



タイヤの力学と操縦安定性

築地原政文(株式会社ブリヂストン)

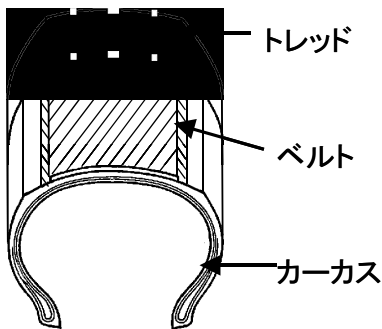
1. はじめに

タイヤの基本機能は、荷重支持機能、制動駆動(“走る”、“止まる”)機能、緩衝機能(振動吸収)、進路保持(“曲がる”)機能であるが、ここでは、その中で、“曲がる”という機能、すなわち、操縦安定性においてタイヤの力学的特性が、どのようなメカニズムで発生し、その特性が車両の運動にどのように影響を及ぼすかについて説明する。

2. タイヤの基本構造

タイヤの構造は、操安性だけでなく、耐久性、乗り心地、転がり抵抗等多くの性能を考慮して設計されるものであるが、ここでは、操安性に大きく関わる部分についてのみ説明する。

現在多く使われているラジアルタイヤは図1に示すような構造になっている。カーカス、ベルトは、有機繊維、あるいはスチール繊維をゴムで挟んだ積層構造になっている。カーカスは、繊維が半径方向(ラジアル方向)に配置され、空気圧に対し形状を保持するものである。ベルトは、通常はスチール繊維を用い、角度を変えた2枚を張り合わせたもので、タイヤ径がふくらむのを押さえるとともに、後述のように、横力の発生に関わっている。トレッド部分は、接地面での摩擦力を発生させるが、濡れた路面での接地性、音・振動の低減のためパターンが刻まれている。



2. 何故曲がるか

はじめに、なぜ車は曲がることができるかを説明しておく必要がある。制

動や加速の場合は、接地面でのゴムと路面の摩擦力で説明でき、感覚的には理解しやすい。

直進している車が曲がる場合、微低速ならば、ハンドルを切ると、タイヤがそれぞれ向いている方向に転がるので、曲がることができるが、遠心力が発生するような速度では、遠心力に釣り合うだけの横方向の力が発生しないと曲がるができない。ハンドルを切ったときに、どのようにして横力が生じるかを示したものが図2である。

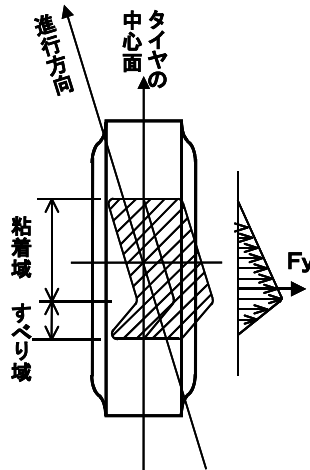


図2 タイヤ横力の発生

ハンドルを切ると、タイヤが進行方向に対し角度を持つことになる。接地面は進行方向に向こうとするので、タイヤの接地面は弾性変形し、横方向の力を発生する。横力が小さいと摩

擦力のほうが大きいので滑らず(粘着域)、変形に比例した横力が発生するが、摩擦力を越えると、すべりが生じて(すべり域)、接地面では図2の右に示したような横力分布をもつ。また、横力の着点中心は、タイヤの中心よりも後方にあるので、垂直軸周りのモーメントも発生し、この着点の後方へのずれをニューマティックトレールと呼ぶ。

進行方向とタイヤの向いている方向のなす角度をスリップ角(SA)、タイヤの発生する横力をコーナリングフォース(CF)、垂直軸周りのモーメントをセルフアライニングトルク(SAT)という。

車が曲がるのは、ハンドルを切る～フロントタイヤにSAがついて横力が発生～車両にモーメントが働き、向きが変わる～リアタイヤにSAが付き、横力が発生～釣り合い状態になるという過程を踏んでいるのである。

