



HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	キャタピラー雪上車の走行試験
Author(s)	藤岡, 敏夫; HUJIOKA, Tosio
Citation	低温科学. 物理篇, 15, 93-100
Issue Date	1956-11-30
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/17915
Type	departmental bulletin paper
File Information	15_p93-100.pdf



キャタピラー雪上車の走行試験*

藤 岡 敏 夫

(低温科学研究所 応用物理学部門)

(昭和31年8月受理)

I. ま え が き

本年1月、北海道網走市でおこなわれた、南極観測隊の予備訓練に参加した人から、キャタピラー型の雪上車を雪の上で走らせたところ、詳しい測定をしたしかめたわけではないが速度がはやいほど、轍があさくなつたという話をきいた。雪上車の速度がはやいと、積雪に力がはたらく時間はみじかい。したがって、このことは、積雪に力がくわえられる場合、力の作用している時間がみじかいと、積雪の破壊強度がますことをしめしているように思われる。

筆者はさきに、櫓の静摩擦抵抗をしらべた時、櫓の引きだし方の緩急と、摩擦抵抗との間にも同様な現象のあることをみとめている¹⁾。

以上のことがきつかけとなつて、種々の測定に便宜のえられる札幌で、雪上車の走行試験を行うことになつた。以下はその試験の結果である。

II. 実 験 方 法

実験に使用した雪上車は、小松製作所製 KC 20-3 型雪上車である。この雪上車の性能のうち、この試験に関係のあるものを次にかかげる。

キャタピラー幅	52.5 cm
接 地 長	237 cm
空 車 時 重 量	2,400 kg
接 地 圧	0.097 kg-wt/cm ²

実験をおこなつた時の乗員は、運転手1名であつた。運転手の体重を 55 kg とすると、雪上車の総重量は 2,455 kg、接地圧は 0.0986 kg-wt/cm² となる。

実験は昭和31年(1956年)2月24日におこなつた。場所は、札幌市丘珠飛行場で、自然に放置された積雪深 42 cm の平らな雪原である。この積雪の上で、雪上車を東西の方向に4回走らせた。第1回目は東向きに時速 30 km、第2回目は西向きに 1.5 km、第3回目は東向きに

* 北海道大学低温科学研究所業績 第340号

16 km, 第4回目は西向きに7.6 kmであつた。したがつて、東向きの2回は速度がはやく、西向きの2回は速度がおそい。こんど、何回目とよぶかわりに、速度のはやい方から *I*, *II*, *III*, *IV* の番号をつけよぶことにする。第1回目が *I*, 第3回目が *II*, 第4回目が *III*, 第2回目が *IV* になる。

雪上車の速度は2つの方法でもとめた。第1の方法は、雪上車についている速度計のよみとりによるもので、第2の方法は、雪上車が一定区間を走るのに必要な時間の測定によるものである。第2の時間測定はつぎのようにしておこなつた。雪上車が東向きにはしるときは、車の走行路にそつて、西から東の方に、0 m, 50 m, 100 m の3つの地点をきめ、これらの地点に人がたち、50 m, 100 m の地点にいる人は秒時計をもつ。雪上車が助走区間をはしつたのち、0 m の地点の前にさしかかると、この地点にいる人は、上げていた手をふりおろす。この合図で、他の2つの地点にいる人は秒時計をうごかしはじめ、車が自分の前にさしかかつたとき、秒時計をとめた。車が西向きにはしるときは、0 m と 100 m の位置をとりかえる。車の助走距離は、0 m の地点の手前に、速度のはやかつた *I*, *II* のばあいは約 70 m, 速度のおそかつた *III*, *IV* のばあいは約 30 m とつた。4回の走行をおこなつたのち、50 m の測定地点附近で、轍の深さと轍の下の積雪の破壊状態をしらべた。写真 *I-2* にもみられるように、轍は週期的に深くなつたり、浅くなつたりしている。轍の深さや、積雪の破壊状態の調査は、轍の深い部分と浅い部分の両方についておこなつた。

