

36. 雪上トラクタの走行性能について

愛媛大学 室 達 朗

1. まえがき

履带式雪上車のけん引性能を評価するためには、まず積雪の動カ学的挙動として圧縮およびせん断変形特性について解析し、その後、積雪面上を走行する雪上車の運動機構、車輛の構造特性と積雪の力学特性との相互作用から最大けん引力を算定する必要がある。まず、雪上車の沈下にもなう積雪の圧縮変形エネルギーと積雪の構造特性との関係を明らかにすることを目的として、種々の新雪および硬化雪について矩形板載荷試験を行った。試験温度は -13°C であり、 $7.6\text{ cm} \times 7.6\text{ cm}$ の矩形板を使用し、載荷速度 3.7 mm/sec のひずみ制御型として試作した試験機を使用した。つぎに、履帯下の雪のせん断強度と変形特性を明らかにすることを目的として、種々の新雪および硬化雪について現地試験用として開発したベンコンによる貫入試験とせん断試験を行った。すなわち、頂角 30° 、高さ 36.5 mm と 69.9 mm の2種類のベンコンを使用し、貫入速度 3.7 mm/sec 、せん断速度 1.89 mm/sec と 3.49 mm/sec においてベンコンに作用するロードとトルクを計測し、雪のせん断変形特性を明らかにした。

つぎに、雪上車の通過によって攪乱されていない新雪および硬化雪で構成された積雪面上を気温 -13°C で走行するたわみ性履帯を有する履带式雪上車のけん引性能を算定するために、雪上車の積雪面走行時の運動についてエネルギー解析を行った。すなわち、エンジンからの入力エネルギー、足回り部分の沈下と履帯のスリップによる雪の変形などによるエネルギー損失、およびけん引による仕事エネルギーとの間に成り立つエネルギー平衡方程式を組み立て、けん引力とスリップ率との関係を求めた。さて、これらのエネルギー解析の結果より、種々の積雪深度を有する場合から積雪深度無限大に至る積雪面上を走行する雪上トラクタの履帯の沈下量を冷凍室で実施した矩形板載荷試験から推定し、鉛直方向のそれぞれの圧縮変形エネルギーを算定するとともに、ベンコンによるせん断試験からえられる応力変位曲線より雪のせん断変形エネルギーし、ある実車の一例として、自重が 3630 kg の小型雪上車を選定し、新鮮な降雪直後の雪、粒状体の新雪および硬化雪で構成された種々の積雪面上のけん引力特性について理論的に算定した結果について述べる。

2. 積雪の矩形板載荷試験¹⁾

6種類の雪試料 A・B・…・F を実験に使用した。すべての雪試料は、天然の降雪より冬期外気温 0°C 以下で採取した。試料雪 A, B, D, F は -13°C の冷凍室にしばらく保管した後、粉砕機により人工的に粉砕して粒度を調整した人工粉状雪である。また、試料雪 C と E は新鮮な降雪であり、降雪後ただちに冷凍室に搬入し試験に供した。平均粒径は $0.43 \sim 0.60\text{ mm}$ 、均等係数は $1.32 \sim 1.92$ であった。これらの試料は、すべて口径 2 mm のふるいを使用し、一定の落下高 13 cm よりふるい分けて内容積が $7.6\text{ cm} \times 45.7\text{ cm} \times 27.4\text{ cm}$ の透明なブ

