

# 木材の摩擦抵抗に関する研究

大学院特別研究生: 上 飯 坂 實

Minoru KAMIZAKA: A Study  
on Frictional Resistance of  
Wooden Surface

# 木材の摩擦抵抗に関する研究

## 緒 言

木材の摩擦抵抗に関しては従来多くの人の実験を見、就中摩擦係数に関しては種々の状態に就いてその値が発表されてゐる。<sup>(1)</sup> 筆者は之の実験を實際に使用されてゐる橇に就いて行い、殊に橇が載荷して雪の上を走る場合の橇の前面及び側面の抵抗に就いて砂を用い解析的な実験を行つた。同時に木材の静摩擦係数の測定を行い、その偏異がどの程度のものであるかを再検討し、よつて木材摩擦係数決定の一指針を得たいものと考え、この研究に着手したわけである。尙本実験は總べて静摩擦係数に就いて行つたものである。

この実験を行うに就いて、御懇切なる御指導いただいた藤林教授、加藤助教授及び丸山助手に感謝の意を表す。

## I 静摩擦係数の測定

橇の砂上に於ける前面及び側面の抵抗に就いて実験するに先き立ち、橇底面に於ける摩擦抵抗に就いて調べた。之に就いては次の2つの方法に就き実験を行つた。

### i) 板を傾斜せしめる方法

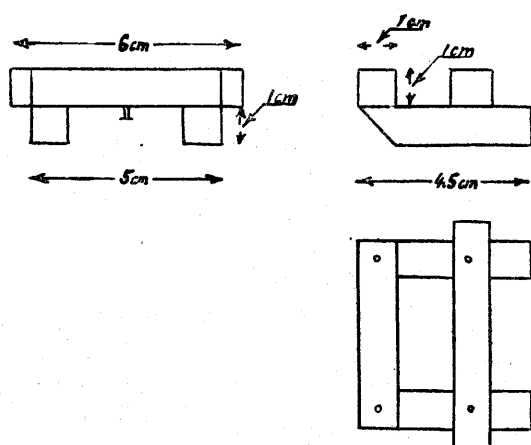


Fig. 1.

### 材料及び試験方法

材料は杉材を用い、Fig. 1の如き寸法の橇模型を使用した。橇底面の繊維方向は橇の進行方向に平行で柁目にとつた。使用せる橇はA, B, Cの三個で重量は7~8gである。

試験方法は鉋で削つた杉板の上に橇をのせ、その杉板を傾斜させて橇のすべり出した時の角度を測定する。角度の測定には杉板に着けたクリノメータ

(1) Franz, A.; Forstliche Riesbauten. S. 127~128 (1911)  
 Santon, T. E.; Friction. p. 138 (1923)  
 Hauska, L.; Das Forstliche Bauingenieurwesen. S. 110 (1938)  
 Marchet, J.; Landstrassen- und Waldwegebau. S. 5, 6 (1925)

一によつて0.5°迄測定し、真數表により靜摩擦係數の値を算定した。又傾斜をつける方法としては出來得る限り傾斜角度の増加を連続的にする爲に、杉板を大きな分銅にのせ、分銅を廻轉させ乍ら移動させた。

