

雪氷路面上でのスキッドの機構に 関する一考察

北大五学部 正員 加来 照俊

北大大学院 学生員 ○指保 茂樹

北大大学院 学生員 西尾 優

1. まえがき

積雪寒冷地に於ける冬期の交通事故のうち、雪氷路面上でのスキッドを起すことによつての交通事故は、夏期に起こり得ないような要素を含んでおり、また件数少なく毎年尊い人命が失なわれている。

この雪氷路面でのスキッドに対する研究は、著者らの研究室でも数年来行なわれ、例年すべり試験車等による野外実験も行なわれている。関係各方面で雪氷路面上でのすべり抵抗、制動時の不規則施回運動、またこれらをもとにして道路線形等の研究が成されているが、この論文では緊急事態発生時の急制動の機構について、すなわち急制動を圧雪路面上・氷結路面上の二つに大別して、圧雪路面上では（あまり氷の存在しない路面）スノーシューのタイヤと路面、また氷結路面上ではスノーシューのタイヤにスパイクを打ち込んだタイヤと路面間に働く力について考え、その機構を解明しようとするものである。

2. 圧雪路面上でのスキッド³⁾

積雪寒冷地では冬期になると雪が降り、その路面の雪は通過交通により踏み固められ、最初密度が 0.1 g/cm^3 以下であったものが踏み固められて圧雪となると、その密度は 0.6 g/cm^3 程度までに至る。このような路面上を走行している車両は危険物を発見すると急制動して停止する。ここでは、急制動時から停止するまでの現象をエネルギーと仕事、そして運動方程式より説明する。

車両が制動直前に持っていたエネルギーは、車両が圧雪に成した仕事に消費されると考えると、

$$E = W$$

E : 制動直前の車両のエネルギー

W : 車両が圧雪に成した仕事

車両が圧雪に成した仕事 (W) を車両のタイヤが圧雪を圧縮して断続的破壊する仕事 (W_1) と、その圧縮断続的破壊を受けた後の跡 (溝) とタイヤの摩擦 (W_2) とすると、

$$W = W_1 + W_2$$

また、圧雪を圧縮断続的破壊するのに要する力 (P) と、タイヤと溝との摩擦係数 (μ) を用いて運動方程式を表めると、

$$m \frac{d^2x}{dt^2} + P + \mu mg = 0$$

m : 車両質量

x : 制動直後からある時間 (t) までの距離

g : 重力加速度

(風の抗力の影響は無視)

P が x によって変わるとすると $P = P(x)$ で、

$$W_1 = \int_0^x P(x) dx$$

また、 μ も x によって変わるとすると $\mu = \mu(x)$ で、

$$W_2 = \int_0^x \mu(x) \cdot mg \cdot dx$$

である。運動方程式は、

$$m \frac{d^2x}{dt^2} + P(x) + \mu(x) \cdot mg = 0$$

となり、ここで

$$\bar{P} = \frac{1}{x} \int_0^x P(x) dx, \quad \bar{\mu} = \frac{1}{x} \int_0^x \mu(x) dx$$

を上式に代入すると、(制動直前の車両のエネルギーを速度エネルギーとする)

$$E = \frac{1}{2} m V^2 = \bar{P} \cdot L + \bar{\mu} m g \cdot L$$

L: 停止距離
V: 制動初速度

著者は圧雪路面上で急制動した車両の減速度を調べるために次の実験を行なった。減速度計を小型乗用車の前部座席と後部座席の間の床に固定し、制動初速度を40 km/hとし、そのときの停止距離と減速度を測定した。なお試験コースは北大構内で路面状態は著者が見る限りでは、十分踏み固められていて、道内の国道程度の道路とはほぼ同様の圧雪路面状態であった。

次にその結果の一部を示す。10数回行なった実験から得られた減速度は、すべて図2-2のような値となり、同様の曲線を描いている。この図からわかるように、 $t=0.3$ sec 付近で減速度は最大になるが、それ以後減速度はあまり変化しないで停止に至る。このことより減速度はほぼ一定であると仮定する。

次に圧縮セン断的破壊をされた直後の雪面の摩擦係数を調べるために、前記の小型乗用車を用いその値を測定した。その時の制動初速度は $V=40$ km/h で、停止距離は $L=11.80$ m であった。先に減速度が一定である傾向を示したが、摩擦係数も一定であるとする。

$$m \frac{dv}{dt} + P + \mu mg = 0$$

であるから、 $P = \text{const.}$ である。それ故、

$$\frac{1}{2} m V^2 = \bar{P} L + \bar{\mu} m g L$$

となる。

車重と乗車人員1名とで $W=1100$ kg とし、その時の P と μ との関係を表わせば

$$P = -1100 \mu + 587$$

となる。更に、圧縮セン断的破壊をされた直後の圧雪路面上の摩擦係数をポータブル・テスターで測定した。その値は約 $\mu=0.3$ であった。もしこの値が車両と圧雪路面間の摩擦係数と仮定できるならば、 P の値は図2-3より推定できる。すなわち、 $\mu=0.3$ の場合、 $P=257$ kg と推定できた。

