

編成そりの走行抵抗について

細 谷 昌 之*・喜 納 淳**

On Dynamic Resistance of the Composed Sledge in Antarctica

Masayuki HOSOYA* and Atsushi KINOUE**

Abstract

From September 1968 to February 1969, the 9th JARE (Japanese Antarctic Research Expedition) traveled to the South Pole with the aid of snow vehicles and sledges.

In order to ensure the mobility of the travel, the tractive effort of the snow vehicles on the crust surface of snow in Antarctica and the running resistance of the composed sledges were tested.

The results of the tests revealed that the maximum tractive force of one vehicle on

crusted surface in Antarctica is 15.4 tons, the static frictional resistance coefficient μ_s is 0.68, and the dynamic frictional resistance coefficient μ_d is 0.51 at 3 km/h vehicle speed.

When the snow vehicle towed five composed sledges, or was loaded with 15.4 tons, behavior of the vehicle was considerably hampered, especially in the motions of turning or crossing a drift of snow. Therefore, 15.4 tons may be a critical value of load. Paying attention to this point, the movement of the traverse party became considerably easy.

1. は し が き

1968年9月から1969年2月にかけて、第9次越冬隊は、極点までの往復6000km余りの内陸調査旅行を、雪上車と編成そりによって行なった。この調査旅行に先だって、編成そりの適正重量と行動性の見地から、雪上車けん引力と編成そりの運動性を調べるために、編成そりの直進走行抵抗、旋回走行抵抗の試験を行なったので整理報告する。時間的な制約から、種々の雪質下についての試験を行なうことができなかったのも、南極における雪上車の路外条件テストとしては一部分であった。この試験の結果から、極地の走行雪面についての路外

* 防衛庁技術研究本部。Japan Defence Agency, Mishuku, Setagaya-ku, Tokyo.

** 防衛庁技術研究本部第4研究所。Technical Research and Development Institute, Japan Defence Agency, Fuchinobe, Sagamihara.

条件を定性的、定量的につかむには、試験データが不足している。しかし、極地における代表的な、表面のクラストしている雪面については、その傾向はつかめたと思われる。試験は1968年9月上旬に、昭和基地から内陸に30km入った平坦な雪面で行なわれ、編成そりの積載重量は旅行において雪上車1両がけん引する重量のほかに、負荷用そり1台を含めて5台編成とし、その積載重量を15.4tとした。今回は、雪上車の最大けん引力試験、編成そりの直進走行抵抗試験、観測そりのみの直進走行抵抗試験と旋回走行試験を実施した。

2. 走 行 抵 抗

そりの直進運動によって発生する外部抵抗力、すなわちフローウィングフォースは、そりのランナー湾曲部が雪面と衝突することによって雪を変形、破壊し、圧潰する抵抗と、雪とランナーの平面摩擦によって生ずる抵抗力の2つに分けられる。このような運動をすることによって発生する種々の抵抗力を総称して走行抵抗という。野外での試験においては、個々の成分の抵抗についての計測は困難なので、試験においてはフローウィングフォースの影響が小さくなるように、平坦雪面を選んで行なった。このためけん引力が平面摩擦で代表されるところならば、2物体間の見かけの接触面積*に作用する荷重を G 、摩擦力(けん引力)を F とするとき、クーロン則が成立すると仮定して、摩擦係数 μ は次式で表わされる。

$$\mu = \frac{F}{G} . \quad (1)$$

今回の試験ではそりランナー部エッジは無視されるほど面積が小さいので、横方向の摩擦係数は直進と等しいと考えられる。けん引力 F を計測して(1)式より抵抗係数を求めた。旋回時の走行抵抗は直進時の外部抵抗のほかに、旋回時の外部抵抗と内部抵抗の和で表わされる。旋回時の外部抵抗とは、旋回するときそりランナーと雪面との間に抵抗モーメントが発生することと、雪面から横方向の摩擦力が発生することである。そりの摩擦面が平面であり、横方向のフローウィングフォースが小さいなら、近似的に直進時の摩擦抵抗係数に等しい。内部抵抗の因子としては、旋回運動によってそり重心軸に関する慣性モーメントと旋回運動によって発生する遠心力が考えられる。旋回に消費される仕事 W を旋回した角度 α で割ると、旋回の抵抗モーメントが求められる。すなわち、仕事 W を図1(a)の片側ランナーについて求めると、

