

複層林施業における適正な集材作業システムの構築

誌名	日本林學會誌 = Journal of the Japanese Forestry Society
ISSN	0021485X
著者	小林, 洋司 仁多見, 俊夫 岩岡, 正博
巻/号	72巻5号
掲載ページ	p. 399-405
発行年月	1990年9月

論 文

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——

小林 洋司*・仁多見俊夫*・岩岡 正博*
南方 康*・渡邊定元**

小林洋司・仁多見俊夫・岩岡正博・南方 康・渡邊定元：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— 日林誌 72 : 399~405, 1990 複層林あるいは天然林施業における搬出の問題は重要であり、とくに生産性の面からの検討が重要である。本報告は本施業方式および間伐作業などに適する集材方法としてトラッククレーン集材を取り上げ、適正な集材方法、仕組みを究明した。手法として、前報で報告した東京大学北海道演習林の作業試験結果に基づき、コンピュータによるトラッククレーンの集材シミュレーションを構築した。本シミュレーションの適用性を検証し、本シミュレーションによって集材機の能力の違い、すなわち搬器の容量による工期の違い、トラッククレーンの取り付け回数による工期の違い、平均集材距離による工期の違いをシミュレーションで明らかにした。結果として搬器の容量によって工期が格段に増加すること、条件によって平均集材距離がある値を超えた場合にはスカイライン方式がよいこと、などが明らかになった。この結果は今後における本トラッククレーンの改良点あるいは集材作業システムとしての改良点の参考に資することができる。

KOBAYASHI, Hiroshi, NITAMI, Toshio, IWAOKA, Masahiro, MINAMIKATA, Yasushi, and WATANABE, Sadamoto : **Constructing a profitable logging system in a multi-storied forest—The truck-crane logging system simulation** J. Jpn. For. Soc. 72 : 399~405, 1990 It is very important, especially in managing multi-storied and natural forests, to harvest efficiently. In this paper we deal with a truck-crane logging-system that is profitable for thinning. We constructed the truck-crane logging-system simulation with an electric computer on the basis of the results of a truck-crane logging-test in the Tokyo University Forest in Hokkaido, that we reported before. We investigated the results of using this simulation for testing logging results. Using this simulation, we investigated and compared the results of the operational efficiency of different-capacity carriages, setting times of the truck-crane, and different yarding distances. It was clear that the operational efficiency of the truck-crane increases with increasing carriage capacity, and that the use of the skyline method is better at yarding distances over 100 m. These results can be used for the development and improvement of the truck-crane or other logging systems.

I. はじめに

近年の林業を取り巻く厳しい情勢から複層林施業が叫ばれ久しくなる。複層林施業は、植え付けと下刈の省力化による育林費の低減化、木材の需要に対する弾力化、森林に対する社会的要請の多用化に対して優れた施業法であるといわれている。しかし一方では生産費の大部分を占める集材作業にとっては工期の面、技術の面でコスト低減化に逆行する困難な問題が多々ある。これは従来の天然林施業における択伐作業、人工林における間伐作業の搬出における問題と共通点があ

る。この点で本集材作業法を確立することは重要である。

こういった背景からトラッククレーンによる作業道からの集材作業を注目し、ここ数年東京大学北海道演習林にて試験を行っているところである(1~3)。トラッククレーンによる集材法は、残存立木や林地に対して損傷が少ない点で短距離集材法として注目されている作業体系である。当演習林の高密路網を前提にすれば十分に採算の合う集材法であるといえる。

本報告は、これまでの集材作業試験によって得られたデータの分析結果(1~3)に基づき、さらに集材

* 東京大学農学部 Fac. of Agric., Univ. of Tokyo, Tokyo 113

** 東京大学農学部付属北海道演習林 Tokyo Univ. Forest in Hokkaido, Furano 079-15

工期に影響する因子と作業時間の関係を分析するためにコンピュータによるシミュレーションを構築し、トラッククレーンによるより望ましい集材作業システム構築のためのシミュレーション手法の適用性について検討した。

II. 用いた集材試験の概要

本研究で用いた調査は、1987年8月25日より9月10日にかけて、東京大学北海道演習林で行われたトラッククレーンによる間伐木集材作業である。調査対象地は、北海道演習林75林班内の3試験地区で、平均傾斜は18.4度であり、東部の砂金沢に接する部分は急で、30度以上を示す地点がみられる。森林利用学的地形指数は33.6で「中」と分類される。林況は大部分がヨーロッパトウヒを主体とする混交林および再生林である。