櫓を滑動させる杉板の面も櫓底面と同じく、纖維方向は櫓の進行方向に平行に、柁目にとつた。Fig. 2 にそれを示す。

圖中、Aは試験に使用する櫓、Bは傾斜角度を増加させる分銅、Cがクリノメーターである。分銅は矢印の方向に移動させる。

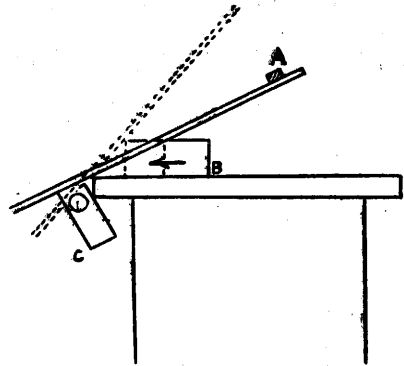


fig. 2

又、點線は傾斜角度を、分銅の廻轉移動によつて増加させた時の状態である。

試験結果及び考察

實驗は各櫓について45回づゝ行い、各々の回に就いて靜摩擦係數 $\mu$ の平均値を求め、その値をプロットすることに依り次に示す如き圖表を得た。

圖に示す $\mu$ の値は次式で示される。

$$\mu = \frac{\sum_{n=1}^n \mu/n}{n} \dots\dots\dots(1)$$

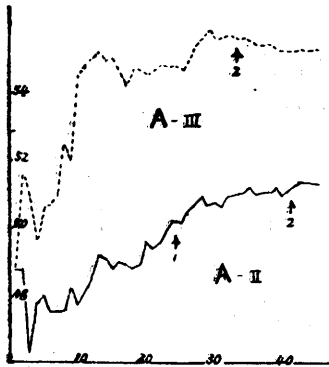


Fig. 3

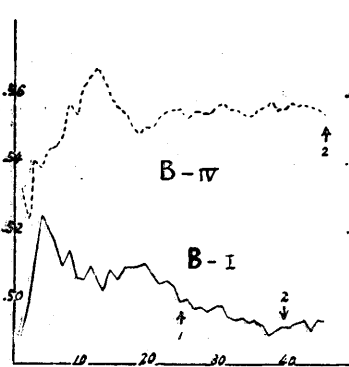


Fig. 4

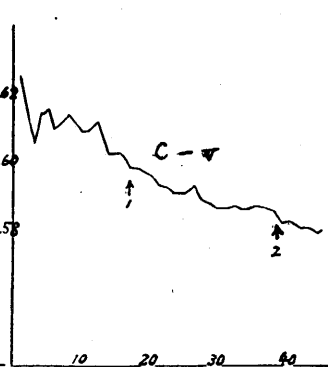


Fig. 5

圖中 A - III, B - IV はそれぞれ A - II, B - I の實驗後に再び同じ試料を用いて實驗を行つたものである。靜摩擦係數の平均値 $\mu_n$ と、その偏異は第1表の如し。

第1表に示す如く、 $\mu_n$ の値そのものに $\pm 20\%$ 近くの偏異があり “W. B. Hardy に依れば摩擦係數が高く且完全に一定値であることは表面の純粹さの規準,, になる。このことから士

(2) Terzaghi : Erdbaumechanik auf bodenphysikalische Grundlage (1925), 土質力學 (I), 石井靖丸譯 58頁 (1943)

20%の偏異は、木材の表面の粗さの規準とも考えられぬこともない。Fig.3~5を見てわかる

	$\mu_{45}^{*1}$	$\delta^{*2}$	$h(\%)^{*3}$
A-I	0.512	$\pm 0.054$	-19.2 +22.0
A-III	0.552	$\pm 0.048$	-18.7 +20.0
B-I	0.492	$\pm 0.044$	-20.0 +21.9
B-IV	0.553	$\pm 0.046$	-17.6 +17.5
C-V	0.580	$\pm 0.031$	-14.0 +9.9

\*1 45回試行の平均値

$$*2 \quad \delta = \sqrt{\frac{\sum(x)^2}{n}}$$

\*3 静摩擦係数の最大偏異の $\mu_{45}$ に対する割合  
(-)は(-)min. (+)はmax. に對するものを示す。

第 1 表

ことは、45回の實驗に於て $\mu$ の値は次第に安定する傾向を見せ、その値の小數以下1桁目の値が決るのは實驗回数20回前後(圖中 $\uparrow_1$ にて示す)に於てあり、2桁目の値が決るのは40回前後(圖中 $\uparrow_2$ にて示す)に於てある。

Fig.6はB-IVに就いて80回實驗を行つた結果である。この圖では60回附近に多少の變動あるが $\mu$ の値は45回に於て略々決つた(小數以下2桁)値は殆んど變化がない。之は各回に就いての平均値をプロットしたものであるが之を標準偏差に就いて見れば第2表の如くなる。

