

トラクター集・運材作業について

第 1 報

佐々木 功 村上 正 康
神崎 康 一 山根 啓 義

Isao SASAKI, Masayasu MURAKAMI
Koichi KANSAKI, Keigi YAMANE ;

On the Tractor Skidding and Logging.

I 緒 論

トラクターによる集・運材作業は欧米各国において古くから行われているが、わが国においても昭和の初頭樺太・北海道において使用されてから、主として冬山の雪橇運材に採用されてきた。しかし、最近国有林の経営合理化に沿って、トラクター集・運材作業による夏山作業が可能な地形の処では内地においても漸次普及してきた。だが、機械化にあたり作業方法の変化に伴って生ずる作業時間の無駄、あるいは機械の能率ならびにその作業全体としての能率の良否について検討するように常に注意しなければならぬ。それゆえ、この集・運材作業の工程、能率、および経費の面より観察、調査、検討を行う必要があるので今夏長野営林局管内で調査を行った。

本報告は先づ工程を理論的に考察し、調査した結果の検討に役立てるものである。

II トラクター集・運材作業の工程理論

トラクター集・運材作業の工程を理論的に考えるために、まず当作業を工程上次のように分ける。

1. 材を牽引している工程（往）
 - a. 荷掛け
 - b. 集材
 - c. ウインチによる材の吊込み
 - d. 実牽引
 - e. 荷外し
 - f. 方向変換
2. 材を牽引していない工程（復）
 - a. 空牽引
 - b. 方向変換
 - c. ウインチ・ロープの引出し

上記の各作業工程の所要時間について以下考察する。

1. a) 荷掛けに要する時間 (t_{1a})

トラクター作業種の人員構成の中にトラクター助手を入れるか入れないかの問題をまず考える必要

がある。運材距離がきわめて短い場合（約100～150m以内）では伐木作業が運材に追われることとなるから助手による荷掛けが必要である。これ以上の距離では伐木作業員が荷掛けを兼ねる方が無駄が略ける。荷掛けに要する時間は Brown 著 logging によれば1本当り0.7分となつている。

1. b) 集材に要する時間 (t_{1b})

トラクターが牽引できるだけの本数を集め元口または末口を揃えるに要する時間である。この時間は牽引材1本当りの重量が可成り大きいときには少くて済むが、材が細く重量が少い場合は本数が多くなり、したがって所要時間が多くなる。これは実際現場で大体測定した値をとる。いまこれを x 分とする。

1. c) ウインチによる材の吊込みに要する時間 (t_{1c})

ウインチの吊込み距離を l_c (m) とし、吊込み速度を V_c (m/min) とすれば、吊込みに要する時間 (t_{1c}) は

$$t_{1c} = \frac{l_c}{V_c} \text{ (分)}$$

吊込み速度 V_c は材が障害物に引掛れば、荷掛夫が移動して、障害物を取除くか材を外す作業をしなければならぬから、人間の移動速度（約 20 m/min）と大体等しいことが好ましいが、皆伐作業で伐採高を出来るだけ低くするように注意すればこのような障害物はなくなり、トラクターの運行も円滑になる。トラクターの吊込みウインチの速度は使用機械により一定している。大体 30～60 m/min である。

ここでウインチで牽引し得る重量の限界について考察する必要がある。

ウインチで牽引しうる重量の限界：

ウインチ機種により限定された引張力があり、これを T_w (Kg)，牽引しうる材の重量を W (Kg)，材と地面との摺動抵抗係数を f_t ，地面の傾斜角を α° とすれば、牽引力と抵抗との間に次の関係が成立する。

$$T_w \geq f_t W \cos \alpha \pm W \sin \alpha$$

式中+は登り勾配の場合、-は降り勾配の場合である。

したがって、牽引しうる重量 W は

$$W \leq \frac{T_w}{f_t \cos \alpha \pm \sin \alpha}$$

材1本の重量を G Kg とすれば、牽引本数 n は次式より求められる。 $n = \frac{W}{G}$

式中、材と地面との摺動抵抗係数 f_t の値は、山地の土質および地被植物の有無・乾湿、樹種、材の剥皮の有無、トキノの有無などによつて相異なるが、既往の文献を2～3、次に挙げる。

