

車両限界挙動予測技術の研究

Study of Simulation Technology for Limit Drivability

豊島 貴行*

Takayuki TOYOSHIMA

佐藤 祐二*

Yuji SATO

宮谷 泰啓*

Yasuhiro MIYATANI

新井 信太

Shinta ARAI*

要 旨

従来の技術では、限界領域における車両挙動を機構解析的に計算し高い精度で予測することは困難であった。今回 Magic Formula を基本としたタイヤモデルを使い、限界領域に重み付けした最適化、タイヤのたわみ特性の表現、また従来の車両モデルを基本としてサスペンションレートの改良、駆動トルクコントロールの改良により、限界領域までの車両挙動を機構解析的に計算させる事を可能にした。その結果、限界領域の車両運動特性の一つである限界領域旋回性について車両の挙動を高い精度で予測することが可能となった。

ABSTRACT

Using conventional technology, it used to be difficult to calculate vehicle behavior in a limit handling situation by mechanical system analysis and predict that behavior with a high degree of accuracy. A method used tire modeling based on Magic Formula has been developed for tire optimization by improvement of weighted toward limit and for representation of the characteristics of tire deflection. In relation to vehicles, the method has been applied to improvement of the suspension rate and traction torque control. These measures have made it possible to perform mechanical system analysis calculation of vehicle handling behavior up to the limit. As a result, it has become possible to attain a high degree of accuracy in predicting vehicle limit behavior in turn, which is one of the dynamic characteristics for limit drivability.

1. まえがき

車両の操縦安定性を示す指標には様々なものがあり、それらを予測する技術も種々研究開発され実用化されてきた。しかし、限界領域の操縦安定性については予測するというのがこれまで困難とされており、高い精度で予測する技術の構築がこれまでの課題となっていた。限界領域についても、車両挙動をシミュレーション上の仮想空間に再現することができれば机上での評価が可能となり、実走によるテストの負担を減らすことが可能となる。さらに限界領域における予測技術は新たな特性検討の場を与え、より効率の高い車両開発に貢献できるものと考えられる。今回従来の車両運動予測シミュレーション技術をベースとして車両モデルを改良し、タイヤモデルを限界領域旋回性の計算用として構築することで、限界領域の旋回性についても精度よく予測しうる技術を開発したので報告する。

2. 基本的な考え方

限界領域の車両運動特性には様々な項目があるが、本研究ではその中でも限界領域旋回性についてのみを対象としている。限界領域旋回性には大きく二通りの評価方法があり、一つは定常状態で限界性を評価するものであり、ISOでは定常円旋回試験法(ISO4138)として試験法が規定され、限界性評価についても基本的な手法は定められている。もう一つは過渡状態で限界特性を評価するものであり、Jターン走行モードに代表されるような評価法であるが、こちらについては評価技術の確立がこれまでも課題となっている状況である。Fig. 1は両者の代表的な評価方法を記したものである。Jターン走行モードについてはISOでは過渡応答試験法(ISO7401)として規定はあるが、これは主に線形域の過渡応答特性を評価するのがねらいのものである。そこで本研究では過渡状態で限界特性を評価するため、ISOの試

