タイヤ物理特性モデルのトレッド部のモデル化に関する研究
(TM Tire Model の理論的妥当性の検証)豊島 貴行^{*1}, 松澤 俊明^{*2}, 穂高 武^{*2}, 樋口 英生^{*1}Research on tread modeling of physical characteristics tire model
(Verification of theoretical validity of TM Tire Model)Takayuki TOYOSHIMA^{*1}, Toshiaki MATSUZAWA^{*2}, Takeshi HOTAKA^{*2} and Eisei HIGUCHI^{*1}^{*1}HONDA R&D Co., Ltd. Innovative Research Excellence, 4630 Shimotakanezawa, Haga-machi, Haga-gun, Tochigi 321-3393, Japan^{*2}HONDA Motor Co., Ltd. Automobile Operations, 4630 Shimotakanezawa, Haga-machi, Haga-gun, Tochigi 321-3393, Japan

Received: 30 December 2020; Revised: 22 March 2021; Accepted: 7 May 2021

Abstract

In the early stages of chassis model-based development, we needed a tire physical model that could be handled easily, and we devised the TM tire model. Some tire samples have verified that the TM tire model is superior to existing physical property models. The feature of the TM tire model is that it improved the modeling of tire tread parts. This improvement has made it possible to embody the mechanism of the cornering force in the small slip angle range. In this paper, we theoretically prove that the way of thinking of the TM tire model has universal validity and explain its mechanism.

Keywords : Vehicle dynamics, Performance design, Cornering stiffness, Cornering compliance, Tire model

1. 緒 言

1・1 背景

乗用車の操縦安定性はドライバの安全と安心に関わるシャシ性能のひとつであり、シャシ開発での検討には欠かせない。操縦安定性の高さは操舵応答特性や直進安定性の計算等から得られるさまざまな操舵応答パラメータを指標として表現されることが多い。代表的な操舵応答パラメータは図1に示すような車両運動を表わす運動方程式から求めることができる。この式から車両運動を司っている主要要素は、車両の質量 M や慣性モーメント I などの Mass 要素、車両のホイールベース W などの Dimension 要素、および等価コーナリングスティフネス K^* に代表される Stiffness 要素の三者であることがわかる。等価コーナリングスティフネス K^* とはタイヤ単体のコーナリングスティフネスに、サスペンションやステアリング機構などのシャシ要素の影響を加味した、車体からみた見かけ上のコーナリングスティフネスのことである (酒井, 1987)。同様な概念として等価コーナリングパワーと表現されることもある (山本, 2015)。本稿ではタイヤ単体コーナリングスティフネスを、便宜上単にコーナリングスティフネス K と記載する。コーナリングスティフネス K の値は、等価コーナリングスティフネス K^* の基礎となる特性値のため、シャシ開発の上でも特に重要視されるタイヤ単体コーナリング特性の一つである。

図2は、コーナリングスティフネス K に関して、タイヤ仕様の検討の流れを簡易に示した例である。この際にシミュレーションで使われるタイヤモデルにはいくつかの種類が存在するが (水野, 2010)、タイヤ仕様の検討についてはタイヤ物理特性モデルが適している。タイヤ物理特性モデルは、図2の太枠で示すフェーズで用いられる。タイヤ物理特性モデルはタイヤ各部位の剛性とコーナリングスティフネス K の関係を決めており、タイヤ以外のシャシ要素の仕様も合わせて検討する場合には、できるだけ高い精度のタイヤ物理特性モデルであることが望ましい。またモデルベース開発における初期段階においては、多岐にわたる仕様についてさまざまなケース

タディを行うため、十分な精度を有するとともに簡便に扱うことが可能なタイヤ物理特性モデルであることも求められる（豊島他，2017）．既存の代表的なタイヤ物理特性モデルとしては FIALA Model（Fiala, 1954），FIALA+A Model（田中，景山，2006），Neo-FIALA Model（加部，宮下，2003，宮下，加部，2003）などが存在するが，シャシのモデルベース開発が進歩するに従い，従来よりも扱いやすかつ精度の高い新しいタイヤ物理特性モデルへの要求が高まっていった．

$$\begin{pmatrix} \frac{d\beta(t)}{dt} \\ \frac{dr(t)}{dt} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \beta \\ r \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} b_1 \\ b_2 \end{pmatrix} \theta$$

$$a_{11} = \frac{1}{MV} (2K_f^* + 2K_r^*)$$

$$a_{12} = 1 + \frac{1}{MV^2} (2K_f^* W_f - 2K_r^* W_r)$$

$$a_{21} = \frac{1}{MW_f W_r} (2K_f^* W_f - 2K_r^* W_r)$$

$$a_{22} = \frac{1}{MW_f W_r V} (2K_f^* W_f^2 + 2K_r^* W_r^2)$$

$$b_1 = \frac{1}{MV} (2K_f^*)$$

$$b_2 = \frac{1}{MW_r} (2K_f^*)$$

Fig. 1 Typical equation of motion that represents the in-plane motion of a vehicle. The three main elements that control vehicle motion are the mass element(M) and moment of inertia(I) of the vehicle, the dimension element such as the wheelbase(W) of the vehicle, and the stiffness element represented by the equivalent cornering stiffness (K^*).

Fig. 2 Example that briefly shows the flow of tire specification examination for cornering stiffness (K). The tire physical characteristic model is used in the phase shown by the thick frame.

