

急傾斜地における搬出施設について II

— 3 支点集材架線における費用計算

酒 井 徹 朗

Studies on the hauling equipment in difficult terrain (2)

—The calculation of hauling cost on the cable
system with three supports

Tetsurō SAKAI

要 旨

3 支点集材架線による搬出費用の計算をとおり集材機が具備すべき出力と使用索径の最適水準について検討した。搬出費用を集材機出力と使用索径の関数として表わし、その最小値を求めた。1 m²あたりの搬出費用の最大限を0.5人工以下とし、対象となる林地の大きさが等辺長200m以上の2等辺3角形とすれば、集材機出力50馬力、使用索径18~20mm (1.2~1.5kg/m) 前後が最適水準となる。その時の搬出費用を図11に示した。

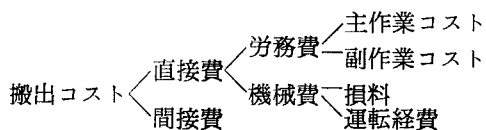
は じ め に

大面積皆伐から小面積皆伐や択伐へと森林の取扱い方法が変化してきた。加えて林道の開設も進み木材搬出方法も長スパン多段集材から短スパンへ、架設撤去の容易なランニングスカイライン式の索張りへと移行しつつある。こうしたなかで非皆伐作業の搬出方法のひとつとして3 支点集材架線に関する研究を進め、試作機による機能実験・作業実験を行った。一応のデータ¹⁾²⁾もそろったので3 支点用集材機の具備すべき集材機出力、使用索径等の最適水準について考察してみる。手法としては搬出費用を集材機出力と使用索径(単位索重kg/m)の関数として定義し、搬出費用が最適となる水準により検討してみた。

費用計算の方法

1) 費用の構成

集材機作業における搬出費用の構成は次のとおりである。



主作業コストは一般には伐木集材・荷掛・集材機運転・荷卸しの各作業のコストよりなる。本研究の場合は集材機出力及び使用索のおおきさの最適水準を求めることを主とするため、林地・林分の条件により大きく変動する伐木造材作業に関するコストを主作業から除いた。荷掛・荷卸

し作業については京大芦生演習林や鳥取大蒜山演習林における実測データ³⁾⁴⁾をもとに、従来のフォーリングブロックやタイラー式の集材架線におけるデータを参考にした。集材機の運転時間については実搬器走行時間と空搬器走行時間を使用索の単位索重・エンジン出力(馬力)・最大索張力・荷重等を変数として計算によって求めた。主作業の m^3 当りの人工数 C_H は(1)式のようになる。但し1日6時間労働とする。

$$C_H = \frac{S}{360 * V} * n \dots\dots\dots(1)$$

C_H : 主作業人工数(man-day/ m^3)

S : サイクル時間(min)

V : 1 荷当りの搬出材積 (m^3)

n : 組人数 (man)

副作業コストは集材架線の架設・撤去・集材機の据付等の作業コストからなる。実測データによると伐開・ブロック取付け・支柱作成等まで含め100m当り架設で2~6人工、撤去で2~4人工であった。そこで副作業の m^3 当りの人工数 C_R を(2)式で近似した。

$$C_R = \frac{(2.15 + 0.04l) * (1 + fr)}{Q} \dots\dots\dots(2)$$

但し, $fr = 0.2\rho$

C_R : 副作業人工数(man-day/ m^3)

Q : 総搬出材積 (m^3)

l : 引きまわし距離 (m)

fr : 使用ワイヤーロープによる増加係数

ρ : 単位索重 (kg/m)

損料は集材機の場合購入価格に一定比率を乗じたものを供用1日あたりの日額損料とした。購入価格⁵⁾は型式、製作会社等により異なるので1馬力当り定額と仮定した。ワイヤーロープ等の損料は従来からの計算⁶⁾⁷⁾を用いた。3支点架線で用いるワイヤーロープは全て作業索と同じと考え搬出材積9,000 m^3 (14mm以上)で償却するものとして算出した。ワイヤーロープの損料の人工当量 C_W (人工/ m^3)は作業員1日の賃金を8,000円として(3)式で表わす。

$$C_W = WL * PW / 9000 / 8000 \dots\dots\dots(3)$$

但し $PW = 239\rho + 54.6$

(価格より近似)

C_W : 損料の人工当量(man-day/ m^3)

WL : 使用ワイヤー総数 (m)

PW : ワイヤーの単価 (YEN/m)

