

〔論 文〕

二輪車のウィーブモードとウォブルモードの両立性の問題

吉野 貴彦^{*1}・片山 硬^{*2}

Compatibility Problems between the Weave and Wobble Modes of Motorcycles

Takahiko YOSHINO^{*1}, Tsuyoshi KATAYAMA^{*2}

Abstract

In modern motorcycles, with respect to straight-line stability, there exists the problem of trade-off between the weave and wobble modes. If the weave mode is designed to be stable, the wobble mode becomes unstable. When the wobble mode is stabilized, the weave mode tends to become unstable. However, the vehicle parameters are complexly related and the generation mechanisms of the weave and wobble modes are not theoretically clarified. Therefore, the problem of compatibility between these modes remains unresolved. Therefore, the energy flow method was used to examine this compatibility problem. Results revealed that the six action forces compatibly control the stability of both modes. Thus, design guidelines can be derived to balance the stability of the two vibration modes.

Key Words : Handling and Stability, Vehicle Dynamics, Maneuverability, Motorcycle, Energy Flow Method

1. はじめに

現代の二輪車は、直進安定性に関して、二つの大きな問題を抱えている。一つ目は高速ウィーブモードであり、なぜ高速になるとウィーブモードが不安定になるのかが現在に至っても詳らかに解明されてはいない。二つ目は、ウィーブモードとウォブルモードの安定化両立性の問題である。これは、開発・設計者が経験的に持っている観念であるが、ウィーブモードが安定化するように設計すると、ウォブルモードが不安定になり、ウォブルモードを安定化させるとウィーブモードが不安定になる傾向がある。

多くの二輪開発者、研究者が長年これらの二つ問題の解決に取り組んでいる。しかし、未だに完全に解明されているわけではない。その要因は、車両諸元が複雑に関連し、理論的にウィーブモードとウォブルモードの発生機構が明らかにならないことである。1980年代になり、この問題にブレークスルーをもたらす新しい解析手法が提案された。これは、振動モードが発生している際に運動の自由度間に生じるエネルギーの流れを解析するもので、エネルギーフロー法⁽¹⁻⁵⁾と名付けられている。

本稿では、エネルギーフロー法を用いて、ウィーブモードとウォブルモードの両立性に関する問題を検討する。

2. 両立性に関する問題

一般的に経験されている問題は、上述のように、どちらかを安定にすると他方が不安定になることである。この典型例はウォブルモードの発生を抑制するためにステアリングダンパーを装着させる。するとウィーブモードが不安定になる。その状況を根軌跡の形で示したものが図1である。同図の下の領域に、低い振動数のウィーブモードの根軌跡がプロットされ、上側にウォブルモードの値が図示されている。赤い点がステアリングダンパーを装着したときのもの($CD=1.5$ と表記)で、青い点で示すものは装着をしない場合($CD=0$)の根軌跡である。この図から、ウォブルモードは固有値の実部が負の方向に移動しており、安定化していることが分かる。一方、ウィーブモードの根軌跡は右方向に移動し、不安定になったことが読み取れる。

^{*1} 交通機械工学科

^{*2} インテリジェントモビリティ研究所

平成30年9月1日受理

設計・開発の現場では、全てのケースで両立しないわけではないことも経験的に知られている。しかし、なぜ諸元変更で二つのモードが両立することが起こるか等の理論的な解明がなされていない。

