

統計タイヤモデルのタイヤ転がり抵抗推定への拡張

Expansion of Statistical Tire Modeling Method to Tire Rolling Resistance Estimation

日 下 馨¹
Kaoru KUSAKA

木 滝 泰 隆¹
Yasutaka KITAKI

古 本 直 己¹
Naoki FURUMOTO

要 旨

開発初期の性能設計に用いる統計タイヤモデルの手法を用いて、タイヤのサイズと内圧のみから転がり抵抗を推定できるよう統計モデルの機能を拡張した。市場で多く流通しサイズも豊富な銘柄のタイヤを選び、コンパウンドと構造を揃えた転がり抵抗の測定結果から、タイヤサイズの転がり抵抗への影響が定量化できた。得られたモデルは、サイズと内圧を変化させた場合の転がり抵抗の増減を精度良く再現できることが検証できた。本モデルを用いることで、膨大な時間の掛かるタイヤ測定をおこなわずに、操安性と燃費性能を両立させる仕様を机上検討できるようになった。

ABSTRACT

The “statistical tire model” method, which is used for performance design in the early stages of vehicle development, was applied in order to expand its function to estimate the rolling resistance of tires just from the information of tire size and its inflation pressure. The influence of tire size on RRC became quantified by using measured rolling resistance of tires that have variation in both its sizes and inflation pressures yet that have the same structure and rubber compound. As a result, a model with good precision was obtained that can estimate the increase/decrease of the rolling resistance with respect to the reference tire if the tire size and its inflation pressure were given. The proposed model made it possible to conduct quantitative parameter studies without carrying out time consuming individual tire measurements.

1. まえがき

自動車は、パーソナルモビリティの利便性を提供することで私たちの生活を豊かにすると同時に、操縦安定性、衝突安全性、居住性や乗心地、省資源性、など多くの背反性能を高いレベルで並立するよう性能を高めてきている。近年では地球温暖化を防止するため、パワープラントの革新による省燃費化技術が進み、シャシ技術においても、低転がり抵抗タイヤで燃費を向上しつつ、操縦安定性や制動性能などを向上する技術が進化している⁽¹⁾。

一方で、これらの性能進化を支える開発技術に目を向けると、複雑化するメカニズムを理解してモデル化し⁽²⁾⁻⁽¹⁰⁾、定量予測に基づいて合理的に設計検討をおこなう性能設計手法が発展してきている^{(11), (12)}。

車両開発の初期には、この性能設計の技術を駆使し、限られたコストやレイアウト制約のもとで目標性能を達成できるよう基本設計をおこなう。また、複数車種の基本設計を一括で企画するプラットフォーム開発では、多くの派生車種を考慮して包括的に設計計画を定めるため、今まで以上に各部品の特性を定量的に把握することが必要になってきている。

自動車の基本性能である走る、曲がる、止まるを支えるシャシ部品について考えると、性能寄与が最も大きい部品の一つであるタイヤは、そのサイズがホイールベースやトレッドなどの車両基本諸元にも影響し、また、その特性や内圧は操縦安定性、制動性能、乗心地、静粛性および燃費などの性能に大きな影響を与える。

プラットフォーム開発でも、そのプラットフォームがカ

¹ 四輪 R&D センター

バーするすべての車種を考慮し、必要十分なタイヤサイズが入るようあらかじめ空間レイアウトを設計しなくてはならない。

このように、タイヤの諸特性を定量把握することは重要な技術課題であるものの、開発初期にタイヤの詳細モデルを入手することは容易ではないため、これまでは、タイヤメーカーに特性予測を依頼したり、市販タイヤを膨大な工数を掛けて解析するしか方法がなく、迅速かつ簡便にタイヤの特性を推定できる技術が望まれていた。

この課題を解決するために、任意のタイヤサイズの平均特性を統計的に予測する統計タイヤモデルと呼ぶ手法を開発し、シャシ初期設計の主に操縦安定性の領域へ適用してきた⁽¹³⁾⁻⁽¹⁵⁾。

この統計タイヤモデルは、数多くのタイヤ特性の情報から一般化されたタイヤ特性を予測できるため、サイズをパラメータとして性能を検討でき、タイヤに求められるさまざまな性能と空間レイアウトを満足するパレート解の探索を効率的におこなうことが可能となる。また、タイヤ特性を理解して設計できるので初期設計の質的向上が図れる。さらに、先行開発やそれぞれの派生機種の開発段階でその都度実施していたタイヤ計測を経ずに性能検討が可能となるので、開発効率の面でも大きな改善が見込める。

そこで、この統計タイヤモデルの手法を、今回、操縦安定性としばしば背反となる転がり抵抗係数 (Rolling Resistance Coefficient: RRC) の予測へも展開し、操縦安定性と転がり抵抗を同時に検討できる環境構築を進めたので、本稿で報告する。

2. 統計タイヤモデル

タイヤモデルは過去 50 年間でさまざまな複雑さと精度のものが提案されてきたが、理論モデルに分類される詳細物理モデル、シンプル物理モデル、そして実験同定モデルに分類される補間近似モデル、特性同定モデルの 4 カテゴリーに大きく分類される⁽¹⁶⁾。

統計タイヤモデルは実験同定モデルの一形態であるが、Magic Formula を代表とする今までのモデルが一つ一つのタイヤ特性を精度良くモデル化しようとする個別的タイヤモデルとすると、統計タイヤモデルはタイヤという部品を群としてとらえ、その性質をサイズや内圧といったメタ情報も含めて一括してモデル化する一般化タイヤモデルと言える (Table 1)。

この統計タイヤモデルは、タイヤサイズや内圧といったメタ情報だけから所望のタイヤ特性を略推定できるので、開発初期にタイヤサイズを決定するための効率的な手段となる。

従来の統計タイヤモデルでは、タイヤのサイズと使用時の内圧 P や荷重 F_z を与えると、コーナリングパワー C_p 、

Table 1 Major prevailing tire models for vehicle dynamics compared with proposed statistical model

Model type	Model name	Modeling approach	Data for model identification	Tire size parameterization
Experimental model	Statistical model	Fitting tire test data from multiple tires using regression technique	From multiple tires	Single model for various size
	Magic Formula, SWIFT, etc.	Fitting full scale tire test data by regression technique	From individual tire	Individual model for each tire
	Interpolation model, etc.	Distorting, rescaling and combining basic characteristics		
Theoretical model	Fiala model, Brush model, etc.	Using simple mechanical representation	From individual tire	Individual model for each tire
	FEM tire model, FTire, RMOD-K, etc.	Describing tire in greater detail		

縦ばね特性 K_z 、動荷重半径 DLR 、タイヤ重量 WT 、接地面積 SS などについて、そのサイズの平均的特性を推定することができた⁽¹⁵⁾。

タイヤサイズ決定には上記の操縦安定性や乗心地に関連する特性に加え、これらと背反する RRC 特性も検討する必要があるが、RRC はタイヤの転動による変形が熱に代わるメカニズムをモデル化する必要があり、技術的難易度が高く、これまでは簡易的に検討する手法がなかった。