3. 氷結路面上でのスキッド

圧雪路面上でのスキッドに述べてある路面状態が更に進行したり、日中気温が上がって雪が融け、夜になり気温が下がると路面は氷状となる。ここでは、この氷結路面上で急制動して停止に至るまでの現象を、エネルギーと仕事、そして運動方程式により説明する。

図2-1 制動中の車両に働く力

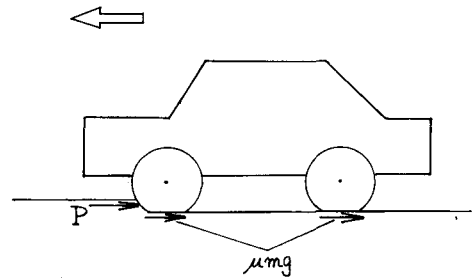


図2-2 減速度αと時間tとの関係図

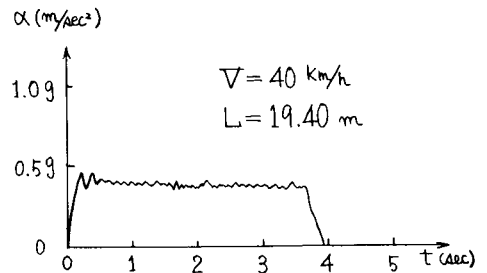
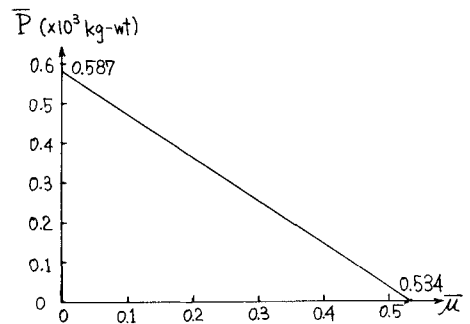


図2-3 $\bar{\mu}$ と $\bar{P}$ の関係



圧雪路面上でのスキッドと同様に、車両が制動直前に持っていたエネルギー（ E ）が、氷を破壊する（ひっかく）仕事（ W_1 ）とタイヤと氷結路面との摩擦（ W_2 ）に消費されると考えると、

$$E = W_1 + W_2$$

また、スパイクが氷をひっかく力（ P ）と、タイヤと氷結路面との摩擦係数（ μ ）を用いると、車両の制動に対する運動方程式は、

$$m \frac{d^2x}{dt^2} + P + \mu mg = 0$$

で表わされる。

次に著者らの研究室で行なわれた実験からの摩擦係数（ μ ）について述べる。1969年3月苫小牧市郊外のウトナイ湖に氷上コースを設けて研究室のすべり抵抗試験車及び実車による実験が行なわれた。実車については、初速度20, 30, 40, 50 Km/hから制動して停止距離を測定した。その結果の一部を次に表で示す。

表3-1の中の試験車Aと試験車Dについて考えると、

A車とD車は同メーカー同モデルの排気量1500ccと1600ccの車であり、A車は4輪スノータイヤ装着で、D車は4輪スパイク装着である。このA車について、制動前のエネルギー（ E ）と、制動から停止に至るまでに成された仕事（ W ）を表わすと、

$$W_1 = 0, \quad W_2 = \bar{\mu} mgL$$

ただし、 $\bar{\mu} = \frac{1}{L} \int_0^L \mu(x) dx$ ($\mu = \mu(x)$)

制動前のエネルギーを速度によるものとする、

$$E = \frac{1}{2} mV^2$$

よって、

$$\frac{1}{2} mV^2 = \bar{\mu} mgL$$

$$\bar{\mu} = \frac{V^2}{2gL}$$

表3-3は上式より計算されたものである。

測定誤差などの影響を考慮すると、 μ は一定であると考えられる。それ故に、

$$\bar{\mu} = \mu = \text{const.} \doteq 0.1$$

A車とD車との試験コースの状態は、ほぼ同一と考えられ、又D車の装着しているスパイクタイヤは、スノーテザインのタイヤにスパイクを打ち込んだものであるから、D車の実験時に於ける摩擦係数も一定であると考えられる。

