



技術論文

二輪車の操縦特性調査

Steering Characteristics of Motorcycles

藤井 茂 塩澤 総一 品川 晃徳 岸 知昭

Abstract

To answer the emerging needs for greater safety and running performance as the motorcycle market matures, motorcycles today are increasingly designed with electronic control devices whose functions are to control the movement of the machine. While the adoption of these electronic control devices makes it possible to control the performance of the machine with a high degree of accuracy and detail, there is also a problem of rising development cost due to the need to find and select suitable control parameters. This has led the industry to seek methods for predicting the effect of control parameters on machine handling and selecting practical parameters from the standpoint of machine handling in order to develop new methods for efficiently optimizing control parameters.

With motorcycle, there are cases where slight differences in operating actions or shifting of body weight by the rider can have a big effect on the characteristics of machine movement. However, investigations are limited to steady state conditions, it is possible to reduce the effect of the rider to the differences in center of gravity resulting from different body lean angles and thereby conduct tests with a high degree of repeatability. In light of this we focused efforts in this research project on handling characteristics in steady-state conditions and performed simulations and measurements with the aim of developing a method for quantitative evaluation of the basic elements of machine handling.

In recent years, researchers including Ichiro Kageyama have focused on steady-state characteristics and have proposed performance indexes (metrics) for steady-state characteristics of motorcycles and presented their theoretical background and the differences with 4-wheeled vehicle metrics. However, these studies have not included accurate measurement of the angle of lateral tire slippage as one of the important parameters for determining evaluation indexes. As a result, their considerations have been primarily theoretical and there has been a lack of verification of their findings with actual test results.

In this study, we report on the results of measurements we conducted on steady-circle turning using a particular sport touring motorcycle model, in which measurements were taken for the parameters of steering angle, steering torque, roll angle and tire force and moment and tire lateral slip angle. With regard to tire lateral slip angle measurement data in particular, we utilized two different measurement methods while also comparing the results with simulation results to verify their accuracy. Then, we also investigated the effect of differences in rider lean attitude on steady-state characteristics. Taking these results, we then went on to use our actual

test measurement data to evaluate the validity of the handling evaluation indexes proposed by Kageyama (et al.) for steering factors, lateral slip factors, and steering torque factors.

1 はじめに

二輪車市場の成熟化が進み、更なる安全性や走破性といったニーズに応えるため、二輪車にも車両運動をコントロールする電子制御デバイスが導入されることが増えている。電子制御デバイスの導入により、きめ細かな性能の作り込みが可能になる反面、最適な制御パラメータを選定する為の開発コスト増大が課題となっている。そこで、制御パラメータの最適化を効率的に行うために、制御パラメータごとに操縦性が予測でき、操縦性の観点からも合理的にパラメータを決められるといった開発手法が期待されている。

二輪車ではライダーの僅かな操作や体重移動の違いで車両の運動特性が大きく変わる場合があるが、定常特性に限るとライダーの影響はその姿勢の違いによる重心位置の違いに限定できるので、再現性の高い試験も可能である。そこで、私達の研究プロジェクトでは定常特性に注力して、シミュレーションや計測を駆使し、定量的に基本的な操縦特性を評価する手法を開発することを目指している。

また、景山ら^{[1]~[4]}も、定常特性についての研究に近年注力しており、定常特性についての操縦性評価指標の提案やその理論的な背景、および四輪車の操縦性評価指標との違いを示している。しかし、これらの研究では評価指標を求める際に重要なタイヤの横すべり角を精度良く計測する手法が確立していないために理論検討が中心となっており、実験による検証は不十分である。

本報では、スポーツツアラー二輪車での定常円旋回走行中の舵角、保舵トルク、ロール角、タイヤ力・モーメント、タイヤ横すべり角の計測結果を報告する。特に、タイヤ横すべり角の計測データについては2つの手法で取り組むと共に、シミュレーション結果とも比較し、その精度を検証した。続いて、ライダーのリーン姿勢の違いが定常特性に与える影響を調査した。加えて、計測結果から、景山らの提案したステア特性(スタビリティファクタ)、横すべり特性、保舵特性の操縦性評価指標を実測データより算出し、有効性の検証を行った。

2 計測方法

本報では排気量1300ccの大型スポーツツアラーを計測対象にした。走行方法は、半径20m、30m、50mのコースを、それぞれ幾通りかの速度にて、時計回り、反時計回りする定常円旋回試験とした。計測項目は舵角、保舵トルク、車速、ロール角、タイヤ力・モーメント、タイヤ横すべり角とし、計測結果を表示する座標系はISO座標系とした。(図1)

タイヤ横すべり角については慣性&GPS姿勢計測器(以下、慣性GPSセンサ)(図2)と光学式2軸速度計測装置(以下、光学式センサ)(図3)という2種類の方法を用いて同時に計測を行い、両者を比較した。慣性GPSセンサでは、慣性センサで計測した加速度、角速度のデータと、GPSで計測した位置データを用いて、カルマンフィルタ等による処理により、センサを取り付けた後部座席位置での前後、横速度を求める。そして、センサ位置での2軸速度を基に、ヨーレート、ロールレート、タイヤ接地位置、舵角等のデータ

を用いた換算式によりタイヤ接地位置での前後、横速度に換算し、横すべり角を求めた。

一方、光学式センサではタイヤ前後にそれぞれ取り付けられたセンサにてセンサ直下の前進速度、横速度を求め、ヨーレートと前後位置差分の補正を行い、タイヤ接地点での横すべり角を求めた。(図4)

また、横すべり角計測を行った車両と同型の車両にホイール六分力計を装着して、タイヤ力・モーメントの計測を行った。(図5)