運転経費は燃料費、油脂費、その他の経費からなる。そのなかでも大きな割合を占める燃料費はディーゼルエンジンの場合、軽油0.24 l / (時間・馬力)、油脂代は燃料費の20%(15~25%)であるといわれている⁷⁾。この経費は機械損料と同様に集材機出力と作業時間により変化する。そこで計算上機械損料と運転経費の和を一応機械経費 C_M (人工/ m^3)として(4)式で表わした。

$$C_M = \frac{Ma * S}{360 * V} \dots\dots\dots(4)$$

$$Ma = 0.064 + 0.055PS \dots\dots\dots(5)$$

Ma : 1日当りの機械費 (man/day)

Ps : 集材機出力 (HP)

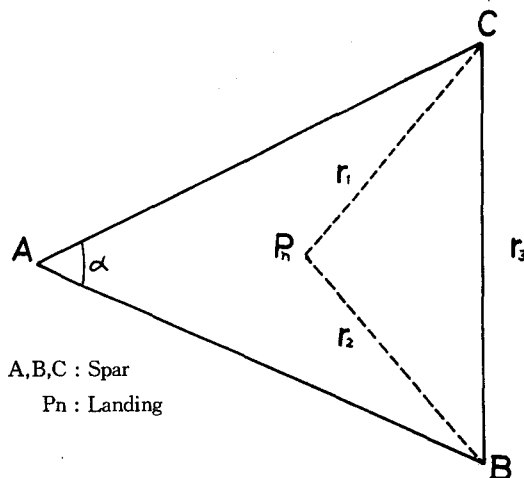


Fig.1 Model for calculation of hauling cost

2) 平均集材距離 (A.S.D.)

架線における費用計算ではサイクルタイムや搬出コストは平均集材距離をもとに算出されている。3 支点架線における平均集材距離は従来の架線と算出方法が異なる。そこで Suddarth や Penn A.⁸⁾ 等によって提唱された A.S.D. (Average Skidding Distance) の算出方法を用いて Dennis の計算プログラム⁹⁾を 3 支点用に修正し計算した。図 1 において Pn を荷卸し土場とすれば $\Delta Pn BC$ における平均集材距離 X_i を各辺長 r_i を用いて表わすと(6)式のようにになる。

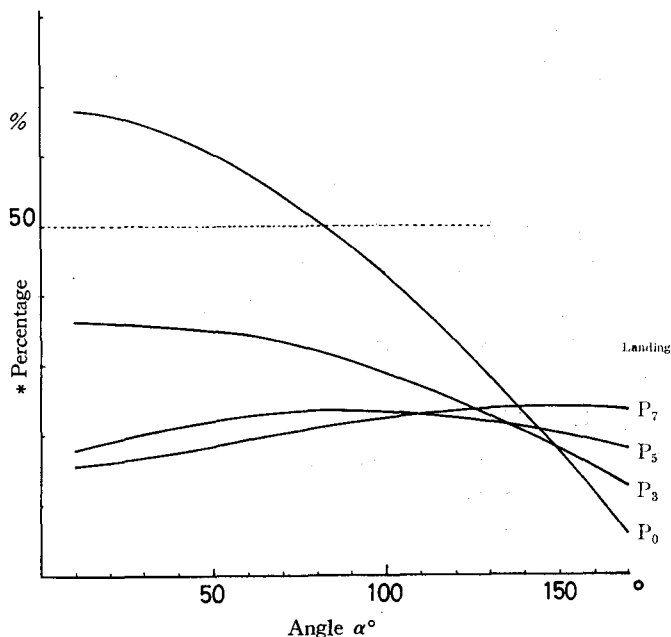


Fig. 2 Relation between the A.S.D. and the top angle of isosceles triangle

* Percentage for length of side

A.S.D. = (length of side) * Percentage / 100

$$X_i = \left(\frac{r_1 + r_2}{6r_3^2} \right) * (r_3^2 + (r_1 - r_2)^2) + \frac{(r_3 - (r_1 - r_2)^2) ((r_1 + r_2)^2 - r_3^2)}{12r_3^2} * \ln \frac{r_1 + r_2 + r_3}{r_1 + r_2 - r_3}$$