轍の深さ、また、轍の下の積雪の破壊状態はつぎのようにしてしらべた。まず、轍の部分に、写真 *I-3* にみられるような穴をほり、積雪の垂直断面をつくる。この断面は、写真のように、一面に真白な壁になつているが、霧吹きでインクの稀釈溶液をふきつけると、雪の壁に、写真 *I-4* のような縞模様があらわれる。このままでも、積雪の破壊状態の大体の様子がわかるけれども、この面をさらに、トーチランプであたためて、表面の一部の雪をとかすと写真 *I-5* にみられるようなはつきりした縞模様になる。写真 *I-5* で轍のすぐ下 10 cm ばかりの範囲に、縞模様が密になり、かつ、下に凸になつて彎曲している部分が、キャタピラーによつて破壊圧縮をうけた部分である。写真 *I-4* につぎにうたがはれている物指しのうち、水平におかれていたものは、cm 目盛りの物指しで、立ててあるのは吋目盛りの物指しである。

III. 測定結果

測定結果をまとめて、第1表にかかげてある。速度の欄のうち、「50 m 区間」、「100 m 区間」は、それぞれ走行距離 50 m, 100 m についての平均速度で、「速度計の速度」は、雪上車の速度計のよみである。50 m 区間、100 m 区間共に、一番上の欄は、秒時計のよみとり、中段、下段はこのよみとりから換算した *m/sec*, *km/H* の速度である。50 m 区間の速度と 100 m 区間の速度とは大体ひとしいから、雪上車はほぼ一定の速度で、100 m の距離をはしつたものと考えられる。雪上車の速度計による速度のうち、*IV* にあたる欄が空欄になつているのは、

第 1 表

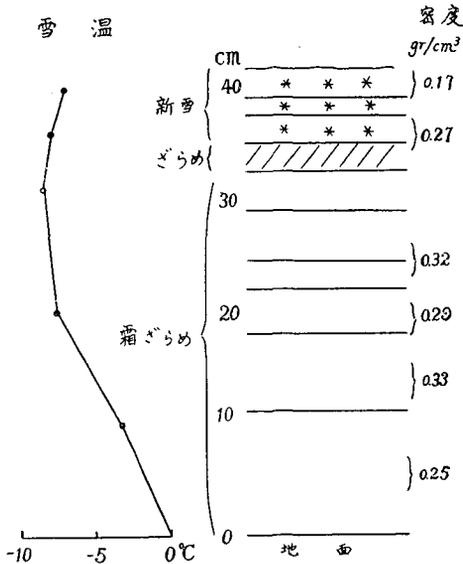
		I	II	III	IV
速 度	50 m 区間	6.0 sec	11.4 sec	24.6 sec	121 sec
		8.3 m/sec	4.38 m/sec	2.03 m/sec	0.41 m/sec
		30 km/H	15.8 km/H	7.32 km/H	1.5 km/H
	100 m 区間	11.9 sec	23 sec	45.6 sec	240 sec
		8.4 m/sec	4.5 m/sec	2.19 m/sec	0.46 m/sec
		30 km/H	15.6 km/H	*7.9 km/H	1.5 km/H
雪上車の速度計による速度		38~40 km/H	20 km/H	10 km/H	
速度計の値/実測値		1.3	1.25	1.3	
轍の深さ D	浅い部分	4 cm	4 cm	1.5~2 cm	8.5 cm
	深い部分	11~12 cm	9 cm	12 cm	
圧縮層の厚さ h	浅い部分	10 cm	10 cm	8 cm	16 cm
	深い部分	22 cm	14 cm	14 cm	
h/D	浅い部分	2.5	2.5	5.3~4	1.9
	深い部分	2.0	1.6	1.2	

雪上車の速度があまりにおそくて、速度計の針がうごかなかつたためである。

第 1 表にみられるように、秒時計によつて測定された速度の実測値にくらべると、雪上車の速度計による速度は 3 割ほど大きい。速度計は駆動軸の回転速度をしめすものであるが、その