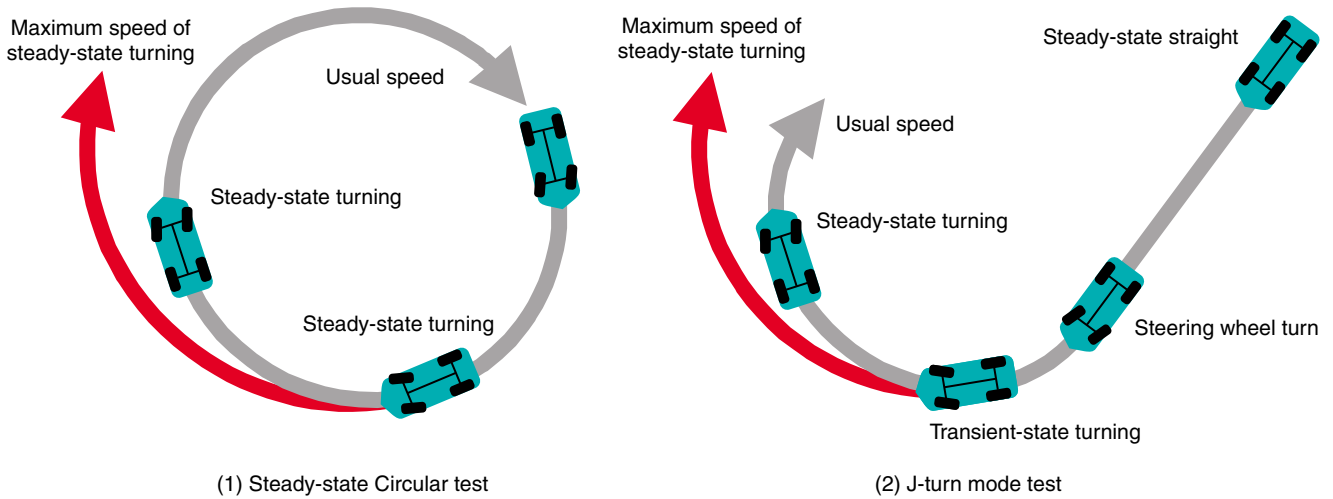


Fig. 1 Two patterns for evaluation of turning behavior

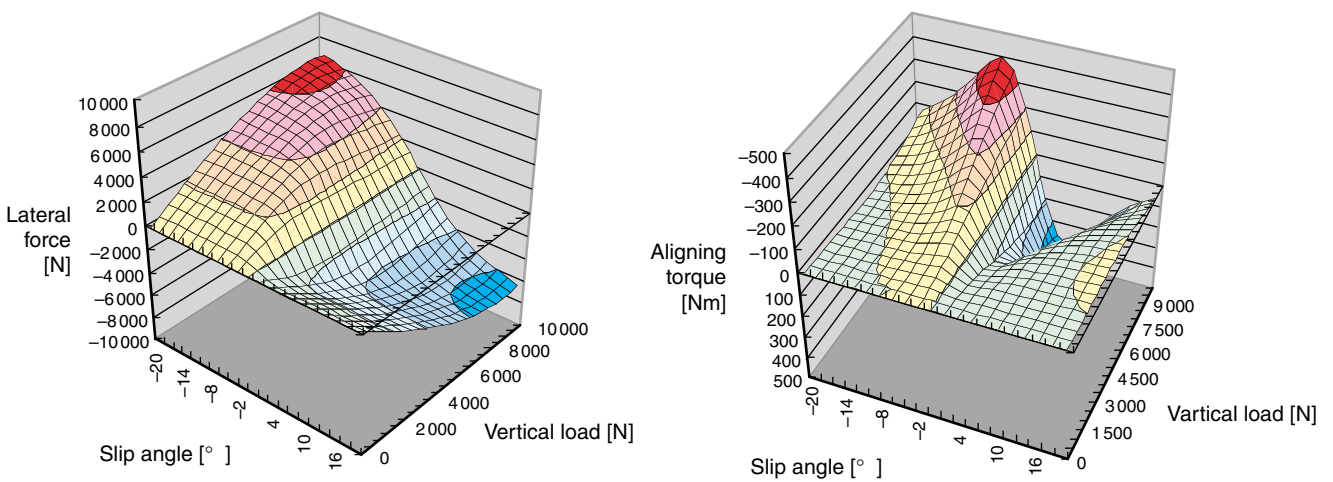


Fig. 2 Nonlinear characteristics of tire

験法を参考にしつつ別途試験法を設定した。具体的にここで述べるJターンとはハンドルを特定の舵角まで転舵させて過渡的に旋回状態に移行し、そのまま定常的な旋回状態に至るまで操舵角一定かつ一定速で走行するという走行形式のことを示している。ここでは最終的に到達する最大速度域における車両挙動を限界領域旋回性と定義し、これに対して最大速度域よりも十分低い速度域での車両挙動のことを通常領域旋回性と呼ぶこととする。

車両挙動をシミュレートし予測するツールはこれまでも幾つか開発され実用化されてきたが、いずれも限界領域におけるタイヤの強い非線形性を正確に表現できていない事、タイヤのたわみ特性が考慮されていない事などの理由から、限界領域旋回性の検討に適用することは困難な状況である。限界領域では Fig. 2 で示されるように、荷重、スリップ角等の値は極端に大きくなり発生力やトルクは強い非線形性を示す。また Fig. 3 はタイヤに発生する横力によってタイヤがたわむ様子を示したもののだが、限界領域ではこのようなたわみ量も大きな値となる。従ってこれらを見逃して計算すると結果のズレが大きくなってしまい、必要な

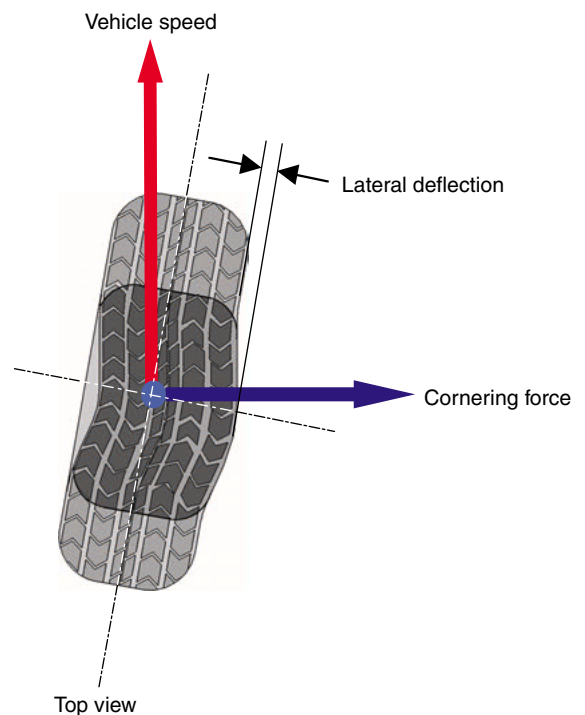


Fig. 3 Lateral deflection of tire

精度を得ることができない。限界領域旋回性を予測するためには、限界領域のタイヤコーナリング特性およびたわみ特性を正確に表現したタイヤモデルを構築することが必要となる。

またタイヤモデル以外の部分についても、定常領域と限界領域とでは状況が大きく異なるため、大ストローク域での特性設定の改善や、駆動力などの条件規定においても、限界領域を計算させるために必要となる改良を加えなければならない。

これらのモデルを改良する事によって、機構解析的に車両挙動をシミュレートし、限界領域旋回性を予測することが可能となる。

3. タイヤモデルの構築

限界領域の旋回性の予測にも適応しうるタイヤモデルの構築には、大きく以下の二つの要素がある。

- (1) 限界領域におけるタイヤコーナリング特性の表現
- (2) 限界領域におけるタイヤのたわみの表現

3.1. 限界領域におけるタイヤのコーナリング特性

車両の運動を決定する為に必要となるタイヤのコーナリング特性には Fig. 4 に示すように、主として、タイヤの前後方向に対して発生する制駆動力、タイヤに対して左右方向に発生する横力、及びタイヤの接地面垂直軸回りに発生するセルフアライニングトルクの三者があり、限界領域の車両挙動を正確に表現するためにはこの3者の絶対値を精度よく把握しモデルで正確に表現することが必要である。