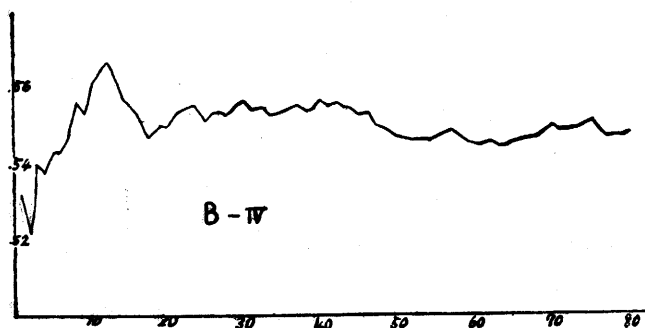


Fig. 6

	10	20	30	40	50	60	70	80
B-IV	$\pm 0.0675$	.0415	.0410	.0568	.0382	.0458	.0409	.0572

第 2 表

80回の實驗に於ては標準偏差にそれ程の變化は認められず、實驗回数を増しても静摩擦係数の値の偏差が小になると言う傾向は認められない。第2表の標準偏差の値は、各10回毎に出した値である。

筆者は此處で少数回の實驗によつて靜摩擦係數の限界平均値<sup>\*1</sup>を求めたいわけであるが、今5回、10回、15回の試行による $\mu$ の平均値と45回の試行による $\mu$ の平均値との關係を求めて見る。第3表に於て6,7,8列の値は $\mu$ の値が増加してゐる場合には $(^5/_{45})$ をとり、減少してゐるときは $(^{45}/_5)$ をとつて(−)をつけた。最後の列の符號はそれを示す。尙B—IVに於ける $(^5/_{45})$ の値の1.02と、A—IIIに於ける $(^{10}/_{45})$ の値の1.08を捨て、平均すると、5%以上の危険率があるので捨てられない。

實驗回数 試驗體	5	10	15	45	$^5/_{45}$	$^{10}/_{45}$	$^{15}/_{45}$	増傾 減向
A—II	0.480	0.476	0.487	0.512	1.07	1.08	1.05	+
A—III	0.505	0.543	0.549	0.552	1.09	1.02	1.01	+
B—I	0.519	0.504	0.504	0.492	(−)1.05	(−)1.03	(−)1.02	−
B—IV	0.543	0.561	0.556	0.553	1.02	(−)1.01	(−)1.00	
C—V	0.615	0.603	0.602	0.580	(−)1.06	(−)1.01	(−)1.04	−
第 3 表					1.05	1.03	1.02	

第3表よりわかる様に、45回の實驗の時の $\mu$ の平均値を推定する爲には少くとも15回の實驗によらなければ判断を下すことは危険である。而して15回の實驗による $\mu$ の平均と45回の實驗(限界平均値)による $\mu$ の平均値との間には次の關係がある。

$$\mu_{45} = 1.02 \mu_{15} \dots\dots\dots(2)$$

(2) 式は増加する場合であり、減少する場合は1.02で割る。

	$\mu_{45}$	(2) 式より 求めた $\mu_{15}$	誤差(%)
A—II	0.512	0.492	3.9
A—III	0.552	0.554	0.4
B—I	0.492	0.499	0.1
B—IV	0.553	0.556	0.6
C—V	0.580	0.596	2.8

第 4 表

$\mu_{45}$ ,  $\mu_{15}$  はそれぞれ45回、15回實驗の平均値である。

この式による誤差は第4表に示す如く、極めて小さく多くの場合 $\mu_{45}$ の値は小數以下2桁迄あつてゐる。

以上の考察を通じて、本實驗に於ける靜摩擦係數 $\mu$ の値の變異を量的に見たわけであるが、現實に

於てはこの實驗に於ける如き接觸状態をなすことは少く、載荷状態のものが多いわけである。橇に荷重が加えられてゐる場合には、實驗回數の増加と共に木材と木材との接觸状態の

<sup>\*1</sup> $\mu$ の値の誤差が Gaus の normal distribution をなす場合、數十回の實驗により得られる平均値は Fig. 6 の如く安定してくる。その安定してくる平均値を限界平均値と呼ぶ。