北海道演習林では、従来、作業の能率化、合理化を図るために、伐区内に低コストの濃密路網をつくり、集材距離を短縮してきた。このため1986年度末における林道の延長は、691.1 kmであって、林道密度は30.2 m/haに達している。75林班は、1986年度の9月に作業道の作設試験が実施され、現在の総延長は4,700 mで作業道密度は60.2 m/haに達している。試験地は比較的若齢木の多い林分で、集材距離別にA, B, C区の3試験区に分けた。各試験地区ではあらかじめ全立木の胸高直径と位置を測定し、各試験区ごとの材積表および林内立木位置図を作成した。間伐方法は定性間伐とし、A区では12~30 cm, B区では42 cm以上を、またC区では32~40 cmの胸高直径の木を、各径級、各試験区ごとに20本, 17本, 15本を伐倒木として決定した。材積の間伐率は、A区で約10%, B区で約35%, C区で約45%であった(2)。シミュレーションにあたり以上の集材作業のデータを用いた。

III. シミュレーションの構築

機械による集材作業は、人間と機械からなる一つのシステムと考えられる(5)。トラッククレーンを用いた集材法について上記の搬出試験を行ったが、ある搬出計画区で集材する場合に与えられた条件のもとではどのくらいの時間がかかるか、いかほどの工期となるかを求めるためにシステムシミュレーションの作成を試みた。このシミュレーションの概要が図-1で、以下A~Dの過程にしたがって説明する。

A: 前処理過程

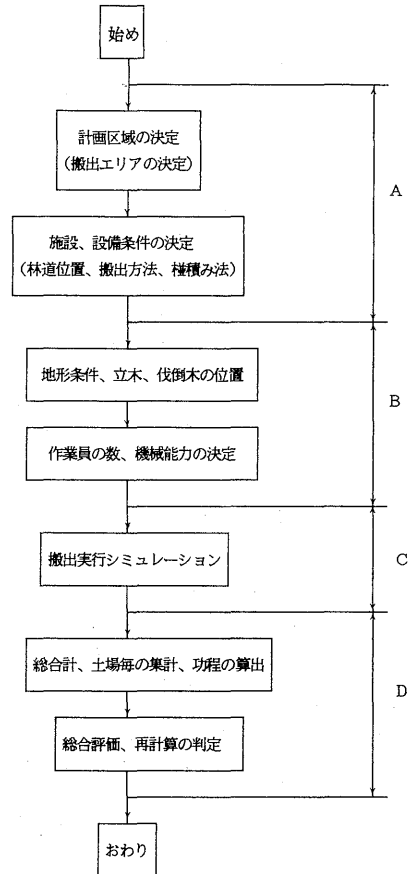


図-1. 集材シミュレーションの概要
Flow chart of the logging simulation

計画区域を決定し、道路位置、トラッククレーンの位置をデータとして入力する。つぎに搬出施設について搬出方法(グラウンドリードかスカイライン方式)、極積み方法を決定する。

B: 諸条件の入力

傾斜、立木分布、作業員の人数、伐倒木の位置をデータとして与える。また用いるトラッククレーンの搬出能力も入力する。

C: 搬出シミュレーション

本システムの主要なる部分を占め、上記の条件にしたがい搬出シミュレーションを行う。本過程については土場ごと、サイクルごとに出材材積等のデータが記録される。

D: 計算結果の検討

計算結果について合計作業時間あるいは工期の面から検討を加え、再計算を行ったり、作業システムの改

良点等の検討をする過程である。

1. 具体的なアルゴリズム

1) 伐採地区の境界線は、座標値によって与え、座標は原点を左上隅、X軸は林道上にとり、Y軸は林道と直角の下方向とした。本シミュレーションに用いた伐採地区の形状は図-2に示すような矩形であった。

2) 土場位置は、座標値によって与え、林道位置はX軸とした。図-2の1~5は土場の位置を示す。

3) 地形因子の傾斜については、20度未満の場合は全体の工期に影響を与えないものとした。伐倒木は、①位置データを与える。②林分モデルによってその位置、材積値を求める。③列状に伐る。このいずれかによって、位置、材積、玉材の数を求める。図-2の○印で示した立木の位置は、天然林の場合には乱数を発生させ、さらに人工林の場合もプログラムによって発生させる。間伐する木もプログラムによって選定可能である。人工林の列状間伐の場合も、1伐2残あるいは2

