風流れ改善によるワンボックスカーのミラーびびり振動低減*

谷本 隆一^{*1}, 辛島 智聡^{*2}, 志満津 孝^{*3}Reduction of Mirror Image Vibrations by Improvement
of Wind Current around Mirror in One-Box-CarRyuichi TANIMOTO^{*4}, Tomoaki KARASIMA and Takasi SIMATSU^{*4} Engineering Div. No. 2, Toyota Auto Body CO., LTD.,
100 Kanayama, Ichiriyama-cho, Kariya-shi, Aichi, 448-8666 Japan

In recent years, the level of dynamic quality of one-box-car required to be the same as that of a passenger car. To meet this requirement, various vibration problems have to be examined. In this paper, among them the problem of mirror image vibrations is considered. As compared with a passenger car, the outer mirror of a one-box-car is larger in shape and thinner in depth, and is attached at more forward position. Due to these, mirror image vibrations are severer in a one-box-car than in a passenger car. To find a way to reduce the vibrations, we first studied the characters of the mirror vibrations by modal analysis. Then we studied the velocity distribution of wind around the mirror by PIV (Particle Image Velocimetry) technique. Based on these studies, we proposed a better form of the mirror, which reduced the mirror image vibrations.

Key Words: Mirror Image Vibration, Modal Analysis, Vibration of Vehicle, PIV (Particle Image Velocimetry)

1. ま え が き

近年、ワンボックスカーは高速化が進み、また、乗用車と同等レベル品質への期待の高まりがある。その結果、高速走行・粗面路走行時のボデー機能部品の振動問題がクローズアップされてきた。振動問題としてアウターミラー鏡面のびびりした振動、シートのぶるぶるした振動、ドアのばたついた振動等がある。

本研究では、これらの問題のうち高速走行時のアウターミラー鏡面のびびり振動をとり上げ、実車走行時のミラー鏡面振動のモダル解析による現象解明、振動発生要因となる強制力調査、および、ミラー廻りの風流れ解析を行い、ミラー外形の形状改良による風流れ改善を行った。その結果、図面段階での対策によりミラー鏡面のびびり振動の抑止が図れるようになったのでその結果を報告する。

2. ミラーびびり振動現象の解明

ミラーびびり振動とは、図1に示すように、高速走行、あるいは、悪路走行時のミラー鏡面の細かい振動

により、鏡面上の像が、2重、またはぼけて映り、像の識別が困難な状態となる現象である。

Fig.1 Mirror image vibration

ワンボックスカーは乗用車に比べ、高速走行時のミラーびびり振動が発生しやすく、試作段階における問題が多く、対策に費用と時間を費やしている。その原因を探るため、ワンボックスカーと乗用車とのミラーびびり振動を比較した。その結果、図2に示すように、ワンボックスカーのミラーは、①面積が大きい、②厚みが薄い、③取り付け位置が車両最前方などが原因で、高速走行時に走行風の影響を受け易いことがわかった。

そこで、当社で開発したワンボックスカーA車（以下A車とする）を対象に、ミラーびびり振動の現象解明に取り組んだ。

* 原稿受付 2000年9月8日。

*¹ 正員、トヨタ車体(株) (〒448-8666 刈谷市一里山町金山100)。*² トヨタ車体(株)。*³ 正員、(株)豊田中央研究所 (〒480-1192 愛知県長久手町)。

E-mail: RYUICHI.TANIMOTO@mail.toyota-body.co.jp

	Passenger car	One-box-car
① Size	Small Mirror	Large Mirror
② Thickness	Thick Mirror	Thin Mirror
③ Layout	Mirror Center of car	Mirror Front of car

Fig.2 Comparison between passenger car's mirror and one-box-car's mirror

問題となっていた A 車の 140km/h 高速走行時のミラーびびり振動現象を、図 3 に示す小型加速度センサを用いて測定した。センサはミラーまわりに 20 点×3 軸方向取り付け、F F T にて測定しモード解析を行った。

Fig.3 Measurement method for mirror image vibration

F F T 測定結果の例として、図 4 の上図に示す鏡面上の下側外／内両サイドの 2 点 (a) (b) における鏡面に垂直な振動を図 4 に示す。また各振動数に対する振動モードのアニメーション解析結果の一例を図 5 に示す。その結果、ミラー鏡面には 20Hz、50Hz、75Hz、90Hz の 4 つの振動ピーク周波数の存在が確認でき、20Hz、50Hz は鏡面に垂直な並進モード、75Hz、90Hz はミラー鏡面对角方向を軸とする回転モードであるこ