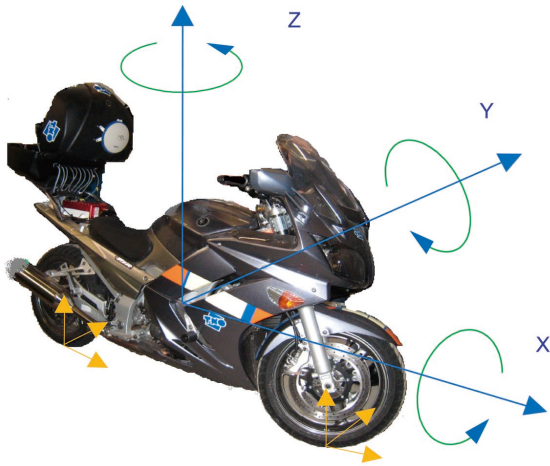


図1 座標系



図2 慣性 GPS センサ

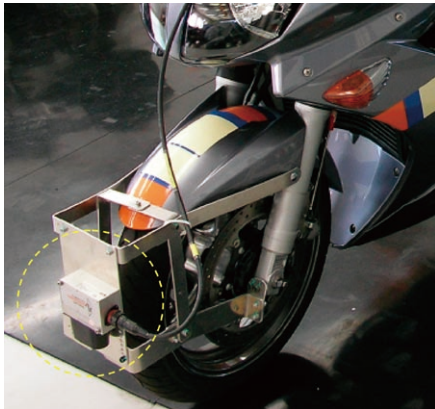


図3 光学式センサ

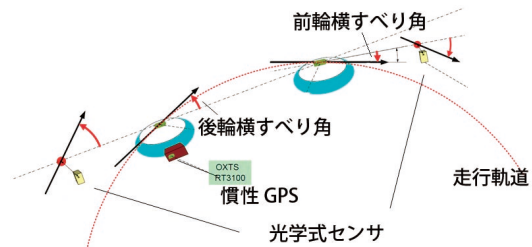


図4 横すべり角計測センサ配置

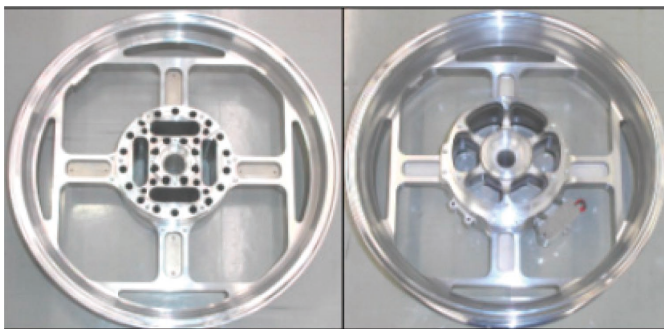


図5 ホイール六分力計

3 計測結果

図6に半径50m、65km/h、時計回り旋回の定常円旋回試験データの一例を示す。図中に示す軌跡データからわかるように50mほどの直線区間にて加速を行い、円軌道に入り、一周走行の後、初めの直線走行の延長線上のコースに戻し、直線路にて減速した。このデータでは12～22秒の区間で速度、ロール角、舵角がほぼ一定となっており、この区間を定常円旋回区間と見なした。しかし、実際のところ、保舵トルクや横すべり角は円旋回中、ドリフトするかのように一方向に変化し続ける場合が見られた。この現象はロール角や速度が大きい場合に特に顕著に見られ、タイヤ温度の上昇と関係が深いと推測している。

ここで、例に示した保舵トルクは正の値を示した。この場合の正の値は反時計回りの向きである。すなわち、時計回りの旋回に際して、旋回する方向と逆向きのトルクを加えたことを示し、舵が旋回する方向に切れ込むのを抑制する当て舵を加えている。そして、ここに示した例では旋回を継続すると保舵トルクの値は低下した。

横すべり角は進行方向に対して左側に進む向きを正とした。前輪の横すべり角はこの例では慣性センサ、光学センサ共に負の値を示した。これは旋回中心に向かう向きである。また、後輪は正の値で、旋回中心から遠ざかる向きである。(図4)

示した例では旋回を継続するに従い、前後輪共に、旋回中心から次第に遠ざかる向き(この例では正の向き)に横すべり角が変化した。慣性センサと光学センサのデータは共に1Hzローパスフィルター処理しているが、慣性センサの方がスムーズな結果であった。また、いずれのセンサも低速時は計測値が不安定になる場合が見られた。

以下では、定常円旋回データの平均値を条件の違いごとに比較するが、その場合、平均値は速度、ロール角、舵角がほぼ一定となった区間を5秒ごとに平均した値を1つの点として示している。

図7では横軸に車体ロール角を取ったグラフにて、半径50mの定常円旋回における前後輪接地点におけるタイヤ横すべり角の平均値を、慣性センサと光学センサとシミュレーション(モデルの詳細は次章参照)の結果の3者で比較している。計測結果のばらつきは大きいですが、3者の結果はおよそ一致した。横すべり角の計測値について、以下では光学式センサの値を示す。

図8、9には半径50m、30m、20mの定常円旋回走行での定常走行時の舵角、保舵トルク、前後輪横すべり角、前後輪タイヤ力・モーメントの計測結果とシミュレーション結果を示す。舵角についてはバラツキが小さく、シミュレーション結果とも良く一致した。保舵トルクについては大きなバラツキが見られた。しかし、同じロール角の場合、旋回半径が小さいほど大きな値を示すという点ではシミュレーションと一致した。

