



# 二輪操舵システムの開発 (自動二輪車の低速走行時における安定性評価)

Motorcycle steering system development (evaluation of motorcycle stability at low speeds)

辻井 栄一郎 木村 哲也 安藤 裕介

## 要旨

車両の開発を効率よく行なう上で、操縦性・安定性を定量的に評価することは重要な課題の一つであり、二輪車の安定性については高速域と低速域で低下する特性があることがわかっている<sup>[1]</sup>。そのうち、高速走行中の直進安定性については、長年にわたって理論的・実験的な解析が行なわれ、定量的な評価が可能となっており、実際の開発にも応用されている<sup>[2][3]</sup>。

また、極低速での走行は不安定であるが、キャスト角・トレール長の違いによって、一本橋走行を模擬した極低速の走行においても車両の特性が変化することもわかっている<sup>[4]</sup>。

一方、車両の操縦性と安定性を両立させる手段として二輪操舵の研究もされており、後輪に舵角を付与することで車両の操縦性と安定性に影響を与えることも知られており<sup>[5]</sup>、低速走行安定性の向上も期待されている。

本研究では、二輪の運動特性について鑑みた結果、新たな二輪操舵機構を考案、その前後輪の操舵比の違いにおける舵角時の、等価なキャスト角・トレール長との違いを換算した上で、操舵比の違いによる特に低速直線走行時における車両の特性を実験結果から評価した。

## Abstract

One of the important issues involved in increasing the efficiency of motorcycle development is the ability to make quantitative evaluations of steering performance and machine stability, and it is a well-known fact that in the case of a motorcycle stability decreases at both low speeds and high speeds<sup>[1]</sup>. Of the two, stability in straight-line forward motion at high speeds has long been the subject of both theoretical and experimental analysis and quantitative evaluation methods have been developed and put to use in motorcycle development<sup>[2][3]</sup>.

It is also known that running stability decreases at extreme low speeds and it has been proven that changes in caster angle and trail length will change the machine's stability characteristics in extreme low-speed running simulating a single-beam bridge run<sup>[4]</sup>.

Meanwhile, there has also been research in the area of motorcycle steering mechanisms with the aim of achieving higher levels of handling performance and stability and it is now known that applying a steering angle to the rear wheel has an effect on both the handling performance and stability of a motorcycle<sup>[5]</sup>. This fact has led to the hope of using such mechanisms to improve machine stability at low speeds.

In this paper we report on a research project in which we took into account past research results on motorcycle motion characteristics and proposed a new motorcycle steering mechanism that takes in past studies and evaluated it for machine characteristics particularly with regard to stability in straight-line forward motion based on test results involving different steering angles in the front and rear wheels with compensation for differences in equivalent caster angle and trail length.

## 1

## はじめに

### 1-1. 二輪の走行メカニズム

一般的に、二輪は走行中に倒れようとする側に操舵することで、転倒せずに走行が可能であると言われている。これは、前後輪のタイヤの接地点と車両の重心位置に密接な関係が

あり、この三点を結んだ三角形を重心三角形と呼ぶこととした。更に、重心位置に地球の引力と遠心力との合力によるベクトルがあり、これを重力ベクトルと呼ぶこととする。図1に重心三角形と重力ベクトルを示す。

つまり、二輪の走行中においてこの重心三角形の平面と重力ベクトルが重なった時、車両は安定しているといえ、車両が

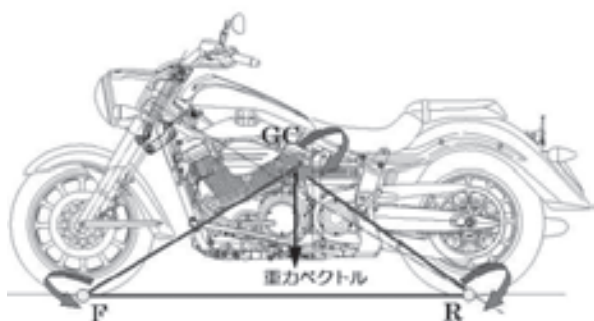


図1 重心三角形と重力ベクトル

ふらついた時、重心三角形と重力ベクトルにズレが発生していると言える。その時、前輪が操舵されることで、重心三角形の一点を移動、重心三角形と重力ベクトルが再び重なり合うことで、転倒せずに走行していると考える。