タイヤのモデルには使用用途に応じた形で色々な種類が

存在するが、その中で今回は三種類のタイヤモデルを候補にあげその適性を判断した。具体的には Fiala⁽¹⁾や Gim⁽²⁾の理論に代表されるような力学モデル、FEM によるメッシュモデル、Magic Formula に代表される数式モデルの三つである。

力学モデルは、タイヤの構造を簡便なモデルに置換え力学的に力を計算するので、タイヤの構造決定の上で有意義な検討を可能にしてくれるが、限界領域において現実との誤差が甚だ大きいものになってしまうという欠点がある。これはタイヤが複雑な複合材料部品であり、簡単な構造モデルでは置き換えられないほどの複雑な変化を示すためと考えられる。従って絶対値としての精度が求められる今回のシミュレーションに適用することは不可能である。

メッシュモデルは、現実に近いタイヤ本来の特性を表現することは可能となるが、必要な精度を得るためには非常に複雑な構造を持つモデルとなり、また計算に必要な時間も複雑ゆえにおびただしいものとなるため、本研究のねらいと合致せず現時点では適用不可能である。

通常、タイヤのコーナリング特性はタイヤに掛かる荷重、スリップ率、スリップ角、キャンバー角の4つの状態量に対して連続的に変化する特性を持っているため、その特性値を状態量を引数とする適当な連続関数で置き換えてタイヤモデルを表現してやれば、その数式をもってタイヤモデルとすることができる。実測値に基づき構築される数式モデルは絶対値としての精度が高く計算も速いため、本研究に対しては最も適したタイヤモデルといえる。

Fig. 5 は今回適用したタイヤモデルの構造を記したものであるが、これは代表的なタイヤ数式モデルである Magic Formula の一つである^{(3), (4)}。

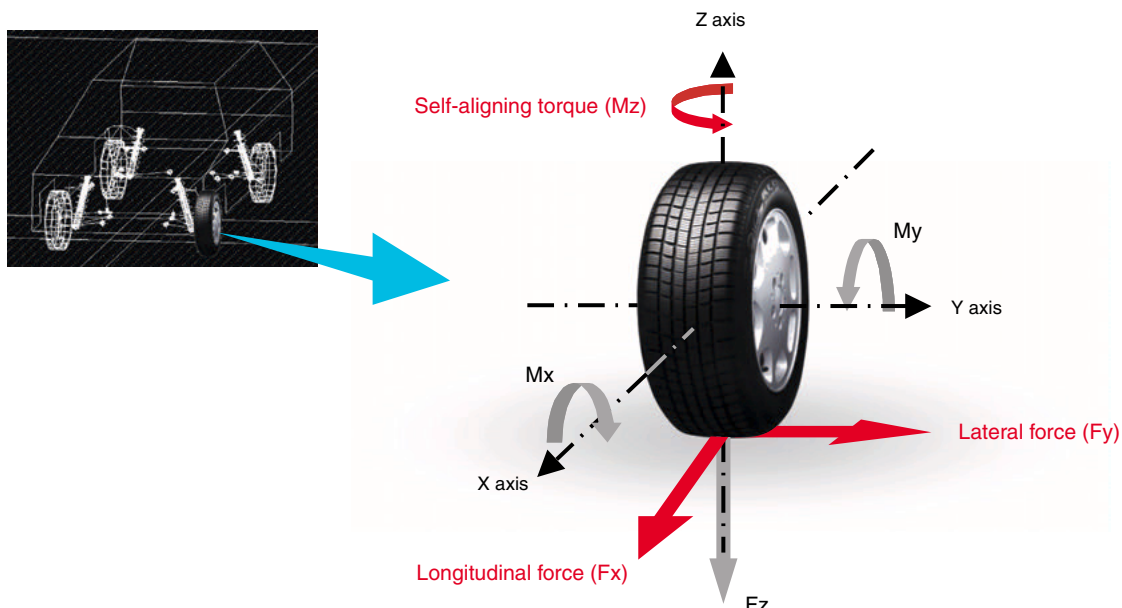


Fig. 4 Three-component forces for tire performance

Longitudinal force

$$F_x = D_{xa} \cos [C_{xa} \tan^{-1} \{B_{xa} (\alpha + Sh_{xa})\}]$$

$$F_{x0} = D_x \sin [C_x \tan^{-1} \{B_x (\kappa + Sh_x) - E_x (B_x (\kappa + Sh_x) - \tan^{-1} (B_x (\kappa + Sh_x)))\}] + S_{v_x}$$

$$B_{xa} = f(\kappa)$$

$$C_{xa} = \text{Constant}$$

$$D_{xa} = f(F_{x0}, \gamma)$$

$$Sh_{xa} = \text{Constant}$$

$$Sh_x = f(F_z)$$

$$S_{v_x} = f(F_z)$$

$$B_x = f(F_z)$$

$$C_x = \text{Constant}$$

$$D_x = f(F_z)$$

$$E_x = f(\kappa, F_z)$$

Lateral force

$$F_y = D_{yk} \cos [C_{yk} \tan^{-1} \{B_{yk} (\alpha + Sh_{yk})\}] + S_{v_{yk}}$$

$$F_{y0} = D_y \sin [C_y \tan^{-1} \{B_y (\alpha + Sh_y) - E_y (B_y (\alpha + Sh_y) - \tan^{-1} (B_y (\alpha + Sh_y)))\}] + S_{v_y}$$

