

次数トラッキングデータを用いた実稼動モード解析の考察

Study of Modal Analysis from Order Tracking Data

坂口 元 康*

Motoyasu SAKAGUCHI

要 旨

エンジンの実稼動データからの固有モード抽出技術の提案をした。エンジン振動の特性を考慮し、部分空間法に次数トラッキング振動データを用い、モード抽出精度が向上した。

FEMの検証に用いられるモード形に注目して、本提案手法の精度検証をおこなった。パルスを用いた加振テストで擬似的にトラッキング解析をおこない、伝達関数を用いるモード解析と比較し、相似のモード形が得られることを確認した。本手法を実際のエンジン振動へ適用し、ディーゼルエンジンのチェーンカバーのモードの抽出をおこない、従来用いられていた、実稼動時振動形状解析、および平均処理スペクトルによるモード抽出に比べ、モード形の直交性が向上した。

以上の結果から、従来手法と比べエンジンの実際の稼動条件での固有モードの抽出精度が向上する手法を確立した。

ABSTRACT

A Modal analysis technology using engine data taken under operational conditions is proposed. Taking the features of engine vibration into consideration, order tracking vibration data is used as an input to the subspace method and the identification of modal parameters is enhanced.

Paying attention to the mode shape used to validate FEM, and an accuracy validation by the proposed method was conducted. In the excitation test using pulses, pseudo tracking analysis was conducted. The results were compared with the modal analysis using the transfer function, and it was confirmed that a similar mode shape was obtained. By applying this method to actual engine vibration, the chain cover mode of diesel engines was identified, and it was confirmed that the orthogonality of the mode shape was enhanced compared to the mode shape obtained using conventional operational deflection shape and using average spectrum.

From the above, it is determined that the proposed method offers enhanced identification accuracy of the natural modes under actual engine operating conditions, as compared to the conventional method.

1. まえがき

振動対策案の検討やFEMモデルの精度向上のために、実際の構造物の固有モードを得ることは重要である。従来、固有モードは加振テストにより得られている。しかし、エンジンでは非線形性の影響や拘束条件の違いなどにより、加振テストと実際の運転状態とで固有モードが一致しない場合がある。そのため、これまでは運転状態の固有モードの代用として、簡易的に注目する周波数の振動量をそのまま扱う、実稼動時振動形状解析(Operational Deflection Shape: ODS)がおこなわれていた。この手法は、振動の可視化による対策の検討⁽¹⁾には有用である。しかし、FEMと実験の比較、および実験における測定点配置の最適検証⁽²⁾など、固有モードに注目した解析においては、ODSは根本的に固有モード

と異なる事象であるため、解析の精度が低下してしまう。

一方、実際の機械の運転条件の振動応答のみから固有モードを抽出する手法として、実稼動モード解析(Operational Modal Analysis: OMA)が研究されている⁽³⁾。⁽⁴⁾ OMAは、構造物に対する起振力が、白色雑音のような周波数領域で偏りが無いことを前提としている。しかし、エンジンの起振力は回転次数成分が支配的で、くし型のスペクトルとなるため OMA の適用が難しく、正確な固有モードは得られない。

そこで、エンジンの実稼動状態での固有モードを、精度良く得る手法を提案した⁽⁵⁾。エンジン振動の特性を考慮して、次数トラッキングデータを OMA の入力に用いて、抽出精度を向上させた。本報告では、固有モードの特性のなかでも FEM の結果との比較によく用いられるモード形に注

*四輪開発センター

目し、精度の再検証をおこなった。エンジン振動を模擬した加振テストで、従来からの伝達関数を用いたモード解析(Experimental Modal Analysis: EMA)と相似のモード形が得られた。実際のエンジン振動へ適用し、従来からのODSと比較しモード形の直交性が向上した。以上の結果から本手法によるモード形抽出精度の向上が確認できたので報告する。

