

転動車輪の横すべり走行に及ぼすタイヤ圧の影響

中尾清治[※]・田辺一[※]

Seiji NAKAO and Hajime TANABE
Influence of the Inflation Pressure on the
Side Slipping Trailer Tire

I 緒 言

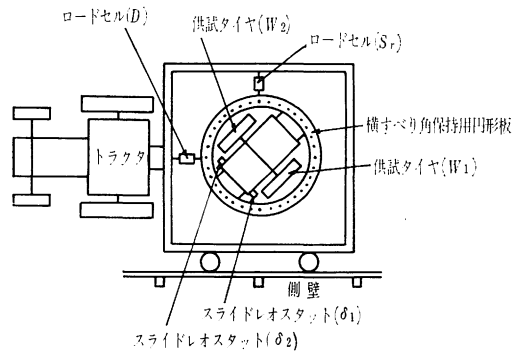
直進している自動車あるいはトラクタが、車体の側方から外力を受けた場合、あるいは傾斜地を等高線方向に走行しているトラクタのように、車体の傾斜、進路角がある場合などは、左右車輪にかかる車輪荷重に差が生じて、それがそれぞれの車輪の発揮するけん引力、けん引抵抗など車輪のけん引性能に影響をおよぼす¹⁾²⁾³⁾。

これらの状態は、一般的には重心まわりの回転モーメント、タイヤのたわみ量の変化として観察される⁴⁾。そこで、4.00-10の農用空気タイヤを用いて、タイヤのたわみを車輪荷重と横すべりを発生させる力の二種による影響に分け、それぞれの影響を $0.5\sim 3.5\text{kg/cm}^2$ のタイヤ圧のもとに調査した。また同時に、タイヤ圧の影響によるけん引抵抗、コーナリングフォースの発生状況をも調査した。

なお、この研究を遂行するにあたり、実験、取りまとめに多大の協力を得た45年度4年生深津和歳、木原裕の両君に感謝の意を表す。

II 実験装置および実験方法

実験は転動する二輪の装置を作成し、室内コンクリート路面上でこれを 0.14m/sec の速度でけん引した。この供試二輪の実験装置は全重量 276kg で、角度 10° ごとにけん引かんを装着できるようにした円板を取付けた。この装置全体は保持枠を用いて側壁に沿って一方方向のみ進行させるようにしてある。また、けん引かんの位置を変えることによって $0\sim 90^\circ$ までの横すべり角が与えられるようになっている。この供試二輪の実験装置をけん引した時のけん引抵抗 (D) と、それに直角な方向のコーナリングフォース (S_r) をそれぞれロードセルを介して測定した。



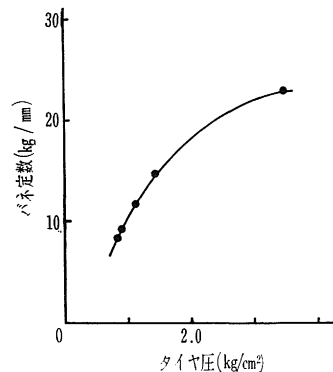
第1図 実験装置

第1表 供試タイヤ寸法

項目	規格4.00-10, 2 PLY
外 径	450mm
幅	113mm
タイヤ 高	78mm
接 地 幅 (1.4kg/cm^2 時)	94mm

第2表 タイヤ圧条件

タイヤ 圧 (kg/cm^2)	バネ定数(E) (kg/mm)
0.5	8.5
0.8	9.2
1.4	11.6
2.0	14.7
3.5	23.0



第2図 供試タイヤの特性

※ 農業機械工学研究室

供試タイヤは踏面のパターンによって諸特性に対する影響の度合いが異なると考えられるので、ここではタイヤのラグを取り除き表面を滑らかなタイヤとした。タイヤ寸法は第1表のとおりである。タイヤ圧は0.5, 0.8, 1.4, 2.0, 3.5, の5段階とした。