ラスチックの箱に充てんし試験に供した。写真1に実験装置を示す。枠組中央に、昇降速度 $3.70 \sim 74.08 \text{ mm/sec}$ のテーブルがあり、その上に試料箱が設置されている。また、枠組上部には試作した回転可能なロードセルとトルクセルを設置し、矩形板の載荷試験およびベンコーンによる貫入およびせん断試験に使用した。載荷板の形状・寸法は、 $7.6 \text{ cm} \times 7.6 \text{ cm}$ の正方形板を選定し、また、載荷速度はひずみ制御とし、すべて一定速度 3.7 mm/sec で行った。図-1および図-2は、それぞれ新雪および硬化雪に対する矩形板の貫入抵抗と貫入深さとの関係を示したものである。新雪においては、いずれも貫入抵抗は初期圧縮過程において弾性的挙動を示しており、貫入深さがある値に達すると増加勾配が減少し塑性降伏してくる。また、貫入抵抗は断続的なこぎり波形を示しているが、雪の圧縮変形領域が雪試料箱の底辺に達すると、貫入抵抗は図に示したように急激な増加現象を呈した後破壊



写真1 冷凍室内の実験装置

によって減少する突起現象を呈し、その後急激な増加を示してくる特性がみられた。本実験においては完全な拘束状態ではないが、この突起現象を呈する矩形板の貫入深さに対して雪の密度はすべて臨界密度に達したと判定できる。一方、硬化雪の初期圧縮過程で顕著な弾性的挙動を示しており、その後貫入量がある値に達すると塑性的挙動を示してくる。また、鉛直方向のすべり面上でのせん断強度もかなり大きく塑性域に達してからも貫入抵抗は放物線的に増大していく。

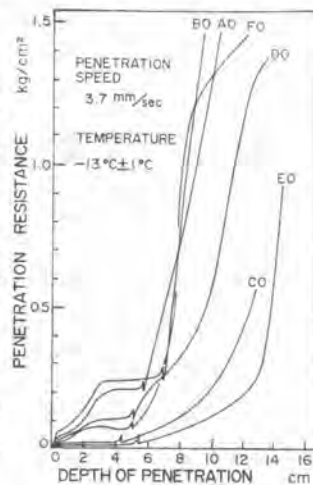


図1 新雪に対する矩形板載荷試験

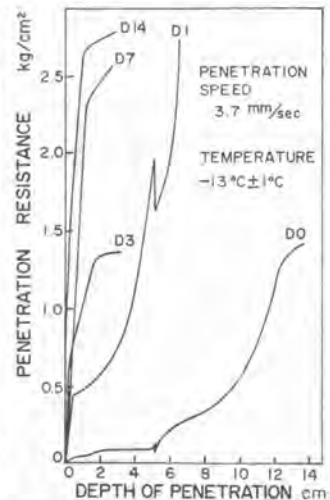


図2 硬化雪に対する矩形板載荷試験

3. 積雪のベンコーン試験²⁾

ベンコーンの貫入速度は 3.7 mm/sec 、回転速度は 1.75 r.p.m. として実験に供した。まず、矩形板による載荷試験終了後、矩形板をとりはずしベンコーンを新しく設置して貫入試験を行い貫入抵抗と貫入深さとの関係を求めた。図-3は、雪箱にゆるく堆積させた初期密度の異なる種々の新雪および硬化雪に対するベンコーンの貫入試験の結果である。一般に、コーン指数はベンコーンが試料雪の中に完全に貫入するまで貫入深さとともに増加するが、さらに貫入させると降伏点に達しその後はほぼ一定の残留強度を示している。また、せん断変形特性は剛塑性体挙動を示しせん断応力 τ と変形量 X の間には $\tau = \tau_0 \exp(-2X)$ なる関係が成立した。またベンコーンによるせん断試験はすべて雪の正規圧縮領域で実施できるのでせん断応力 τ と垂

垂直応力 σ の関係は、図-4に示したようにクーロンの破壊基準式 $\tau = c + \sigma \tan \varphi$ が成立することが明らかとなった。