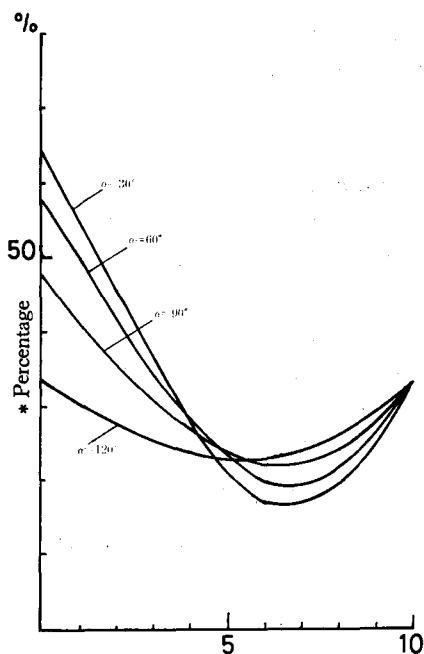
$$= \frac{1}{3} (2r_1^2 + 2r_2^2 - r_3^2)^{\frac{1}{2}} \dots \dots \dots (6)$$

同様に $\Delta PnAB$, $\Delta PnAC$ について計算し ΔABC の平均集材距離 A.S.D. を求めれば(6)'式となる。

$$A.S.D. = \frac{\sum_{i=1}^3 A_i x_i}{\sum_{i=1}^3 A_i} \dots \dots \dots (6)'$$

(但し A_i ; i 番目の 3 角形の面積)

図 2 は図 1 の ΔABC において $AB=AC$, $\angle BAC = \alpha$, 荷卸し土場 Pn (Pn は辺 BC の中線上にあり, 頂点 A と辺 BC の中点を $n : (10-n)$ に内分する点) とし平均集材距離を算出したものである。Y 軸は平均集材距離の等辺に対するパーセントである。荷卸し土場 Pn の位置により, $\angle BAC$ の影響による変化に大きな差がある。すなわち頂点に近い程変動は大きく, 重心点に近い程変動は少なく平均集材距離も短い。図 3 は荷卸し土場の位置による差をみるために示してある。X 軸に土場の位置を, Y



The position of landing Pn
Fig. 3 Relation between the A.S.D. and the position of landing

軸に平均集材距離の等辺の長さに対するパーセントをとってある。頂角 α の小さい程その変動は大きい。以上のことより3支点架線における平均集材距離は荷卸し土場の位置に大きく影響されることがわかる。

3) サイクルタイム

サイクルタイムの構成は荷掛・実搬器走行・荷卸し・空搬器走行・余裕時間の5つに大別される。荷掛、荷卸し時間はスリング本数、荷掛本数はもとより斜面傾斜、退避距離、歩行速度等の影響を受け、とくに荷掛時における林地の傾斜の影響は大きい。本研究ではこれらの因子については実測データをその平均値として考えることにより無視した。荷掛、荷卸し、余裕時間の和 C_b (min)を、鳥取大森山演習林での実測データより荷掛4.5分、荷卸し2.4分を用い $C_b = 7$ とした。

搬器走行時間については集材機出力 $PS(HP)$ と使用索の単位索重 ρ を用いて計算した。一般に巻き込み時に第 i ドラムの駆動に必要な動力 H_i は(7)式で表わされる。

$$H_i = \frac{T_i \cdot V_i}{4500} \cdot \eta \quad \dots\dots\dots(7)$$

T_i : 巻き込み索張力 (kg/m)
 V_i : 巻き込み速度 (m/min)

巻き込みロープ長を L_i , 巻き込み時間を t_i とすれば(8)式のようなになる。

$$t_i = \frac{T_i}{H_i \cdot 4500 \cdot \eta_i} \cdot L_i \quad \dots\dots\dots(8)$$

η_i : 伝達効率 (エンジンからドラム)

機械操作が中断なく行なわれると、搬器走行時間 t_s は、ドラム駆動に必要なエンジンからの総動力を H_E とすれば、 $H_E = \sum H_i$ となり

$$t_s = \frac{\sum T_i L_i}{H_E \cdot 4500 \cdot \eta} \quad \dots\dots\dots(9)$$

となる。またインターロックにより戻し索による動力回生が行なわれた時、その回生率を β とすれば巻き込みのための総出力 H_s は

$$\left. \begin{aligned} H_s &= H_E + H_I \\ H_I &= \frac{T' \cdot L'}{4500 \cdot \eta' \cdot t_s} \cdot \beta \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots\dots(10)$$

$T' \cdot L'$: 戻し索の仕事量の和 (kg・m)
 η : 伝達効率 (戻しドラムから巻ドラム)