タイヤたわみ量の測定には摺動抵抗器を各車輪の両側に装着し、左右タイヤのたわみに応じて摺動つまみに固定した軸が上下に摺動するようにした。その移動による抵抗の変化をオシログラフに記録させた。

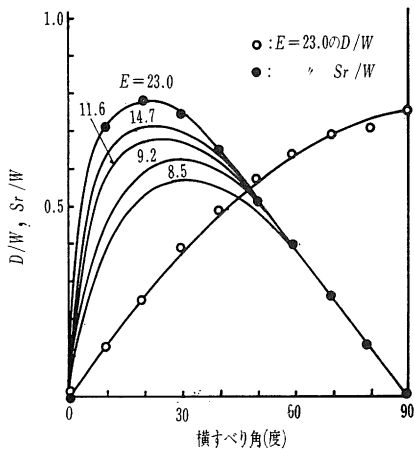
車輪荷重とタイヤたわみ量の関係は、一般にタイヤたわみ初期においてはラグ剛性が支配的となるが⁵⁾、ここではラグを取り除いたので、車輪荷重 50~250kg の間は単純線形特性となった。これから求めたタイヤ圧とバネ定数は第2表および第2図のようになる。

III 実験結果および考察

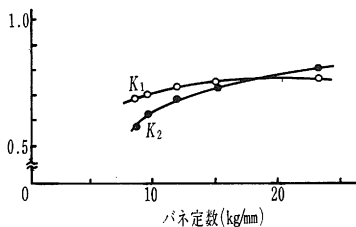
1. けん引抵抗とコーナリングフォース

供試二輪の実験装置を他のトラクタでけん引した場合のけん引抵抗 (D) とコーナリングフォース (S_r) とを全車輪荷重で除し、それぞれけん引抵抗係数、コーナリング係数としてその値を第3図に示す。

けん引抵抗と横すべり角 (α) との関係は、タイヤた



第3図 けん引抵抗, コーナリングフォースの変化



第4図 K_1, K_2 の変化

わみによるころがり抵抗の変化値を省略(これについては後述する)すると、ほぼ次のような式で示される。

$$D = K_1 \sin \alpha \quad (1)$$

ここで K_1 は車輪回転面と直角の方向での路面との摩擦係数である。この K_1 の値とタイヤのバネ定数の変化との関係を第4図に示す。タイヤのバネ定数が小さくなると K_1 はやや小さくなる傾向がみられたが、これは安武氏らの研究⁶⁾でタイヤ圧が 1psi の減少に対して摩擦係数は約 1%減少するという事実と、同じ傾向を示している。しかしながら許容タイヤ圧の範囲では K_1 の差はほとんどないと見てもよいと考えられる。

(1)式ではとくに $\alpha = 0$ の場合、 $D = 0$ となるが実際にはころがり抵抗が存在する。すなわち第5図(a)はころがり抵抗係数を比較したもので、図から示されるようにバネ定数が小さくなると、すなわちタイヤ圧が低くなるところがり抵抗係数が増大する⁷⁾。とくにこのタイヤではタイヤ圧 1.4 kg/cm^2 付近より低くなると急にころがり抵抗係数が増大する結果になっており、タイヤ圧の許容下限がこの値B付近にあると考えられる。しかしながらこの値とけん引抵抗係数の値とを比較するとその変化量は小さく、横すべり角の変化によるけん引抵抗の検討には省略しても差しつかえない。

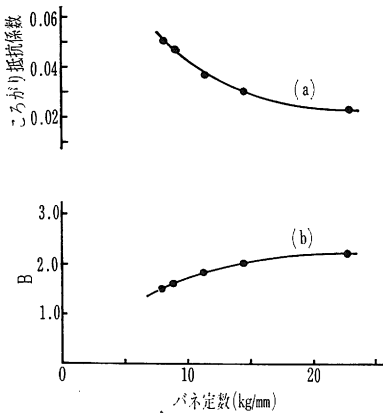
コーナリングフォース (S_r) は、車輪が横すべりする場合に、進行方向と直角の方向にタイヤの横すべりに対抗して発生する力⁸⁾で、横すべり角 (α) によって第3図のように変化した。このときの値は次の式で実験値とよく一致した。