1・2 既存研究

一般的なタイヤは，図3に示すように主に，サイドウォール部，ベルト部，トレッド部，の三つの剛性要素に分類することができる．タイヤの仕様検討では狙いとするタイヤのコーナリング特性となるように，これら三つの剛性要素のバランスの組み合わせを考察することが基本となる．FIALA Model では三つの剛性要素の組み合わせの考え方からコーナリングフォースを求める式（1）を導出した．

$$F_y = C_{0_Tread} L_h^2 \left\{ \frac{1}{2} \tan \beta_t - \frac{\alpha L F_y}{2} \left(\frac{1}{2} - \frac{L_1}{3L} \right) \right\} - 4\mu p_m b L \left(\frac{1}{6} - \frac{L_1^2}{2L^2} - \frac{L_1^3}{3L^3} \right) \quad (1)$$

$$L_h = L \left(1 - \frac{C_{0_Tread} L \tan \beta_t}{4\mu p_m b - \frac{C_{0_Tread} \alpha L^2}{2} F_y} \right)$$

式 (1) を横滑り角 β_t について微分し $\beta_t = 0$ としたものが、コーナリングスティフネスの式 (2) として定義できる。

$$K = \frac{C_{0_Tread} L^2}{2 \left(1 + \frac{C_{0_Tread} \alpha L^3}{12} \right)} = \frac{1}{\frac{2}{C_{0_Tread} L^2} + \frac{\alpha}{6} L} \quad (2)$$

田中, 景山等は式 (2) の逆数を取り回帰係数を容易に求めることができる接地長 L に関する多項式 (3) に変形した (田中, 景山, 1999)。

$$\frac{1}{K} = 2C_{0_Tread}^{-1} \cdot L^{-2} + \frac{1}{6} \alpha \cdot L \quad (3)$$

本稿では式 (3) の逆数の形式で表記した式 (4) をコーナリングスティフネスに関する FIALA Model と記載する。

$$K = \left\{ 2C_{0_Tread}^{-1} \cdot L^{-2} + \frac{1}{6} \alpha \cdot L \right\}^{-1} \quad (4)$$

また, 田中, 影山等は式 (4) に補正係数として定数 A を加えた式 (5) を考案した。本稿ではこのタイヤ物理モデルを便宜上 FIALA+A Model と記載する。

$$K = \left\{ 2C_{0_Tread}^{-1} \cdot L^{-2} + \frac{1}{6} \alpha \cdot L + A \right\}^{-1} \quad (5)$$

一方 Neo-FIALA Model では FIALA Model に対して捻じれ方向の剛性 G_{Side} を付与し, コーナリングフォースとセルフアライニングトルクの過渡的な変化を合理的に説明した (宮下, 2013)。Neo-FIALA Model を元にコーナリングスティフネスを表す式を接地長 L に関する多項式に変形したものが式 (6) である。本稿ではこれを Neo-FIALA Model と記載する。いずれのタイヤ物理特性モデルも用途により現在も広く活用されている。FIALA+A Model は高い精度でコーナリングスティフネスを同定することができ, Neo-FIALA Model は接地面に生じる力の過渡的な力の変化を考察する際に有効なことが, それぞれの主な利点としてあげられる (Nakajima, 2019)。

$$K = \left\{ 2C_{0_Tread}^{-1} \cdot L^{-2} + \frac{1}{6} \left(\alpha + \frac{1}{G_{Side}} \right) \cdot L + B_{Side} \cdot L^4 \right\}^{-1} \quad (6)$$

Fig. 3 About tires captured by the tire physical model.
It is interpreted as a combination of three types of stiffness elements.

これらの既存のタイヤ物理特性モデルに加え、前研究では新たに TM Tire Model (Tread Mechanics Tire Model) を提案した。TM Tire Model の利点は、タイヤ仕様とシャシ仕様の検討を同時に進める際に広範なサイズのタイヤに対して有効に活用できるところである(豊島, 松澤, 2019)。表 1 は FIALA Model, FIALA+A Model, Neo-FIALA Model および TM Tire Model の式を接地長 L の次数に関して整理し比較したものである。FIALA+A Model は接地長に依存しない剛性要素 A が加えられていること、Neo-FIALA Model については接地長 L の 4 乗に比例して高まる剛性要素 B_{Side} が加えられていることがわかる。これらに対し TM Tire Model の特徴は、接地長 L に比例する剛性要素を有するという点である。前研究では 20 余りのさまざまなタイヤデータサンプルを対象に分析を進め、TM Tire Model の有効性について可能性を示した。ただしその考え方が全てのタイヤに対して普遍的に適用できると言い切るには不十分であった。十分とするためには理論的な追加検証により TM Tire Model の考え方の合理性を示す必要があった。

Table 1 Comparison of tire physical models. They are expressed arranged by the order of "L" so that the difference in features becomes clear.

