

エンジンカム駆動用歯付きベルトの 歯元荷重分担の解析

The Analysis of a Load on Each Tooth of 4 Cycle Gasoline Engine's Cam Pulley

内 田 孝 尚*
Takanao Uchida

花 田 尚 喜*
Naoki Hanada

山 地 泰比古*
Yasuhiko Yamaji

要 旨

歯付きベルトは、自動車用エンジンのカム軸駆動用等で一般によく用いられている。我々は、運転中の4サイクルガソリンエンジンの丸歯歯付きベルトカムプーリ各歯に加わる荷重を測定した。その歯元荷重とドライブプーリで計測したベルト荷重の商を求めることにより無次元化した歯元荷重分担率を求め、ベルト荷重とベルト掛かり歯位置との影響の解析を行った。

この結果、丸歯の歯付きベルトでは、ベルト材料特性とベルト歯山形状等が一定ならば次の結論が導き出される。

一般に用いられる自動車エンジンでは常用回転数の範囲ならば、動荷重及び静荷重にかかわらず、カム駆動に使われるプーリの歯元荷重分担率はほぼ一定である。

ABSTRACT

Synchronous drive belts are used to drive car engine camshafts and other driving mechanisms that require synchronization of torque transmission.

An analysis was made of the relationship of the dimensionless tooth load distribution ratio with the engagement position load relative to the belt tension load, on belt cam pulley used for a four-cycle gasoline engine in operation. In the process, the load was measured on each tooth of a synchronous drive belt with rounded teeth cam pulley followed by calculation of its dimensionless load distribution ratio by dividing the tooth root load by the load measured by a belt tension load measurement on drive pulley.

This study provided the following conclusion: when material properties, tooth profiles and other specifications of the pulley are the same, under either dynamic or static load, the tooth load distribution ratios of pulleys with rounded teeth used to drive engine camshaft remain almost the same at the normal speed range of production car engines.

1. ま え が き

歯付きベルトは、チェーンと同様の同期性と大きな伝達力特性を有することから、一般の自動車用エンジンのカム軸駆動装置等に広く使われており、今日では、静粛で軽量等の利点からチェーン駆動方式より多く使われている。昨今自動車用エンジンの高出力化の要求に伴い、動弁系のDOHC化や多バルブ化が行われたり、また、高バルブリフト化によるトルクアップがはかられたりし、必然的にカム軸駆動トルクの負荷が増大してきている。

また、軽量化ニーズから、ドライブプーリ、ドリブンプーリの小径化やベルト幅縮小等の傾向があり、ベルトの基本性能に対してベルト強度の向上や、メンテナンス

* 和光研究所

フリーを目指した耐久性能の向上などの要求が厳しくなっている。

そうした状況から、歯付きベルトに対する基本性能の向上や歯付きベルトの使用限界追求の研究が多方面で行われている。

現在、一般に使用されている歯付きベルトの歯の主な形状として、Fig. 1(a)の丸歯やFig. 1(b)の台形歯等が存在する。この歯付きベルトの破損モードには、主として屈曲疲労等による心線切断と歯元への繰り返し荷重によって生じるFig. 2に示すようなベルト歯山の欠落がある。

この中で、心線切断に対しては心線自体の荷重、即ちベルト荷重(ベルト張力)を測定することにより解析

が期待出来、この心線荷重測定手法等はすでに報告されている。⁽¹⁾⁽²⁾

一方、ベルト歯山欠落に対しては、プーリ上のベルト各歯に掛かるカム軸駆動トルクの荷重分担を解析することにより、対策が期待出来、様々な手法を使って解析を進めている。しかしながら、過去に歯付きベルトの荷重分担理論に関して幾つかの報告例⁽³⁾⁽⁴⁾⁽⁵⁾が見られるが、動的に変化するベルト荷重に対する荷重分担に関する報告例は、理論解析及び実験による解析結果共に見つけることが出来ない。

我々は、直列4気筒4サイクルガソリンエンジンを用い、丸歯歯付きベルトのカムプーリ各歯に加わる荷重(歯元荷重)を測定し、運転中の動的な歯元荷重分担の解析を行った。

本論文では、その歯元分担荷重を動的に変化している過渡状態のベルト荷重値で除し、無次元化した歯元荷重分担率を求めて計測結果を整理したところ非常に興味深い一般性のある結論が得られたので紹介する。