以下に、エネルギーフロー法を用いて、各系に作用している力の大きさの変更が両モードに及ぼす影響を調べ、二つのモードの両立性を左右する要因を推定する。

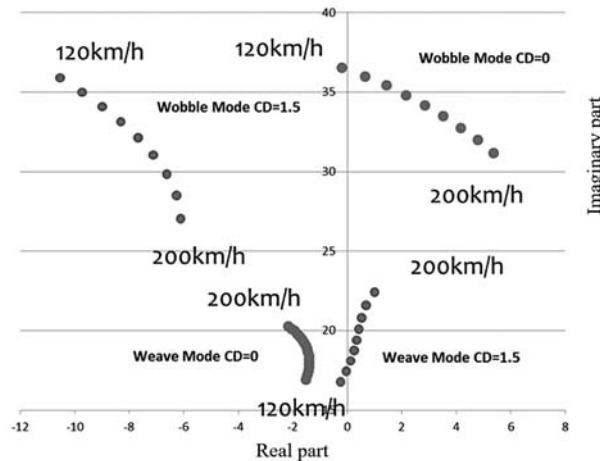


Fig. 1 Example of root locus with steering damper attached

3. 作用力変化時のウィーブモードとウォブルモードの安定性変化

一般的に、安定性の解析では、設計諸元を変更し、その際の固有値を求めることがなされている。しかし、二輪車の運動方程式⁶⁾では一つの設計諸元が方程式の多数の項に含まれており、どのようなメカニズムで安定性が変化したかが詳らかではない。本研究で使用するエネルギーフロー法では、力学的に解釈可能なレベルの係数を変化させて考える。例えば横運動系に作用するヨーレイト力⁷⁾ $(M_f + M_r)x_1\dot{\psi}$ の係数 $(M_f + M_r)x_1$ を変化させる等を行う。

四つの自由度の各運動系に作用する主な力は26種類（横運動系6種類、ヨー運動系8種類、ロール系5種類、操舵運動系7種類）ある。この26種類の力の係数を変化させた場合のウィーブモードとウォブルモードの固有値の実数部分の変化（係数変化後の固有値実部から係数変化前の値を引いた数値）を図2に示す。この図では、横軸にウィーブモードの固有値実部変化をとり、縦軸にウォブルモードの固有値実部変化を取っている。

図2が示すように、回帰係数は負の値であり、全体的に両固有値変化は相反する傾向を持っている。すなわち、ウィーブモードが安定になればウォブルモードが安定になっている。

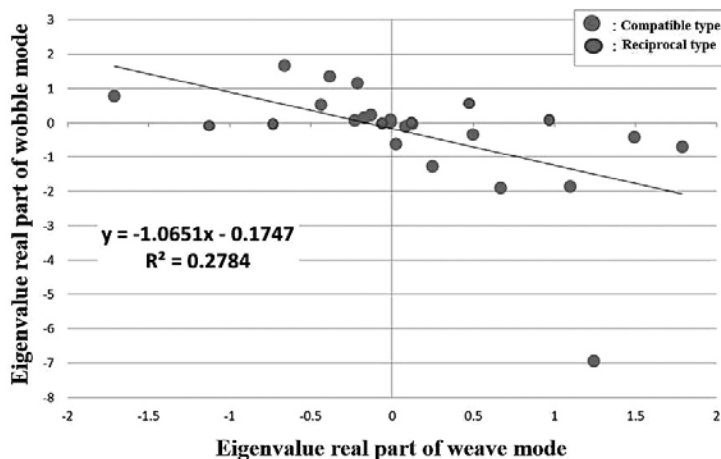


Fig. 2 Change of the real part of the eigenvalue due to the change in the coefficient of force (vehicle speed 180km/h)

図2の第二象限と第四象限に分布するものは、相反するタイプで20例ある。一方、第一象限と第三象限にあるもの(図中の赤丸)は、両立するケースで6例あることが分かる。

両立する6例のうち5例はヨー運動系の係数を変化させた場合のもので、1例は操舵系の係数を変化させたものである。横運動系およびロール運動系の係数変化は全て相反タイプである。

4. 相反タイプの典型例

相反するタイプには、いくつかの際立った特徴を持っている。その一つに、前輪タイヤの影響が大きいことが上げられる。ここでは、相反タイプの典型的な特徴を表す例として横運動系に作用するヨーレイト力の係数を2%大きくした場合の両モードの根軌跡を図3に示す。同図をみると、この力の大きさの変更により、ウィーブモードは安定になるがウォブルモードは不安定になっている。

