

単気筒エンジンにおけるカム駆動機構の動的挙動 シミュレーション技術の研究

Research in Technology for Simulating Dynamic Behavior of Cam Drive Mechanism in
Single-Cylinder Engines

壇 恵 一*
Keiichi DAN
川 上 拓 郎*
Takuro KAWAKAMI

新 納 忠*
Tadashi NIINO
菅 野 牧 子*
Makiko SUGANO

神 谷 満 好*
Mitsuyoshi KAMIYA
小 沼 隆 之*
Takayuki KONUMA

要 旨

単気筒エンジンにおけるカムチェーン駆動損失とアイドル回転域のカムチェーン打音の机上評価技術を確立した。従来、カムチェーンの打音・駆動損失を机上評価した例はほとんど無く、カムチェーンの打音や駆動損失を満足させるテンショナリフタやテンショナガイドの仕様は、実機テストにて決定されていた。本研究において開発したシミュレーションモデルに与えたカムチェーンやテンショナガイドの静特性・動特性・カムチェーンとカムスプロケットのかみ合い剛性や摩擦係数等は、各々、実機単体テストにより取得した。その結果、カムチェーン打音の発生荷重とカムチェーンシステムの駆動損失が実機データと絶対値レベルで高い相関性を持つことが確認された。本研究により、低燃費と静粛性のエンジン性能を高い次元で両立するカムチェーンシステムを設計初期段階で検討することが可能となった。

ABSTRACT

A technology has been established for theoretical evaluation of timing chain systems, including drive loss and slapping noise at idling engine speed, in single-cylinder engines. To date, almost no theoretical evaluation reports have been published about drive loss and slapping noise in cam drive systems including timing chains. The specifications for tensioner lifters and tensioner guides that satisfy slapping noise and friction loss requirements have therefore been determined only through tests with actual engines. The highly accurate mechanism simulation model developed in this research is populated with data obtained through bench tests with actual engines. This includes the static and dynamic characteristics of the cam chain and tensioner guide as well as the cam sprocket and cam chain contact stiffness and friction coefficient. The results have confirmed a high correlation at the absolute value level between the simulation values and the actual engine test values for the load generated when cam chain slapping noise occurs as well as drive loss in the cam chain system. This research enables examination at the initial design stage of cam chain systems intended to achieve a high-level balance of enhanced fuel efficiency and low noise in engine performance.

1. まえがき

小型二輪車において、単気筒エンジン搭載車が主流となっており、燃費向上のためカム駆動系の駆動損失の低減が求められている。カム駆動系のレイアウトを適切におこなうことによりエンジンの燃費低減を図ることができる。また、小型二輪車では、カム駆動にはコンパクト性・高張力駆動耐久性からカムチェーンシステムが使用されており、カムチェーンとカムスプロケット間のかみ合い時に発生する音の低減が求められている。このため、カム駆動系の駆動損失とカムチェーンかみ合い時の発生ノイズの定量化を可能とする数値解析システム開発が求められている。近年、数

値解析においては3次元モデルを用いた機構解析が用いられてきている。カム駆動系の機構解析をおこなうには、動弁系のカムトルク、カムチェーンの挙動、テンショナガイドの挙動を同時に求める必要があるため、複雑で大規模な解析システムを構築する必要があり、実用化が困難であった。また、カムチェーンのモデル化は、構成要素の多さとカムスプロケットとの接触の数値化という課題がある。一方、数値計算領域においては、リカーシブル法等の解析アルゴリズムの進化により、多自由度な質点系モデルの解析時間が短縮化され設計パラメータの検討用ツールとして実用的なものとなってきている。これらを背景として、今回、カムチェーンおよびカム駆動系の挙動、動弁系挙動を総合的にシミュ

*二輪R&Dセンター

レーションするシステムを開発し応用性の研究をおこなった⁽¹⁾。本稿においては開発システムの概要、カムチェーン関連部品のモデル化手法および、カム駆動系の駆動損失およびアイドル回転域でのカムスプロケットとカムチェーン間のかみ合い時挙動のシミュレーションによる予測評価について述べる。