前輪横すべり角についてはバラツキが大きく、旋回半径ごとの違いは明確に見られなかった。ロール角に対する変化の様子はシミュレーション結果と同様であった。

後輪横すべり角についても同様に旋回半径の差は見られなかったが、シミュレーション結果とは同じ傾向を示した。

タイヤ横力 F_y (CPI)については前後輪共に旋回径に関わらずロール角に比例する値であり、シミュレーションとも良く一致した。

前後軸周りのモーメント M_x (STI)は後輪では旋回径ごとの違いが現れなかったが、前輪では旋回径ごとに違いが生じ、その傾向はシミュレーションと同一であった。この違いが保舵トルクに置ける旋回径ごとの違いに結びついているものと思われる。タイヤの上下方向軸周りのモーメント M_z (STI)についても旋回径による顕著な違いは見られなかった。また、シミュレーションとはほぼ一致した。

(注) (STIはタイヤの中心点を原点として、座標軸がタイヤの動きに一致する座標系でタイヤ力を表す。CPIはタイヤと路面の接点を原点とし、座標軸が路面従う座標系でタイヤ力を表す。図10参照。詳細については参考文献7を参照のこと)

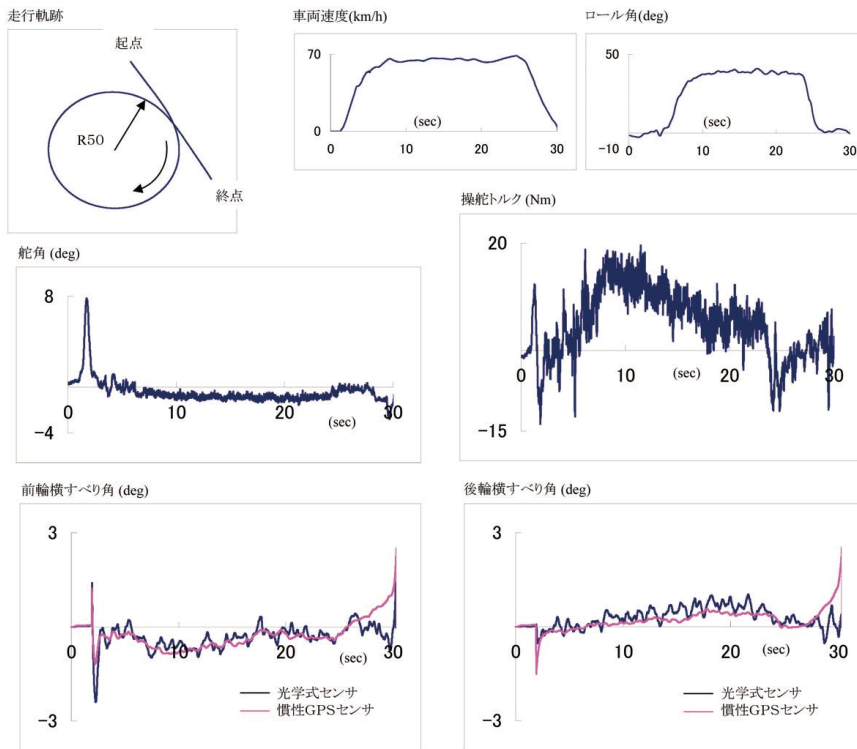


図6 時系列データ例

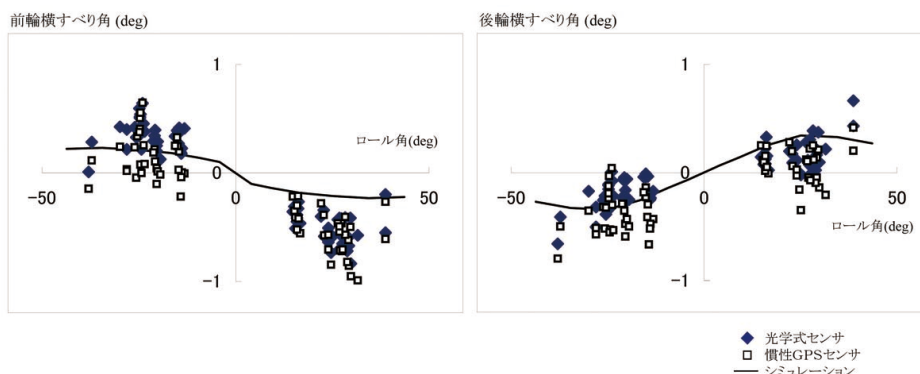


図7 光学式センサと慣性GPSセンサとシミュレーションの横すべり角データ比較 (旋回径50mの場合)

