

## 小型トラックの操舵系に発生する振動現象に関する研究

日大生産工(院) ○平野 拓実 日大生産 景山 一郎

### 1 まえがき

自動車や二輪車に発生する振動の代表例であるシミー現象は古くからそれぞれ研究がなされ、比較的減衰の悪い振動として知られている。そのため、この振動を解明するために過去、様々なモデルが構築されてきた<sup>(1)(2)</sup>。しかし、現在の試験車両において発生周波数等でこれらのモデルでは表現できないシミーが確認され、モデルの汎用性が十分ではないことがわかつてきた。そのため、本研究ではシミー現象を考慮した車両設計を可能にするため、シミーを表現する新たなモデル構築を目的とし、対象となる実験車両に人為的にシミーを発生させ現象計測を行い、その特性把握を行った。それらの結果を考慮して過去構築された操舵系モデルを再検討しシミーに対して影響度のパラメータの抽出を行った。

### 2. シミー現象把握実験

#### 2.1 実験概要

本実験では、人為的にシミーを発生させるために荷台に錘を載せ、高さ50mm程度の段差を乗り越えることで実験を実施した。運転はこの車両の運転に慣れたテストドライバーが行い、安全に十分考慮した上で計測を行った。表1に各実験条件を示す。

Table1. Experimental Conditions

Tire groove depth	Under 1.6mm
Speed condition	70~100km/h / every 5km/h
Measurement items	Velocity(longitude,lateral),Tierod lateral acceleration Tier rod lateral deviation,Steering Wheel angle

#### 2.2 実験結果

本実験にて確認されたシミーを明確にするため、周波数解析及び実験結果を複素平面上に展開し検討を行った。図1、図2にはタイロッド横加速度の測定結果及び周波数解析結果を示す。図1より速度が一定区間では振動が発散し、速度が低下すると振動も減衰していることが確認できる。そこで、図1より周波数特性を求めるため速度が一定区間を切り出し、解析区間とした。

図2より振動のピークが約10.7Hz付近にあることが確認できる。車両速度を変化させた際にも同じくシミー

の発生周波数は約10Hzとなったため、本実験車両に発生するシミーの周波数は約10Hz付近であることが確認された。この周波数は過去報告されている振動数<sup>(1)</sup> (6~8Hz) と比べ高いことがわかる。

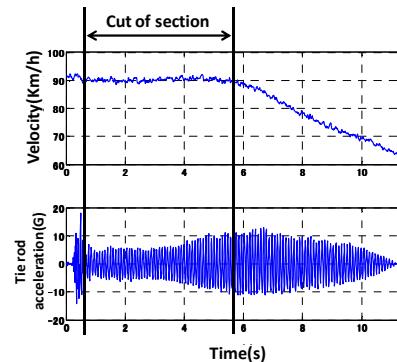


Fig.1 Experimental result

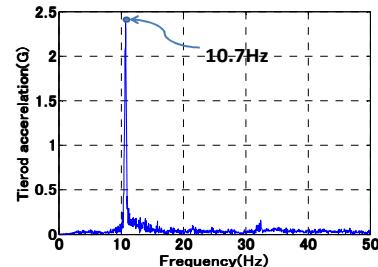


Fig.2 Frequency characteristic

次に、車両速度を変化させた際の実験結果を複素平面上に示したもの図3に示す。

この結果より、車両速度 70 km/h~80 km/h では振動が発生してもすぐに収束し、85 km/h に関しては発生した振動は減衰するものの振動が継続的になっている。これ以上の 90~100 km/h では発生した振動が発散している。実験結果から、速度増加に伴い振動が不安定になっているため実験車両に発生しているシミーに速度依存性があると判る。このシミーの速度依存性に関しては過去の研究<sup>(2)</sup>においても報告されているが、発生する速度域に関しては通常 40~70 km/h 付

Study on vibration phenomenon to occur in the steering system of light duty truck

Takumi Hirano ,Ichiro Kageyama

近で発生し、これ以上の速度域では振動が収束していくことが多く見られた。しかし、本実験結果では発生速度域が約 80 km/h 以上となっており、100 km/h まで車両速度を上げても振動の収束が確認できなかった。また、シミーが発生する速度域でも入力がなければシミーは発生せず、一方で入力される段差の大きさによってもシミーの発生の有無が存在したことより、入力の大きさがシミーの発生に影響していると考えられる。