FIALA	$K = \left\{ 2C_{0_Tread}^{-1} \cdot L^{-2} + \frac{1}{6} \alpha \cdot L \right\}^{-1}$	(7)
FIALA + A	$K = \left\{ 2C_{0_Tread}^{-1} \cdot L^{-2} + \frac{1}{6} \left(\alpha + \frac{1}{G_{\text{Side}}} \right) \cdot L + B_{\text{Side}} \cdot L^4 \right\}^{-1}$	(8)
Neo-FIALA	$K = \left\{ 2C_{0_Tread}^{-1} \cdot L^{-2} + \frac{1}{6} \alpha \cdot L + A \right\}^{-1}$	(9)
TM Tire	$K = \left\{ 2C_{0_Tread}^{-1} \cdot L^{-2} + C_{0_Tread}^{-1} \cdot L^{-1} + \frac{1}{6} \alpha \cdot L \right\}^{-1}$	(10)

1・3 研究目的

本研究の目的は、TM Tire Model の考え方が、既存のタイヤ物理特性モデルに対して普遍的な有効性を持つことを証明することである。そのために既存のタイヤ物理特性モデルのなかでも、とくに FIALA Model, FIALA+A Model の二者に着目し分析をすすめる。これは前研究において Neo-FIALA Model はタイヤの過渡的な変化を表現するのに適したモデルであり、定常状態のタイヤコーナリング特性のデータから同定することに対しては、複雑な手続きを要するため扱いが困難であることが明らかになったからである。以下に本研究目的達成のために定めた目標を記す。

- (1) 十分な量のデータサンプルを対象にコーナリングスティフネスの同定を行い、FIALA Model と FIALA+A Model の両者と比較し TM Tire Model の普遍的な有効性を統計的に検証する。
- (2) タイヤの諸現象を精度よく再現する詳細な FEM Tire Model でコーナリングスティフネスを算出し、TM Tire Model の計算結果と傾向が一致することを検証する。
- (3) TM Tire Model によるタイヤの物理的な特性(剛性要素)の表現が、実際のタイヤに生じる現象と照らし合わせて合理的な解釈になっていることを示す。

2. モデルの同定成績

2・1 タイヤ単体試験データサンプルについて

図 5 はタイヤ物理特性モデルの比較のために、収集したタイヤのデータサンプルを呼び幅、扁平率、内径、でサイズを分類した分布図である。大小さまざまなサイズのタイヤについて、統計的に隔たりのない分析を行うため総数 533 本のタイヤについてコーナリング特性を計測した。また図 6 は本研究のタイヤ単体計測に用いた試験機である。A&D 社製のフラットベルトコーナリング試験機であり、主なスペックを併記した(酒井他, 2013)。現在も稼働中の試験機であり複数の研究機関において同型の試験機が導入されている実績あるものである。

Fig. 5 Distribution of tire data collected for verification. From this distribution map, it is can see that it covers a wide range from small size tires to large size tires.

Fig. 6 Tire testing machine used in this study. Flat belt type tire testing equipment manufactured by "A & D".

2・2 コーナリングコンプライアンスのモデル同定

コーナリングスティフネス同定結果を見る前に、タイヤ単体のコーナリングコンプライアンス特性（以後コーナリングコンプライアンス CC ）の重回帰分析によるモデル同定結果を比較する。タイヤにスリップ角が生じるとコーナリングフォース CF が発生しタイヤは撓む。図 7 はコーナリングフォース CF が発生しているタイヤの撓む様子を撮影したものである。コーナリングフォース CF が発生する方向へタイヤが撓む様子は目視で確認す

Fig. 7 Tire flexing due to cornering force and the stiffness element of the tire physical model. There is no element that shows negative stiffness in the tire.

ることができ、力の向きと逆方向に変位する要素の存在はみあたらない（詳細は3章にて説明）。コーナリングコンプライアンス CC は単位コーナリングフォース CF あたりの撓み量 δ に相当するため、タイヤ物理特性モデルによるコーナリングコンプライアンス CC 同定結果は、タイヤ各部位の剛性要素について力と変位の方向が同方向であることを示す正の値でなければならない。つまり重回帰分析の結果、すべての剛性要素を表す係数が正の値で同定されなければ、タイヤ物理特性モデルとして不適である。したがって負の値が生じるケースを不合格として、全同定数に対する合格数をカウントすれば、合格率 P_1 で各タイヤ物理特性モデルの有効性を比較できる。

図8はテストサンプル群を呼び幅、扁平率、内径、で分類し、それぞれ FIALA Model, FIALA+A Model および TM Tire Model の三者についてコーナリングコンプライアンス同定の合格率 P_1 をグラフにしたものである。この図から、FIALA+A Model に対して総じて FIALA Model と TM Tire Model の合格率 P_1 は高く、ほぼ 100%に近い値になっていることがわかる。つまり FIALA Model と TM Tire Model は重回帰分析による同定により各剛性要素の値が負になるという不具合が生じにくいタイヤ物理特性モデルであるといえる。また、幅が広いほど、扁平率が小さいほど、内径が大きいほど、合格率 P_1 の値の差は大きくなり、いわゆるハイパフォーマンスタイヤといわれる高性能タイヤほど FIALA+A Model では同定が困難になる傾向があることを示唆している。

Fig. 8 Pass rate (P_1) of each tire model for identifying cornering compliance.
The result is that the P_1 value of FIALA + A Model is relatively low.

