

タイミングチェーン荷重予測手法の確立

Prediction of Chain Load in Timing Chain System

高 岸 広*
Hiroshi TAKAGISHI

菅 原 一 志*
Hitoshi SUGAWARA

要 旨

可変バルブリフトタイミング機構および連続可変バルブタイミング機構下でのタイミングチェーン耐久性検討を目的としたチェーン荷重予測手法を確立した。リリーフバルブ付テンショナ及び動弁系のモデル化により、異なるリリーフ圧およびバルブタイミングでのチェーン荷重予測を可能とした。更に、従来不可能であった高回転域でのチェーン荷重の直接測定を可能とするテレメータ手法も開発し、シミュレーションの妥当性を実機で検証した。これらにより、異なるリリーフ圧、バルブタイミング下で高回転域までチェーン荷重の予測が可能となった。

ABSTRACT

A chain load prediction technique was established to investigate timing chain durability under conditions of a variable valve lift timing mechanism and a continuous variable valve timing mechanism. Modeling a tensioner with a relief valve and the valve train made it possible to predict the chain load at different relief pressures and valve timings. Furthermore, telemeter techniques were also developed enabling direct measurement of the chain load at high engine speeds, which was formerly impossible, and the validity of the simulation was verified using an actual engine. These developments made it possible to predict the chain load up to high engine speeds at different relief pressures and valve timings.

1. はじめに

耐久性向上および小型化のため、エンジンのカム駆動にチェーンを使用するケースが近年増加している。このため、設計段階よりタイミングチェーンに発生する荷重を予測する必要性が生じている。そこでタイミングチェーン荷重の予測手法が10年ほど前より各社で盛んに行われているが、カムおよびチェーンをマス・バネ系と考えた簡易モデルに動弁系駆動トルクを加えて計算する簡易解析^{(1)~(3)}から、チェーンの各リンクプレートを質点に置き換えて計算を行う大規模解析^{(4)~(6)}まで幅広く報告されている。しかし簡易解析では開発上もっとも重要な油圧テンショナの影響を充分考慮できていない。また、大規模解析では膨大な計算時間によりタイムリーな解析を行えない等の問題があった。そのため本稿では、設計段階より短時間に精度よくチェーン荷重を予測できるシミュレーション技術を開発したので、その内容を報告する。

*栃木研究所

2. 着目点と課題

タイミングチェーンシステムの挙動を支配しているのは、カムとスプロケット等のイナーシャと、チェーンと油圧テンショナからなるスプリング及び各部減衰である。特に油圧テンショナは、リリーフバルブを内蔵する油圧機構であり、チェーン荷重に多大な影響を及ぼしている。

またガソリンエンジンの場合、チェーンシステム系を加振するのは動弁系の駆動トルクが支配的である。特に動弁系部品がチェーン駆動トルクに及ぼす影響は大きい。

このことより、以下の点に着目し、シミュレーション手法を構築した。

着目点1：リリーフバルブ付テンショナ特性のモデル化

課題：リリーフバルブ流路抵抗によるテンショナ周波数依存性挙動の精度保証

着目点2：チェーンの主加振力である動弁系を含んだモデル化

課題：動弁系仕様違いによるチェーン荷重変化の精度保証

3. リリーフバルブ付テンショナ特性のモデル化

3.1. シミュレーションモデル

今回用いたテンショナを Fig. 1 に示す。テンショナのプランジャに加わった力はメインスプリングと高圧室に吸入されたオイルで保持される。この時入力荷重が高いと、リリーフバルブおよびプランジャとハウジング間からのオイルの漏れで荷重の低減を図っている。