2. モード抽出精度向上手法

2.1. ストochastic・サブスペース法

OMA に用いた手法は、ストochastic・サブスペース法(Stochastic Subspace Identification Method)⁽³⁾または部分空間法⁽⁴⁾と呼ばれる手法である。この手法に関する理論は参考文献に詳細に記述されているので、ここでは概要のみを記述する。ストochastic・サブスペース法は、応答の相関関数から作成されたハンケル行列に特異値分解をおこない、応答を支配する行列を求め、固有モードを抽出する手法である。Fig. 1にその概念を示す。入力に用いる応答の相関関数は、クロススペクトルの逆フーリエ変換からも得られる。ストochastic・サブスペース法は、入力される起振力が、周波数で偏りが少ない、との前提を満たせば、振動データから直接、固有振動数、モード形、およびモード減衰比を得られる。しかし、伝達関数を用いないため、モーダルマスなどによるスケールリングができない。そのため、得られた結果は、FEMの結果の検証への利用は可能だが、部分構造合成法などへの利用はできない。

ストochastic・サブスペース法は、上記のように加振テストが不要なため、大型建築物などのように、加振テストが困難な構造物の解析に使われる例が多い。また、自動車のサスペンション⁽³⁾のように振幅依存性が大きく、加振テストでは実稼動状態での振幅に相当したモードの抽出が難しい場合でも、実際の運転条件下での固有モードを抽出できる。しかし、起振力に特定の偏りがある場合には、得られた結果が、真の固有モードなのか起振力の影響を受けた結果なのか判定できず、解析の信頼性を低下させる原因になる。

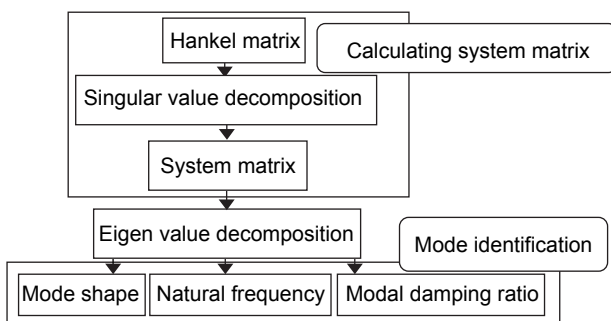


Fig. 1 Overview of OMA

2.2. エンジンに OMA を適用するときの問題点

エンジンの振動は Fig. 2 に示すように、エンジン回転に対する次数成分が支配的であり、くし型のスペクトルとなる。よって、前述の起振力が周波数で偏りが少ない、との前提が成立せず、そのままでは OMA の適用ができない。そのため、OMAを適用させるために時間や回転数で振動スペクトルの平均処理をおこない、起振力の偏りを少なくするなどの工夫が必要になる(Fig. 2)。現在市販されているOMAの解析システムは、建築構造物の常時微動のような白色入力を想定し、振動スペクトルを単純に平均処理している物が多い。しかし、この方法をエンジンの振動に適用した場合、次数成分以外の、応答レベルの小さい振動も含めて平均する。そのため、S/N比などのデータの信頼性が低下し、モード抽出精度も低下する。

2.3. エンジンに合わせた解析精度改善の提案

エンジンの実稼動状態でのモード抽出精度の向上のため、OMAの入力データに、トラッキング解析による次数成分データを用いる。次数成分の起振源は、エンジン内部の慣性力、チェーンや歯車の噛み合いなどの機構の運動による起振力、燃焼圧などであり、回転数が変化しても比較的安定したレベルを保持する。そこで、これらの事象に注目して振動に次数トラッキング解析をおこない、スペクトルとして用いる。これにより、振動スペクトルの単純な平均処理よりも S/N 比が良く、かつ起振力が周波数で偏りが少ない応答が得られる。よって、次数トラッキングデータを用いることにより、OMAの解析精度が向上すると考えられる(Fig. 3)。