スリップ角に対するCF, SAT変化の例を図3に示す。

スリップ角が小さい場合は、最大摩擦力に対し、横力が小さいので、図2の粘着域がほとんどを占め、従って、横力はスリップ角にほぼ比例した力を発生する。この部分のタイヤ特性を表すものとして、図3のCFの SA ゼロ付近の勾配(いわば、比例定数)で表し、コーナリングパワー(CP)と呼ぶ。操

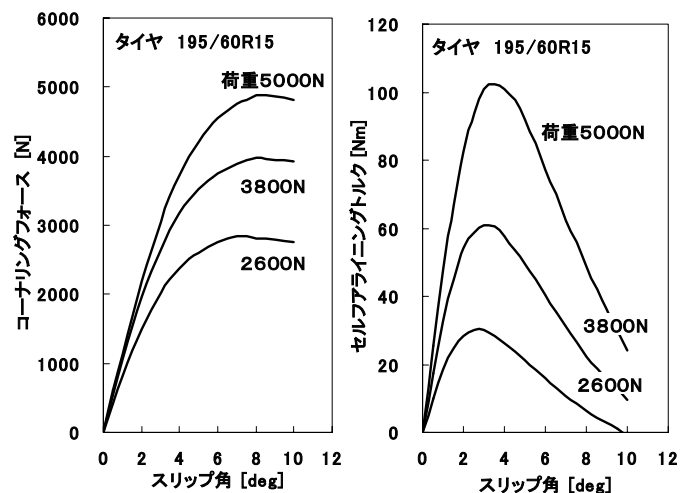


図3 タイヤのCF, SAT特性

安性に於いて、限界走行を除けば、通常の走行ではSAは比較的小さく、このCPで車両運動を議論することができる。

4. コーナリング特性に及ぼす諸要因

次に、タイヤのこれらの力学特性が、諸要因によってどのように変化するかを考える。

(1)設計要因

図2から、ベルトの剪断剛性とトレッドゴムの摩擦係数が大きな要因となることは理解できるが、実際には、タイヤの形状、ベルトの張力分布、それらによる接地圧分布等複雑な要因によって発生する横力が決まってくる。ここでは、1例として、偏平率が変わると横力がどのように変化するかを図4に示す。タイヤ径が同じで偏平化することとは、ベルトの幅が広がることを意味し、結果としてベルトの剛性が高くなるので、図のように、偏平タイヤほどCPが高くなる。また、荷重がある程度以上高くなると、CPは逆に減少するが、偏平タイヤでは、実用荷重域では、減少傾向は見られず、荷重に対する変化も線形に近くなる。

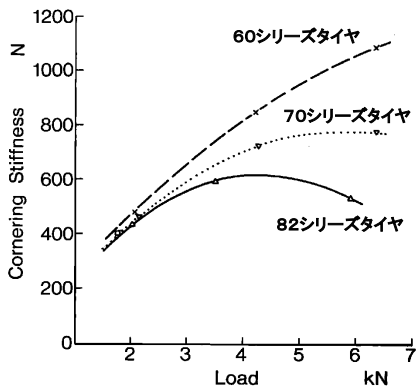


図4 偏平率とCP特性

(2)最大横力・摩擦係数

CFmax は図5に示すように荷重の増加に伴って増加していく。この特性も上記CPと同様、偏平タイヤほど線形に近くなり、82シリーズタイヤでは、ある程度荷重が重くなると逆に減少する傾向を示す。

摩擦係数という見方をすると、図6に示すように、低荷重の方が高く、荷重が増すと減少していく。これは、最大荷重付近(SAが非常に大きい領域)では、接地面内はほとんどが滑り域になり、トレッドゴムの摩擦係数の寄与が大きくなる。