2. システム開発の全体構成

開発の対象とする動弁系機構は、小型二輪車で多く採用されている燃焼室上部にカムシャフトを一つ持つ SOHC とした。Fig. 1 に開発したシステムの概要を示す。カムトルクは、高回転域でバルブ系の加速度による慣性力が增大するため、エンジン回転速度毎に変化する。よって、エンジン常用回転速度域のすべてのカムトルクを考慮できるように、カム、バルブ、バルブスプリング、ロッカアームをモデル化した。また、カムチェーン挙動に影響を及ぼす、テンショナガイド、チェーンガイド、テンショナリフトをモデル化している(以下、カムチェーン系モデルという)。これらの各構成要素をニュートン・ラフソン法による時間領域での数値積分計算を用いることにより、実機エンジンの運転状態を再現した。

3. カムチェーン系モデル化手法とモデル特性値の検証

3.1. カムチェーン系のモデルにおける課題

クランクシャフトの運動をカムシャフトへ伝えるカムチェーンは、多数のリンク要素から構成されており、チェーン全体の剛性・減衰は、チェーンリンク間の摩擦・接触剛性等により非線形特性を有している。またカムチェーンと他部品との接触・摩擦状態を数値化するために数値モデルの特性値を取得する必要がある。このため、チェーン系をモデル化する手法を検討した。

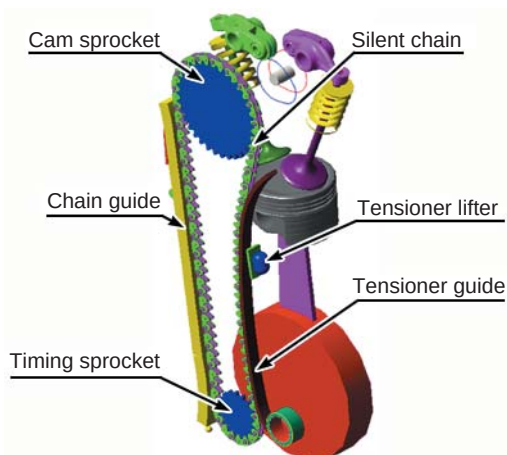


Fig. 1 Overview of developed system

3.2. カムチェーン

カムスプロケットへのかみ込みやテンショナガイドとチェーンの接触を精度良くモデル化をおこなうため、個々のチェーンリンクを形状の無い質点系に簡易化せずに実形状をモデルに反映した。本システムでは Fig. 2 に示すように多自由度モデルとしており、各チェーンリンクに質量・慣性モーメントを持たせ、チェーンリンク間を非線形バネで表現した。チェーンリンク間の剛性値は、アムスラー試験機にてカムチェーンの引っ張り試験をおこない、荷重-変位より相関性を確認した。さらに、カムチェーンの共振周波数に代表される動特性の精度を検証するため Fig. 3 に示す計測治具を用いて、予張力と加振加速度毎に電磁加振機にて加振をおこない、Fig. 3 に示す A 部の振幅量を計測した。実測値と計算値の結果を Fig. 4(a), Fig. 4(b) に示す。