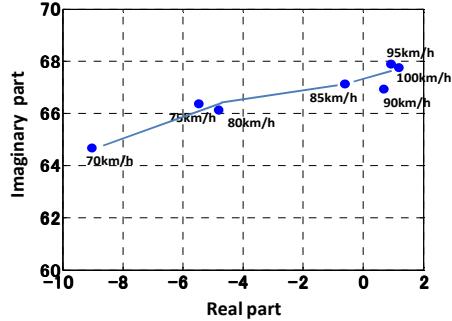


Fig.3 Experimental result

### 3. 操舵系モデルによる検討

#### 3.1 過去の操舵系モデルの検討

理論的な検討の初期段階として過去構築されたモデルにて本実験車両に発生するシミー現象の検討を行った。このモデルでは、実験車両と同型のサスペンション形式を元に構築されたモデルである。また、左右のタイヤの横方向の動特性を考慮した計 5 自由度のモデルである。根軌跡の結果を図 4 に示す。

図 4 より実験結果を従来の操舵系モデルでは表現できていないことが分かる。

そこで、実験結果から判明した操舵系の摩擦の影響に着目し操舵系モデルに加え検討を行った。図 5 に実験結果を示す。図の結果より振動の減衰部分が直線的に減衰していることが確認できる。これは、摩擦の影響が明確に表れていることを確認することができる。

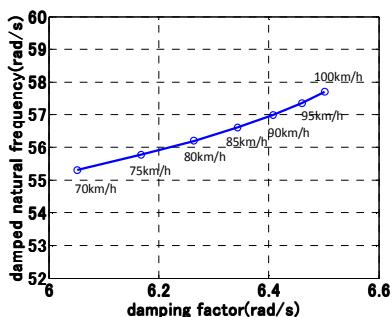


Fig.4 Conventional model result

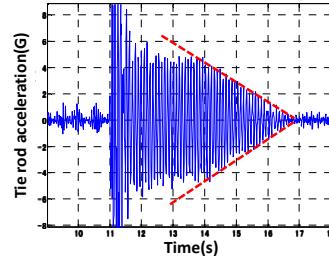


Fig.5 Experimental result

#### 3.2 簡易モデルによる検討

モデル検討の第一段階として、簡易的な操舵系モデル<sup>(1)</sup> 検討を行った。簡易モデルで検討することにより概略的にシミー現象を捉えることが目的である。図 6、表 2 にモデルおよびモデルパラメータを示す。このモデルではタイヤの横方向、ねじれ方向およびステアリング軸回りの 3 自由度のモデルである。それぞれ横方向、ねじれ方向には転動距離に対する一次遅れ系を考慮することでタイヤの動特性を表現している。また、摩擦項に関しては、ステアリング軸回りに操舵系で発生する摩擦を摩擦トルクとして等価的に付け加えた。

図 7 には表 2 の値を基準値としてシミュレーションを行った結果を示す。シミュレーション条件としては、車両速度 60~100 km/h とし初期値に実舵角速度 100deg/s とした。

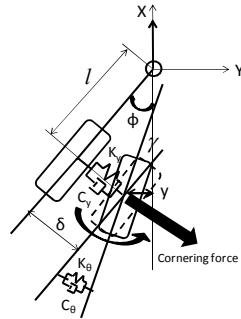


Fig.6 Simple steering model

Table.2 Symbol parameter

$I$ : Moment of inertia around steering axis	0.80 (kgm <sup>2</sup> )
$l$ : Trail	0.095 (m)
$V$ : Velocity	60 to 100 (km/h)
$K$ : Cornering stiffness	41500 (N/rad)
$K_s$ : Tire lateral spring constant	119000 (N/m)
$K_{as}$ : Self aligning torque power	300 (Nm/rad)
$K_t$ : Tire twist spring constant	1000 (Nm/rad)
$C_g$ : Tire lateral damping coefficient	60(Ns/m)
$C_b$ : Tire twist damping coefficient	5 (Ns/m)
$C$ : Steering damping coefficient	1 (Nsm/rad)
$T_g$ : Relaxation length of $\gamma$	0.41 (m)
$T_b$ : Relaxation length of $\beta$	0.5 (m)
$\delta$ : Distance from wheel to contact plane	(m)
$y$ : Lateral displacement of contact plane	(m)
$\phi$ : Steering angle	(rad)
$\gamma$ : Angle of tire contact plane	(rad)
$F_{f,f}$ : Static friction torque	5 (Nm)
$F_{d,f}$ : Dynamic friction torque	3 (Nm)
$v$ : Revolution speed around steering axis	(rad/s)
$T$ : Time constant	1(s)