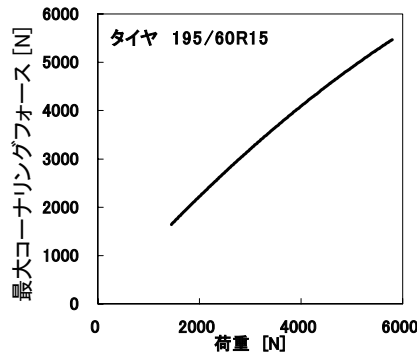


図5 CFmax の荷重による変化

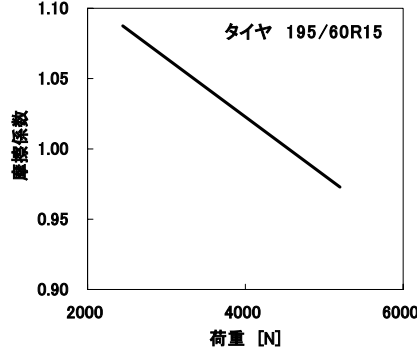


図6 摩擦係数の荷重による変化

ゴムは一般に接触圧依存性があり、接触圧が低い方が摩擦係数は高くなり、この性質から、タイヤの摩擦係数もこのような特性になる。これは、前後力に関しても同様である。

(3)空気圧

空気圧を高くすると、タイヤの歪みが小さくなるため、転がり抵抗が小さくなることは知られている。しかし運動性能に関わる特性のCPは、図7に示すように、空気圧が高くなると逆に減少する傾向を示す。

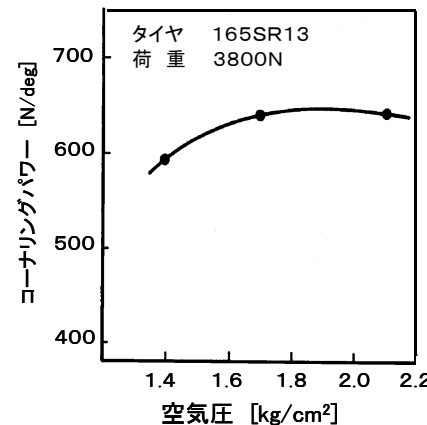


図7 空気圧とタイヤ CP

5. タイヤ特性と操安性

このように、使用条件によってタイヤ特性は変化するので、同じタイヤでも車両特性が異なれば、違った運動性

能を示すようになる。

5.1 車両運動モデル

これらのタイヤ特性変化がどのように操安性に影響するかを考えるために、車両モデルを用いて説明する。通常は幅方向を考えない2輪モデルを用いると理解しやすいが、ここでは、タイヤ特性の荷重依存性の効果も入れるので、ロールによる荷重移動まで含めた図8のようなモデルで考える。また、限界付近まで考えなければ、タイヤのCFは線形で扱うことができ、横力はCPを用いて表すことにする。

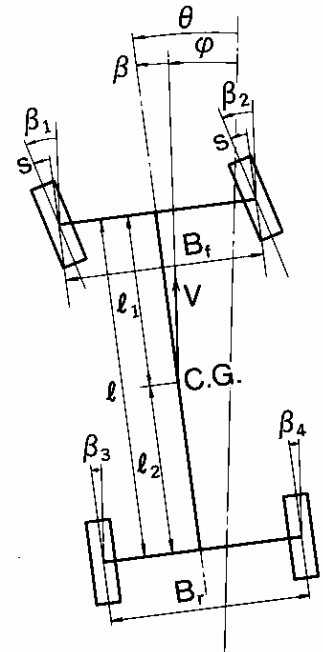


図8 車両モデル

横及びヨーイング方向の釣り合い式は次のようになる。

$$\frac{w}{g} V \frac{d\phi}{dt} = K_{r1}\beta_1 + K_{r2}\beta_2 + K_{r1}\beta_3 + K_{r2}\beta_4 \quad \text{--- (1)}$$

$$J_z \frac{d\theta^2}{dt^2} = K_{r1}\beta_1 l_1 + K_{r1}\beta_2 l_1 + K_{r1}\beta_3 l_2 + K_{r2}\beta_3 l_2 \quad \text{--- (2)}$$