4. 積雪面走行時のエネルギー解析³⁾

一般に、雪上トラクターの走行時のエネルギー平衡方程式は次式で表現することができる。

$$E_1 = E_2 + E_3 + E_4 + E_5 + E_6 \quad (1)$$

ここに、 E_1 は、雪上トラクターの移動走行時の有効な入力エネルギーであり、所定のエンジン定格出力からギヤ-マスプロケット部分の摩擦による機械的なエネルギー損失部分を差引いたものとして与えられる。さて、履板が雪上トラクター本体に対して1トラック長 D 相対移動したときの入力エネルギー E_1 は $s D T_1$ で与えられる。 E_2 は、鉛直方向の雪の圧縮変形エネルギーとして $E_2 = s T_2 D (1-s)$ で与えられる。雪上トラクターの走行による積雪面の圧縮沈下による締固めエネルギー損失として矩形板の載荷試験の結果より算定することができる。図-5は、雪上トラクターの1トラックに作用する諸力 $T_1 \sim T_6$ を表わし、スリップ率 S は、雪上トラクターの走行速度 V とトラックリングの移動速度 V' の比より $S = 1 - V/V'$ で与えられる。

つぎに、 E_3 は履帯と積雪面との間のスリップによって発生する雪のせん断変形エネルギー損失として、ベンコンによるせん断試験の結果より算定することができる。

スリップエネルギー E_3 と積雪面のせん引抵抗力 T_3 との関係は $E_3 = 2 T_3 S D$ で与えられる。 E_4 は雪上車のけん引仕事エネルギーとして $E_4 = 2 T_4 (1-s) D$ で与えられる。つぎに、 E_5 は履帯上部の側面摩擦エネルギーであり雪上トラクターの移動走行にともなってトラクター本体に付着した雪と自然積雪との間に発生する側面摩擦

抵抗力 T_5 による摩擦エネルギー損失のことである。一方、 E_6 は雪上トラクターの移動走行にともなって履帯とシューグローサとの間に圧雪締固められた雪と自然積雪との間に発生する側面摩擦抵抗力 T_6 による摩擦エネルギー損失のことである。これらのエネルギー解析を行った結果、けん引力 T_4 とスリップ率 S との間に次式が成立することが明らかとなった。

$$T_4 = \frac{1}{1-S} T_1 - \frac{S}{1-S} (T_3 + T_6) - (T_2 + T_5) \quad (2)$$

5. 履带式雪上車のけん引性能⁴⁾

積雪深度が無限大の場合と有限の場合について冷凍室で行った矩形板載荷試験の結果から雪上トラクターの履帯の沈下量およびトラクターを支持する積雪の鉛直方向の変形エネルギー

