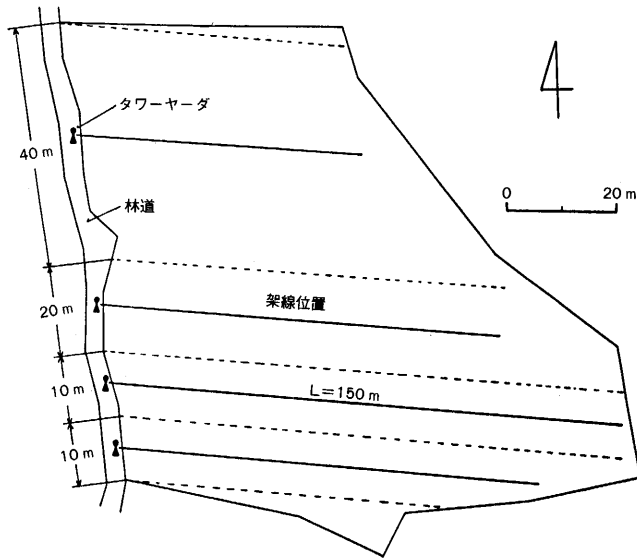


図-4 調査地 B とタワーヤーダおよび架線の位置.
 Fig. 4. Study area B and location of Tower-yarder and Skyline.

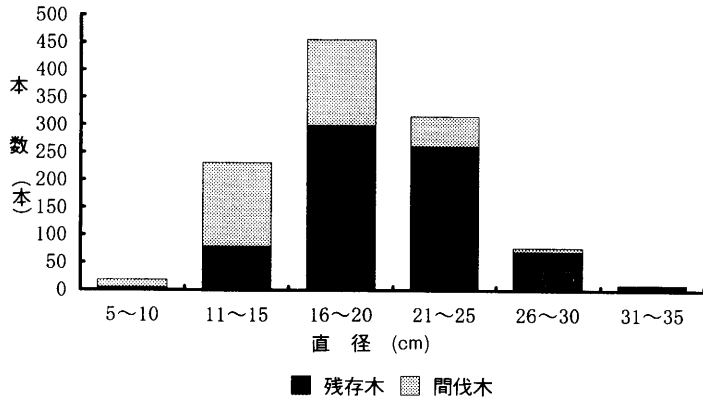


図-5 調査地 B における直径別本数.
 Fig. 5. Number of trees by D. B. H in study area B.

下 B 搬器とする。図-8) である。B 搬器はホールバックラインをクランプして、材を巻き上げるため、A 搬器よりも横取り作業が能率的であると予想される。

調査地 A では、チェーンソーによって伐倒し、集材作業はタワーヤーダによって全木集材し、土場でチェーンソーによる枝払いおよび玉切りの造材作業を行い、A 搬器を使用した。伐倒作業における作業員の配置は、伐倒手 1 名、枝払い手 1 名、信号手 1 名とチルホール手 1 名で基本的には 4 名の 1 組である。先行伐倒後集材作業における作業員の配置は、タワーヤーダのオペレータ 1 名、荷掛け作業員 2 名、先山玉切り作業員 1 名、土場積み込み作業と荷外し作業員 1 名、土場造材作業員 1 名、桎積み作業のためのバックホー運転手 1 名の計 7 名で作業を行った。



図-6 調査地 B におけるタワーヤーダとプロセッサによる間伐作業.

Fig. 6. Thinning operation by Tower-yarder and Processor in study area B.

表-2 タワーヤーダ RME-200T の主要諸元

Table 2. Specifications of Tower-yarder RME-200T

項 目	諸 元
名 称	リョウシン・タワーヤーダ
形 式	RME-200T
全 長	4,680 mm
全 高	1,900 mm
全 幅	1,530 mm
重 量	4,200 kg
エ ン ジ ン	
排 気 量	2,771 cc
最大出力	60PS/2,200 rpm
駆 動 方 式	6 輪全輪駆動
懸 架 方 式	前輪揺動懸架
タ ワ ー	
伸 長 量	5~9 m (3 段)
起 伏	100 度
施 回	380 度
アウトリガー	前後 4 基
ガイライン	手巻ウィンチ 30×2 m
タワーウィンチ	
型 式	ダブルキャブスタンドラムインターロック
ロープ巻き込み量	メインライン 250 m ホールバックライン 400 m
最大スパン距離	200 m
索送り速度	0~80 m/分
直 引 力	1,800 kgf



図-7 非クランプ式の A 搬器。
Fig. 7. Unclamped carriage A.



図-8 クランプ式の B 搬器。
Fig. 8. Clamped carriage B.

複層林造成のための間伐のため、間伐材が大きく、荷掛け時間が長くなり、材が重いために滑落したり、また、伐倒木が重なり合っていたため、林内で玉切り作業も行った。

調査地 B では、チェーンソーによって伐倒し、タワーヤードによって全木集材した。林道端でプロセッサ GP30 によって枝払いと玉切り、桎積みを行い、A 搬器と B 搬器の両方を使用した。伐倒作業における作業員の配置は、伐倒手 1 名、枝払い手 1 名、信号手 1 名とチルホール手 1 名

で基本的には4名の1組である。先行伐倒後の集材作業における作業員の配置は、タワーヤードのオペレータ1名、搬器クランプ作業員1名、荷掛け作業員2名、先山玉切り作業員1名、土場の荷外し作業員1名、プロセッサのオペレータ1名の計7名で作業を行った。間伐率が低く、定性間伐として木が小さく、残存木が多かったため、巻き上げ中に残存木が障害となることが多かった。また林道の幅員が3mと狭く、最小限の土場が確保されていない急傾斜地のため、材を完全に土場まで搬出できず、プロセッサの組合せ作業もよくできなかった。

3. 調査方法

調査は、ストップウォッチによる時間観測を行った。まずタワーヤードの集材架線路の距離をコンパス測量しておき、各要素作業の開始時間、集材距離と横取り距離を時間観測野帳に記帳した。

調査地Bでは、A搬器を使用した場合の集材作業（以下調査地Baとする）と、B搬器を使用した場合の集材作業（以下調査地Bbとする）に区別して調査を行った。

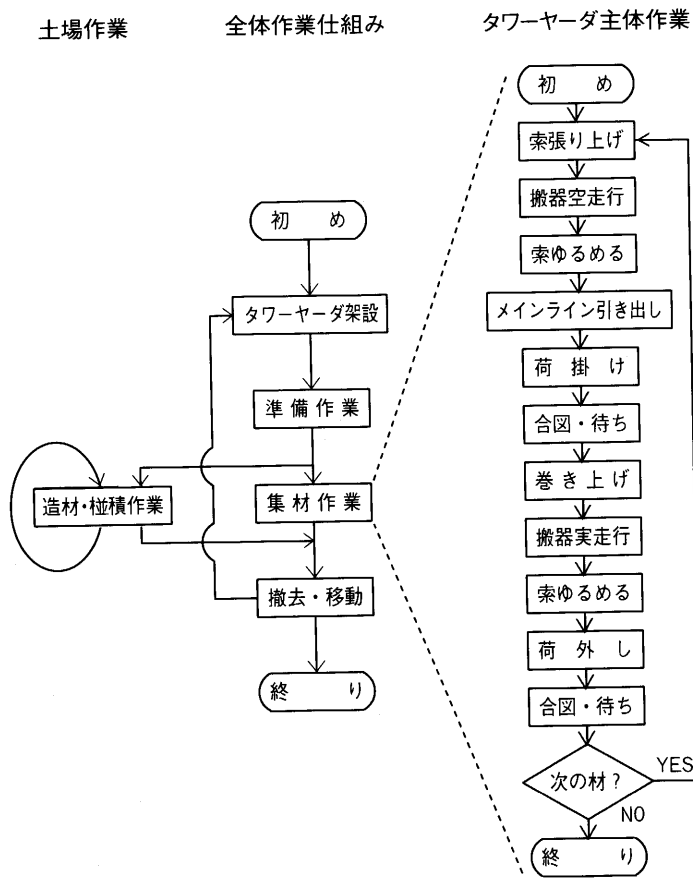


図-9 タワーヤード（ランニングスカイライン式）による間伐作業の流れ。

Fig. 9. Flow chart of thinning operation by Tower-yarder.

