

北海道大学工学部 正員 板倉 忠三

北海道大学工学部 正員 加来 照俊

現在、積雪地の道路設計の場合でも現行道路構造令によって線形設計をおこなっているが、積雪地での特殊条件である雪氷路面を考えると多少検討を要するところもあるように思われる。従って雪氷路面、特に氷結路面を対象とし、加えて車の運動の安定性の面から道路線形設計について、三の考察を試みた。そのうちのいくつかを報告する。

1. トラックが登坂できる縦断勾配

氷結路面を車が走行する場合、その車が発揮し得る最大けん引力は、機関の駆動力が十分であっても路面とタイヤ間の付着力係数（最大摩擦係数）と車輛重量に関係する。車がスリップしないためには(1)式の関係を満足しなければならない。この関係から車の登坂可能な最急縦断勾配を算出するので

$$P = \mu W_r \geq F > R \quad (1)$$

ここで P : タイヤと路面間で発揮できる付着力

μ : 最大摩擦係数

W_r : 駆動輪に加わる重量

R : 走行抵抗

$$j = F_t/W - \mu_r - k A v^2/W \quad (2)$$

ここで j : 登坂可能最急勾配

F_t : 車のけん引力

μ_r : ころがり抵抗係数

k : 空気抵抗係数

表1の最急勾配は表にある車種の他の国産6.5t積トラック4車種を合せて算定した値を求めたものである。ここで問題となるのは氷結路面の摩擦係数であるが、報告者らが苫小牧ウツナイ湖で S.F.C. 測定車および British Portable Tester で測定した値は0.05～0.1の間にあった。またこれらの値は速度には殆んど関係がないので(1)式の P を算出する際に摩擦係数を速度にかかわらず一定とした。なお現在の国産トラックがその有する最大けん引力を発揮できるのは摩擦係数が約0.4以上な

あるが、それには(2)式で計算する方法と、図式におこなうのと二通りある。ここでは図式によるもの、すなわち車の性能曲線を利用する方法でおこなった。この方法は車の走行性能曲線を手で引きければ簡単に登坂可能な縦断勾配を求めることができる。すなわち車の走行性能曲線に(1)で求めた P を走行抵抗と考えて重ね合わせれば良い。算定の結果を表1に、また算出法一例を図1に示す。

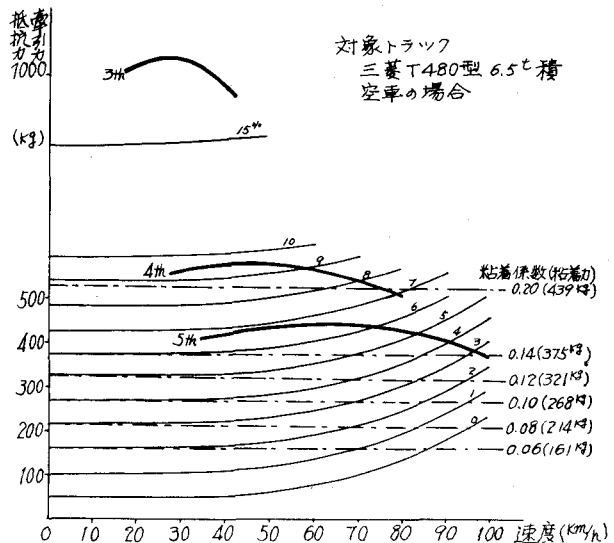


図-1 車の性能曲線から縦断勾配の算出法

ければなら
ないようで
ある。

速度 (km/h)	0.14		0.12		0.10		0.08		0.06	
	ヤ	1480	ヤ	1480	ヤ	1480	ヤ	1480	ヤ	1480
100	▽	2.5	▽	1.4	▽	0.5	▽	0.6	▽	0
90	▽	3.5	▽	2.5	▽	1.6	▽	1.3	▽	0.5
80	▽	4.3	▽	3.0	▽	2.4	▽	2.0	▽	1.0
70	▽	4.9	▽	4.0	▽	3.0	▽	2.5	▽	1.5
60	▽	5.3	▽	4.5	▽	3.4	▽	2.8	▽	1.8
50	▽	5.6	▽	4.5	▽	3.7	▽	3.0	▽	2.0
40	▽	5.8	▽	5.0	▽	4.0	▽	3.3	▽	2.2
30	▽	5.9	▽	5.5	▽	4.0	▽	3.0	▽	2.0
20	▽	6.0	▽	5.5	▽	4.0	▽	3.0	▽	2.0
10	▽	6.0	▽	5.5	▽	4.0	▽	3.0	▽	2.0
0	▽	6.0	▽	5.5	▽	4.0	▽	3.0	▽	2.0