$$B_{yk} = f(\alpha)$$

$$C_{yk} = \text{Constant}$$

$$D_{yk} = f(\alpha, F_{y0})$$

$$Sh_{yk} = \text{Constant}$$

$$S_{v_{yk}} = f(\alpha, \gamma, F_z)$$

$$S_{v_y} = f(\gamma, F_z)$$

$$B_y = f(\gamma, F_z)$$

$$C_y = \text{Constant}$$

$$D_y = f(\gamma, F_z)$$

$$E_y = f(\alpha, \gamma, F_z)$$

$$Sh_y = f(\gamma, F_z)$$

Aligning torque

$$M_z = -t F'_y + M_{zr} + s F_x$$

$$t = D_t \cos [C_t \tan^{-1} \{B_t \alpha_t - E_t (B_t \alpha_t - \tan^{-1} (B_t \alpha_t))\}] \cos(\alpha)$$

$$F'_y = F_y - S_{v_{yk}}$$

$$M_{zr} = D_r \cos [\tan^{-1} (B_r \alpha_r)] \cos(\alpha)$$

$$s = f(\gamma, F_z, F_y, R_0)$$

$$\alpha_t = f(\alpha, \gamma, \kappa, F_z)$$

$$B_t = f(\gamma, F_z)$$

$$C_t = \text{Constant}$$

$$D_t = f(\gamma, F_z, R_0)$$

$$E_t = f(\alpha, \gamma, F_z)$$

$$\alpha_r = f(\alpha, \gamma, \kappa, F_z)$$

$$B_r = \text{Constant}$$

$$D_r = f(\gamma, F_z, R_0)$$

Longitudinal Slip	: κ
Slip Angle	: α
Camber Angle	: γ
Normal Wheel Load	: F_z
Unloaded Tire Radius	: R_0

Fig. 5 Magic Formula model

Magic Formula の式は三角関数を組み合わせた形となっており、係数を適当に設定することでさまざまな曲線を表現することが可能であることがわかる。式の構造からスリップ角 α やスリップ率 κ に対しては高い自由度を持っており、一般的な乗用車用タイヤであればその非線型なコーナリング特性を限界領域まで表現することは可能であると予想される。しかし、キャンバー角 γ に対する自由度は比較的低いいため、コーナリング特性のキャンバー角依存性については限界領域まで精度よく表現できるかどうかについてはこれまで不明であった。Magic Formula のタイヤモデルはタイヤ試験機から同定されたタイヤ単体のコーナリング

特性にしたがって、その特性に合致するような各係数を最適化計算によって見出し、モデル化するものであるが、一般的なタイヤ試験機では、限界領域におけるタイヤの状態を正確に再現することは困難であり、限界領域でタイヤが発生している力を正確に計測することが困難である。従って、通常の最適化計算では限界領域をもカバーした Magic Formula を構築することはできなかったのである。今回実走行によるタイヤ6分力の詳細な分析とタイヤ試験機に改良を加えることによって、限界領域で発生するタイヤの力を正確に同定することに成功し、その特性変化を詳細に調査したところ Magic Formula でも十分に表現できるもの

である事が判明した。さらにこの事実に基づき新たに限界領域におけるコーナリング特性に重み付けを偏らせて最適化する手法を設定することで限界領域でも適用可能なタイヤモデルを構築することが可能となった。Fig. 6は従来の手法で構築されるタイヤモデルと今回新たに設定した手法で限界領域旋回性計算のために構築したタイヤモデルの比較である。定常領域に比べ限界領域の精度が比較的勝っていることが確認できる。

3.2. 限界領域におけるタイヤのたわみ特性

限界領域ではタイヤは横方向に大きくたわむが、Magic Formula では横方向のたわみについて正確に表現することができない。Fig. 7は限界領域ではタイヤの横方向のたわみによって、接地中心が車両内側に変位するため有効トレッド幅が狭くなる現象を図示したものであるが、従来のシミュレーションではタイヤの横方向のたわみを表現できないため、このような有効トレッド幅が狭くなることによ

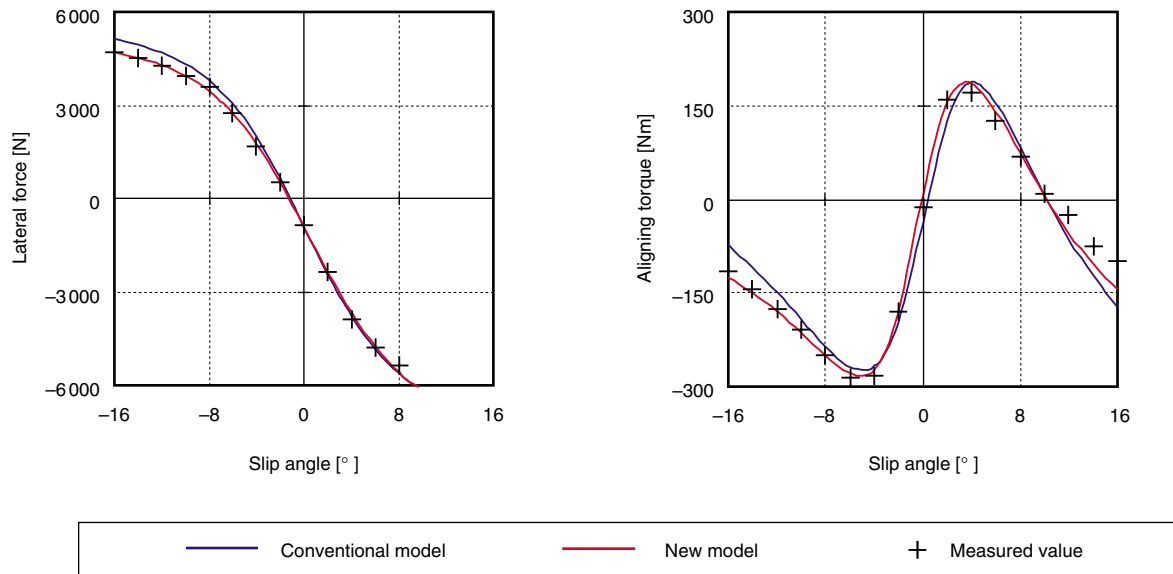


Fig. 6 Comparison between calculated value and measured value
(Load 7500N, Camber angle 10°)