$$S_r = K_2 W \sin (A \alpha^{\frac{1}{B}}) \quad (2)$$

$$\text{ただし、} A = 2 \times 90^{1 - \frac{1}{B}}$$

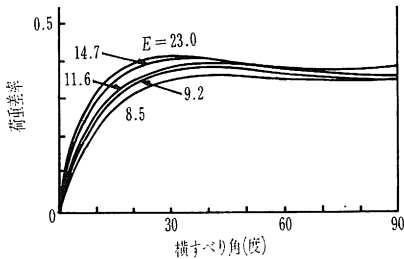
K_2 の値は S_r の最大値を示す係数で、図に示されるようにタイヤのバネ定数の値が小さくなると値は小さくなっていく。とくにタイヤ圧 1.4 kg/cm^2 付近以下になると急に減少する結果となった。これはころがり抵抗係数と関連するもので、タイヤ圧が低くなることは車輪が回転しにくくなることである。したがってコーナリングフォースは車輪が横すべりしながら進行する場合に発生する性質上、けん引抵抗力によって引き起こされるコーナリングフォース方向の合力はタイヤのたわみによってエネルギーが消費され、ころがり抵抗が増加し、この値が結果的には小さくなっていくことになる。

Bの値はほぼ1.5~2.2の範囲にあり、この値のタイヤのバネ定数との関係は第5図(b)に示されるようになった。このBの値はコーナリングフォースの最大値の位置

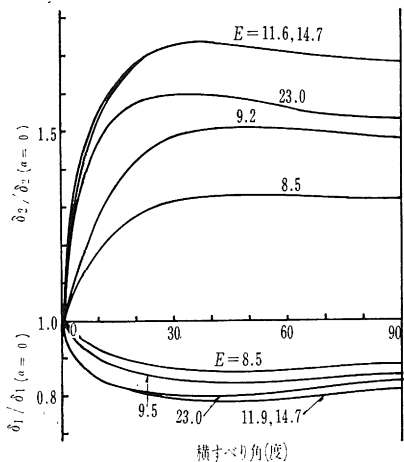


第5図 (a) ころがり抵抗係数の変化
(b) Bの値の変化

を示す値で、第3図の S_r の値と比較して検討すると、バネ定数が小さいときはBの値は小さく横すべり角は 30° 近くで S_r は最大値となるが、バネ定数が大きくなるとBの値は大きくなり、横すべり角 20° 近くに最大値が移動する。すなわち、タイヤ圧が低いとエネルギーの消費が大きくそれだけ回転しようとする力が小さくなる



第6図 荷重差率の変化



第7図 横力によるたわみ率

ので、 S_r の大きさも小さくなると同時に重心まわりに車体を轉向しようとするモーメントも小さくなって、最大値の発生の位置も横すべり角が大きい方に移行する。したがってタイヤ圧を高くすると小さい横すべり角で大きいコーナリングフォースを得る⁴⁾結果となり、また小さい横すべり角はけん引抵抗も小さくなる。すなわち転動車輪ではタイヤ圧を高くすることが望ましいことになる。

2. けん引時におけるタイヤのたわみ

いままでは停止時におけるタイヤのバネ定数を基準にして検討してきたが、実際にはけん引時に左右車輪の車輪荷重がけん引抵抗、コーナリングフォースなどによって異なってくる。すなわちこれらの力によって重量転移を生じ、その量だけ車輪荷重が増加あるいは減少する。これらの重量転移量を計算で求めるとつぎのようになる。