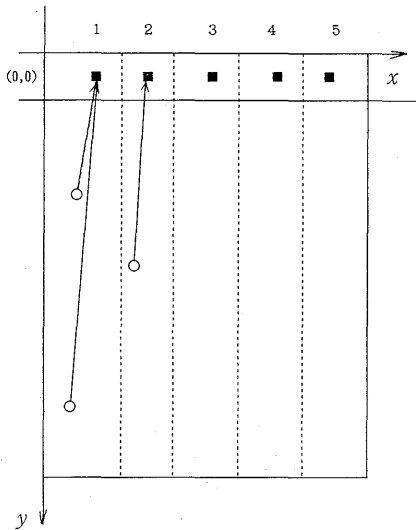


図-2. 土場と伐倒木の位置

Illustration of the positions of the truck-crane (■) and felled trees (○)

表-1. 本シミュレーションに与えるデータの例
Examples of the input data for the logging simulation

種類	インプット・データ				
クレーンの位置(x,y)	No.1(4,0)	No.2(21,0)	No.3(35,0)	No.4(51,0)	No.5(67,0)
計画区域(x,y)	(0,0)	(86,0)	(86,105)	(0,105)	(0,0)
作業道(x,y)	(0,0)	——x軸——			(0,86)
伐倒木(x,y,玉数)	(2,5,2)	(4,5,1)	(15,8,1)	(12,2,5)	(15,56,2)

伐3残といった間伐木の選定が可能となる。

4) 作業員の人数はあらかじめデータとして与え、機械能力は試験に用いたトラッククレーンの仕様によるが、集材工期を求めるといった課題に対しては、あらかじめ搬出能力を想定する場合もある。

表-1に本シミュレーションに与える因子のデータ例を示した。

2. シミュレーションの構築

トラッククレーンによる集材方法については、前報(1~3)に詳しく述べた。本システムの主要な部分であるトラッククレーンによる搬出作業のシミュレーションの流れ図が図-3である。トラッククレーンを設置してその対象とする集材木の集材が完了し、トラッククレーンを移動するまでを示したものである。1サイクルとはトラッククレーンより荷掛け用のワイヤーを引き出して丸太を林道端まで木寄せするまでである。以下そのサイクルタイムの要素時間の算出法について記す。

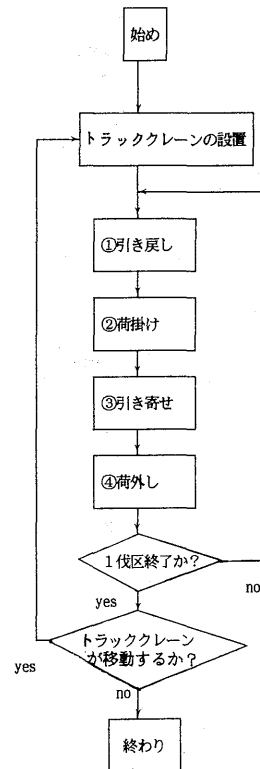


図-3. 集材の1サイクル

Detail flow chart of the logging simulation

表-2. 荷掛け時間の確率分布
Distribution of choker setting time

時間(s)	度数	確率	累積確率	乱数
1~10	16	0.33	0.33	0~32
11~30	14	0.29	0.62	33~61
31~50	12	0.25	0.87	62~86
51~70	5	0.10	0.97	87~96
71~90	1	0.02	1.00	97~99

① 引き戻し時間

グランドリード方式を想定し、作業員がトラッククレーンより荷掛け用のワイヤーロープをつかみ集材する伐倒木の所まで歩行し、荷掛けをするまでの時間である。この時間は主として歩行に要する時間で、集材距離に比例し、(1)式のような一回帰式として表せる(1, 2)。したがってシミュレーションのこの時間の算出は搬出するべく伐倒木までの集材距離によって決定できる。