2・3 コーナリングスティフネスのモデル同定

つぎにコーナリングスティフネス K について各タイヤ物理特性モデルの有効性を比較する。コーナリングスティフネス K は単位スリップ角あたりのコーナリングフォース CF であり、コーナリングコンプライアンス CC の逆数に相当する。つまりタイヤ物理モデルから計算されるコーナリングコンプライアンス CC の逆数と、タイヤ試験機で計測されたコーナリングスティフネス K の値と比較し、両者の相関分析結果をもって各タイヤ物理特性モデルの有効性を比較することができる。相関係数は高ければ高いほど成績が良いことを意味するが、ここでは一つの目安として、相関係数が 0.995 以上となる場合を合格とし 0.995 未満を不合格として合格率 P_2 を求めた。

図9はテストサンプル群を呼び幅、扁平率、内径、で分類し、FIALA Model, FIALA+A Model および TM Tire Model

Fig. 9 Pass rate (P_2) of each tire model for identifying cornering compliance.
The result is that the P_2 value of FIALA Model is relatively low.

Model の三者についてコーナリングスティフネス K の同定の合格率 P_2 をグラフにしたものである。この図からは、FIALA+A Model と TM Tire Model の合格率 P_2 はほぼ 100%に近い値となっていることがわかる。これは FIALA+A Model と TM Tire Model はコーナリングスティフネスを高い精度で同定することができるモデルであることを意味している。それに対し FIALA Model の合格率 P_2 は総じて低い値となっており、この場合 FIALA Model ではコーナリングスティフネスについて十分な精度が得にくいという結果となった。

2・4 タイヤモデルの有効性比較

実際に仕様検討に用いるタイヤ物理特性モデルは、コーナリングコンプライアンス CC の同定もコーナリングスティフネス K の同定も、ともに高い合格率となっていることが望ましい。前者の不合格は仕様に反映することが困難となることを意味しており、後者の不合格は車両運動性能に基づく検討の精度が下がることを意味している。そこでコーナリングコンプライアンス CC とコーナリングスティフネス K の両方の同定で合格したケースの合格率 P を求め比較したグラフが図 10 である。この図からコーナリングコンプライアンス CC においては FIALA Model と TM Tire Model が、定常コーナリングスティフネス K においては FIALA+A Model と TM Tire Model が比較的良好な同定結果を得られていることがわかる。このように TM Tire Model は両方において合格率 P が 100%に近い値を示しており、さまざまなサイズのタイヤで普遍的に良好な結果を得ることが統計的に検証された。

Fig. 10 Pass rate (P) of each tire model for identifying cornering stiffness. The result is that the “ P ” value of TM Tire Model is relatively high.

タイヤ物理特性モデルによるコーナリングコンプライアンスの同定結果の具体例を図 11 にしておく。比較的小型な車両に装着されるタイヤサイズの代表例として 185/60R15 サイズのサマータイヤと、比較的大型な車両に装着されるタイヤサイズの代表例として 235/40R18 サイズのサマータイヤの二つの事例について、FIALA Model, FIALA+A Model, Neo-FIALA Model および TM Tire Model のそれぞれのタイヤ物理特性モデルで、コーナリングコンプライアンスを同定した結果である。グラフの破線で囲まれた箇所で、撓み量の値が負になっていることがわかる。このように負の値が生じる同定結果になった場合が不合格とカウントされる。

また図 12 は同じく 185/60R15 サイズのサマータイヤと、235/40R18 サイズのサマータイヤにおいて、それぞれのタイヤ物理特性モデルでコーナリングスティフネスを同定した例である。比較的高い荷重域で計算値と計測値の値のズレが大きくなる傾向がみとめられるが、このズレは小さいほどよい。いずれのサイズのタイヤにおいても TM Tire Model は比較的良好な同定結果が得られていることを示している。

Fig. 11 An example of cornering compliance identified using two typical size tire samples. If the identification result of cornering compliance is a negative value, it means that the rigidity element with a negative value is included and the result is not passed. It can be seen that a negative value occurs at the part surrounded by the broken line.

Fig. 12 An example of identified cornering stiffness using two typical size tire samples. It can be seen that there is a tendency for differences to occur depending on each tire model, especially in the high load region.

3. 詳細なタイヤモデルによる検証

3・1 詳細なタイヤモデルについて

図 13 はタイヤの諸現象を分析するために構築した、詳細な三次元 FEM Tire Model (詳細 FEM Model) のイメージ図である。本詳細 FEM Model は実際のタイヤを材料毎に細分化し、それらの要素全てを個々に物性モデルに置き換え、仮想空間に一本のタイヤを作り出すようにして構築したモデルである。具体的には汎用陽解法有限要素法ソフト PAM-CRASH を使用し、全体要素数は約 230 万要素からなりトレッド部は SOLID 要素、ベルト部は異方性を考慮した SHELL 要素にて構成し、内部空気圧については 220kPa を基準の条件として設定した。本詳細 FEM Model では、接地面の様子 (接地圧や接地形状など) や、タイヤの撓み形状などもよく再現していることを

予め確認している. この詳細 FEM Model を使った計算結果から導かれるコーナリングスティフネス K の値と, TM Tire Model で同定したコーナリングスティフネス K の値について比較検証する.

Fig. 13 Image of 3D detailed FEM Tire Model. The general-purpose explicit method finite element method software “PAM-CRASH” was used. It was composed of 2.3 million SOLID and SHELL elements and 2 million nodes. The tread part was modeled with SOLID, and the belt part was composed of SHELL elements considering anisotropy. The bead wire is reproduced with the BAR element. The interior is filled with an air pressure of 220 kPa.