D車の停止距離は、A車のその約半分であるが、この違

いは明らかにA車のタイヤがスノーテザインであるのに対して、D車のタイヤがスパイクであるためである。このスパイクが氷を破壊する仕事を P として、D車の制動から停止に至るまでの運動は、

$$m \frac{d^2x}{dt^2} + P + \mu mg = 0$$

で表わされる。

上式の $\frac{d^2x}{dt^2}$ に関して、1969年1～2月に北海道と北海道警察によって主催された実験の報告は、図3-1の様な氷上の制動に関する時間-距離曲線載せている。この曲線をその2次関数と仮定し、最小二乗法で処理すると、相関係数 R が $R = 0.97$ と高い値を示す。

試験車	前輪タイヤ	後輪タイヤ
A	スノーテザイン	スノーテザイン
B	スノーテザイン	スパイク
C	スパイク	スノーテザイン
D	スパイク	スパイク
E	チェーン	チェーン

表3-1 試験車タイヤの種類

試験車	停止距離 (m)			
	制動初速度 (Km/h)			
	20 Km/h	30	40	50
A	17m	36	64	—
B	14	29	50	75
C	9	25	44	67
D	8	18	30	—
E	7	25	46	—

表3-2 各試験車の実験結果¹⁾

V	20 Km/h	30	40
$\bar{\mu}$	0.093	0.098	0.098

表3-3 A車についての計算結果

それ故、この曲線を $L = -at^2 + bt$ に近似して、時間 t を微分すると、

$$V(t) = \frac{dx}{dt} = -2at + b$$

$$a(t) = \frac{d}{dt} V(t) = \frac{d^2x}{dt^2} = -2a = \text{const.}$$

である。

減速度 $\frac{dv}{dt}$ が一定で、摩擦係数 μ も一定なので、スパイクが氷を破壊する力 P も一定となる。この P と μ とを用いて、制動直前のエネルギーと制動から停止に至るまでの仕事の釣合を表わすと、

$$\frac{1}{2} m V^2 = \bar{P} \cdot L + \mu m g L$$

先のD車のスパイクにかかる力を上式より試算すると表3-4の様になる。表中の $V=40$ km/h の $\bar{P}$ が $V=20, 30$ km/h の $\bar{P}=97$ kg-wt の値を10%程上まわっているのは、風・抗力による影響と考えられる。また、測定値のバラツキから生じたものとも思われる。

次にスパイクの配置を考え、車面が制動後停止する横すべりをしないで、最初の進行方向を保つものとし、又前輪の最初の4本のみが氷をひかき、そのひかいた跡を残りのスパイクが通る時には、氷をひかかないとすれば、前輪2本のタイヤの8本のスパイクに $\bar{P}$ の力がかかるわけである。これを1本のスパイク当りの力にすると、約12 kg-wt の力になる。

以上の結果より氷結路面上での制動直前の速度エネルギーは、タイヤのゴム部分と氷結路面との摩擦の仕事に50%、スパイクが氷をひかく仕事に50%消費される。また、 $W=1000$ kg-wt の車面(小型乗用車)の位置と速度を、時間 t によって表わすと、図3-2、図3-3の様になる。

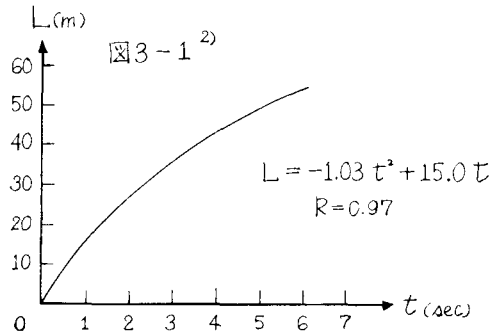
4. あとがき

以上、圧雪・氷結路面上でのスキッドの機構について述べてみたが、これからの研究方向としては、雪質とスキッドの関係についてアプローチしていくつもりである。なお、御協力頂いた、北海道工業大学の堀内先生、並びに北大低温研究所の対馬助手に厚く感謝致します。また本研究は文部省科学研究費によって行なわれたものである。

5. 参考文献

- 1). 氷結路面における車両運動と道路線形の一考察
- 2). 冬期安全運転技術研究実験報告
- 3). スキーの研究

加来 照俊 土木学会論文報告集第198号
北海道, 北海道警察本部
藤岡 敏夫 低温科学-物理篇-第16号



V (km/h)	20	30	40
$\bar{P}$ (kg-wt)	97	97	110

表3-4 D車のスパイクにかかる力

