



## 技術論文

# 二輪車の低速ウィーブモードとスラローム走行の関連調査

Investigating the relationship of motorcycle weave mode at low speeds and slalom running

岸知昭 藤井茂 内山俊文

### 要旨

我々の研究プロジェクトでは、二輪車の操縦安定性を把握する上で重要となる二輪車の代表的な振動モードであるウィーブモードについての研究を進めている。ウィーブモードの分析方法としては、走行中の二輪車のハンドルに外乱を加え、その時のロール角等の応答波形から推定する方法が挙げられる。しかし、車輻速度が低い領域では、ライダーの操縦による影響が走行データに大きく現れるため、推定が困難である。そこで低速領域においては、ウィーブモードとほぼ同じ振動周波数であるスラローム走行のデータからウィーブモードを推定できないか考えた。

今回、シミュレーションを用いて両者の関連を調査した結果、特定の車速及びパイロン間隔でのスラローム走行は低速ウィーブモードと同じ振動モードであることを確認できた。また実際の車両でスラローム走行した時のデータについても、シミュレーション結果との比較を行い、操縦安定性を考える上で重要なデータである操舵トルクとロール角についてシミュレーションと同様の傾向を示すことが確認できた。

### Abstract

Recently, our research has focused on the weave mode. This is a representative vibration mode occurring in motorcycles and is important when considering maneuverability and stability. One method of analyzing the weave mode is to apply external disturbance to the handle-bars of the motorcycle in motion and then make estimations based on the waveform of the roll angle and other responses that occur as a result of the disturbance. However, when the motorcycle is ridden at low speeds, the steering operations of the rider have a large effect on the running data and this makes estimation difficult. As a solution to this problem, we hypothesized that weave mode data can be estimated from slalom running data, since slalom running produces almost the same vibration frequency as the weave mode in the low speed range.

In our research this time, the simulations were used to investigate the relationship between the weave mode and slalom running. The results of the investigation confirmed that slalom running at a specified speed around pylons spaced apart at a specific interval resulted in the same vibration mode as the weave mode in the low speed range. Furthermore, the data obtained from actually performing the slalom running was compared to the simulation results, and we were able to confirm that the same trends occurred in the steering torque and roll angle, which are vital data when considering maneuverability and stability.

## 1 はじめに

二輪車において、運転のしやすさおよび安定して走行することは重要であると考えられるが、それらを数値化することは難しい。もしこれらの操縦安定性を数値化でき、さらに実際に運転することなく車輻の設計データから操縦安定性を示す数値が予測できれば、車輻の設計段階においても操縦安定性を考慮した設計が可能となり、開発プロセスに大きく貢献することができる。従って二輪車の操縦安定性を定量的に評価することには大きな意義がある。

これまでに我々のチームでは、二輪車の操縦安定性を定量的に評価するため、二輪車に姿勢計測装置を搭載し、計測

を実施してきた<sup>[1]</sup>。これによりテスト条件や乗車姿勢の違いによって定常円旋回でのタイヤ横すべり角や操舵トルク等に異なる傾向が見られることを確認した。このように定常状態での車輻挙動の把握を進めてきたが、現在は過渡的な挙動についても研究を進めており、特に二輪車の操縦安定性を把握する上で重要となる低速域でのウィーブモードについての研究を進めている。

ウィーブモードを始めとする二輪車の振動モードの分析方法として、ハンドルに外乱を加え、その時のロール角等の応答波形から推定するハンドルヒット法が挙げられる。しかし、低速におけるハンドルヒット法では、ライダーの無意識でのハンドル操作や体重移動により、振動が即座に減衰してしまい、振

動モードを分析することが困難である。

そこで本報では、低速におけるウィーブモードとほぼ同じ周波数であるスラローム走行データに着目し、二輪車のシミュレーションモデルを用いて、低速ウィーブモードとスラローム走行が同じ振動モードとなっているか検証を行った。また、シミュレーション上で車速・パイロン間隔・スラローム幅を変化させてスラローム走行を行い、これらの走行データから低速ウィーブモードを予測することが可能であるかを検証した。さらに、スラローム走行データと二輪車モデルから算出した周波数応答との関連についても調査した。最後に実際の車両でもスラローム走行を行い、シミュレーションと同じ傾向を示すか確認した。

## 2 シミュレーション

### 2-1. シミュレーションモデル

調査には、図1に示すような排気量1300cm<sup>3</sup>の大型二輪車のシミュレーションモデルを用いた。モデルは10剛体(main frame, rider, engine, tank, front fork, front arm, front wheel, arm relay, rear arm, rear wheel, ただし, rider, engine, tankはmain frameに剛結)、11自由度を持ち、タイヤモデルについてはタイヤ試験データによりモデリングを行うMF-Tyre modelを用いた。座標系は図2に示すようにISO座標系を用いている。また、ライダーによる制御モデルを式(1)に示す。なお、モデルの詳細な説明については参考文献を挙げる<sup>[2]</sup>。

$$\tau = -k_p(\phi - \phi_{ref}) - k_{d1}\dot{\phi} - k_{d2}\dot{\alpha}$$

$\tau$ : steering torque  
 $\phi$ : roll angle  
 $\alpha$ : steering angle  
 $k$ : gain

