

論文・解説

32

動弁系及びタイミングチェーンの機構運動解析 Multi-Body Dynamics Simulation of Valve Train and Timing Chain Drive

小泉 昌弘^{*1} 宮内 勇馬^{*2} 近藤 真希夫^{*3}
Masahiro Koizumi Yuma Miyauchi Makio Kondou

要 約

近年、多くの自動車用エンジンのカムシャフト駆動には、耐久性向上のためタイミングチェーンが採用されている。タイミングチェーンは、カムシャフトの駆動トルク、クランク軸角速度変動、オートテンションナの特性等の影響でチェーン張力が変動し、チェーンノイズの増大や、チェーン破損及びカムノーズ折損等の信頼性問題を引き起こすことがある。そこで、それらの問題を早期に予測可能な機構解析手法を開発したので、その計算モデルの概要と、予測精度の検証結果について報告する。

Summary

Recently timing chains have been used for camshafts in many car engines for durability purpose. The timing chain tension, however, may fluctuate due to driving torque of the camshaft, torsional vibration of the crankshaft, characteristics of an auto tensioner or the like, thus causing increased chain noise ; or breakage of the chain or a cam nose. To address these problems, a multi-body dynamics simulation model of the timing chain and valve train was developed. There was a good correlation between analytical results and experimental results. This model also shows that the chain tension might be excessively high due to camshaft driving torque, which is caused by camshaft resonance.

1. はじめに

低コストで高品質な商品を短時間で開発するためには、机上予測技術が極めて重要であり、タイミングチェーンシステムにおいても、開発初期に振動、騒音や信頼性問題を予測可能な机上予測技術が求められている。

そこでタイミングチェーン及び動弁機構を連成させた高精度機構解析手法を開発したので、その計算モデルの概要と、チェーン張力予測精度の検証結果について報告する。

2. 計算モデル

解析に用いたエンジンは、排気量2.3リットルの直列4気筒ガソリンエンジンである。動弁機構は、吸気、排気それぞれのカムシャフトがタペットを介してバルブを開閉する直打式動弁系であり、タイミングチェーンにより、それぞれのカムシャフトをクランク軸と同期して駆動している。また、チェーンの挙動はガイド及びレバーによって抑制さ

れており、レバーの揺動を規制する油圧式オートテンションナにより、チェーン張力を適正化している。

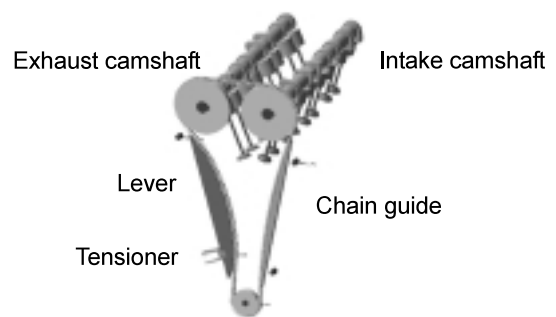


Fig.1 Timing Chain Multi Body Dynamic Model

2.1 動弁機構モデル化手法

動弁系の機構モデルは、Fig.1に示すように吸気側、排気側それぞれ、カムシャフト、タペット、バルブ、バルブスプリングで構成されている。以下に各部品のモデル化手法について説明する。

*1, 2 パワートレイン先行開発部
Powertrain Advance Development Dept.

*3 第3エンジン開発部
Engine Development Dept. No.3

(1) タペット, バルブ

質量, 慣性モーメントを持つ剛体要素で定義しており, その弾性変形の影響を考慮するため, 要素間に線形ばね及び減衰要素を定義した。

(2) バルブスプリング

サージングの影響を考慮可能とするため, ばね, 減衰要素を持つ5質点でモデル化している。

(3) カムシャフト

ねじり共振の影響を考慮可能とするため有限要素モデルとし, ねじり振動がカムシャフト単体加振実験結果と相関が高いことを確認の上モデル化している。このモデル図と加振実験結果との相関をFig.2に示す。また, 機構モデル Super-element法による動的縮退を行っている。