全体作業は、タワーヤード架設作業と準備作業、集材作業、タワーヤード撤去・移動に分類され、集材作業中に土場における造材・極積み作業を行った。タワーヤードによる集材作業の流れを図-9に示す。

III. 調査結果および作業システムの分析

1. 要素作業時間の分析

調査地 A で観測した総作業時間は 53 サイクル 474 分 27 秒で、このうち主体作業と判断された作業時間は 287 分 29 秒で総作業時間の 58.8% である。主体作業時間の内訳を図-10に示す。主体作業では搬器実走行が 24.2%、搬器空走行が 13.0%、作業停止が 11.8% と、搬器走行の占める割合が高い。

付帯作業については図-11 のようになり、タワーヤード架設、撤去の割合が高く、タワーヤード撤去 21.6%、タワーヤード架設 44.3% であった。

調査地 Ba で観測した総作業時間は 808 分 50 秒で、このうち主体作業時間が 443 分 44 秒、総作業時間の 54.9% であった。集材作業は 79 サイクルが観測された。主体作業では作業停止と搬器実走行、搬器空走行、巻き上げ停止の占める割合が高い(図-12)。付帯作業ではタワーヤード架設と撤去、土場整理の割合が高い(図-13)。

調査地 Bb で観測した総作業時間は 449 分 22 秒で、このうち主体作業時間が 306 分 45 秒、総作業時間の 68.3% であった。集材作業は 56 サイクルが観測された。調査地 Ba と同じく作業停止と搬器実走行、搬器空走行、合図・待ちの要素作業の割合が高い(図-14)。付帯作業では調査地 Ba と同じくタワーヤード架設、撤去の割合が非常に高く、調査地 B はいずれも調査地 A より高い割合であった。これはタワーヤードと先柱の架設の仕方の違いを示すものと考えられる。次に作業準備となっている(図-15)。

調査地 A, Ba, Bb の要素作業の割合を表-3 に示す。表-3 は主体作業は 1 サイクルあたりに、付帯作業は 1 回あたりに換算したものである。

調査地 A は下げ荷集材のため、上げ荷集材の調査地 Ba, Bb よりも索張り上げ時間が短くなっている。調査地 Ba は横取り距離が長かったため、メインライン引き出し時間が長くなった。

調査地 Ba は巻き上げ停止時間の占める割合が大きく、調査地 A の 5 倍になっている。これは調査地 Ba が間伐率の低い定性間伐であったため残存木が多く、損傷を防ぐために横取り時の搬器停止位置を細かく変更していたためである。また、調査地 Bb ではクランプ式改良搬器を使用したため、調査地 Ba より巻き上げ停止時間が少ない。したがって、非クランプ式搬器を使用した調査地 Ba の巻き上げ時間 31.4 秒と巻き上げ停止時間 33.7 秒の合計 65.1 秒よりも、調査地 Bb では巻き上げ時間 20.9 秒と巻き上げ停止時間 8.7 秒、クランプ掛け時間 15.1 秒、合計 44.7 秒と、サイクルタイムが短い。

調査地 A の架設撤去時間は、先柱を移動しただけのため、調査地 Ba, Bb よりも短くなっている。調査地 A は搬出材が大きかったため、先山における玉切りと支障木整理の時間が長くなった。

調査地 Ba, Bb は林道幅が 3 m と狭かったため、プロセッサの土場作業のための材の方向転換が難しく、そのための作業停止時間が長くなった。

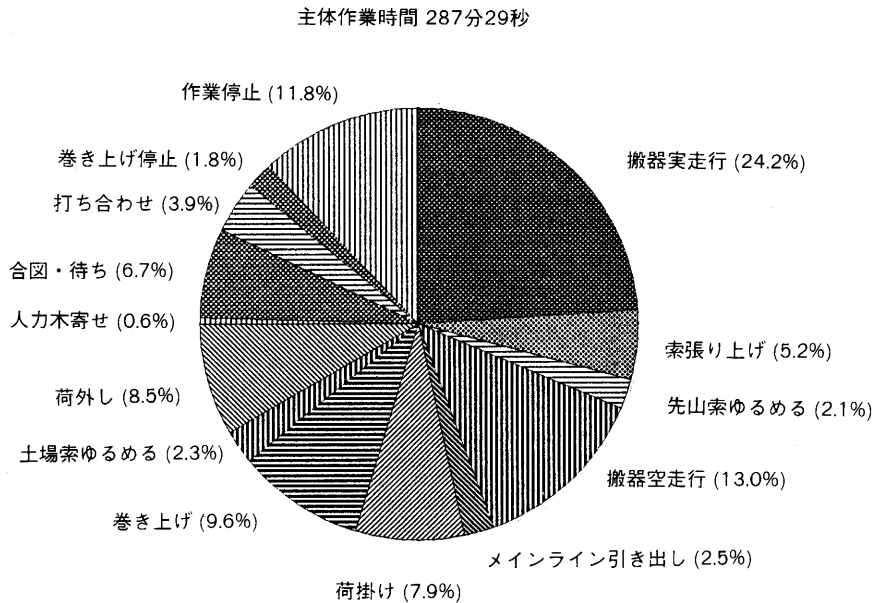


図-10 調査地 A における主体作業時間の内訳。

Fig. 10. Proportion of main operation time in study area A.

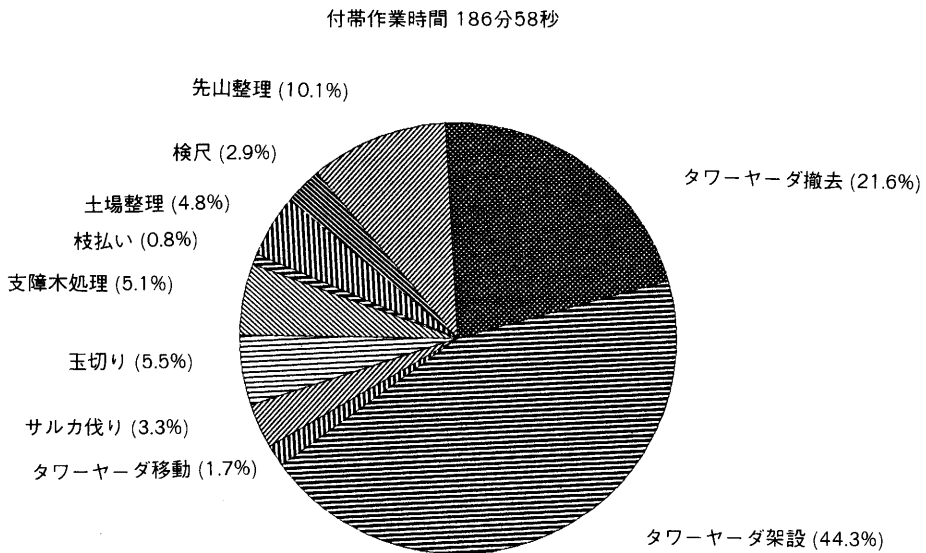


図-11 調査 A における付帯作業時間の内訳。

Fig. 11. Proportion of sub-main operation time in study area A.