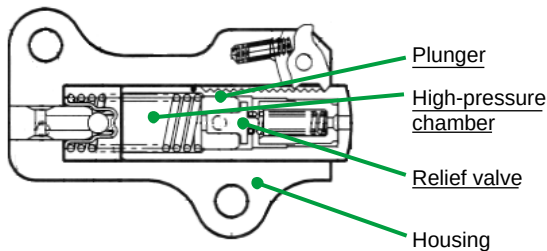


Fig. 1 Chain tensioner cross section

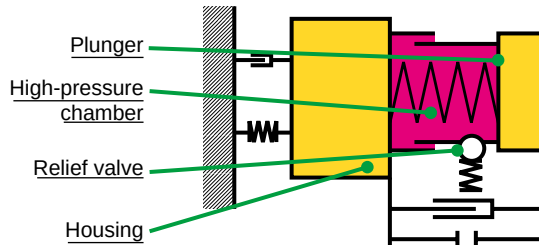


Fig. 2 Tensioner simulation model

このテンショナをプランジャ、スプリング、高圧室オイルとハウジングの連成振動モデルに置き換える。Fig. 2はそのモデルを現す。ピストンとハウジングの間にメインスプリングと高圧室モデルを配置し、空気の混入によるオイルの圧力依存非線形剛性も考慮している。また、オイル吸入用のチェックバルブが高圧室モデルに組み込まれている。オ

イルの排出は、ピストンとハウジングの隙間より洩れる分に加え、リリーフバルブによる排出もモデル化した。この時、排出時のオイルの粘性抵抗による圧力損失を考慮し、リリーフバルブを通過するオイルの流量は以下の式を用いて近似した。

$$Q = \pi \cdot d \cdot l \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot P_h}{\rho \cdot (1 + \xi)}}$$

Q : 流量

d : バルブシート直径

l : バルブリフト

P_h : 高圧室油圧

ξ : 損失係数

ρ : オイル密度

3.2. 検証テスト

テンショナ単体の動的特性を把握するため、油圧加振機での単体加振テストを行った。テスト装置の概略を Fig. 3 に示す。プランジャ上にテンショナを固定し荷重検出機にプランジャを押し当て加振を行う。加振にあたって、テンショナには外部ポンプより作動油を供給する。測定は 6 000rpm のクランク 2 次共振までを想定し 30Hz 100Hz 200Hz の 3 段階で行った。加振は変位制御で、両振幅 0.4mm