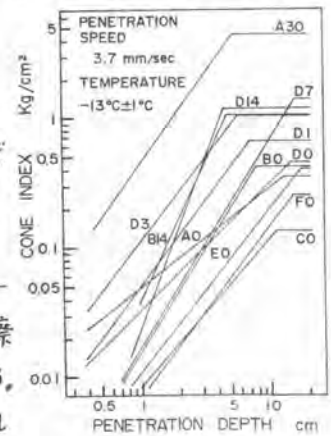


図3 ゆるく堆積した新雪および硬化雪に対するベンコン貫入試験の結果

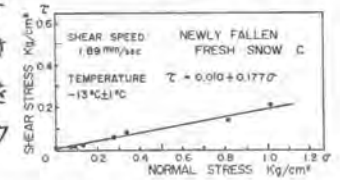


図4 ベンコンによるせん断試験結果の一例

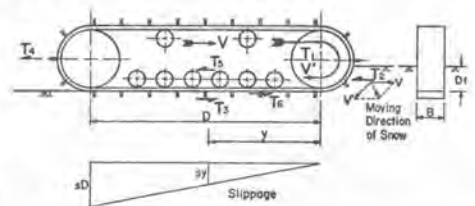


図5 雪上トラクターの1トラックに作用する諸力

を算定することができる。図6はここ一例として選定した小型雪上車の諸元を示したものである。この雪上トラクターのけん引力とスリップ率の関係は、前述のエネルギー方程式より式(2)を用いて算定することができる。図7は12種類の新雪および降雪直後の雪、粒状体の新雪および硬化雪が、積雪深度27.4 cmで堆積した積雪面上を走行する場合のスリップ率によるけん引力の変化を算定した結果である。この場合、トラクターの平均最大接雪圧は平均接雪圧の4倍として0.346 kg/cm²で与えられるので、すべての新鮮な降雪直後の雪と粒状体の新雪に対しては履帯下の雪の密度はそれぞれの雪の臨界密度を越えていることが判明した。そのため、鉛直方向の履帯下の雪の圧縮変形エネルギー損失はかなり大きくなるが、積雪のけん引抵抗力は締固めにより十分増加している。したがって、雪上車のけん引力は、これを積雪面のけん引抵抗力から算定するとスリップ率0において最大値をもちスリップ率の増加とともに減少することが判明した。そのため、実際のエンジン出力から算定される履帯の有効張力が積雪面の最大けん引力を越えない限り、雪上車はスリップすることなく、そのけん引力は履帯の有効張力から算定することができる。図8は、一例として、積雪深度121.9 cmと無限大の種々の雪で構成された積雪面上を走行する雪上トラクターのけん引力と圧縮変形エネルギー損失量との関係を示したものである。図より明らかに、すべての雪の種類および積雪深度に対して雪上トラクターのけん引力は圧縮変形エネルギー損失量に比例して減少していきことが判明した。

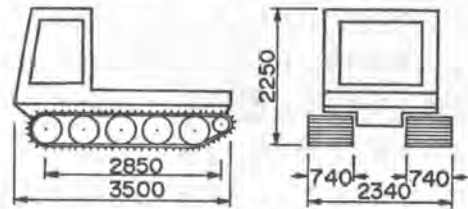


図6 小型雪上車の諸元

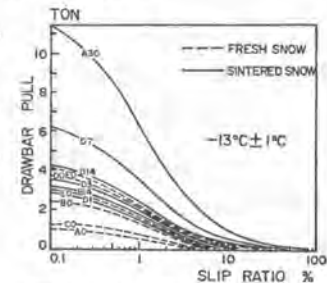


図7 種々の積雪面上の履带式雪上車のけん引力とスリップ率の関係

6. あとがき

-13°Cの低温において種々の新雪および硬化雪で構成された積雪面上を走行する履带式雪上車のけん引性能について、積雪の矩形板載荷試験およびベンコンセン断試験の結果に基づいて、積雪面走行時のエネルギー解析を行った。その結果、履带式雪上車のエンジン馬力が比較的小さい場合には、一般にスリップすることなく、いかなる積雪深度に対してもそのけん引力 D.B.P. は履帯下の積雪の単位面積当たりの圧縮変形エネルギー E_n の増大とともに減少し、 $D.B.P. = T - 2BE_n$ (T :履帯の最大有効張力、 B :履帯幅)で与えられることが判明した。

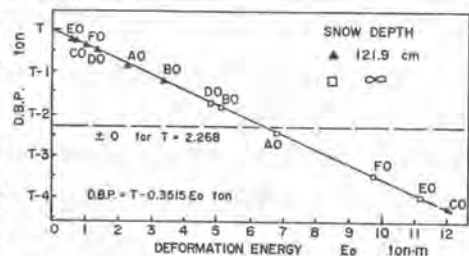


図8 積雪深度121.9 cmおよび無限大の新雪積雪面上を走行する履带式雪上車のけん引力と積雪の圧縮変形エネルギーとの関係 (T は履帯の最大有効張力)

7. 参考文献

- 1) 室達朗他, 1980: 積雪の矩形板載荷試験, 雪氷42, 1, 17-24.
- 2) 室達朗他, 1980: 積雪のベンコン試験, 雪氷42, 1, 25-32.
- 3) 室達朗他, 1980: 履带式雪上車の走行性, 雪氷42, 2, 93-100.
- 4) 室達朗他, 1980: 履带式雪上車のけん引性能, 雪氷42, 2, 101-108.