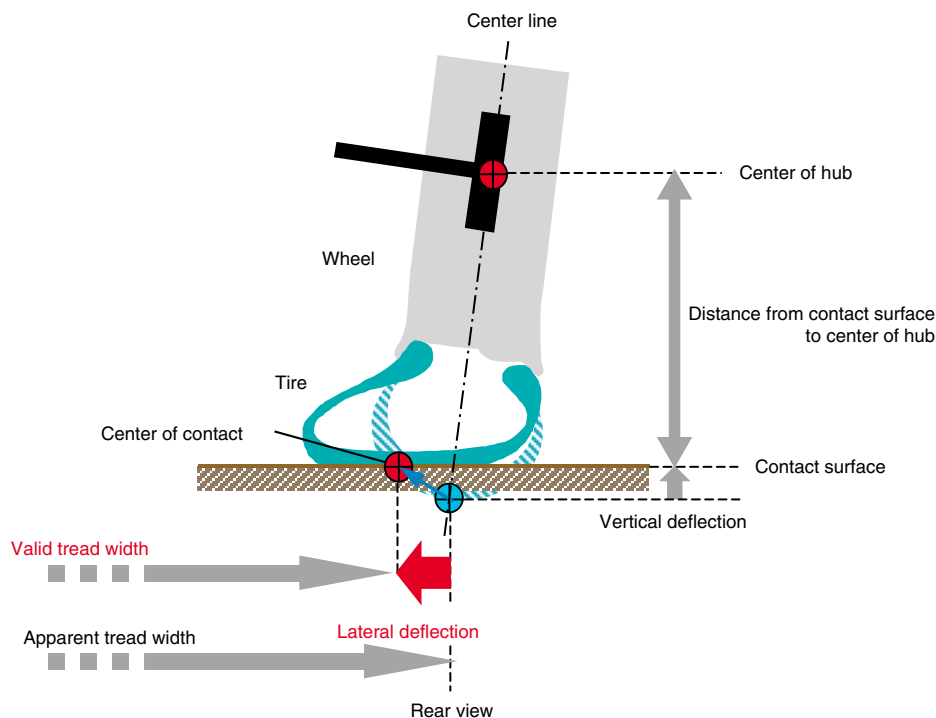


Fig. 7 Change of valid tread width

でもたらされる影響を計算に反映させることができない。

本研究ではこの有効トレッド幅の変化を、タイヤモデルと車両モデルを連結するハブ中心にバネ要素を挟み込むことで表現を可能にした。Fig. 8はスリップ角を与えた場合における接地中心のズレ量を示すグラフである。ハブ中心のバネ要素にはスリップ角と垂直荷重から決まるタイヤの発生横力に対する接地中心のズレをひずみ特性として与えている。

4. 車両モデルの改良

限界領域の旋回性の予測に必要な車両モデルの改良項目は、主に以下の二つの要素がある。

- (1) サスペンションレートの改良
- (2) 駆動トルクコントロールの改良

なおここでは速度の規定あるいは操舵の規定など、一般にはドライバモデルと呼ばれているモデルについても、タ

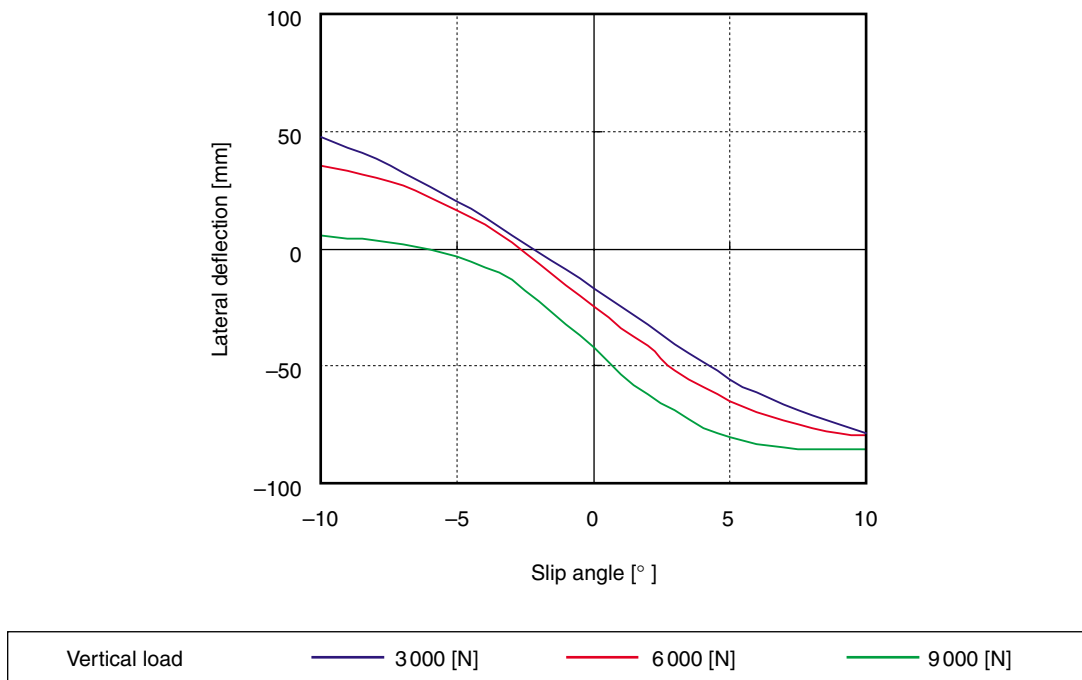


Fig. 8 Measurements of lateral deflection (Camber angle 5°)