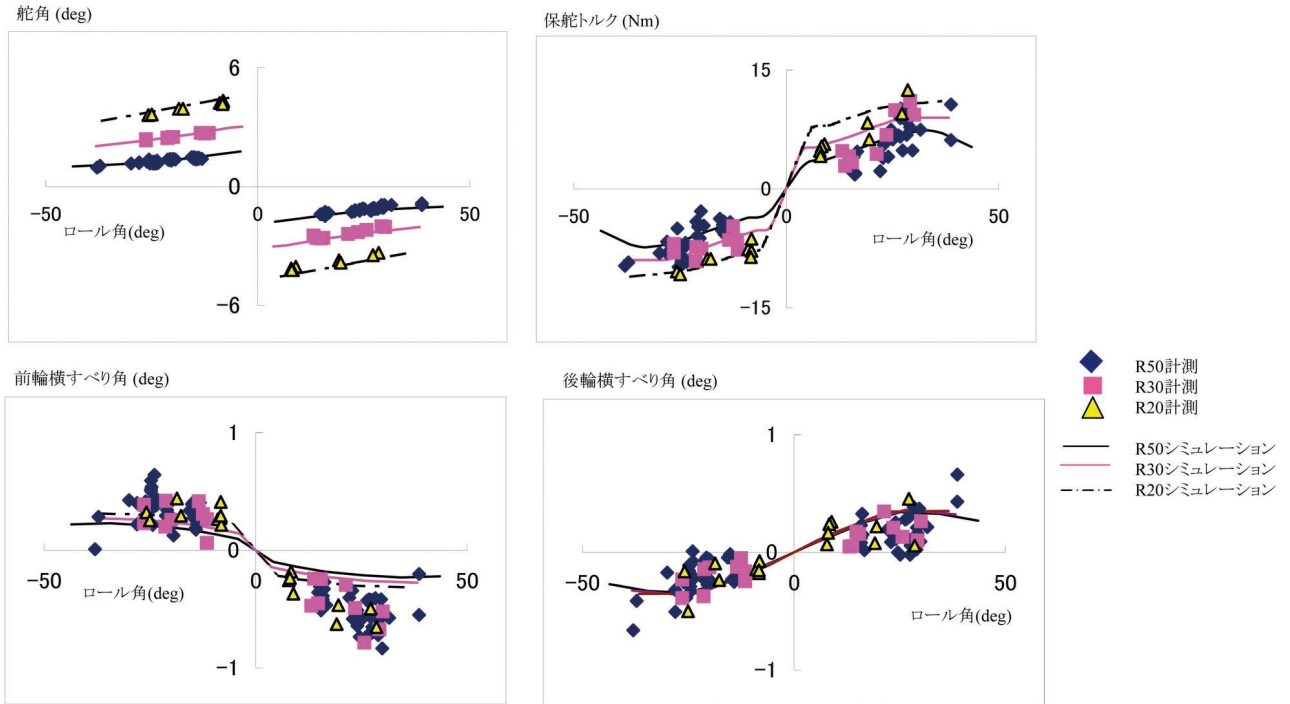


図8 旋回半径ごとの定常円旋回データ

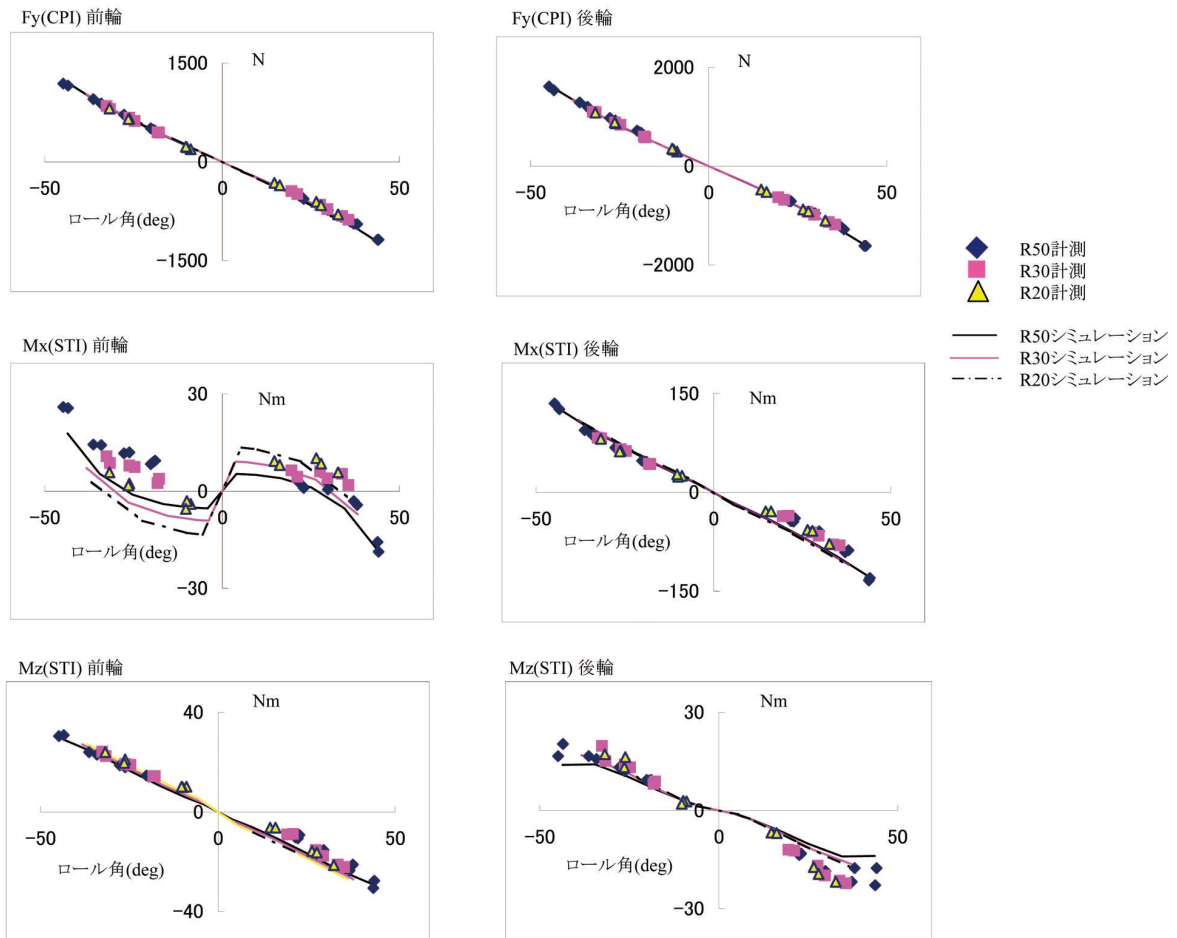


図9 旋回半径ごとのタイヤ力・モーメント

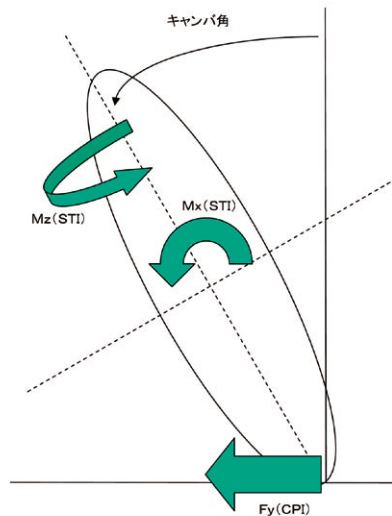


図 10 タイヤ力・モーメントの軸と方向 (正面図)

4 シミュレーションモデル

車体モデルは、SimMechanicsにより作成した。図11に示すように、概要は、剛体数10(メインフレーム、ライダー、エンジン、タンク、フロントフォーク、フロントバネ下、前輪、アームリレイ、リアアーム、後輪)、回転ジョイント4(ステアリング、リアアームピボット、前後輪)、伸縮ジョイント1(フロントサスペンション)、バネダンパ2(フロントサスペンション、リアサスペンション)とした。自由度は、メインフレーム基準点の6自由度(前後左右上下、ロール角、ピッチ角、ヨー角)の他に前後輪の回転、フロントサスペンションの伸縮、リアアームの回転角、ステアリングの回転角と合計で11自由度のモデルとした。外力としては重力、空気抵抗、揚力とタイヤ荷重を用いた。入力データは各剛体の重心点、接続点の座標や重量、慣性モーメント、バネ、ダンパ等の物性値やタイヤについての定数等を入力した。

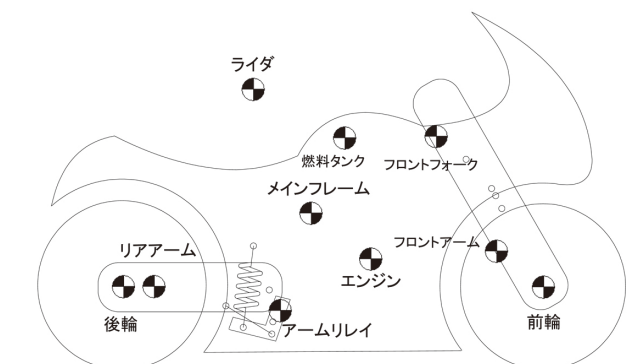


図 11 シミュレーションモデルの質点の配置

タイヤモデルはMFTyreを使用した。このモデルは、タイヤの路面に対する状態(高さ、キャンバ角、横すべり角、前後すべり率)を入力として、タイヤごとに求められたパラメーター値を用いて、接地点における前後力、横力、接地荷重、セルフアライニングトルク、転がり抵抗モーメント、オーバーターニングモーメントを出力する。モデルの各パラメーターは計測値を用いた。

走行シミュレーションは、車体モデルの状態を、あらかじめ設定された目標コースや目標速度に到達するように、操縦モデルが制御することにより実行される。操縦モデルはドライブトルク τ_d とステアリングトルク τ_s をそれぞれ、

$$\langle \text{式 1} \rangle \quad \tau_d = -K_{p1}(v - v_{ref})$$