とが判った。

Fig.4 Vibration level of mirror image

Fig.5 Mode animation of mirror image vibration

ここで、A 車のミラーと類似形状で、ミラーびびり振動が発生しない B 車のミラーの振動レベルとの比較を行った。B 車は A 車と同じワンボックスカーであり、そのミラーは A 車と同じ大きさで外形々状のみ少し異なるミラーである。結果の例として、A 車の (a) (b) に対応する点 (a) (b) を B 車にとり、両者の振動レベル比較を図 6 に示す。両者の比較結果より、両ミラーには、75Hz、90Hz において大きな差異がある。一方、20Hz、50Hz には差が見られなかった。

以上、ミラーびびり振動、モードアニメーション、ミラーびびり発生有無の関連より、ミラーびびりはミラー鏡面の回転モードが発生要因と推定される。

Fig.6 Vibration level compared with non-problematic mirror

次に、実走行時のミラー鏡面の対角線を軸とした回転振動が、ミラー鏡面の固有モードによるものか否かを明らかにするため、鏡面のイナータンス測定を行った。イナータンスとはある構造体に単位加振力を加えた時の動き易さを振動加速度レベルで表した単位であり、ここではインパルスハンマー加振時の力（F）と、その時生じる振動加速度（A）をFFTで処理（イナータンス $I = A/F$ ）して求めた。ここで、イナータンス $60\text{dB} = 1\text{m}/\text{S}^2 \cdot \text{N}$ とした。その結果、実走行振動モードと同様（a）点では75Hz、（b）点では90Hzにピークが発生した。例として、（a）点加振結果を図7に示す。このことより、実走行時のミラー回転モードは鏡面の2つの慣性主軸まわりの固有モードにより生じているといえる。

Fig.7 Resonance frequency of mirror vibration

ここでミラー鏡面の対角線を軸とした回転モードによる振動（ミラー角度変化 $\Delta\theta$ ）と、ミラーびびり量

との関係を図8のモデルを用いて検討した。このモデルより、ミラーびびり量、すなわち、Eyeから見たCarの虚像の角度ずれ $\Delta\alpha$ は式（1）によって与えられることが導かれる。

Fig.8 Model of mirror image vibration

$$\begin{aligned}\Delta\alpha &= \frac{\Delta B}{L} = \frac{1}{L} \times \frac{2LR}{2L+R} \Delta\theta \\ &= \frac{2R}{2L+R} \Delta\theta\end{aligned}\quad \dots\dots (1)$$

$\Delta\alpha$: Eyeから見たCarの虚像の角度ずれ (rad)
 ΔB : ミラ-鏡面上画像ぶれ量 (m)
 L : ミラ-~アイポイント間距離 (m)
 R : ミラ-鏡面曲率(m) $\Delta\theta$: ミラ-角度変化(rad)

式（1）より、ミラーびびり量 $\Delta\alpha$ を小さくするためには、ミラー角度変化 $\Delta\theta$ を小さくすれば良いことがわかる。この方法には、ミラー鏡面の回転方向イナータンスの低減、強制力低減の2つの方法がある。

鏡面のイナータンス低減手段として、近年一般的となった電動ミラー（図9）ではアクチュエーターとミラーボデー間の線バネ追加、ブチルゴム追加等による

Fig.9 Structure of conventional motor drive mirror

制振がある。しかし、これらの対策は、コストアップ、電動ミラー鏡面の可動トルク増加によるモーターの焼き付き等、解決すべき課題がある。そこで、以下では強制力の低減に取り組んだ。

3. ミラーびびり振動の強制力検討

ミラーびびり振動の強制力要因として考えられる悪路走行時の路面入力、エンジンからの振動入力、および、高速走行時の車速風による寄与度調査を行った結果を図 10 に示す。この結果、A 車のミラーびびりは車速風の影響が大きいといえる。