$$W = \int_0^\alpha \int_0^{\frac{L}{2}} \frac{\varphi G}{L} \cdot x \cdot dx \cdot d\alpha , \quad (2)$$

* 見かけの接触面積とは、雪面とランナー接触部の面積でランナー平行部とランナー幅の積で表わされる。実際には雪面の凹凸のために真実接触面積ではない。

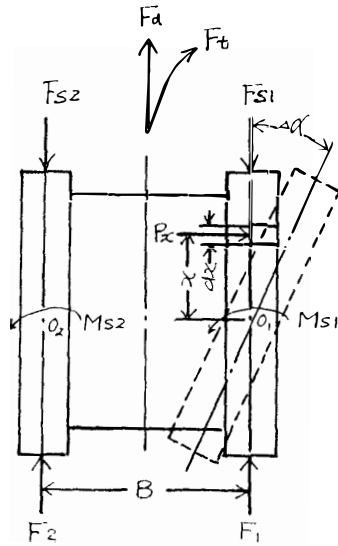
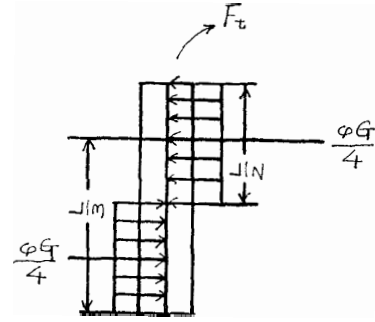


図 1 (a) 旋回時のそりランナー
に作用する力関係



(b) 旋回時の雪面の横方
向反作用

L : そりと雪面との接地長

φ : 横方向の摩擦力

片側ランナーの旋回仕事 W は

$$W = \frac{\varphi GL}{8} \alpha, \quad (3)$$

片側ランナーの旋回抵抗モーメント M_s は

$$M_s = \frac{W}{\alpha} = \frac{\varphi GL}{8}. \quad (4)$$

旋回するそのの力の平衡式は図 1 (a) から,

$$\left. \begin{aligned} F_d &= F_1 + F_2 \quad (F_1 = F_2, \text{ 直進}) \\ F_t &= F_1 + F_2 \quad (F_1 < F_2, \text{ 旋回}) \\ F_1 &= F_{s1} - \frac{M_{s1} + M_{s2}}{B}, \quad F_2 = F_{s2} + \frac{M_{s1} + M_{s2}}{B} \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

直進時のそりランナーの抵抗力 $F_{s1} = F_{s2} = \mu G/2$ であり, 旋回時は $M_{s1} < M_{s2}$ であるので, 以上を F_1 , F_2 , に代入してそれぞれのそりランナーの旋回抵抗力を求めると,

$$F_1 = \frac{\mu G}{2} - \frac{\varphi GL}{4B} \quad (6)$$

$$F_2 = \frac{\mu G}{2} + \frac{\varphi GL}{4B}. \quad (7)$$

旋回抵抗モーメントは接地圧分布のようすによって影響を受ける．そこで(6)，(7)式はそりランナーの接地圧が矩形分布するときに適用され，その外の場合には適用されない．その構造，燃料ドラムの積載状態から接地圧は矩形分布していると見なせる．