機構には欠陥がなく、速度計の値は正しいとすると、この 3 割の誤差は、キャタピラーのスリップによるものとしか考えられない。轍をみると、もつとも速度のおそかつた IV のばあいにはキャタピラーの跡がはつきりしているが、他の 3 つのばあいにはかなりくずれていた。このことから、キャタピラーの下になつて破壊された雪が、車のうしろの方におしやられ、キャタピラーが地面に対してスリップしたのとおなじ結果になつたのではないかと想像される。

実際、この時の札幌の雪は非常にもろい構造のものだつたのである。第 1 図に積雪の成層状態と温度とをしめしてある。積雪の深さは 42 cm で、上部は新雪、その下にうすいざらめ



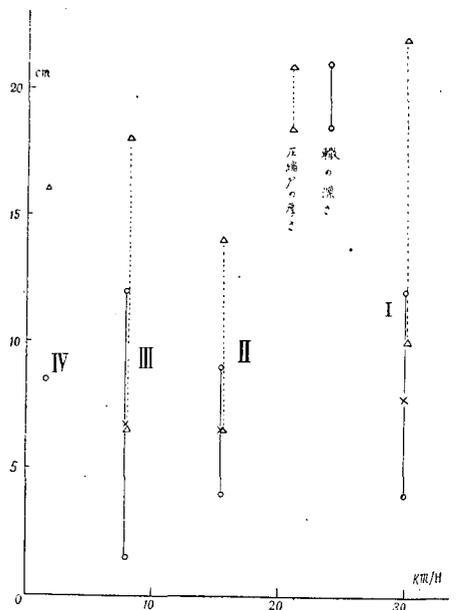
第 1 図 積雪の成層状態及び温度

雪の層があり、ざらめ層の下、地面から 32 cm の高さまでのあいだは、そのほとんど全体が霜ざらめであつた。全体にわたつて、図の水平な実線の位置に何枚かのうすい氷の板がはさまつていた。新雪もざらめ雪も弱い構造のものであるが、霜ざらめ雪は殊にもろい構造のものである。これについては小島の詳しい報告がある²⁾。第 1 図の左側に、積雪のなかの温度を測定した結果がしめしてあるが、霜ざらめの部分での温度の勾配は、30 cm について 10°C、すなわち 0.3°C/cm にも達している。霜ざらめは、このように大きな温度勾配が積雪のなかに持続したばあいにはできるものであつて、今年の札幌の雪はそのような条件のもとにおかれたのであつた。積雪全体のこの弱い構造のために、雪上車が地面に対してスリップした結果となり、3 割にのぼる差異が実際の速度と速度計の速度とのあいだにあらわれたものと思われるが、3 割という誤差は非常に大きい。實際上大きな問題であろう。いろいろな積雪についてこの誤差を決定するとともに、スリップのおこる機構を研究する必要がある。

第 1 表の轍の深さは、もつとも深い部分と、もつとも浅い部分との値である。ただし、最低速度の IV のばあいには、轍の深さは一樣で、週期的な深浅はみられなかつた。第 2 図の横軸に速度をとり、轍の深さの最大値と最小値とを円印であらわしてある。十字の印はその平均値である。最低速度の IV のばあいに比べると、速度の大きいほかの 3 つのばあい、轍はたしかに浅くなつてはいるが、速度が大きいほど轍が浅くなるというような一般的関係はみられない。しかし、前にものべたように、この試験結果は、特別にもろい構造の雪に関してのものである。積雪はもつと丈夫なしまり雪からなつてるのが普通で、そのような普通のばあいには、速度と轍の深さとの間に簡単な関係があるのかもしれない。

前節で、轍のなかの雪の上層部には圧縮層があることをのべたが、第 2 図の三角の印はその圧縮層の厚さである。轍の最深部ではもつとも厚く、最浅部ではもつともうすいので、そのふたつの値をしめしてある。圧縮層の厚さは、速度がますますつれて減少する傾向はみられるが、II のばあいから I のばあにかけては、反対に速度とともに増加している。