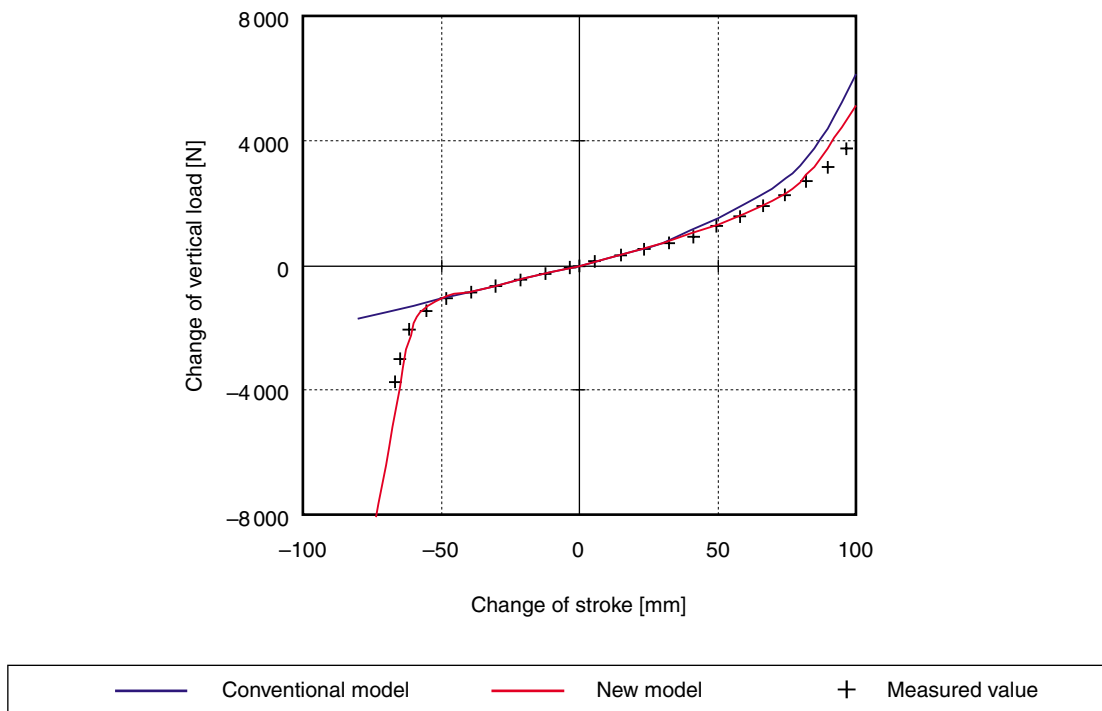


Fig. 9 Suspension rate

イヤモデル以外のシミュレーションモデルを一括して車両モデルと呼ぶこととする。

4.1. サスペンションレートの改良

限界領域ではバンプおよびリバウンドストロークが通常領域では使用しない範囲にまで及ぶため、フルバンプ状態からフルリバウンド状態までの広い範囲で、実車相当の非線形特性を設定しなければならない。Fig. 9は従来のシミュレーションモデルに採用されるサスペンションレートと今回限界領域を考慮したサスペンションレートの設定を比較した一例である。前者は通常領域の計算では問題とはならないが、限界領域の計算では後者の設定で計算する必要がある。

4.2. 駆動トルクコントロールの改良

高い速度域から急激な旋回状態に入ると、タイヤのサイドフォースの車両に対する前後方向成分が強い走行抵抗として作用する。実車テストでは速度を一定に保つため、アク

セル操作で速度コントロールをするが、従来のシミュレーションでは駆動輪にトルクを発生させて速度一定の制御をしている。通常領域を計算する場合には走行抵抗の値は比較的小さいため、駆動トルクの値が極端に大きくなることは無く問題にはならない。しかし限界領域では走行抵抗の値が大きいため急激に極端に大きな駆動トルクが発生してしまう。ゆえにタイヤの摩擦円の関係からタイヤの横力が現実に対して極端に低下してしまうという現象が起こり、計算結果に大きなズレを生じさせてしまう。そのため限界領域旋回性を計算する場合には、急激な横力の低下が発生しないように、駆動トルクコントロールを調整した。その結果速度を実車テストの値に近づけつつ、なおかつ直進時から旋回状態に移行する時に生じる駆動トルク、横力は実車に近い状態にすることができた。Fig. 10は車両4輪に働く駆動力と横力について、従来のシミュレーションモデルにより計算させた場合、今回新たに構築したシミュレーションモデルにより計算させた場合、および実走行時に生じている力の三者を比較したものである。