3・2 計算結果比較

図 14 は実際にタイヤ単体コーナリング試験機で計測された値と, 詳細 FEM Model の計算結果を比較したグラフである. スリップ角 β_i について 0.5° と 1.0° の二条件, 荷重については 500N から 5000N まで連続的に変化させたときのコーナリングフォース CF について比較している. このグラフから, 1.0° 以下の微小なスリップ角の領域における両者の値はよく合致することが確認できる. また両者ともスリップ角 1.0° の値がスリップ角 0.5° の値に対して, 概ね二倍となっていることがわかる. つまり 1.0° 以下の微小なスリップ角領域のコーナリングフォース CF はスリップ角 β_i に対してほぼ線形な特性を持っていることが確認できる.

Fig. 14 Comparison the value calculated by the 3D detailed FEM Tire Model with the measurement for CF . It can be seen that the values of the calculation result and the measurement result of the 3D detailed FEM Model are in good agreement.

図 15 は詳細 FEM Model を使い, トレッド部のベルト層に近いアンダートレッドの剛性を変えた場合と, 接地面に近いトレッドブロックの剛性を変えた場合について, コーナリングスティフネス K を導出して描いたグラフである. 左のグラフがアンダートレッド部の剛性のみを $\pm 40\%$ 変化させた場合であり, 右のグラフがトレッドブロック部の剛性のみを $\pm 40\%$ 変化させた場合である. 二つのグラフを比較すると, アンダートレッド部の剛性を変化させた場合とトレッドブロック部の剛性を変化させた場合とでは, コーナリングスティフネスの変化の形が違ってくる.

Fig. 15 Changes in cornering stiffness characteristics (K) when the stiffness of the tread part of the detailed 3D detailed FEM Tire Model is changed. The graph on the left is due to the study in stiffness of the under-tread. The graph on the right is due to the study in stiffness of the tread-block.

図 16 は変化の形の違いを明確にするために、荷重 1000[N], 3000[N], 5000[N], の 3 条件において、基準値からの変化量を棒グラフで表したものである。アンダートレッド部の剛性を変化させた場合は、比較的低荷重域である 3000[N]近傍で差が大きくなるのに対し、トレッドブロック部の剛性を変化させた場合は、比較的高荷重域の 5000[N]近傍で差が大きくなるのがわかる。

Fig. 16 A description of changes in cornering stiffness characteristics (K) for three typical load conditions (1000 [N], 3000 [N], 5000 [N]). The characteristics of the change differ between when the stiffness of the under-tread is changed and when the stiffness of the tread-block is changed.

一方 TM Tire Model において $C_{0_Tread-1}$ と $C_{0_Tread-2}$ の値をそれぞれ変化させてコーナリングスティフネスを計算した結果が図 17 である。左のグラフが $C_{0_Tread-1}$ を $\pm 5\%$ 変化させたもので、右のグラフは $C_{0_Tread-2}$ を $\pm 40\%$ 変化させたものである。 $C_{0_Tread-1}$ と $C_{0_Tread-2}$ の変化の度合いは詳細 FEM Model で検討されたコーナリングスティフネスの変化と同程度の差異が生じるように調整して決めた。前述の FEM Model の分析同様に、荷重 1000[N], 3000[N], 5000[N], の 3 条件で基準からの変化量をグラフにしたものが図 18 である。図 16 と図 18 を比較すると、詳細 FEM Model のアンダートレッドの剛性変化は TM Tire Model の $C_{0_Tread-1}$ の値を変化させた場合と類似しており、詳細 FEM Model のトレッドブロックの剛性変化は TM Tire Model の $C_{0_Tread-2}$ の値を変化させた場合と類似していることがわかる。

Fig. 17 Changes in cornering stiffness characteristics (K) when the stiffness of the tread part of the TM Tire Model is changed. The graph on the left is due to the study in $C_{0_Tread-1}$. The graph on the right is due to the study in $C_{0_Tread-2}$.

Fig. 18 A description of changes in cornering stiffness characteristics (K) for three typical load conditions (1000 [N], 3000[N], 5000 [N]). The characteristics of the change differ between when $C_{0_Tread-1}$ is changed and when $C_{0_Tread-2}$ is changed. Its characteristics are similar to those were studied in the 3D detailed FEM Tire Model.

4. TM Tire Model の考察

4・1 TM Tire Model のFitting 能力

表 1 に示した各タイヤ物理特性モデルを構成する式の内訳を見ると、コーナリングスティフネス K の逆数、つまりコーナリングコンプライアンス CC は接地長 L の次数違いの項を線形結合した型式となっていることがわかる。例えば式 (11) のように、接地長 L の次数で整理したコーナリングコンプライアンス CC の式を定義すれば、係数 $a_2 = a_3 = a_5 = a_6 = a_7 = 0$ とおくことにより FIALA Model の式と同型式になる。同様に係数 $a_2 = a_5 = a_6 = a_7 = 0$ とすれば FIALA+A Model, $a_2 = a_3 = a_5 = a_6 = 0$ とすれば Neo-FIALA Model の式と同形式になる。つまり a_1 , a_2 , a_3 , a_4 , a_5 , a_6 , a_7 , はタイヤを構成する各部剛性要素に対応しており、表 2 は各タイヤ物理特性モデルが反映する剛性要素を一覧表にしたものである。

$$\text{Cornering Compliance (CC)} = a_1 \cdot L^{-2} + a_2 \cdot L^{-1} + a_3 \cdot L^0 + a_4 \cdot L^1 + a_5 \cdot L^2 + a_6 \cdot L^3 + a_7 \cdot L^4 \quad (11)$$

ここで特に FIALA Model, FIALA+A Model および TM Tire Model を構成する四種類の剛性要素 (a_1, a_2, a_3, a_4) に着目し, コンプライアンス (撓み量 δ) の荷重依存性を表現したグラフを図 19 に示す. 値が小さいほど撓み量は小さく剛性が高いことを意味している. コーナリングコンプライアンス CC は, これらの剛性要素の値を足し合わせたものとなる. このような考え方で FIALA Model, FIALA+A Model および TM Tire Model のコーナリングコンプライアンス CC の内訳を象徴的に表現したものが図 20 である.

