

ORタイプの傾斜地における摩擦仕事について

(株)アPLICATION・リサーチ研究所 正員 ○下村 正弘
愛媛大学 大学院 学生員 豊高 誠
愛媛大学 工学部 正員 榎 明彦
愛媛大学 工学部 正員 室 達朗

1. まえがき 前報¹⁾においては、平地における駆動・制動時のダンアトラックタイヤの摩擦機構について考察した。本研究では、平地及び傾斜地における1回の駆動・制動で、タイヤの摩擦はどれだけ起るかを傾斜角の影響について、タイヤと路面間の摩擦仕事に注目して、自動車工学の理論より数値解析し、結果を報告する。

2. 車両及び前後輪の運動 数値解析に使用したダンアトラックのモデルを図1と表1に示す。スリップ率 δ を次の様に定義した。 $v > R\omega$ のとき $\delta = (v - R\omega)/v$, $v < R\omega$ のとき $\delta = (v - R\omega)/R\omega$ 。ただし v : 車両速度, R : タイヤの有効半径, ω : タイヤの回転速度。またスリップ率 δ と制動力係数 μ との関係は図2の様に、 $\mu = 0.72 \sin(9000 \cdot \delta / 34)$ で与えた²⁾。図1に示したダンアトラックの車両及び前後輪の運動方程式は、前輪を添字 f 、後輪を添字 r で表わし、傾斜角 θ を負の値のとき登り坂、正の値のとき下り坂とすると次のようになる。

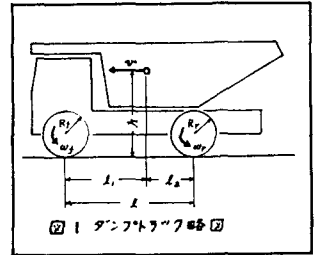


図1 ダンアトラック略図

$$d^2x/dt^2 = g(-M_f N_f - M_r N_r + W \sin \theta) / W \quad (1)$$

$$dw_f/dt = \{(M_f - \mu R) N_f R_f + T_f\} / 2 I_f \quad (2)$$

$$dw_r/dt = \{(M_r - \mu R) N_r R_r + T_r\} / (4 + k_e) I_r \quad (3)$$

$$N_f = W_f \cos \theta = W \{l_2 \cos \theta + h \sin \theta - h (dv/dt) / g\} / l \quad (4)$$

$$N_r = W_r \cos \theta = W \{l_1 \cos \theta - h \sin \theta + h (dv/dt) / g\} / l \quad (5)$$

ただし、 g : 重力加速度, W : 全車両重量, W_f, W_r : 前後輪にかかる荷重, N_f, N_r : 前後輪の垂直抗力, T_f, T_r : 前後輪にかかるトルク, I_f, I_r : 前後輪の慣性モーメント, $k_e I_r$: 後輪とともに回転する部分の後輪に換算した慣性モーメント, μR : ニョリ抵抗係数。



図2 μ - δ 曲線

項目	単位	数値
L	m	3.61
l_1	m	1.82
l_2	m	1.79
h	m	2.14
W	kg	32000
$2 I_f$	kg·m ²	135.56
$(4+k_e) \cdot I_r$	kg·m ²	300.00
R_f	m	0.815
R_r	m	0.815
μR		0.02

ただし、 g : 重力加速度, W : 全車両重量, W_f, W_r : 前後輪にかかる荷重, N_f, N_r : 前後輪の垂直抗力, T_f, T_r : 前後輪にかかるトルク, I_f, I_r : 前後輪の慣性モーメント, $k_e I_r$: 後輪とともに回転する部分の後輪に換算した慣性モーメント, μR : ニョリ抵抗係数。④⑤⑥式は容易に積分できない。そこであるトルクを与えたときの v, w_f, w_r をRunge-Kuttaの積分法³⁾により求め、同時に $S_f, S_r, M_f, M_r, N_f, N_r$ を求めた。

3. 摩擦仕事と作用仕事 時間 $t=0$ から $t=t_m$ で駆動または制動するとき、 $0 \leq t \leq t_m$ 間を Δt ごとに分割すると、摩擦仕事(加積)は、

$$v > R\omega \text{ のとき } \sum \mu(t) \cdot \delta(t) \cdot N(t) \cdot v(t) \cdot \Delta t \quad (6)$$

$$v < R\omega \text{ のとき } \sum \mu(t) \cdot \delta(t) \cdot N(t) \cdot R\omega(t) \cdot \Delta t \quad (7)$$