今回は、モデル化のための実験条件を工夫した上で、統計タイヤモデルの手法を適用し、RRC へのサイズと内圧の影響を定量化することができたので、その基本的な考え方、同定手法および応用方法について次章以降で解説する。

3. RRC 推定

3.1. タイヤ RRC 特性

タイヤの転がり抵抗とは、タイヤが転動する時に生じる進行方向逆向きの抵抗力をいい、抵抗値を接地荷重で割った RRC で代表される。

RRC は通常の乗用車用タイヤでは $80 - 100 \times 10^{-4}$ 程度の値となり、近年の低損失ゴムコンパウンドを使用した低燃費タイヤでは 60×10^{-4} 程度の値をとる。

走行時の消費エネルギーの内、タイヤの転がり抵抗によるエネルギー損失が約 1/3 を占めるため、RRC の低減はシャシの省燃費性能を高めるために重要な技術である。

タイヤの転がり抵抗は原理的にタイヤの変形がコンパウンドのヒステリシス特性によって熱エネルギーになるため発生するので、式 (1) のような速度依存性がある⁽¹⁷⁾。

また RRC は、タイヤの変形を支配するタイヤの内部構造にも影響を受けるので、低損失ゴム材料を用いたり、ゴムの使用量を減らしたり、余裕あるタイヤサイズの選択や高い内圧設定で転動時の変形を抑制したりすることで低減が図れる (Fig. 1)。

$$f_R = f_{R0} + f_{R1} \left(\frac{V}{100} \right) + f_{R4} \left(\frac{V}{100} \right)^4$$

where

$$\begin{cases} f_R : \text{RRC} [-] \\ V : \text{Tire rolling speed [km/h]} \\ f_{R0} : 0.0080 \text{ to } 0.0100 [-] \\ f_{R1} : 0.0010 \text{ to } 0.0025 [\text{h/km}] \\ f_{R4} : 0.0002 \text{ to } 0.0004 [\text{h}^4/\text{km}^4] \end{cases} \quad (1)$$

しかしながらこれらの手法を採ると、タイヤの重要な機能であるグリップ性能や強度耐久性を低下させてしまったり、タイヤの縦ばねが高くなって乗心地の低下を招いたりしてしまう。

よって、低 RRC による省燃費性能と、シャシに求められる操縦安定性や快適性などの性能とは、一般に背反問題を形成する。

われわれが着目したタイヤサイズと RRC との定量的な関係を効率的に検討できるようにするためには、このコンパウンドや構造を揃えた実験データを取得し、サイズと内圧の影響のみを抽出してモデル同定する必要がある。

3.2. 統計 RRC モデル

タイヤの RRC の基本的な性質を明らかにするために、市場で多く流通しサイズバリエーションも豊富な低燃費銘柄のタイヤをサンプルケースに選び、この RRC を精密に測定した結果からモデル同定をおこなった。

計測したタイヤの幅 (以降, W)、扁平率 (H)、リム径 (D)、ロードインデックス (L)、使用条件である内圧 (P)、荷重 (F_z)、そして RRC についての統計値を Table 2 に示す。

計測は、それぞれのタイヤのサイズと内圧から規定される許容荷重の 80% の荷重で、内圧を一定に保ちながら十分なウォームアップをおこなった上で実施した。

計測して得られた転動速度に対する RRC の特性を Fig. 2

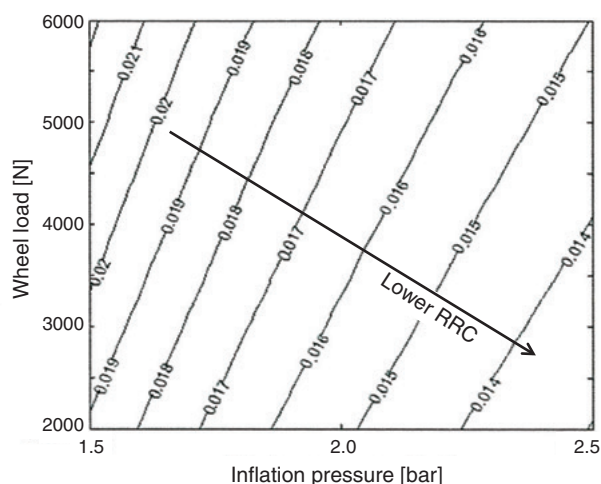


Fig. 1 Example of tire RRC with respect to wheel load and inflation pressure from reference

Table 2 Statistics of tire parameters of 31 cases

	Tread width, W [mm]	Aspect ratio, H [%]	Rim diameter, D [inch]	Load index, L	Inflation pressure, P [kPa]	Normal load, F_z [kN]	RRC at $V=80$, [$\times 10^{-4}$]
Average	202.1	56.3	16.0	89.2	250.6	4.6	69.1
Median	205.0	55.0	16.0	91.0	220.0	4.9	68.4
Std.Dev. σ	17.4	6.2	1.2	5.1	44.9	0.6	7.2
Minimum	155	45	13	73	210	2.89	54.0
Maximum	225	65	18	97	340	5.74	85.8
Max.-Min.	70	20	5	24	130	2.85	31.8
	(4.03 σ)	(3.23 σ)	(4.17 σ)	(4.7 σ)	(2.89 σ)	(4.45 σ)	(4.39 σ)