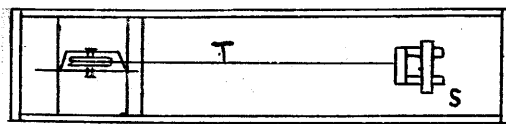
変化が大きく、 $\mu$  の値の標準偏差がどの様に變化するか問題であろう。

ii) 荷重と引張力との關係から求める方法。

材料及び試験方法

材料には i) と同じ材料を用いた。寸法は i) に示してある通りである。

實驗裝置は Fig.7 に示す。S は櫓の模型でありその上に荷重を加える。その櫓は木綿糸 T



により強化木で作られた滑車  $P_u$  を通して引張られる。櫓を引張る爲に錘  $P$  を次第に増してゆくのである。木綿糸 T の破斷強度は 700gr (長さ 800mm<sup>\*1</sup>) である。T としてニツケル線、三味線糸等も考えられたが、實驗回数を増すと、滑車  $P_u$  により、糸は曲率をもつ様になり内部エネルギーを蓄積して眞直ぐにのばした時にも曲ろうとする傾向を有し引張られる櫓そのものゝ重量が小なる場合は引張る力に分力を生じてくる。そこで破壊伸び

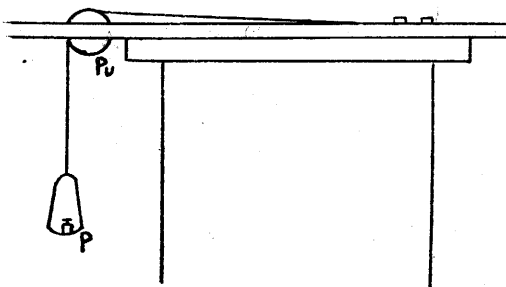


Fig. 7

率の比較的小さい木綿糸を使用した。<sup>(3)</sup>

實驗方法は S に荷重を加え (錘をのせる) 次に順次 P を大にしてゆき S が滑り出した時の P を求めた。

試験結果並びに考察

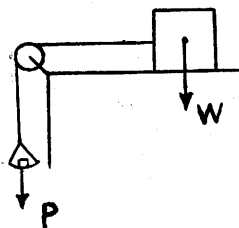


Fig. 8

左圖の如き場合に於て W なる重量の物體を引張るに要する力を P とすると物體と物體の載つてゐるものが互に剛體である場合には P と W の間は一次的な關係の存在することは既に知られてゐる通りである。

$$P = \mu W \dots\dots\dots(3)$$

(3) 式に於ける  $\mu$  を靜摩擦係數と稱する。併し乍ら、本實驗に於ては力の傳達を滑車を通して行つてゐる爲に滑車の摩擦力が問題となり、その程度如何によつては之の補正を行はねばならない。筆者の用いた滑車は強化木材製のもので、その摩擦抵抗を無視するわけにゆかず

\*1 糸は長ければ糸の強さのムラにより短い同質の糸より弱い。

(3) 藤野清久：糸の機械的性質，1942

次の如き実験を行つて滑車の摩擦抵抗力を求めた。

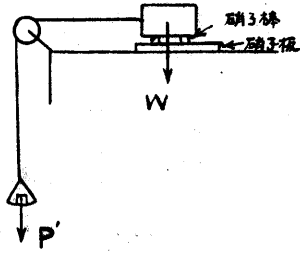


Fig. 9 の如く水平なる硝子板の上に硝子棒を2本置き、その上に槓をのせて槓の動き出す時のPを測定した。この場合硝子の摩擦抵抗力は滑車のそれと無視し得るから次式より滑車の摩擦係数が求められる。之を $\sigma$ とすれば次式を得る。