となり巻き込みドラムの動力が H_I だけ増加する。

(8)~(10)式を用い搬器走行時間を算出した。計算は3支点の形、大きさを2等辺三角形の頂点と等辺のデータで与え、最大索張力・荷重・荷卸し場の位置毎に平均搬器走行時間を求めた。3支点の内部を5mメッシュに区切り、各メッシュ交点を荷掛点とし搬器走行時間を求め、その平均値を平均搬器走行時間とした。この計算において索張力は搬器移動に伴い変化するが、荷掛点、荷卸し点における索張力の平均を用いた。また変化ロープ長は両点における差の絶対値を用いた。空搬器走行時間についても実搬器同様に算出できる。この場合、荷重は搬器のみの重さとなり、搬器が同一高度を維持すると最大索張力も小さくなる。

以上のことよりサイクルタイム S (分)は

$$S = (t_s + t_b) \cdot \frac{\rho}{PS} \cdot Ca + C_b \quad \dots\dots\dots(11)$$

但し

$$Ca = \frac{PS_0}{\rho_0}$$

t_s : 実搬器走行時間 (min)

t_b : 空搬器走行時間 (min)

PS : 集材機出力 (HP)

PS_0 : 基準となる集材機出力 (HP)

ρ_0 : 基準となる単位索重 (kg/m)

C_b : 荷掛・荷卸し・余裕時間の和 (min)

となり、サイクルタイムは集材機出力 PS と使用索の線比重 ρ の関数となる。また主作業の m^2 当りの人工数 C_H は(1)へ(11)式を代入し

$$C_H = \frac{(ts+tb) \cdot \frac{P}{PS} \cdot Ca + Cb}{360 \cdot V} \cdot n \quad \dots\dots\dots(12)$$

但し、材の比重 dw (kg/m^3)、荷重の大きさを単位索重 ρ の W 倍とすれば

$$V = \frac{W \cdot q}{dw}$$

となる。

搬器走行時間と平均集材距離の関係について検討してみたところ、集材機出力、使用索比重が同一である時、3支点の大きさ形等が変化しても(13)式のような関係が成立する。

$$(ts+tb) = -3.118 + 0.517 \cdot A.S.D \quad \dots\dots\dots(13)$$

$$(r^2 = 0.977)$$

$$\text{但し, } \rho_0 = 3.0(kg/m) \quad PS_0 = 5(HP)$$

この式を用いて任意の3支点のサイクルタイムは平均集材距離を(6')式より求めることができる。

モデル計算

1 m^2 当りの搬出費用(人工数) C は(12), (1), (3), (4)式より

$$C = C_H + C_R + C_W + C_M \quad \dots\dots\dots(14)$$

で表わされる。右辺各項を索の線比重 ρ と集材機の出力 PS で表わすと一般に次のようになる。

$$C = a\rho + \frac{b}{\rho} + c \frac{PS}{\rho} + \frac{d}{PS} + e \quad \dots\dots\dots(15)$$

$$\left. \begin{aligned} \text{但し, } a &= f_a(r, \alpha, q) \\ b &= f_b(w) \\ c &= 9.168 \cdot 10^{-4} \\ d &= f_d(ts, tb, w) \\ e &= f_e(r, \alpha, ts, tb) \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots\dots(16)$$

r : 等辺の長さ (m)
 α : 頂角 (deg)
 q : 搬出材積 (m^3/m^2)
 w : 一荷の重さ (線比重単位)
 ts : 実搬器走行時間 (min)
 tb : 空 // (min)

作業工程の違い、損料比率、購入価格等によっても各式の係数は変化するが、ここでは一応(16)式で与えられた変数より(15)式の係数を求め搬出費用を算出した。(15)式は各係数 $a \sim e$ が正であり、 ρ , PS が正である条件下で極小値をとる。(17)式はそのときの ρ , PS の関係を示している。

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial C}{\partial \rho} &= a - b \frac{1}{\rho^2} - C \cdot PS \frac{1}{\rho^2} = 0 \\ \frac{\partial C}{\partial PS} &= \frac{c}{\rho} - \frac{d}{PS^2} = 0 \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots\dots(17)$$

図4は頂角 α が 30° , 60° , 90° 、等辺の長さ r が $100 \sim 500m$ ($100m$ 毎)、搬出材積 q が $0.01m^3/m^2$ ($100m^3/ha$)、荷重 w が $1000 \times \rho$ (kg) の時、搬出費用が最小となる集材機出力と索比重の関係を