また、Table 1 に実測値と計算の FFT 結果を示す。共振周波数及び共振時の振幅値は、良い相関性を示すことが確認された。

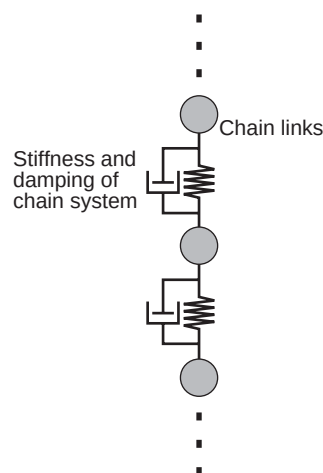


Fig. 2 Multi-degree-of-freedom model of chain links

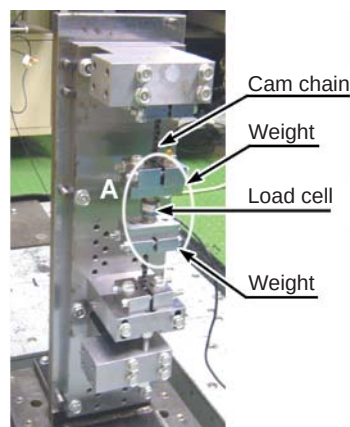


Fig. 3 Measuring tool for chain link dynamic characteristics

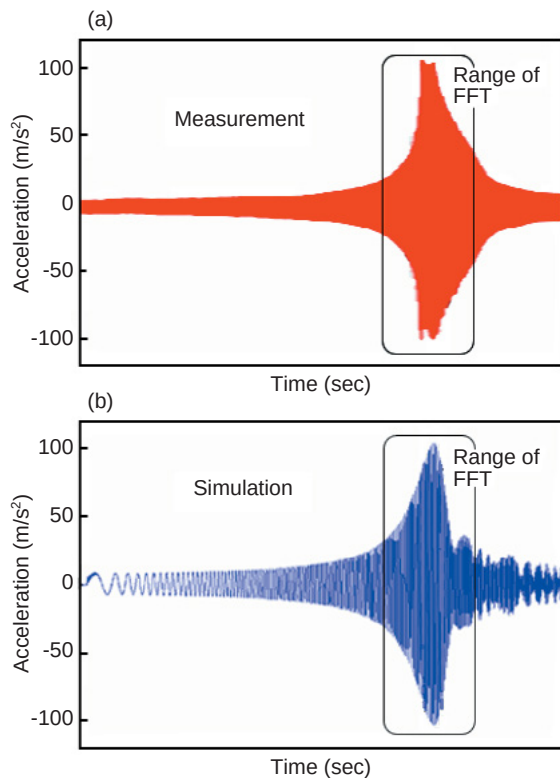


Fig. 4 Measurement and simulation results for the dynamic characteristics of chain links

3.3. チェーンガイド

チェーンガイドのモデルを Fig. 5 に示す。チェーンガイドの形状は、チェーンガイドを 20 分割した beam 要素にて特性を表現した。単位荷重下における数値計算上の各部の曲げ変位量を実測値に合わせることで beam 要素の剛性特性値を同定した。

Table 1 FFT results of measurement and simulation

	Measurement	Simulation
Resonance frequency (Hz)	424.1	430.0
Amplitude (m/s ²)	31.7	31.9

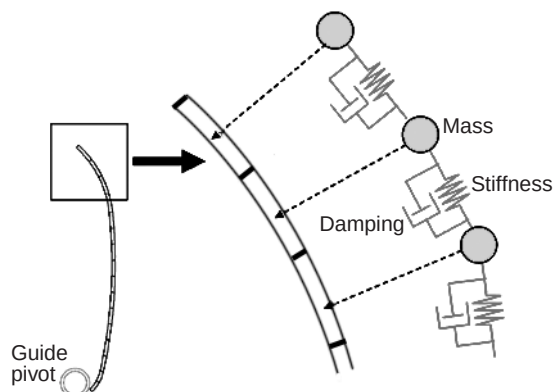


Fig. 5 Model of chain guide

3.4. カムsprocket

カムsprocketとカムチェーンのモデルを Fig. 6 に示す。カムsprocketへのかみ込みを表現するため、カムチェーンとのかみ合い部分には、接触剛性・接触減衰・摩擦を考慮したモデルとしている。このかみ込み部の特性を把握するために、Fig. 7 に示す振り子テストをおこない、系の持つ総エネルギーの時間変化を求め、実測と計算の相関性検証をおこなった。Fig. 8 に示すように、総エネルギーが時間とともに低減していくが、この低減率を計算結果は良く表していることが確認された。