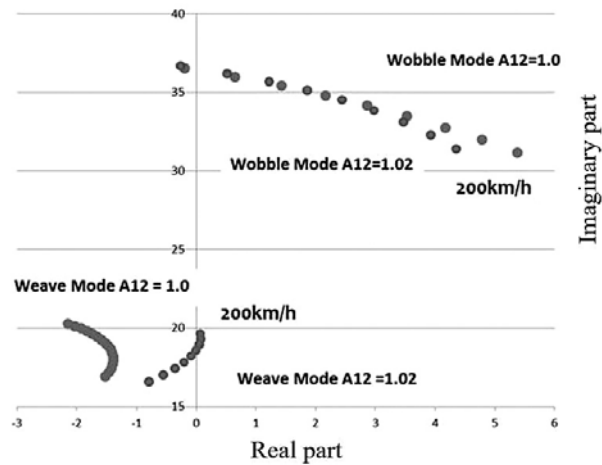


Fig. 3 Root locus when the yaw rate force acting on the lateral motion system is increased by 2%

以下にその要因を検討する。ウィーブモードを特徴付けている自由度はヨー運動系である。図4に、横運動系に作用するヨーレイト力の係数を変化させた際の、ヨー運動系に作用している各力の配置の変化を示す。図中の青い矢印が係数変化前の力の配置で、赤い矢印が係数変化後のものである。

この力の配置から安定性変化の定性的な特徴を知ることができる。エネルギーフロー法によると、図中の右反面(実数部分が正)にある力はウィーブモードを不安定にしている。係数変化をこの観点からみると、実数部分が正方向に移動したものが系を不安定にしており、負の方劫に移動したものが系を安定にしている。この観点から、後輪タイヤ力は安定化に寄与し、前輪タイヤ力は不安定化に寄与している。また横加速度力も不安定化を助長している。

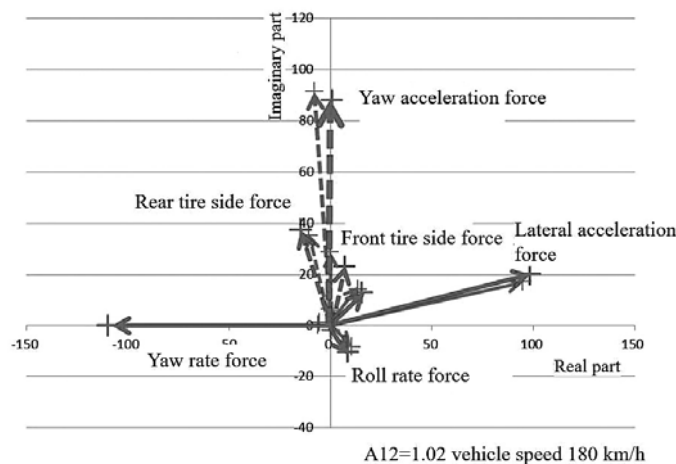


Fig. 4 Force arrangement of yawing motion due to the change in the coefficient (change of yaw rate force acting on lateral motion of the weave mode)

安定性変化の寄与を定量的に見たものが図5である。この図は、作用する力の大きさを変更した際の各力が関与しているエネルギー流の変化を示したものである。図5が示すように、ウィーブモードが不安定になる第一要因は、前輪タイヤによる運動エネルギーの増加であることが分かる。この図が示すように、前輪タイヤ力の寄与が最も大きくなっており、次いで横加速度力である。一方後輪のタイヤ力は安定化に寄与していることが分かる。

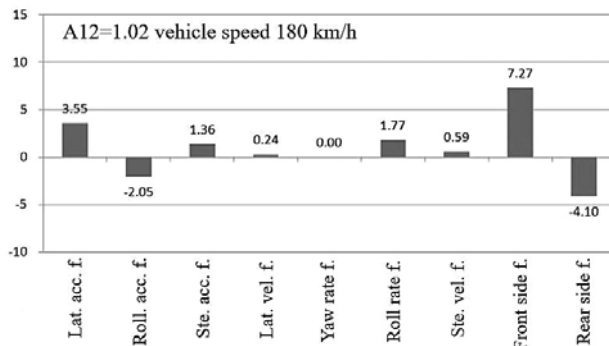


Fig. 5 Energy change in the yawing motion (2% increase in yaw rate force acting on lateral motion)