(1)

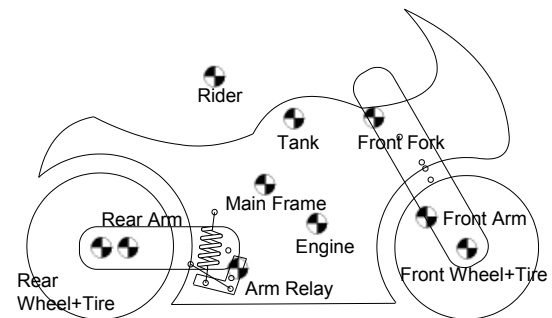


図1 シミュレーションモデル

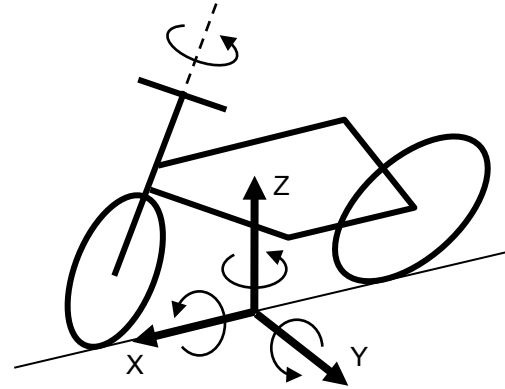


図2 座標系

### 2-2. 振動周波数について

シミュレーションモデルにて様々な車速で直線走行させた時の固有値解析を行い、その結果からウィーブモードを示す固有値を抜き出したものを図3に示す。二輪車のウィーブモードは、中高速域で振動周波数1~4Hz程度の領域に現れることが一般的に知られている。しかし、従来は注目されていなかったが、図3に示すようにこのモードは低速域でも発生しており、図中の低速域で実部が0、つまり振動が減衰せず持続する時の車速は25km/h前後であり、この時の振動周波数は実部0の固有値の虚部から読み取ることができ、約2.3rad/sec (0.3Hz)である。

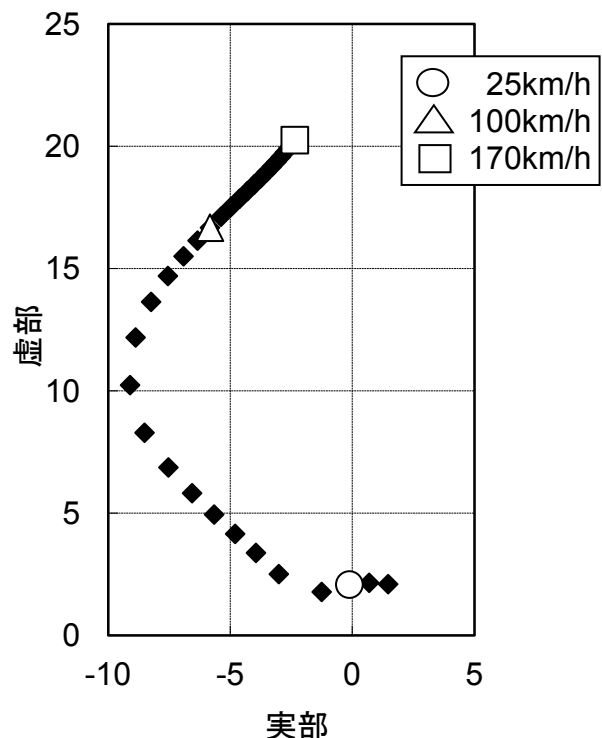


図3 ウィーブモードの固有値

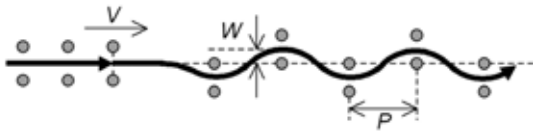


図4 スラローム走行テスト

一方、スラローム走行試験は図4に示すようなものであり、車速 $V$ 、スラローム振幅 $W$ 、パイロン間隔 $P$ の各条件を変化させて行う。このスラローム走行時の条件のうち、車速 $V$ を低速ウィーブモードと同じ25km/hとし、パイロン間隔 $P$ を8~20mで変化させて走行したとすると、スラロームの周波数 $f$ は0.2~0.4Hzとなり、低速ウィーブモードの周波数とほぼ同じ範囲となる。