主体作業時間 443分44秒

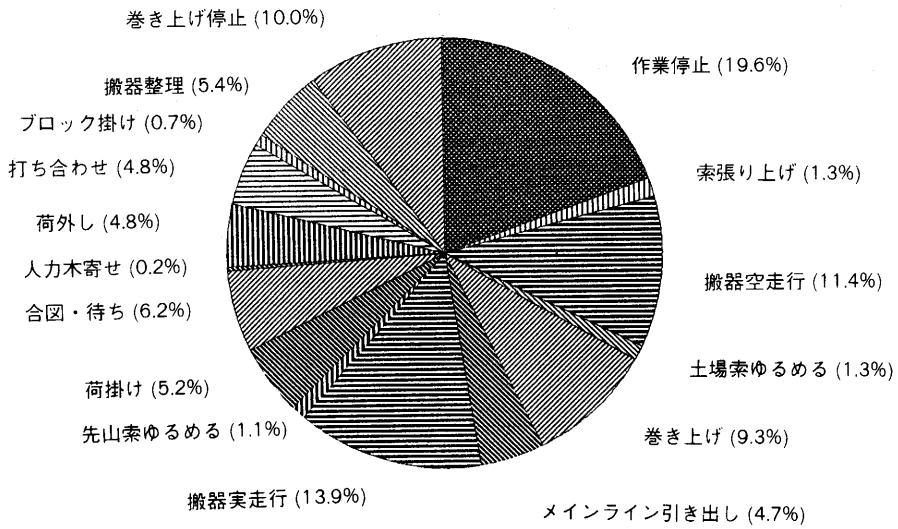


図-12 調査地 Ba における主体作業時間の内訳.

Fig. 12. Proportion of main operation time in study area Ba.

付帯作業時間 279分49秒

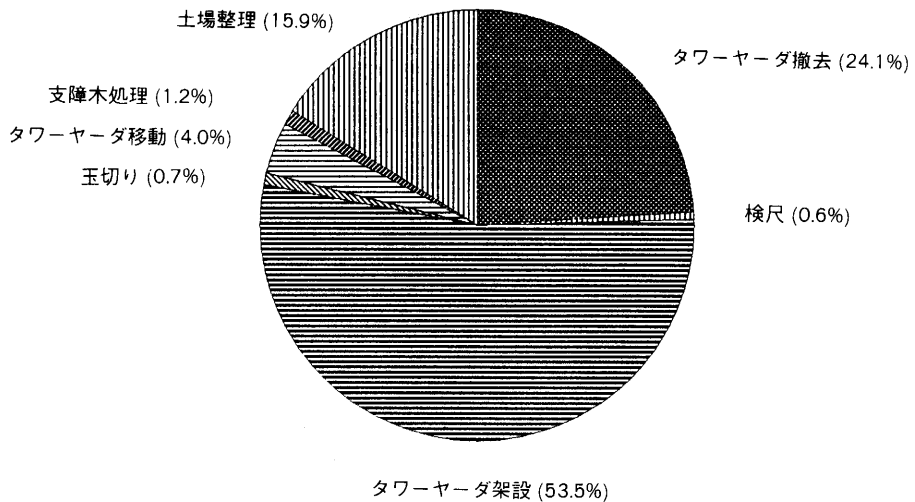


図-13 調査地 Ba における付帯作業時間の内訳.

Fig. 13. Proportion of sub-main operation time in study area Ba.

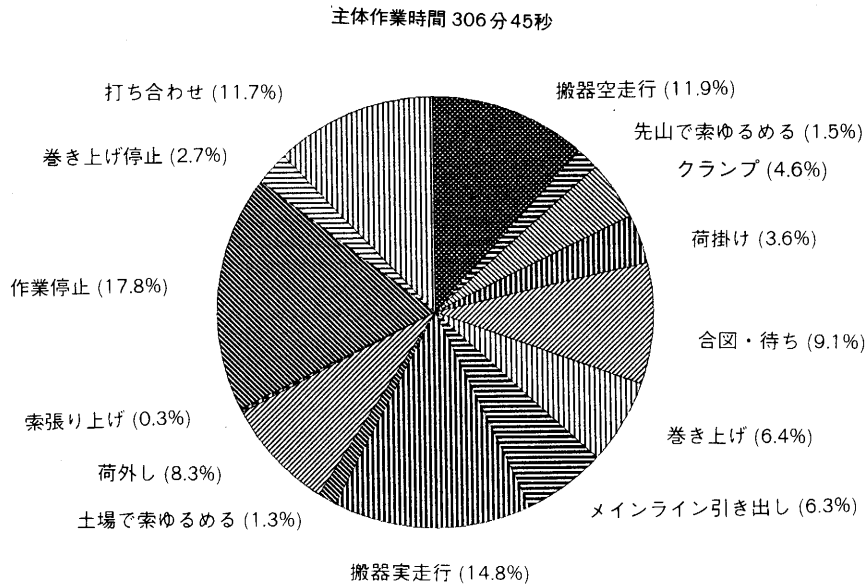


図-14 調査地 Bb における主体作業時間の内訳

Fig. 14. Proportion of main operation time in study area Bb.

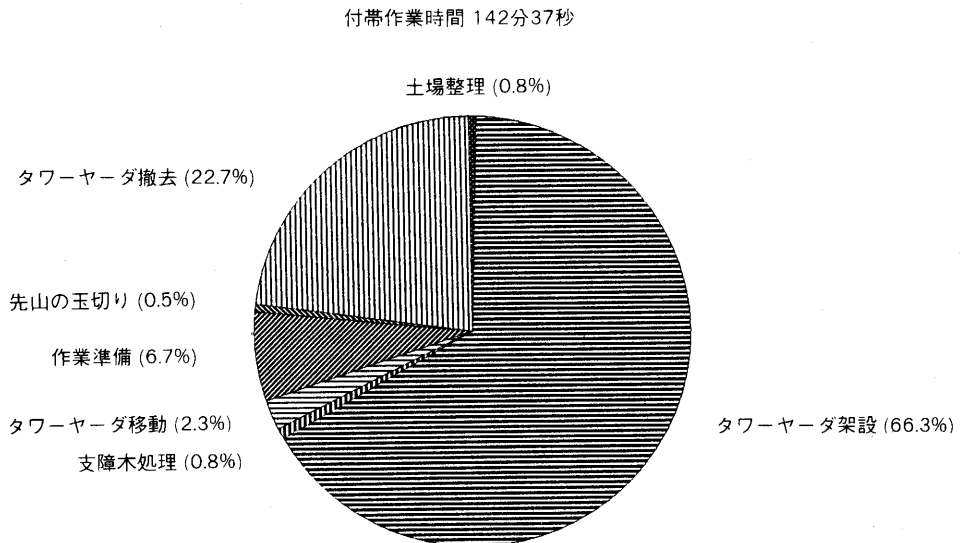


図-15 調査地 Bb における付帯作業時間の内訳

Fig. 15. Proportion of sub-main operation time in study area Bb.