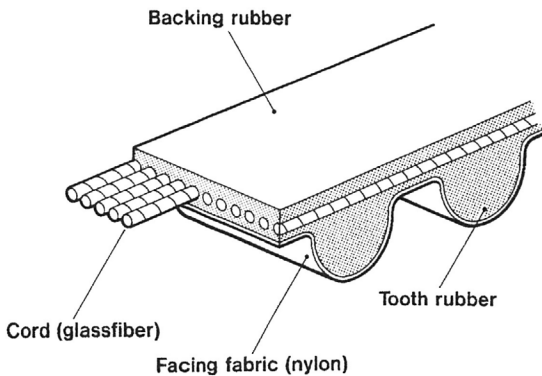


Fig. 1(a) Synchronous belt with rounded teeth

2. 計測方法

2.1. 測定用テストエンジン

ベルト挙動とカム軸の駆動トルク変動は、密接な関係を持っていることが一般に知られている。⁽³⁾⁽⁴⁾

このカム軸のトルク変動は、バルブ駆動カムの形状や、バルブ系のスプリングによるバネ力、及びバルブやスプリング等の等価質量による慣性力の影響で変化する。即ち、エンジン形式や動弁系仕様の違いで大きく変化することになる。そこで、カム駆動トルク変動条件を同じにするため、SOHC 動弁系の直列4気筒 1500cm³を使用した。

このエンジンのベルト廻りレイアウトを簡略して Fig. 3 に示す。また、この動弁系レイアウトにおけるカム軸駆動トルク変動を計算によって求めた例を Fig. 4(a)(b) に示す。

過去の解析結果から、燃焼によるクランクシャフトの回転変動による影響が、ベルト荷重に対して少ないことが判明している。これは、クランクシャフトの回転変動

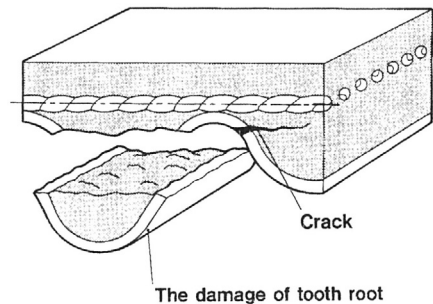


Fig. 2 The damage of tooth root

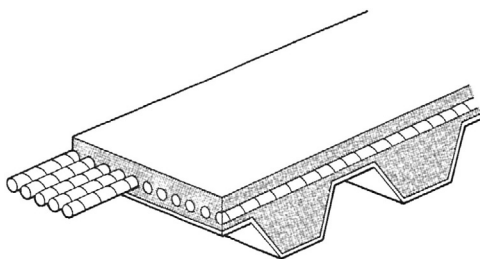


Fig. 1(b) Synchronous belt with trapezoidal teeth

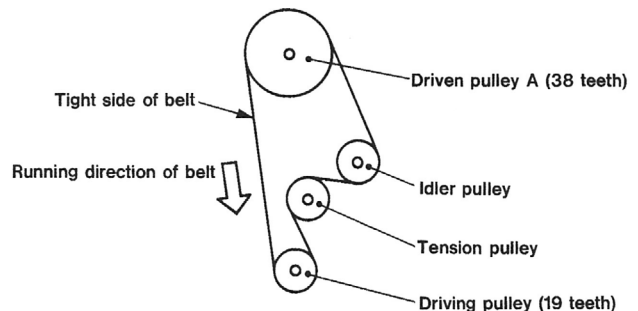


Fig. 3 Running system of synchronous belt

が、カム軸の回転変動に比べて極端に小さいことが主な理由である。そこで、この解析におけるベルト挙動の起振源をカム駆動力変動のみとする為、ピストンを外し、外部モーターによりエンジンを駆動して解析テストを行った。