第 1 表の一番下の欄に、圧縮層の厚さと轍の深さとの比をしめた。雪の上に重りをのせたとき、重りのしずんだ深さを D とし、雪の内部に生じた圧縮層の厚さを h とすると、 h は $h=1.5D$ と $h=4D$ との間にあることがしられている³⁾。第 1 表の雪上車の場合も、大体この



第 2 図 雪上車の速度と轍の深さ
圧縮層の厚さの関係

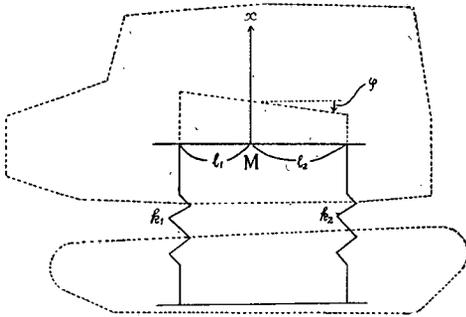
結果に一致している。

積雪の断面をみると、圧縮層の下にある雪の中に割れ目が存在するばあいは何例かみられた。轍が深いばあいには、例外なく割れ目ができて、この割れ目は、地面迄達していた。割れ目は圧縮層の左右の両端に生ずることが多いが、これは、そこに歪力が集中するからである。また、この他に、たとえば写真 I-6 にあるように、轍の中央に近く割れ目がはいつているばあいもある。この写真からみられるように、中央の割れ目と、右側の割れ目との間では、圧縮部分が舌状に下の方におしだされている。このように、圧縮層の厚さは、轍の幅全体にわたってかならずしもおなじでないが、そのようなときには、舌状におしだされた部分は除外し、それ以外の部分の厚さをとつて第 I 表にだしてある。

IV. 雪上車のピッチング

最低速度の IV のばあいをのぞけば、轍には、深い部分と浅い部分とが規則的に交互に存在していた。積雪の強度が均一でなく、週期的に変化していたとすれば、当然それが原因と考えられる。しかし、最低速度 IV のばあいに、深さに変動があらわれなかつたことからみて、積雪の強度は一樣であつたと考えなければならない。

雪上車が走っている時、横から観察していると、IV のばあいをのぞいて、他の I, II, III の 3 つのばあいとも、雪上車の車体がひどくピッチングするのがみとめられた。雪上車の車体は第 3 図にしめしたように、スプリングを介してキャタピラーの上につている。そのため、



第 3 図 模式化した雪上車

k_1, k_2 はスプリング、 M は車体の重心、 x は重心の鉛直方向の座標、 φ はピッチングの角。

車体は上下方向の振動とともに、前後の方向にかたむく振動、すなわち、ピッチングをもおこしうるわけである。この 2 つの振動のほか、車体には、左右の振動であるローリングもおこりうるわけであるが、雪にしるされた轍は、同時に浅くなつたり、深くなつたりして、ローリングがあればみられる筈の左右交互の凸凹はみられなかつた。それで、轍の深さの週期的な変化は、車体の上下振動や、ピッチングのためにおこつたものと考えられる。

第 3 図は、雪上車の側面の模式図であるが、 M は雪上車の車体の重心、 k_1, k_2 は雪上車の前後のスプリング、 l_1, l_2 はそれぞれ重心 M から前後のスプリング迄の距離である。重心 M を座標原点とし、鉛直上向きに x 軸をとる。また、車体の水平方向に対する傾きの角を φ とする。なんらかの原因で、車体が平衡の位置からずれたとすれば、車体は振動的な運動をおこすわけであるが、そのときの運動方程式は、 φ が小さい値にかぎられるとして、

$$M\ddot{x} = -k_1(x + \varphi l_1) - k_2(x - \varphi l_2) \quad (1)$$

$$I\ddot{\varphi} = -k_1 l_1(x + \varphi l_1) + k_2 l_2(x - \varphi l_2) \quad (2)$$