2. 作業工程の分析

タワーヤードの架設・撤去、準備作業を除いた時間で作業工程を分析した。調査地 A では、実

表-3 調査地における要素作業時間の割合

Table 3. Proportion of operational element time in study area

	要素作業名	調査地 A		調査地 Ba		調査地 Bb	
		(秒)	(%)	(秒)	(%)	(秒)	(%)
主 体 作 業	索張り上げ	16.8	(5.3)	4.2	(1.3)	0.8	(0.2)
	搬器空走行	44.7	(14.1)	38.5	(11.4)	39.1	(11.9)
	索ゆるめる(先山)	6.7	(2.1)	3.9	(1.1)	4.8	(1.5)
	クランプ掛け	0.0	(0.0)	0.0	(0.0)	15.1	(4.6)
	メインライン引き出し	8.0	(2.5)	34.0	(10.1)	20.7	(6.3)
	荷掛け	25.4	(8.0)	20.1	(6.0)	11.7	(3.6)
	合図・待ち	21.5	(6.8)	20.9	(6.2)	29.8	(9.1)
	巻き上げ	30.9	(9.8)	31.4	(9.3)	20.9	(6.4)
	搬器実走行	69.0	(21.8)	47.0	(13.9)	48.5	(14.8)
	索ゆるめる(土場)	7.6	(2.4)	4.3	(1.3)	4.3	(1.3)
	荷外し	27.5	(8.7)	16.2	(4.8)	27.3	(8.3)
	人力木寄せ	1.8	(0.6)	0.5	(0.2)	0.0	(0.0)
	打ち合わせ	12.6	(4.0)	16.2	(4.8)	38.4	(11.7)
	巻き上げ停止	5.8	(1.8)	33.7	(10.0)	8.7	(2.6)
	作業停止	38.2	(12.1)	66.1	(19.6)	58.4	(17.7)
		合計	316.5	(100)	337.0	(100)	328.5
付 帯 作 業	タワーヤード架設	1658.0	(54.7)	2995.0	(61.0)	2581.0	(59.0)
	タワーヤード撤去	807.0	(21.5)	1348.0	(27.5)	1428.0	(32.7)
	タワーヤード移動	62.3	(2.1)	336.5	(6.9)	197.0	(4.5)
	サルカ切り	37.0	(1.2)	0.0	(0.0)	0.0	(0.0)
	先山の玉切り	40.9	(1.3)	14.0	(0.3)	40.0	(1.0)
	支障木整理	57.4	(2.0)	33.5	(0.6)	65.0	(1.4)
	先山の枝払い	45.0	(1.5)	0.0	(0.0)	0.0	(0.0)
	土場整理	268.0	(8.8)	157.0	(3.2)	65.0	(1.4)
	先山の検尺	54.2	(3.0)	26.3	(0.5)	0.0	(0.0)
	合計	3029.8	(100)	4910.3	(100)	4376.0	(100)

(注) 主体作業は1サイクル、付帯作業は1回当たりに換算したものである。

働時間 348.1 分で 53 回集材し、集材立木本数は 41 本、集材立木材積は 33.2 m³ であった。タワーヤードの 1 回当たり架設撤去時間は、4 人で架設時間が 27 分 38 秒であり、撤去時間 13 分 27 秒と合計して 41 分 5 秒であった。

調査地 Ba では、実働時間 495.2 分で 79 回集材し、集材立木本数は 71 本、集材立木材積は 12.1 m³ であった。タワーヤードの 1 回当たり架設時間は 4 人で 49 分 55 秒であり、撤去時間は 22 分 28 秒で 1 回当たり架設撤去時間は 72 分 23 秒であった。

調査地 Bb では、実働時間 319.2 分で 56 回集材し、集材立木本数は 59 本、集材立木材積は 10.0 m³ であった。タワーヤードの 1 回当たり架設時間は、4 人で 43 分 01 秒であり、撤去時間 23 分 48 秒と合計して架設撤去時間は 66 分 49 秒であった。

各調査地のタワーヤードの架設時間と撤去時間の 1 回当たり平均は架設時間が 40 分 11 秒、撤去時間が 19 分 54 秒、合計 60 分 5 秒であった。

各調査地におけるタワーヤードによる集材作業工程の計算結果を表-4 に示す。集材作業工程は 1.5~5.7 m³/時になる。調査地 A, Ba, Bb の集材本数や集材回数に大きな差はないが、調査地

表-4 調査地におけるタワーヤードによる集材作業工程
Table 4. Productivity of logging operation by Tower-yarder

項目		調査地 A	調査地 Ba	調査地 Bb
測定値	集材回数 (回)	53	79	56
	集材立木本数 (本)	41	71	59
	集材立木材積 (m ³)	33.2	12.1	10.0
	実働時間 (分)	348.1	495.2	319.2
	作業員数 (人)	5	5	5
集材1回当たりの平均	集材本数 (本/回)	0.77	0.99	1.05
	集材材積 (m ³ /回)	0.63	0.15	0.18
	サイクルタイム (分/回)	6.6	6.3	5.7
実働1時間当たりの平均	集材回数 (回/時)	9.1	9.6	10.5
	集材本数 (本/時)	7.1	8.6	11.1
	集材材積 (m ³ /時)	5.7	1.5	1.9
1日当たりの平均	集材回数 (回/日)	54.6	57.6	63.0
	集材本数 (本/日)	42.6	51.6	66.6
	集材材積 (m ³ /日)	34.2	9.0	11.4
1日1人当たりの平均	集材回数 (回/日・人)	10.9	11.5	12.6
	集材本数 (本/日・人)	8.5	10.3	13.3
	集材材積 (m ³ /日・人)	6.8	1.8	2.3
タワーヤード	架設時間 (1回)	27分 38秒	49分 55秒	43分 1秒
	撤去時間 (1回)	13分 27秒	22分 28秒	23分 48秒

(注) 1日は実働6時間である。

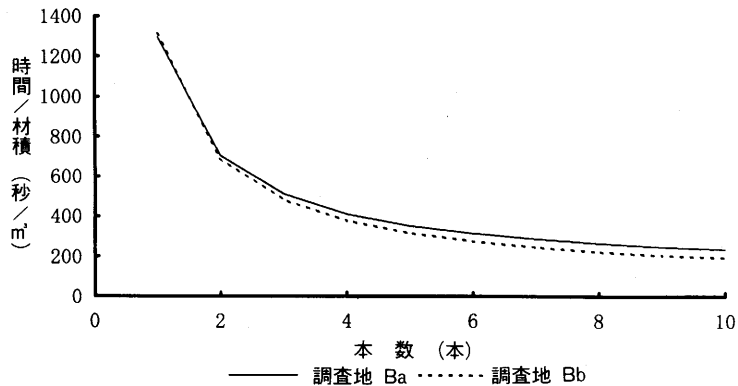


図-16 調査地 Ba と Bb における荷掛け本数と平均集材作業工程。

Fig. 16. Number of trees of choker and average logging operation productivity in study Ba, Bb.