内部抵抗の因子としてのそり全体の慣性モーメント J_z はそり構造の機素質量が不明なため求めなかった．旋回運動によって発生する遠心力 C は旋回中心 O の回りの旋回半径 R_0 より

$$C = \frac{G}{g} \cdot \frac{v^2}{R_0} \quad (8)$$

が求められるが，旋回半径 R_0 の大きい領域では遠心力増加はあまりない．しかしその旋回運動はなめらかではなく，多角形運動的に旋回するため，旋回半径の小さいときは無視できない．

3. 試験供試そり諸元および雪上車諸元

試験供試そりおよび積載荷重分布を表1に示す．けん引雪上車 KD60 型の諸元を表2に示す．

表1 編成そりの内容

	観測そりカブ ス (ST40V)	燃 料 そ り (ST40)	中 型 木 製 そ り	中 型 木 製 そ り
	kg	kg	kg	kg
そ り 重 量	1,340	1,770	700	700
カ ブ ー ス 重 量	900			
ラ ン ナ ー 接 地 長	3,300	3,300	3,500	3,500
ラ ン ナ ー 幅	500	500	225	225
積 載 重 量	2,000	4,000	2,000	800
総 重 量	4,240	5,770	2,700	1,500
接 地 圧 (積)	0.128 kg/cm ²	0.174 kg/cm ²	0.34 kg/cm ²	0.28 kg/cm ²

負荷用そりは中型木製そりに積載重量 500kg，総重量 1,200kg，接地圧 0.15kg/cm²

表 2 雪 上 車 諸 元

項 目	KD 605
機 関 型 式	4サイクル水冷ディーゼル エンジン
シ リ ン ダ 数	6
総 排 気 量	6373cc
圧 縮 比	22 : 1
接 地 圧 (積載時)	0.19kg/cm ²
平地定格出力(平地セット)	140ps/2400r.p.m.
〃 (高地セット)	105ps/2400r.p.m.
燃 料 消 費 量	1.6~2.0l/km
最 小 旋 回 半 径	7000mm
全 長	5470mm
全 幅	2500mm
全 高	2660mm
重 量 (空車)	7400kg
積 載 量	500kg
車 両 総 重 量	7900kg
けん 引 力 (そり重量)	14t

4. 試験方法と測定器

4.1. 試験方法

雪上車の最大けん引力試験は南極の雪面においてどのくらいのけん引力を雪上車が持っているか、それによってどのくらいの編成そりをけん引可能であるかについて調べるために行なった。そこで雪上車の後部けん引フックに荷重計（けん引力測定範囲 $\pm 5t$ 、検出方法は抵抗線歪変換素子を使用）を取付け、荷重計の他端にワイヤロープを接続し、ワイヤロープはアンカー用として雪に埋まった金属そりに接続した。荷重計はけん引力に応じた歪量を電流として発生し、この出力を増幅器を通して記録計に接続した。けん引力は歪一荷重検定曲線から読取った。セットされた測定系で、雪上車を除々に前進させて張力を増加させると、ついには雪上車は自走しなくなり、それと共に張力は雪上車駆動力に比例して増加する。雪上車履帯が雪面のせん断力の限界の駆動力を越すと、ついには雪上車履帯は空回転する。記

録波形から駆動力，またはけん引力の最大値を最大けん引力，空回転している時の定常的なけん引力を運動時けん引力として読取り，(1)式よりそれぞれの抵抗係数を求めた．運動時のけん引力は雪上車車速を一定条件とし，その時の速度の平均値をタコグラフより読取り，それぞれ静止摩擦係数，動摩擦係数とした．試験場所の雪面の性質は硬度計（木下式落重硬度計）により雪面硬度を計量法により密度を測定した．けん引力試験は新雪面を選んで4回行なった．

編成そりの直進走行抵抗試験は，けん引重量 15.4t に編成したとき，車速，すなわちそりの走行速度を 3km/h, 5km/h, 7km/h とした時のけん引力の増加傾向を求める試験である．編成そりのけん引力は雪上車後部フックと第1けん引そりの間に荷重計を接続して測定した．速度の測定は 20m 区間を 8 区間設けて，区間通過を計時して平均速度を求めた．雪面の硬度，密度は，表面について一つの方法につき10点測定し，その平均値を求めた．