$$\langle \text{式 2} \rangle \quad \tau_s = -K_{p2}(\phi - \phi_{ref}) - K_{d2} \dot{\phi} - K_{d3} \alpha$$

に従って算出するものとした。ここで、 v を前進速度、 ϕ をロール角、 α を操舵角とした。すなわち、目標速度 v_{ref} と目標ロール角 ϕ_{ref} に速度とロール角が一致するように P(D) 制御を行うものに、ステアリングダンパの効果を加えたものである。ステアリングダンパの項については、通常は車体モデルにその機能を持たせることが多いが、ステアリング部に発生する摩擦力は通常小さく、実際にはライダーが加える力であることと、走行条件によってステアリングダンパの値は変化すると考え、式(2)に加えた。なお、今回は所定の旋回半径の走行を実現するために目標ロール角を調整し、安定走行を実現するための操縦モデルにおける各ゲインは、目標速度と目標ロール角ごとに、事前に遺伝的アルゴリズムにより決定した。そして、シミュレーション中は、走行条件に応じた最適値を選択することとした。

5 ライダリーン角の計測結果への影響について

3章ではライダーのリーン角を同一の条件で計測した場合のデータのみを示したが、ここではライダーのリーン角を標準状態のリーンウィズからリーンインやリーンアウトに変更した場合(図12)のデータを示し、その違いについて検討を行う。

図13に示すように、リーンインにすると操舵角絶対値は増加し、保舵トルクは当て舵が小さくなる、或いは、引き舵になる場合があり、前輪横すべり角も絶対値が小さくなり、旋回中心から離れる向きになる場合があった。一方、後輪横すべり角は旋回中心から離れる向きに増加した。また、図14に示すようにタイヤ横力 F_y にはほとんど変化が見られないが、詳しく見ると、わずかながら、横すべり角の変化に伴い、リーンインの場合、同じロール角では前後輪共に横力 F_y が増加している。また、 M_x も前後輪共にロール角を復元する向きに増加した。 M_z についてはあまり明確な差ではないが、前後輪共に絶対値が小さくなった。

これらの変化は、リーンインによりロール角を増加させる向きにモーメントが発生したために、それに釣り合うための復元モーメントが必要となったことから、前後輪共に旋回中心から離れる向きに横すべり角が増加して、コーナリングフォースも増加したことが原因と考えられる。