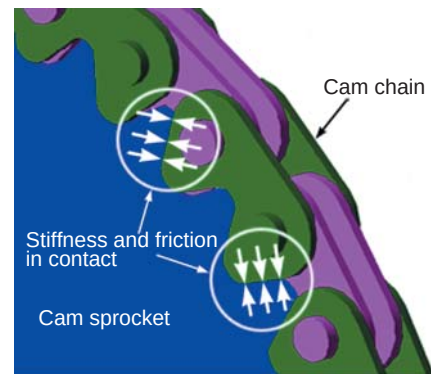


Fig. 6 Model of cam sprocket and cam chain

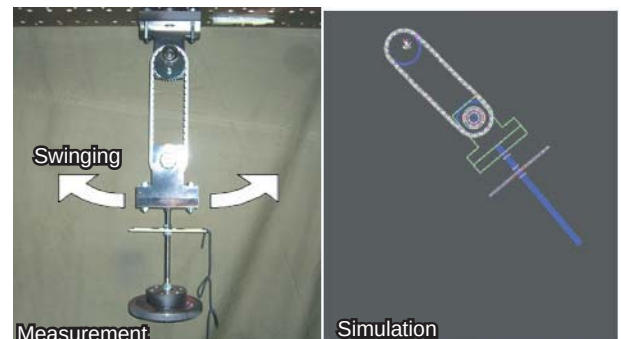


Fig. 7 Pendulum test for measurement of mesh area contact stiffness and friction

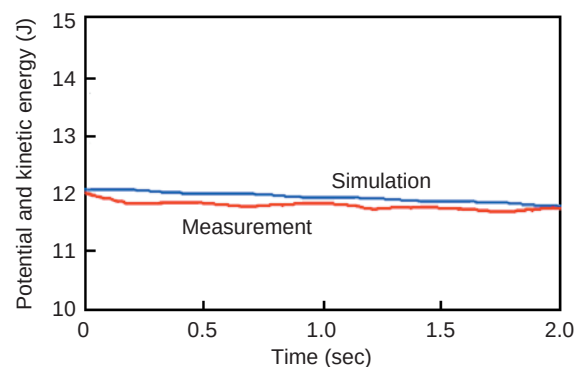


Fig. 8 Comparison of simulation result and measurement result of potential and kinetic energy

4. カムチェーン系モデルの実機運転状態との 相関検証

開発したカムチェーン系モデルが実機エンジン運転状態を精度良く表しているのかを検証するため、カム駆動トルクとリフタへの発生荷重に関して、シミュレーション計算値と実測値との比較検証をおこなった。実機エンジンは Fig. 9 に示す単気筒 150 cm³ エンジンを使用した。実機計測は 1400 r/min から 9000 r/min までおこなった。Fig. 10 にカム駆動トルクの 1 サイクルでの最大値の比較、Fig. 11 にリフタへの発生荷重の比較結果を示す。どちらも、6000 r/min 以降の速度域ではやや差異は見られるが、1400~6000 r/min 域では良い相関性が見られる。これらの結果から、開発したモデルは実機運転状態を良く再現しているといえる。

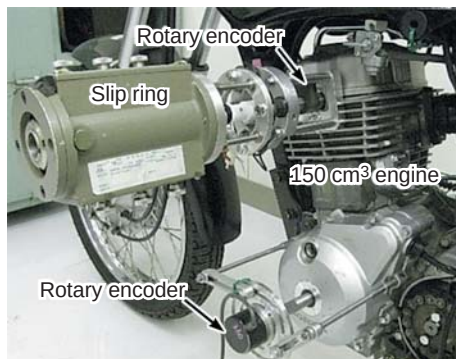


Fig. 9 Test engine and measurement system

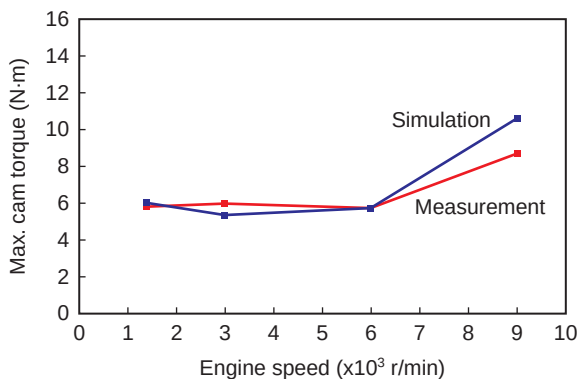


Fig. 10 Comparison of simulation result and measurement result of maximum values for timing sprocket drive torque

5. 開発システムの応用研究

5.1. カムチェーン駆動損失の予測検討

カムチェーン駆動損失の計算手法について示す。開発システムでは、クランクスプロケット駆動トルクとカム駆動トルクが計算される。これらの計算値を用いて、カムチェーンの駆動損失を計算する手法について検討した。ク

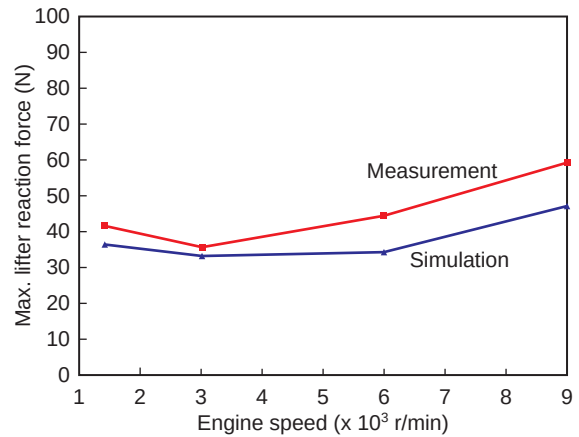


Fig. 11 Comparison of simulation result and measurement result for lifter reaction force