まず車輪に作用する外力すなわちけん引抵抗とコーナリングフォースを車軸に平行な力の合力すなわち横力(X)、それと直角で車輪面方向の力の合力(Y)に分ける。

$$X = D \sin \alpha + S_r \cos \alpha \quad (3)$$

$$Y = S_r \sin \alpha + D \cos \alpha \quad (4)$$

路面からけん引かんまでの高さすなわちここでは車軸高さにこれを選んだのでこれを h とする。輪距を b 、全車輪荷重を W 、内側車輪荷重(横すべり角のつく方向の側の車輪荷重)を W_1 、外側車輪荷重(他の側の車輪荷重)を W_2 とする。以下添字1は内側車輪、添字2は外側車輪を表わす。さらに X, Y が作用する動的状態における車輪荷重を同様にそれぞれ W_1, W_2 とする。また X の作用によって生じる車輪の反力をそれぞれ R_1, R_2 とすると、

X については

$$bR_1 + hX - \frac{W}{2}b = 0$$

$$\therefore R_1 = \frac{W}{2} - \frac{h}{b}X \quad (5)$$

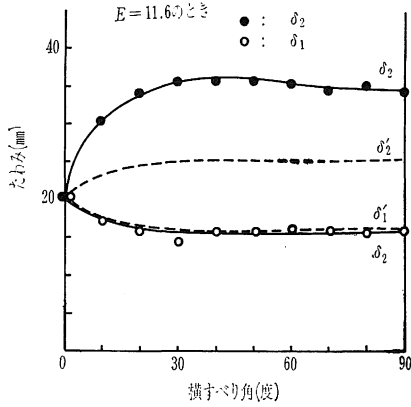
$$R_2 = \frac{W}{2} + \frac{h}{b}X \quad (6)$$

Y については

$$Rl + hY - Wl = 0$$

$$R = W - \frac{h}{l}Y \quad (7)$$

ここで l は二輪とその前方の支え点(停止時においてはここに重量がかからないようにした)との距離、 R は動



第8図 タイヤのたわみ特性

的狀態における全支持反力である。

Y方向に対する重量転移量は内側、外側の両車輪に等分に作用すると仮定する。この仮定は車軸中央にYの力が作用しているの両車輪への作用度合はほぼ等しいとみて差しつかえないと考えられる。

これらから、XとYの作用による重量転移量は

$$\text{内側車輪では } \frac{h}{b}X + \frac{h}{2l}Y$$

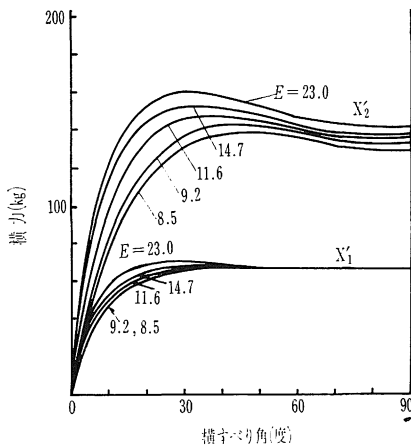
$$\text{外側車輪では } -\frac{h}{b}X + \frac{h}{2l}Y$$

したがって次式が得られる。

$$W_1 = \frac{W}{2} - h \left(\frac{X}{b} + \frac{Y}{2l} \right) \quad (8)$$

$$W_2 = \frac{W}{2} + h \left(\frac{X}{b} - \frac{Y}{2l} \right) \quad (9)$$

静車輪荷重では両車輪荷重を等しく置いたが、この重



第9図 横力 X'₁, X'₂ の計算値

量転移によって荷重差を生じる。荷重差率(λ)は次式で定義される。

$$\lambda = \frac{W_2 - W_1}{W_2 + W_1} \quad (10)$$

(3), (4), (8), (9)の式からタイヤの各バネ定数の状態について計算をし、(10)式によって荷重差率を求めると第6図のようになる。タイヤのバネ定数の変化によってλはあまり変化しないが、バネ定数が小さくなると若干全体的に小さくなっていく傾向にある。また横すべり角ごとにみると約30°までは急激にλの値は変化をするが、その後はほぼ一定値となった。このように横すべり角がつくことによって荷重差率は異なっていくので、等荷重の場合、所要の荷重差の場合などの値を求めるには、この計算結果からあらかじめ荷重を調整しておかなければならない。