表-1 トラックの登坂をさる縦断勾配

2. 降坂時制動停止距離

氷結路面上では車の制動停止距離が大きな問題となるが、ここでは特に降坂時の車の制動停止距離を考へてみた。制動停止距離は従来(3)式で算定されているが、この式を用いると、殆んど倒れないのであるが $f = -l$ の時に S が無限大となり不合理が生じてくる。従つてここでは(4)式を用いて降坂時制動距離を求めてみた。

$$S = v^2 / 2g(f+l) \quad (3)$$

S : 制動停止距離

v : 初速度

f : 縦すべり摩擦係数

l : 勾配(下りを負)

$$S = \frac{(1+\varepsilon)W}{g \cdot k \cdot A} \cdot \log_e \sqrt{1 + \left(\frac{v}{c}\right)^2} \quad (4)$$

$$c = \sqrt{(f+l+\mu_r)W/k \cdot A}$$

ε : $\frac{\text{車の回転部加速抵抗}}{\text{車体の加速抵抗}}$

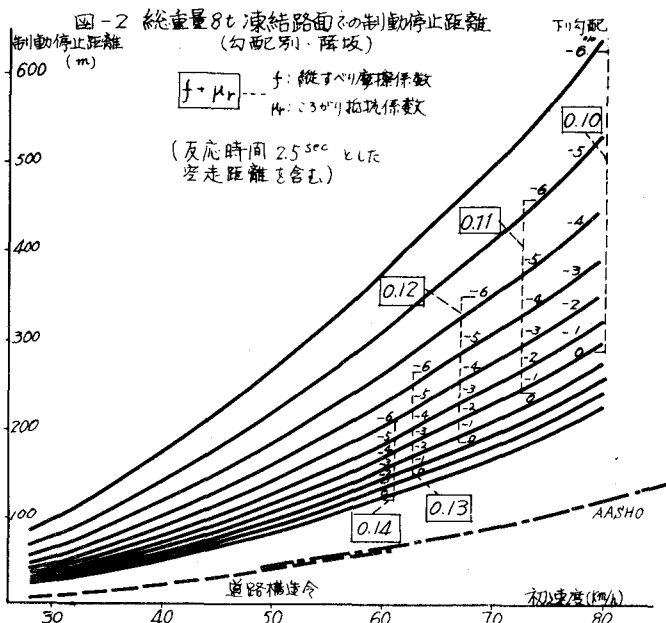
W : 車輛総重量 (Kg)

k : 空気抵抗係数

A : 車の前面投影面積 (m^2)

μ_r : ころがり抵抗係数

S, v, f, l : (3)に同じ



計算は現行道路構造令に採用されている総重量8t車について、 $f + \mu_r = 0.10 \sim 0.14$ までの $l = 0 \sim -6$ %についておこなった。これを図2および表2に示す。なおこの図2と表2の制動停止距離は(4)式に反応時間を2.5秒としてその間に走行する距離 $S = 2.5v$ を加えたものである。参考のため図中に現行道路構造令に採用されている視距を示した。なお道路構造令の場合 $f = 0.3$ を採用しているののでこの点からも今回の計算とはかなり差が生じている。以上の降坂時制動停止距離と1.の縦断勾配の値から氷結路面上の縦断勾配に対する検討が可能であろう。また曲線との組合せについては現在検討中である。

3. 曲線半径

道路の曲線半径は従来、曲線部を車が走行できるように遠心力と横すべり摩擦力の釣合を考えて求めているが、今回車の安定性と操縦性の面から曲線半径を検討してみた。それは車が曲線走行をする場合、タイヤはある横すべり角をもって走行する。このときタイヤに働く力を図3に、図4に高速旋回運動の車に働く水平方向の力を示す。車が曲線走行中に遠心力に対抗し、また車の上下軸のモーメントに対抗するにはコーナリングフォースCが大きい程安定である。この力は横すべり角によって変化し、通常の乾燥路面では横すべり角が10°付近で最大値に達しその後は一定となる。コーナリングフォースは車輪1ヶについてこの最大値を越えることができない。従ってその車の車輪の総数より発揮される総コーナリングフォースとなり、この力がその車の最大コーナリングフォースであり、この力がその車の曲線運動を制限する。この力が最大値となる横すべり角以下で車が走行すれば安全に曲線走行ができると考えたものである。この場合の計算式は次のようになる。