Table 2 Stiffness element adopted by each tire physical model. It indicates that each tire model incorporates a rigid element marked with "○".

	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5	a_6	a_7
	Tread rubber (1)	Tread rubber (2)	Correction factor	Side wall Belt (1)	—	—	Side wall Belt (2)
FIALA Model	○			○			
FIALA + A Model	○		○	○			
Neo-FIALA Model	○			○			○
TM Tire Model	○	○		○

Fig. 19 Load dependence of each tire stiffness element (a_1, a_2, a_3, a_4). Since stiffness is the inverse of the amount of deflection, a_1 is the coefficient that relates the stiffness element that increases in proportion to the square of the load, a_2 is the coefficient that relates the stiffness element that increases in proportion to the load, and a_3 is the coefficient that relates the stiffness element that does not depend on the load, and a_4 is the coefficient that relates the stiffness element that decreases in proportion to the load.

コーナリングコンプライアンス CC の内訳をみると, 4 種類の剛性要素のうち荷重変化に対してコーナリングスティフネス K の特性が線形となる剛性要素は a_2 のみである. 一方でコーナリングスティフネス K の荷重に対する変化は, 一般的に低荷重領域ではほぼ線形特性を示すことが知られており (酒井, 1987), この特性を表現するうえで剛性要素 a_2 は適している. つまりコーナリングスティフネス K の荷重依存性が線形性を示すタイヤほど a_2 を含む TM Tire Model による同定が適すると考えられる. 実際にハイパフォーマンスタイヤと呼ばれる高性

能タイヤほど、コーナリングスティフネス K の対荷重特性は線形に近い変化をする傾向があり、呼び幅が広く扁平率が低いサイズのタイヤ程 TM Tire Model の同定成績が比較的良くなるという結果と合致する。

Fig. 20 Breakdown of cornering compliance for each tire model. The TM Tire Model has “ a_2 ” that expresses the stiffness that is inversely proportional to load.

また FIALA+A Model に含まれる剛性要素 a_3 を TM Tire Model にも加えて、式 (12) に示すようなタイヤモデルを定義して分析してみる。係数 A' が加わるぶんだけ同定の自由度が増すため、更に高精度なタイヤ物理特性モデルとなることが期待できる。

$$\text{Cornering Compliance} = 2C_{0_Tread-1}^{-1} \cdot L^{-2} + C_{0_Tread-2}^{-1} \cdot L^{-1} + \frac{1}{6} \alpha \cdot L + A' \quad (12)$$

しかし 2 章で論じた方法と同様にして実際に合格率 P を調べてみると FIALA +A Model とほぼ同等という結果となり TM Tire Model の合格率 P に及ばなかった。その原因はコーナリングコンプライアンス CC の同定の際に負の剛性要素が同定されてしまうことによる。つまり係数 A' による補正が本来は必要のない剛性要素を表現してしまい、他の必要な剛性要素の同定誤差を助長してしまうためと考えられる。したがって TM Tire Model に補正係数 A' を加えるのは必ずしも望ましいといえない。

4・2 TM Tire Model の考え方

接地長 L に比例して増大する剛性要素を含む事が TM Tire Model の最大の特徴である。これはトレッドベースに二種類の剛性要素を設定していることに相当する。一方は接地長 L の二乗に比例して剛性が増加する要素 a_1 であり、もう一方は接地長 L に比例して剛性が増加する要素 a_2 である。図 21 は TM Tire Model の接地面近傍で撓むサイドウォール、ベルトおよびトレッドベースについて模式的に示した絵である。この絵は TM Tire Model の内訳がわかるよう撓む様子を強調して表現している。既存のタイヤ物理特性モデルの考え方と異なるところは、トレッドベースの撓みが接地面内で三角形でなく台形状で捉えているところである。図 22 はトレッドベースの撓みを抽象的に描いたものである。トレッドゴム全体の剛性が二種類の要素の剛性を足し合わせたものと捉え、台形状に撓む接地面を表現することが可能になることを示している。タイヤのトレッドベースには複数種類のゴムが存在することが一般であり、また溝やトレッドパターンにより見かけ上のトレッドベースの剛性は複雑に変化する。したがってトレッドベース断面の剛性は一様ではないと考える方が自然である。単一の係数でトレッドベース部の剪断剛性を正確に表現するのは難しいが、接地長 L の二乗に比例して剛性が増加する要素 a_1 と、接地長 L に比例して剛性が増加する要素 a_2 の二種類の剛性要素を直列に結合させて、トレッドベース全体の剪断剛性を表現すれば、複雑に分布しているトレッドゴムの一様でない剪断剛性を、全体としては簡便に二種類の剛性に置き換えて表現することができるということを意味している。従来のタイヤ物理特性モデルよりも的確にトレッドベースのメカニズムを捉えていることで、コーナリングスティフネス K の同定精度が向上したと考えられる。

Fig. 21 How to detect displacement near the tire contact surface with TM Tire Model. A major feature is that the tread section is connected in series with the type of stiffness element. One is a stiffness element that increases in proportion to the load, and the other is a stiffness element that increases in proportion to the square of the load.