また、リーンインにより保舵トルクが減少する原因は、前輪 M_x の変化が主な原因と考えられるが、 M_z の変化も寄与している。また、別の見方をすると、前輪横すべり角の変化により、コーナリングフォースが増加したことが原因と見ることできる。

リーンインして保舵トルクが0となる場合、手放しでも旋回を保つことができる。リーンインしない場合は舵が旋回する側に切れ込まないように舵を押さえないと旋回できないが、この傾向が強い場合は、曲

がりたい方向と逆に舵を切る、いわゆる逆転舵が必要になる。よって、保舵トルクが大きい車両では大きなリーンをするか、逆転舵をしなければ、旋回に入れられないために直進性の強い車両、または、旋回しにくい車両と言う評価になりやすい。一方、保舵トルクが小さい車両は舵を意識しなくとも小さな体重移動により旋回に入れるため、旋回性が高い車両と言う評価になり易い。

リーナウトの場合は操舵角絶対値が減少し、操舵トルクは増加した。前輪横すべり角は旋回中心に向かう向きに増加した。後輪横すべり角は旋回中心から離れる向きで見て減少した。また、タイヤ力についてはリーナウトの場合はリーニンと逆に横力がわずかに減少し、 M_x はロールを復元する向きと逆に変化し、 M_z はロールしている側に切れ込む方向にわずかに増加した。



図 12 ライダのリーン角の違い

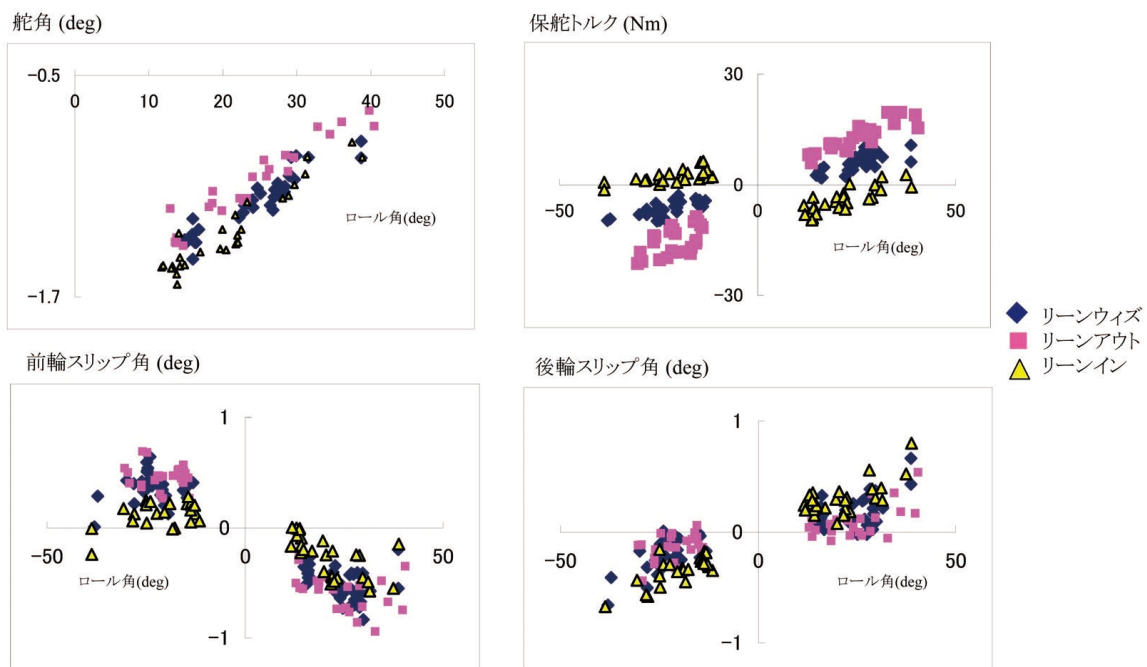


図 13 ライダのリーン角ごとの定常円旋回データ (旋回径 50m の場合)