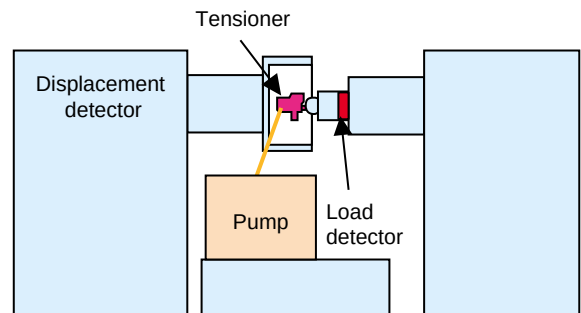


Fig. 3 Hydraulic excitation test apparatus

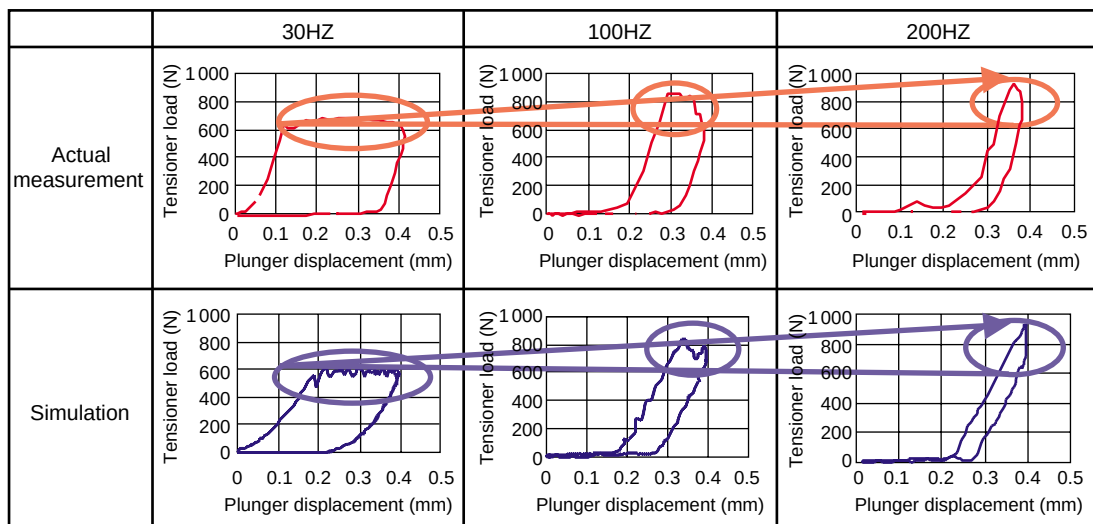


Fig. 4 Result of tensioner discrete excitation

の正弦波で行う。この時発生する荷重とテンショナの変位から、リサージュ波形を作成しテンショナ単体シミュレーションの妥当性検証をおこなった。

3.3. 検証結果

結果を Fig. 4 に示す。30, 100, 200 Hz とも、精度よく荷重と変位を再現できている。特に、高周波時のヒステリシスの減少や、荷重増加を正確に再現できている。このように、テンショナ単体で実用上十分な精度でのシミュレーションを達成できた。

4. チェーンの主加振力である動弁系を含んだモデル化

4.1. シミュレーションモデル

Fig. 5 に示すエンジンでチェーン荷重シミュレーションの妥当性検証をおこなった。これは可変バルブタイミングリフト機構と連続可変バルブタイミング機構を組み合わせ省燃費、高出力、排気ガスレベルの低減を図ったエンジンである。

シミュレーションにあたり、実動時のタイミングチェーン荷重を予測するため、動弁系を含むチェーンシステムの

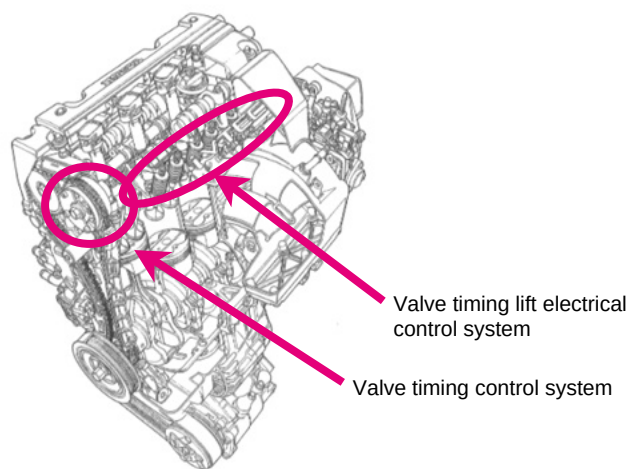


Fig. 5 Engine used for validation

計算モデルを作成した。動弁系の各部品を質点に分割し、剛性と減衰で連結するマルチボデーシステムアプローチを採用した。計算は2次の予測子修正法⁽⁷⁾を用い、定常回転状態での計算を 200rpm 間隔で行っている。

Fig. 6 にその全モデルを示す。バルブ、ロッカーアーム、カムシャフトの動弁系モデルをチェーンモデルが駆動している。また、3.1.で述べたリリーフバルブ付テンショナモデルでチェーンモデルの張力は保持されている。

以下にモデル各部の詳細を述べる。

Fig. 7 に実際の可変バルブタイミングリフト機構動弁系を、Fig. 8 にそのモデルを示す。モデル化にあたって、チェーン負荷の大きな高速用カム使用時に着目した。高速時には3つのロッカーアームはピンを介して連結されている。そこでシミュレーションでも同様に、中央の高速用ロッカーアームが左右のロッカーアームを駆動する様モデル化をおこなった。