ただし、 M は車体の質量、 I は重心のまわりの車体の慣性能率、 k_1 、 k_2 はスプリングの常数である。この聯成振動の方程式の解は

$$x = A \cos\left(\frac{2\pi}{\lambda_1} t + a\right) + B \cos\left(\frac{2\pi}{\lambda_2} t + \beta\right) \quad (3)$$

$$\varphi = \frac{A}{p} \cos\left(\frac{2\pi}{\lambda_1} t + a\right) + \frac{B}{q} \cos\left(\frac{2\pi}{\lambda_2} t + \beta\right) \quad (4)$$

となるが、 A 、 B 、 a 、 β は振動の初期条件によつてさだまる常数、 λ_1 、 λ_2 はつぎの方程式の2つの根である。

$$\frac{1}{\lambda} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{2} \left\{ -(a+d) \pm \sqrt{(a-d)^2 + 4bc} \right\}}$$

ここで、 a 、 b 、 c 、 d は

$$a = -\frac{k_1 + k_2}{M}, \quad b = -\frac{k_1 l_1 - k_2 l_2}{M},$$

$$c = -\frac{k_1 l_1 - k_2 l_2}{I}, \quad d = -\frac{k_1 l_1^2 + k_2 l_2^2}{I}$$

をあらわす。実験につかつた雪上車の M 、 l_1 、 l_2 、 k_1 、 k_2 の値は

$$M = 2.46 \times 10^6 \text{ gr}, \quad l_1 = 3.6 \times 10 \text{ cm}, \quad l_2 = 9.9 \times 10 \text{ cm},$$

$$k_1 = 31.8 \times 2 \text{ kg-wt/mm}, \quad k_2 = 26.9 \times 2 \text{ kg-wt/mm}$$

となつている。この M の値としては、車全体の質量をとつてある。実はキャタピラー部分の質量をとりのぞいた、車体だけの質量をとるべきなのであるが、それが不明なので全質量で代用する。また、車体の重心と前後のスプリングとの水平距離 l_1 、 l_2 も、車体だけの重心の位置がわからないので、車全体の重心位置からもとめてある。重心のまわりの車体の慣性能率 I は、正確な資料がえられないので、つぎのようにしてもとめた。今車体を、一樣な密度の物質がつまつている直六面体と考え、この箱の前後の長さを $4m$ 、高さを $1m$ とすると、

$$I = 3.5 \times 10^{10} \text{ gr} \cdot \text{cm}^2$$

となる。 I の値としてはこれをつかつた。以上の値から λ_1 、 λ_2 をもとめると、

$$\lambda_1 = 0.28 \text{ sec}, \quad \lambda_2 = 0.53 \text{ sec}$$

となる。

この2つの λ の値は、うえにのべたように、粗い近似計算の結果もとめられたものでもあり、また、はじめにかかげた運動方程式には、振動の減衰も考慮されていないのであるから、これらが雪上車の正確な振動週期であるとは期待できない。しかし、雪上車をゆすつて、ピッチングをおこさせ、その週期を実測してみると、 1.0 sec となり、計算の結果と少なくとも大き

きの程度の点ではあつているのである。車を地上にとめておき、車の後部の出入口の階段に3人の人がのつて、膝を屈伸して車に、強制的に、ピッチングをおこさせた。膝の屈伸の週期と、車のピッチングの固有週期とが一致すれば、はげしい振動がおこる。このようにしてえられたピッチングの週期が 1.0 sec だつたのである。うえにえられた2つの λ の値のうちの大きい方が実測値に近いから 1 sec という実測値は λ_2 に相当するものと考えてよいであろう。膝の屈伸するはやさをもつとはやくして、屈伸の週期が短い方の週期 λ_1 に一致すれば、その時にも大きな振動がおこるはずであるが、この種の振動をおこすことには成功しなかつた。一般的にいって、共鳴振動の振幅は週期の短い振動ほど、週期の自乗に比例して小さくなるから、 λ_1 の週期の振動は、たとえおこつたとしても振幅の小さいものであることが予想される。