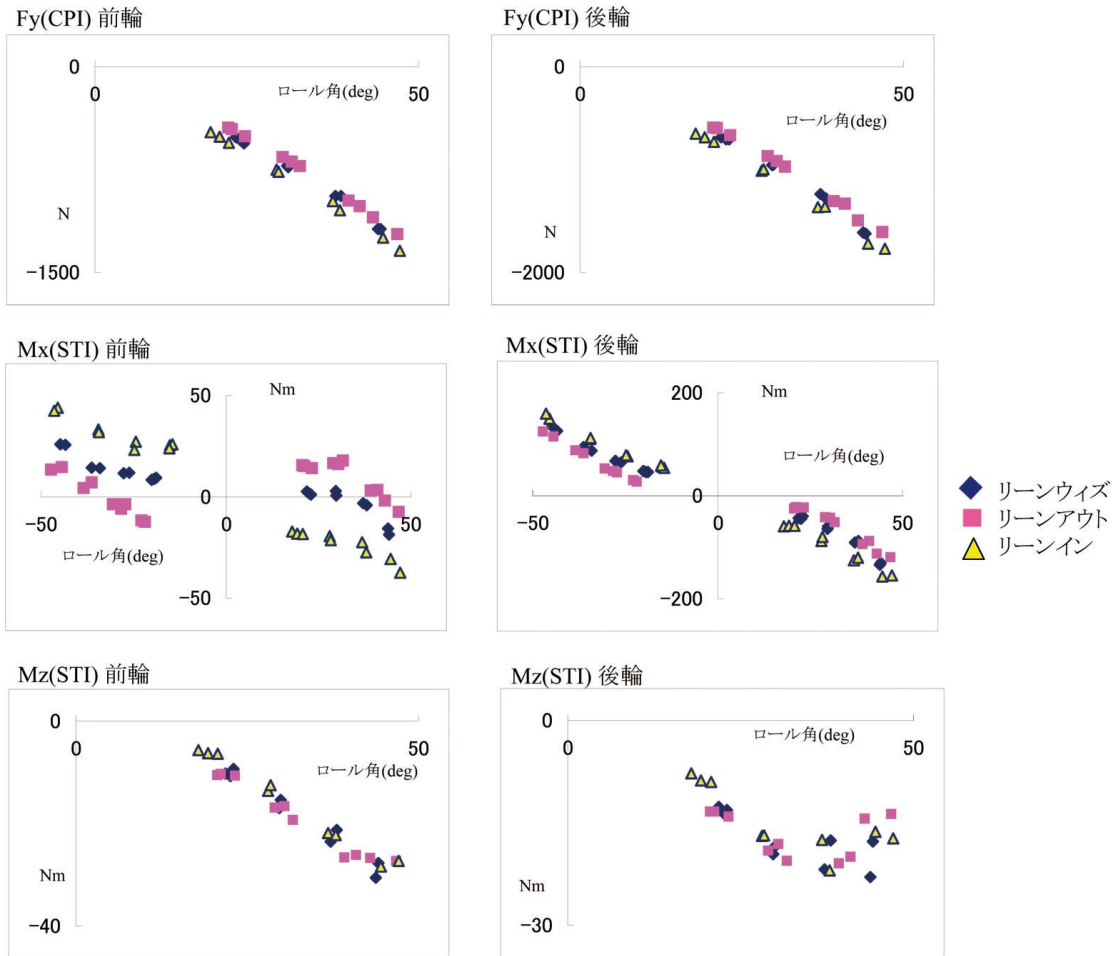


図 14 ライダのリーン角ごとのタイヤ力・モーメント (旋回径 50m の場合)

6 ステア特性と横すべり特性と保舵トルク特性

ここでは、これまでに示した計測結果を用いて、参考文献1,2等で景山らが提案している定常円旋回時の操縦性についての特性値を算出あるいは検討する。

参考文献1,3等に倣い、図15、16に速度2乗と舵角、重心点での横すべり角、保舵トルクの絶対値の関係を示す。また、参考文献1に示された以下の式に従って、幾何学的舵角の値も用いてスタビリティファクタを求める。

$$\langle \text{式3} \rangle \quad \frac{\delta}{\delta_0} = \delta \times \frac{R}{l} \times \frac{\pi}{180} = 1 + K_\delta \times V^2$$

δ : 舵角 (deg)

$\delta_0 (= \frac{l \times 180}{R \times \pi})$: 幾何学舵角

R : 旋回半径

l : ホイールベース(m)

K_{ϕ} : スタビリティファクタ(s^2/m^2)

V : 速度(m/s)

表1 スタビリティファクタ

旋回径 / リーン	幾何学的舵角 (deg)	スタビリティファクタ (s^2/m^2)
20 / リーンウィズ	4.30	-0.00227
30 / リーンウィズ	2.86	-0.00180
50 / リーンウィズ	1.72	-0.00125
50 / リーンアウト	1.72	-0.00177
50 / リーンイン	1.72	-0.00105

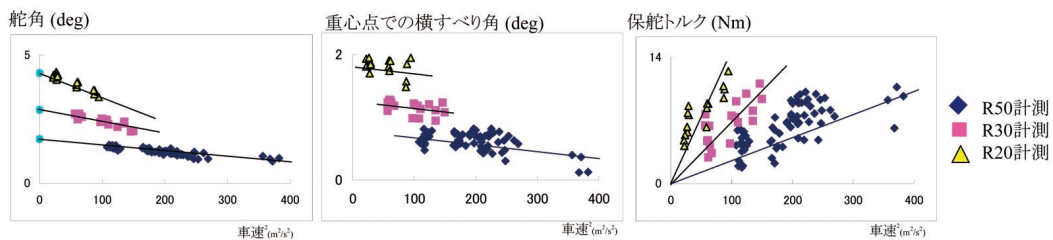


図15 旋回径ごとの定常円旋回データ (横軸車速2乗)

求められたスタビリティファクタ値を表1に示す。結果は負の値を示し、オーバーステアを示す。速度の2乗と舵角の関係はどの旋回半径でも直線的であり、また、図16に示すように、リーン角が変化した場合であっても、その傾きが大きく変化しないことから、指標としての有効性が期待できる。しかし、定常円旋回における小さな舵角の増減をライダーは通常実感できず、同じ旋回径で走行する場合で、“速度が増すときに、舵角が減少するのでオーバーステアである”という四輪と同じ評価方法は二輪車の操縦フィーリングと結び付き難い。また、4章にて示したように舵角が小さくなり、本指標ではオーバーステアが強まると評価されるリーンアウトの場合は、保舵トルクが大きくなり、気を緩めると舵が切れ込むことによりロール角が減少し、旋回径が大きくなってしまいう傾向を示す。このことは四輪のオーバーステアの性質と逆になるために、混乱を生む場合があると思われる。参考文献8にあるように前後輪の横すべり角のバランスを示す指標として活用する方法なども参考にしつつ、様々な車両、タイヤ、走行条件にて、データを取得すると共に、操縦フィーリングを記録し、対比することにより、検討を継続することが必要である。