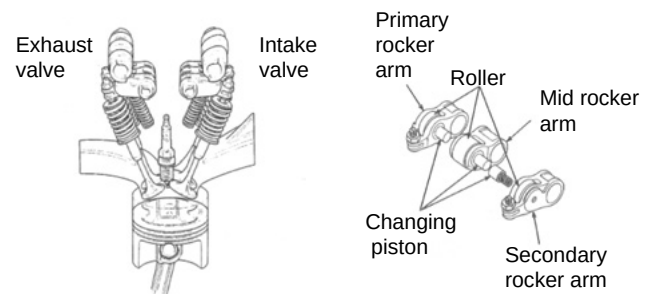


Fig. 7 Valve train

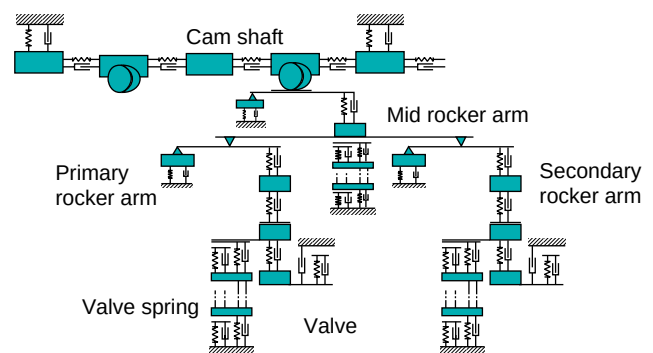


Fig. 8 Valve train simulation model

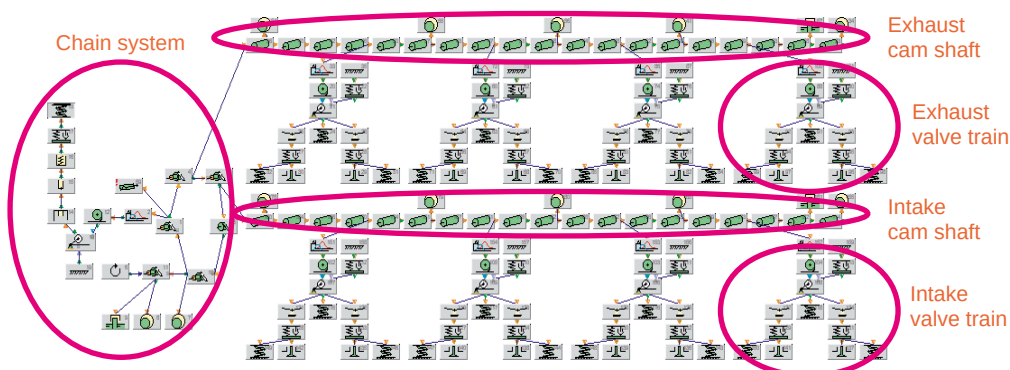


Fig. 6 Overall simulation model for timing chain load

Fig. 9 に実際の連続可変バルブタイミング機構の構造を示す。この機構はベーンタイプのアクチュエータで、4つのチャンバに充填されたオイルを介して動力を伝えている。そのため鉄系部品に対して剛性が低めとなる。

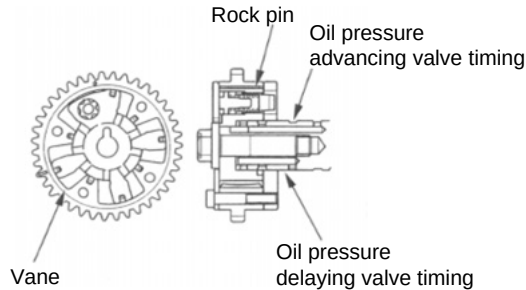


Fig. 9 Valve timing control actuator

そこで以下の式で剛性を推定しモデル化している。

$$C = 4 * K * \frac{A^2}{V} * r^2$$

C: 剛性

K: オイルの体積弾性係数(オイルの空気含有率が10%)

A: 受圧面積

V: 1チャンバーのオイル体積

r: 有効半径

Fig. 10に実際のチェーンの取り回しを示す。チェーンは6.35mm ピッチのサイレントチェーンを使用し、インテーク、エキゾーストの両方のスプロケットを1本のチェーンで同時に駆動している。

インテークカムクランク間の張り側およびインテークとエキゾーストのカム間にチェーンの横ゆれ防止のガイドがある。エキゾーストカムとクランク間の緩み側ではテンショナがアームを介してチェーン荷重を保持している。