$$TI = 1.55HL - 5.87 \quad (1)$$

ただし、 TI ：引き戻し時間、 HL ：集材距離。

② 荷掛け時間

作業員が集材する丸太のところで荷掛け用のフックを材に取り付ける時間である。時間観測の結果は、表-2のような分布になった。この時間は、丸太の直径、足場、林内の植生、作業員個人の技量等多くの因子の影響を受けると思われ、明確に特定の因子との関係は見いだすことはできなかった。荷掛け時間の発生頻度分布は、確率的分布のポアソン分布とみるのが妥当であり、この分布は次式のようになる。

$$f(x) = \frac{m^x}{x!} e^{-m} \quad (2)$$

ただし、 m ：平均値、 $f(x)$ ：確率密度。

この確率密度関数 $f(x)$ に従う乱数 x を作る。 $f(x)$ の累積分布関数を $F(x)$ とすると、

$$F(x) = \int_{-\infty}^x f(t) dt \quad (3)$$

と表せる。ここで x は u を $[0, 1]$ 上の一様乱数とした $x = F^{-1}(u)$ とすればよい。

したがって、ここでは表-2のような試験地における実測地の度数分布を確率関数とし、累積確率分布を求め、これにしたがった乱数によって求めた(4)。

③ 引き寄せ時間

作業員が荷掛けを終了し、トラッククレーンのオペレータに合図を送り、材が林道端まで引き寄せられる時間である。途中で材が障害物にひっかかり作業員によって直される時間も含む。時間観測の実績から集材

表-3. 荷外し時間の確率分布
Distribution of unhooking time

時間(s)	度数	確率	累積確率	乱数
0~20	7	0.16	0.16	0~15
21~40	5	0.12	0.28	16~27
41~60	2	0.05	0.33	28~32
61~80	6	0.14	0.47	33~46
81~100	3	0.07	0.54	47~53
101~120	3	0.07	0.61	54~60
121~140	5	0.12	0.73	61~72
141~160	3	0.07	0.80	73~79
161~180	2	0.05	0.85	80~84
181~200	1	0.02	0.87	85~86
201~220	6	0.13	1.00	87~99

距離に比例し、一回帰式として(4)式のように表せる(1, 2)。

$$T3 = 6.12HL - 45.25 \quad (4)$$

ただし、 $T3$ ：引き寄せ時間。

④ 荷外し時間

材が林道端まで引き寄せられ、材よりフックをはずす時間である。試験結果より荷掛け時間と比較し多少ばらつきが大きいのが、同様に考えられ、結果として表-3のような形になった。

よって、サイクルタイム(T)は、作業員が荷掛け用フックをもってワイヤーを引き戻し、荷掛け、引き寄せまでを考え、(5)式のように表せる。

$$T = T1 + T2 + T3 + T4 \quad (5)$$

3. プログラム化

前項の1集材単位をサイクルタイムとし、集材作業全体のシミュレーションのプログラムを作成した。伐倒木等についてのデータはモデルによっても作成可能であるが、今回は試験データの再現と他因子の検討を目的にしたので、調査結果を用いた。すなわちデータは伐倒木の位置、材積、玉材の数である。集材木の選定は、当該トラッククレーンから集材距離の小さい材より集材する。玉材ごとに集材するが想定した材積になるまで材を集める。以上のような考え方により前項で述べた理論によってBASICでプログラム化した。手順は次のとおりである。

- 1) 土場(トラッククレーン)に集材する伐倒木を選定する。
- 2) 伐倒木までの集材距離を求め、引き戻し時間を求める。
- 3) この場合、まだ集材されない材のうち最小の集材距離の材から選定する。荷掛け時間を求める。

4) 玉材が一荷当たりの許容値に達したら集材を開始し、前項の考え方によって引き寄せ時間を算出する。

5) 材が林道端に達したら荷外し時間を求め、サイクルタイムを計算する。伐倒する材が残っていたら1)に戻る。

6) 1カ所のトラッククレーン設置場所での集材が終了したら、移動し次の集材作業に移る。

4. シミュレーションの検算

さきに説明した試験地Aのデータを用い、作成したプログラムによってシミュレーションを行った。試験地での結果を合わせて表-4に示した。シミュレーション(1)と(2)の結果を現地の結果と比較してみると最大集材距離50mについては、合計時間、各要素時間の絶対時間および平均サイクルタイムについてもほぼ同じ値になっている。サイクル時間に占める要素時間の割合もほぼ同様の結果となっている。引き寄せ時間の割合が大きい。最大集材距離を100mとした時は集材