観測そりの直進走行抵抗試験は初め編成そりについて行なうはずであったが，定速旋回が不可能なため観測そりのみについて直進走行と旋回走行したときの抵抗力の比較をするために行なった．試験方法は編成そりの場合と同じであり，測定回数は4回にとどめた．旋回走行抵抗試験は旋回走行中雪上車の車速が一定になるように，計測区間では操向レバーを一定に引いて，雪上車タコグラフメータが一定速になったとき，合図により連続記録中の記録紙に記号を入れた．速度の測定は雪上車タコグラフの平均値を読取った．旋回終了後，外側軌跡の2点，すなわちクロスに測定し，平均値から旋回直径を求めた．

4.2. 測定装置

測定装置には，動歪測定装置 6 チャンネル，内蔵 DC 電源を主に使用し，現象周波数特性 0~1kHz，歪感度 $3\text{mA}/100 \times 10^{-6}\mu$ ，使用温度範囲 $80^{\circ}\text{C} \sim -25^{\circ}\text{C}$ でカタログ性能を保証されるように，部品の吟味，動作，特性検定を国内において実施しておいた．動荷重計は歪出力電流の低温特性について，および衝撃荷重，オーバロード荷重に対して信頼できるよう製作され，出発前に構成部品，材料に配慮し，製作後検定した．記録器は無現像記録紙型を使用し，これら全ての測定器は低温においても十分動作した．

5. 結 果 と 考 察

雪上車最大けん引力試験の結果を表3に示す．雪上車重量 7.9t として測定データを(1)式に代入してそれぞれの静摩擦係数 μ_s ，運動摩擦係数 μ_k を求めた．けん引力試験時の大気温度は -28°C ，雪表面温度 -28°C であった．硬度，密度の値は測定個所によりばらつきが

表 3 雪上車最大けん引力試験結果 (雪上車接地圧 0.19kg/cm²)

測定回数	最大けん引力 (kg)	運動時けん引力 (kg)	静摩擦係数 (μ_s)	運動摩擦係数 (μ_k)	雪質 (3カ所測定平均)	
					密度(g/cm ³)	硬度(kg/cm ²)
1	5,150	3,800	0.65	0.48	0.33	0.85
2	5,400	4,050	0.68	0.51	0.35	0.87
3	4,950	3,650	0.63	0.46	0.32	0.73
4	5,250	4,100	0.66	0.52	0.34	0.83

あり、クラストしている表面のみについて測定した。クラスト以外のドリフトでは測定位置によりかなり値がばらつくので測定をしなかった。試験した雪面には小さな起伏があり、接地面は必ずしも見かけの接触面積になっていない。けん引力は結局履板またはランナーと雪との摩擦機構に依存している。実際の接触している真実接触面積において、雪面は雪上車の重量により降伏応力 p を受けていて、このときの真実接触面積 A は $A=G/p$ 、これらの接触結合部のせん断に要する接線応力を τ とすると、結合部全体のせん断する力 $F_\tau=A\tau$ で、 F_τ は摩擦力 F である。真実接触面積は W および p で決まり、2面間の見かけの面積によらない。 A と F_τ は次のように示される。

$$F_\tau = \frac{G}{p} \tau. \quad (9)$$

(1)式に(9)式を代入して、摩擦係数 μ を求めると、

$$\mu = \frac{\tau}{p}. \quad (10)$$

ここで τ が実験によって定量的に分かれれば、けん引力試験以外からも μ が求められる。そして(1)、(10)式からも摩擦力は荷重に比例し、摩擦係数は荷重に関係しないことがわかる*。