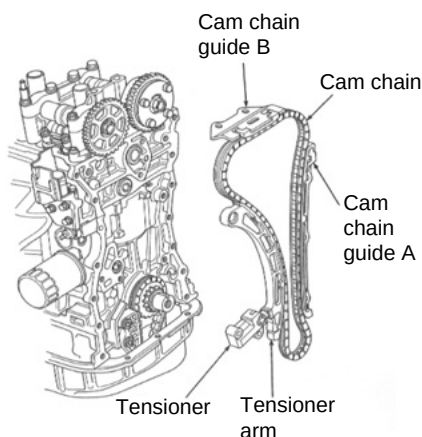


Fig. 10 Timing chain system

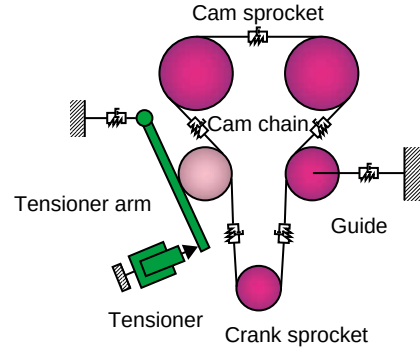


Fig. 11 Timing chain simulation model

タイミングチェーンの場合、このようにガイドおよびテンショナでチェーン進行方向と垂直に保持されている。このため正常な運転が行われている場合、テンショナブランジャ部の変位は 0.1 ~ 0.2mm 程度であり、チェーンの横振動もほとんど無いと考えて良い。そこでモデルはチェーン張力の主方向である縦振動方向1次元モデルで作成した。

Fig. 11 にチェーンモデルを示す。各部のイナーシャをチェーンの剛性および減衰で連結し、エキゾーストカム、クランク間には、実機と同じくアームとテンショナを設けている。チェーン荷重はこのアーム経由でテンショナが保持するようモデル化してある。

4.2. チェーン荷重シミュレーションの妥当性検証テスト
検証は開発途上のエンジンを用い、ファイヤリングでの測定結果と比較を行った。

4.2.1. トルク測定による検証

まず、比較的簡便なトルク測定によりチェーン荷重シミュレーションの妥当性を検証した。

クランクスプロケットに設けた薄肉円管部にひずみゲージを貼り、チェーン駆動トルクを測定した。シミュレーションも同様の軸モデルを作成し駆動トルクを計算している。この駆動トルクをスプロケットのピッチ円半径で割りチェーン荷重とし、シミュレーションの妥当性の検証を行った。比較はチェーン荷重が高い 6 000rpm 以上の高速用カムを使用する高回転域でおこなった。あわせてFig. 12に示すようインレットバルブタイミングの進角を 0, 30, 50deg の3段階に変化させて、シミュレーションの追従性を確認した。チェーン荷重の最大値を比較した結果を Fig. 13 に示す。

6 000 ~ 8 600rpm までの幅広い領域でシミュレーションはチェーンの最大荷重を再現できている。またバルブタイミングの進角の変化に対しても精度良く追従している。6 000, 7 000, 8 600rpm の各回転数におけるバルブタイミング進角 30deg での時系列データ比較を Fig. 14 に示す。各回転数において波形が一致しており、高い精度でチェーン荷重が再現できていることが確認された。