### 2-3. スラロームシミュレーション

固有値解析結果とスラローム走行試験結果の関連性を調べるため、上記のスラローム走行試験をシミュレーションで再現した。結果の一部を図5に示す。

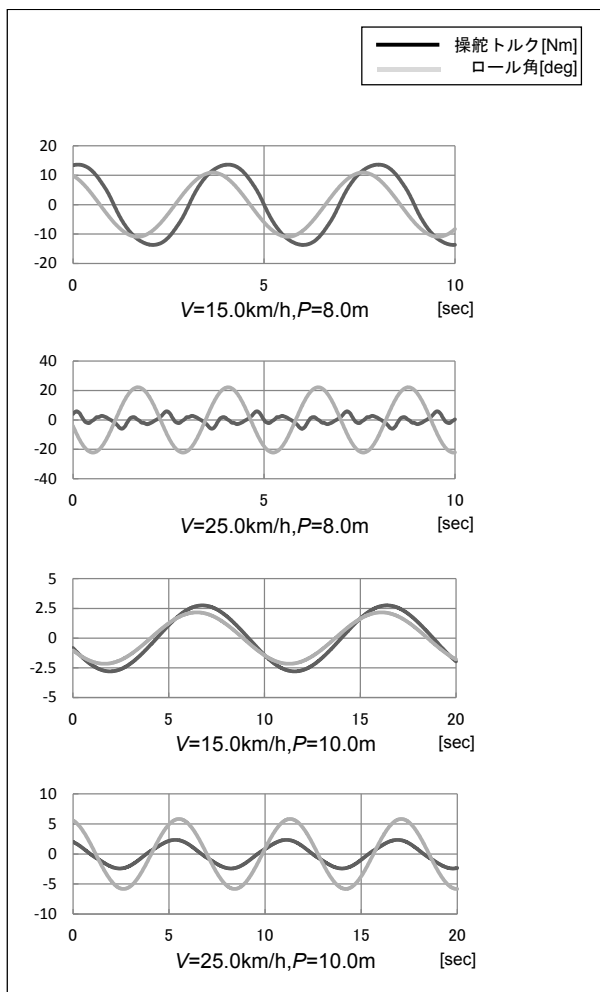


図5 操舵トルクとロール角

通常、ライダーはスラローム走行の際に操舵トルク入力を与えている。従って、スラローム中の走行データ波形から振動モードを分析しようとしても、ライダーの操舵トルク入力の影響があるため、二輪車単独の振動モードを分析することはできない。しかし、図5に示すスラロームシミュレーションの結果中の $V=25\text{km/h}$ 、 $P=8.0\text{m}$ の時のように、与える操舵トルクが比較的小さい場合もある。

そこで、実部0のウィーブ固有値となる速度と振動周波数のスラローム条件を求めて、その条件でスラローム走行するシミュレーションを行えば、初期を除けば操舵入力が無くても持続振動が可能であることが予想される。この場合、ライダー操縦の影響は無くなり、二輪車単独のウィーブモードがスラローム走行として現れると考えられる。

### 2-4. 低速ウィーブモードとスラローム走行の比較

検討結果を基に、実部0の固有値から算出した条件(車速 $V_0$ 、パイロン間隔 $P_0$ )でスラロームシミュレーションを行い、低速ウィーブモードと同じ振動モードとなることを示す。

まず、低速ウィーブモードと同等の振動周波数となるスラローム条件(車速 $V_0$  km/h・パイロン間隔 $P_0$  m)を求める。図3より実部0となる固有値 $\lambda_0$ から車速 $V_0$ を求める。そして式  $P_0 = (V_0 / 3.6) / (b / 2\pi) / 2 (b : \lambda_0 \text{の虚部})$  からパイロン間隔 $P_0$ を求める。算出すると $V_0 = 24.3\text{km/h}$ 、 $P_0 = 10.1\text{m}$ となる。

次に、低速ウィーブモードとスラローム走行、それぞれにおいて振動モードを表す固有ベクトルを以下の方法で算出し、比較を行う。

- ・固有値解析結果より、実部が0となる低速ウィーブの固有値 $\lambda_0$ に対応する固有ベクトルを求める(図6)。図6のベクトルの長さから振幅比、ベクトルのなす角度から位相差を読み取ることができ、それらを表1に示す。
- ・算出した条件(車速 $V_0$ 、パイロン間隔 $P_0$ )のスラローム走行をシミュレーション上でを行い、走行中の各状態量を測定する(図7)。

なお、スラローム振幅 $W$ は実車走行試験時のデータを参考に0.8mとした。そして各状態量間の振幅比、位相差を求め、これらを表1に示す。また、固有ベクトルと同様のベクトル表示も行う(図8)。図8には参考として、 $V_0$ 以外の車速(15km/h、35km/h)でも同様に算出した状態量のベクトル表示も図示している。比較を容易にするため、両者のベクトルは主要な状態量5変数についてのみ表示し、ロール角を示すベクトルが(1,0)となるよう回転及びスケールさせている。

表1より、ウィーブモードと車速 $V_0$ のスラロームについては、

振幅比・位相差共にほぼ一致していることが確認できた。つまり、実部0の固有値から算出した条件(車速 $V_0$ 、パイロン間隔 $P_0$ )でスラローム走行を行えば、低速ウィーブモードと同じ振動モードとなっている。

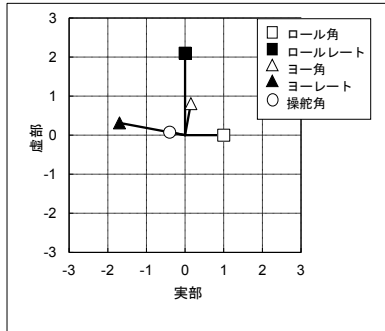


図6 固有ベクトル (ウィーブモード)