Fig. 22 Differences between the FIALA Model and TM Tire Model regarding the deflection of the tire tread surface. The FIALA Model approximates the generation of lateral force in the form of a triangle, assuming that the value of lateral force is zero at the front end of ground contact. On the other hand, in the TM Tire Model, a lateral force is generated even at the front end of the ground contact, and the generation of the lateral force is approximated by a trapezoidal shape.

5. 結 言

本研究では TM Tire Model の既存のタイヤ物理特性モデルに対する有効性を示すことを試み、以下の結論を得ることができた。

- (1) 553 サンプルに及ぶタイヤ単体計測データを使いタイヤ物理特性モデルによる同定を行い、コーナリングコンプライアンスおよびコーナリングスティフネスについて TM Tire Model はタイヤサイズによらず普遍的に高い精度で同定できることを検証した。
- (2) TM Tire Model の計算結果は詳細 FEM Model の計算結果とも傾向が一致することを検証した。
- (3) レッドゴムの剪断剛性は接地長 L の二乗に比例する剛性要素と接地長 L に比例する剛性要素の二種類に分類して捉えることにより概ね表現可能であり、この考え方を適用することでコーナリングスティフネスの同定精度は向上することを示した。

なお、本研究では定常状態で観測されるコーナリングスティフネス、およびコーナリングコンプライアンスの同定において TM Tire Model の有効性を証明したが、車両運動の計算目的に応じて適するタイヤモデルは異なるため、既存のタイヤ物理特性モデルを用いた方が有効な場合も多々存在することを付記しておく。設計者や研究者が目的に応じて計算に適したタイヤ物理特性モデルを選択するにあたり、TM Tire Model は有効なひとつの選択肢を新たに加えたものと考えらる。

6. 記号一覧

M	: 車両質量 [kg]
I	: 車両慣性モーメント [kg-m ²]
W	: ホイルベース [m]
V	: 車体速度 [m/s]
K^*	: 等価コーナリングスティフネス [N/rad]
K	: コーナリングスティフネス [N/rad]
CC	: コーナリングコンプライアンス [rad/N]
CF	: コーナリングフォース [N]
β	: 車体スリップ角 [rad]
β_t	: タイヤスリップ角 [rad]
γ	: 車体ヨーレート [rad/s]
θ	: 操舵角 [rad]
δ	: タイヤの撓み量 [m]
$\delta_{\text{Side\&Belt}}$	: サイドウォール部およびベルト部の撓み量 [m]
$\delta_{\text{Tread-1}}$	: トレッドゴムの撓み量 (TM Tire Model L 二乗比例要素) [m]
$\delta_{\text{Tread-2}}$	: トレッドゴムの撓み量 (TM Tire Model L 比例要素) [m]
C_{0_Tread}	: トレッドドラバーせん断剛性 [N/m ²]
$C_{0_Tread-1}$	: トレッドドラバーせん断剛性 (TM Tire Model L 二乗比例要素) [N/m ²]
$C_{0_Tread-2}$	: トレッドドラバーせん断剛性 (TM Tire Model L 比例要素) [N/m]
EI_{Belt}	: ベルト面内曲げ剛性 [Nm ²]
k_{Side}	: サイドウォール横剛性 [N/m ²]
G_{Side}	: サイドウォールねじり剛性 [Nm/rad]
B_{Side}	: $(1/72 G_{\text{Side}}) \cdot \alpha \cdot C_{0_Tread}$ [1/Nm ⁴]
L	: 接地長 [m]
L_h	: 粘着域から滑り域に切り替わる位置と接地前端の距離 [m]
μ	: 地面とトレッドゴム間の摩擦係数 [-]
ρ_m	: 最大接地圧[N/m ²]
b	: 接地幅 [m]
α	: $(1/4EI_{\text{Belt}})^{3/4} \cdot (1/k_{\text{Side}})^{1/4}$ [1/Nm]
A	: 補正係数 [rad/N]
P	: タイヤモデル同定合格率 [%]

文 献

- Bundorf, T. and Leffert, R. L., The cornering compliance concept for description of vehicle directional control properties, SAE Transactions, Vol. 85 (1976), pp. 2278-2291.
- Fiala, E., Seitenkräfte am rollenden luftreifen, VDI zeitschrift, Vol. 96, No. 29 (1954), pp. 973-979.
- 樋口明, 車両運動解析のためのタイヤモデル, 自動車技術会論文集, Vol. 45, No. 1 (2014), pp. 101-107.
- 加部和幸, 宮下直士, 解析的タイヤモデルによるコーナリングフォースの取扱い, 自動車技術会学術講演会前刷集, No. 76-03 (2003), pp. 5-8.
- 宮下直士, 加部和幸, 解析的タイヤモデルによるコーナリングパワーの取扱い, 自動車技術会学術講演会前刷集, No. 76-03 (2003), pp. 1-4.
- 宮下直士, 解析的タイヤモデルによる過渡コーナリング特性の取り扱い, 自動車技術会論文集, Vol. 44, No. 6 (2013), pp. 1391-1396.
- 水野雅彦, 車両運動解析用タイヤモデルに関する研究, 名古屋大学博士論文 (2010), pp. 13-159.