次に、横すべり特性について検討する。図15、16から、旋回径、リーン角によって、重心での横すべり角の値は変化するが、速度2乗に対しての傾きはあまり変化しなかった。ただし、半径50mの場合に速度を上げ限界走行に近づけた場合、重心横すべり角が小さな値になった。このことから重心横すべり角が大きい(旋回中心に近づく向きで)ということは、前後輪のグリップに余裕があることを示すように思われる。

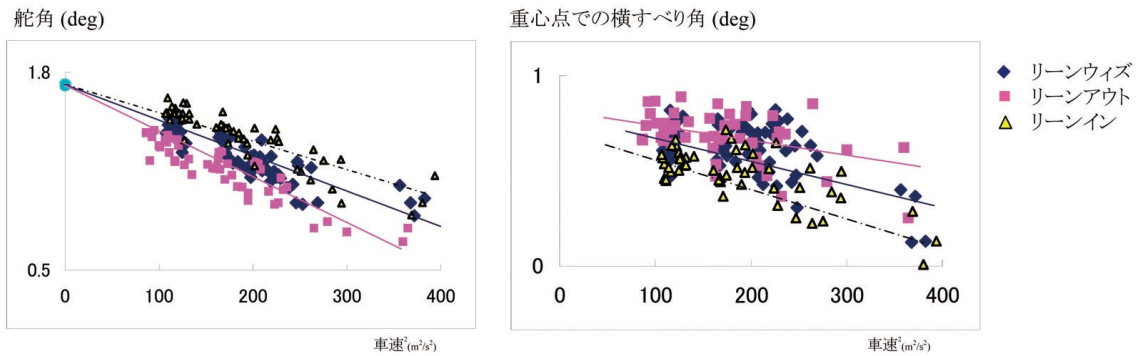


図 16 ライダのリーン角ごとの定常円旋回データ（横軸車速 2 乗）

最後に速度の2乗と保舵トルクの関係を見ると、保舵トルクは旋回径ごとに異なる値を示すが、同じ旋回径のデータに限ってみると、速度の2乗と保舵トルクはほぼ比例関係にありこの傾斜角を求めることは可能である。そして、保舵トルクの軽重は旋回の軽快さといった官能評価指標とも結び付き易く、保舵トルクが増加した場合、直進性が上がる一方、舵が重く、旋回しにくいと表現される場合があり、非常に重要な指標と考えられる。しかし、保舵トルクは先の図13でも示したようにライダーのリーン角によって大きく変動するので、ライダーの異なる結果を比較する場合には注意が必要である。

7 おわりに

本報では二輪車の定常円旋回試験の計測結果を紹介し、その測定結果がシミュレーションと良く一致することを示した。

特に、横すべり角の計測は、慣性&GPS姿勢計測器による計測結果と光学式計測器による計測結果を比較し、同様の結果が得られたことから、二輪車特有のキャンパ角の大きい状態での横すべり角計測手法を確立したことを示した。

また、ライダーのリーン姿勢の違いが舵角、保舵トルク、タイヤ横すべり角、タイヤ力・モーメントに与える影響を示した。ライダーのリーン姿勢の違いは、舵角、タイヤ横力には影響が小さく、一方、保舵トルクやタイヤ横すべり角には大きな影響がでることが判った。

続いて、景山らの提案した操縦性評価指標に計測結果を当て嵌め、スタビリティファクタの値を求めた。スタビリティファクタはライダーのリーン姿勢の影響を受け難く、正確に求めやすいため、良い指標になる可能性があるが、値の解釈に研究の余地がある。

保舵トルク特性は操縦の容易さといった官能評価と結びつきが強く、重要な指標と考えられるが、指標の値はライダーのリーン姿勢により大きく変化するので、試験方法に注意が必要である。

今後も様々なタイプの車両について定常円旋回試験データを蓄積することにより、指標の値により操縦性を議論することができるようになり、開発に役立つ定量的基本操縦性評価手法が実現すると考える。また、将来的には過渡特性や限界特性を評価する指標についても研究を進めたい。

■参考文献

- 1) 景山一郎:二輪車の運動特性とその評価指標に関する研究、自動車技術会学術講演会前刷集、No.150-07、13-18頁(2007)
- 2) 景山一郎、栗谷川幸代:二輪車の運動特性とその評価指標に関する研究、自動車技術会学術講演会前刷集、No.58-08、1-5頁(2008)
- 3) 富松正浩、景山一郎:二輪車のタイヤ特性と運動解析に関する研究、自動車技術会学術講演会前刷集、No.150-07、9-12頁(2007)
- 4) 景山一郎、栗谷川幸代:二輪車の旋回性能に与える制動力の影響、自動車技術会学術講演会前刷集、No.65-09、19-24頁(2009)
- 5) 藤井茂:遺伝的アルゴリズムを用いた二輪車操縦モデルの開発、自動車技術会学術講演会前刷集、No.62-04、9-12頁(2004)
- 6) Akinori Shinagawa, Shigeru Fujii: A Study on Three-Dimensional Course Model for Motorcycle, Proceeding of AVEC06,p575-580(2006)
- 7) H.B.Pacejka: Tyre and Vehicle Dynamics, Butterworth -Heinemann(2002)
- 8) Vittore Cossalter: MOTORCYCLE DYNAMICS (Second Edition)(2006)

■著者



藤井 茂
Shigeru Fujii
技術本部研究開発統括部
システム技術研究部



塩澤 総一
Souichi Shiozawa
技術本部研究開発統括部
システム技術研究部



品川 晃徳
Akinori Shinagawa
技術本部研究開発統括部
システム技術研究部



岸 知昭
Tomoaki Kishi
技術本部研究開発統括部
システム技術研究部