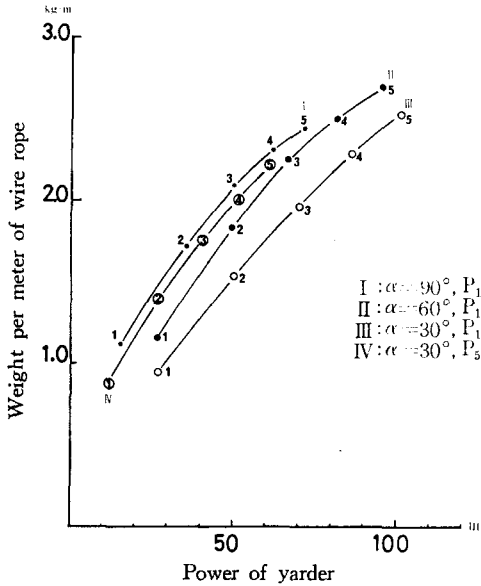


Fig. 4 Relation between the power of yarder and the weight per meter of wire rope for minimize the hauling cost

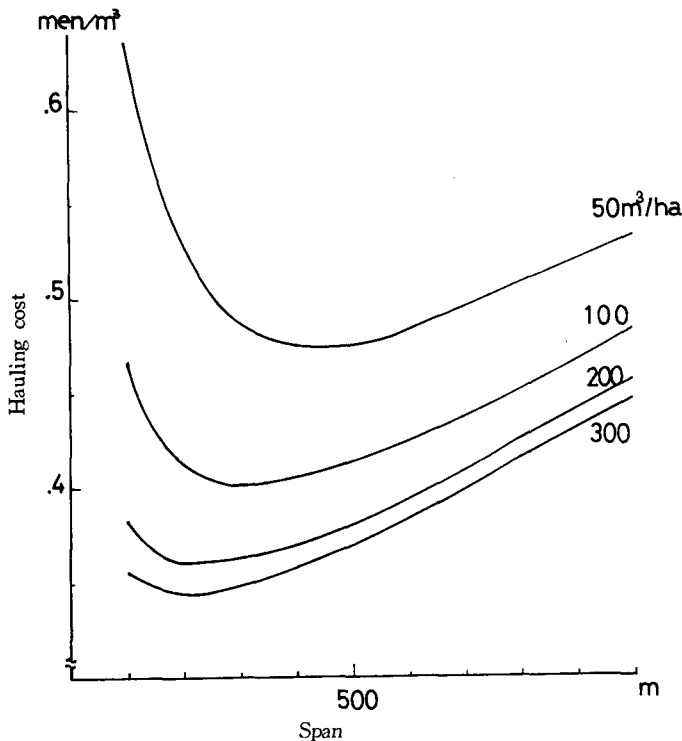


Fig. 5 Relation between the hauling cost of normal yarding and the span

プロットしたものである。等辺の長さは 100m 単位で図中に示してある。最小値をとる出力と索比重は等辺の長さ、つまり平均集材距離により大きく変化している。同一の角度でも荷卸し土場の位置を変化させ平均集材距離を短くすると、図中のⅢとⅣ線のように減少する。対象となる林地の平均集材距離が最適水準の集材装備を決定する重要な因子となる。

図 5 は普通架線集材における搬出費用とスパンの関係を示したものである。平均集材距離はスパン長の半分、横取 50m 以内、集材機出力 75 馬力として計算した。3 支点架集とは対象地域の形が遠うので一概にいえないが、搬出費用が 0.4~0.5 人工/m³ 前後が比較する一応の目安と考えられる。

図 6、図 7 は出力馬力が一定の場合、使用索の比重により搬出費用がどのように変化するかをみたものである。図中の曲線の組 A、B は頂角が一定の時の等辺の長さの違いによる搬出費用の違いを対比させてある。A₂ と A₃、B₂ と B₃ の間には辺長 200~500m の搬出費用曲線がはいる。B₃ が $r=400m$ であるのは図 8 にみられるよう $r=500m$ の時と最小搬出費用に差がなく、出力馬力が最小搬出費用となる出力より小さいところではむしろ逆転しているためである。搬出費用の水準を