(8), (9)の式より計算した動的状態における車輪荷重 W₁, W₂に対する車輪のたわみ量をそれぞれδ₁, δ₂とする。

$$\left. \begin{aligned} \delta_1 &= \frac{W_1}{E} \\ \delta_2 &= \frac{W_2}{E} \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

ここでEはタイヤのバネ定数である。

さらに、横すべりの要素によるたわみ量 δ'₁, δ'₂ とすると全たわみ量 δ₁, δ₂ は次のように表わされる。

$$\left. \begin{aligned} \delta_1 &= \delta_1' + \delta_1 \\ \delta_2 &= \delta_2' + \delta_2 \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

このδ₁, δ₂の実験結果を第7図に示す。一般にδ₁は重量転移によって減少しδ₂は増加する。さらにδ₂のたわみ率が大きいのは、横すべりによるたわみ量δ'₂が影響しているものと考えられる。バネ定数が大きいほど横すべりによるたわみも少ないと考えられるが、E = 9.2kg/mm すなわちタイヤ圧 0.8 kg/cm² 以下は、実験時の荷重では重すぎてタイヤの変形が大きく、したがってδ₂(α=0)が大きいので、横すべりに対してはすでにリムの影響などが現われて、たわみが少なくなったものと考えられる。したがって、このタイヤでは実験条件の荷重範囲では約 1.4kg/cm² (E = 11.6kg/mm) 以上のタイヤ圧の必要があるといえる。

いま、E = 11.6kg/mm の実験値を例に示すと第8図のようになる。実線はδ₁, δ₂の実測値であり、破線は(8), (9)式を(11)式に代入して計算した重量転移によるたわみ δ'₁, δ'₂を示す。図に示されるように内側車輪はδ₁ = δ'₁でδ'₂ = 0となり、また外側車輪はδ₂ > δ'₂である。すなわち、内側車輪では横すべりによるた

わみはほとんどないが、外側車輪はそれが非常に大きい値を示して横すべりによる影響は大きい。

つぎに δ_1^i, δ_2^i について横力との関係を見出すために、次の2通りの仮定について比較検討する。

- ① $\delta_1^i = 0$ であるので横力 X が、その力の発生は両車輪ではあるが、 δ_2^i にすべて作用して次の関係にあるとする。

$$\delta_2^i = \frac{1}{K_3} X \quad (13)$$

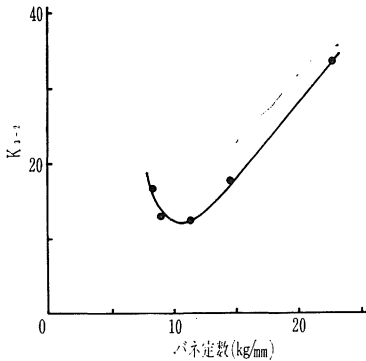
- ② δ_1^i, δ_2^i は横力 X を各車輪の分担車輪荷重に配分した値すなわち X_1^i, X_2^i がそれぞれ作用して次の関係にあるとする。

$$\left. \begin{aligned} \delta_1^i &= \frac{1}{K_{3-1}} X_1^i \\ \delta_2^i &= \frac{1}{K_{3-2}} X_2^i \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