このようなことから、ピッチングは、2つの週期でおこりうるが、実際には、そのうちの週期の長いものだけがおこると仮定する。すなわち、(4)式において、 $A=0$ と仮定する。そうすると、(3)式によつて、 x も週期 $\lambda_2 (=1 \text{ sec})$ で変化することになる。

$$M\ddot{x} = -B \frac{4\pi^2}{\lambda_2^2} \cos\left(\frac{2\pi}{\lambda_2} t + \beta\right) \quad (5)$$

はスプリングが車体におよぼす力であるが、スプリングは、これとおなじ力をキャタピラーを介して、雪におよぼすわけである。したがつて、雪は週期的に変化する圧力をうけ、轍は週期 λ_2 をもつて深くなつたり、浅くなつたりしなければならない。

最大速度 I の走行試験のばあいには生じた轍の深い部分同志の間隔は、 8.1 m , 9.6 m , 10 m , 9.9 m になつていた。この時の雪上車の平均速度は、 8.3 m/sec であつたから、これらの距離を車が走るのに要した時間は、 0.98 sec , 1.0 sec , 1.2 sec , 1.2 sec で、ほぼピッチング φ の週期の実測値に一致する。したがつて、轍に生じた凸凹は、雪自身の特性によるものではなく、雪上車のピッチングによるものと考えなければならない。

最低速度で走つた IV のばあい、横から観察してピッチングもみられなかつたし、轍にも凸凹がなく一様の深さになつていた。轍の深さは 8.5 cm であつた。ピッチングがおこらなければ、車体の重心の上下運動もおこらないから、雪にくわえられていた圧力は、雪上車の静止接地圧 $0.0986 \text{ kg-wt/cm}^2$ にひとしい。この圧力をうけたまま、積雪表面が 8.5 cm へこんだとすると、表面 1 cm^2 あたり、 $w = 0.0986 \times 8.5 \text{ kg-wt}\cdot\text{cm}$ の仕事になされたことになるが、このため、キャタピラーによつて、積雪表面 1 cm^2 あたり、 $a = 8.5 \rho \text{ gr/cm}^2$ の雪が排除されたわけである。ここに ρ は、雪がへこまされるまえにもつていた密度である。雪の密度を第1図からみて、 0.3 gr/cm^3 とすると $a = 2.6 \text{ gr/cm}^2$ となる。木下は、円筒形の錘りを雪面におとしたばあい、同一の雪については、 a と w とが比例することをみだし、本年の雪についても、 $a/w = 2 \sim 4 \text{ gr/kg-wt}\cdot\text{cm}$ なる値をえている⁹⁾。今の雪上車のばあいも、 $a/w = 3.0 \text{ gr/kg-wt}\cdot\text{cm}$ となり、木下の結果と矛盾しない。 a/w はその定義からもわかるとおり、雪の弱さ、軟さの目安

と考えることが出来るのであつて、例年の雪では a/w は 1 くらいである。したがつて、この報告のはじめにものべたとおり、今年の雪は例年にくらべて、非常に弱く軟かい雪であつたわけである。

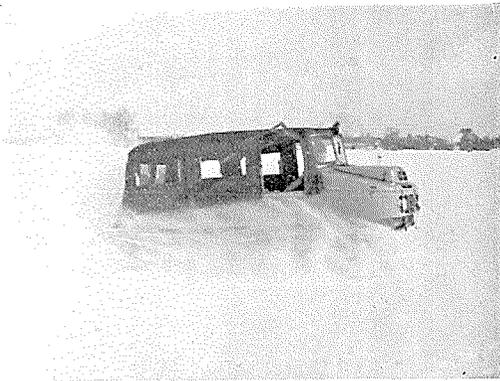
この実験にあつては、低温科学研究所の、吉田順五教授をはじめ、研究員の人達、朝日新聞社、小松製作所の方々の御協力をいただいた。ここに記して感謝の意をあらわす。

文 献

- 1) 藤岡敏夫・木下誠一 1955 雪橋の抵抗 III. 低温科学, 物理篇, **14**, 43.
- 2) 小島賢治 1956 積雪層の粘性圧縮 II. 低温科学, 物理篇, **15**, 117.
- 3) Z. Yosida and Colleagues 1956 Physical Studies on Deposited Snow II. Contribution for the Institute of Low Temperature Science, **9**, 63.
- 4) 木下誠一 1956 衝撃による積雪の破壊 II. 低温科学, 物理篇, **15**, 149.