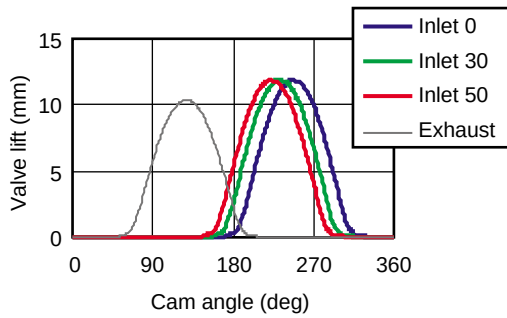


Fig. 12 Valve lift timing

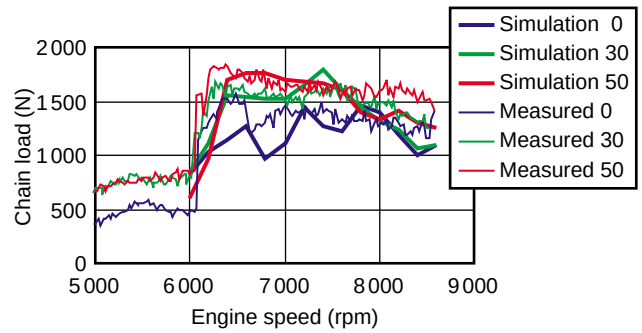


Fig. 13 Maximum value of timing chain load

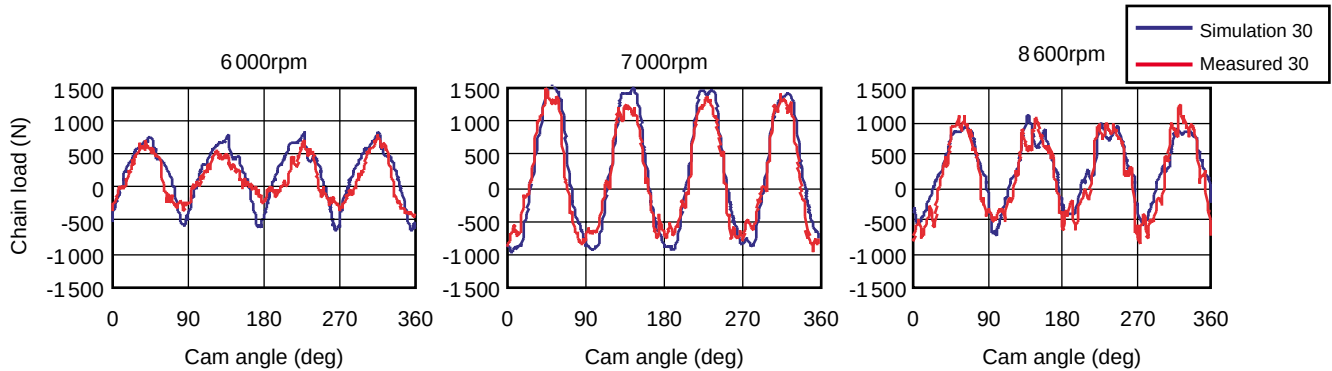


Fig. 14 Timing chain load fluctuation

次にテンショナリリーフ圧を変化させた時のシミュレーションの追従性を検証した。リリーフ圧を 2.2MPa より 1MPa へ下げた時の結果を Fig. 15 に示す。リリーフ圧の変化に対しても本シミュレーションの高い追従性が検証できた。

4.2.2. チェーン荷重測定による検証

クランク部に発生したトルクからチェーン荷重を推定する手法は簡便である。しかし、その手法ではチェーンに加わる予荷重のみならずカム間に発生するチェーン荷重も測定できない。そのためチェーン荷重を直接測定するために

は、チェーンに貼り付けたひずみゲージから信号を取り出す必要がある。従来、ピアノ線等の補助ケーブルを用いて結線し測定を行った事例もある。しかし、この手法では、チェーンカバーをはずさないと測定できない。そのため潤滑油が飛散するのみならず、ピアノ線の固定部が遠心力で外れた時ワイヤーが飛び跳ね極めて危険である。そこで、

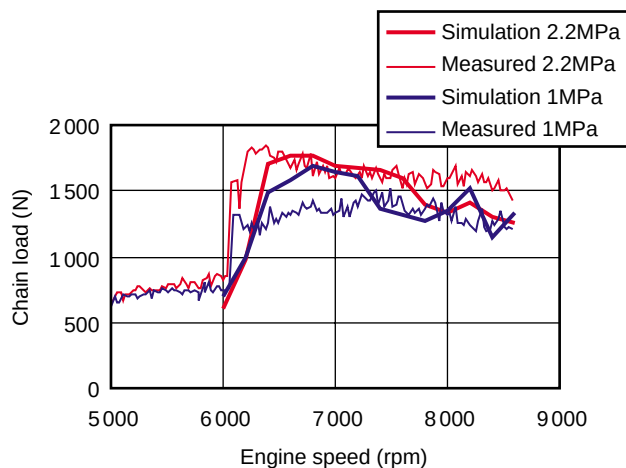


Fig. 15 Maximum value of timing chain load (Relief pressure 2.2Mpa, 1Mpa)