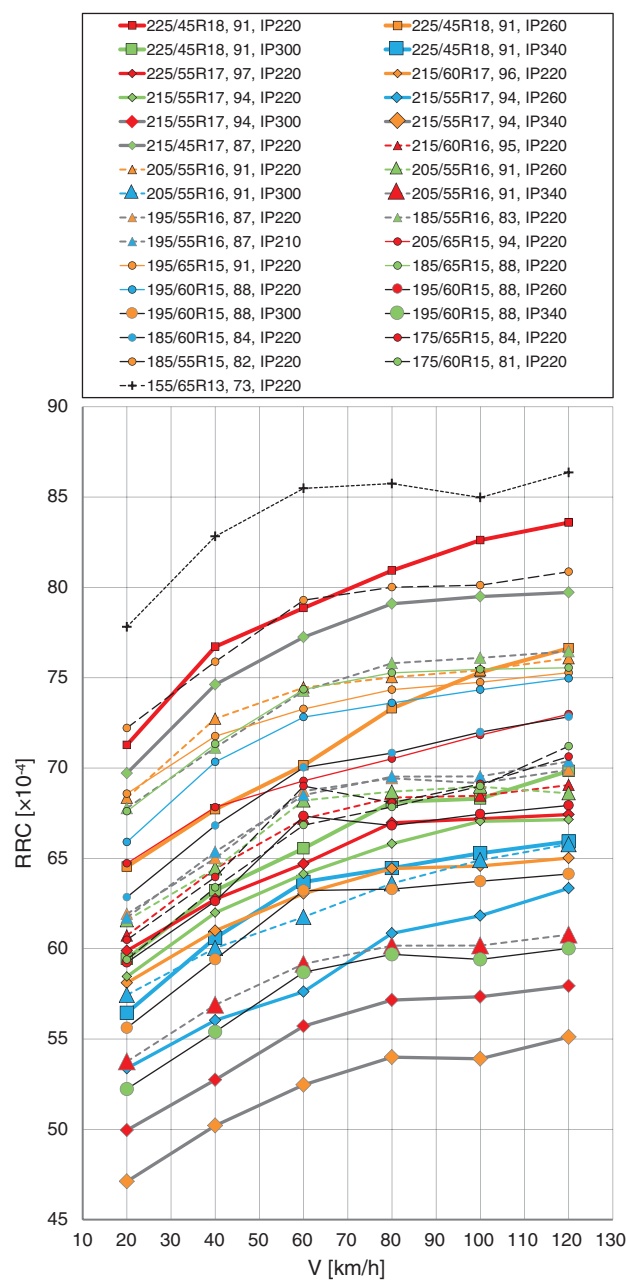


Fig. 2 Measured tire RRC vs rolling speed of 31 cases with normal load F_z equal to 80% of the load index's maximum load and with regulated inflation pressure

に示す。コンパウンドや構造が同一の銘柄のタイヤでも、サイズや内圧が異なれば RRC が大きく変化することがわかった。

RRC の速度依存性については式 (1) に基づいて推定が可能なので、本稿では速度 80[km/h] の時の RRC 値をそのタイヤの RRC 代表値として用いた。

Table 3 に、No.12 の 205/55R16 91, $P=220$ [kPa] の RRC 値を基準に各タイヤの 80[km/h] における RRC を相対値で示す。なお、基準とした No.12 のタイヤサイズはサンプルのタイヤサイズ W , H , D , L , P の中央値である。

得られたデータに対して、まず、タイヤサイズパラメータ W , H , D , L と使用条件 P , F_z と RRC の相関性を分析するため、散布図をプロットした (Fig. 3)。

Fig. 3 の対角に並ぶヒストグラムはそれぞれのパラメータの出現頻度、散布図は対角に並んだパラメータ間の相関をマトリクス状に表現したものである。散布図中の直線は相関の線形近似を表す。

例えば、Fig. 3 の一番右上のプロットは、x 軸が RRC, y 軸がタイヤ幅 W の散布図で、右下がりの近似直線は RRC が大きいほど W が小さくなっていることを表す。また一番左下のプロットはこの x 軸と y 軸が入れ替わったプロットとなる。

Fig. 3 のヒストグラム分布をみると、計測したタイヤは W , H および D に関してバリエーションを付けたサンプルが確保できている。 W , H および D のそれぞれの相関からは、 D が大きくなるほど W は大きく、 H は小さくなっているが、これは物理的因果関係ではなく、市場に出回っている大径タイヤは幅広で扁平なものが多いという製品ラインの傾向によるものである。よって、 W , H , D をモデル同定の際に、相互に独立した入力パラメータとして採択した。

また、タイヤの容量のパラメータとしてロードインデックス L を、タイヤ変形量を支配するパラメータとして F_z と P を入力パラメータに加える。今回、計測荷重 F_z は L で

Table 3 Measured RRC relative to No.12* case, with various tire size, load index, inflation pressure, and normal load
* Tire size 205/55R16 of No.12 is a median of sample cases

No.	Tread width, W [mm]	Aspect ratio, H [%]	Rim diameter, D [inch]	Load index, L	Wheel size on measurement	Inflation pressure, P [kPa]	Normal load, F_z [kN]	RRC at $V=80$, [$\times 10^{-1}$]
1	225	45	18	91	18x8J	220	4.85	107.9%
2	225	45	18	91	18x8J	260	4.85	97.7%
3	225	45	18	91	18x8J	300	4.85	90.8%
4	225	45	18	91	18x8J	340	4.85	85.9%
5	215	45	17	87	17x7.5J	220	4.27	105.4%
6	225	55	17	97	17x7.5J	220	5.74	89.3%
7	215	55	17	94	17x7.5J	220	5.25	87.7%
8	215	55	17	94	17x7.5J	260	5.25	81.1%
9	215	55	17	94	17x7.5J	300	5.25	76.2%
10	215	55	17	94	17x7.5J	340	5.25	72.0%
11	215	60	17	96	17x7.5J	220	5.59	85.9%
12*	205	55	16	91	16x6.5J	220	4.85	100.0%
13	205	55	16	91	16x6.5J	260	4.85	91.6%
14	205	55	16	91	16x6.5J	300	4.85	84.8%
15	205	55	16	91	16x6.5J	340	4.85	80.2%
16	195	55	16	87	16x6.5J	220	4.27	92.5%
17	185	55	16	83	16x6J	220	3.82	101.0%
18	215	60	16	95	16x6.5J	220	5.44	91.1%
19	185	55	15	82	15x6J	220	3.73	106.7%
20	195	60	15	88	15x6J	220	4.41	98.1%
21	195	60	15	88	15x6J	260	4.41	89.1%
22	195	60	15	88	15x6J	300	4.41	84.4%
23	195	60	15	88	15x6J	340	4.41	79.6%
24	185	60	15	84	15x5.5J	220	3.92	94.4%
25	175	60	15	81	15x5.5J	220	3.63	90.4%
26	205	65	15	94	15x6J	220	5.25	94.0%
27	195	65	15	91	15x5.5J	220	4.85	99.1%
28	185	65	15	88	15x5.5J	220	4.41	100.3%
29	175	65	15	84	15x5.5J	220	3.92	90.7%
30	155	65	13	73	13x4J	220	2.89	114.3%
31	195	55	16	87	16x6J	210	4.27	92.7%

定まる最大荷重の 80% に設定したため L との相関はほぼ 1 になっているが、これにも因果関係はないと仮定した。

タイヤサイズや内圧と RRC との関係には非線形性も存在すると考えられるので、これを表現するためにこれらパラメータの二乗項も入力パラメータとして考慮した。採択した入力パラメータの妥当性については後に考察する。

以上の仮定の下で、タイヤサイズのパラメータ W , H , D , L および使用条件のパラメータ P , F_z で RRC を推定する統計 RRC モデルを式 (2) で定義した。