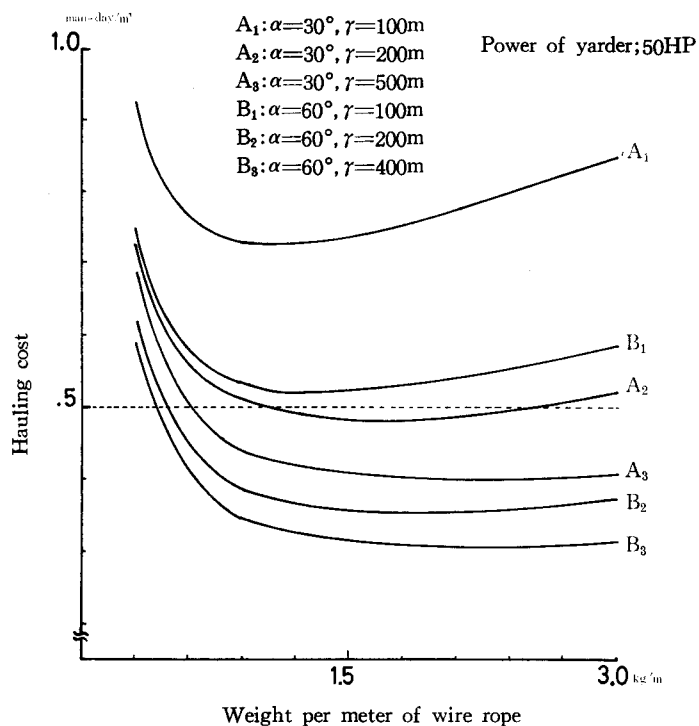


Fig. 6 Relation between the hauling cost and the weight per meter of wire rope

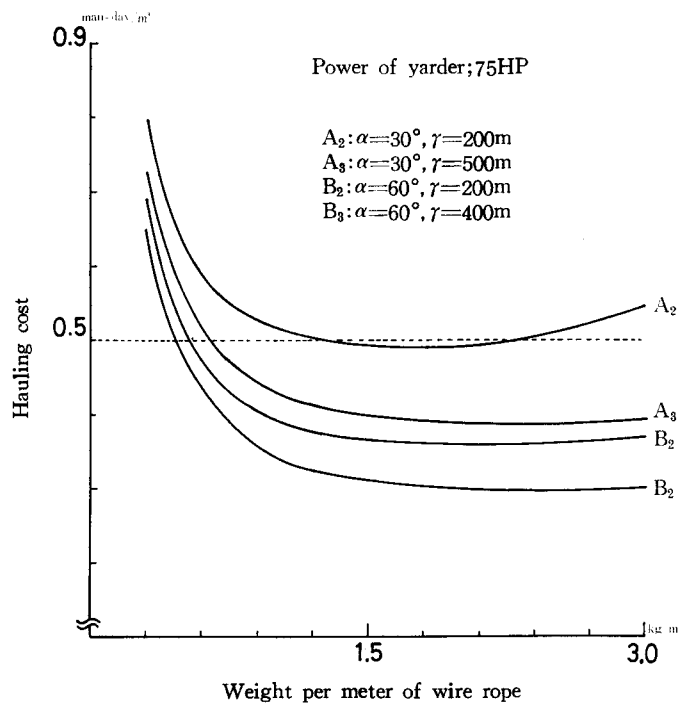


Fig. 7 Relation between the hauling cost and the weight per meter of wire rope

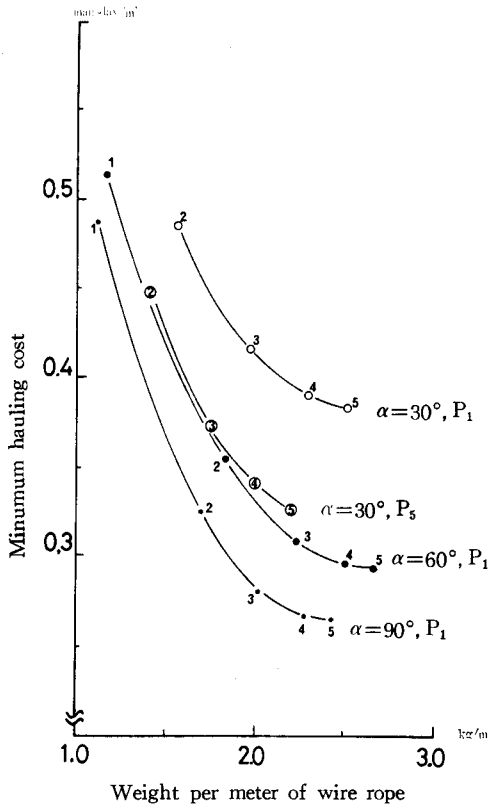


Fig. 8 Relation between of the minimum hauling cost and the weight per meter of wire rope