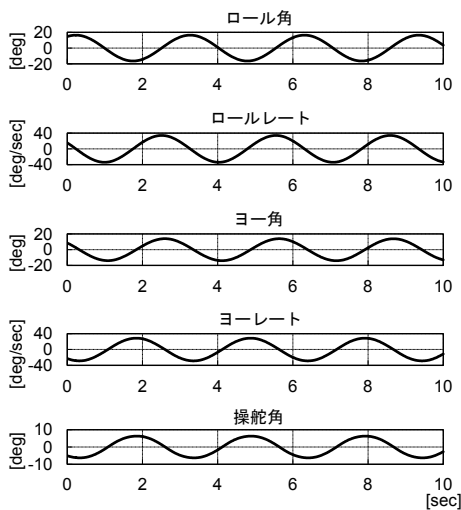


図7 スラローム走行データ

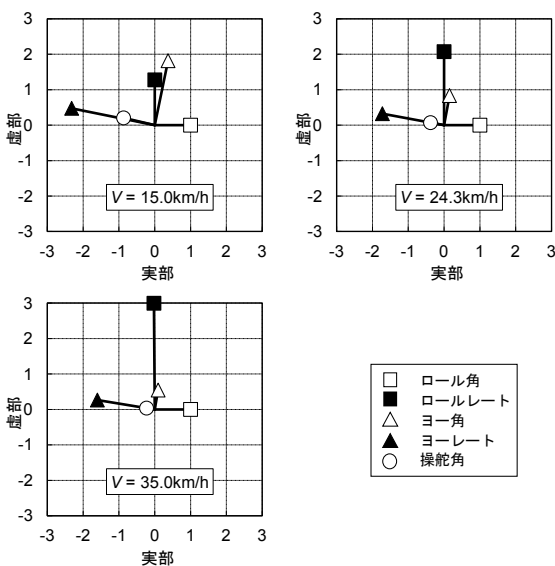


図8 スラローム走行データのベクトル

表1 ベクトルの比較

	ウィーブモード	スラローム走行		
		15.0km/h	24.3km/h	35.0km/h
ロール角	1.00	1.00	1.00	1.00
ロールレート	2.10	1.28	2.07	2.99
ヨー角	0.82	1.86	0.85	0.55
ヨーレート	1.73	2.37	1.75	1.62
操舵角	0.41	0.89	0.38	0.23

	ウィーブモード	スラローム走行		
		15.0km/h	24.3km/h	35.0km/h
ロール角	0.00	0.00	0.00	0.00
ロールレート	89.98	89.91	90.00	90.43
ヨー角	79.52	78.46	79.74	80.19
ヨーレート	169.50	168.40	169.34	170.62
操舵角	169.02	166.70	169.34	170.62

### 3 スラローム走行データの分析 (シミュレーション)

#### 3-1. スラローム走行データから低速ウィーブモード取得

前章では実部0のウィーブ固有値から求めた条件(車速 $V_0$ 、パイロン間隔 $P_0$ )でのスラロームに着目した。次にスラロームデータからウィーブモードを取得できるか、すなわち様々な条件でスラローム走行を行い、その中で操舵トルクが0に近い走行データから低速ウィーブモードを予測することができるかシミュレーションを用いて調査した。

調査方法はroll transfer functionを参考とし<sup>[3]</sup>、図9に示すように、スラローム中の操舵トルクとロール角の振幅比及び位相差を、スラローム条件毎に求めることを行った。スラローム条件は、パイロン間隔については $P_0=10.1m$ がほぼ中央となるように6m、8m、10m、12m、16mの計5パターンを用意し、車速は $V_0=24.3km/h$ がほぼ中央となるように15km/hから35km/hまで変化させた。また、これまでスラローム幅 $W$ は0.8m固定としてきたが、 $W$ の違いによる影響も把握するため、 $W=0.1m, 0.4m, 0.8m$ の3パターンで調査した。以上のスラ