このモデル定義式に Table 3 の計測データを与え、誤差の最小二乗法の式 (3) からモデル係数 a_1 から a_{12} までを同定した。

$$RRC(a_1, a_2, \dots, a_{12}/W, H, D, L, P, F_z) = a_1 W + a_2 W^2 + a_3 H + a_4 H^2 + a_5 D + a_6 D^2 + a_7 L + a_8 L^2 + a_9 P + a_{10} P^2 + a_{11} F_z + a_{12} \quad (2)$$

where $\begin{cases} W: \text{Tread width [mm]} \\ H: \text{Aspect ratio [\%]} \\ D: \text{Rim diameter [inch]} \\ L: \text{Load index} \\ P: \text{Inflation pressure [kPa]} \\ F_z: \text{Normal load [kN]} \\ a_i: \text{Coefficients of RRC multi-regression model} \end{cases}$

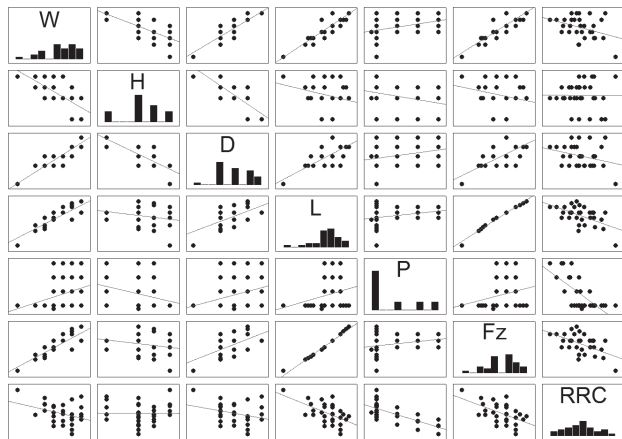


Fig. 3 Correlation overview of sample tire information for “Stat RRC” - W , H , D , L , P , F_z , and RRC

Table 4 Identified model parameters for statistical RRC model

Model coefficient	Identified value	Note
a_1	3.62E-2	W
a_2	-1.07E-4	W^2
a_3	-1.06E-1	H
a_4	7.51E-4	H^2
a_5	-8.34E-1	D
a_6	2.38E-2	D^2
a_7	8.61E-2	L
a_8	-9.61E-4	L^2
a_9	-4.09E-3	P
a_{10}	4.55E-6	P^2
a_{11}	7.78E-1	Fz
a_{12}	5.90E+0	y-intercept

$$\frac{\partial J}{\partial a_k} = 0 \rightarrow a_k \left| \frac{\partial J}{\partial a_k} = 0 \right. \quad (k = 1 \text{ to } 12) \quad (3)$$

where

$$J = \sum_{i=1}^n [RRC_i - RRC(a_1, a_2, \dots, a_{12}/W_i, H_i, D_i, L_i, P_i, Fz_i)]^2$$

このようにして得られた統計 RRC モデルの係数を Table 4 に示す。

4. 計算結果

4.1. RRC 予測結果

同定された統計 RRC モデルに、タイヤサイズ、ロードインデックス、内圧および荷重を与え、RRC を推定した結果を Table 5 に示す。また、この推定値と計測した RRC との相関を Fig. 4 に示す。

統計 RRC モデルの実測値に対する相関は補正 $R^2 = 0.913$ となった。

補正 R^2 とは自由度調整済み決定係数（もしくは寄与率とも呼ばれる）であり、提案モデルが RRC のサイズや内圧による変動のおよそ 9 割を説明しているということを示している。したがって、開発初期段階でタイヤサイズや内圧を変更して RRC など諸性能を検討する場合、本稿で提案する統計 RRC モデルは十分な検討精度を持つ。

しかし、Fig. 4 より、標準誤差は $\sigma = 2.13 \times 10^{-4}$ 程度あることや、予測式で表現しきれていない寄与率が 1 割程度残っていることなど、性能設計に当たってはこれら見積り誤差を念頭に置く必要がある。

タイヤ幅 W 、扁平率 H 、リム径 D 、ロードインデックス L 、内圧 P に対する転がり抵抗係数 RRC のプロットを推定値と計測値を重ねてプロットし、Fig. 5 に示す。

Fig. 5 を見ると、それぞれのサイズパラメータに対する RRC 推定値がおおむね良好な精度を持っており、実測値の $\pm 2.13 \times 10^{-4}$ 以内に分布していることが確認できる。

Table 5 Estimated RRC by statistical RRC model

Tire size and IP	Measured RRC at V = 80 in relative form	Estimated RRC at V = 80 in relative form	Error [%]
225/45R18, 91, IP220	107.9%	105.7%	-1.0%
225/45R18, 91, IP260	97.7%	98.0%	0.2%
225/45R18, 91, IP300	90.8%	91.9%	0.5%
225/45R18, 91, IP340	85.9%	87.2%	0.6%
215/45R17, 87, IP220	105.4%	105.4%	0.0%
225/55R17, 97, IP220	89.3%	87.5%	-0.8%
215/55R17, 94, IP220	87.7%	89.3%	0.8%
215/55R17, 94, IP260	81.1%	81.7%	0.3%
215/55R17, 94, IP300	76.2%	75.5%	-0.3%
215/55R17, 94, IP340	72.0%	70.8%	-0.5%
215/60R17, 96, IP220	85.9%	86.7%	0.4%
205/55R16, 91, IP220	100.0%	99.3%	-0.3%
205/55R16, 91, IP260	91.6%	91.6%	0.0%
205/55R16, 91, IP300	84.8%	85.5%	0.3%
205/55R16, 91, IP340	80.2%	80.7%	0.3%
195/55R16, 87, IP220	92.5%	94.6%	0.9%
185/55R16, 83, IP220	101.0%	94.8%	-2.9%
215/60R16, 95, IP220	91.1%	89.7%	-0.6%
185/55R15, 82, IP220	106.6%	104.8%	-0.9%
195/60R15, 88, IP220	98.1%	97.2%	-0.4%
195/60R15, 88, IP260	89.1%	89.6%	0.2%
195/60R15, 88, IP300	84.4%	83.4%	-0.5%
195/60R15, 88, IP340	79.6%	78.7%	-0.4%
185/60R15, 84, IP220	94.4%	95.1%	0.3%
175/60R15, 81, IP220	90.4%	96.4%	2.8%
205/65R15, 94, IP220	94.0%	96.8%	1.3%
195/65R15, 91, IP220	99.1%	99.6%	0.2%
185/65R15, 88, IP220	100.3%	95.5%	-2.3%
175/65R15, 84, IP220	90.7%	91.2%	0.2%
155/65R13, 73, IP220	114.3%	114.0%	-0.1%
195/55R16, 87, IP210	92.7%	96.7%	1.9%