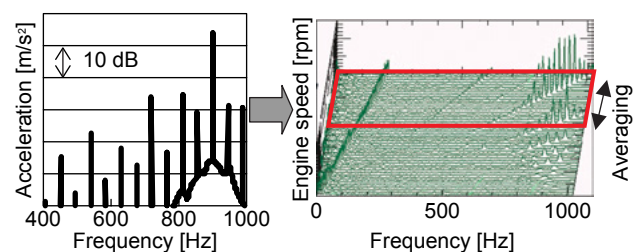


Fig. 2 Averaging engine vibration

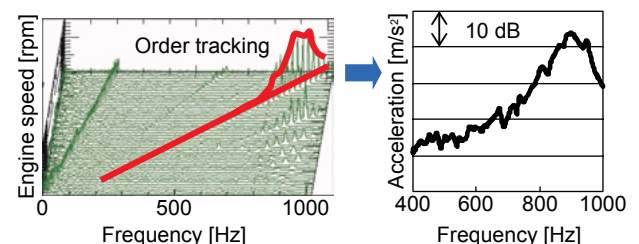


Fig. 3 Order tracking of engine vibration

3. 精度検証手法

3.1. 加振テストによる精度検証

実稼動状態での検証をおこなう前に、加振テストにより、次数トラッキングデータに OMA が適用できるかの検証をおこなった(Fig. 4)。測定対象にはシリンダヘッド、シリンダブロックに、チェーンカバー、ヘッドカバーを組み付けた物を用いている。シリンダブロックのオイルパンデッキを電磁加振器で加振し、ヘッドカバーの振動応答のみを測定する。加振テストにて次数トラッキング解析を擬似的におこなえるよう、三角波などのパルス波形を加振に用い、かつパルスの間隔を連続的に変化させ、擬似的に回転数の上昇を再現させる。このようにして得られた振動に次数トラッキング解析を用い、OMAを実行しモードを抽出する。また、OMAの比較として、ランダム波形による加振テストもおこない、EMAとの比較をおこなう。EMAの手法は、一般に広く用いられる時間領域のポリリファレンス法を用いる。

3.2. エンジンの実稼動テスト

次に、実際のエンジンをテストベンチで運転したときの振動を用いて、OMAの精度検証をおこなった。測定対象には4気筒 2.2L のディーゼルエンジンを用い、チェーンカバー表面の面外振動を測定する(Fig. 5)。燃焼加振力によるノイズを排除するために、モータリングによる外部駆動をおこない、回転数を上昇させて振動を測定する。OMAを適用するために、チェーンとスプロケットの噛み合いに注目した次数トラッキング解析と、従来からの手法であるスペクトルの平均処理をおこない、これらのデータに OMA を実行し得られたモードの比較をする。さらに、固有モードの

代用として古くから使われているトラッキング解析結果を用いた ODS を実行し、OMA と比較する。

3.3. モード形の比較

モード形はモード解析から得られる特性の中でも、振動現象の可視化やFEMの結果との比較などに用いられる、重要な特性である。よって、OMAの精度検証では特にモード形に着目した検証を実施した。以下に、モード相関係数(Modal Assurance Criterion: MAC)⁽⁶⁾を用いたモード形の抽出精度の検証方法について述べる。モードベクトル ϕ_r と ϕ_s が与えられたとき、MACは式(1)より得られる。ここで、添字 r および s は固有モードの次数を表す。

$$MAC(\phi_r, \phi_s) = \frac{|\phi_r^H \phi_s|^2}{\|\phi_r\|^2 \|\phi_s\|^2} \quad (1)$$

ϕ_r^H は ϕ_r の共役転置を表す。MAC は2個のベクトルの相関度を示す。 $0 \leq MAC \leq 1$ であり、 $MAC=1$ のときは2個のベクトルは完全な相関があり、 $MAC=0$ のときは無相関である。

通常は、複数のモード間で MAC を計算し、マトリックス表示をおこなう。同じモード間でおこなう自己相関と、異なるモード間でおこなう相互相関がある。自己相関の場合は、非対角成分のレベルが小さいほど、モード形の直交性が高く、モードが正しく抽出されている。相互相関の場合は、対角成分が1に近い値であると、互いのモード形が相似である。