2面間において荷重がとり除かれても依然として履板に雪の付着のある場合、せん断応力はその影響で高くなるので適用されない。そのランナー面はまれにこのよな状態になり、クローン則が全ての範囲で適応されるとはいえない。

図2に最大けん引力試験時の記録波形を示す。張力が作用すると記録波形はなめらかにけん引力が増加してゆくが、増加の途中において小さな波形の乱れが a 点、c 点、d 点、f 点

* Amontons の第2法則で広い実験範囲の下で成立する。雪の場合、せん断応力、荷重に対する降伏応力についての機械的性質については定量的な実験が少ないので求めにくい。

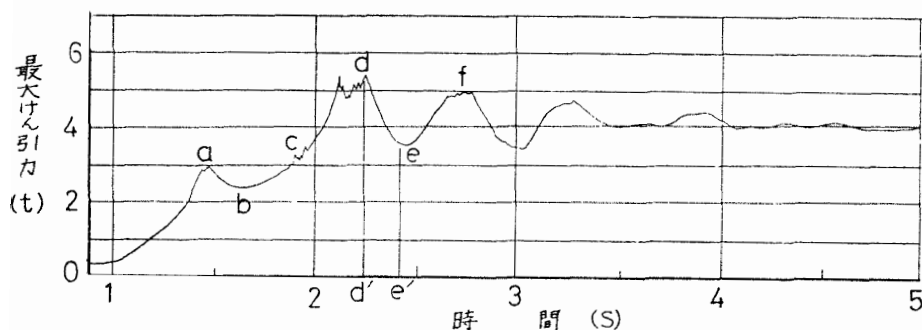


図 2 最大けん引力記録波形例

等に表われる．これは履帯と雪面の間で「付着—すべり」stick-slip の小さな挙動をしていると考えられる．この様な現象の間欠運動については次のように考えた．いま荷重 w で 2 面間が押しつけられているとすると，この 2 面間に働く力が静摩擦 $F_s = \mu_s w g$ に等しくなるまですべることなく運動するとき，雪面のたわみは時間に対して liner に たわみ，図 2 で $dd' = \mu_s w g / k$ ， k は弾性係数， d 点にくるとすべりが起こる．すべっているときの動摩擦を一定値 $\mu_k w g$ であるとする，面の運動方程式は，

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} - \mu_k w g = -kx. \quad (11)$$

運動はじめの瞬間 $t=0$ (B 点) におけるたわみは， $x = \mu_s w g / k$ ，前進速度 dx/dt は v に等しいとすると，

$$x = \frac{wg}{k} \{ (\mu_s - \mu_k) \cos \omega t + \mu_k \} + \frac{v}{\omega} \sin \omega t. \quad (12)$$

最後の項は前進速度がすべりの速度に比べて小さければ省略されて，

$$x = \frac{wg}{k} \{ (\mu_s - \mu_k) \cos \omega t + \mu_k \} \quad (13)$$

となり，すべりは停止し，再び同じ「付着—すべり」の間欠運動をする． c 点， d 点は履帯接触部の局所的な「付着—すべり」挙動であり d — e 点 は履帯接地部全体のすべり， e — f 点は同様な付着を示している．

雪上車のけん引力特性としては，発進時には静摩擦係数は高く，走行中は運動摩擦係数が小さいのが望まれるが，使用環境用途により異なる．即ちブルドーザーは走行速度は低いので，静摩擦は大きく，雪上車はある程度速度も早いので，運動摩擦を小さくするために，ブルドーザーの履板と形状が異なり，この点からも雪上車に大きなけん引力を負荷されるならば，ブルドーザーに似た構造の履板が要求される．この試験結果から雪上車は単車で走行す