ただし、 $\frac{X_1^i}{X_2^i} = \frac{W_1^i}{W_2^i}$, $X = X_1^i + X_2^i$

ここで、 K_3, K_{3-1}, K_{3-2} はタイヤの横力 X, X_1^i, X_2^i と垂直方向のたわみ量との係数である。

②の仮定に基づいて計算した X_1^i, X_2^i の値を第9図に示す。 X_1^i はバネ定数が変化しても変わらず横すべり角に



第10図 外側車輪の K_{3-2} の変化

第3表 K_3, K_{3-2} の値

α	E=8.5		E=9.2		E=11.6		E=14.7		E=23.0	
	K_3	K_{3-2}	K_3	K_{3-2}	K_3	K_{3-2}	K_3	K_{3-2}	K_3	K_{3-2}
0	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
10	27.6	16.8	21.5	13.1	20.2	12.8	27.9	18.2	50.5	33.5
20	26.2	17.0	19.9	13.1	19.0	12.8	27.1	18.4	48.2	33.5
30	25.3	16.8	19.3	13.0	18.7	12.8	26.4	18.2	48.0	33.8
40	24.9	16.9	18.9	13.0	18.6	12.8	26.4	18.3	48.2	33.8
50	24.9	16.9	18.9	13.0	18.7	12.8	26.4	18.1	47.8	33.0
60	25.0	16.9	19.4	13.1	18.7	12.7	26.7	18.2	48.6	33.4
70	25.3	16.9	19.2	13.0	19.0	12.9	26.6	18.0	50.0	34.3
80	25.4	17.0	19.5	13.1	19.1	12.9	26.8	18.1	49.5	33.8
90	25.2	16.8	19.4	13.0	19.0	12.8	26.8	18.1	49.5	33.8

対して一定の曲線を示しているが、 X_2^i はバネ定数が大きくなると大きな値となっていく。とくに $\alpha = 20 \sim 30^\circ$ 附近が大きな値となっている。これらは②の仮定に基づく値であり、これらの傾向から横力は内側車輪ではタイヤ圧にあまり影響されないが、外側車輪ではタイヤ圧を高くすると横力は増加する。

K_3, K_{3-2} の計算結果を第3表に示す。 K_{3-1} の値は $\delta_1^i = 0$ のため $K_{3-1} = \infty$ となる。 K_3 は $\alpha = 10 \sim 20^\circ$ の値がやや大きくそれより大きい α ではほぼ一定となっている。また K_{3-2} は α の値に関係なくほぼ一定の値となっている。一般にタイヤの横方向たわみによる横バネ定数は、車輪荷重が大きくなると減少する。ここでは K_3, K_{3-1}, K_{3-2} はこの横バネ定数と同性質のものである。したがって第6図から λ の値が $\alpha \geq 20^\circ$ では $\alpha = 10^\circ$ に比べて大きく W_2^i が大きいので $\alpha \geq 20^\circ$ の K_3, K_{3-2} の値は $\alpha = 10^\circ$ より小さくなると考えられ、 K_3 の値がその傾向を示すことになる。しかしながら、 $\alpha = 10^\circ$ と $\alpha = 20^\circ$ の W_2^i の車輪荷重の変化率は約5~8%であるので横バネ定数の減少割合もわずかで無視すると考えれば、むしろ K_{3-2} の値がほぼ一定であるのでタイヤの特性を表わすのに都合がよい。これらの考えから後者の値とバネ定数との関係を第10図に示す。

K_{3-2} の値は $E = 11.6 \text{ kg/mm}$ 附近が最小値となっている。 11.6 kg/mm より大きい E になると急激に増加する。これはタイヤ圧が高くなると横力によるたわみ量は急に小さくなることを示している。また 11.6 kg/mm より小さい E では同じように増加している傾向を示しており、これはタイヤ圧が極度に低く δ_2 が許容以上に大きくなりすぎてタイヤが極度に変形し、リムの影響があらわれそれ以上変形しないものと考えられる。実験中でもこの範囲のタイヤ圧はかなり無理な状態にあった。

このような結果から、タイヤの規格(大きさ、プライ数、ラグの配列など)を考慮して、数種のタイヤについて検討すれば K_{3-2} の特性値をは握することができると考えられる。したがって、どのようなタイヤが K_{3-2} を小さくできるか、すなわち横すべりによる変形を小さく抑えることができるかをある程度予想されることが考えられる。