- 村田智史, 大竹浩文, 星野光弘, 内田智, 藤原真一, 超小型 FF 車の運動性能とサスペンション, 自動車技術会論文
文集, Vol.41, No.2 (2010), pp.201-206.
- Nakajima, Y., Advanced Tire Mechanics, Springer Nature Singapore Pte Ltd. (2019), pp.722-768.
- 酒井秀男, タイヤ工学, グランプリ出版 (1987), pp.163-262.
- 酒井智紀, 日下馨, 佐藤祐二, フラットベルト式サスペンションタイヤ試験機, Honda Technical Review, Vol.25, No.2
(2013), pp. 64-69.
- 田中克則, 景山一郎, 設計パラメータ推定のためのタイヤモデルに関する研究, 自動車技術会論文, Vol.30, No.2
(1999), pp.99-104.
- 田中克則, 景山一郎, 車両運動力学とタイヤ構造力学に基づくタイヤ設計手法に関する研究, 日本ゴム協会技術
論文, Vol. 79, No. 4 (2006), pp.225-230.
- 豊島貴行, 松澤俊明, コーナリングスティフネスに関する物理特性タイヤモデルの研究 (仕様検討に適した新し
いタイヤモデルの提案), 日本機械学会論文, Vol.85, No.880 (2019), DOI:10.1299/transjsme.19-00284.
- 豊島貴行, 松澤俊明, 伊藤憲悟, 遠藤喜章, 高野広喜, 牛村智也, 量産車の MBD におけるシャシ性能設計技術
の構築, Honda Technical Review, Vol.29, No.1 (2017), pp. 49-58.
- 山本真規, 自動車の操縦性安定性の基本設計とこれに基づくシャシ制御に関する研究, 東京大学博士論文 (2015),
pp. 32-40.

References

- Bundorf, T. and Leffert, R. L., The cornering compliance concept for description of vehicle directional control properties, SAE
transactions, Vol. 85 (1976), pp. 2278-2291.
- Fiala, E., Seitenkr afte am rollenden luftreifen, VDI zeitschrift, Vol. 96, No. 29 (1954), pp. 973-979.
- Higuchi, A., Tire model for vehicle dynamic analysis, transactions of society of automotive engineers of Japan, Vol.45, No.1
(2014) pp. 101-107 (in Japanese).
- Kabe, K. and Miyashita, N., A study of cornering force by use analytical tire model, 2003 JSAE Congress (Autumn)
Proceedings, No. 76-03 (2003), pp. 5-8(in Japanese).
- Miyashita, N. and Kabe, K., A study of cornering power by use of analytical tire model, 2003 JSAE Congress (Autumn)
Proceedings, No. 76-03 (2003), pp.1-4 (in Japanese).
- Miyashita, N., A study of transient cornering property by use of an analytical tire model, Transactions of Society of Automotive
Engineers of Japan, Vol.44, No. 6 (2013), pp.1391-1396 (in Japanese).
- Mizuno, M., Research on tire model for vehicle dynamics analysis, PhD thesis, Nagoya University (2010), pp. 13-159 (in
Japanese).
- Murata, S., Ohtake, H., Hoshino, M., Uchida, A. and Fujiwara, S., Development of vehicle dynamics and suspension for micro
FF car, Transactions of Society of Automotive Engineers of Japan, Vol.41, No.2 (2010) , pp.201-206 (in Japanese).
- Nakajima, Y., Advanced Tire Mechanics, Springer Nature Singapore Pte Ltd. (2019), pp.722-768.
- Sakai, H., TAIYAKOGAKU, Grand Prix BOOK PUBLISHING Co. Ltd. (1987), pp.163-262 (in Japanese).
- Sakai, T., Kusaka, K. and Sato, Y., Flat belt test system for suspension and tire measurement, Honda Technical Review, Vol.
25, No.2 (2013), pp. 64-69 (in Japanese).
- Tanaka, K. and Kageyama, I., Study of tire model for the estimation of design parameters, Transactions of Society of
Automotive Engineers of Japan, Vol. 30, No. 2 (1999), pp.99-104 (in Japanese).
- Tanaka, K. and Kageyama, I., Study of tire design methodology based on vehicle dynamics and tire mechanics, NIPPON
GOMU KYOKAISHI, Vol. 79, No. 4 (2006), pp.225-230 (in Japanese).
- Toyoshima, T. and Matsuzawa, T., Study of physical characteristic tire Model about cornering stiffness (Proposal of new tire
Model suitable for specification consideration), Transactions of the JSME (in Japanese), Vol.85, No. 880 (2019),
DOI:10.1299/transjsme.19-00284.
- Toyoshima, T., Matsuzawa, T., Ito, K., Endo, Y., Takano, H. and Ushimura, T., Development of chassis of performance design
technologies for MBD of mass-production vehicles, Honda Technical Review, Vol. 29, No.1 (2017), pp. 49-58 (in
Japanese).
- Yamamoto, M., Basic design of maneuverability stability of car and research on chassis control based on this, PhD thesis, The
University of Tokyo (2015), pp. 32-40(in Japanese).