Fig.10 Contribution of force to mirror image vibration

Fig.11 Relationship between mirror image vibration and vehicle's speed

A 車以外のワンボックスカーについても同様の強制

力寄与度調査を行った結果、ミラーびびり振動は車速風による影響が大きいことが判った。

そこで、車速風の影響に着目し、A 車を対象に、車速とミラー鏡面振動加速度レベル (dB) との関係の調査した。その結果を図 11 に示す。鏡面振動レベル A は速度の 2 乗の対数に比例し増加する。

ここでイナータンス I は定義より、 $I = \text{振動加速度レベル } A \div \text{力 } F$ であり両辺を対数にとると

$$I \text{ (dB)} = A \text{ (dB)} - 20\log F$$

従って、この車速風とミラー鏡面イナータンスから、ミラー鏡面振動レベル A は式 (2) で与えられる。

$$A = I + 20\log F$$

$$= I + A_0 + 20\log V^2 \quad (\text{dB}) \dots\dots\dots (2)$$

A : 鏡面振動レベル:at75Hz (dB)
 I : ミラー鏡面イナータンス:at75Hz (dB)
 F : 加振力 (kgf) V : 車速 (km/h)
 A_0 : 実験定数 (dB) ← 実験より算出

次に、強制力である車速風の周波数特性の調査を行った。車速を変化させて、ミラー鏡面に垂直な振動加速度レベルを測定した結果の一例を図 12 に示す。ミラーびびり振動発生周波数 50~100Hz 帯域では、車速増加により振動レベルが平行に増加するといえる。

Fig.12 Frequency characteristic of wind around mirror

ワンボックスカーのミラーびびり振動は車速風の影響が大きいことがわかる。そこで車速風と振動発生との関係を把握するため、以下、ミラー廻りの風流れ解析を行った。

4. ミラー廻りの流れ解析

ワンボックスカーのミラー廻りの流れ解析のため、車両廻りの流れを模擬した簡易風洞 (図 13) を製作し、

流れの可視化 P I V (Particle Image Velocimetry)⁽¹⁾
(2) (3) を実施した。可視化トレーサには、風洞上流で発生させたヘリウム封入シャボン玉および煙（フォグ）を利用し、ミラー廻りの流れに対し、スリット光による各断面画像を高速ビデオカメラにて撮影した。さらに可視化画像を P I V プロセッサを用い流速分布計測を行った。本評価では風洞装置の能力より車速 15 km/h 条件を選定している。この条件選定のため、まず、実車を大型風洞に入れ、140km/h 風洞でのミラーびり振動レベルが実車走行時と同一であることを確認した。その後、140km/h 風洞内にてミラー廻りの風流れをスモークとスリット光で観測し、そのイメージを簡易風洞にて再現させた。

実車状態を再現させるため簡易風洞で工夫した点は、ファンを観測部の下流に配置し、観測部とファン間に整流板を格子状に設けたこと、上流側にチャンバー槽を設け、風洞部へは曲線で接続し、またチャンバー入口に壁を設け、シャボン玉、スモークの初期流速の観測部への影響を取り除いたことである。

Fig.13 Laboratory apparatus for analysis of windy current around outer mirror (speed 15 km/h)

検討に用いた A 車ミラーの改良前後の形状を図 14 に示す。また P I V 計測結果を図 15 に、流れの解析結果を図 16～17 に、ミラー中央断面にて示す。

図 16 は改良前後のバブルトレーサの流れを 0.015

Fig.14 Improvement for outer shape of mirror

秒ごとに高速ビデオで連続撮影した写真をこま送りにて示す。初期ミラーでは矢印で示すトレーサが鏡面に衝突する様子が観測された。改良後はボデーとミラー間から流れてきたトレーサが矢印のように鏡面にそって流れ鏡面には衝突しないことが観測された。

また、図 17 はフォグ（煙）トレーサの 0.015 秒ごとの高速ビデオ撮影による連続写真を示す。初期ミラーではミラー鏡面まで大きな渦が廻りこんでいる様子が観察され、改善後は渦は小型化し後方に流れて鏡面に衝突しないことが観察された。

図 15 は P I V による軌跡作図結果を示す。これらより、A 車の初期ミラーでは、ミラーとボデーの隙間からの流れと、車両外周側においてはく離れた流れが、ミラー鏡面後方で交互に、かつ、不安定に発生し、ミラー鏡面への衝突を周期的変動をもってを繰り返す。そして、この衝突がミラー鏡面後方の圧力変動を引き起こし、ミラーびり振動を発生させる強制力となっていることを明らかにした。