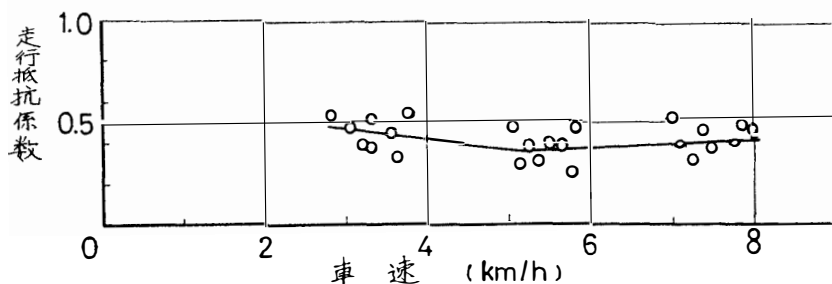


図3 編成そりのけん引直進走行抵抗

るよりはけん引車としての性質を備えているといえる。極地の雪質のようにクラストしている表面は日本国内では見当らず、硬度も高い。そのため運動摩擦係数が大きいそりが編成された場合、編成そりの走行抵抗が個々のそりの走行抵抗の和を考えると、この試験の結果から、編成そりの総合の走行抵抗が 0.48~0.52 まで雪上車はけん引可能であると云える。事実編成そりの試験結果とこのことは関係づけられた。

つぎに編成そりの走行抵抗試験についての結果を図3に示す。図3は車速—走行抵抗の関係で示してあり、走行抵抗値は測定記録した波形のけん引力の平均値を編成そりの積載荷重で割った値である。車速の低い 3.5~3.8km/h 付近は他の車速に比べて走行抵抗係数が大きい。この原因として考えられるのは、雪面の影響、走行抵抗係数と車速との関係であると思われる。雪面の影響については、雪面硬度、密度の変化、勾配など考えられるが、これは走行中ごく局部的なものであり、平均値として評価したので、影響は小さいと考えられる。走行抵抗係数と車速との関係について吟味すると、走行速度の早い領域ではそりランナーが雪面と接触している部分は見かけの面積に比して小さい。これは真実接触面積の局部的に作用する接触による降伏応力が高いと考えられる。このような状態においては、雪は融けやすくなり、さらにそりの運動によって摩擦熱が作用し、雪は融け、すべりやすくなることと、後続のそりは一度踏み固めた跡を通りその上を通過するための効果が働くからである。一方低速領域はランナー材料の熱伝導率にもよるが、運動摩擦熱と圧雪による融雪が作用しても走行抵抗係数に有利に作用せず、抵抗力は比較的に変らない。野外においてはブローイングフォースは速度に比例して増加する。図3では、このようなことから速度、ブローイングフォースおよび摩擦の様式によって走行抵抗が一時下がる傾向が見られたと考えられる。

図4に編成そりのけん引時の記録波形を示す。シャープな変動は周期性を持っていて、その変化は 12~15 Hz で、車速 7.3km/h でもこの範囲に含まれ、雪面の間欠運動の動特性と

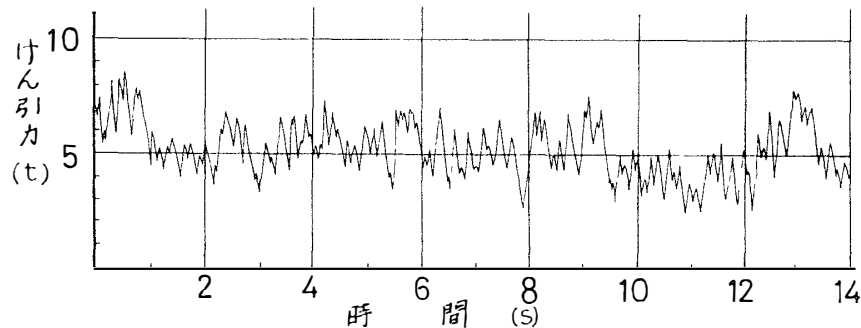


図4 編成そりのけん引力記録の一例 (車速 7.3km/h)