ランクスプロケット平均駆動トルクを T_f 、カム平均駆動トルクを T_c 、とした場合のカムチェーン平均駆動トルク FT は、式(1)で定義される。

$$FT = T_f - T_c \quad (1)$$

$$P_{slc} = FT \cdot N \cdot \frac{2\pi}{60} \quad (2)$$

FT : カムチェーン平均駆動トルク (Nm)

T_f : クランクスプロケット平均駆動トルク (Nm)

T_c : カム平均駆動トルク (Nm)

P_{slc} : カムチェーン駆動損失馬力 (kW)

N : エンジン回転数 (r/min)

これを基に2章で示したエンジンにおけるカムチェーン駆動損失の比較をおこなった。Fig. 12 に結果を示す。6000~7000 r/min において計算では変動が見られるものの、良い相関性を示している。

5.2. カムスプロケットとカムチェーンのかみ合い挙動と打音

アイドリング時に、カムチェーン室から鳴る音は、違和感を受ける音であり商品性を阻害するものである。この音の発生のタイミングを把握するため、発音部近傍に生ずる加速度を加速度センサにて計測した⁽²⁾。その測定値を Fig. 13 に示す。打音は、加速度の急激な振幅の増大から排気上死点のタイミングにて発生していることがわかった。さらにこの現象を調べるためにカムチェーンがカムスプロケットへ着座する場所へ着座荷重を減衰させるモリスダンパを付けて計測したところ、打音が消えた。以上のことから、排気上死点時に、カムスプロケットとチェーンの接触により打音が発生していることを発見した。次に、この打音を机上評価するため、打音の発生要因となるカム

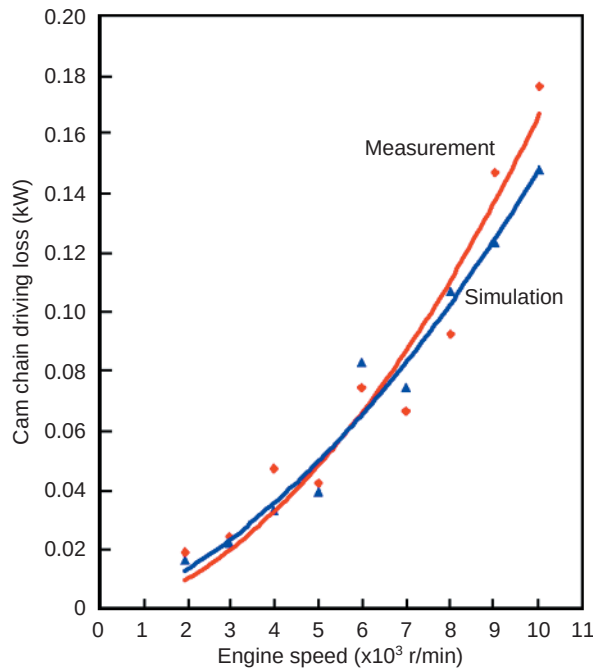


Fig. 12 Cam chain driving loss

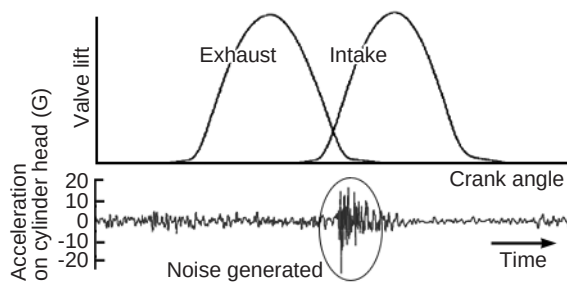


Fig. 13 Variation of acceleration on cylinder head

チェーンがカムスプロケットへ衝突する力の測定を試み、シミュレーション計算値との比較をおこなった。実機試験は Fig. 9 で示したエンジンを用いた。発音起振力を計測する治具を Fig. 14 に示す。カムスプロケット平面の荷重 X・Y 成分とカムトルクの測定がおこなえる 3 分力計を製作し、計測をおこなった。Fig. 15 に 1400 r/min 運転時の計算結果と実機の計測結果の比較を示す。最大荷重の振幅量、発生タイミングとも良い相関があり打音発音起振力のシミュレーションによる予測評価が可能となった。

5.3. カムチェーンレイアウトの評価

カム駆動系の設計パラメータは、主としてチェーンガイドの形状、剛性、および支点位置、テンショナリフタの取り付け角、位置などである。これらのパラメータはエンジン全体のレイアウトに影響するものであり、低燃費と静粛性を高い次元で両立するためには、これらの設計パラメータを、設計初期段階で検討する必要がある。そのパラメータスタ