モード形の抽出精度を複数のモードについて客観的に評価するために、マトリックス表示とあわせ、MACの平均値の評価もおこなった。自己相関の場合はモードの直交性に注目して式(2)に示す非対角成分(Non-diagonal Element: Non-diag)の平均値を、相互相関の場合はモードの相似に注目して式(3)に示す対角成分(Diagonal Element: Diag)の平均値を評価する。

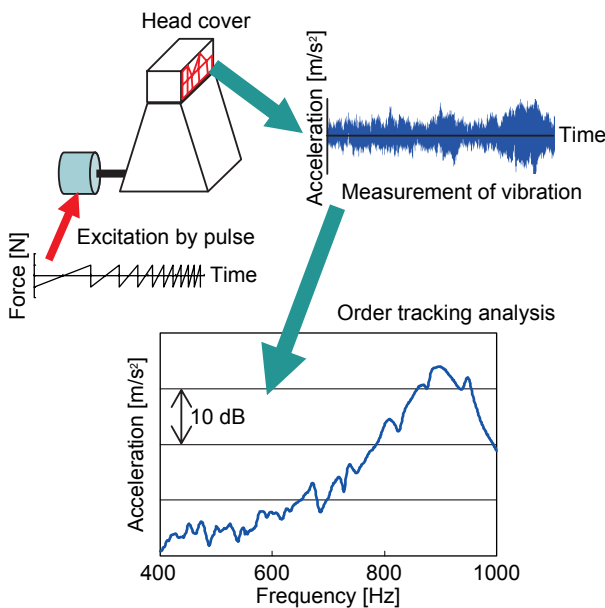


Fig. 4 Overview of pulse excitation test

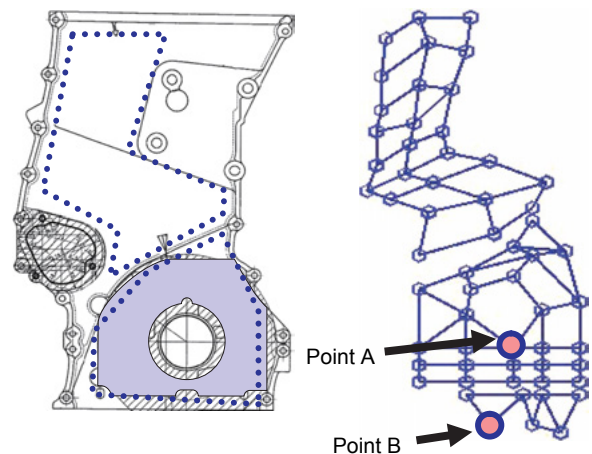


Fig. 5 Chain cover and measurement points

$$\text{Mean (Non-diag)} = \overline{\text{MAC}(\phi_r, \phi_s)} \quad (r \neq s) \quad (2)$$

$$\text{Mean (Diag)} = \overline{\text{MAC}(\phi_r, \phi_s)} \quad (r = s) \quad (3)$$

4. 結果

4.1. 加振テストによる精度検証

加振テストに OMA および EMA を適用して得られたヘッドカバーのモード形の比較をおこなった結果を Fig. 6 に示す。Fig. 6 の (a) は OMA の自己相関、(b) は EMA の自己相関、(c) は OMA と EMA の相互相関の MAC のマトリックス表示である。OMA と EMA の自己相関は、非対角成分で 0.40 以上の MAC があった。OMA と EMA で同じ傾向を示すため、OMA と EMA の解析精度の違いによるものではなく、計測点が少ないなどが原因であると推定できる。また、(c) に示す相互相関の対角成分の大きさは 0.89 以上であり、相互相関の対角成分の平均値も、0.94 と高い数値を示した。以上の結果から、OMA と EMA から得ら