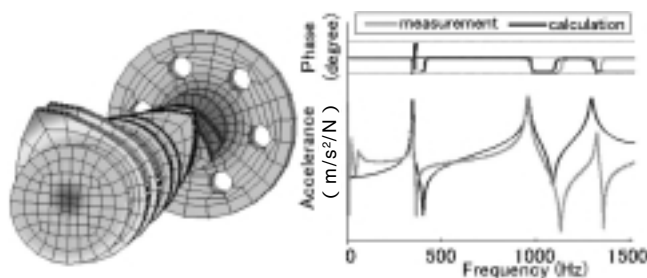


Fig.2 Camshaft FE Model and Torsional Resonance

2.2 タイミングチェーンモデル化手法

タイミングチェーン機構モデルはチェーンリンク, スプロケット, ガイド, レバー, 油圧式オートテンシヨナで構成されている。以下各モデル化手法について説明する。

(1) スプロケット, ガイド, レバー

吸気側, 排気側カム及びクランクの各スプロケット, ガイド及びレバーは, それぞれ質量, 慣性モーメントを持つ剛体要素として定義している。また, それぞれの部品はその形状を忠実に再現している。

(2) チェーンリンク

タイミングチェーンの進行方向及び直交方向の挙動を予測可能とするため, チェーンを構成する各リンクをそれぞれ質量, 慣性モーメントを有した剛体要素として定義している。また, 弾性伸びを考慮可能とするため, それぞれのリンク間にはばね及び減衰要素を定義した。

(3) 油圧式オートテンシヨナ

油圧式オートテンシヨナはハウジング, プランジャ及びチェックボールにより構成されている。油圧式オートテンシヨナはレバーからの荷重をプランジャスプリングとテンシヨナ内油圧によって受ける機構であるため, チェックボール挙動に伴うオイルの出入り及び, プランジャとハウジング間のオイルリークを考慮して, テンシヨナ内油圧変動を計算可能なモデルとした。式①にテンシヨナ内油圧変動の計算式を示す。

$$\frac{dP}{dt} = -\frac{\beta}{V} \left(\frac{dV}{dt} - Q_m + Q_{out} \right) \quad \text{①}$$

P : テンシヨナ内圧力

: 体積弾性係数

V : 高圧室体積

Q_m : 流入流量

Q_{out} : 流出流量

(4) 接触定義

カムとタペット間, リンクと各スプロケット, ガイド, レバー間にはFig.3に示す非線形ばね, 減衰要素による接触定義を行った。また, 各接触部位での接触荷重からクーロン摩擦力の算出も同時に行っている。

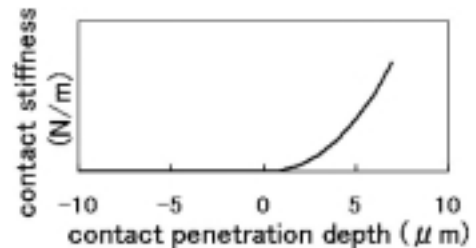


Fig.3 Non-linear Contact Stiffness

(5) クランク軸入力

機構モデルの入力は, クランク軸に角速度変動を伴う強制回転変位を与えている。

3. 各構成部品計算モデルの妥当性検証

計算モデルの妥当性を検証するため, カム荷重, カムシャフト駆動トルクについて実機計測結果との比較を行った。以下の検証結果から, いずれも高い相関が得られたため計算モデルは妥当であると考えられる。

3.1 カム荷重計算結果の検証

チェーン張力変動の要因として考えられるカムシャフト駆動トルクを正しく予測するため, カムシャフトの加振力であるカム荷重の実測データとの比較を行った。その結果をFig.4に示す。上段は3,000rpm, 下段は6,800rpmである

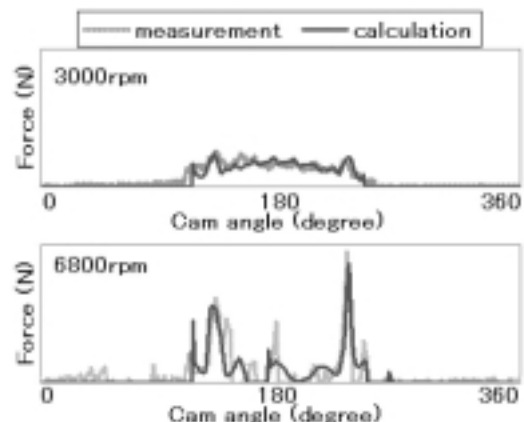


Fig.4 Cam Force (Exhaust Cam)