また、測定上影響の無い補機類、吸排気系部品等は取り外してある。

2.2. 測定用各装置

(1) 歯元荷重測定用プーリー

歯元荷重測定用プーリーは、Fig. 5 のようにカムプーリーの歯の両側にスリットを入れ、歪ゲージを貼付し、歯のたわみから歯元荷重を測定出来るように改造したものである。できるだけ一度に歯元荷重を測定出来るように、7か所のスリットを入れた歯の上に歪ゲージを設定している。また全てのバルブ開閉タイミングで歯元荷重が測定出来るように、キー溝は6箇所設定し、キー位置を変

更することによりバルブの開閉タイミングに対して全ての歯元荷重を測定できる。

歯の曲げ方向のたわみのみを検出できるように、片側のスリットに2枚ずつ計4枚の歪ゲージを貼り、カムプーリーの歯に加わる振じれを相殺するようにブリッジを組んでいる。スリットを入れた歯元の剛性は、ベルト歯山のバネ定数と比較して問題の無いレベルで十分な剛性があり、スリットによるベルト歯元荷重への影響はほとんどない。

(2) ベルト荷重測定用ドライブプーリー

カムプーリーをベルトで駆動する時のベルト張力を検出する為に、クランクシャフトにベルト荷重測定用ドライブプーリーを取り付けた。

Fig. 6 にベルト荷重測定用ドライブプーリーの軸取り付け部を示す。図の斜線部を削り取って振じり剛性を低くし、振じり感度向上を図って歪ゲージを貼付けている。

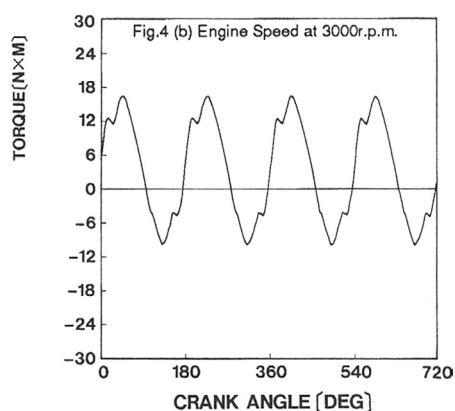
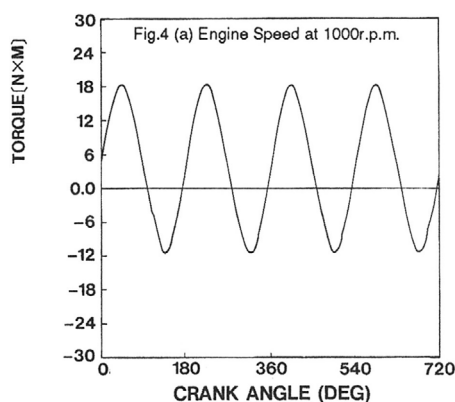