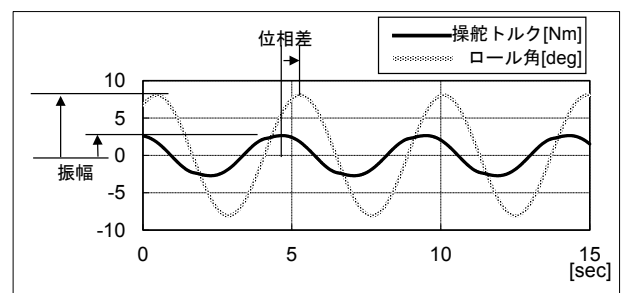


図9 位相差と振幅比の算出

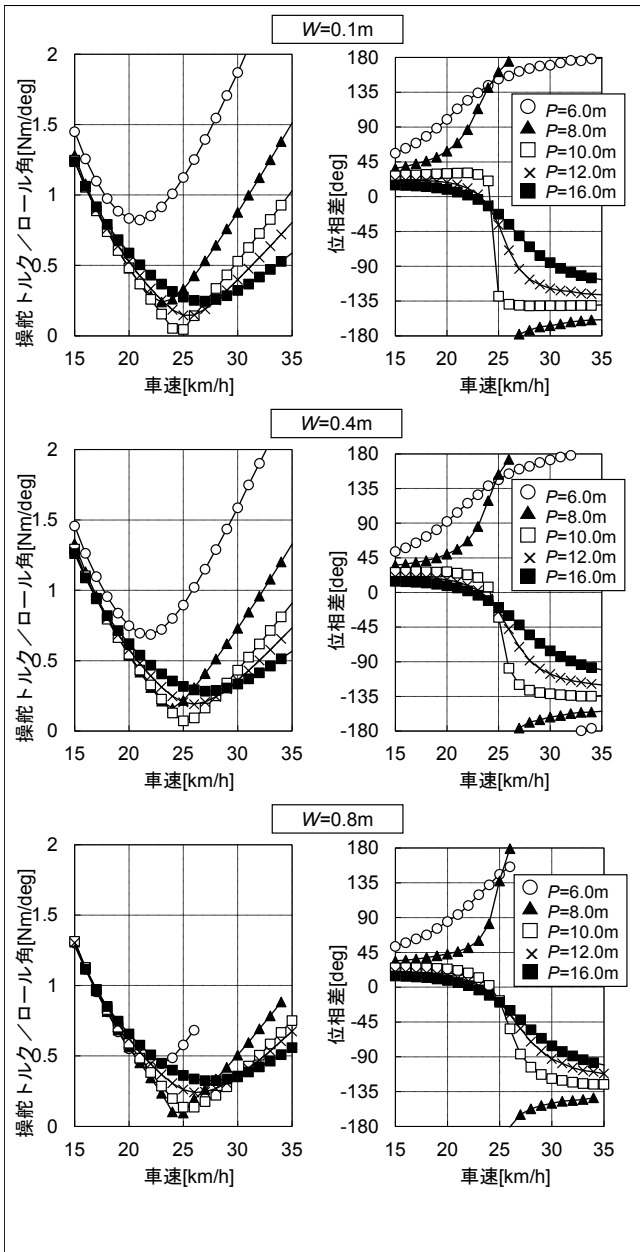


図10 振幅比と位相差 (シミュレーション)

スラローム条件で算出した操舵トルクとロール角の振幅比及び位相差の結果を図10に示す。

図10よりスラローム幅  $W$  の値、パイロン間隔  $P$  の値が、いずれの場合でも振幅比のグラフは下に凸のグラフ形状となった。振幅比が最小、つまり操舵トルクが0に最も近くなるのはパイロン間隔  $P$  が8mまたは10mの時であり、車速  $V$  は25km/h付近となった。この結果については前章での調査結果である「 $V_0=24.3\text{km/h}$ 、 $P_0=10.1\text{m}$  の時操舵トルクが0」に近いと言える。また、位相差のグラフについてはパイロン間隔  $P$  が8m以下では車速  $V$  が増加するにつれて位相差が増加するのに対し、パイロン間隔  $P$  が10m以上の時は位相差が減少していく、0degの値を通過する傾向が見られる。