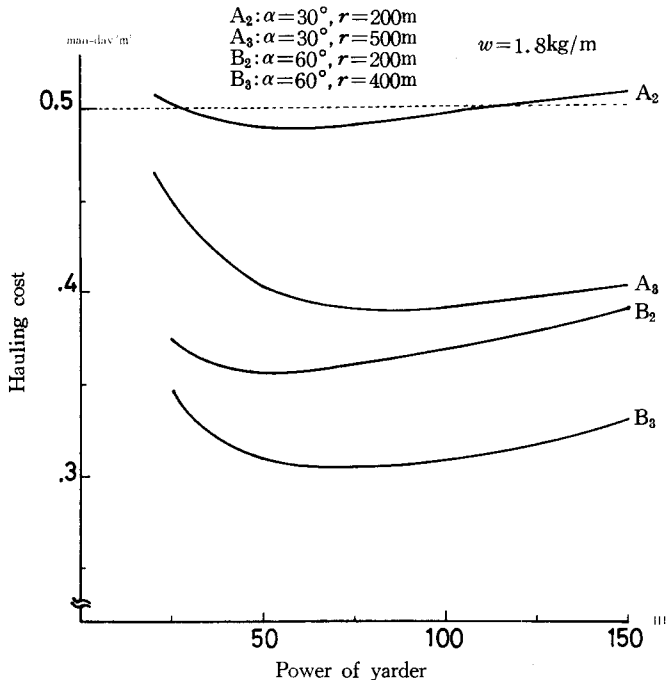


Fig. 9 Relation between of hauling cost and the power of yarder

0.5人工/m³以下、辺長を200m以上とすれば、集材機出力50馬力(図6)の時1.2~2.4kg/m, 75馬力(図7)の時も1.2~2.4kg/mである。またこれらの図より明らかなように搬出費用は0.9~1.2kg/m附近まで急激に減少し、1.5~1.8kg/m前後では変化なく、それ以上では増加に転じている。

図8は前述の最小値をとる単位索重と搬出費用の関係をプロットしたものである。この図を用いると3支点の対象となる最低の大きさ、形をもつ林地を想定すれば、最小費用、使用索の単位索重が推定できる。

図9は線比重1.8kg/mの索を使用した場合の搬出費用と集材機出力との関係を表わしたものである。50~75馬力で各曲線とも最小値をとる。搬出費用も全搬にわたり0.5人工以下であり、変化もあまりない。図10は同様に0.9kg/mの時の関係を図示したものである。やはり50~75馬力で最小値をとる。この場合50馬力前後で搬出費用は0.5人工以下になる。

以上のことより、このモデル計算では集材機出力50馬力、使用索の線比重1.2~1.5kg/mが最適水準となる。この場合搬出費用と等辺の長さの関係は図11のようになる。図5の普通集材の搬出費用と比較してもまず妥当な線といえよう。