ここで、 $K_{r1,2}, K_{r1,2}$ はそれぞれタイヤのCPを、 J_z は車両のヨーイング慣性モーメントを示す。(その他の記号は図8参照)

タイヤスリップ角は、

$$\beta_{1,2} = \beta + s - \frac{l_1}{V} \frac{d\theta}{dt} + \left(\frac{\partial\beta}{\partial S}\right)_r S_{r1,2} - \left(\frac{\partial\beta}{\partial T}\right)_r T_{r1,2} \quad \text{--- (3)}$$

$$\beta_{3,4} = \beta + \frac{l_2}{V} \frac{d\theta}{dt} + \left(\frac{\partial\beta}{\partial S}\right)_r S_{r1,2} + \left(\frac{\partial\beta}{\partial T}\right)_r T_{r1,2} \quad \text{--- (4)}$$

で表される。ここで、

$$\left(\frac{\partial\beta}{\partial S}\right)_{f,r} \left(\frac{\partial\beta}{\partial T}\right)_{f,r}$$

は、サスペンションの横力、アライニングトルクによるコンプライアンスステア係数であり、 $S_{fl,2,r1,2}$ 、 $T_{fl,2,r1,2}$ はタイヤの横力、アライニングトルクである。

操安性の基本特性である U/S 特性（アンダーステアの度合い）は、定常円旋回のスタビリティファクターの大小で表すことができるので、式(1)～(4)を舵角一定の定常円旋回の条件でとくと、

$$R/R_0 = 1 + \overline{SM} V^2 \quad \text{--- (5)}$$

となり、スタビリティファクター SM は、

$$\overline{SM} = \frac{1}{gl} \left(\frac{w_f}{K_f^*} - \frac{w_r}{K_r^*} \right) \quad \text{--- (6)}$$

で表される。ここで、 K_f^* 、 K_r^* は左右輪の平均の等価 CP で、各タイヤの等価 CP は

$$K_{f1,2}^* = \frac{K_{f1,2}}{1 - K_{f1,2} \left\{ \left(\frac{\partial\beta}{\partial S} \right)_f - \left(\frac{\partial\beta}{\partial T} \right)_f (n_0 + n_r) \right\}} \quad \text{--- (7)}$$

$$K_{r1,2}^* = \frac{K_{r1,2}}{1 - K_{r1,2} \left\{ \left(\frac{\partial\beta}{\partial S} \right)_r - \left(\frac{\partial\beta}{\partial T} \right)_r n_r \right\}} \quad \text{--- (8)}$$

で表され、サスペンションのコンプライアンスを考慮した CP である。

また、ロールに伴う荷重移動は以下のように表される。

$$w_{f1,2} = w_f / 2 \pm \Delta w_f \quad \text{--- (9)}$$

$$w_{r1,2} = w_r / 2 \pm \Delta w_r \quad \text{--- (10)}$$

$$\Delta w_f = \left(\frac{V^2}{gR} \frac{1}{B_f} \right) \left\{ \frac{k_{af} w_0 h}{(k_{af} + k_{ar})} + w_f h_f \right\} \quad \text{--- (11)}$$

$$\Delta w_r = \left(\frac{V^2}{gR} \frac{1}{B_r} \right) \left\{ \frac{k_{ar} w_0 h}{(k_{af} + k_{ar})} + w_r h_r \right\} \quad \text{--- (12)}$$

これらの式中で、 n_0 はキャスターとロール、 n_f, n_r はタイヤのニューマティックとロール、 k_{af}, k_{ar} は前軸、後軸のロール剛性、 h は重心とロール軸の距離、 h_f, h_r は前軸、後軸でのロール軸高さを、 w_f, w_r は軸重を示している。

5.2 タイヤ特性がスタビリティファクターに及ぼす影響

タイヤ特性変化が、スタビリティファクター、即ち、U/S の度合いにどのように効果を与えるかを見ていく。

(1) セルフアライニングトルク

操安性に影響を与えるのは横力だけと考えがちだが、特にフロントタイヤの SAT はステア特性への影響が大きい。式(7)の等価 CP で、SAT が大きいと (SAT = ニューマティックトレール x CP)、等価 CP が小さくなり、SM は大きく、即ち、U/S が強くなる。これは、ステアリング系を含めたサスペンションのコンプライアンスが大きいためで、等価 CP がタイヤ CP の 70～80% になってしまう程である。