(イ) G. R. Förster の報告

土地の状況	乾湿	丸太の皮の有無	摺動抵抗係数 μ_b
地面堅実で石のないもの	乾	皮 付	0.548
		皮 剥	0.486
	湿	皮 付	0.483
		皮 剥	0.403
堅い粘土質土	乾	皮 付	0.571
		皮 剥	0.478
	湿	皮 付	0.269
		皮 剥	0.161
新しく刈取つた草木地	乾	皮 付	0.586
		皮 剥	0.505
	湿	皮 付	0.478
		皮 剥	0.425

(ロ) Micklitz の報告

剥皮乾燥材に対する土修羅最小勾配 (%)

粘土地 (湿潤)	17%	砂礫地 (湿潤)	40%
" (乾燥)	49%	" (乾燥)	48%

以上の資料よりみて、皮付丸太で枝条のない場合には土地の状況によつて異なるが大体 0.6 以下である。梢端部枝条付きの資料はないので、判明しないが摺動抵抗係数は 0.8 以上になるものと思われる。

1. d) 材牽引に要する所要時間 (t_{1a})

いま、搬出距離 (斜距離) を l_a (m)、トラクターの牽引平均速度を V_{1a} (m/min) とすると、トラクターによつて所要の地点まで牽引するのに必要な時間 (t_{1a}) は

$$t_{1a} = \frac{l_a}{V_{1a}} \text{ (分)}$$

となる。しかし V_{1a} について考察してみると、トラクターの牽引力、トラクター自身の重量、ならびに履帯と地面との摩擦係数などによつて牽引速度は変化するのが当然である。それ故以下にこれらの相関関係を考察する。

トラクターの牽引力、牽引重量 (サルキーの重量を含む)、履帯と地面との摩擦係数および牽引速度の相関関係：

トラクターの牽引力 T (Kg) は次式より一般に求められる。

$$T = \frac{75 \times 60}{V_T} \eta N$$

ここに η : 動力伝達機構の機械効率 = $\frac{\text{作業に有効に使われる最大牽引出力}}{\text{機関の最大出力}}$

N : 機関の出力 (PS)

V_T : トラクターの牽引速度 (m/min)

η の値は機械工学便覧によると約 0.80 ~ 0.85 である。

一方、トラクターの粘着牽引力 T_1 (Kg) は

$$T_1 = \mu_T W_T \cos \theta$$

ここに μ_T : トラクターの履帯と路面との間の摩擦 (粘着) 係数

W_T : トラクターの全備重量 (Kg)

θ : 路面の勾配 (度)

上式中 μ_T の値は路面の状態、土質、履帯の種類・形状などによつて相違する。つぎにこの資料を記載すると、

(イ) 農業機械ハンドブック

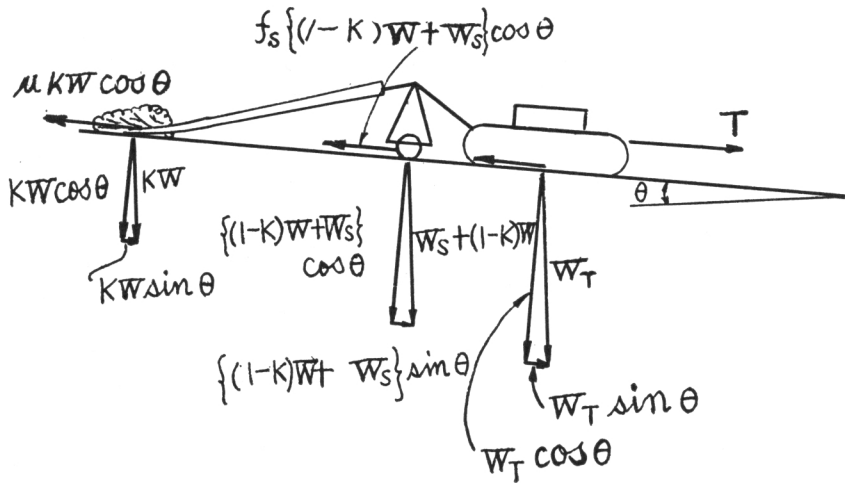
路面の状況	摩擦係数
微 砂	0.30 ~ 0.55
深い泥土	0.50 ~ 0.60
軟かい砂質土道	0.60 ~ 0.70
乾いた硬い土道	0.80 ~ 0.90