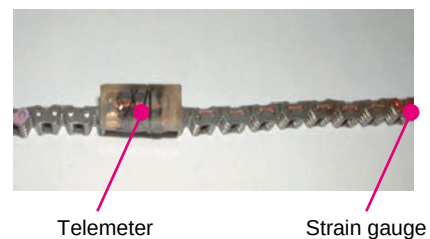


Fig. 16 Chain with telemeter

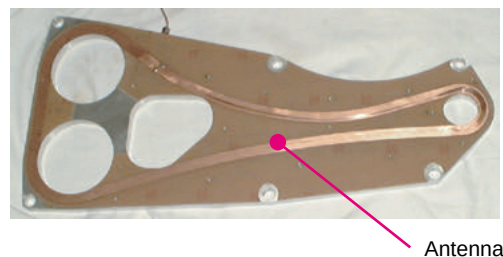


Fig. 17 Antenna for telemeter

テレメータ⁽⁸⁾を用いてこの問題を解決した。Fig. 16 にテレメータを取り付けたチェーンを示す。チェーン荷重はガイドプレート上に貼り付けたひずみゲージから検出される。高回転域まで測定できるようにホルダーを軽量化し、遠心力と慣性力の影響をひずみゲージが受けないようひずみゲージとホルダー間に適正な距離を設けている。Fig. 17 に示したアンテナよりテレメータを経由してひずみゲージへ電流が供給され、同時に検出された信号はテレメータよりアンテナを経由して外部に取り出される。

出力信号の例を Fig. 18 に示す。張り側、緩み側、カム間と各スパンをチェーンが通過する時のチェーン荷重の変化を連続的に測定できている。このテレメータシステムを用いることで、8000rpm以上の高回転域までチェーン荷重の直接測定が可能となった。

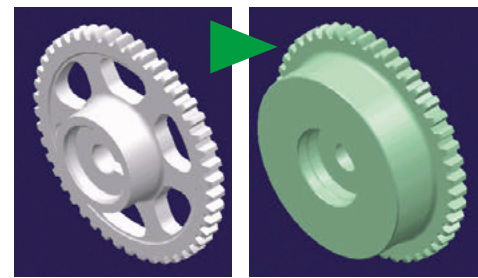
シミュレーションからもチェーンに発生する荷重を取り出し比較をおこなった。

テレメータを用いた各スパンでの 7000rpm におけるチェーン荷重測定結果とシミュレーションとの比較結果を Fig. 19 に示す。各スパン間で荷重の変化を精度良く再現できていることが確認された。

5. 適用例

確立されたシミュレーションを適用し、チェーン荷重低減策を検討した。最適化前後のスプロケット形状を Fig. 20 に、その時のチェーン荷重を Fig. 21 に示す。対策としてエキゾーストカムスプロケットの慣性モーメントを 0.00029kgm^2 から 0.0007kgm^2 へ増やし、チェーンの2次共