ディーとして当シミュレーションを用い、設計パラメータを変えた場合の打音の変化について確認した。Fig. 16 に、1400 r/min 時のチェーンガイドの剛性違いによるカムチェーン打音発音起振力のシミュレーション評価の結果を示す。このエンジンの場合、チェーンガイドの剛性を上げると、1400 r/min 時のカムチェーン打音の主因である発音起振力が下がり、より静粛性を保てることがわかった。

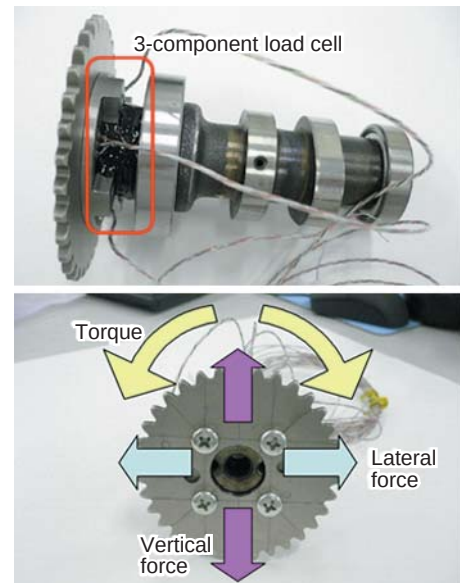


Fig. 14 3-component load cell for measuring excitation force

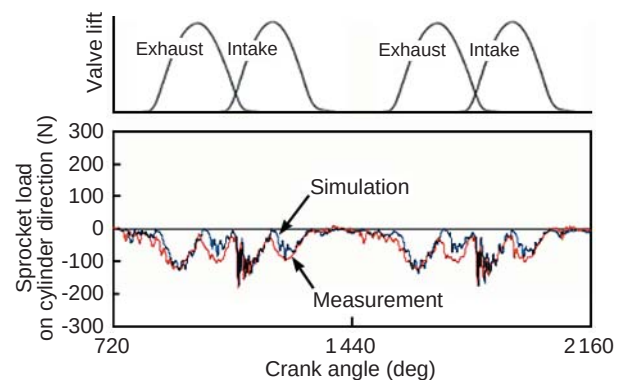


Fig. 15 Comparison of calculation result and actual engine measurement result for sprocket load on cylinder direction at 1400 r/min

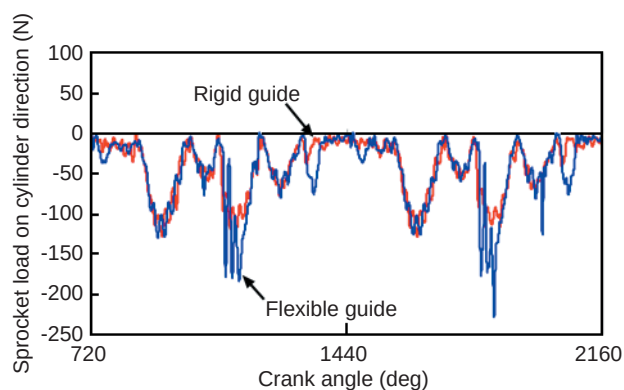


Fig. 16 Comparison of rigid guide and flexible guide result for sprocket load on cylinder direction at 1400 r/min

6. まとめ

- (1)カム駆動系・往復部・動弁系まで連成計算するシステムを開発することによりカム駆動系の挙動を精度よく計算することができた。
- (2)カムスプロケットとカムチェーン間のかみ合い時の打音現象を明らかにし、アイドル回転域でのカムチェーン打音のシミュレーションによる予測評価ができる手法を見出した。
- (3)クランクスプロケット駆動トルクとカム駆動トルクからカムチェーン駆動損失を計算することが可能となった。

参考文献

- (1) Takagishi, H., Nagakubo, A.: Multi-body Dynamic Chain System Simulation Using a Blade Tensioner, SAE Paper, 2006-32-0067(2006)
- (2) 小林利彰, 嶽和秀, 神谷満好, 高橋幸敬: 3次元ピストン挙動シミュレーションによるピストン打音予測, Honda R&D Technical Review, Vol.19, No.1, p.156-162

■著 者■



壇 恵一



新納 忠



神谷 満好



川上 拓郎



菅野 牧子



小沼 隆之