(ロ) Brown 著 logging

路面の状況	乾湿	摩擦係数
砂混り粘土質土	乾	0.57
"	湿	0.39
粘土質土	乾	0.60

以上の資料よりトラクターの摩擦係数 μ_T は類推される。

またトラクターの牽引力に対して、牽引する材の重量、サルキー及びトラクター自体の抵抗がある。いまこの抵抗力を R で示せば、下図より



$$R = [\mu k W + f_s \{W_s + (1-k)W\} + f_T W_T] \cos \theta \mp (W + W_s + W_T) \sin \theta$$

式中+は登り勾配の場合、-は降り勾配の場合を示す。

ここに μ : 木材の一端を吊上げ、他端を接地して牽引する場合の木材と路面との摺動抵抗係数

k : 木材の一端を吊上げるため、木材重量が地面とサルキーとに分配される割合

f_s : サルキーの走行抵抗係数

f_T : トラクターの走行抵抗係数

θ : 路面の勾配 (度)

W : 木材の全重量 (Kg)

W_s : サルキーの全重量 (Kg)

W_T : トラクターの全重量 (Kg)

上述の μ の値は 1 c) の項で述べた f_t の値を用いてもよいが、実際は木材の一端が吊上げられているため幾分相違する。この場合の資料としては

Brown 著 logging

地面の状況	乾湿	摺動抵抗
砂混り粘土質土	乾	0.730
"	湿	0.600
粘土質土	乾	0.650

次に、 k の値であるが、これを理論的に考察すれば、いま木材の幹曲線を

$$y^2 = a + b x + c x^2 + \dots + q x^n$$

とすれば、この木材の重心は次式より求められる。重心の $\bar{x}$ 座標は

$$\bar{x} = \frac{\int \int \int_V \rho x \cdot dx \cdot dy \cdot dz}{\int \int \int_V \rho \cdot dx \cdot dy \cdot dz}$$

樹幹全体にわたり密度一様なものとすれば

$$\bar{x} = \frac{\int \int \int_V x \cdot dx \cdot dy \cdot dz}{\int \int \int_V dx \cdot dy \cdot dz}$$

この式の分子は立体の y 軸に対する幾何モーメントであり、分母は樹幹の体積を表わすから、上式を書換えて

$$\begin{aligned}
&= \frac{\pi \int_0^l xy^2 dx}{\pi \int_0^l y^2 dx} \\
&= \frac{\left[\frac{a}{2} x^2 + \frac{bx^3}{3} + \frac{cx^4}{4} + \dots + \frac{a}{n+2} x^{n+2} \right]_0^l}{\left[ax + \frac{bx^2}{2} + \frac{cx^3}{3} + \dots + \frac{q}{n+1} x^{n+1} \right]_0^l} \\
&= \frac{\frac{a}{2} l + \frac{b}{3} l^2 + \frac{c}{4} l^3 + \dots + \frac{a}{n+2} l^{n+1}}{a + \frac{b}{2} l + \frac{c}{3} l^2 + \dots + \frac{q}{n+1} l^n}
\end{aligned}$$

ただし l は樹幹長

この重心の位置が判れば、材の両端を支えたときの反力が求められるから k の値が決定される。

即ち、材の全重量を $W = \rho \int_0^l \pi y^2 dx$ (ρ は木材の比重) とすれば、両端の反力 R_1, R_2 は力の平衡条件よりそれぞれ

$$\begin{aligned}
R_1 &= k W = \frac{W \bar{x}}{l} \\
R_2 &= (1 - k) W = \frac{W(l - \bar{x})}{l}
\end{aligned}$$