振回転数をカム2次加振力が極小となる回転数に一致させた。これにより、チェーン荷重を約15%低減し、実機でもその効果を確認できた。



<Base> $I = 0.00029\text{kgm}^2$
<Modified> $I = 0.0007\text{kgm}^2$

Fig. 20 Cam sprocket shapes

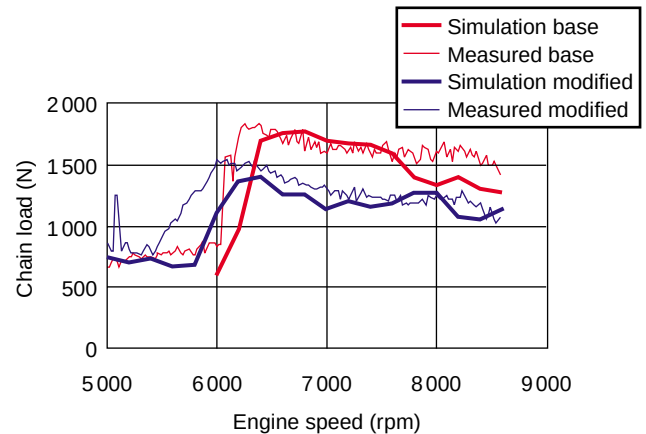


Fig. 21 Example of application

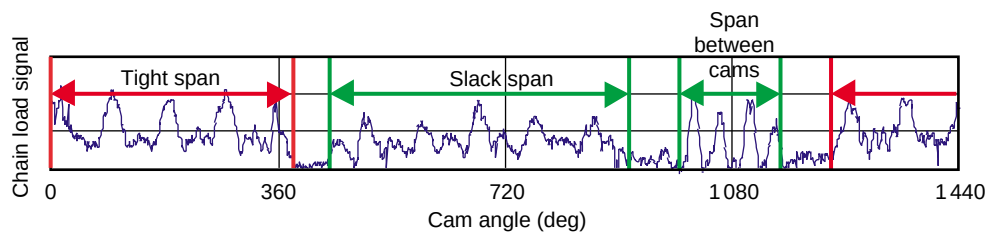


Fig. 18 Example output signal

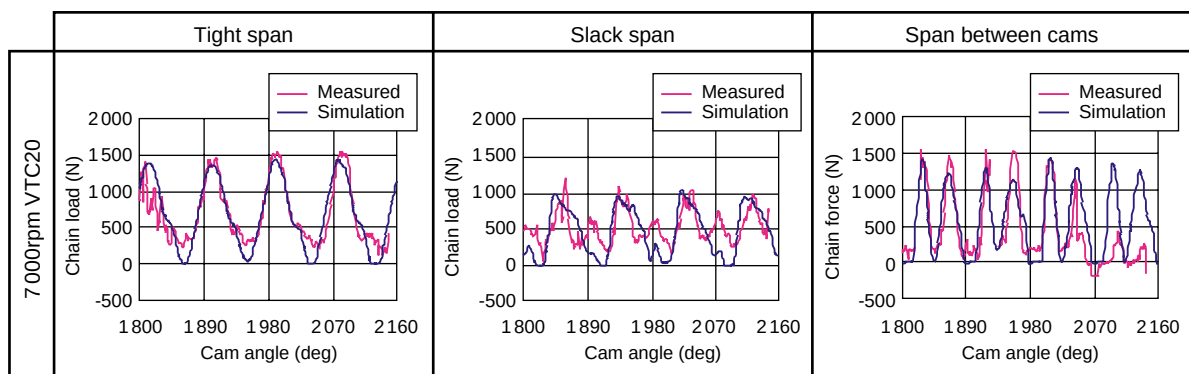


Fig. 19 Chain load comparison between simulation and telemeter measured data

6. まとめ

本研究により,

- (1) リリーフバルブ流路抵抗によるテンショナ周波数依存性挙動を考慮し, 異なるバルブタイミングで実用上充分な精度のタイミングチェーン荷重予測技術を確立できた.
- (2) 本シミュレーションを実際開発に適用しチェーン荷重低減に有効であることを確認した.

7. 謝辞

本シミュレーションを開発するにあたり, ご協力いただいた各方面の方々に心より感謝したい.

参考文献

- (1) Wang, K.W. : Vibration Analysis of Engine Timing Chain Drives with Camshaft Torsional Excitation, SAE Paper 911063
- (2) Reinicke-Murmann, J. : Analysis and Development of Camshaft Drive Systems Using a Computer Simulation, SAE Paper 9400448
- (3) Hwang, Shng-Jiaw: Torsional Response of Automotive Timing Chain Systems, SAE Paper 940689
- (4) Gregori, H. : Simulation der dynamischen Effekte im Steuerkettentrieb mit Hilfe der FE-Method, Konstruktion 45 p.358-364 (1993)
- (5) Rosse, J. : Simulating the Dynamic Behaviour of Chain Drive Systems by Advanced CAE Programs, SAE paper 960298
- (6) 石本, 鈴木: チェーン伝動機構の動解析, TSUBAKI TECHNICAL REVIEW Vol.5 No.1 p.41-48 (1995)
- (7) Hellinger, W. Pribsch, H. H. Rainer, G.Ph.: Auslegung von Ventiltrieben für Hochleistungsmotoren - Rechnerische und Experimentelle Verfahren. 16. Internationales Wiener Motorensymposium 1995
- (8) Weber, C. : Experimental Investigation Into The Dynamic Engine Timing Chain Behavior, SAE paper 980840

■著 者■



高 岸 広



菅 原 一 志