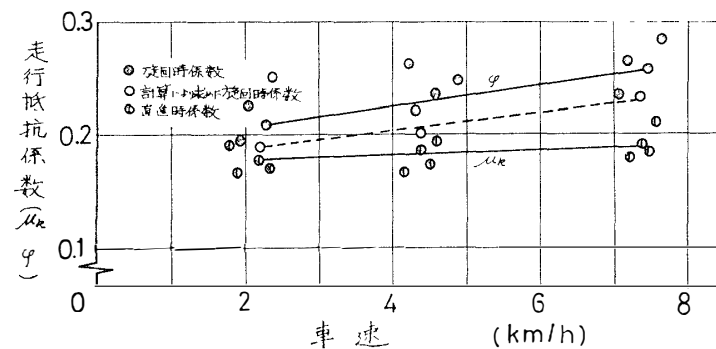


図5 観測カブースそりの比較抵抗試験

考えられる。試験した雪面の平均密度分布は $0.33 \sim 0.38$ ，平均硬度分布 $0.78 \sim 0.82 \text{ kg/cm}^2$ であった。

観測カブースそりのみの直進時と旋回時の走行抵抗を比較した結果を図5に示す。旋回試験終了後，その軌跡の外側2点，クロスに測定した平均の旋回直径は 42.5 m ，2回目は 38.8 m であった。図5の点線は直進走行抵抗試験で求めた μ_k と φ とを用いて旋回抵抗モーメント，遠心力を計算で求めた値を，雪上車重量との関係から抵抗係数に換算して求めプロットした。慣性力の運動はそりの旋回が多角形運動のため，角加速度等の測定が困難であり求められない。計算で求めた走行抵抗係数と実測の走行抵抗の差は力に換算して $200 \sim 300 \text{ kg}$ であった。この差が旋回による慣性力，外部外乱因子とすると，実測のけん引力の $10 \sim 15\%$ は慣性力と外乱因子に相当している。

6. む す び

KD60 型雪上車による最大けん引力は，クラストしている極地の雪面では $5.0 \sim 5.5 \text{ t}$ ，静

摩擦係数 $\mu_s = 0.63 \sim 0.68$, また雪上車の運動摩擦係数は車速 3 km/h で 0.48~0.52 と高い粘着力を持っていた. 編成そりのけん引重量 15.4t(この結果は国内での値より10%多い)は雪上車のけん引力の限界で, 旋回動作には余裕がなく, 小さなドリフトにも走行を阻止された. 低温におけるけん引力は結局ランナーと雪表面の摩擦機構についての問題であり, プローウィング低抗摩擦等影響を及ぼす因子があるが, その原因の実態は野外試験では求められず, 実験室のデータ蓄積が必要と思われる. ランナー材料の影響も著しいと考えられるが, ランナー材料と雪の付着性は挙動的にも明らかでない. そりの旋回性を向上させるためには L/B (そりの接地長 L , ランナー中心距離 B) の比を適切に選ぶことにより旋回抵抗モーメントを小さくすることが可能であり旋回性は向上する.

編成そりに積荷重量を分布させてけん引する方式と, 積荷重量を1台のそりに載せけん引する方式は, 後者の方が運動的によいが, これは雪質の変化に敏感に作用する. これに反し前者は雪質の変化に鈍感であり, 踏破性は良い. 雪質や路面の状態によって編成そりの走行抵抗は増加するが, 走行抵抗の増加の因子は, むしろプローウィングフォースの軽減にかかっているといえる.

最後にこの試験にあたって, 種々の配慮と助力をいただいた第9次越冬隊長村山雅美氏に感謝の意を表する.

文 献

BOWDEN, F. P. and D. TABOR (1954): The Friction and Lubrication of Solids, Oxford.

藤岡敏夫 (1958): 雪橇の抵抗Ⅳ. 低温科学, 物理篇, 17, 31-51.

下田 茂 (1952): 車輪駆動式雪上自動車について (第一報). 新潟大学工学部研究報告, No. 1, 135-140.

(1969年12月6日受理)