Fig. 4 Calculated Cam Shaft Torque Fluctuation

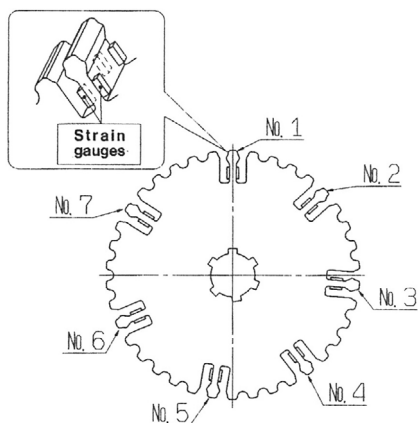


Fig. 5 Tooth root load measurement pulley

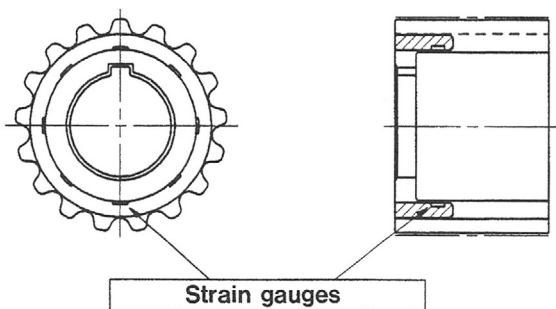


Fig. 6 Belt tension load measurement drive pulley

ドライブプリーの振り方向歪みのみ検出できるよう、歯元荷重測定用プリーと同様に、4枚以上の歪みゲージを貼ったブリッジ方式によって曲げ方向の歪みを相殺している。

3. 測定結果

実際のエンジンのベルト廻りレイアウトにおけるカムプリー上のベルト歯元荷重分担を調べる為、動的及び静的荷重測定の実験を行った。

3.1. 動的歯元荷重分担

3.1.1. ベルト荷重測定値

Fig. 7 にエンジン回転数をアイドルから 7000 回転前後まで、モーターでゆっくりと上昇させ、ベルト荷重測定用ドライブプリーを使って測定したベルト荷重データを示す。このようなベルト荷重値の大きさを比較するデータは、ベルトの心線等の負荷を判断する時に使用されることが多い。

本エンジンでは、回転数 3600rpm にベルト共振によるベルト荷重ピークが存在する。

これはベルトのパネとカム軸等の慣性モーメントとの共振と考えて良い。このようなベルトレイアウトをパネマス系振動モデルとして報告した例として、(6)、(7)の文献が挙げられる。

3.1.2. 歯元荷重分担

(1) クランク角度に対するベルト荷重、各歯元荷重の波形データ

Fig. 8 に一定エンジン回転数における、クランクアングル毎のベルト荷重と各歯元荷重のデータを示す。

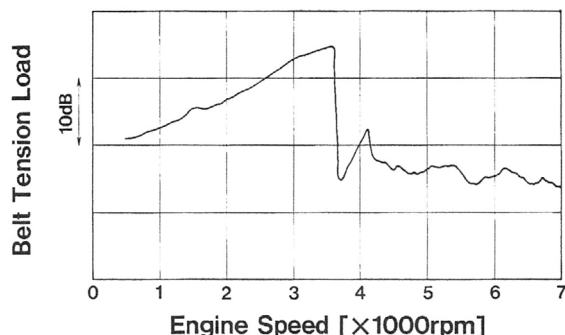


Fig. 7 The belt tension load

最上段のデータは、ベルト荷重測定用ドライブプリーで測定したベルト荷重データで、本テストエンジンでは、クランク回転 1 回に対して 2 つのピーク値を持った周期的な波形パターンである。これは、ベルト荷重の変動はカム駆動トルク変動が起因として発生している為、カム駆動トルク変動の波形パターンに従属している為である。2 段目以降の番号の付いたデータは、カムプリーの 7