Fig. 9  $P' = \sigma W$  .....(3)<sup>1</sup>

実験により  $\sigma = 0.083$  である。第5表に補正すべき滑車の摩擦力P'を示す。

W(g)	50	100	150	200	250	300	400	500
P'(g)	4.2	8.3	12	17	21	25	33	42

第 5 表

第5表による補正を行つた実験結果を示すと Fig. 10, 11 の如くである。

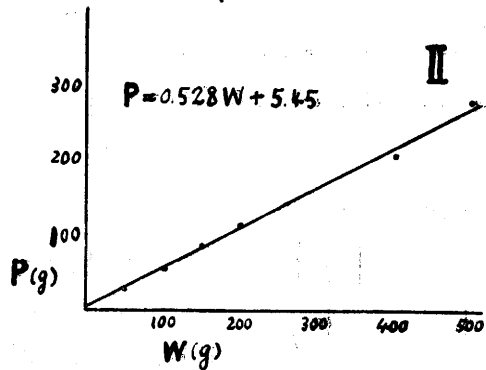
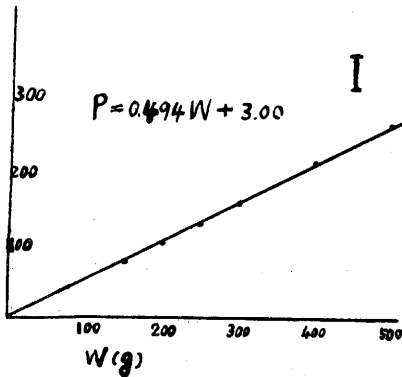


Fig. 10, 11

之は  $P = \mu W + C$  にて表はされWの係数は静摩擦係数をあらはし最後の常數項は糸の張力による抵抗等その他の偶然因子によるものである。本実験に於てはW有効數字2桁、Pが同じく2桁迄信用し得るから、求められる $\mu$ の値は小數以下2桁迄信用し得る値である。之は先きの實驗 i) と同じ程度の信用度である。

次に各荷重段階に於ける静摩擦係數の變化に就いて圖示すると Fig. 12 の如くなる。

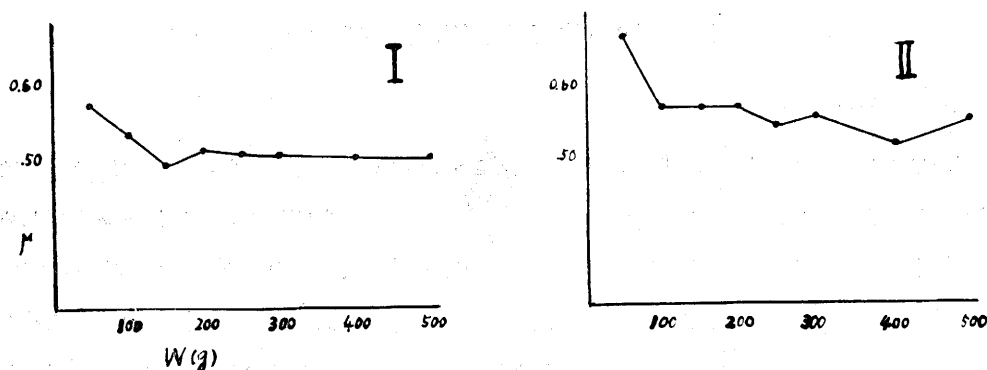


Fig. 12

Fig 12 の I に於ては W が 150g の點から  $\mu$  の値は殆んど變化がなく II に於ては W が 100g の點から  $\mu$  の値が大體一樣である。而して I, II 共に W の小なる場合に  $\mu$  の値が大きく出てゐる。このことから i) の方法による實驗の  $\mu$  の値は載荷時のそれより大きく出てゐる可能性が大である。併し乍らこの値は平均値からの偏異はせいぜい 14~15% であつて、之のみでは W が 100g の點に  $\mu$  の値の變化する點があると言ひ得ない。Reinnie<sup>(4)</sup> (1829, 1861) に依れば摩擦係数は單位面積當りの壓力増加と共に増加すると言ひ出されて Coulomb の主張に反對してゐるがその後 Terzaghi<sup>(4)</sup> の實驗によれば Reinnie とは反對に 0.15~70 kg/cm<sup>2</sup> の面壓力の際の摩擦係数は面壓力には無關係であることを述べてゐる。E. Gaber<sup>(5)</sup> の實驗に於ても差は認められない。併し乍ら木材の場合に於ては金屬の如く平滑であり得ず摩擦によつて表面に變化をきたす時は、秋材と春材との減りの差から當然接觸面積が變化して來る筈である。極端な場合には秋材のみで接觸してゐることが有り得るわけで (現實に於てなく實驗に於て) 秋材部分の壓縮強度程度の荷重がかかる場合には當然摩擦係數に變化をきたして然るべきである。而してこの場合に言う摩擦抵抗とは接觸部分の剪斷剛性と言ふことになり、土の場合の土粒子間の摩擦に似た傾向を持つ。本實驗に於ては載荷重量が小さいので (max. 70g/cm<sup>2</sup> 程度) Fig. 12 に於ける變化が載荷の爲のものゝと結論を下すわけにはゆかないが實際の場合には載荷の状態にある時の方が必要なわけで、その場合には靜摩擦係數の値は載荷重量には關係ないと見て差支えないと思はれる。