Résumé

The author has been told that when a snow car equipped with caterpillars ran over the snow cover, the ruts they made in the snow showed the tendency to become shallower as the speed of the car was increased. In order to see whether this is the case or not, a snow car was driven on the snow cover at different speeds (30, 15, 7 and 1.5 *km/hour*), and the ruts it made in the snow were carefully examined. The weight of the car was 2,460 *kg* therefore its static pressure on the snow cover was 0.098 *kg-wt/cm²*. For the lowest speed 1.5 *km/hour*, the ruts were uniformly 8.5 *cm* deep while for the higher speeds their depth was found to change periodically along the course of running. In Fig. 2, the maximum and minimum depth of the ruts are shown by small circles against the speeds of the car, the triangles in the same figure showing the thickness of the compressed snow region developed beneath the ruts. The depth of the ruts shows no clear tendency to decrease with the increasing speed. The snow upon which these experiments were done was of particularly fragile structure, having been metamorphosed to an aggregate of hoar crystals by sublimation owing to the intense temperature gradient which had been prevailing for a long time beneath the snow surface. The existence of such an especially fragile structure might be the reason why no evidence could be found of the reported relationship between the depth of ruts and the speed of car. Indeed the speedometer attached to the car showed excess values amounting to 130% of the real speeds, which indicates that the speed of car was partly lost owing to the very fragile structure of the snow.



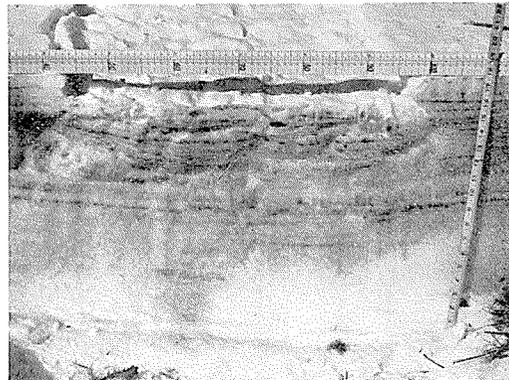
I-1. 時速 30 km で走っている雪上車



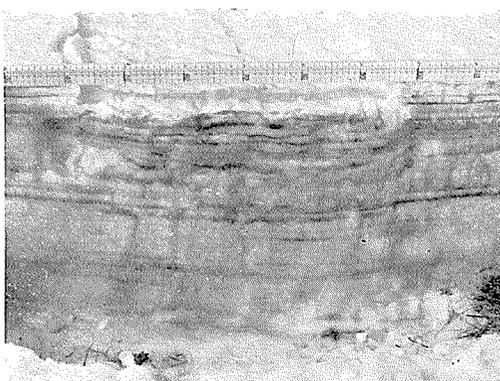
I-2. 轍. 深さが週期的にかわっている



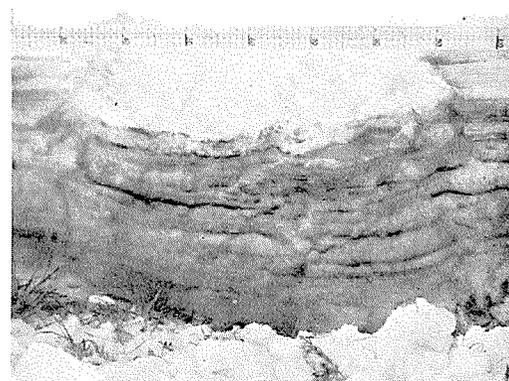
I-3. 轍の浅いところの積雪断面



I-4. I-3の断面にインクをとかした水を噴霧したもの



I-5. おなじ断面を更にトーチランプであぶつたもの



I-6. 轍の深いところの積雪断面