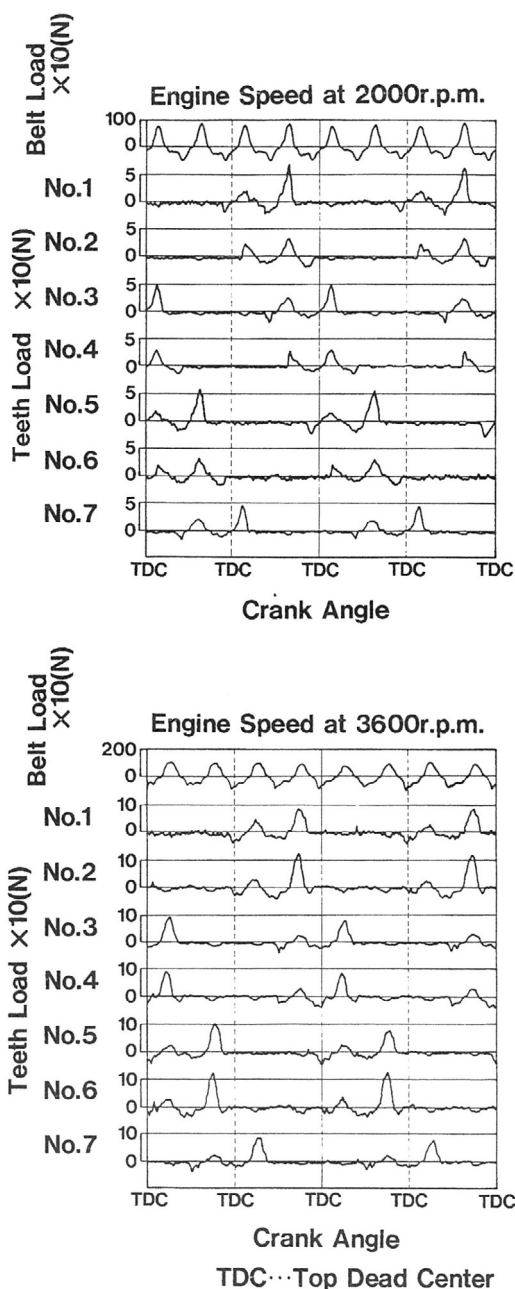


Fig. 8 Belt tension load and each tooth root load versus crank angle

か所に取り付けられた各歯元荷重測定用歪ゲージによる測定値である。

歪みゲージを取り付けたカムプリーの各歯は、ベルトがカムプリーの約半周に巻き付いている間に2度ほど歯元荷重の高い値を示す。

ベルト荷重ピーク値の発生タイミングと各歯元荷重値との関係を検討してみると、歪みゲージを取り付けたカムプリー歯の位置により歯元荷重値の大きさが違うことが判る。特に、このセンサーの付いた歯がカムプリーとベルトの噛み離れに近い位置で、ベルト荷重のピークと同期すると歯元荷重値が高くなるのが判る。また、噛み込みに位置するところで同期すると低い値を示すのが判る。

そこで、各エンジン回転数毎の各歯元荷重値を、カムプリー上の歯元位置に対してプロットし Fig. 9 に歯元荷重分担実測値として示した曲線は最小自乗法にて求めている。

この図から、カムプリーの約半周に巻き付いているベルトの各歯元荷重分担に違いがあることがはっきり現れている。

これらの荷重分担に関する内容は、今までに、多くの報告例 (5)～(7) が見られる。これらは、荷重一定の条下での測定、及び理論的に解析されたものが多く、荷重が変化した場合を測定してより一般的な取扱いをしたものはない。

3.2. 静的歯元荷重分布

エンジンベルト廻りレイアウト (Fig. 3) と全く同じ

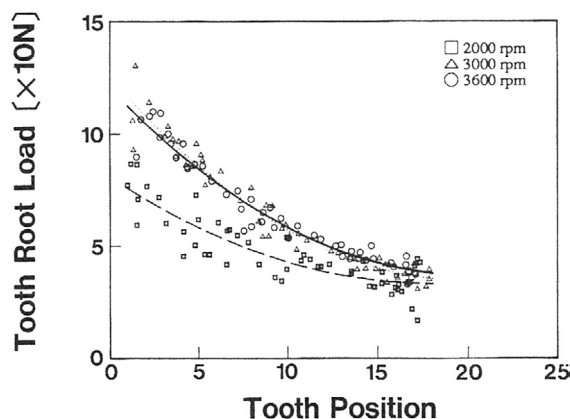


Fig. 9 Dynamic tooth root load distribution

レイアウトの治具をアルミ板上に再現し、エンジンベルト廻りレイアウトで歯元荷重分担の測定を行った。(Fig. 10)

この単体解析装置を使って、各歯元の位置に於ける歯元荷重を整理したのが Fig. 11 である。横軸はカムプリー上の歯の位置を示している。ベルト荷重を変化させると、各歯元荷重値は変化するものの、動的歯元荷重分担と同じような荷重分担の傾向を示している。

4. 歯元荷重分担率の算出

前述した歯元荷重のピーク値を同一クランクアングルにおけるベルト荷重値で除し無次元化して荷重の分担率を求め、その時の歯元位置で整理を行った。解析には、テストを行ったエンジン回転数の Idle から 6000rpm に相当する測定範囲 20Hz～200Hz までの測定データを用いた。