この作用力の係数変化に伴うウォブルモード変化を図6に示す。この図は、横運動系に作用するヨーレイト力を2%増加させた時に、ウォブルモードの力の配置（操舵運動系）を示したものである。

この配置図より、ウォブルモードは安定化するが、その最もおおきな要因はロールレイト力の大きさが縮小していることである。

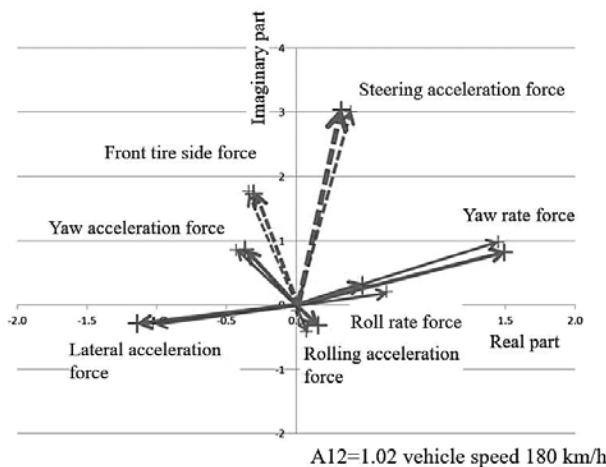


Fig. 6 Force arrangement acting on the steering system of the wobble mode

以上この章で、相反するタイプの典型例を見たが、この例でみた特徴は、大多数の相反タイプに見られるものである。すなわち、ウィーブモードの安定性変化には、ヨー運動系の前輪タイヤ力の寄与が顕著であり、ウォブルモードの安定性変化は操舵系に作用するロールレイトの大きさの変化が大きく寄与している。

5. 両立タイプの特徴

両立タイプは6例あるが、それぞれ詳細な構造は異なっている。しかし、ウィーブモードの安定性変化で共通している大きな特徴は、前輪タイヤ力の寄与度が低いことが上げられる。その代表的なエネルギー流を図7に示す。これは、ヨー運動系に作用する横加速度力を10%増加させた時のヨー運動系のエネルギー流変化である。この図が示すように、ウィーブモードは不安定になるが、その最も大きな要因は、横加速度力の寄与が最大であり、前輪タイヤの寄与は相対的に小さいといえる。

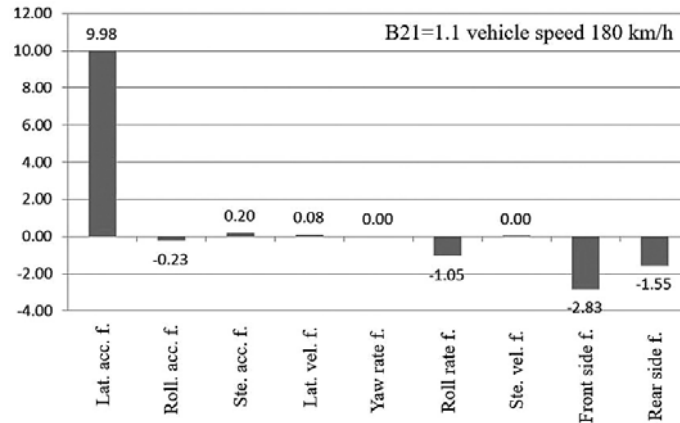


Fig. 7 Energy change by the 10% increase in lateral acceleration force acting on the yaw angle system (Weave mode)

また、前輪の寄与は安定化に寄与しており、このことは、ウォブルモードは不安定化することを示唆している。その様子を見るために、ウォブルモードのエネルギー流変化を図8に示す。予測どおり、ウォブルモードは不安定化している。しかし、その構造は、ヨー角加速度力およびヨーレイト力の寄与が主であることが分かる。