が、エンジン回転数の上昇に伴う動弁系慣性力増大の傾向と高い相関が見られる。

3.2 カムシャフト駆動トルク計算結果の検証

Fig.5にカムシャフトの駆動トルクの計算波形と実機計測波形との比較を示す。各回転ともに実測波形と高い相関が見られる。

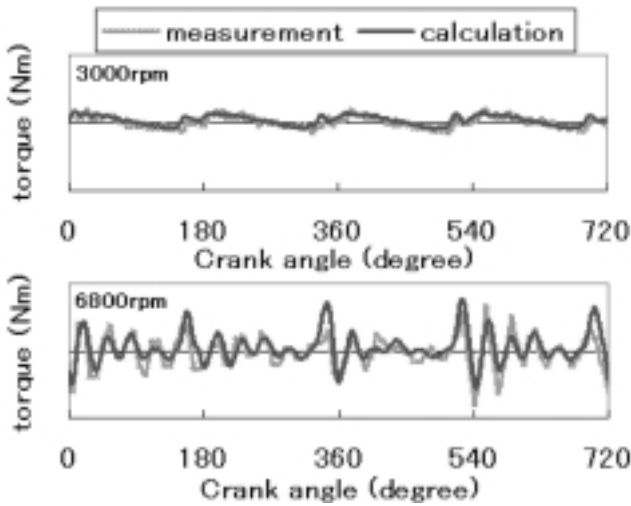


Fig.5 Camshaft Driving Torque (Exhaust Camshaft)

4. チェーン及びカムシャフトの強度評価手法

4.1 チェーン動的張力の評価手法

チェーン破損及びカムノーズ折損等の信頼性問題の一要因はチェーンの動的発生張力が過大となることである。ここでは、破損の問題を評価する代用特性としてチェーン張力を採用した。チェーン破損については動的発生張力の振幅と平均値から安全率を導き、カムシャフトノーズねじりについてはTension-sideとSlack-sideの動的張力の差とカム加振力からねじりトルクを算出して安全率評価を実施した。この評価概念をFig.6に示す。またFig.7にエンジン負

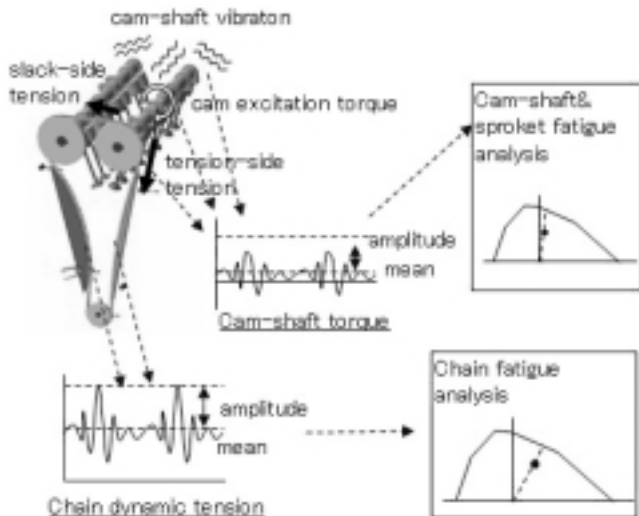


Fig.6 Fatigue Analysis Flow

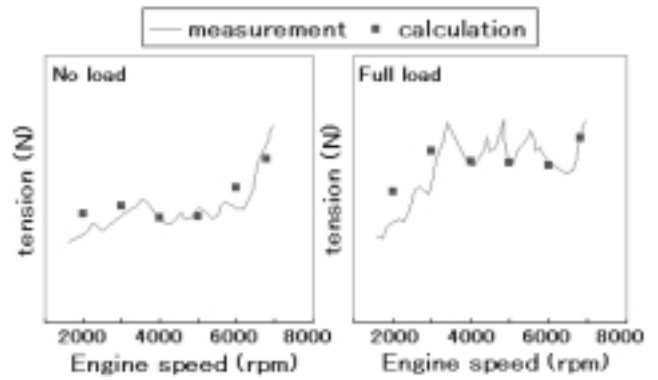


Fig.7 Chain Tension

荷が無負荷、全負荷時のチェーン張力の計算結果と、実機計測結果との比較を示す。各エンジン回転数とともに高い相関が得られ、チェーンやカムノーズの強度を評価するためのチェーン張力の評価が可能であることが確認できた。