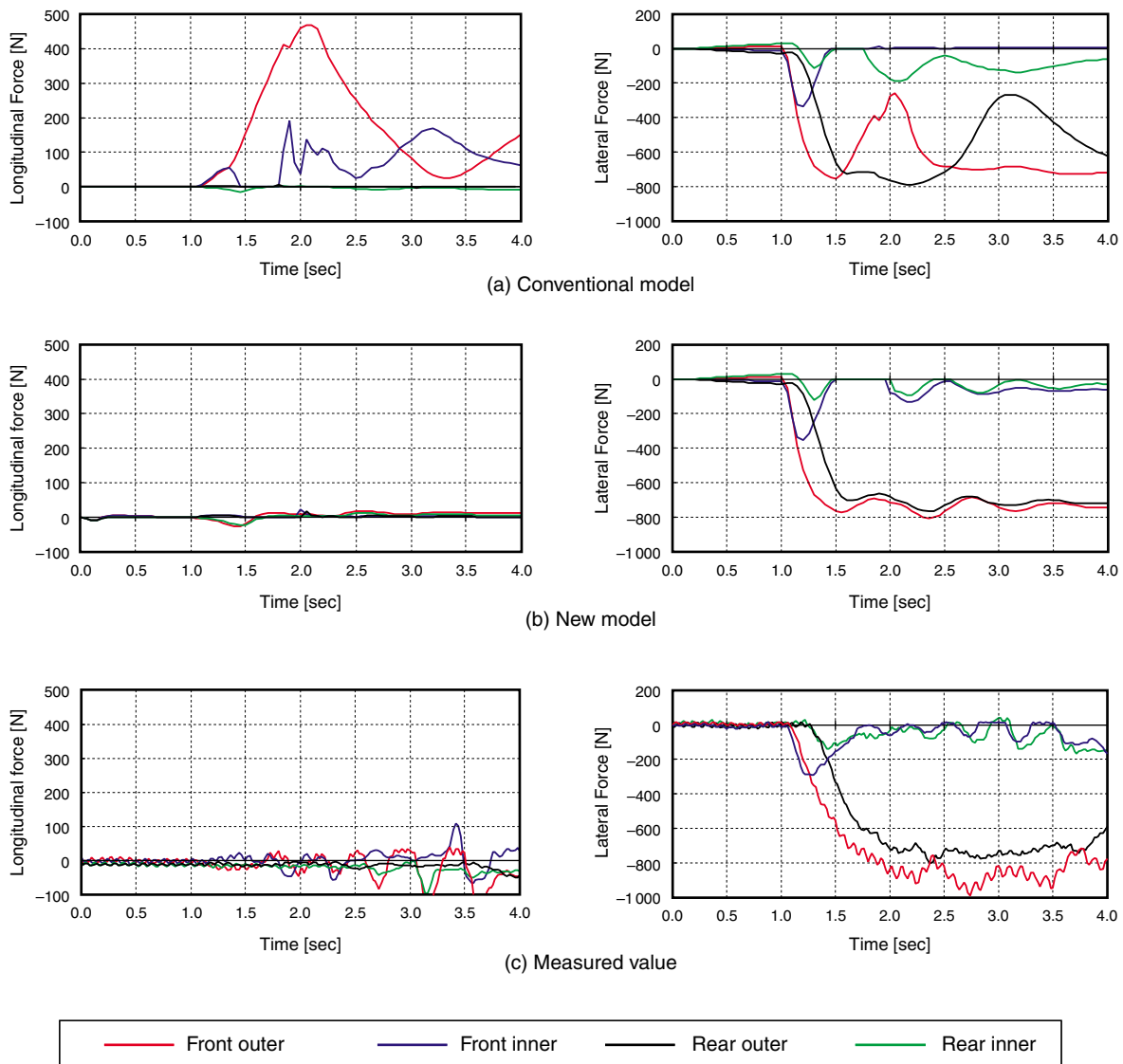


Fig. 10 Change of tire forces with torque control

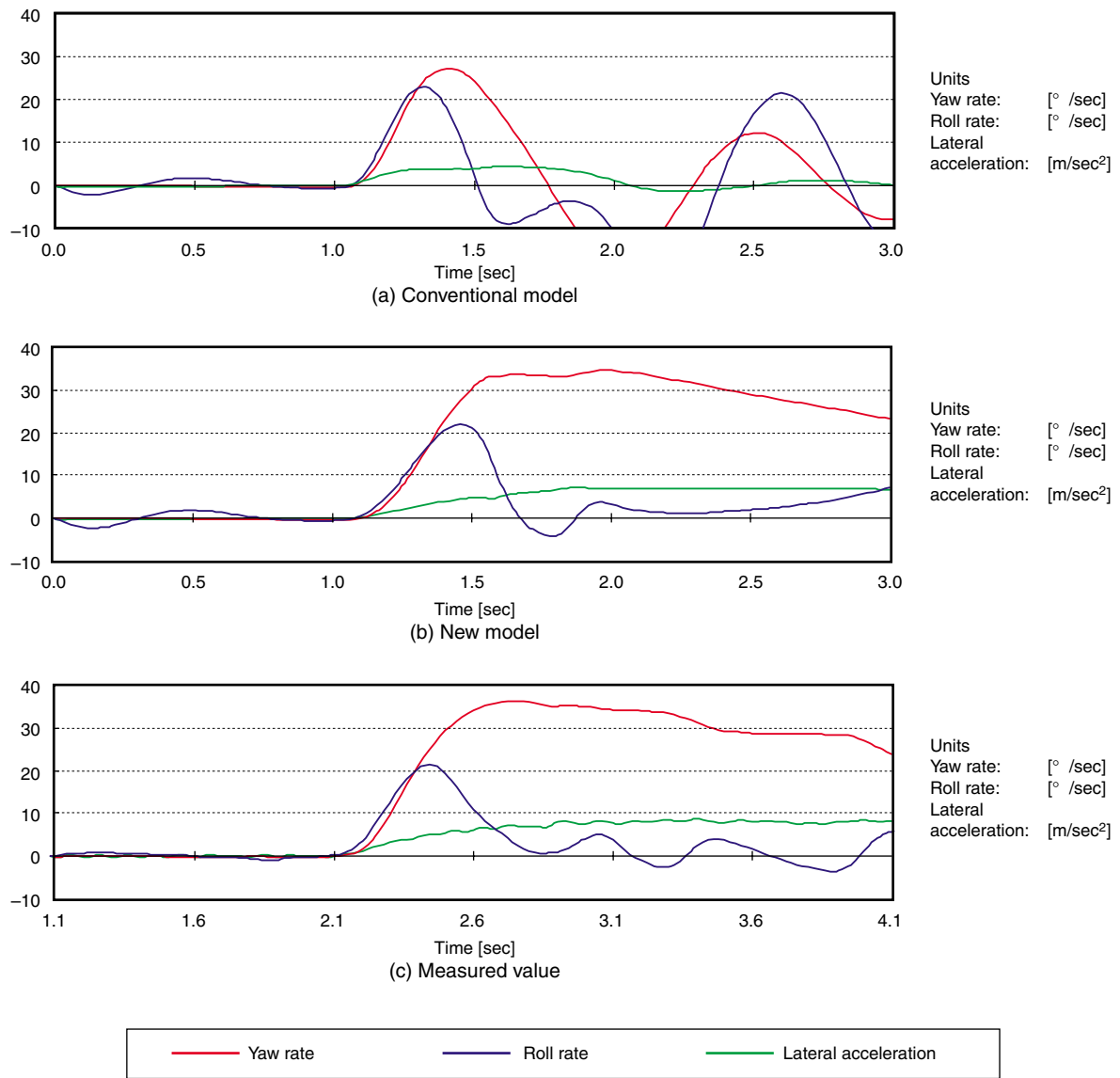


Fig. 11 Comparison between calculated value and measured value

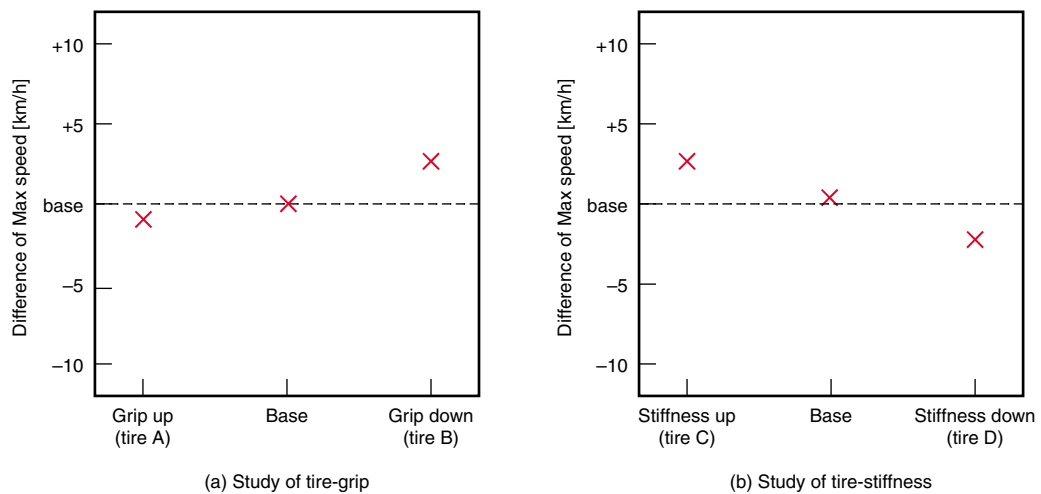


Fig. 12 Verification of simulation model

5. 計算結果

新たに構築されたタイヤモデル及び車両モデルによるJターンモード走行の計算結果を Fig. 11 に記す。(a) は従来のシミュレーションモデルによる計算結果であり、(b)は本研究により得られたモデルによる計算結果である。また(c)は実測値である。

限界領域では車両挙動が定常状態に速やかに移行せず不安定な状態が続くため、操舵入力後数秒区間の挙動予測が重要となってくる。操舵入力後約2秒間のヨー角速度、横加速度、ロール角速度等各物理量の時系列変化は、実測値と比較していずれも予測計算としては十分に高い一致度を示しているといえる。

またFig. 12は構築されたタイヤモデルを基準として、タイヤのトレッドゴムの違い(a)、タイヤの剛性違い(b)の、二通りの場合についてタイヤの種類と定常的な旋回に入れなくなった最大速度との関係をグラフ化したものである。計算結果は実走行によるテスト結果と高い一致をしめしており、このシミュレーションモデルの妥当性について確認することができる。

6. まとめ

限界領域の旋回性について高い精度で予測する技術の構築を目指し、以下の結論が得られたと考える。

- (1) 限界領域のタイヤの非線型性は、Magic Formula タイヤモデルによる表現が可能である。
- (2) タイヤの横方向のたわみはハブ中心にバネ要素をはさみ込むことで表現可能となる。