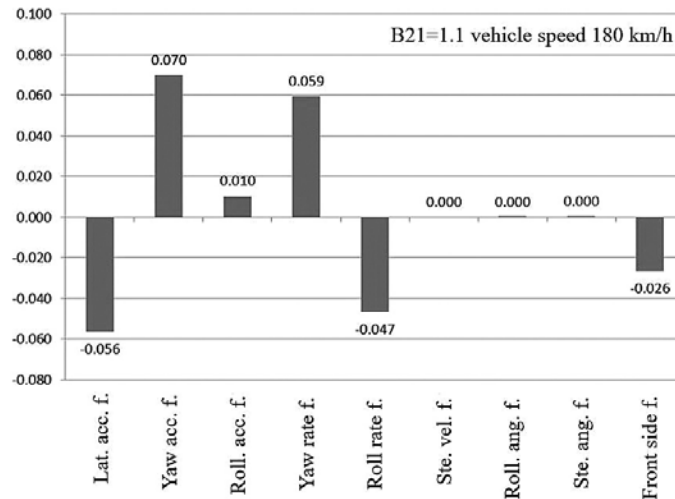


Fig. 8 Energy change by the 10% increase in lateral acceleration force acting on the yaw angle system (wobblemode)

両立タイプの特徴を纏めると、次のようになる。

以下の6種類の作用力がウィーブモードとウォブルモードを同時に安定化できることが明らかとなった。

- ①ヨー角系に作用する横加速度力
- ②ヨー角系に作用するロール加速度力
- ③ヨー角系に作用するヨーレイト力
- ④ヨー角系に作用する操舵速度力
- ⑤ヨー角系に作用する後タイヤ力
- ⑥操舵系に作用するロール加速度力

このように、ヨー角系に作用する多くの力は、ウィーブモードの安定性を単独にコントロールできる可能性を示している。一方、ロール角系の力は、両立が難しい。

これらの解析を通じて、両立する作用力には共通した特徴をもっていることが明らかとなった。すなわち、前輪タイヤ力の寄与が小さいことである。逆に、前タイヤによる寄与が大きいものは、ウォブルモードの安定性に大きく影響を及ぼしていることが示唆される。

6. 結 語

本稿では、二輪車業界で長年不明であった二つの問題の一つ、ウィーブモードとウォブルモード安定化の両立性を検討した。その結果、6種類の作用力は両モードの安定性を両立的にコントロールすることができることが分かった。これらの作用力変化では、ウィーブモードの安定性変化に、前輪タイヤ力の寄与が相対的に小さいことが共通の特徴である。

この共通する傾向は、ウォブルモードは操舵系の振動であり、操舵系の位相、前タイヤの位相に影響を与えないことに起因していると考えられる。しかし、この共通する特徴の根底に在るメカニズムは未だに不明であり、その解明は今後の課題である。

以上のように、本研究は、ウィーブモードを安定化するための設計指針を見出す基本的な知見を与えていると考える。

文 献

- (1) 片山硬, 西見智雄, “エネルギー・フロー法による二輪車のウォブルモードの解析”, 自動車技術会学術講演会前刷集, No. 892 (1989), pp. 209-212.
- (2) 片山硬, 西見智雄, “エネルギー・フロー法による二輪車のウォブルモードの解析”, 自動車技術会論文集, No. 46 (1990), pp. 67-72.
- (3) Katayama, T. and Nishimi, T., “Energy Flow Method for the Study of Motorcycle Wobble Mode”, *Vehicle System Dynamics*, Vol. 19, No. 3 (1990), pp. 151-175.
- (4) 片山硬, “二輪車のウィーブモードの解析 第1報”, 自動車研究, Vol. 23, No. 10 (2001), pp. 538-541.
- (5) 片山硬, “二輪車のウィーブモードの解析 第2報”, 自動車研究, Vol. 24, No. 2 (2002), pp. 63-66.
- (6) Sharp, R.S., “The Stability and Control of Motorcycles”, *Journal mechanical Engineering Science*, Vol. 13, No. 5 (1971), pp. 316-329.
- (7) 丸茂喜高, 片山硬, “ライダーの振動特性が二輪車のウィーブモードに及ぼす影響の解析”, 日本機械学会論文集 C編, Vol. 70, No. 699 (2004), pp. 3001-3008.