## 2 二輪操舵機構

### 2-1. 二輪操舵機構の背景

重心三角形において、前輪操舵による前輪の接地点の移動だけでなく、後輪をも操舵させ、後輪の接地点も積極的に移動させることで、重心三角形と重力ベクトルが重なり合う応答性を上げる事が可能であることが判る。また、この重心三角形の三頂点全てをコントロール可能となれば、更に応答性の良い操縦系が出来ることが予測される。

一方、これまで自動二輪車における二輪操舵は、後輪に操舵軸を追加しその軸を中心に後輪を転舵させることで、後輪に舵角を付与しスリップ角を発生させる構造が知られており<sup>[6]</sup>、バネ下が重くなるなどの欠点があった。

本研究では、これまでとは異なる構造を採用することで、前記欠点を克服した二輪操舵機構搭載の車両を開発した。

### 2-2. 構造

自動二輪車のメインフレームにおいて、そのヘッドパイプ後端にステアリング軸とほぼ直交するように回転可能な自由度を追加した。また、この回転軸の延長線は後輪接地点近傍

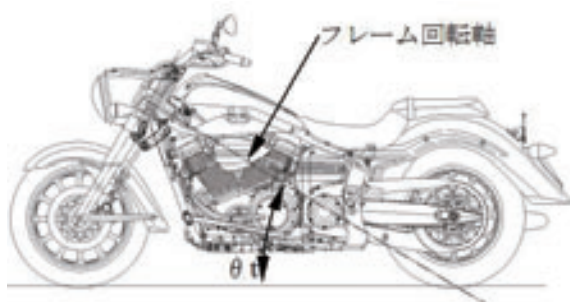


図2 二輪操舵機構

を通過する。

更に、回転可能となったフレームからステアリングに向かって、レバーが剛結合され、このレバーとステアリングは操舵回転方向に自由度を持って連結される。

二輪操舵機構の全体図を図2に示す。

ステアリングと回転可能なフレームとの連動して回転する機構部の詳細図を図3に示す。



図3 二輪操舵機構詳細

レバーの一端にはアクチュエータを設置し、これを駆動することで、ステアリングとこのレバーの接続位置を機構学的に変更、操舵比を変更することが可能となる。

### 2-3. 後輪操舵角

図4に後輪舵角のイメージを示す。

図2及び図3に示すフレーム回転軸において、 $\alpha^\circ$  回転した場合、 $\theta_r$  後輪に舵角が付与され、T1からT2へ後輪の向きが変化する。つまり、フレームに回転自由度を追加することで、後輪操舵が可能となる。

この時のフレーム回転角度と後輪舵角の関係は

$$\theta_r = \alpha \cdot \sin \theta_t \quad \dots(1)$$

で表せる。

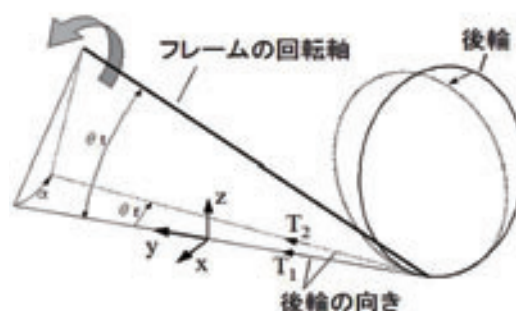


図4 後輪操舵のイメージ

参考までにこの時の後輪キャンバー角は

$$\text{後輪キャンバー角} = \alpha \cdot \cos \theta t \quad \dots(2)$$

となる。

## 2-4. 前輪と後輪の操舵連動

### 2-4-1. 二輪操舵中立状態

図5に二輪操舵の中立状態を示す。フレーム回動部とステアリングを回動可能に連結されている部分が、ステアリング回転軸の延長線上に位置することで、ステアリングの操作がフレームへ影響を及ぼさずに走行できる。