で求められる。

なお Brown によると、根株の方を吊上げ梢端接地して曳出す場合、木材全重量の55%がサルキーへ、残り45%が地面にかかるとしている。

さらに f_s の値は次の資料による。

サルキーの走行抵抗を測定したものは、Brown のもの以外に見当たらないので、これと同一とみられるトラックの走行抵抗係数を参考資料とすれば

(イ) Brown

土地の状況	乾湿	走行抵抗係数
砂混り粘土質土	乾	0.110
〃	湿	0.135
粘土質土	乾	0.110

(ロ) 前田 利一

道路の状況	走行抵抗係数
乾いた粘土質の自然路面	0.25
砂または石灰質の路面	0.165
手入不良の石の多い道	0.08

最後にトラクターの走行抵抗係数 f_T の資料を記載すれば

(イ) 農業機械ハンドブック

地表条件	走行抵抗係数(装軌式)
乾いた硬い土道	0.07
軟かい砂質土道	0.10
深い泥土	0.10~0.15
微砂	0.10

(ロ) G. R. Förster

林地の状況	走行抵抗係数(装軌式)
切株散在した林内	0.110~0.220

以上の各種抵抗係数を用いて抵抗力 R は求められる。この抵抗 R に打勝つて材を牽引するためには、トラクターの粘着牽引力 T_1 はつぎの条件

$$T_1 \geq R$$

を満足せしめなければならぬ。なおトラクターの牽引力 T がその粘着牽引力 T_1 よりも如何程大きくても、実際に働く牽引力は T_1 に支配されるため、 $T \doteq T_1$ のとき動力が最も有効に使われることとなる。

したがって

$$T \doteq T_1 \geq R$$

でなければならぬ。

トラクターが運行しているときには、次の運動式が成立する。

$$T = \frac{W + W_s + W_T}{g} \frac{dV_T}{dt} + [\mu k W + f_s \{W_s + (1 - k)W\} + f_T W_T] \cos \theta \mp (W + W_s + W_T) \sin \theta$$

上式に $T = \frac{75 \times 60}{V_T} \eta N$ を代入して V_T について整理すれば

$$\frac{dV_T}{dt} - \alpha \frac{1}{V_T} + \beta = 0$$

$$\text{ここに } \alpha = \frac{75 \times 60 \eta N g}{W + W_s + W_T}$$

$$\beta = g \frac{[\mu k W + f_s \{W_s + (1 - k)W\} + f_T W_T] \cos \theta}{W + W_s + W_T} \mp g \sin \theta$$

この微分方程式を解けば

$$t = \frac{\alpha}{\beta^2} \log_e \alpha - \frac{V_T}{\beta} - \frac{\alpha}{\beta^2} \log_e (\alpha - \beta V_T)$$

上式中右辺の第3項の $(\alpha - \beta V_T)$ について考えると

$$\alpha - \beta V_T = \frac{g V_T}{W + W_s + W_T} \left[\left(\frac{75 \times 60 \eta N}{V_T} - [\mu k W + f_s \{W_s + (1 - k)W\} + f_T W_T] \cos \theta \pm (W + W_s + W_T) \sin \theta \right) \right]$$

であり、 V_T がある値になり、 $T_1 = R$ になつた瞬間、すなわち $\frac{dV_T}{dt} = 0$ のときには $\alpha - \beta V_T = 0$ となるから、 $-\frac{\alpha}{\beta^2} \log_e (\alpha - \beta V_T) = +\infty$ 、すなわち $t = \infty$ となる。このことはトラクターの速度 V_T をそれ以上高めることが不可能であることを意味する。この限界の速度を V_{T0} とすると

$$V_{T0} = \frac{\alpha}{\beta}$$

で表わされ、この α ならびに β に上述の式を代入すれば

$$V_{T0} = 75 \times 60 \eta N / [\mu k W + f_s \{W_s + (1 - k)W\} + f_T W_T] \cos \theta \mp (W + W_s + W_T) \sin \theta$$