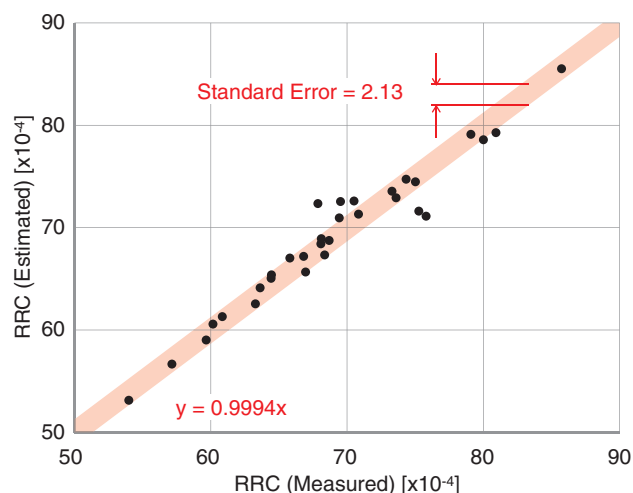


Fig. 4 Correlation between measured RRC and estimated RRC from statistical RRC model with W , H , D , L , P , and Fz given

Table 6 Multiple regression model - Stepwise verification using forward selection method

Model ID	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
Independent parameters	W	W,H	W,H,D	W,H,D,L	W,H,D,L,P	W,H,D,L,P,Fz	W,H,D,L,P,Fz,W ²	W,H,D,L,P,Fz,H ²	W,H,D,L,P,Fz,D ²	W,H,D,L,P,Fz,L ²	W,H,D,L,P,Fz,P ²	W,H,D,L,P,Fz,Fz ²	W,H,D,L,P,Fz,W ² ,H ²	W,H,D,L,P,Fz,W ² ,H ² ,D ²	W,H,D,L,P,Fz,W ² ,H ² ,D ² ,L ²	W,H,D,L,P,Fz,W ² ,H ² ,D ² ,L ² ,P ²	W,H,D,L,P,Fz,W ² ,H ² ,D ² ,L ² ,P ² ,Fz ²
Statistics																	
R	0.367	0.516	0.554	0.639	0.906	0.907	0.912	0.957	0.935	0.926	0.908	0.947	0.960	0.968	0.968	0.972	0.973
R ²	0.135	0.266	0.307	0.408	0.821	0.823	0.831	0.916	0.875	0.857	0.824	0.897	0.922	0.937	0.937	0.945	0.946
Adjusted R ²	0.105	0.213	0.230	0.317	0.785	0.779	0.780	0.891	0.836	0.814	0.771	0.865	0.894	0.910	0.906	0.913	0.910
Standard error	6.832	6.404	6.336	5.967	3.345	3.395	3.385	2.384	2.920	3.117	3.455	2.650	2.349	2.169	2.260	2.132	2.163
Coefficients																	
y-Intersept	1.33E+0	2.16E+0	2.78E+0	1.80E+0	2.66E+0	3.19E+0	4.79E+0	8.36E+0	9.14E+0	-5.89E+0	3.39E+0	6.83E+0	7.56E+0	9.65E+0	4.88E+0	5.90E+0	2.37E+0
W	-2.04E-3	-3.97E-3	-1.73E-3	9.64E-3	8.12E-3	7.21E-3	-2.42E-2	-5.69E-3	-3.18E-3	8.74E-3	7.21E-3	8.15E-3	2.34E-2	4.51E-2	3.08E-2	3.62E-2	4.18E-2
H		-7.82E-3	-1.20E-2	8.07E-3	-1.46E-3	-3.21E-3	-9.33E-3	-1.33E-1	-1.91E-2	1.11E-3	-3.40E-3	2.88E-3	-1.47E-1	-1.31E-1	-1.08E-1	-1.06E-1	-1.19E-1
D			-5.24E-2	-2.36E-2	-5.75E-2	-5.98E-2	-8.15E-2	-9.39E-2	-9.75E-1	-5.24E-2	-6.08E-2	-3.67E-2	-7.77E-2	-7.24E-1	-7.33E-1	-8.34E-1	-1.08E+0
L				-3.26E-2	-2.25E-2	-2.81E-2	1.11E-2	-1.32E-2	3.57E-2	1.97E-1	-2.80E-2	-1.77E-1	-4.97E-2	-3.93E-2	9.68E-2	8.61E-2	2.40E-1
P					-1.50E-3	-1.49E-3	-1.54E-3	-1.46E-3	-1.71E-3	-1.51E-3	-2.94E-3	-1.68E-3	-1.41E-3	-1.54E-3	-1.54E-3	-4.09E-3	-3.81E-3
Fz						6.53E-2	-1.46E-1	2.46E-1	-1.76E-1	1.04E+0	6.54E-2	2.80E+0	4.82E-1	4.57E-1	7.62E-1	7.78E-1	6.06E-2
W ²							7.12E-5						-7.03E-5	-1.32E-4	-9.25E-5	-1.07E-4	-1.27E-4
H ²								9.77E-4					1.13E-3	9.56E-4	7.78E-4	7.51E-4	8.25E-4
D ²									2.78E-2				2.04E-2	2.38E-2	2.05E-2	2.38E-2	3.11E-2
L ²										-2.03E-3					-1.02E-3	-9.61E-4	-1.75E-3
P ²											2.63E-6					4.55E-6	4.09E-6
Fz ²												-1.79E-1					7.24E-2

4.2. モデル検証

同定した統計 RRC モデルの妥当性を検証するため、重回帰分析のステップワイズ変数増加法によって、さまざまな入力パラメータの組み合わせをもつモデルの同定精度を求め、提案するモデルと比較した。結果を Table 6 に示す。提案モデルは Model 16 である。各モデルの補正 R² と標準誤差をそれぞれ Fig. 6 と Fig. 7 に示す。

Table 6 より、変数を増加させていくと補正 R² が増加して再現性が高まり、合わせて標準誤差が小さくなってモデル精度が向上してゆく様子がわかる。

例えば入力パラメータが W だけの Model 1 は補正 R² (寄与率) は 0.105, 入力パラメータを W と H に増やした Model 2 は 0.213 なので、パラメータ W, H の RRC への寄与率はそれぞれ 10% 程度であると分析できる。

Model 4 から 5, および, Model 7 から 8 に着目すると、それぞれ内圧 P と偏平率の 2 乗 H² が変数として加わった際に補正 R² は 0.317 から 0.785 および 0.780 から 0.891 へと大きく改善されることから、入力パラメータの内圧 P と偏平率の 2 乗項 H² がそれぞれ 47% と 11% 程度の寄与を持つことがわかる。