図5 中立状態

### 2-4-2. 逆相操舵

図6に二輪操舵の逆相操舵状態を示す。

フレーム回動部とステアリングを回動可能に連結されている部分が、ステアリング回転軸の延長線上に対して、車両の後方に位置している。このため例えば、ステアリングを右転舵させると、連結回転部は左方向に回転する。その結果フレームは後輪から見て時計回りに捻られる様に回転し、後輪は左転舵することとなる。つまり、前輪を右転舵した時後輪は左に転舵する逆相状態となる。



図6 逆相状態

### 2-4-3. 同相操舵

図7に二輪操舵の同相操舵状態を示す。

フレーム回動部とステアリングを回動可能に連結されている部分が、ステアリング回転軸の延長線上に対して、車両の前方に位置している。このため例えば、ステアリングを右転舵させると、連結回転部は右方向に回転する。その結果フレームは反時計回りに捻られる様に回転し、後輪は右転舵することとなる。つまり、前輪を右転舵した時後輪は右に転舵する同相状態となる。



図7 同相状態

### 2-4-4. 操舵比の変更

図5～7の状態をアクチュエータで切り替えることで、走行中の操舵比を逆相から中立そして、同相へ、またはその逆に切り替えることが可能となる。

図8に逆相と同相について、旋回中の前後輪の進行方向と舵角を模式的に表す。

## 2-5. 二輪操舵とキャスト角（アライメントの変化）

ここまで、前輪と後輪の接地点を基準に各々のタイヤの向

きを観ることで、二輪操舵を説明してきた。

また、本二輪操舵機構は後輪を支持する車体をロールさせることによる、後輪の向きについて検討してきたが、本来ロール運動が拘束されていない乗り物である二輪において、そのロール角を地面基準で定義すべきか否か、または車両のどの部分を基準にして運動状態を理論付けるのかは、難しいとも言える。

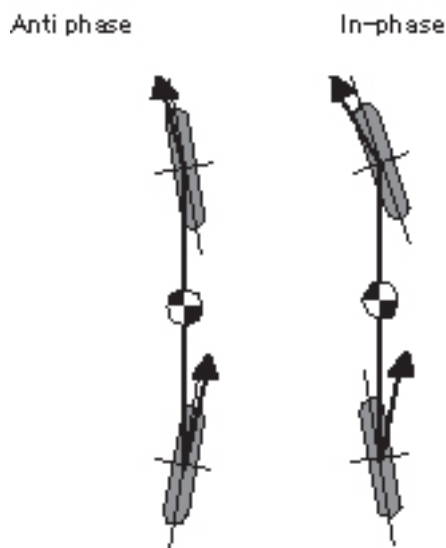


図8 旋回中の前輪と後輪イメージ

そこで、車体もしくは後輪を基準に前輪の状態を考えると、この二輪操舵機構を等価な可変キャスターに置き換えることが可能かを検討した。

#### 2-5-1. 等価キャスター

キャスターとトレールは密接な関係にあり、キャスター角が小さくなるとトレール量も小さくなる。また、前輪の接地点は操舵角と車体のロール角によっても、移動し、その移動量はキャスターにより異なる。

そこで、前述の操舵比の変化とそれによる前輪操舵時の接



図9 操舵系ジオメトリー

地点の移動量を算出することで、等価なキャスターを導いた。

まず、図9に前輪まわりの基本ジオメトリーの記号を示す。

この時、操舵比( $\lambda$ )とフレームの回転角度( $\alpha$ )は、

$$\text{操舵比}(\lambda) = \text{前輪舵角}(\theta_s) \div \text{後輪舵角}(\theta_r) \quad \dots(3)$$

$$\text{フレーム回転角}(\alpha) = \sin^{-1}(r \cdot \sin(\theta_s) / L) \quad \dots(4)$$