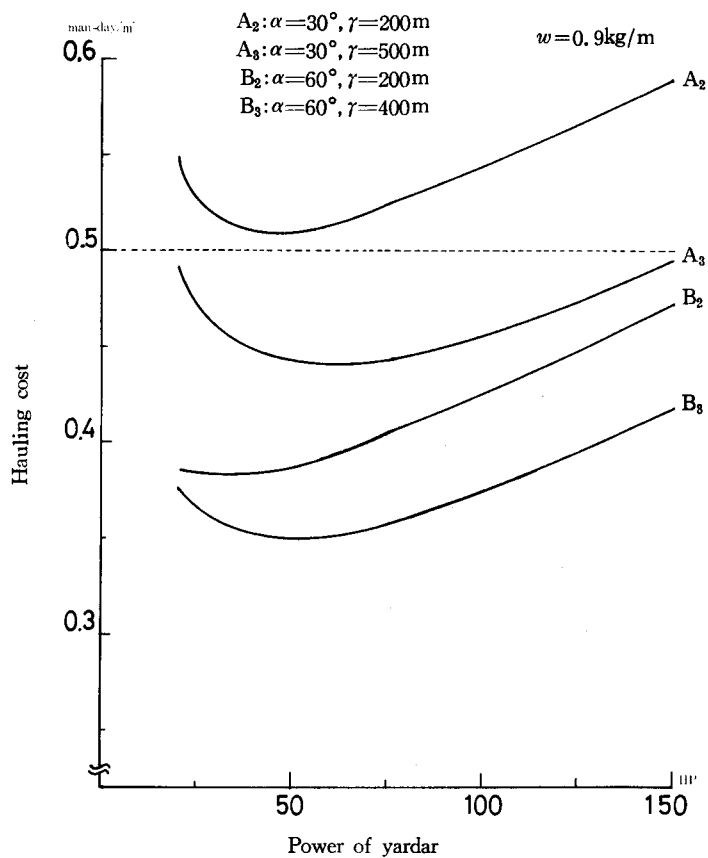


Fig. 10 Relation between the hauling cost and the power of yarder

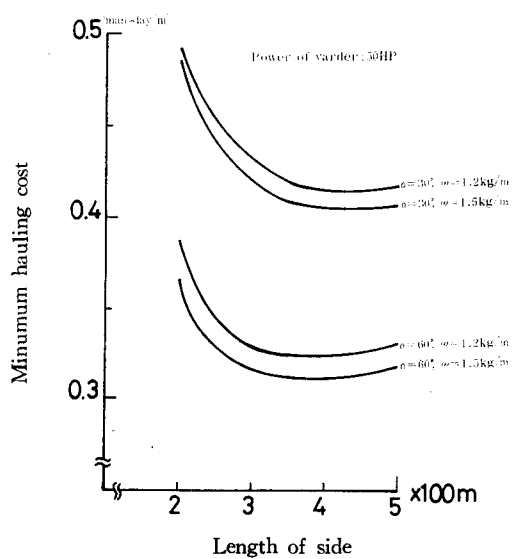


Fig. 11 Relation between the minimum hauling cost and the length of side

4. お わ り に

搬出費用の算出により集材機の出力，使用索径の最適水準を求めることができた。荷掛・荷卸し・架設・撤去等の各作業工程の違いにより費用が変化することは勿論であるが，3支点集材の対象地域の大きさ，形，平均集材距離，搬出材積によっても大きく変動する。今後は集材対象区域の一般的特性によりどういう集材方法がベターであるか，従来のエンドレスタイラー，フォーリングブロック式やランニングスカイライン方式，更にはトラクタ集材等を含め比較検討してゆきたい。

最後に，本研究をすすめるにあたり実験・観測に御協力をいただいた鳥取大学蒜山演習林の皆さん，京都大学芦生演習林の利用班の皆さん，ならびにいろいろ御教示をいただいた鳥取大の神崎教授に感謝の意を表します。なおこの研究の一部は昭和54年度文部省科学研究費(試験研究)により行い，計算には京都大学大型計算機センターを利用した。

引 用 文 献

- 1) 神崎康一他：昭和54年度科学研究費補助金(試験研究1)研究成果報告書，1980
- 2) 酒井徹朗他：3支点架線用4胴集材機のインタロック機能について，未発表
- 3) 渡辺茂他：材木・造材・集材システムの最適化に関する研究(I)，林業試験場研究報告，No235，1971
- 4) 林業教育研究会編：伐出作業，1975
- 5) 林業機械化協会；林業機械便覧，1980
- 6) 〃 ；ワイヤロープとその取扱い，1980
- 7) 土木学会編；土木工学ハンドブック，中巻，p.1519-1526，1975
- 8) Penn A. Peters ; Spacing of Roads and Landings to Minimize Timber Harvest Cost, Forest Sci., VOL 24, NO.2, 1978
- 9) Dennis M. Donnelly ; Computing Average Skidding Distance for Logging Areas with Irregular Boundaries and Variable Log Density, U.S.D.A. General Technical Report RM-58, 1978

Résumé

In the present report we have studied the calculation of hauling cost and the most suitable condition between the power of yarder PS(HP) and the weight of wire rope ρ (kg/m) on the cable system with three supports. The hauling cost is considered to be a function of ρ and PS as equation (15) and (16). Equation (16) is considered to be a function of length of side(r), angle(α), hauling volume (q), load (w), and cycle time according to equation (2), (3), (4), (5), and (12). A cycle time is calculated by equation (11) and (13) so that is affected significantly by average skidding distance as equation (13). Equation (17) may be used to determine the minimum hauling cost so the solutions are shown in Fig.4. Fig.6 and Fig.7 show relation between the hauling cost and the weight of wire rope at a constant power. These curves of hauling cost are not very much change between 0.9 and 1.8 kg/m and less than 0.5 man-day/m³. Fig.9 and Fig.10 show relation between the hauling cost and the power of yarder at a constant weight of wire rope. These curves are not very much change. Rearranging the calculation results, the most suitable condition of the power of yarder is 50HP and weight of wire rope is 1.2-1.5kg/m. The results of the hauling cost are shown in Fig.11.