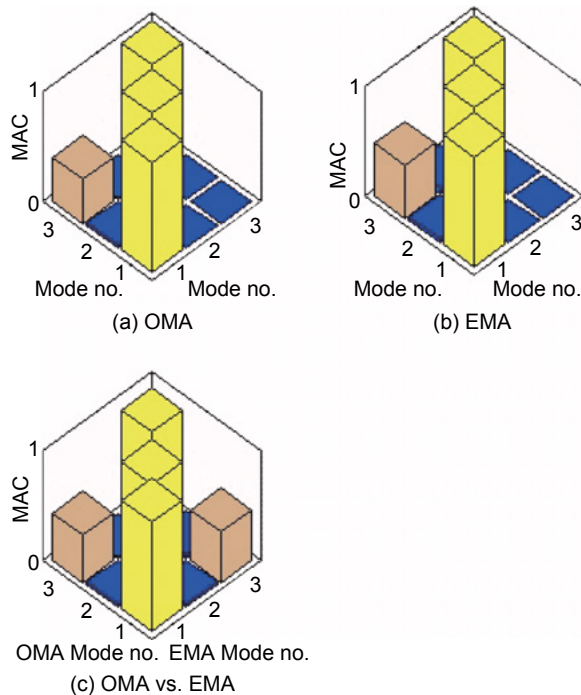


Fig. 6 MAC from excitation test

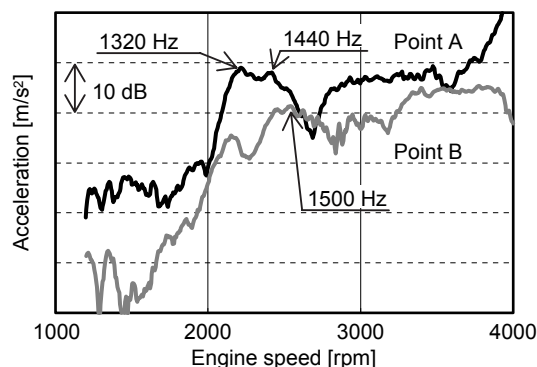


Fig. 7 36th order vibration of chain cover

Table 1 Comparison of natural frequencies of head cover by OMA and EMA

Mode no.	Natural frequency [Hz]		Difference [%]
	OMA	EMA	
1	831	829	0.2
2	901	901	0.0
3	947	947	0.0

れたモード形が相似であり、OMA が EMA と同等のモード形の抽出精度を有することが確認できた。

Table 1 には、OMA および EMA から得られた固有振動数を示す。OMA と EMA の固有振動数の差は 0.2% 以下であった。両者から得られた結果が一致し、固有振動数の抽出精度においても、OMA と EMA は同等である。

4.2. エンジンの実稼動テスト

チェーンカバー振動にチェーン噛み合い次数である 36 次のトラッキング解析を実施した結果の例を Fig. 7 に示す。測定点は Fig. 5 における Point A および Point B である。