図4から車に働く遠心力と求心力との釣合および上下軸のまわりのモーメントの釣合から v と r を与えた場合以下の各式で与えられる。

$$\beta = \frac{1}{r} \frac{W/g \cdot v^2 \cdot l_1/l - 114.6 K_f l_2}{2 K_f f (dC_y/d\beta \cdot l_1/l + dC_y/d\beta) P/2 \cdot A v^2} \quad (\text{度}) \quad (5)$$

$$s = \frac{57.3}{r} (l_1 + \frac{K_f l_2}{K_f l_1} \cdot l_2) - \beta (1 - \frac{K_f l_2}{K_f l_1}) + \frac{1}{2 K_f} \frac{l}{r} \frac{dC_y}{d\beta} \beta^2 A v^2 \quad (\text{度}) \quad (6)$$

$$\beta_1 \div \beta_2 \div s + \beta - 57.3 \frac{l_1}{r} \quad (\text{度}) \quad (7)$$

$$\beta_2 \div \beta_4 \div \beta + 57.3 \frac{l_2}{r} \quad (\text{度}) \quad (8)$$

実際の計算に上式を用いるのは少々面倒なので空気力 C_a および同モーメントを無視した次式を用いた。

$$\beta = \frac{W/g \cdot v^2 \cdot l_1/l - 114.6 K_f l_2}{2 K_f r} \quad (\text{度}) \quad (9)$$

$f \cdot \mu_r$					初速度 V_0 (km/h)						
0.10	0.11	0.12	0.13	0.14	25	30	35	50	60	70	80
57	57	57	57	57	66	95	128	257	363	479	610
-6	-6	-6	-6	-6	53	76	103	207	295	390	499
-5	-5	-5	-5	-5	44	63	87	174	248	329	425
-4	-4	-4	-4	-4	38	55	74	150	214	285	367
-3	-3	-3	-3	-3	33	48	65	132	188	248	324
-2	-2	-2	-2	-2	29	43	58	118	168	224	290
-1	-1	-1	-1	-1	27	39	53	107	152	203	263
0	0	0	0	0	24	35	48	98	139	184	240
					22	32	44	90	128	171	220
					20	29	41	82	118	161	204
					19	27	37	71	103	144	192

表-2 ($W=8t$) 制動停止距離(m)

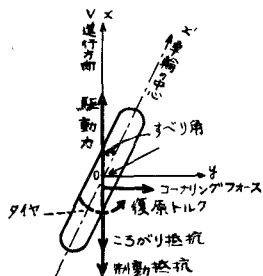


図3 タイヤの横すべり時に働く力

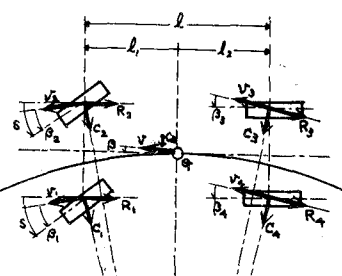


図4 車に働く力

図4の記号説明

r : 重心まわりの半径
 v : 重心まわりの速度
 β : 重心まわりの横すべり角
 s : 横滑り角
 β_1, β_2 : 前左右輪の横すべり角
 β_3, β_4 : 後左右輪の横すべり角
 R_1, R_2 : 前左右輪の路面抵抗
 R_3, R_4 : 後左右輪の路面抵抗
 A : 自動車前面面積
 P : 空気密度
 C_y : 横力モーメント係数
 C_m : 偏揺れモーメント係数

C_1, C_2 : 前左右輪コーナリングフォース
 C_3, C_4 : 後左右輪コーナリングフォース
 C_a : 空気力によるコーナリングフォース
 M_a : 上下軸回りの空気力モーメント
 K_f : 前輪のコーナリングパワー
 K_r : 後輪のコーナリングパワー
 N_1, N_2 : 前左右輪の垂直路面反力
 N_3, N_4 : 後左右輪の垂直路面反力
 l_1 : 前輪重心間距離
 l_2 : 後輪重心間距離
 l : 前後輪間距離

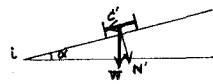


図5 片勾配による分力

$$\beta_2 = \beta + 57.3 \ell_2 / r \quad (\text{度}) \quad (10)$$

$$\beta_1 = (K_r \ell_2 / K_f \ell_1) \beta_2 \quad (\text{度}) \quad (11)$$

$$\delta = \beta_1 - \beta_2 + 57.3 \ell_1 / r = \beta_2 (K_r \ell_2 / K_f \ell_1 - 1) + 57.3 \ell_1 / r \quad (\text{度}) \quad (12)$$