Fig.15 Improvement of current for wind (P I V)

解析結果をもとに、A 車ミラーへの不安定な流れの

衝突を低減してミラー振動を抑制するため、外周側におけるはく離を防止する。そのためミラー先端部形状に図 14 に示すような斜線部を付け加え、外側形状を流れに平行となるように変更した改良品を開発した。

改良品では、ミラー先端部での風流れのはく離が抑制され、ミラー鏡面への外周側からの不安定流れの衝突が減少していることがわかる。その結果、ミラーとボデー間からの流れがスムーズに後方に排出されることによりミラーへの衝突現象が抑制された。

さらに、簡易風洞評価において効果が確認された改

Fig.16 Improvement of current for wind (Bubble tracer)

Fig.17 Improvement of current for wind (Fog tracer)

良品に対し、実車で 140km/h 高速走行評価を実施した。改良品ではミラー鏡面 (a) 点の圧力変動量が、図 18 に示すように 100 Pa から 50Pa に半減した。

その結果、上記改良品のミラーびびり振動は、図 19 に示すようにミラー鏡面ポイント (a) の初期ミラーに比べ、75Hz にて約 6 dB 低減し、官能評価でも大幅な向上が確認できた。本ミラー形状は次期開発車両から製品化に展開している。

Fig.18 Pressure variation at point (a) on mirror

Fig.19 Reduction of mirror image vibration

本研究は A 車の結果であるが、式 (1) (2) の値を既知ミラーから新規に開発しようとするミラー諸元に設定し直すことにより他の車両ミラーへの適用、あるいは新規開発車両ミラーへの適用が可能となる。適用は、式 (1) よりミラー鏡面曲率 R、ミラー～アイポイント間距離 L 等ミラー諸元と、Eye から見た Car の虚像の角度のずれ $\Delta\alpha$ の品質目標から、ねらいとするミラーの角度変化 $\Delta\theta$ を求める。次に、式 (2) か

らミラー鏡面イナータンス I、保証車速 V、風の強制力 F からミラーの振動レベル A を求める。ここで、式 (1) から求めた $\Delta\alpha$ と、式 (2) から求めた A は正の相関がある。この関係を用いることにより、既知ミラーから新規開発車両ミラーへの予測が可能となる。

特に、近年、図面段階での CFD 予測技術も進んでいる。CFD の活用により、既知ミラーと新規ミラーとの風流れ比較解析により図面段階でのミラーびびり振動品質予測が可能になると思われ、本研究は広く有用であると考えられる。

5. まとめ

(1) ワンボックスカー A 車の高速走行時ミラーびびり振動現象のモード解析を行い、ミラーびびり振動は、鏡面の対角線を軸とした回転振動により発生し、ミラー鏡面の固有振動と一致していることを明らかにした。

(2) ミラーびびりの強制力要因調査結果より、ワンボックスカーは車速風による影響が大きいことを明らかにした。さらに、強制力である車速風の調査を行った結果、ミラーびびり発生時鏡面振動レベル (dB) は速度の 2 乗の対数に比例し増加する。

(3) PIV 計測・可視化により、ミラー後流に 2 つの流れが不安定に発生し、ミラー鏡面への流れが周期的に衝突を繰り返すことがびびり振動の発生要因であることを明らかにした。

(4) ミラーびびり対策とし、ミラー先端部での風流れのはく離の抑制を目的にミラー外側形状に流れに沿う平行な整流面を設けた改良案を提案した。検証結果より、改良品はミラー鏡面への不安定な流れの衝突を減少させることにより、ミラーびびり振動が低減することを確認した。

おわりに、本研究をまとめるにあたりご指導をたまわった名古屋大学大学院工学研究科安田仁彦教授に謝意を表す。

文 献

- (1) 小林ら, 2 次元流れ場の実時間デジタル画像計測システムの開発, 機論, 5-509, B(1989), 107-114.
- (2) 西野ら, 画像処理に基づく流れの三次元計測に関する研究, 機論, 50-510, B(1989), 404-412.
- (3) T.Shimazu, Development of high speed and high accuracy PIV system, Flow visualization and Image Processing 2 Pacific symposium, 1998.