A は調査地 Ba, Bb より平均単木材積が大きいため、集材作業工期が高い。また、クランプ式搬器を使用した調査地 Bb の方が調査地 Ba より工期が良い。

ここで、平均単木材積の小さい調査地 Ba, Bb において、複数の材を同時に集材したと仮定した場合の工期について検討してみる。

複数の材を集材するときの単位材積当たりの集材時間は (1) 式で表わせる。

$$\frac{\text{索張り上げ} + \dots + \text{荷掛け} \times \text{本数} + \dots + \text{荷外し}}{\text{1 本当たり材積} \cdot \text{1 回当たり本数}} \quad (1)$$

調査地 Ba と Bb における 1 本当たりの荷掛け時間は、表-3 より 20.1 秒と 11.7 秒であったので、この値を荷掛け時間に援用して荷掛け本数と平均集材作業工期を計算すると図-16 となる。調査地 Ba と Bb のように間伐材の材積が小さい場合には、複数の材を同時に集材する方が効果的であるが、残存立木の影響や、集材木の分布、積載荷重の関係で、本数をむやみに多くすることはできない。図-16 から本数が 2~3 本の場合に傾きが急になっており、この程度の本数が最も効果的と思われる。

3. 搬器空走行距離と搬器空走行時間の関係

土場から先山まで空搬器が移動する搬器空走行距離 (X) と搬器空走行時間 (Y) の関係を図-17 に示す。回帰分析の結果、調査地 A: $Y=0.81X, R^2=0.64$, 調査地 Ba: $Y=1.10X, R^2=0.61$, 調査地 Bb: $Y=1.13X, R^2=0.69$ となり、相関係数の検定の結果、いずれも 1% の有意水準で相関関係が認められた。

調査地 Ba, Bb の回帰式はほとんど同じであったが、調査地 A は調査地 Ba, Bb よりも搬器空走行時間が短かった。これは、上げ荷と下げ荷の違いとタワーヤードのオペレータの違いによるものと考えられる。

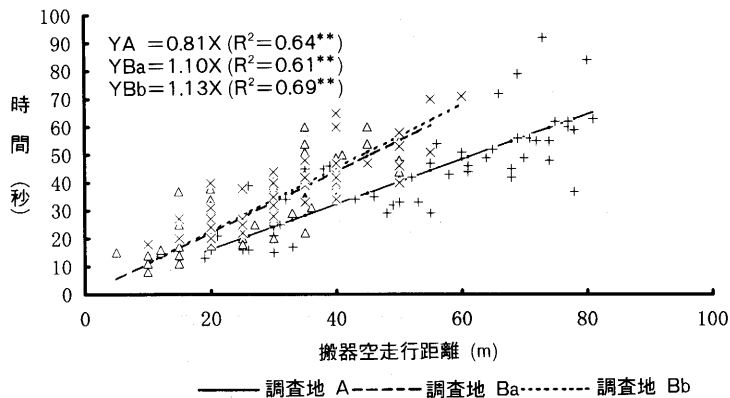


図-17 調査地における搬器空走行距離と空走行時間の関係。

Fig. 17. Relationship between unloaded carriage running distance and unloaded carriage running time in study area.

4. 搬器実走行距離と搬器実走行時間の関係

調査地 A, Ba, Bb における搬器実走行距離 (X) と搬器実走行時間 (Y) の関係を図-18 に示す。回帰分析の結果、調査地 A: $Y=1.13X, R^2=0.37$, 調査地 Ba: $Y=1.47X, R^2=0.63$, 調査地 Bb: $Y=1.41X, R^2=0.81$ となり、相関係数の検定の結果、いずれも 1% の有意水準で相関関係が認められた。

調査地 A では、材が大きいために、回帰式の傾きが小さく、調査地 Ba, Bb よりもばらつきが大きく、相関も低い。また、調査地 A は、下げ荷集材で、材が重いために、搬器実走行速度が速く観測された。調査地 Ba, Bb は、上げ荷集材のため、調査地 A よりも材が小さいにもかかわらず、搬器実走行速度が小さかった。調査地 Ba, Bb では集材作業条件がほぼ同じであるため、搬器

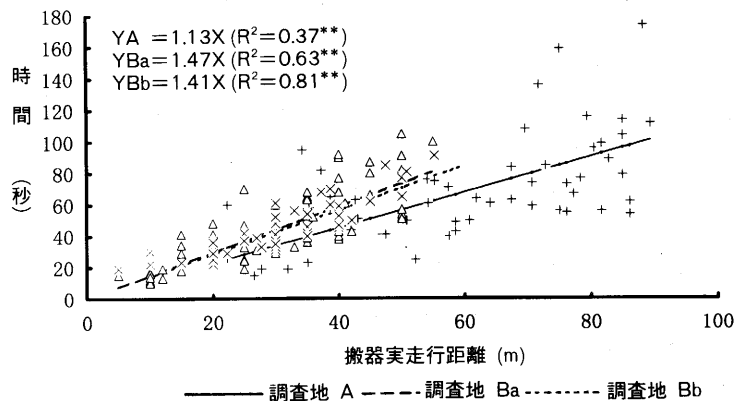


図-18 調査地における搬器実走行距離と実走行時間の関係。

Fig. 18. Relationship between loaded carriage running distance and loaded carriage running time in study area.

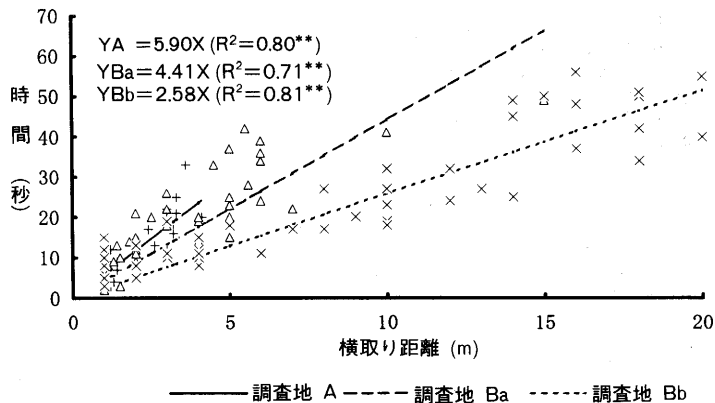


図-19 調査地における横取り距離とメインライン引き出し時間の関係。

Fig. 19. Relationship between lateral yarding distance and mainline pulling time in study area.

実走行距離に対する搬器実走行時間は、搬器の違いにもかかわらず、ほとんど同じであった。

5. 横取り距離とメインライン引き出し時間の関係

調査地 A, Ba, Bb における横取り距離 (X) と荷掛けのためにメインラインを引き出す時間 (Y) との関係を図-19 に示す。回帰分析の結果、調査地 A: $Y=5.90X$, $R^2=0.80$, 調査地 Ba: $Y=4.41X$, $R^2=0.71$, 調査地 Bb: $Y=2.58X$, $R^2=0.81$ となり、相関係数の検定の結果、いずれも 1% の有意水準で相関関係があった。

調査地 A は材が大きく、足場が悪いため、調査地 Ba, Bb よりメインライン引き出し時間が遅くなったと考えられる。また、調査地 Ba, Bb では上げ荷集材のため、下げ荷集材の調査地 A よりメインライン引き出ししが容易で、メインライン引き出し時間が早かったと考えられる。調査地 Bb は、クランプ式搬器を使用したため、調査地 Ba よりもメインライン引き出し時間が短い。

6. 横取り距離と巻き上げ時間の関係

調査地 A と調査地 Ba, Bb における横取り距離 (X) と材の巻き上げ時間 (Y) の関係を図-20 に示す。回帰分析の結果、調査地 A: $Y=6.42X+5.71$, $R^2=0.63$, 調査地 Ba: $Y=4.06X+9.59$, $R^2=0.71$, 調査地 Bb: $Y=1.58X+5.59$, $R^2=0.70$ となり、相関係数の検定の結果、いずれも 1% の有意水準で相関関係があった。