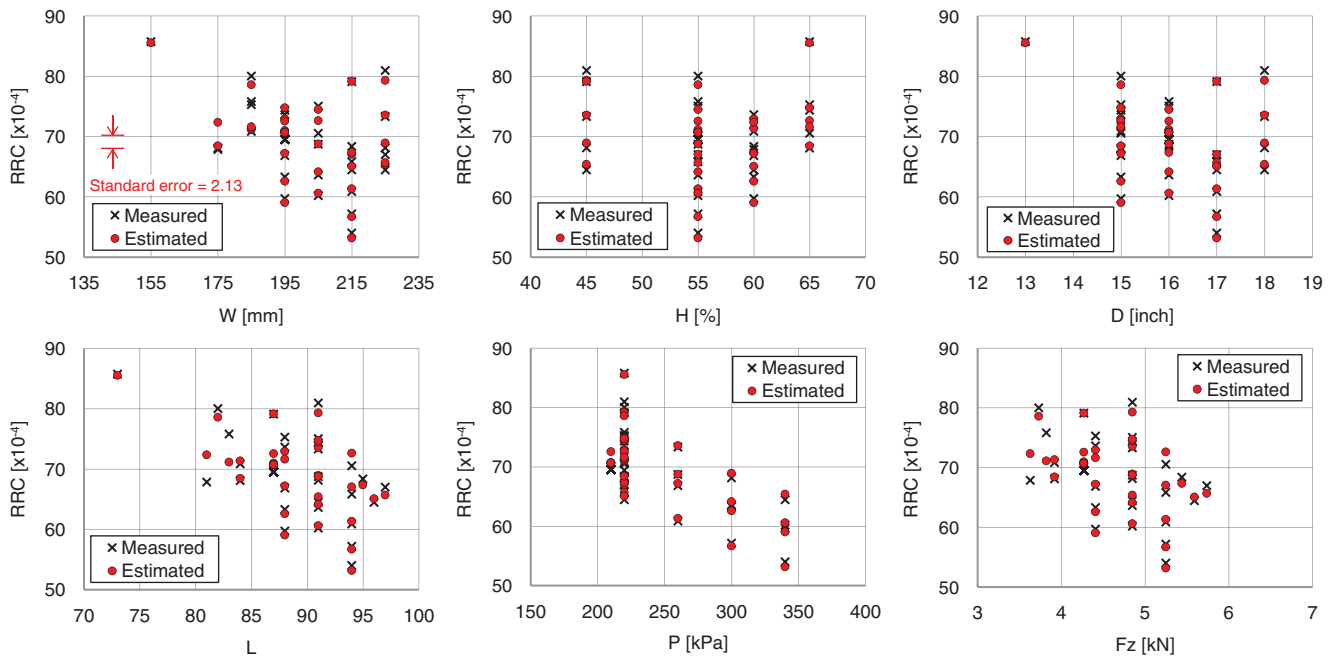


Fig. 5 Comparisons between measured RRC and estimated RRC with respect to W, H, D, L, P, and Fz

しかしながら、提案モデルの Model 16 にさらに荷重の 2 乗項 Fz^2 が加わる Model 17 では補正 R^2 が低下し標準誤差も大きくなってしまふ。これは、RRC は荷重 Fz に関しては線形で近似する方が適切であることを示している。

以上のような検証作業から、提案モデル Model 16 は、サ

イズや内圧の RRC への寄与を高い精度で予測できる再現性の良いモデルであることが確認できた。

なお、Model 8 はよりシンプルながらも補正 $R^2 = 0.891$ と予測精度が良好であるため、次章でロバスト性の観点で考察する。

5. 応用例および考察

5.1. ロバスト性に関する考察

Fig. 8 は、提案モデル Model 16 と、よりシンプルなモデル Model 8 から推定された RRC を、さまざまなタイヤサイズについて実測値と並べてプロットしたものである。

Model 8 は W , H , D , L , Fz および H^2 を変数とするモデルであるが、その推定値は実測値の近傍にあり、標準誤差も Model 16 の $\sigma = 2.13 \times 10^{-4}$ に対して $\sigma = 2.38 \times 10^{-4}$ と 11% 程度の増加に留まっている。

Fig. 9 に、今回 RRC の基準として用いた 205/55R16 91, IP=220 のタイヤ幅 W だけを 145 から 235 へ変動させた、仮想サイズの RRC 推定値を、Model 16 と Model 8 に関して点線で示す。

Model 16 の RRC 推定値は上に凸の形状を描き、計測したサンプルタイヤのサイズを外れる $W < 155$ や $W > 225$ の領域で RRC が大きく低下する予測値を算出してしまう。これに対して、よりシンプルな Model 8 では、タイヤ幅 W が増加すると RRC が低下する線形の傾向を予測する。

タイヤ幅と RRC との関係を考察すると、一般に荷重一定の条件でタイヤ幅が狭くなるとタイヤ接地長は長くなり、ヒステリシスを生じるトレッド面の屈曲変形は大きくなる。したがって Model 16 のタイヤ幅が狭くなる $W < 155$ の外挿領域で RRC が低下するという予測は、この一般傾