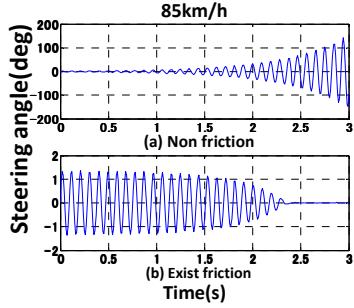


Fig.7 Simulation result

図7と図3の実験結果を比較すると、実験結果では85km/h付近は安定領域内にあるが、摩擦を考慮していない結果の場合、振動が発散している。一方で摩擦を考慮した場合では振動が収束し実験結果と同様な傾向が確認できる。摩擦を考慮した場合、これ以降の速度域でのシミュレーションでは振動が発散していることより図3の実験結果を定性的に表現できていると考えられる。

### 3.3 感度解析による検討

前述した簡易モデルを使用し、シミーに対して感度が大きい車両パラメータを抽出するために感度解析を行った。解析方法として表2に示される基準値から $\pm 1\%$ 変化させ、変化率に対する応答の減衰比の変化からパラメータの抽出を行った。

図8に感度解析の結果を示す。パラメータの変化率に対して応答の減衰比の変化が大きいものはコーナリングパワーのほか、タイヤの捩じれおよび横変位に関する項目である。従来の操舵系モデル<sup>(2)</sup>ではタイヤの横変位は考慮されているが、タイヤの捩じりについて考慮されていなかった。自励振動であるシミーの励振力がタイヤの捩じりと横変位の連成している可能性があり、シミーに対してタイヤの捩じりに関する重要なことを示した。

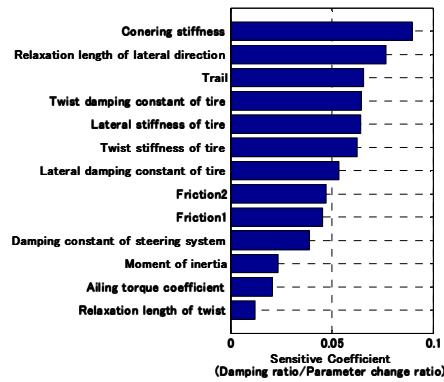


Fig.8 Sensitive analysis result

### 3.4 自由度を増加したモデルによる検討

前述した簡易モデルではシミーに対して影響が高いパラメータを示したが、定量的な領域での展開はされてこなかった。また、必ずしも簡易モデルの中に設計段階で必要となるパラメータが含まれていなかった。そこで、自由度を増し定量的な領域でもシミーを再現できるモデルの構築を行った。図11には操舵系モデルの図を示す。このモデルでは前述した簡易モデルの要素に加え、サスペンション系の捩じりやハンドル系の捩じり剛性等を考慮したモデルとした。

図13には根軌跡においてシミーに関する根だと考えられる固有ベクトルを示す。他のベクトルに比べハンドル系、タイヤの捩じり、実舵角のベクトルが長いことよりシミー特有のハンドル系およびタイヤ系の振動であることが分かる。

### 3.5 時系列的検討

根軌跡上に示された結果では振動系の収束や発散に関して十分再現できていないことが確認された。一方で過去、エネルギー・フローの観点から二輪車のウォブルモードに関して研究が行われておりエネルギーの出入りにより収束、発散に影響がある事が確認されている。<sup>(4)</sup>一般的にエネルギー散逸項でありシステムの安定性に影響すると考えられる摩擦項を考慮することでシミー発生時の実舵角の応答の確認を行った。摩擦項は非線形要素であるため時系列データにて検討を行った。シミュレーションは初期値を実験データから算出した実舵角速度とし実車実験と同様の速度域で行った。速度が約80及び90km/h時の実験結果、シミュレーション結果を図13に示す。この結果より、各速度域での収束や発散といった定性的な部分を再現できていることが確認できる。一方で、実験で確認された周波数が約10Hzであるのに対し、シミュレーション結果では約9Hzであることが確認できた。このことより定量的な部分でも再現できたと考えられる。