- (3) 限界領域を計算させるためには、フルバンプからフルリバウンド状態までの最大ストロークの幅で高い精度のサスペンションレートを車両モデルで設定する必要がある。
- (4) 限界領域の計算では、速度維持のために発生する極端に大きな駆動トルクを抑える必要がある。
- (5) (1)から(4)を従来技術に加味することで限界領域の旋回性を仮想空間に高い精度で再現することが可能となる。

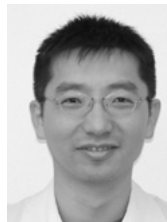
本研究の成果により、限界領域の旋回性を含めた広い範囲での車両運動特性の設計を机上で考察することが可能となり、実車による評価の削減、幅広い車両特性の検討等に向け大いなる可能性を示したと言える。

7. 参考文献

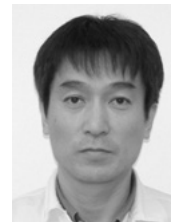
- (1) Fiala.E.: SeitenkrafteamRollenden Luftreifen. VDI, Vol.96, No.29 (1954)

- (2) Gim.G.,Nikraves.P.E.: An Analitical model of Pneumatic Tires for Vehicle Dynamic Simulations. Part1: Pure Slips, International Journal of Vehicle Design, Vol.11, No.6, p.589-618 (1990)
- (3) Pacejka.H.B.: The Tyre as a Vehicle Componet, XXVI FISITA Congres, Prague, June, p.16-23 (1996)
- (4) Maurice.J.P.,Pacejka.H.B.: Dynamic Tyre Response to Yaw Angle Variations, AVEC 9836833

■ 著 者 ■



豊島 貴行



宮谷 泰啓



佐藤 祐二



新井 信太