以上行つた實驗にもとづいて、次に櫓の前面及び側面抵抗に就いて實驗して見た。

(4) Terzaghi : 前出。57頁, 65頁 (19

(5) Gaber, E. : "Versuche über die Reibung von Nadelholz." (Holz als Roh- und Werkstoff H. 4), S. 119—122 (1940)



## Ⅱ 櫛の前面及び側面抵抗の測定

### 材料及び試験方法

材料はⅠに使用せる櫛の模型を用い、砂は40meshの乾燥砂を用いた。尙その砂の息角は30~35°である。前面抵抗はFig. 13に示す如くに砂を盛りあげ櫛の前面に抵抗を生ぜしめる様にした。つまり圖の如く砂を三角形に盛りあげ高さを大體櫛の高さに等しくする。三角

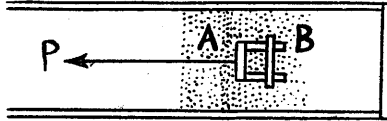
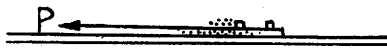


Fig. 13

形につんだ砂の重量は44gである。Aの部分は積みあげた砂の部分であるがBの部分、即ち櫛を置いた杉板の上には極く少量の砂を散布して置いた。之は後に砂の上を滑動する櫛の摩擦抵抗と比較する爲に



ちに杉板の上になく砂をまいたのである。次に側面抵抗はFig. 14に示す如く櫛前面に全然抵抗を生ぜしめず櫛の高さすれすれになる迄櫛を砂の中に埋め側面抵抗を測定した。櫛を砂中に埋める場合にはFig. 14中点線の矢印の方向に櫛を後ろに向けて、しかも底面は充分に杉板に押しつけて入れる様にした。砂中に埋つてゐる時の櫛下面の状態は前面抵抗の場合と略々同様に杉板の上に極く薄い砂の層が存在してゐるものと思はれる。

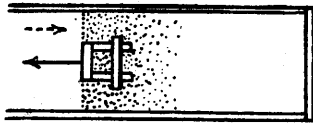


Fig. 14

載荷方法はⅠ, ii)の場合と同様で引張る力Pより抵抗を求めた。

状態は前面抵抗の場合と略々同様に杉板の上に極く薄い砂の層が存在してゐるものと思はれる。

載荷方法はⅠ, ii)の場合と同様で引張る力Pより抵抗を求めた。

### 試験結果並びに考察。

實驗は櫛2つに就いて砂上、前面、側面抵抗の測定を各80回づゝ行つた。結果はFig. 15に

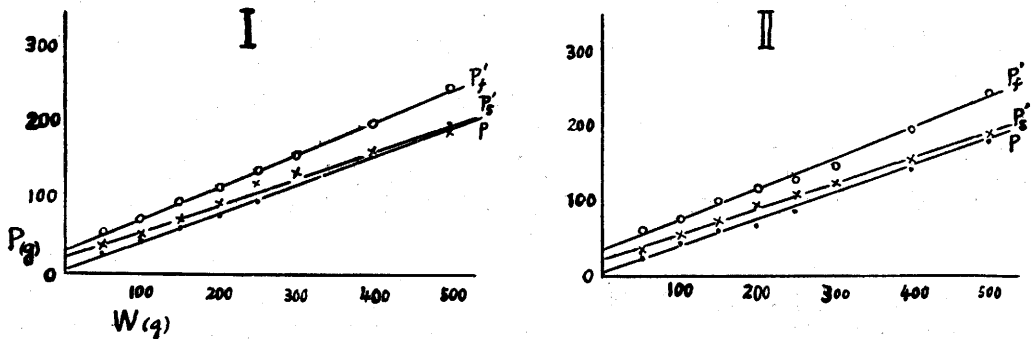


Fig. 15

示す。

圖中 $P_f'$ は底面抵抗( $P$ )と前面抵抗( $P_f$ )がプラスされたものであつて見かけの前面抵抗になる。

又 $P_s'$ も底面抵抗( $P$ )と側面抵抗( $P_s$ )がプラスされたものである。

Fig. 15によればI, II共に $P_f'$ と $P$ ,  $P_s'$ は明確に區別されるが,  $P$ と $P_s'$ との差は明確ではない。併し乍ら傾向は $P_f'$ が最大で次が $P_s'$ , 最少が $P$ と言う順になつてゐる様である。