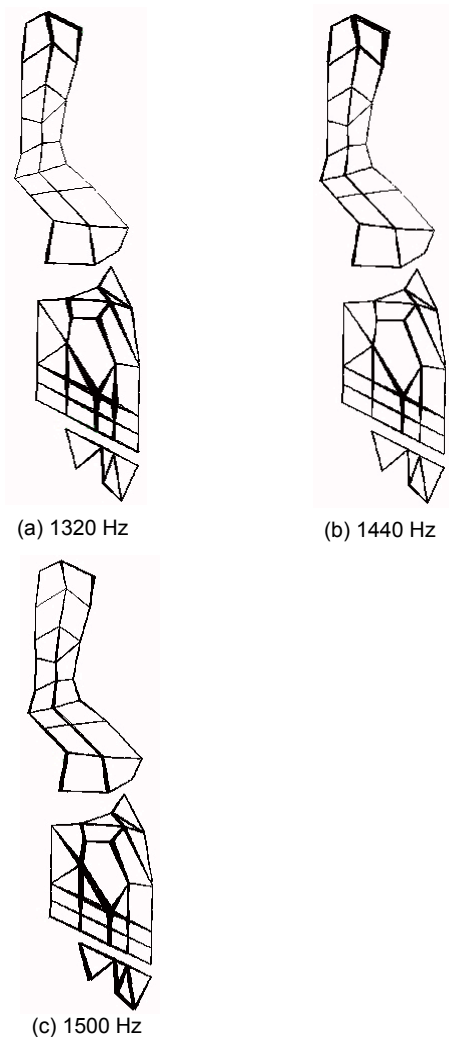


Fig. 8 ODS of chain cover

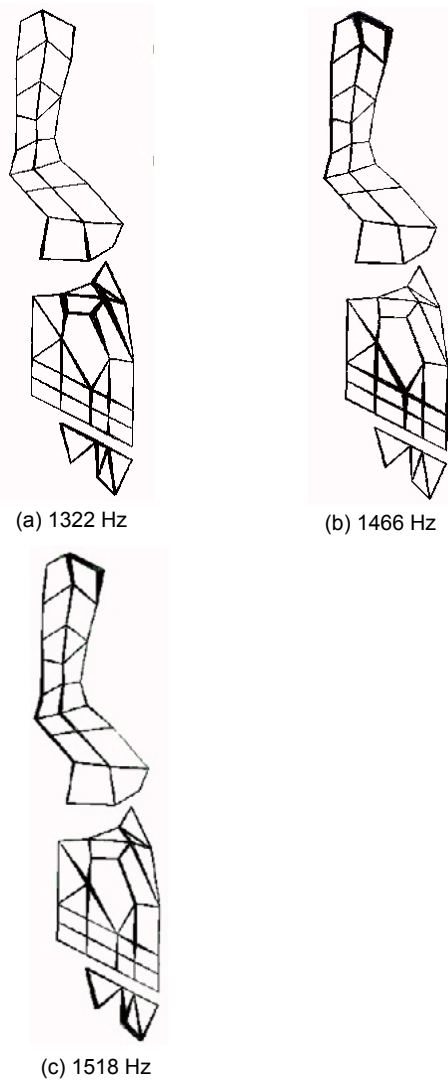


Fig. 9 Mode shape of chain cover

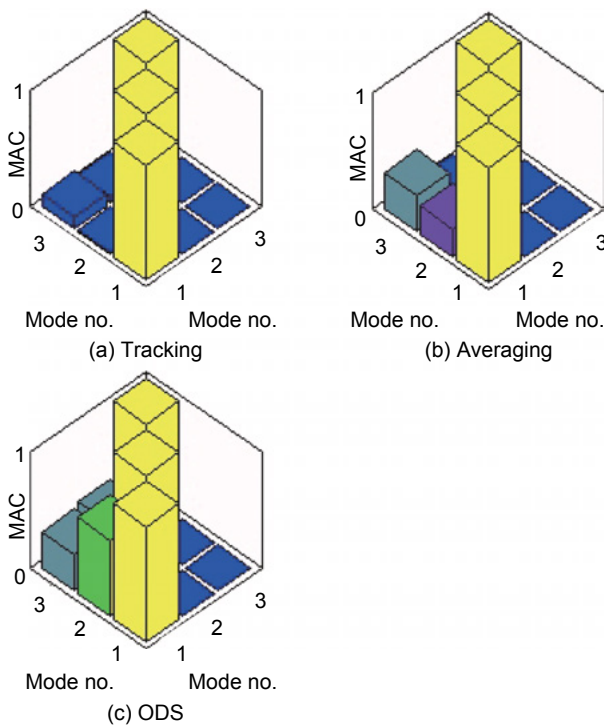


Fig. 10 MAC from operational condition

Table 2 Comparison of MAC mean from operational condition

Mean of non-diagonal MAC		
Tracking OMA	Averaging OMA	Tracking ODS
0.06	0.20	0.44

Table 3 Comparison of natural frequencies of chain cover by OMA from tracking and averaging

Mode no.	Natural frequency [Hz]		Difference [%]
	Tracking	Averaging	
1	1320	1322	0.2
2	1425	1466	2.9
3	1512	1518	0.4