となる。

作業中には、出来る限り速くこの速度 V_{T0} に達することが最も好ましいが、実際問題としては伐採跡地の林内において、伐根あり枝条が散在していたり、局所的な形地の変化とか転石などのためこの速度 V_{T0} を出すことが不可能であるから、実際の調査を必要とするがトラクターの作業中に出す平均速度として V_{T0} の60%位とみればよいのではないか。いまこの $0.6 V_{T0}$ を認めるとすれば、木材牽引に要する時間 T_{1a} は

$$T_{1a} = \frac{l_a}{V_{1a}} = \frac{l_a}{0.6 V_{T0}} \text{ (分)}$$

で示される。

1. e) 荷外しに要する時間 T_{1e}

トラクターが土場の所定の場所につき、ウインチを緩め荷を接地して、チョーカーを材から外すに

要する時間は、その際牽引されてきた材の本数に比例するものと考えられるから

$$T_{1e} = A \cdot n$$

A : 材 1 本当りの荷外し所要時間約 0.2 分

n : 牽引されてきた材の本数

1. f) トラクターが方向変換するに要する時間 T_{1f}

土場はなるべく広くトラクターが方向変換する必要なく、迂回して伐採地まで戻れるようになっていことが好ましいが、実際には土場が狭い処もあるので、この方向変換に要する時間 T_{1f} を工程に加える場合も起り得る。Brown によれば、 $T_{1f} = 3.0$ 分となつてゐる。

以上で往時の各工程の所要時間を算出することが出来る。一方復時の各工程の所要時間についても考察すれば

2. a) 空牽引に要する時間 (T_{2a})

前述の 1 d) の場合と同様に考えられるので、搬出距離を l_a (m), トラクターの復時の平均速度を V'_T 復時の限界速度を V'_{T0} とし、いま $V'_T = 0.8 V'_{T0}$ とみれば空牽引に要する時間 T_{2a} は式

$$T_{2a} = \frac{l_a}{V'_T} = \frac{l_a}{0.8 V'_{T0}} \text{ (分)}$$

で示される。

2. b) トラクターの方向変換に要する時間 (T_{2b})

トラクターが伐採地に到着し、円形に廻つて方向が変えられるような場合にはこの所要時間を考える必要は少いが、そのように回転できない地形の処ではトラクターは方向変換しなければならない。これに要する時間 T_{2b} は 1 f) の項と同様に約 3 分見込めばよいであろう。

2. c) ウインチ・ロープの引出しに要する時間 (T_{2c})

トラクターが伐採地に達し、方向変換が終れば直ちに荷掛夫はウインチ・ロープの先端にあるフックを持つてチョーカーの処まで移動しなければならぬ。これに要する時間 T_{2c} は荷掛夫の歩行速度によつて影響するから、いまトラクターと材のある処までの距離を l_c , 荷掛夫の歩行速度を V_M とすれば

$$T_{2c} = \frac{l_c}{V_M} \text{ (分)}$$

で示される。

1 c) 項で示したように $V_M = 20$ m/min をとると

$$T_{2c} = \frac{l_c}{20} \text{ (分)}$$

となる。

以上でトラクター作業の 1 工程が終了し、その所要時間はそれぞれの過程の所要時間を合計して求められる。いま 1 工程に要する時間を T_A で表わせば

$$\begin{aligned} T_A &= \sum_{\gamma=a}^f T_{1\gamma} + \sum_{\gamma=a}^c T_{2\gamma} \\ &= (0.7n + xn + l_c/V_c + l_a/0.6 V_{T0} + 0.2n + 3.0) + (l_a/0.8 V'_{T0} + 3.0 + l_c/20) \end{aligned}$$

となる。

この場合にトラクターが牽引できる木材の総重量 W について考察する。もしウインチで牽引できるだけの重量を牽引するとしても、トラクター牽引中の搬出路で逆勾配や緩勾配などがあるならばその処においてトラクターはもはやその荷重を牽引できないことになる。またこの逆の場合もあり得る。すなわちトラクターはウインチで牽引した自重以上のものを牽引できることがあつて、1 回の工程においてトラクターを無駄に使つたこととなる。かかることのないようトラクターの運転手は極力牽引