尙各々の直線の方程式は下表の如くである。

	I	II
$P_f'$	$P_f' = 0.426W + 29.50$	$P_f' = 0.404W + 34.41$
$P_s'$	$P_s' = 0.354W + 21.35$	$P_s' = 0.340W + 22.08$
$P$	$P = 0.384W + 4.41$	$P = 0.358W + 5.29$

第 6 表

	I			II		
	抵抗力 (g)	接觸面積 ( $\text{cm}^2$ )	單位面積 當り抵抗 ( $\text{g}/\text{cm}^2$ )	抵抗力 (g)	接觸面積 ( $\text{cm}^2$ )	單位面積 當り抵抗 ( $\text{g}/\text{cm}^2$ )
$P_f$	29.5	7	4.2	34.41	7	4.9
$P_s$	21.35	18	1.2	22.08	18	1.2

第 7 表

前面及び側面抵抗は櫓にのせた重量には關係せず、而も櫓の移動の爲に押される砂が自由にひろがる程度のゆとりがある場合には抵抗力は一定であり、 $P_f'$ ,  $P_s'$  のもつ勾配は底面の摩擦抵抗によるものである。尙側面の抵抗力は實際の場合には極微量と考えられ、櫓の進行中に於ける左右のふれ以外には殆んど考える必要がない。本實驗に於て $P_s$ の値がかなり大きく出たのは側面以外の(櫓横木の)抵抗が入つてゐる爲である。 $P_s'$ は $W$ が増すにしたがつて $P$ の示す直線と略々一致して來る様である。本實驗によれば砂を媒介體とした場合の前面抵抗と側面抵抗との比は大體 $P_f/P_s = 3.5 \sim 4.1$ であつた。

尙木材(杉)と砂との静摩擦係數 $\mu$ は0.4であり、同じ材料を用いて求めた杉と杉との摩擦係數よりも小である。之は使用せる砂が微量でありしかもそれが車の働きを爲す爲である。

今前面に於ける抵抗力を $P_f$ とすると、 $P_f$ は次式を満足せねばならない。

$$P_f = F - \mu N \quad \dots\dots\dots(4)$$

(4) 式に於てFは前面に抵抗なき場合に櫓を砂の上で引張るに要する力で第6表のPに相當する。Nはその時の垂直方向の力である。此處では $P_f$ を第7表より30(g)とする。

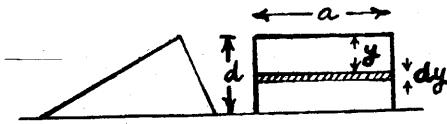


Fig. 16

今前回の砂を Fig. 16 に示す如くに盛つたとすると前面にかゝる壓力は次の如くなる。

$$P_f = a\gamma \int_0^d y \, dy \quad \dots\dots(5)$$

$\gamma$  は砂の比重 (乾燥砂2.5)

$$P_f = \frac{a\gamma}{2} d^2 + C \quad \dots\dots(6)$$

(6) 式は  $a$  及び  $d$  が一定であれば常に一定であり  $d$  が零の時  $P_f$  も零となるから  $C=D$  である。故に  $P_f'$  で導かれる式は次の如くなる。

$$P_f' = 0.4W + \frac{a\gamma}{2} d^2 \quad \dots\dots(7)$$

この式より前面抵抗は櫓の巾 ( $a$ ) よりも高さ ( $d$ ) にきいてくることがわかる。つまり巾は廣くともよいが高さはあまり高いのは好ましくないわけである。