また車が片勾配のある面を走行する場合、
重心に片勾配による分力Cが図5のように
働くから角 α が小さいとして

$C = W \sin \alpha \div W \tan \alpha = W i$ である。またこ
れによるモーメントはなく、またこれによる他
のカへの影響がないものとする

$$\beta' = \frac{(V^2/g - r i) W \ell_1 / \ell - 114.6 K_r \ell_2}{2 K_f r} \quad (13)$$

β_2, β_1, δ については式(10), (11), (12) 式と同
じである。普通車の曲線走行では車輪の横す
べり角は 0.5° 位の範囲に入る。乾燥路面で
は前述のように10位でコーナリングフォース
が最大になり、しかも横すべり摩擦係数が大きいので
さして支障にならないが氷結路面ではコーナリングフ
ォースが最大になるのは横すべり角度 1° 前後と考えら
れ、さらに横すべり摩擦係数も0.1以下と非常に小さい
のでコーナリングフォースが不足して安全に車が走行
できにくくなる。ここでは種々問題もあるが計算の
便宜として最大横すべり摩擦係数を横すべり角 1° で 0.09
になるとし、 1° 以下では直線的に0まで減少するもの
としまた速度に関係無いとした。対象とした車は

$W = 11,780 \text{ kg}$ (6.5t積), $\ell = 4.4 \text{ m}$, $\ell_1 = 3.08 \text{ m}$, $\ell_2 = 1.32 \text{ m}$
 $K_f = 157 \text{ kg/deg}$, $K_r = 370 \text{ kg/deg}$ のものである。これから

(9)式から(13)式によって各速度別に横すべり角と半径との関係を求めたのが図6と図7である。図6は
5%の片勾配のある場合であり、図7は片勾配のない平坦な場合である。また図6から平均速度で走
行する車には $\beta_1 (= \beta_2) = 0^\circ$ 、最高速度で走行する車には $\beta_1 (= \beta_2) = 0.8^\circ$ なる曲線半径を求めたのが表3であ
り、図7から $\beta_1 (= \beta_2) = 1^\circ$ の時の半径を求めたのが表4である。また現行道路構造令の曲線半径につ
いて β を逆算してみると 1° をこえるものばかり見受けられた。以上冰雪路面を考えた道路線形につ
いて若干の考察をおこなったが何らかの参考になれば幸いである。またこの制動運動を考えた場合の道
路との関係、曲線半径と片勾配、横断勾配が影響する制動運動等については次の機会に報告したい。
最後に理論式の検討、実際の数値計算をおこなった静岡県久保田 亨氏に謝意を表する。

参考文献：近藤政幸「基礎自動車工学」前後期編、高野務「道路構造令解説」、W. Zuk "The dynamics of
vehicle skid deviation as caused by road conditions." 平尾収「理論自動車工学」久保田 亨氏 1984年度卒業論文

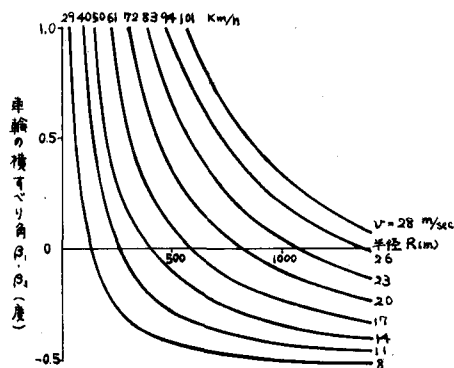


図6 横すべり角と半径の関係

V (m/sec)	8	11	14	17	20	23	26	28
V in C.B. + 0.5% 片勾配	135	250	400	570	830	1070	1380	—
V (m/sec)	14	17	20	23	26	29	31	
V in C.B. + 0.5% 片勾配	155	240	335	445	560	700	900	

表3 片勾配(5%)のある場合の半径

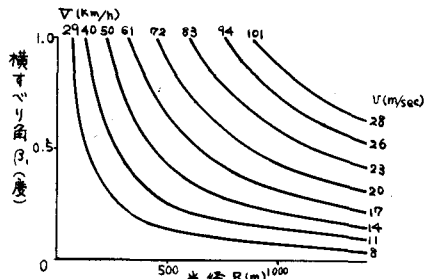


図7 横すべり角と半径の関係(平坦)

V (m/sec)	8	11	14	17	20	23	26	28
V (km/hr)	28.8	39.6	50.4	61.2	72.0	82.8	93.6	104.0
半径 m	75	140	230	330	450	600	770	900

表4 片勾配のない平坦な場合の半径