振動のピークが、2200 rpm(1320 Hz)，2400 rpm(1440 Hz)，2500 rpm(1500 Hz)に存在し、解析はこれらの周波数付近に注目して実行した。

トラッキング解析結果を用いた ODS の結果を Fig. 8 に、トラッキングデータに OMA を適用して得られたモード形を Fig. 9 に示す。Fig. 9 に示すモード形では、それぞれクランク貫通穴の上側、下側、オイルパンが振動する形状であるが、Fig. 8 に示す ODS はすべてにクランクシャフトの貫通穴の下側部分が振動する形状が含まれている。ODS はモードが分離できずに重ね合わさって表示されているためであると推定される。

自己相関の MAC を求めた結果を Fig. 10 に示す。それぞれ、(a) トラッキング解析結果から得たモード形、(b) 平均処理から得たモード形、(c) トラッキング解析結果を用いた ODS の自己相関の MAC のマトリクス表示を示している。また、Table 2 には自己相関の MAC の非対角成分の平均値を示す。トラッキング解析を用いた OMA の非対角成分は最大で 0.11 であったのに対し、平均処理による OMA の非対角成分は最大 0.31、ODS の非対角成分は最大 0.66 であった。また、Table 2 に示す非対角成分の平均値においても、トラッキング解析を用いた OMA は 0.06 であり、平均処理による OMA の 0.20、および ODS の 0.44 より小さい値を示した。トラッキング解析を用いた OMA のほうが得られる固有モードの直交性が高く、モード形の分離ができていないのに対し、平均処理による OMA と ODS は直交性が低く、モード形の分離ができていない。よって、トラッキング解析を用いた OMA は、従来用いられてきた ODS や平均処理による OMA と比較しモード抽出精度が向上している。

Table 3 には、トラッキング解析と平均処理を実施した振動データから得られた固有振動数の比較結果を示す。2 番目のモードで、固有振動数に 2.9% の差異が見られたが、実

用上は問題ないレベルであり、固有振動数については従来手法の OMA でも十分な抽出精度を持つ。

5. まとめ

エンジンの実稼動状態における固有モード抽出の精度向上のため、OMAに振動の次数トラッキングデータを用いることを提案した。モード形に注目した検証をおこなった結果、以下の結論を得た。

- (1)パルス波形を用いた加振テストによる検証では、振動の次数トラッキングデータを用いた OMA は、伝達関数を用いた EMA との比較において相似のモード形が得られ、EMA と同等のモード抽出精度がある。
- (2)実稼動時のチェーンカバーの振動を用いて検証した結果、次数トラッキングデータを用いた OMA は、従来からの方法である振動を平均処理する OMA 手法や、OMA の代用手法である実稼動時振動形状解析(ODS)と比べ、固有モードの直交性が高く、モード形の抽出精度が向上した。

本手法は、実際の運転条件で励起され問題となる固有モードのみを抽出できる。今後は、モード密度の高い高周波領域などで本手法を用いて解析効率の改善が期待できる。

参考文献

- (1)大塚雅也：ディーゼル燃焼騒音のエンジン構造での低減方法，自動車技術会学術講演会前刷集，No.36-05, p.7-10(2005)
- (2)銭場克己，高橋勝雄，坂口元康，山岸仁：エンジン部品振動解析への BBA 手法の適用，HONDA R&D Technical Review, Vol.11, No.2, p.135-142
- (3)Hermans, L., Auweraer, H. V., Abdelghani, M. : Modal testing and analysis of a car under operational conditions, 16th IMAC, p.1000-1006(1998)
- (4)日野順市，河本忠幸，芳村敏夫：部分空間法を用いたモード特性同定に関する研究(インパルス加振による振動試験)，日本機械学会Dynamics & Design Conference 2005 論文集，No.603(2005)
- (5)坂口元康：次数トラッキングデータを用いた実稼動モード解析，自動車技術会学術講演会前刷集，No.36-06, p.1-4(2006)
- (6)吉村卓也：モード相関係数，モード解析ハンドブック，コロナ社，p.128(2000)

■ 著 者 ■



坂口元康