調査地 A の方が調査地 Ba, Bb よりも回帰式の傾きが大きい。これは、調査地 A では下げ荷であっても材が大きく、さらに、残存木に注意しながらウィンチを巻き上げていたためである。

調査地 Bb は、調査地 Ba より巻き上げ時間の増加が小さい。これは、調査地 Bb はクランプ式搬器を使用し、材の巻き上げがスムーズに行われ、巻き上げ時間が小さくなった。

各調査地とも伐倒された木が重なり合っていたため、巻き上げの障害となっていた。今後、材が重なり合わないよう、搬出方向にあわせて上手に伐倒するならば、巻き上げが容易になる。

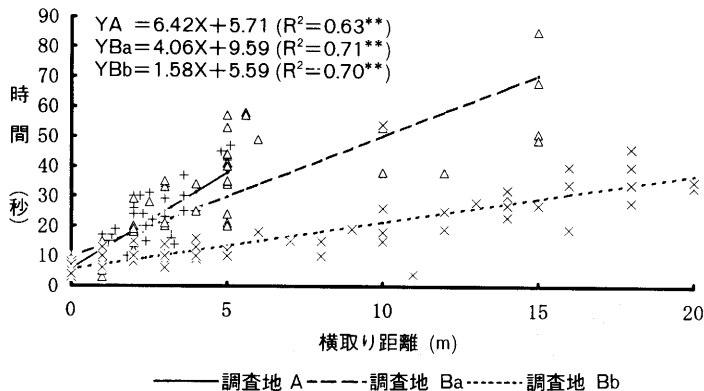


図-20 調査地における横取り距離と巻き上げ時間の関係。

Fig. 20. Relationship between lateral yarding distance and skidding time in study area.

7. 横取り距離とサイクルタイムの関係

調査地 A と調査地 Ba, Bb における横取り距離 (X) とサイクルタイム (Y) の関係を図-21 に示す。回帰分析の結果、調査地 A: $Y=18.65X+183.35, R^2=0.10$, 調査地 Ba: $Y=11.66X+135.31, R^2=0.15$, 調査地 Bb: $Y=0.812X+206.35, R^2=0.10$ となり、調査地 A, Bb では 5% の有意水準、調査地 Ba では 1% の有意水準で相関関係があるが、調査地 Bb では回帰式の傾きが小さく、横取り距離とサイクルタイムの相関が低かった。これはクランプ式搬器を使用したため、横取り距離によるサイクルタイムへの影響が少なかったためと考えられる。調査地 A は材が大きいため、調査地 Ba 及び Bb よりサイクルタイムに対する横取り距離の影響も大きかった。

8. 搬器実走行距離とサイクルタイムの関係

調査地 A と調査地 Ba, Bb における搬器実走行距離 (X) とサイクルタイム (Y) との関係を図-

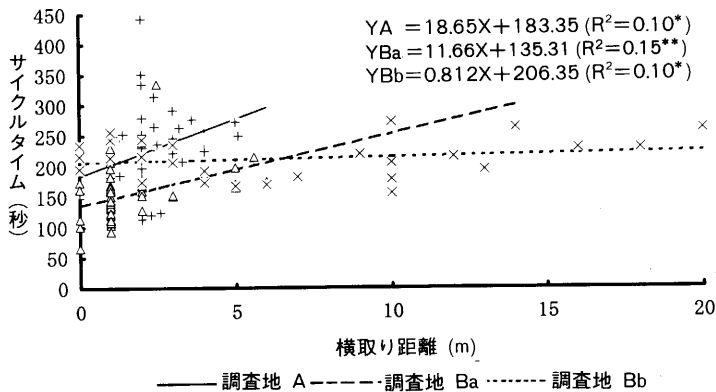


図-21 調査地における横取り距離とサイクルタイムの関係。

Fig. 21. Relationship between lateral yarding distance and cycle time in study area.

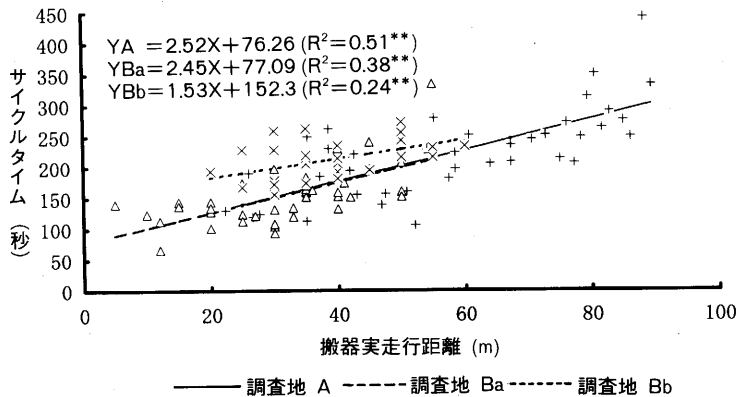


図-22 調査地における搬器実走行距離とサイクルタイムの関係。

Fig. 22. Relationship between loaded carriage running distance and cycle time in study area.

22に示す。回帰分析の結果、調査地 A: $Y=2.52X+76.26, R^2=0.51$, 調査地 Ba: $Y=2.45X+77.09, R^2=0.38$, 調査地 Bb: $Y=1.53X+152.30, R^2=0.24$ となり、相関係数の検定の結果、いずれも1%の有意水準で相関関係があった。調査地 A と調査地 Ba では、搬器実走行距離とサイクルタイムの関係がほぼ同じである。

9. 適正横取り距離の分析

タワーヤードによる集材作業では架線の架設間隔、すなわち、横取り距離が重要である。架設間隔を短くすればタワーヤードの架設・撤去時間が多くなり、架設間隔を大きくすれば横取り距離に対する集材時間が多くなる。いま、架線の架設間隔を L とし、平均横取り距離に対する集材1回当たりのサイクルタイムを T とすれば、平均横取り距離は $L/4$ となり、 T は(2)式のようになる。

$$T = a \cdot \frac{L}{4} + b \quad (2)$$

ただし、 a, b は1次回帰直線の係数。

最大集材距離を100 m と想定し、林地幅を LL , 集材本数を N と表せば、 $N=LL \cdot 100/S$ で表せる。ここに、 S は間伐材1本当たりの面積で、 $S=10,000/(1 \text{ ha 当たりの間伐本数})$ 。従って、集材本数に対する集材時間は $N \cdot T$ となる。また、架線の架設・撤去作業時間を Kx と表せば、伐区全体に対する総作業時間 TT は、架設回数が LL/L となり、(3)式のように表せる⁴⁾。

$$TT = N \cdot T + (Kx) \cdot \frac{LL}{L} \quad (3)$$

また、架線の架設間隔 (L) に対してまとめると、 TT は、

$$\begin{aligned} TT &= \frac{LL \cdot 100}{S} \cdot \left(a \cdot \frac{L}{4} + b \right) + Kx \cdot \frac{LL}{L} \\ &= \left(\frac{LL \cdot 100 \cdot a}{S \cdot 4} \right) \cdot L + Kx \cdot \frac{LL}{L} + \left(\frac{LL \cdot 100}{S} \right) \cdot b \end{aligned}$$

と書き換えられる。ここで、

$$C_0 = \frac{LL \cdot 100 \cdot a}{S \cdot 4}, \quad C_1 = Kx \cdot LL,$$

$$C_2 = \frac{LL \cdot 100}{S} \cdot b$$

とおけば、

$$TT = C_0 \cdot L + \frac{C_1}{L} + C_2$$

となる。

従って、 TT を最小とする L を求めるには、 TT を L に対して微分して0とする値を求めればよい。

$$L = \sqrt{\frac{C_1}{C_0}}, \quad L = \sqrt{\frac{Kx \cdot S}{25 \cdot a}} \quad (4)$$