距離が長くなったので、当然の結果として引き寄せ時間の割合が大きくなっている。また図-4にサイクルタイムに対する頻度分布を試験地のデータとシミュレーションの結果について示した。シミュレーション(1)の結果がいくぶん異なる。しかし表-4の結果から全体の合計作業時間の算出を目的としたシミュレーションプログラムとしては、ほぼ現地の結果を再現しているものと判断できよう。

IV. シミュレーションによる作業法の検討

1. 集材能力による工期の違い

ここではこのシミュレーションによって各因子が全体の作業工期にどのように影響するかを検討した。間伐材の伐出集材試験における試験地Aの集材作業時間を表-4に示した。この場合の1荷当たりの平均材積は約0.4m³であった。ここでクレーンの能力が増加したらどうなるかについてシミュレーションを行った。すなわち1荷当たりの材積の限度をいろいろ変化させた場合の集材結果の比較である(図-5)。条件はA試験地のデータを用い、グランドリード方式で最大集材距離は50mである。結果は、合計作業時間、合計サイクル数は1荷当たりの材積が増加することによって減少

表-4. シミュレーションによる要素時間
Operational elements by the logging simulation (seconds)

項目	現地の結果	シミュレーション(1)	シミュレーション(2)	シミュレーション(3)	シミュレーション(4)
最大集材距離(m)	50	50	50	100	100
集材時間合計(秒)	13963(100)	13980(100)	14868(100)	18496(100)	21541(100)
①引き戻し時間	1763(12)	1666(12)	1726(12)	2795(15)	3216(15)
②荷掛け時間	1360(10)	1780(13)	1640(11)	1540(8)	1640(8)
③引き寄せ時間	6000(43)	5613(40)	5803(39)	10061(54)	11665(54)
④荷外し時間	4840(35)	4920(35)	5700(38)	4100(22)	5020(23)
平均サイクルタイム	291	291	310	385	449

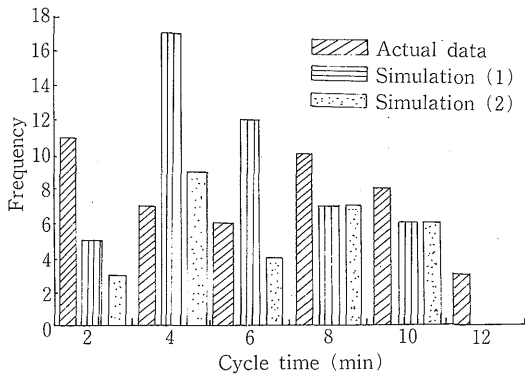


図-4. サイクルタイムの分布

Distribution of the cycle time by the logging simulation

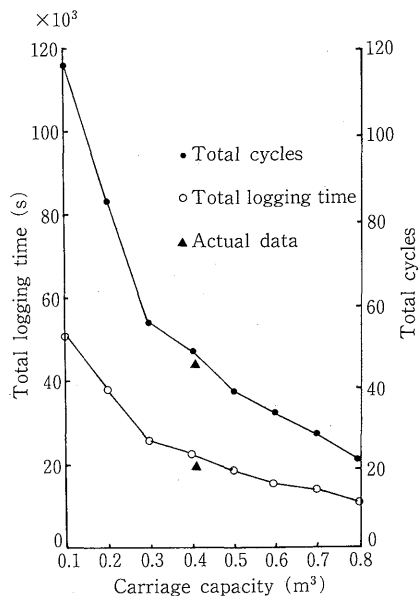


図-5. グランドリード方式によるシミュレーション結果

Results of logging simulation of the ground-lead method for carriage capacities

し、試験地の実測値と比較すると1荷当たりの材積を増加することによってかなりの功程が期待できることがわかる。

2. 集材方式の違いについて

先の集材実験では、集材距離が100 m ぐらいまではグランドリード方式、100~150 m はスカイライン方式で行った。これまで構築したシミュレーションは、A 試験値のグランドリード方式である。ここでスカイラインの場合のシミュレーションを作り、索張り方式について検討する。スカイライン方式とグランドリード方式のおもな違いは、引き寄せ時間と引き戻し時間の長短である。図-6 は、スカイライン方式を使用した試