以上粗雑乍ら、筆者の行つた實驗を報告したのであるが、I に報告せる静摩擦係数の問題は今後共引續いて研究さるべき事柄であり、偶然性に支配され易い摩擦係数の値をどの様に處理してゆくべきかと言う問題はその視點が統計學的或いは微視的方面に向けられるにつれて愈々興味を増すものがある。

## 總 括

### I 杉材と杉材の間の静摩擦係數

(1) 杉材と杉材 (纖維に平行) の静摩擦係數  $\mu$  は 0.49~0.58 である。

この數字は小數點以下 1 桁迄しか信頼出來ない。

(2) 小型模型實驗に於て信頼し得る摩擦係數を求めするには 45 回以上の同一實驗を繰り返して平均値をとる必要がある。然し 15 回の實驗による平均値から 45 回の實驗値を次式により推定することが出来る。

$$\mu_{45} = 1.02 \mu_{15}$$

(3) 摩擦荷重が 0.01~0.07 kg/cm<sup>2</sup> の間では摩擦係數は荷重の大きさに無關係である。

### II 砂上で小型模型櫓 (杉材) を牽引する場合の抵抗

(1) 底面の摩擦抵抗は 0.37 である。

(2) 前面抵抗は側面抵抗よりも大きい。而して荷重が大になるに従つて側面抵抗は無視し得る様になる。

(3) 前面抵抗の値は次の式で與えられる。

$$P = \frac{a\gamma}{2} d^2$$

たゞし  $W$  = 荷重

$a$  = 抵抗面の幅

$d$  = " 高さ

$\gamma$  = 砂の比重

(4) 側面抵抗の値は

$P_s = 0.0012 \text{kg/cm}^2$  である。

(1949. Aug. 脱稿)

#### SUMMARY

It is evident that a certain resisting force is acting against a tractive force when a sledge (or any other simmiller log-transporting equipment) is pulled by that force. The total resistance is mainly due to the friction on the contacting surface between the sledge and the ground on which it lays, but somewhat complicated figures may be seen in the amount of the resistance owing to the additional resisting forces on the front surface and the side surfaces of the sledge. Though there had been already performed numerous studies theoretically as well as experimentally on the phenomena of friction and resistance, the given values of the resistance or the coefficients of friction differ to a large amount in each case; the nature of friction itself is not yet sufficiently clarified because it depends upon various complicated factors. The author performed some experiments with small-size model-sledges aiming to analyse the problem. In the experiments coefficients of statical friction on the bottom surface and the resisting forces both on the front and the side surfaces of the model-sledges were measured. As to the measurement of friction and resisting forces, two methods, namely, 1) maximum slope of the ground surface at the moment when a sledge slides being measured directly, and 2) tractive force to move a sledge on horizontal surface being measured, and then coefficient calculated mathematically, were compared at first; better results were proved by the latter method. The results obtained by the latter method are

as follows :

I. Coefficient of statical friction when "Sugi"-wood is placed on "Sugi"-wood surface.

(1) Coefficient of friction (parallel to the grain)  $\mu=0.49\sim 0.58$

The numerical value of  $\mu$  in each case of different model is reliable to the 1st place below the decimal point.

(2) To obtain a reliable value of  $\mu$  in the model-experiments, the same measurement should be repeated in each case at least 45 times. The mean value  $\mu_{45}$  of 45 measurements may be presumed by the mean value  $\mu_{15}$  of 15 measurements in the formula  $\mu_{45}=1.02 \mu_{15}$

(3) There exists no correlation between  $\mu$  and the weight of the load applied on the sledge within the range of unit pressure  $0.01\sim 0.07$  kg per sq. cm.

II, Resistance of sledge on sand.

(1) Resistance due to friction on bottom surface is given by the formula;  $P=\mu W$ , where  $W$ =applied load, and  $\mu=0.37$

(2) Front resistance is given by the formula;  $P_f'=\frac{a\gamma}{2} d^2$ , where  $W$ =applied load in kg,  $a$ =width of front surface in cm,  $d$ =height of front surface in cm,  $\gamma$ =specific weight of sand in kg per cub. cm.

(3) Side resistance in kg per sq. cm.;  $P_s=0.0012$

(4) Resistance on the front surface is larger than those on side surfaces. There observed an inclination, that, the heavier the applied load the more negligible the respective side resistance.