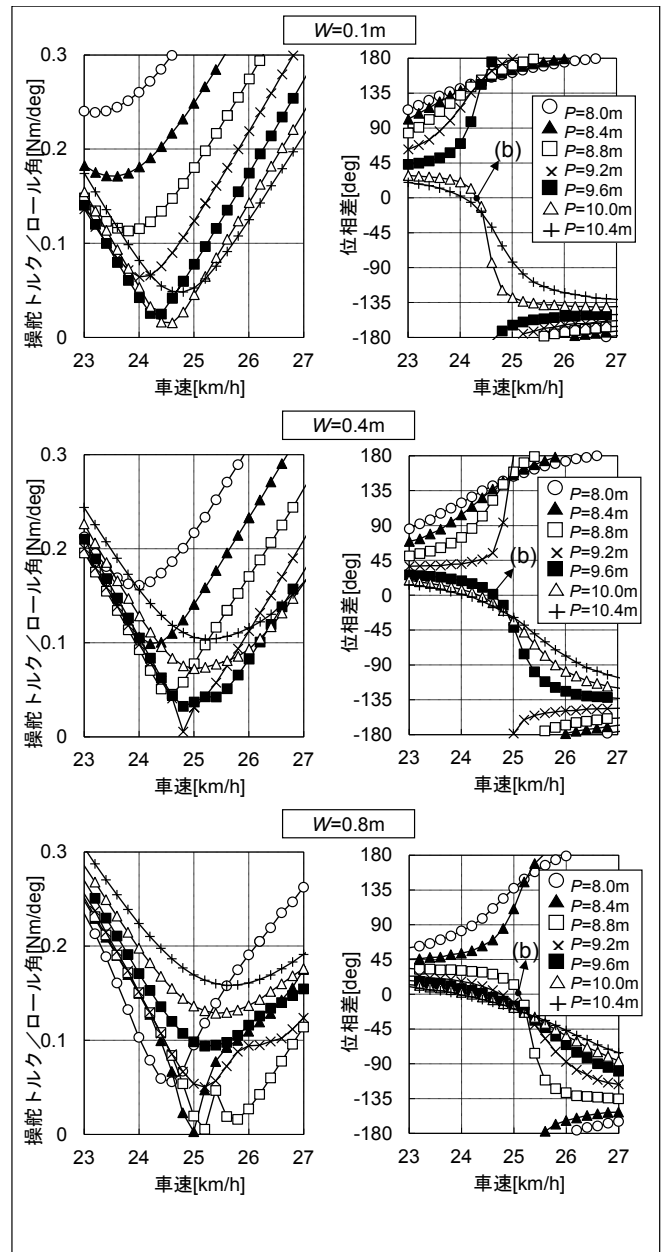


図11 振幅比と位相差の詳細 (シミュレーション)

これらの傾向をより詳細に確認するため、さらにパイロン間隔  $P$  を細かく変化させてスラロームデータを取得した。結果を図11に示す。そして図11から「(a)振幅比が最小となる時のスラローム条件」と「(b)パイロン間隔  $P$  を拡大した時に、位相差0を通過する最初のスラローム条件(図11中の矢印)」を表2に示す。また比較のため、「(c)ウィーブ固有値から算出したスラローム条件」も合わせて示す。

表2より、スラローム幅が  $W=0.1\text{m}$  の時は「(a)振幅比から算出した値  $P=10.0\text{m}$ 、 $V=24.6\text{km/h}$ 、 $f=0.34\text{Hz}$ 」と「(c)低速ウィーブ固有値から算出した値  $P=10.1\text{m}$   $V=24.3\text{km/h}$   $f=0.33\text{Hz}$ 」は、ほぼ一致していることが確認できた。また、「(b)位相差から算出した値  $P=10.0\text{m}$   $V=24.3\text{km/h}$   $f=0.34\text{Hz}$ 」

についても(c)とほぼ同じ値が得られていることも確認できた。このことから様々な条件でスラローム走行を行い、その時のロール角と操舵トルクの振幅比・位相差を調べることで、ウィーブモードが低速域で発生する時の車速と周波数を求めることができると言える。

ただし、スラローム幅 $W$ が大きくなるにつれ(a)と(c)の差が大きくなっている。この原因としては(c)の値は線形化したモデルから算出しているのに対し、(a)の値を算出しているスラロームについては、振幅が大きくなるにつれ非線形的な要素が強くなっているため、線形化モデルとのズレが大きくなっているからであると考えられる。

表2 スラローム条件の比較 (シミュレーション)

(a)振幅比が最小となる時のスラローム条件

スラローム幅 $W$ [m]	振幅比 [Nm/deg]	パイロン間隔 $P$ [m]	車速 $V$ [km/h]	周波数 $f$ [Hz]
0.1	0.015	10.0	24.6	0.34
0.4	0.005	9.2	24.8	0.37
0.8	0.003	8.4	25.0	0.41

(b)パイロン間隔 $P$ を拡大した時に、位相差0を通過する最初のスラローム条件

スラローム幅 $W$ [m]	パイロン間隔 $P$ [m]	車速 $V$ [km/h]	周波数 $f$ [Hz]
0.1	10.0	24.3	0.34
0.4	9.6	24.6	0.36
0.8	8.8	25.1	0.40

(c)ウィーブ固有値から算出したスラローム条件

パイロン間隔 $P$ [m]	車速 $V$ [km/h]	周波数 $f$ [Hz]
10.1	24.3	0.33

### 3-2. スラローム走行データと周波数応答の比較

二輪車において操縦性は重要な指標であるが、これは言い換えると「ライダーからの操舵トルク入力に対する車輻挙動の応答性」と言うこともでき、つまりこれは二輪車モデルにおける周波数応答ということになる。また、今まで示してきたスラローム走行データにも、操舵トルクと車輻挙動であるロール角の情報が含まれているので、周波数応答のグラフが作れるはずである。そこでまず、二輪車モデルから周波数応答のグラフを算出し、これがスラロームデータから求めたグラフと一致するかを調査した。

図1のモデルを用いて、入力を操舵トルク[Nm]、出力をロール角[rad]とした時の周波数応答を車速別に算出した結果を図12に示す。周波数応答のゲインのグラフ上にピークが

現れており、これが低速ウィーブモードを示している。

また、これまでに取得したシミュレーション上のスラローム走行データから算出した車速別の周波数応答のグラフを図13に示す。周波数の範囲は限定されるものの、図12とほぼ一致していることが分かる。従って、周波数応答の代用データとしてスラローム走行データを使用できると言える。