(2) ロールによる荷重による効果

サスペンションのスタビライザーの径を太くするとロール剛性が大きくなる。式(10),(11)からわかるように、フロントのロール剛性をあげると、旋回時のフロントの荷重移動量が大きくなる。リアの剛性をあげると、リアの荷重移動量が大きくなる。

タイヤの CP は荷重によって変化するが、図4に示したように、荷重に対し、上に凸の特性を持っている。従って、ロールによって荷重移動が起こると、図9に示すように、左右輪の平均 CP は荷重移動量が大きくなるに従って減少する。

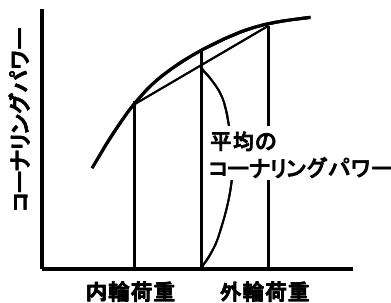


図9 荷重移動と左右輪のCP

フロントのロール剛性をあげると、フロントの荷重移動が大きくなって、タイヤ CP が減少し、式(6)のスタビリティファクターが大きくなって、U/S が強くなる。リアの剛性を高めると、逆のことになる。但し、この効果は、図4に示すように扁平タイヤになるほど、荷重による CP の変化は線形に近くなるので、その効果は小さくなる。

このことは、CFmax にも同様なことが言え、限界での U/S 特性を前後のロール剛性配分を変えることによって、変化させることができる。

(3) 空気圧による変化

空気圧を変えると、タイヤ CP は図7に示すようにある空気圧までは増加するが、それ以上空気圧を上げると逆に減少する。図は省略したが、空

気圧の増加によって CP が増加した場合、荷重依存性特性も同時に増加し、荷重の大きいところでは増加しても、低荷重では逆に減少する傾向にあるので、空気圧を変えた場合のステア特性の変化は、使用荷重域も同時に考える必要がある。

6. 操安性に特化した F1 タイヤ

乗用車タイヤから離れるが、操安性を究極まで高めたレーシングタイヤに簡単に触れておく。

レーシングタイヤが乗用車タイヤと違う点は多くあるが、グリップ向上という面では、

- トレッドゴムは、摩耗、耐熱性を最低限確保し、グリップの向上に振り向けている。

- 接地面積を大きくとるために、低い空気圧で使われ、高い横剛性を持っている

という点が上げられる。

車両側にも、タイヤの特性をより多く引き出すための工夫がなされている。

(1) 荷重が大きいほど、大きな CF が発生するので、ウイングによる空力特性（ダウンフォース）を利用して、自重の3倍以上の荷重をかけて、グリップを稼いでいる。

(2) 速く走るための、チューニングにおいても、ステア特性を変えるために、スタビライザーを変更するなど、乗用車の場合と同じ手法が使われるが、空気圧によるステア特性コントロールも行われている。レーシングタイヤの場合は、その構造から、空気圧が低い方が大きな CF を発生する。そこで、0.1psi（なぜか F1 の世界では、空気圧の単位として psi が使われている。1psi = 約 0.07kgf/cm²）単位で空気圧を変えながら、最適な操安性を得ているといわれている。

7. 終わりに

タイヤの構造、力の発生機構、タイヤ特性が車両運動に及ぼす影響等を紙面の都合上、断片的にしか説明できなかったが、タイヤの特性を知り、それを十分に利用することが、より高い操縦安定性をもつ自動車の設計につながることを理解していただけたと思う。また、本稿が自動車工学を学ぼうとする学生諸氏のタイヤ工学の理解の一助になれば幸いである。