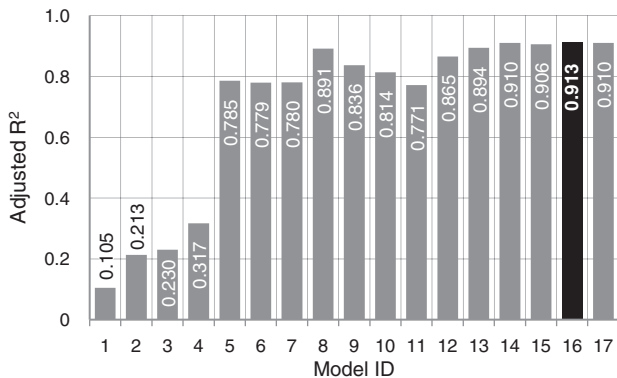


Fig. 6 Adjusted R^2 of multiple regression models

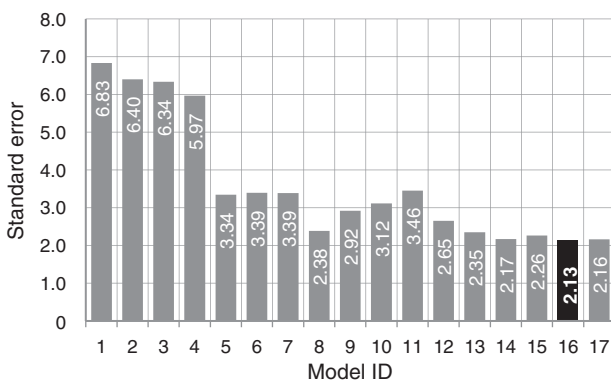


Fig. 7 Standard error of multiple regression models

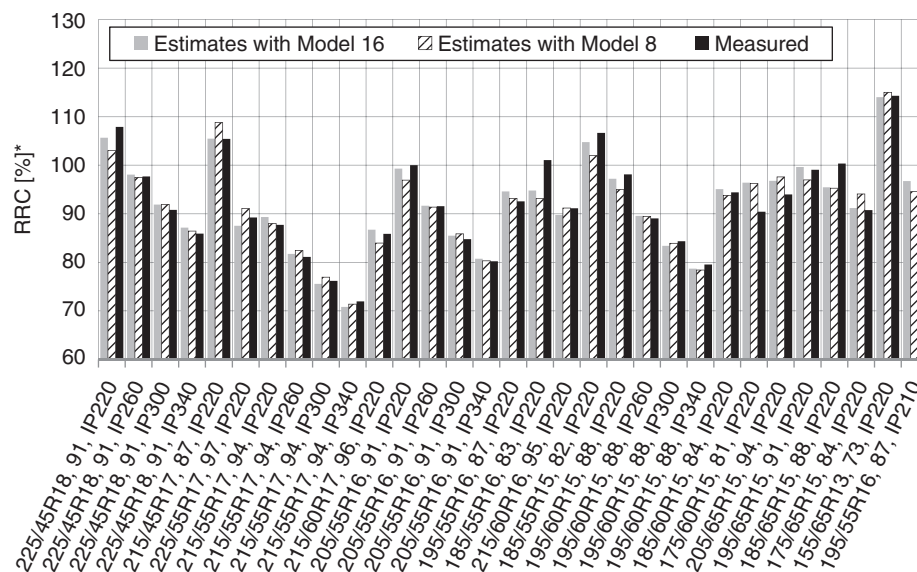


Fig. 8 Comparison of estimates of RRC from Model 16 and Model 8 with measured RRC (relative to 205/55R16's)

向と合致しない。これに対してシンプルな Model 8 は、タイヤ幅 W と RRC の関係を線形で近似するので、この定性的考察と傾向が一致する。

この考察から、少なくともタイヤ幅に関しては Model 16 は与えられたサンプルの範囲では高い再現性を示すものの、この範囲を外れると予測精度が低下してしまう可能性がある。統計 RRC モデルを使用する際は、サンプルで与えられた範囲内の精度を重視したモデルを使用するか、精度はやや劣るもののロバストで一般傾向を捉えたモデルを使用するか、目的に応じて適切なモデルを選択することも必要であることがわかる。

5.2. サイズ感度分析

これまでの開発では、候補タイヤの RRC 特性とコーナリング特性はすべて実測して定量的な性能設計を実施してきたが⁽¹⁸⁾、提案した統計 RRC モデルを先に報告した統計 C_p モデルと組み合わせると、燃費が良く、操縦安定性も良い初期仕様を机上検討で探索することが可能となる。

Fig. 10 に、205/55R16, $L=91$, $P=220$ [kPa] のタイヤの W , H , D , P をそれぞれ変動させた場合の統計モデルによる C_p と RRC の予測感度を示す。

リム径 D を 16 inch から 17 inch へ上げた場合のプロット $D+1$ を見ると C_p が 4% 増加して RRC も 5% 改善される予測である。よって、タイヤ外径は大きくなるものの、リム径を上げることは操縦安定性と燃費を両立できるサイズであることがわかる。

同様に、タイヤ幅 W の +10 幅広化も、 C_p が 4% 増加し、さらに RRC も 8% 低減する予測である。

これに対して、内圧 P を +20 高内圧化しても C_p は 1%, RRC は 4% の改善に留まる。タイヤ内圧による対策は、サ

イズ変更と比べると相対的に効果が小さいことが定量的に明らかにできる。また、偏平率 H を -5 偏平化しても C_p は 5% 向上するが RRC は 13% も増加してしまい、操縦安定性と燃費がトレードオフしてしまうこともわかる。

例えばある基本プラットフォームから重量増加を伴う SUV を派生車種として作る場合、重量増加に対応した運動性能を確保しつつ良好な燃費を実現するには、リム径を上げタイヤ幅も広げるためのタイヤサイズ変更とその空間レイアウトが必要であることを示している。

次に Fig. 11 に、225/45R18 のケースで同様の感度を計算した結果を示す。

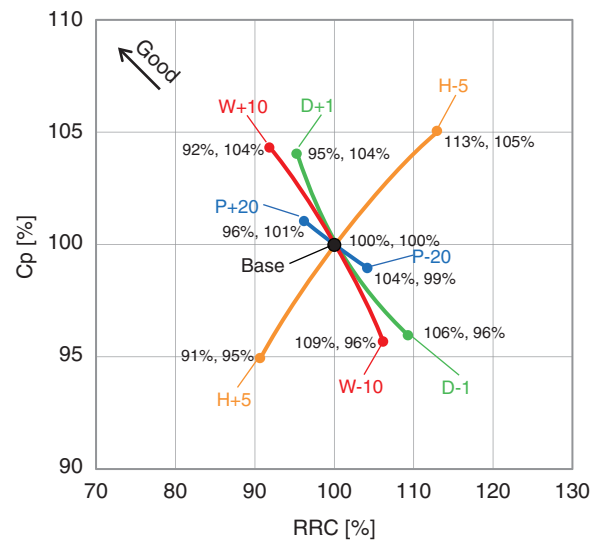


Fig. 10 Sensitivities of tire parameters W , H , D , and P of 205/55R16 tire on both cornering stiffness and RRC

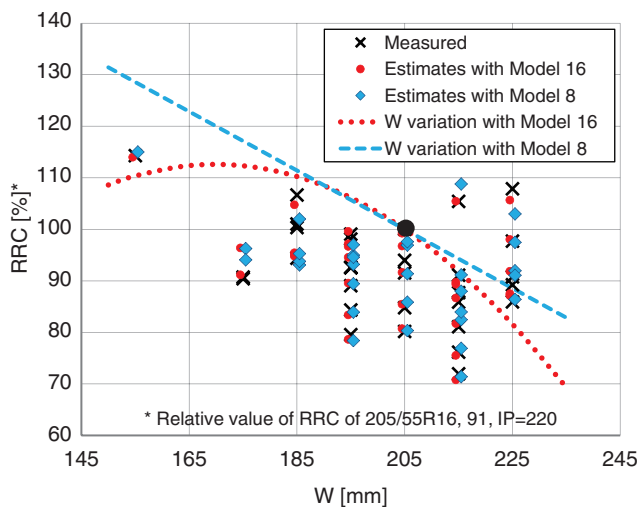


Fig. 9 Comparison of estimates of RRC from Model 16 and Model 8 with measured RRC with regard to tread width W

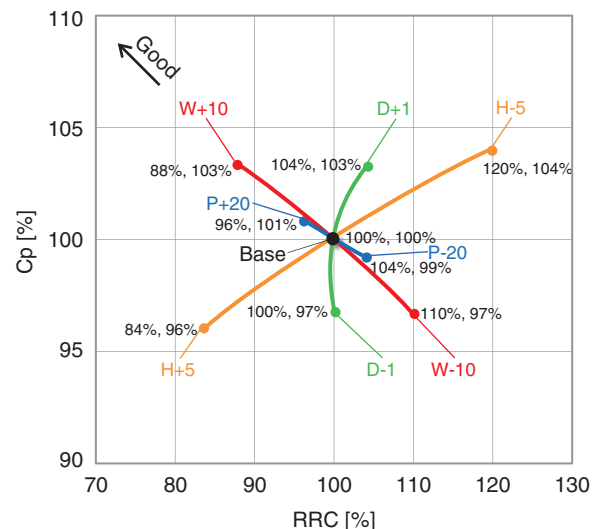


Fig. 11 Sensitivities of tire parameters W , H , D , and P of 225/45R18 tire on both cornering stiffness and RRC