作用仕事(加積)は、

$$\sum |T| \cdot \omega(t) \cdot \Delta t \quad (8)$$

また位置エネルギーの変化量 E は

$$\sum W \sin \theta \cdot v(t) \cdot \Delta t \quad (9)$$

E_{w_f}, E_{w_r} を前後輪の摩擦仕事、その和を E_w とし、また E_{T_f}, E_{T_r} を前後輪の作用仕事、その和を E_T とした。

4. 初期状態 初期状態は等速運動とし、下り坂では次式を仮定した。

$$N_f / T_f = N_r / T_r \quad (10)$$

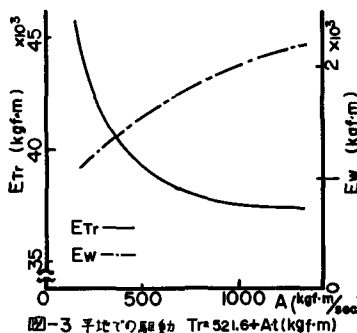


図-3 平地での駆動 $T_r = 521.6 + A t$ (kgf·m)

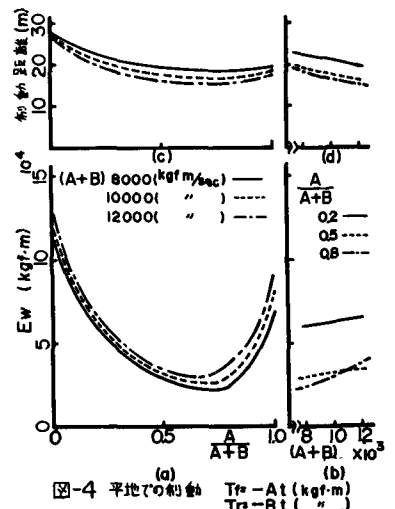


図-4 平地での制動 $T_r = -A t$ (kgf·m), $T_r = -B t$ (")

(1)(2)(3)式において $dv/dt = dw/dt = d\omega/dt = 0$ とおくと、登り坂では $\mu_0 = \mu_R$, $\mu_0 = \{l \sin \theta - \mu_R (l_2 \cos \theta + h \sin \theta)\} / (l_1 \sin \theta - h \sin \theta)$, $\omega_0 = (1 - S_f) v_0 / R_f$, $\omega_0 = v_0 / (1 - S_f) R_f$, $T_0 = W (\mu_R \cos \theta - \sin \theta) R_f$ となる。また下り坂においては $\mu_0 = \mu_R = \tan \theta$, $\omega_0 = (1 - S_f) v_0 / R_f$, $\omega_0 = (1 - S_f) v_0 / R_f$, $T_0 = W R_f (\tan \theta - \mu_R) (l_2 \cos \theta + h \sin \theta) / l$, $T_0 = W R_f (\tan \theta - \mu_R) (l_1 \cos \theta - h \sin \theta) / l$ となる。また上式で示した作用トルク T_0 , T_0 の式が等速運動をするには $\theta < 0.02$ (rad) のとき駆動トルクを、 $\theta > 0.02$ (rad) のとき制動トルクを作用させる必要がある。

5. 駆動・制動時の摩擦仕事 駆動のとき $v_0 = 1 \text{ m/sec}$, 制動のとき $v_0 = 0 \text{ m/sec}$ とした。図3は平地での駆動において、 $v = 4 \text{ m/sec}$ に達するまでの後輪駆動トルク T_r の変化に対する E_w , E_{Tr} の変化を示したものである。ただし、 $T_0 = 521.6 \text{ kgf}\cdot\text{m}$ 。また図4(a)(c)に平地での制動において停止するまでの制動トルクの係数の比 $A/(A+B)$ に対する E_w と制動距離の関係を示し、同図(b)(d)に係数の和 $(A+B)$ に対する E_w と制動距離の関係を示した。図5に坂道での駆動において、 $v = 4 \text{ m/sec}$ に達するまでの E_w , E_{Tr} , E_l , 前後輪速度 $R + \omega_f$, $R + \omega_r$ と傾斜角 θ の関係を示した。そして図6(a)(b)は坂道での制動において停止するまでの制動トルクの係数の比 $A/(A+B)$ に対する E_w と制動距離の関係を傾斜角 θ をパラメータとして示したものである。