4.2 チェーン張力変動増大メカニズムの分析

チェーン張力変動の一要因であるカムシャフト駆動トルク変動は、Fig.8に示す起振力の流れによって発生する。タペット中心から外れた位置Lでカムと接触することによりカムねじり加振力 F_c が発生する。また同時に、カムリフトYの位置で、カム-タペット間の摩擦力によりカムねじり加振力 F_f が発生する。これらの加振力がカムシャフトねじり共振を経由することにより、カムシャフト駆動トルク T が増大する。更に、カムシャフト駆動トルクはFig.9に示すようにエンジン高回転側において増大する傾向にある。これはFig.10に示すように、エンジン高回転時には、動弁系慣性力の増加によって増幅されたカムシャフト加振トルクの高次成分がカムシャフトの共振を励起するためである。これはFig.11に示す実機測定カムシャフト駆動トルクを周波数分析したキャンベル線図からも確認できる。

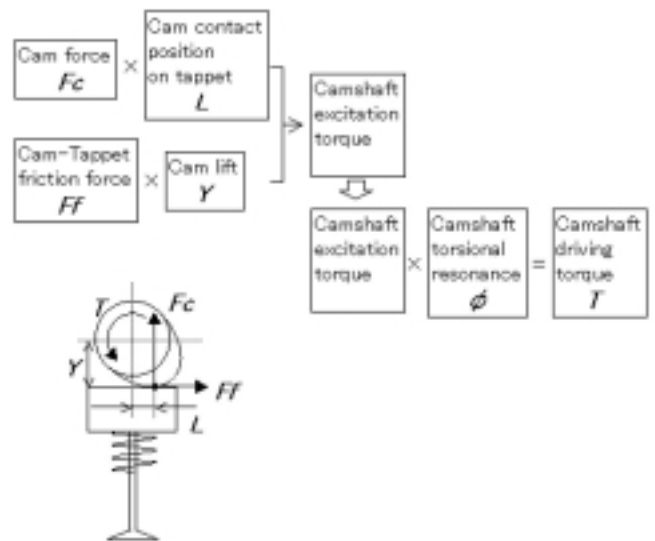


Fig.8 Camshaft Driving Torque Mechanism

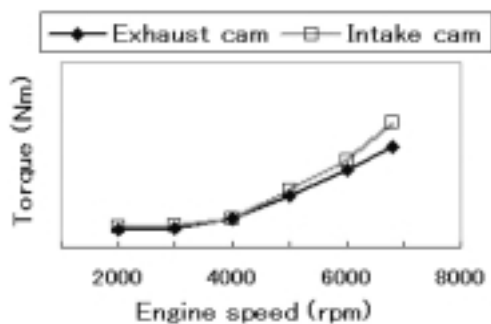


Fig.9 Camshaft Driving Torque Amplitude

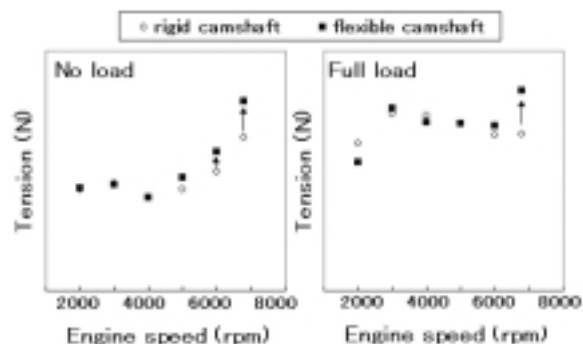


Fig.12 Chain Tension w/rigid Shaft and w/flexible Shaft

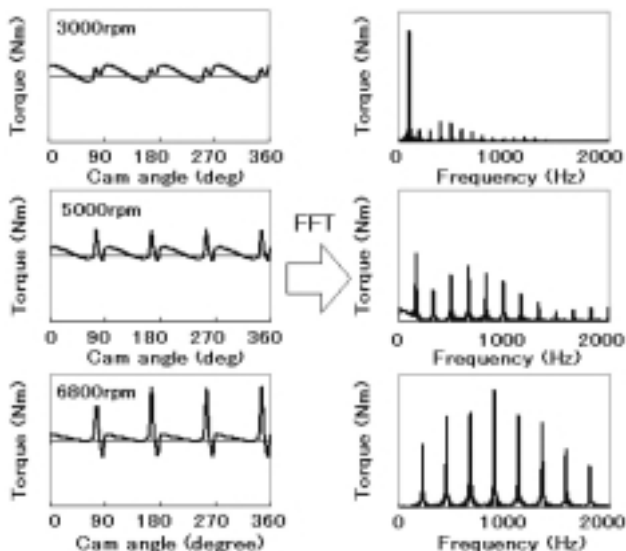


Fig.10 Camshaft Excitation Torque (Exhaust Cam)

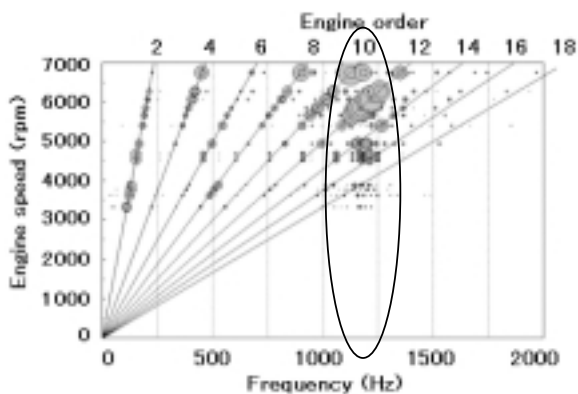


Fig.11 Camshaft Driving Torque FFT (Exhaust Camshaft)