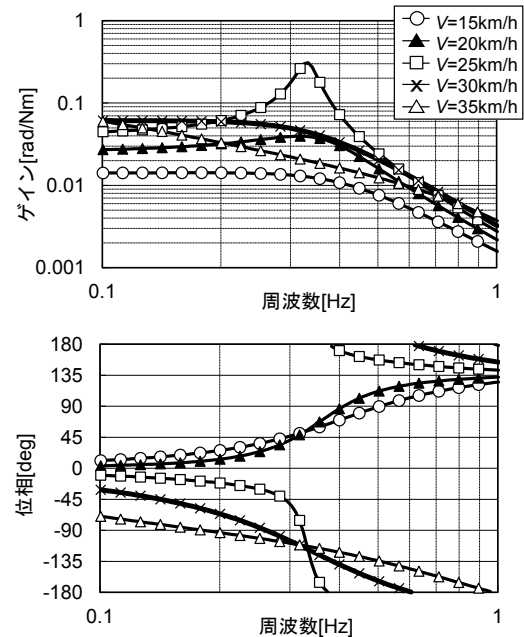


図12 周波数応答 (シミュレーション)  
(入力：操舵トルク 出力：ロール角)

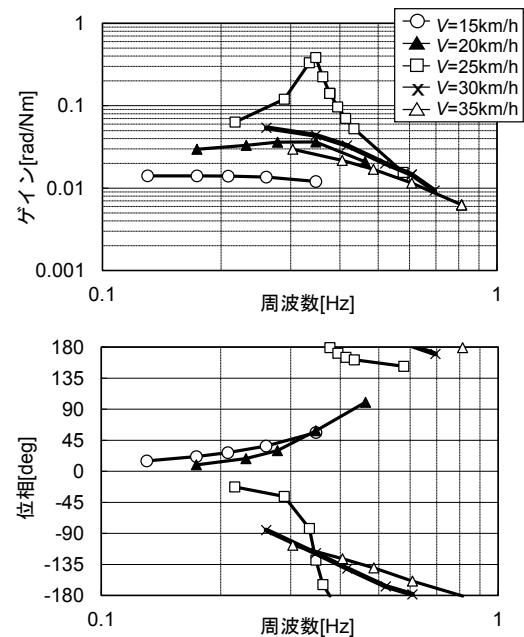


図13 周波数応答 (スラローム走行)  
(入力：操舵トルク 出力：ロール角)

## 4 スラローム走行データの分析

### (実機走行)

前章ではシミュレーション上でのスラローム中の操舵トルクとロール角の関係について述べたが、実機でのスラローム走行でも同様の結果が得られるかを確認するため、走行試験を実施した。なお、走行試験に用いる実機車輛はシミュレーションモデルで扱った車輛と同一とした。

表3にテスト条件を示す。実車では気温による違いが車両に影響を与える可能性を考慮し、異なる走行日でのデータを取得した。また、実車では走行しながらスラローム幅 $W$ を調整するのは困難であるため、車両に搭載したGPSによる走行データ軌跡から幅 $W$ を算出した。幅 $W$ の値はいずれの日でも約0.9mであり、大きく変動していないことを確認できた。

表3 走行テスト条件

走行日	気温 [°C]	スラローム幅 $W$ [m]
2月28日	9.1	0.89
3月29日	14.6	0.90
4月25日	22.4	0.91

実機でのスラローム走行データから算出したロール角と操舵トルクの振幅比と位相差の結果を図14に示す。図14の振幅比のグラフについては下に凸のグラフ形状であり、また位相差のグラフについてはスラローム間隔 $P$ を大きくしていくと0deg付近を通過するようになっており、これらの傾向はシミュレーションと同様の傾向である。

そこで、シミュレーション結果である図11と同様の方法で「(a)振幅比が最小となる時のスラローム条件(図14の矢印a)」と「(b)パイロン間隔 $P$ を拡大した時に、位相差0を通過する最初のスラローム条件(図14中の矢印b)」を算出し、結果を表4にまとめた。ただし、(a)の振幅比についてのスラローム条件は、グラフ上でスラローム間隔 $P$ 別にそれぞれ曲線近似を行い、全ての近似曲線の中で振幅比が最小となる時の条件としている。

表4の結果を考察すると、まず(a)の車速と(b)の車速の差がシミュレーションでは差が僅かであったのに対し、実車では2~3km/hの差が出ている。この理由として(b)点付近の25~30km/hのデータが少ないため、(b)点の位置を正確に求められていないことが考えられる。

また、走行日による違いに着目すると、日付が後の方、つまり気温が高くなるにつれて周波数が低くなっている。データ数が少ないため明確には言えないが、気温によりタイヤ特性へ