重量について総合的に判断しなければならぬ。かかる故にトラクターの牽引出来る重量 W は次の2つの条件を満足しなければならない。すなわち、

1 c) 項より

$$W \leq \frac{T_w}{f_t \cos \alpha \pm \sin \alpha}$$

1 f) 項より

$$W \leq \frac{75 \times 60 \eta N / V_{T_0} - W_s(f_s \mp \sin \theta) - W_T(f_T \mp \sin \theta)}{\{\mu k + (1 - k)f_s\} \cos \theta \mp \sin \theta}$$

III あ と が き

今回の報告に併せて昨年度調査した結果を報告する予定であつたが、資料の整理に思わざる時間を要し、したがつて本報告に掲載できなかったことは残念であるが、近日中に追つてしかるべき発表機関に提出する予定である。

文 献

- 1) Hauska, Leo und Mitarbeiter : Das forstliche Bauingenieurwesen, wien, 1933-50. Carl Gerolds. Sohn.
- 2) Förster, C. R. : Das forstliche Transportwesen. Wien 1885. Perles.
- 3) Hafner, Franz : Die Praxis des neuzeitlichen Holztransportes. Wien 1952. Verlag G. Fromme.
- 4) Brown, N. C. : Logging. New York, John Wiley & Sons, and London, Chapman & Hall, 1949.
- 5) 日本機械学会編 : 機械工学便覧 1951. 日本機械学会
- 6) 農業機械学会編 : 農業機械ハンドブック 1957. コロナ社
- 7) 建設機械協会編 : 日本建設機械要覧 1950. 建設機械協会

Résumé

In order to make clear the process of tractor logging in forest, we studied it logically.

The operation of tractor logging is divided into the hauling and returning procedures, each procedure consisting of the following series.

1. Hauling procedure.

series	time (minute)
a. Hooking the choker at the end of log.	$T_{1a} = 0.7n$
b. Yarding the log.	$T_{1b} = xn$
c. Bringing the logs to the sully with the winch	$T_{1c} = l_c/V_c$
d. Hauling the logs.	$T_{1d} = l_d/0.6V_{T_0}$
e. Unhooking the choker from the logs.	$T_{1e} = 0.2n$
f. Turning the tractor.	$T_{1f} = 3.0$

2. Returning procedure.

series	time (minute)
a. Returning the tractor.	$T_{2a} = l'_d/0.8V'_{T_0}$
b. Turning the tractor.	$T_{2b} = 3.0$
c. Drawing out the winch rope.	$T_{2c} = l'_c/20$

notice,

- n : the number of log in hauling.
- x : yarding time per log.
- l_c : distance between the yarded log and the sully.
- v_c : speed of winch rope.
- l_d : hauling distance.
- v_{T_0} : the limited speed in hauling.
- l'_d : returning distance.

v'_{T_0} : the limited speed in returning.

l'_c : distance between the sulky and log.

If T_A is the total time of a process, T_A is calculated by the next equation.

$$T_A = \sum_{\gamma=a}^f T_{1\gamma} + \sum_{\gamma=a}^c T_{2\gamma} = (0.7n + x \cdot n + l_c/v_c + l_d/0.6v_{T_0} + 0.2n + 3.0) + (l'_d/0.8v'_{T_0} + 3.0 + l'_c/20)$$

In this case the hauling load (W) is satisfied by the following conditions :

$$W \leq \frac{T_w}{f_t \cos \alpha + \sin \alpha} \\ \leq \frac{75 \times 60 \eta N / v_{T_0} - W_s (f_s \mp \sin \theta) + W_T (f_T \mp \sin \theta)}{\{\mu k + (1-k)f_s\} \cos \theta \mp \sin \theta}$$

(+ : on the up-hill, - : on the down-hill.)

in these conditions :

T_w : tention of the winch

f_t, μ : log sliding resistance.

α : grade of log sliding way.

η : mechanical efficiency of tractor.

N : horse power of tractor.

W_s : weight of the sulky.

f_s : sulky rolling resistance.

W_T : weight of the tractor.

f_T : tractor running resistance.

k : ratio of the weight on the ground and on the sulky of total log weight.