6. 結論 平地での駆動の場合、摩擦仕事は駆動トルクの大きさの増加にともなって単調増加していく。また作用仕事は駆動トルクの大きさが増加していくと減少していくが、これはある速度に達するまでの距離が駆動トルクの小さいほど長いためこがり抵抗による仕事が増加することによる。平地での制動の場合では、摩擦仕事は前後輪の制動トルクの係数 A , B の比によって変化し、前輪制動トルクを後輪制動トルクの約2倍の大きさと与えると摩擦仕事を最小とすることができた。また制動距離は前輪制動トルクが後輪制動トルクの約4倍の大きさと最短となるが、前輪制動トルクを増加していくと制動距離の変化は小さくなっていく。また摩擦仕事は前後輪の制動トルクの和が増加するほど増加しそして制動距離は短くなる。坂道での駆動では、摩擦仕事は登り勾配が急になるほど増加している。それに対して下り勾配では摩擦仕事は小さく傾斜による変化はあまり見られない。前後輪の速度については、前輪は傾斜によって変化していないが後輪は登り勾配が急になるほど車両速度との差が大きくなっていく。また下り勾配において勾配が 10° 以上になると車両の運動はほとんどが位置エネルギーの変化によるものとなる。坂道での制動においては、平地と同じように前後輪制動トルクの係数 A , B の比によって摩擦仕事は変化し、下り勾配においては摩擦仕事を最小とする係数の比の値は勾配が急になるにしたがって後輪制動トルクの係数 B が増加している。制動距離については傾斜に関係なく前輪トルクの増加にともなって短くなるが登り勾配ではあまり変化していない。今回の数値解析結果では、制動時には常にロック制動となり後輪が前輪より早くロックしていた。これは制動の際に後輪垂直抗力が減少するため後輪の回転が続けようとする μN が減少し、後輪のある制動トルクに対する角速度 ω_r の速度勾配が急となり短時間で回転が停止するためである。

参考文献 1) 豊高 誠, 室達 朗; DRタイプの駆動・制動時の摩擦仕事について, 第35日土木学会講演概要集, Ⅱ-237, 2) 島昭治郎, 山崎 祥司, 上田 隆; DRタイプに対する現地摩耗試験(第3報), 第34日土木学会講演概要集, Ⅱ-217, 3) 牙尾 収, 巨塚 厚, 近藤 政市, 山本 峰雄; 理論自動車工学, 山海堂, 1979.

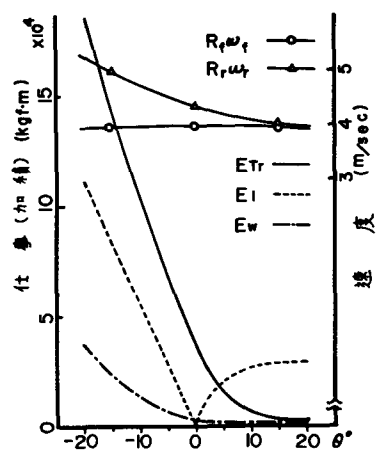


図-5 坂道での駆動 ($\theta > 0.02$) $T_r = 775.4 \text{ kgf}\cdot\text{m}$

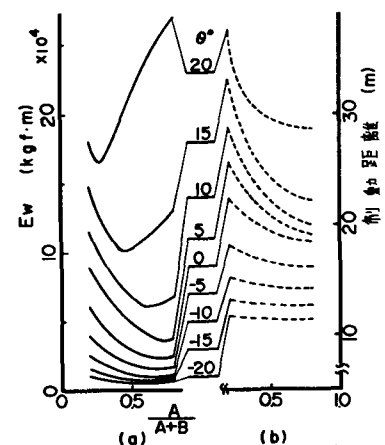


図-6 (a) $\theta \leq 0.02$ $T_r = A \cdot t$ (kgf·m)
 $T_r = B \cdot t$ (kgf·m)
 $T_r = T_0 - A \cdot t$ (kgf·m)
 $T_r = T_0 - B \cdot t$ (kgf·m)
 $A+B = 8000 \text{ (kgf·m/sec)}$