となる。

舵角時横方向のタイヤ接地点移動量を $y$ とすると

$$y = T \cdot \sin(\theta_s \cdot \cos(C)) - (L_f + R_f \cdot \cos(C)) \cdot \sin \alpha \quad \dots(5)$$

ここで、

$$T = R_f \cdot \tan(C) - O_f / \cos(C) \quad \dots(6)$$

となる。

ただし、タイヤのプロファイルは無視する。

従って、等価なキャスター角( $C'$ )は

$$y = (R_f \cdot \tan(C') - O_f / \cos(C')) \cdot \sin(\theta_s \cdot \cos(C)) \quad \dots(7)$$

となる $C'$ を導けばよい。

更に等価なトレールは

$$T' = R_f \cdot \tan(C') - O_f / \cos(C') \quad \dots(8)$$

となる。

舵角時のタイヤ接地点移動量の計算結果を図10に示す。

舵角の変化に伴い、同相 > 中立 > 逆相の順に円弧が大きくなっており、本機構によってトレール長が変化しているとい

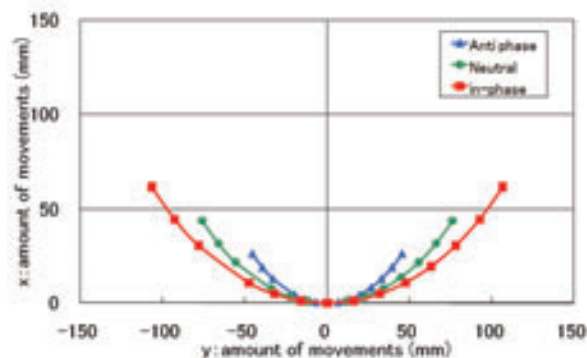


図10 舵角時の接地点移動量

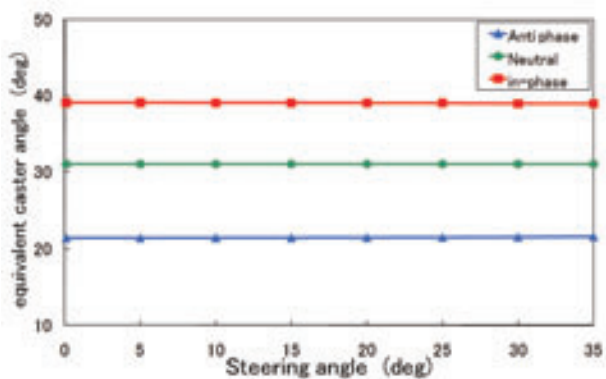


図 11 舵角時のキャスト角変化量

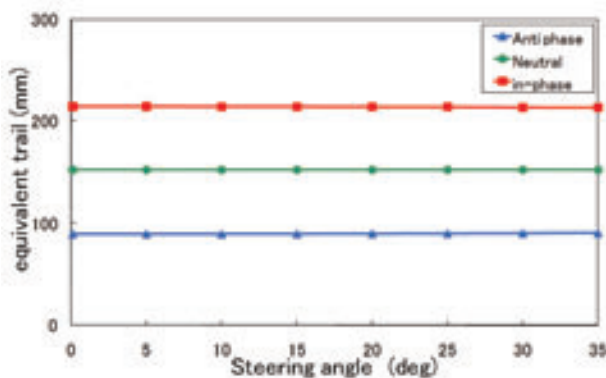


図 12 舵角時のトレール量変化量

うことができる。

同じく、その時の等価なキャスト角を図11に示す。

横軸に舵角を取って整理すると等価キャスト角は、舵角が大きくなると若干変化するがほぼ一定であり、中立時の31°に対して同相は39°、逆相は21.5°に相当することがわかった。