サイズパラメータ W , H , P の感度の傾向はほぼ 205/55R16 と変わらないが, C_p 感度はやや低めに, RRC 感度はやや高めに予測される結果となった。また, D の RRC に対する感度はかなり低くなり, プロット D+1 のケースでは, リム径を上げて RRC が増加してしまうという現実には起こりえない予測結果となってしまった。

この例では, Table 2 で示したサンプル統計の一番外れた W , H , D をもつサイズを中心に感度解析しているが, サイズパラメータがモデル化に使用したデータサンプルの外挿となるケースの予測は本モデルでは担保できないことがわかる。

こうした予測精度の低下を防ぐためには, さらにバリエーションを付けたサンプルを基データとしてモデル同定するとともに, モデル同定用のデータと検証用のデータとを分け, 一方のデータでモデル化して, 他方のデータで統計検定をおこなう作業を繰り返しながらモデルの確からしさを上げる改良作業が必要である。また, 本手法を適用するに当たっては, 用途によってモデルを使い分けるノウハウ蓄積も必要である。

タイヤの RRC に関しては, タイヤ温度を考慮した補正法なども提案され始めており⁽¹⁹⁾, 自動車の低燃費化が進むにつれてより高い精度で予測する技術が求められるようになってきている。本統計タイヤモデル化手法を拡張してゆけば, 既存のタイヤ計測データを活用した計測レスの初期検討環境を整備でき, コンベンショナルなシャシ開発の効率化と性能向上を大きく支援することが可能である。

6. まとめ

本稿では, 設計初期に合理的かつ効率良くタイヤサイズと特性を定められる統計タイヤモデルの手法を, タイヤの転がり抵抗係数の予測に拡張し, 以下の知見を得た。

- (1) タイヤのコンパウンドや構造を同一銘柄に揃えた RRC 計測データから, タイヤサイズと内圧が RRC を支配する重要因子となっておりことがわかった。
- (2) コンパウンドとタイヤ構造が一定の場合, タイヤサイズと内圧の情報だけから RRC を推定するモデルを構築でき, 補正 $R^2 = 0.913$ と再現性が良好である。
- (3) 統計 RRC モデルを統計 C_p モデルと組合せると, 操安性と燃費性能を両立できるタイヤサイズを, 机上検討でき, 膨大な工数を掛けていたタイヤ計測を省略することが可能となる。

本稿で報告した統計 RRC モデルも, コンパウンドのヒステリシス特性, タイヤ重量, タイヤの接地面積や接地長などタイヤ単体の計測データも取り入れたさらなる一般化を図っていきたい。

参考文献

- (1) 渥美淑弘, 鈴木浩義, 宮崎武司, 亀本修吾, 日下馨: CLARITY FUEL CELL の運動性能, Honda R&D Technical Review, Vol.29, No.1, p. 37-42
- (2) 樋口実, 日下馨, 渋谷宏一, 村岡尚彦, 塚越誠: ハンドリングの予測技術の研究 - 動特性を考慮した非線形タイヤモデルの開発 -, HONDA R&D Technical Review, Vol.7, p. 87-97
- (3) Kusaka, K., Higuchi, M., Shibusawa, K., Muraoka, N., Tsukagoshi, M.: Transient Tire Model for Handling Analysis and Prediction, Proc. of The Eighth International Pacific Conference on Automotive Engineering, (1995)
- (4) 塚越誠, 首藤拓也: 部品の弾性変形を考慮したサスペンション特性解析, Honda R&D Technical Review, Vol.15, No.1, p. 195-202
- (5) Kusaka, K., Higuchi, M., Hirata, H.: Handling Analysis and Prediction During Cornering - The Analytical Prediction of Vehicle Cornering Maneuver with respect to Driver-Vehicle System Characteristics, Proc. of The Ninth International Pacific Conference on Automotive Engineering, (1997)
- (6) Nagahisa, M., Kusaka, K., Minakawa, M., Nirei, T.: The Influence of Body Flexibility on the Handling Characteristics, Proc. of The 10th International Pacific Conference on Automotive Engineering, (1999)
- (7) Kusaka, K., Nagahisa, M., Nishimura, T.: An Influence of Body Lateral Bending on Handling Characteristics, Proc. of The 11th International Pacific Conference on Automotive Engineering, (2001)
- (8) 皆川正明, 中原淳, 二宮次郎, 織本幸弘: 路面からタイヤへの伝達力の指向性を利用した振動伝達低減手法 - 第 2 報: 路面入力実測によるばね下過渡振動解析 -, 自動車技術会学術講演会前刷集, No. 53-99, p. 5-8, (1999)
- (9) Nakahara, J., Minakawa, M., Gipser, M., Wimmer, J.: A Modeling Approach for Suspension Friction Consisting of Several Sets of Friction Elements and Springs in Series, 9th Aachen Colloquium Automobile and Engine Technology, (2000)
- (10) Nakahara, J., Minakawa, M.: Validation of Ride Comfort Simulation using a Test Vehicle, which Measures Road Profile and Vehicle Vibration Simultaneously, 5th Stuttgart International Symposium, (2003)
- (11) 大滝雄介, 日下馨, 中原淳, 久世正文: ハンドリングと乗心地を両立するための非線形 CAE 技術, Honda

- R&D Technical Review, Vol.29, No.1, p. 151-159
- (12) 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 R&D Technical Review, Vol.29,
No.1, p. 49-58
- (13) 鈴木朋和, 日下馨: 複数タイヤのデータ群から同定
する「統計タイヤモデル」, Honda R&D Technical
Review, Vol. 24, No.1, p. 85-91
- (14) Kusaka, K., Nagayama, N.: A Statistical Tire Model
Concept - Applications to Vehicle Development, SAE
Technical Paper 2015-01-1578, (2015)
- (15) 日下馨, 長山信行: 統計タイヤモデル研究 - CP, Kz,
DLR 推定への適用 -, 自動車技術会シンポジウム
No. 21-15, シンポジウムテキスト, p. 59-69, (2016)
- (16) Pacejka, H.: Tire and Vehicle Dynamics, Third
edition, Butterworth-Heinemann, p. 672, (2012)
- (17) Pauwelussen, J. P.: Essentials of Vehicle Dynamics,
Butterworth-Heinemann, p. 20-21, (2014)
- (18) 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 R&D Technical
Review, Vol.25, No.2, p. 64-69
- (19) 穂高武, 三浦秀樹: タイヤ温度に着目した走行抵抗補
正技術の研究, 自動車技術会 2018 年秋季大会学術講
演会講演予稿集, p. 1-6, (2018)

■ 著 者 ■



日 下 馨



木 滝 泰 隆



古 本 直 己