カムシャフトの共振がチェーン張力に与える影響を確認するため、カムシャフトに剛体及び弾性体モデルをそれぞれ用いた際のチェーン張力の比較を行った。比較結果をFig.12に示す。無負荷、全負荷ともにエンジン低回転側では張力に差がないが、高回転域においては弾性体カムシャフトモデルの方が、チェーン張力が增大していることが分かる。このように、カムシャフトの共振によるカムシャフト駆動トルク増加によって、チェーン張力が增大することが分かった。

以上の結果から、本解析手法がチェーンとカムノーズの強度評価および現象分析に有効であることが検証できた。

5. まとめ

タイミングチェーンと動弁系機構を連成させた機構解析モデルを開発し、チェーン張力において、本解析モデルと実機計測との相関取りを実施した。この結果から、チェーンやカムノーズの強度を評価するために十分な予測精度を有していることを確認した。更に、本解析手法によってチェーン張力増大のメカニズムを分析した結果、カム荷重を加振トルクとするカムシャフト共振が一要因であることが分かった。

今後、本解析手法を用いて、お客様に喜ばれる低コストで高品質な商品開発に貢献していく所存である。

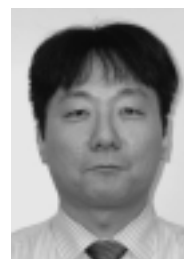
参考文献

- (1) Yeongching Lin et al. : The dynamic Analysis of an Automotive Timing Chain System, European ADAMS User Conference (1996)
- (2) C.Weber et al. : Experimental Investigation Into the Dynamic Engine Timing Chain Behaviour, SAE Paper, No.980840 (1998)
- (3) 鈴木恭ほか : タイミングチェーンシステムの動的解析技術の開発, 自動車技術会学術講演会前刷集No.64-00 P17-20 (2000)
- (4) Martin Sopouch et al. : Simulation of Engine's Structure Borne Noise Excitaion Due to the Timing Chain Drive, SAE Paper, No.2002-01-0451 (2002)

著者



小泉昌弘



宮内勇馬



近藤真希夫