験地 C について集材距離と引き寄せ時間をプロットしたものである。先に求めた(4)式に示したグランドリード方式の回帰式は、100 m 以下であるが100~150 m の範囲で示すと図-6 の破線のようになり、(7)式で示したスカイライン方式による引き寄せ時間より大きい値となる。これはスカイライン方式は、材の先端が宙釣りになり、障害物の引掛かり時間が短縮されるし、引き戻し時間についても機械のホールバックラインを用いるためにいくぶん短縮される。グランドリード方式の場合は試験結果によると最大集材距離が100 m を超した場合には、障害物の引掛かりによってサイクルタイムに時間がかかりすぎ著しく功程が落ちる (1, 2)。しかしながら設置時間については、グランドリード方式が10分以内に対してスカイライン方式は40~50分ぐらい要する。したがって集材距離が分岐点より短い場合は、グランドリード方式、長い場合はスカイライン方式が有利である。C 試験値のデータによってシミュレーションした結果が図-7 である。スカイライン方式による引き戻し時間および引き寄せ時間の算定は実験式(6)、(7)を用いた (1, 2)。

$$T1s = 3.56HL - 116.72 \quad (6)$$

$$T3s = 0.82HL + 122.85 \quad (7)$$

ただし、 $T1s$:スカイライン方式による引き戻し時間、 $T3s$:スカイライン方式における引き寄せ時間。

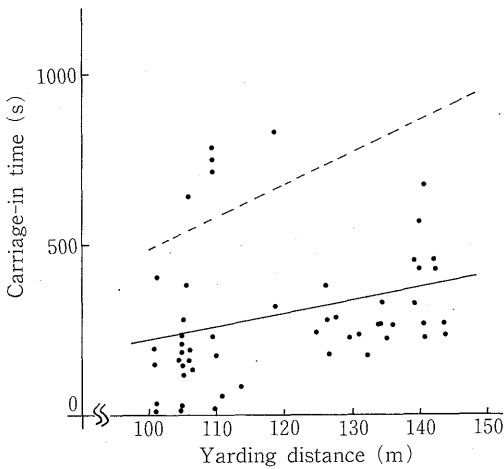


図-6. C 試験地における引き寄せ時間と集材距離 Relationships between carriage-in time and yarding distances

Legend : - - - - , Ground lead method ; —, Skyline method ($y = 0.82x + 122.85$, $r = 0.88$).