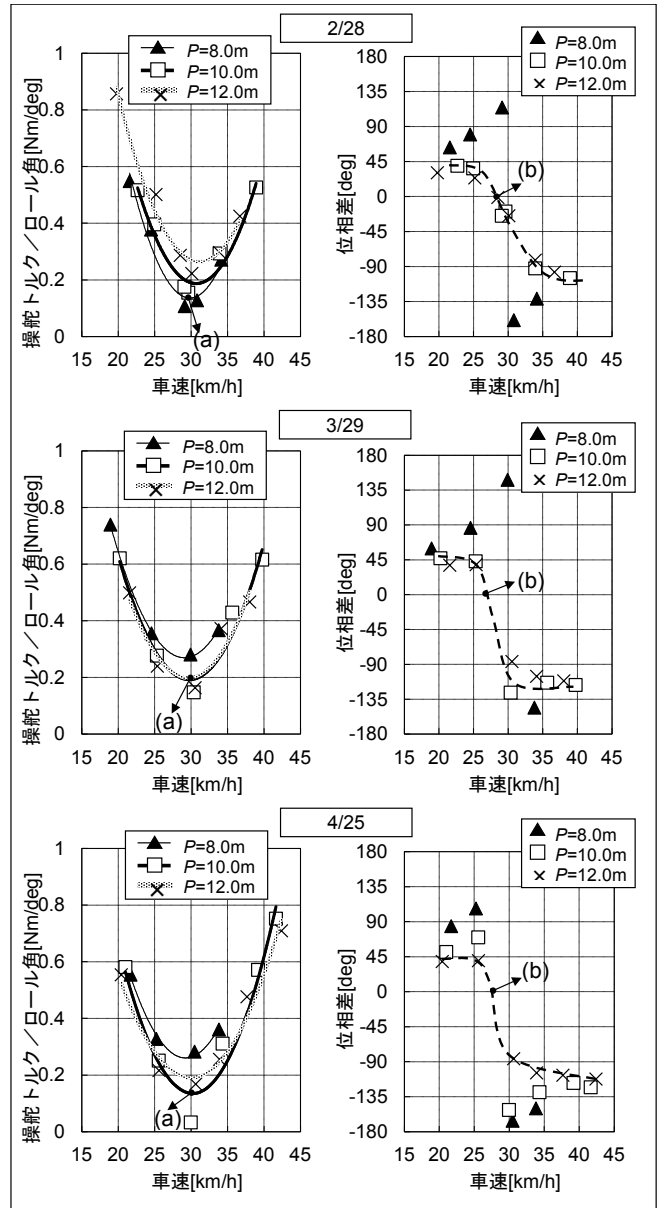


図14 振幅比と位相差 (実機走行)

表4 スラローム条件の比較 (実機走行)

(a)振幅比が最小となる時のスラローム条件

走行日	振幅比 [Nm/deg]	パイロン間隔 $P$ [m]	車速 $V$ [km/h]	周波数 $f$ [Hz]
2月28日	0.14	8	30	0.52
3月29日	0.19	10	30	0.42
4月25日	0.14	10	30	0.42

(b)パイロン間隔 $P$ を拡大した時に、位相差0を通過する最初のスラローム条件

走行日	パイロン間隔 $P$ [m]	車速 $V$ [km/h]	周波数 $f$ [Hz]
2月28日	10	28	0.39
3月29日	10	27	0.38
4月25日	12	28	0.32

の影響が現われたのではないかと考えられる。

そして実機走行で算出された車速は27~30km/hであるが、表2のシミュレーション結果である約25km/hと比較すると高めとなっている。この理由としては実機車輛とシミュレーションモデルとの間に何らかの差異があると考えられ、現在調査中である。

## 5 結論

本報では低速ウィーブモードとスラローム走行の関連性について紹介した。シミュレーションにおいて、低速ウィーブモードを示す実部0の固有値から算出した車速とパイロン間隔でスラローム走行を行えば、両者は同じ振動モードであることを、固有ベクトルを用いて示した。

また、シミュレーション上で車速・パイロン間隔・スラローム幅を変化させてスラローム走行を行い、走行データ中の操舵トルクとロール角の振幅比と位相差を分析することで、低速ウィーブモードが発生する車速と周波数が予測できることを示した。さらに、スラローム走行データから周波数応答が算出できることを示した。そして実機でもスラローム走行試験を行い、スラローム中の操舵トルクとロール角の振幅比についてはシミュレーションと同形状のグラフとなることを確認できた。

今後はスラローム中のタイヤにかかる力・モーメントの計測を行い、低速ウィーブモードのメカニズムの把握に役立てていきたいと考える。またウィーブモードが低速域で発生する時の車速と周波数に関して、車速については二輪車の安定性の指標、周波数は二輪車の操縦性の指標になりうるのではないかと考える。今後様々な車輛でこれらの指標を求めていき、車種の違いによる傾向を把握していく所存である。

## 6 参考文献

- [1]. 藤井 茂 塩澤 総一 品川 晃徳 岸 知昭:「二輪車の操縦特性調査」ヤマハ発動機技報2009年12月第45号
- [2]. Akinori Shinagawa, Shigeru Fujii:A Study on Three-Dimensional Course Model For Motorcycle, Proceeding of AVEC06 ,p575-580, 2006.
- [3]. Vittore Cossalter : MOTORCYCLE DYNAMICS(Second Edition) , p.320-323, 2006.

### ■著者



岸 知昭

Tomoaki Kishi

技術本部  
研究開発統括部  
システム安全技術研究部



藤井 茂

Shigeru Fujii

技術本部  
研究開発統括部  
システム安全技術研究部



内山 俊文

Toshifumi Uchiyama

技術本部  
研究開発統括部  
システム安全技術研究部