となる。

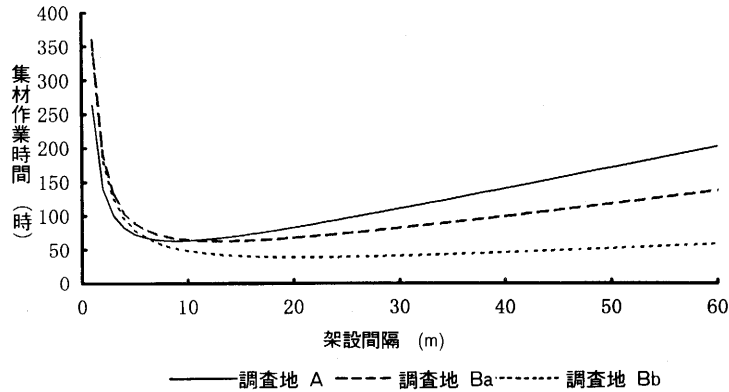


図-23 理論的に計算した架線の架設間隔と集材作業時間の関係。

Fig. 23. Relationship between setting up interval of skyline and logging operation time calculated a theoretical in study area.

これに対して、調査結果の前述のデータを当てはめると、調査地 A では、 $a=18.65, S=17.15$ 、調査地 Ba では、 $a=11.66, S=17.18$ 、調査地 Bb では、 $a=0.812, S=17.18$ となり、また、 Kx は、調査地 A では平均 2465 秒、調査地 Ba, Bb では平均 4176 秒であった。

この値から全体集材作業時間を最小にする架線の架設間隔 (L) を (4) 式によって計算すれば、調査地 A, Ba, Bb の架設間隔は、それぞれ 9.5 m, 15.7m, 59.5 m である。従って、最大集材距離を 100 m とした時の適正横取り距離は、調査地 A では 5 m、調査地 Ba では 8 m、調査地 Bb では 30 m となる。

(3) 式によって架線の架設間隔に対する ha 当たりの全体集材作業時間を計算したのが図-23 である。

調査地 A は、材が大きいために適正横取り距離が短くなっており、単木間伐で、材が小さい調査地 Ba, Bb では、適正横取り距離が長くなっている。特に手動のクランプ式搬器を使用した調査地 Bb は、横取り距離によってサイクルタイムがあまり影響を受けないため、調査地 Ba より適正横取り距離が長くなり、横取り作業の効率が向上したことが分かる。このように、タワーヤード集材作業は、材の大きさや使用搬器によって適正横取り距離が異なることが分かる。

結論として、調査地 A の場合は約 10 m、調査地 Ba は 20 m、調査地 Bb は 60 m 間隔に架設すればよい。

既往の研究⁹⁾によると、調査地 Ba のような定性間伐での上げ荷集材では、適正張り替えの間隔は 20 m であるが、今回の調査地 A の場合は材が大きいために、適正張り替え間隔が短くなったと考えられる。

IV. 適正路網密度の検討

1. 作業土場の間隔

タワーヤード作業においては、路網の整備計画と合わせて作業土場の適正な設置が、作業の効率化、生産性の向上等の重要な要素となる。

作業土場をタワーヤードの設置位置とすると、横取り距離のおよそ 2 倍とすればよい。今回の

調査においては、前述の適正横取り距離から作業土場の間隔はそれぞれ約 10 m, 20 m, 60 m となるよう設置する。作業土場の広さは、1 スパン当たりの生産量と使用するタワーヤード及びブロッサの大きさと集積場所を勘案して必要な面積を確保すればよい。

2. 適正路網密度の計算

2-1. 最大集材距離による路網密度

最大集材距離による路網密度は、既往の研究⁵⁾から次式 (4) で求められる。

$$d = 5,000(1 + \eta) / Sm \quad (4)$$

ここで、 d は路網密度、 η は迂回率、 Sm は最大集材距離である。

タワーヤードの最大スパン長を最大集材距離とし、迂回率は林地傾斜を基準で分類した既往の研究¹⁾によって分類して、式 (4) の路網密度計算結果を表-5 に示す。集材距離と集材経費の関係で最大集材距離が 200 m が適切とした既往の研究²⁾から適正路網密度を求めると、迂回率 0.5 のとき 37.5 m/ha になる。

また、今回の調査に使用されたタワーヤードの最大スパンが 200 m であるため、この 200 m を最大集材距離と見ると、林地傾斜 20 度～40 度の迂回率 0.4～0.6 での適正路網密度は 35 m/ha～40 m/ha である。

表-5 によると、タワーヤード作業システムで最大集材距離を 150 m から 350 m まで、また平均林地傾斜 30 度の迂回率 0.5 とすれば、タワーヤード作業システムでの適正路網密度は 21.4 m/ha～50 m/ha となる。

2-2. 複合路網密度理論による適正路網密度

調査地 A と B のようなタワーヤードによる集材作業システムの適正路網密度を求めるために、複合路網密度理論による適正路網密度を計算した。林道開設費、集材費及び労務費からなる複合路網密度の算定式は、(5), (6), (7) 式のとおりである⁶⁾。

$$d_H = 50 \sqrt{\frac{\alpha_H \cdot V \cdot (1 + \eta)(1 + \eta'_H)}{r_H} + \frac{K(1 + \eta)C_W \cdot N_W}{500 \cdot V_W \cdot r_H}} - d \quad (5)$$

表-5 最大集材距離式による路網密度

Table 5. Forest-road density calculated by maximum logging distance method

最大集材 距離	迂 回 率					
	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7
(m)						(m/ha)
50	120.0	130.0	140.0	150.0	160.0	170.0
100	60.0	65.0	70.0	75.0	80.0	85.0
150	40.0	43.3	46.7	50.0	53.3	56.7
200	30.0	32.5	35.0	37.5	40.0	42.5
250	24.0	26.0	28.0	30.0	32.0	34.0
300	20.0	21.7	23.3	25.0	26.7	28.3
350	17.1	18.6	20.0	21.4	22.9	24.3
400	15.0	16.3	17.5	18.8	20.0	21.3
450	13.3	14.4	15.6	16.7	17.8	18.9
500	12.0	13.0	14.0	15.0	16.0	17.0

$$d_L = 50 \sqrt{\frac{\alpha_L \cdot V \cdot (1+\eta)(1+\eta'_L)}{r_L} + \frac{K(1+\eta)C_W \cdot N_W}{500 \cdot V_W \cdot r_L}} - d_o \quad (6)$$

$$d_C = \sqrt{\frac{p^2}{4} - q} - \frac{p}{2} \quad (7)$$

ただし、

$$p = d_o + \frac{\beta_H - \beta_L}{r_H - r_L} \cdot V$$

$$q = (p - d_o)d_o + \frac{2500 V(1+\eta)\{\alpha_H(1+\eta'_H) - \alpha_L(1+\eta'_L)\}}{r_H - r_L}$$