同じくその時の等価なトレール量を図12に示す。

これも等価キャスト角と同様に舵角が大きくなると若干変化するが基本的にほぼ一定であり、中立は152mm、同相は213.9mm、逆相は90.5mmと言う結果となった。

これらの計算結果を表1にまとめる。

結果が示すように、キャスト角が増加するとトレール量も増加する傾向にあり、これはコンベンショナルな二輪の操舵装置と同じ傾向にあると言える。

|            | Caster Angle | Trail Length |
|------------|--------------|--------------|
| In-phase   | 39°          | 213.9mm      |
| Neutral    | 31°          | 152mm        |
| Anti phase | 21.5°        | 90.5mm       |

表 1 ジオメトリ計算結果

### 3 低速直進安定性計測

これらの計算結果から、本二輪操舵の機構は、ステアリング回りのアライメント変化による接地点移動の影響で、旋回性・操縦性が変化すると考えられる。

そこで、本研究では特に低速直進走行中にて、操舵比による車両安定性変化について、計測を行った。

#### 3-1. 発進停止時 (渋滞想定)

##### 3-1-1. 計測内容と方法

乗員：二人乗り

走行距離：10m

走行パターン：発進と停止

計測項目：車速、操舵トルク、舵角、ロールレイト、ヨーレイト

##### 3-1-2. 発進停止時の計測結果

まず、渋滞路を走行中の二輪車を想定し、車両の運動特性を計測した。

図13に二人乗り発進停止走行の様子を示す。



図 13 二人乗り発進停止走行

図14に同相と逆相における操舵トルクの計測結果を示す。

計測結果が示すように、発進停止時では、逆相よりも同相の方が操舵トルクは大きく、また左右に振られていると言え、逆相は軽快な操縦である。

図15に同じく、舵角の計測結果を示す。

同じく、舵角についても逆相よりも同相の方が大きな舵角となっており、安定して走行するために大きなハンドル操作が必要としていると言え、逆相ではハンドル操作が少なくすんでいる。