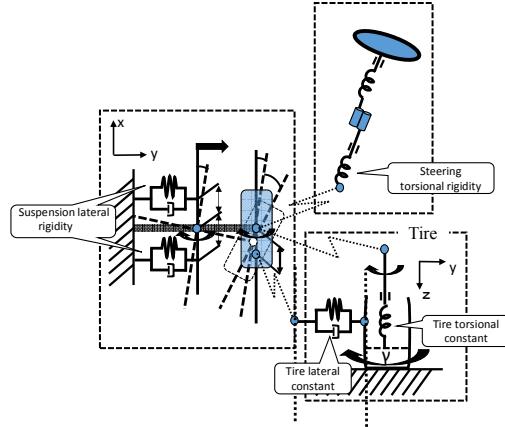


Fig.11 Steering system model

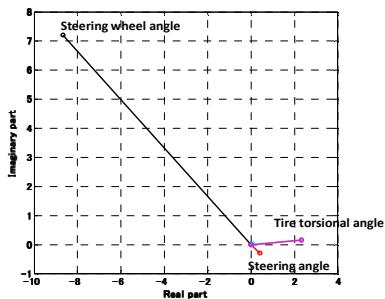


Fig.12 Eigenvector

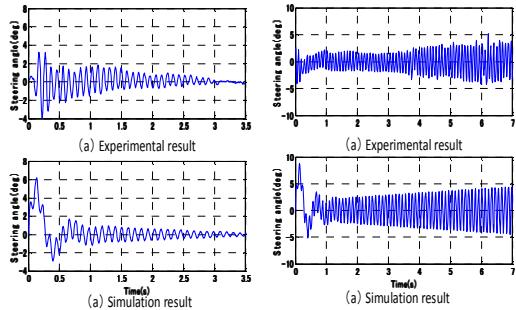


Fig.13 Experimental result and Simulation Result  
(80,90km/h)

### 3.6 感度解析による検討

図 11 のモデルを使用し、シミーに対して影響度の高いパラメータの抽出を行った。解析方法に関しては前述した方法と同様に行った。図 14 に感度解析の結果を示す。影響度が高いパラメータとして顕著に確認されたものが、サスペンション剛性や取り付け距離である。従来のシミーの解析では C.P. の影響が高いとされてきたが、本解析結果ではサスペンションの影響が高いことが確認された。これは、従来のモデルではタイヤ特性にサスペンション剛性が含まれていたことにより影響が高いとされていたと考えられる。一方で、本解析結果ではタイヤ特性とサスペンション剛性を分離して検討した結果、シミー現象ではサスペンション剛性の影響が高いことが明らかとなった。

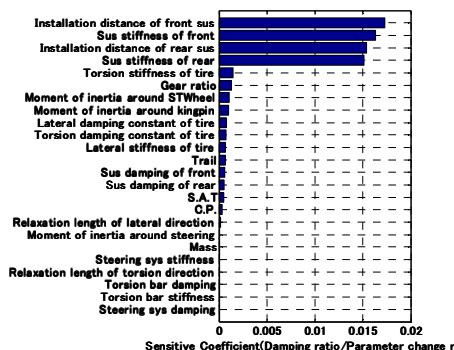


Fig.14 Sensitive analysis result

### 4. 結言

本研究により以下のことが明らかとなった。

- シミー現象把握実験にて、過去のものとは異なるシミー発生速度域や発生周波数が確認した。
- 操舵系簡易モデルにて静止摩擦トルクと動摩擦トルクを含んだモデルにてシミュレーションを行った結果、定性的に実験結果を表現し、シミーに対する摩擦項の影響を確認することができた。
- 操舵系簡易モデルにてパラメータスタディを行った結果、シミーに対する影響度が高いものはコーナリングパワ、タイヤ剛性等が挙げられる。
- 設計段階で必要となる自由度を考慮したモデルにより定量的、定性的にもシミーを表現できたと考えられる。また、このモデルを使用し感度解析を行った結果、サスペンションに関するパラメータにおいて影響が高いことが明らかとなつた。

今後はこのモデルを使い、シミーの周波数や速度域が過去の結果と異なっているのか検討を行う。また、このモデルよりシミーに対して影響度の高いパラメータを抽出し設計段階の指標とすることを考えている。一方でモデルの妥当性を検討するため、実車の諸元を可能な部分で変更し実験結果と理論結果の妥当性を検討する。

### 参考文献

- 江本ら、二輪車のハンドル系に発生するシミーに関する研究、日本機械学会論文集, No. 930 – 81, (1993)
- 江副ら、大型車両の操舵系に発生するシミーに関する研究、日本機械学会第 4 回交通・物流部門大会講演論文集, No. 95–36 , 1995
- 木村ら、小型トラックで発生するステアリングシミーの解析、自動車技術会学術講演会前刷集, No. 951, 1995
- 片山ら、エネルギー・フロー法による二輪車のウォップルモードの解析、自動車研究, 第 11 卷 第 7 号, 1989
- 平野ら、小型トラックの操舵系に発生する振動解析に関する研究、自動車技術会前刷り集, No. 138–13, 20013