ただし、 d_H : 林道と大規模集材システムを前提にした場合の林道密度 (m/ha), d_L : 低規格の林道と小規模集材システムを前提にした場合の林道密度 (m/ha), d_C : d_H と d_L の交点に対応する林道密度 (m/ha), d_o : 林内公道密度 (m/ha), α_H, β_H : 大規模集材システムの集材費に関する係数, α_L, β_L : 小規模集材システムの集材費に関する係数, V : 森林の期待生産量 (m³/ha), η : 林道の迂回率, η'_H : 大規模集材システムの集材路の迂回率, η'_L : 小規模集材システムの集材路の迂回率, K : 歩行距離修正係数, C_W : 労務単価 (円/時), N_W : 労働投入量 (人/ha), V_W : 林内歩行速度 (km/時), r_H : 林道の開設単価 (円/m), r_L : 低規格の林道の開設単価 (円/m)。

この複合路網密度の算定式の適用において、調査地 A の地形は地形の分類法による区分、「急峻」であり、調査地 B の地形は同じく、「急」であるため、調査地 A と B における大規模集材システムに相当する因子は、各々長距離架線集材と中距離架線集材を適用し、小規模集材システムに相当する因子は、タワーヤードによる集材作業を適用して複合路網密度を求めた。

また、集材距離に対する集材費に関する係数は (8) 式の α, β に相当する³⁾。

$$F(L) = \frac{Mt \cdot (a \cdot L + b)}{Vm \cdot 3600} = \alpha \cdot L + \beta \quad (8)$$

ただし、 $F(L)$ は集材距離 L に対する集材費、 L は集材距離、 Mt は 1 時間当たりの機械費、即ち 1 時間当たりの機械損料と運転経費、 a, b は集材距離に対するサイクルタイムの一次回帰直線の係数、 Vm は 1 荷当たり集材材積、 α, β は集材距離に対する集材費を一次回帰直線と当てはめた場合の係数。

算定式適用にあたって、この場合、調査地 A と B における大規模集材システムの集材費に関する係数 α_H, β_H は、長距離架線集材と中距離架線集材に対する既往の研究⁶⁾の値を使用して複合路網密度を求めたが、小規模集材システムとしてタワーヤードによる集材作業の集材費に関する係数 α_L, β_L は、既往の研究³⁾に得た $Mt=5347$ 円、本調査 (表-4) で得た調査地 A の $Vm=0.63$ m³ と調査地 B の $Vm=0.17$ m³、図-22 で得た調査地 A の一次回帰直線の係数 $a=2.52, b=76.26$ 、調査地 B の一次回帰直線の係数 $a=1.99, b=114.69$ の値を用いて (8) 式で計算した α_L, β_L を使用して複合路網密度を求めた。ここで、 α_L, β_L の値は調査地 A と B における大きな差があるが、これは調査地 A と B における 1 荷当たり集材材積 (Vm) と、集材距離に対するサイクルタイムの一次回帰直線の係数 (a, b) の差によるものである。つまり、調査地 A は 1 荷当たり集材材積と a, b の値が大きいため、 α_L, β_L は小さく、調査地 B は 1 荷当たり集材材積と a, b の値が小さいため、 α_L, β_L は大きい。調査地 A の場合は、集材距離に対する集材費が小さく、調査地 B の場合は集材

表-6 調査地における複合路網密度の算定式に用いた値

Table 6. Parameters for calculating synthetic forest-road density in study area

項目	調査地 A	調査地 B
α_H	3.4	4.6
β_H	1797	1823
α_L	5.94	17.39
β_L	179.79	1002.04
V	300 m ³ /ha	300 m ³ /ha
η	0.4	0.4
η'_H	0.3	0.3
η'_L	0.4	0.4
K	3	2
C_w	1383.3 円/時	1383.3 円/時
N_w	450 人/ha	450 人/ha
V_w	2 km/時	2 km/時
r_H	100,500 円/m	70,600 円/m
r_L	10,000 円/m	10,000 円/m
d_o	0 m/ha	0 m/ha

距離に対する集材費が大きくなる。複合路網密度の計算で用いた他の因子の値は、調査地 A と B の施業と地形に対する一般の値を適用した。複合路網密度の計算式で使用した各因子の値は表-6 に示した。

タワーヤードによる集材作業システムを前提にした場合の適正路網密度を計算すると、調査地 A と B で各々 40.24 m/ha, 54.70 m/ha の低規格の林道が必要となり、調査地 A, B とも 40 m/ha 以上の高密度となった。また、これから最大集材距離を求めると、調査地 A が約 174 m, 調査地 B が約 128 m となり、タワーヤードの最大スパン長 200 m 以内である。

結論として、本調査地のようなタワーヤードによる集材作業では 40 m/ha 以上の高密度の路網が必要であることが分かった。

V. おわりに

タワーヤードは架線系の高性能林業機械として地形が急峻な山岳林を中心に導入されて、新しい作業システムとして期待されている。

今回の調査により、タワーヤードの作業において、施業法と使用された搬器による作業形態や適用条件及び作業工程、作業土場と適正路網密度について明らかとなった。例えば、複層林造成のための間伐と普通定性間伐時の作業工程と適正横取り距離の違いである。即ち、複層林造成間伐にあって材が大きい場合には、作業工程が高くなり、適正横取り距離が短くなる。クランプ式搬器の場合と非クランプ式搬器の場合を比較すると、クランプ式搬器の方が作業工程が高く、巻き上げ時間とメインライン引き出し時間も早く、適正横取り距離も長い。また、普通定性間伐の場合における作業工程を高めるためには、1 荷当たり 2~3 本集材することが必要である。また、本調査のようなタワーヤード集材作業のためには 40 m/ha 以上の路網密度が必要である。

本論文による調査および分析の結果は、タワーヤードによる間伐作業を進めていくにあたって、一つの指標となるものと思われる。

要 旨

近年、全国各地で高性能林業機械を導入して新たな林業を展開している。今回はそのなかで地形が急峻な山岳林における間伐材搬出等の集材作業仕組みとして評価が高い、タワーヤードによる間伐作業における適切な作業システムと適正路網密度について調査し、結果を得た。即ち、間伐では単木材積が大きいほど能率的であり、またクランプ式搬器によって集材作業工程が高くなり、横取り作業の効率も 3 倍程度向上することが分かった。タワーヤードによる集材作業システムを前提にした適正路網密度は 40 m/ha 以上の高密度となった。

キーワード: タワーヤーダ, 間伐作業システム, 路網密度

引用文献

- 1) 大川畑修: 架線集材における路網計画に関する研究. 林試研報告, 351号, 1988.
- 2) 越智慎吾: 高性能林業機械を考慮した路網整備に関する一考察. 第28回林道研究発表会, 1992.
- 3) 小林洋司・仁多見俊夫・岩岡正博: タワーヤーダを想定した路網配置計画. 43回日林関東支論, 1992.
- 4) 小林洋司・仁多見俊夫・岩岡正博・伊藤幸也: 急傾斜地における高能率搬出作業仕組みの考究. 103回日林論, 1992.
- 5) 酒井秀夫: 路網密度と集材距離の換算式. 37回日林関東支論, 1986.
- 6) 南方 康・酒井秀夫・伊藤幸也: 複合的路網の整備目標. 東大演報, 74, 1985.

(1994年 4月28日受付)

(1994年 10月 3日受理)

Summary

Recently, high quality forest machines like harvesters, feller-bunchers, processors and mobile tower-yarders have been used in Japanese forest since several years ago in order to improve its difficult forest operational conditions. In this paper we introduce an outline and results of thinning operation systems with a mobile tower-yarder and a profitable forest-road density, that were performed in Tokyo University Forest at Chichibu and Chiba. A profitable forest-road density is over 40 m/ha for thinning operation systems with a mobile tower-yarder in study area A, B.

Key words: Mobile tower-yarder, Thinning operation systems, Forest-road density