図16に同じく、ロールレイトの計測結果を示す。

同様に、ロールレイトも逆相より同相の方が大きく車両がふらついている様子が伺え、逆相の方が安定していることが判る。

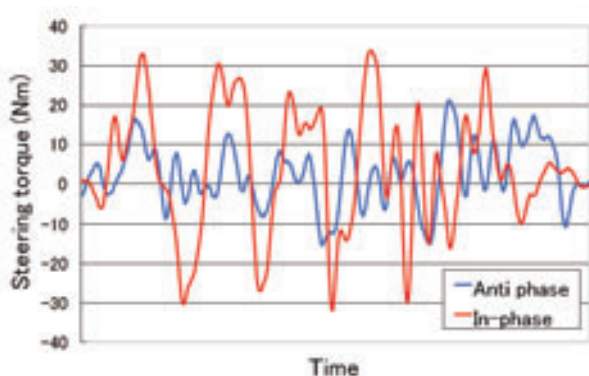


図 14 同相・逆相における操舵トルク

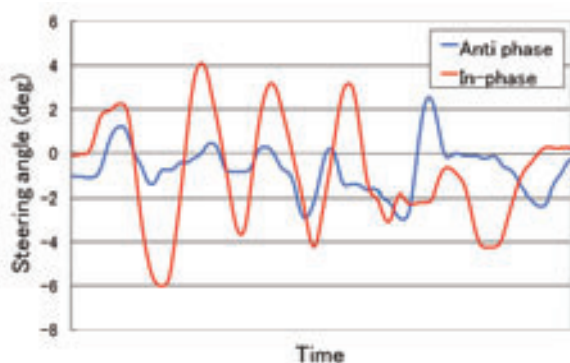


図 15 同相・逆相における操舵角

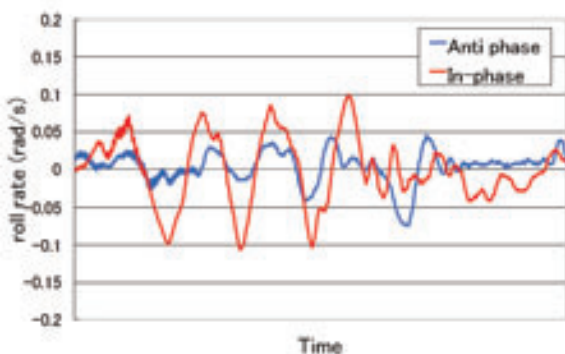


図 16 同相・逆相におけるロールレイト

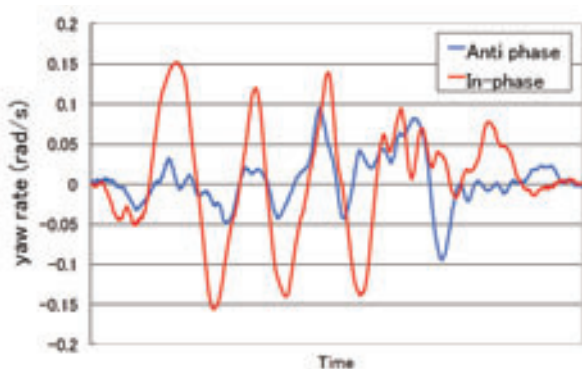


図 17 同相・逆相におけるヨーレイト

図17に同じく、ヨーレイトの計測結果を示す。

同様に、ヨーレイトも逆相より同相の方が大きく車両がふらついている様子が伺え、逆相の方が安定していることが判る。

図18に同じく、ロールレイトと舵角の計測結果をマップしたものを示す。

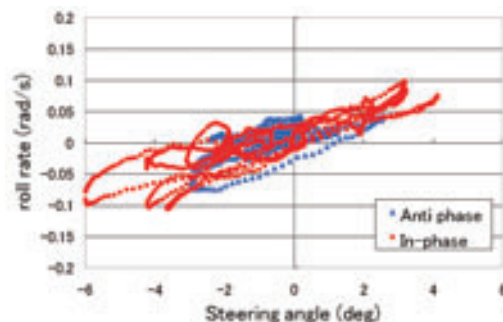


図 18 同相・逆相における操舵角とロールレイト

逆相では、小さな舵角で少ないロールレイトとなっており、少ないハンドル操作でバランスを取っている様子が伺え、同相では、ハンドル操作も大きくロールレイトもそれに比例して大きくなっており、バランスが取り難いと言える。

### 3-2. 定常低速直進時

#### 3-2-1. 計測内容と方法

乗員：一人乗り

車速：10km/h

走行パターン：直進定常走行

計測項目：車速、操舵トルク、舵角、ロールレイト、ヨーレイト

#### 3-2-2. 一定低速直進走行時の計測結果

次に、定常走行中の車両の運動特性を計測した。

計測時において、評価ライダーコメントとして各操舵比における、特に操舵トルクの差異が大きく、本研究ではまず操舵トルクに着目した。

図19に走行中における各操舵比違いによる、操舵トルクの代表的な4秒間の計測結果を示す。

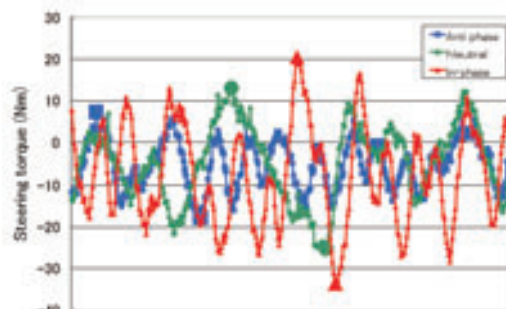


図 19 各操舵比における操舵トルク

|            | Steering torque Nm |       |       |       |       |
|------------|--------------------|-------|-------|-------|-------|
| Anti phase | 15.18              | 14.30 | 13.20 | 14.74 | 17.16 |
| Neutral    | 26.84              | 16.06 | 16.50 | 18.48 | 21.78 |
| In-phase   | 25.30              | 31.90 | 27.06 | 28.60 | 24.64 |