3. まとめ

これまでの結果から横すべりする転動車輪のタイヤたわみ特性について検討をする。タイヤのバネ定数すなわちタイヤ圧が高くなれば、小さい横すべり角で大きいコーナリングフォースが発生する。一方けん引抵抗はタイヤ圧が高くなると大きくなる傾向がわずかにみられるが、横すべり角による影響が大きいのでタイヤ圧にはあまり影響しない。またタイヤのたわみについては、二輪では内側車輪は横力によるたわみはほとんどなく外側車

輪はその影響が大きい。この外側車輪では許容タイヤ圧の範囲において、タイヤ圧が高くなると K_{g-2} が大きくなりたわみ量が小さくなる。逆にたわみ量が大きいところがり抵抗が増大することから、コーナリングフォースも小さくなるので、タイヤ圧を許容限度内でとくに外側車輪は高くすることが好ましいと考えられる。このことは実際の傾斜地では等高線走行するとき外側車輪すなわち谷側車輪にあてはまる。したがって、谷側車輪が山側車輪より車輪荷重が多くなることもあわせて考えれば、谷側車輪はタイヤ圧を高めるのがより効果的と考えられ、同時にタイヤのたわみ量が少なくなってトラクタの横転倒に対してもより安全性が高くなる。

IV 摘 要

トラクタの車輪はとくに傾斜地で等高線走行する場合に横すべり角を必要とする。これはコーナリングフォースの発生によってトラクタの横すべりを防止するが、このときに車輪が横すべりすることによってタイヤにたわみを生じる。このタイヤのたわみの諸特性をタイヤ圧との関係で解析しコーナリングフォース、けん引抵抗などへの影響を検討した。

実験装置はラグ等の複雑な影響を除き、タイヤの基本的性質を把握するため滑らかなタイヤとして、二輪の装置を用いこれを一方向のみ走行可能な装置に連結して、横すべり角 $0 \sim 90^\circ$ まで変化させ測定した。

実験結果は次のとおりである。

1. タイヤのバネ定数が大きいと、ところがり抵抗が小さくなりコーナリングフォースは小さい横すべり角で大きな値を示す。
2. 二輪ではタイヤの車軸方向の力（横力）によるたわみは、内側車輪（山側車輪）ではあまり生じないが、外側車輪（谷側車輪）は大きく影響する。
3. 実験結果からその適用については、実際の傾斜地等高線走行では谷側車輪のタイヤたわみ量を少なくする必要があり、たとえばタイヤ圧を山側車輪より許容限度内で高くするとよいと考えられる。

参 考 文 献

1. 田辺一・中尾清治：農業機械学会誌 29 (4) : 186 - 193, 1967
2. 田辺一・中尾清治：農業機械学会誌 30 (3) : 142 - 147, 1968
3. GEIGER, M. L.: Agr. Eng. 124-140, 1961
4. 近藤政市：基礎自動車工学 前期編 1965, 養賢堂 東京 p. 178-211
5. 奥井四郎・神原広司：自動車技術 15 (4) : 518-521, 1963
6. 安武国雄・藤本邦彦・木村芳雄・原田忠和：自動車技術 15 (4) : 156-161, 1961
7. 関厚二・佐々木四郎・角田肇：自動車技術 18 (10) : 760-764, 1964
8. COOPER, D. H.: Auto. Eng. 524-528, 1958

Summary

Cornering force is useful to keep the travelling of tractor along the contour line on the side slope field. It is produced by rolling a tire at a slip angle, so that the plane of the tire is at an angle to its direction of motion, but the tire deflects laterally under the influence of the cornering force.

This paper deals with the influences of inflation pressure for cornering force, running resistance, and deflection of tire. Test device used in this experiment is two wheel cart using smooth tire, 450 mm across and 113 mm wide.

The test results are as follows :

1. High inflation pressure makes increase the cornering force at the small slip angle, because of relatively low rolling resistance.
2. The lateral deflection of tire is large on the furrow wheel, nevertheless it can be neglected on the land wheel. It is due to the weight transfer by the axial force on the wheel axle.
3. The using of permissively high inflation pressure for the furrow wheel, therefore, is recommended for the purpose of decreasing deflection.