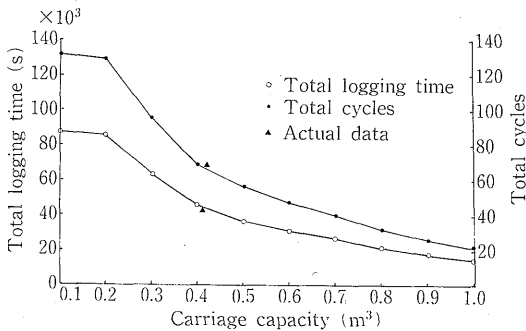


図-7. スカイライン方式によるシミュレーション結果

Results of the logging simulation by the skyline method for carriage capacities

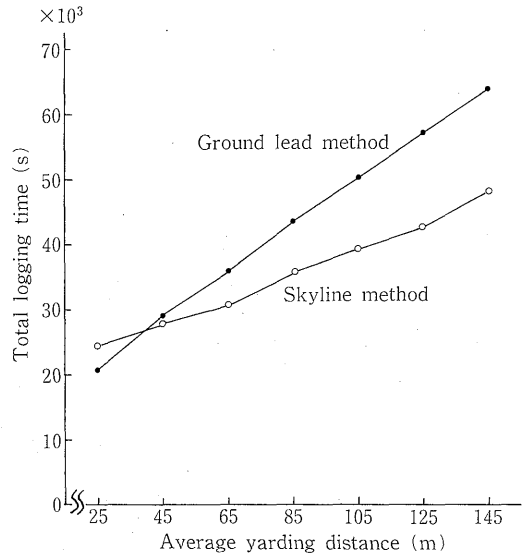


図-8. 平均集材距離に対するシミュレーション結果

Results of the logging simulation for average yarding-distances

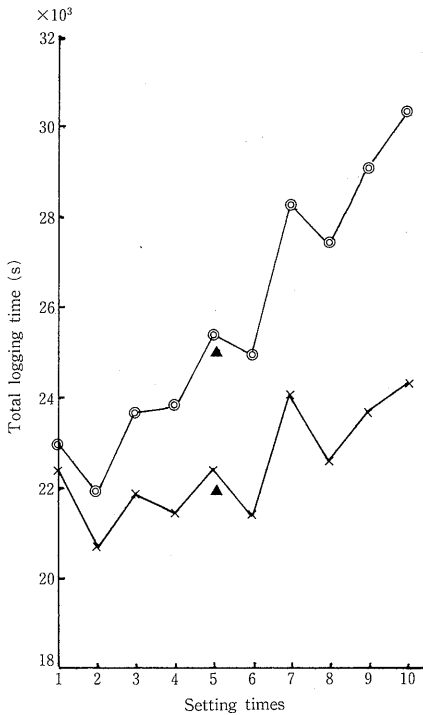


図-9. 設置回数に対するシミュレーション結果

Results of the logging simulation for setting times
 Legend: ○, Including setting time; ×, Without setting time; ▲, Actual data.

3. 平均集材距離による違い

A 試験地の伐採木のデータを用いて、試験地全体を林道より 20 m ずつ移動させ、平均集材距離によって作業工程がどのくらい異なるかをシミュレートした。ここでトラッククレーンの設置時間が問題になる。グランドリード方式の場合はトラックが停車してアウトリガーを出すまでで 5 分、これに対してスカイライン方式の場合はメインラインを張るために 50 分とした。A 試験地の立木に関するデータを用いて集材距離だけを変えた場合には全体の集材作業時間はどうかをグランド方式とスカイライン方式によって集材したシミュレーションである。図-8 がその結果で、時間はいずれもトラッククレーンをそれぞれ 2 カ所に設置した架設撤去の設置時間をも含む。どちらの方式も平均集材距離に比例しているが、平均集材距離 45 m を超えると全集材作業時間はグランドリード方式の方が多くなる。したがって上記の条件の時平均集材距離がこの距離を超えた場合にはスカイライン方式の方が有利であることが分かる。

4. 設置回数と全作業時間との関係

トラッククレーンは、移動に便利である。そこでこの移動回数すなわち設置回数と全体の作業時間との関係をシミュレートした。この場合、試験地は A とし 1 荷当たりの材積値は 0.5 m³ として行った。計算結果をみると、架設撤去時間を含めない場合の全集材作業時間は設置回数が増加してもほぼ変わらない。架設撤去時間を含んだ設置時間を考慮した場合は、当然のことながら全体の作業時間合計は増える。結果をみると設置回数が 2 回のときに作業時間合計は最小となる(図-9)。

V. おわりに

今回試験地の集材作業試験の結果に基づきシミュレーションを構築した。検証した結果をみるとほぼ現地のデータを再現している。このシミュレーションを用いてトラッククレーンの搬器の容量と工期の関係、集材距離との関係、集材方式の関係、集材機の設置回数の検討を行い、シミュレーションの有効性に対して結論を得た。このシミュレーションを用いれば機械の改良点、作業仕組みの改善等についての検討が可能である。

本研究は文部省科学研究費(C)63560144 にて行った。また現地集材試験については、東京大学北海道演習林職員によって行われたことを付記し、謝意を表すものである。

引用文献

- (1) 小林洋司・仁多見俊夫・小野正道・南方 康・河原漢・渡邊定元：林分施業法における搬出システムの構築(I)ートラッククレーンによる搬出試験ー。99 回日林論：675~676, 1988
- (2) KOBAYASHI, H., ONO, M., NITAMI, T., MINAMIKATA, Y., TAKAHASHI, Y., KAWAHARA, S., and WATANABE, S.: Profitable logging operation system in thinning with a track-crane. Bull. Tokyo Univ. For. 81 : 95~105, 1989
- (3) 仁多見俊夫・小林洋司・小野正道・南方 康・河原漢・渡邊定元：林分施業法における搬出システムの構築(II)ートラッククレーン集材作業における適切な労働力・機械力投入量と作業システムー。99 回日林論：677~678, 1988
- (4) 関根智明・高橋啓郎・若山邦紘：シミュレーション。362 pp, 日科技連出版社, 東京, 1976
- (5) SINNER, H. U.: Simulating skyline yarding thinning young forests. Proc. IUFRO Meet. in Freiburg, West-Germany : 82~106, 1973

(1989 年 10 月 17 日受理)