表2 操舵トルク計測結果

|             | S     | Φ  | V     | F 0  | Approval | Contribution |
|-------------|-------|----|-------|------|----------|--------------|
| Steer ratio | 401.3 | 2  | 200.7 | 19.7 | **       | 72.8%        |
| Error       | 122.3 | 15 | 10.2  |      |          |              |
| Total       | 523.6 | 17 |       |      |          |              |

表3 一元配置実験分散分析結果

本結果より、定常直線走行中においても各操舵比によって、操舵トルクに違いがあることが伺え、それは同相＞中立＞逆相の順に大きい傾向があった。

またそれらは10秒間のデータを観察しても同様の様子が伺えた。

そこで、その傾向を確認するために10秒間の直線走行中における操舵トルクのピーク値を特性値とし、各操舵比における一元配置実験を行った。

繰り返し数 N=5の実験を行い、その結果を表2にまとめる。

表2の結果を元に算出した分散分析結果を表3にまとめる。

分散分析の結果から、操舵比は操舵トルクに対して1%棄却域において有意差があった。また、その時の寄与率も72.8%と非常に高い物であり、その傾向は、同相＞中立＞逆相の順に操舵トルクが大きいものであった。実験時のライダーのコメントも、同相は操舵が重く感じ、逆相は軽く感じるという結果で、計測結果と同じ傾向であることが伺えた。

## 4 まとめ

本研究で、開発した二輪操舵機構は、キャストを変更したものと等価な状態を作り出すことが可能となり、操縦性に変化をもたらす物といえる。その主な結論は以下のようになる。

- (1)車体を捻るように回動可能とすることで、後輪に舵角を付加させる事が可能となり、それをステアリングと機械的に連動させることで、二輪操舵を具現化できる。
- (2)本二輪操舵機構は、キャストを変更したり、トレールを変更させることと等価であり、可変キャスト機構とも言える。
- (3)操舵比を同相、逆相に変更することで、発進停止時の極低速における、車両の運動特性に影響を与えられることが解り、特に逆相時に車両を安定させることが解った。
- (4)また、本二輪操舵機構は、10km/hという比較的低速の直進走行においても、操舵トルクに影響を与え、逆相の操舵

が軽く、操縦性を向上させることが解った。

(5)本報では、低速時の直進だけの評価にとどまったが、中高速での評価も望まれる。

## 5 参考文献

- [1]R. S. Sharp: The Stability and Control of Motorcycles, Journal Mechanical Engineering Science, Vol. 13 No.5 (1971)
- [2]浅野俊二、大富部寿一:FEM車両モデルを用いた二輪車運動特性解析:自動車技術会 学術講演会前刷集 No.69-01、326、(2001)
- [3]J. Ootombe, A. Hasegawa: Experimental Analysis of Sense of Stability in Motorcycle, SAE Technical Paper Series SAE-891993 (1989)
- [4]木村哲也:低速走行二輪のライダー操縦モデルに関する検討:自動車技術会 学術講演会前刷集 No.335-20075396
- [5]井口雅一:前後二輪操舵二輪車の操安性についての基礎研究:自動車技術会論文集No.32、1986。
- [6]松田篤志:二輪車への前後輪操舵システム適用例の紹介:自動車技術会論文集Vol.41、No.3、1987

## ■著者



辻井 栄一郎  
Eiichirou Tsujii  
技術本部  
研究開発統括部  
システム技術研究部



木村 哲也  
Tetsuya Kimura  
技術本部  
NVHプロジェクト推進グループ



安藤 裕介  
Yuusuke Andou  
技術本部  
研究開発統括部  
SPプロジェクト推進グループ