データレコーダに入力された各エンジン回転数での

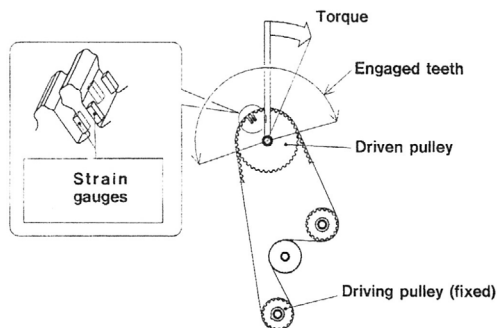


Fig. 10 Measurement method of static tooth root load distribution

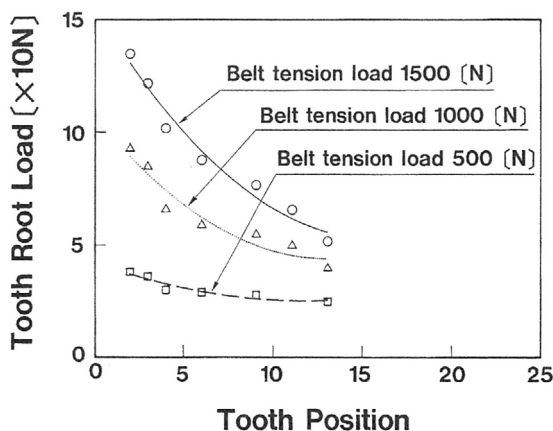


Fig. 11 Static tooth root load distribution

ベルト荷重値と各歯の歯元荷重値をコンピュータ (HP9000MODEL330) に入力し、自動的にベルト荷重の振幅と同位相における各歯元荷重値を読み取り、解析を行った。

この結果を Fig. 12 に示し、曲線は最小自乗法を用いて求めた。

このように無次元化して、各歯の荷重分担率で見ると、低回転域から高回転域 (測定範囲 20Hz 前後～200Hz 前後) まで、エンジン回転数や、ベルト荷重値の違い等の影響がほとんど無く、一定の曲線に近似してくることが判った。

この結果から、歯元荷重分担率はベルト荷重値が変化しても各歯の分担率は変化せず、一定であることが判る。

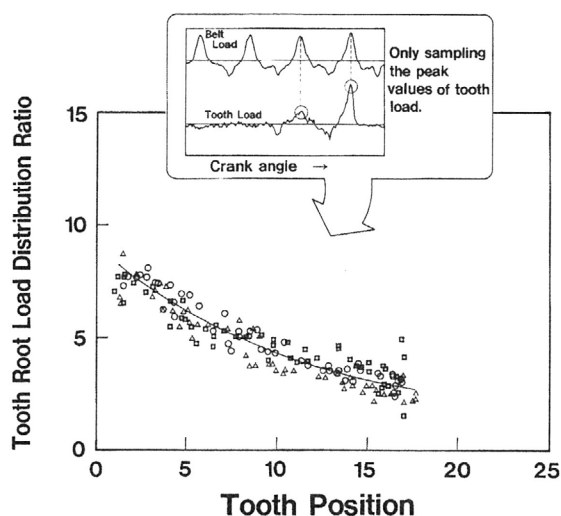


Fig. 12 Dynamic tooth root load distribution ratio

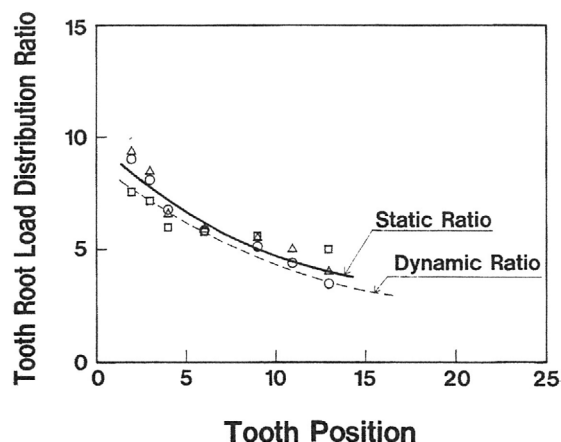


Fig. 13 Static tooth root load distribution ratio

同様に静的歯元荷重の無次元化した結果を Fig. 13 に示す。静的にも歯元荷重分担率はベルト荷重値に影響されないことが判る。

Fig. 13 は Fig. 12 で得られた動的歯元荷重分担率を破線で示している。静的歯元荷重分担率 (実線) と動的歯元荷重分担率 (測定範囲 20Hz 前後～200Hz 前後) はほぼ一致すると判断出来る。

ここで、この動的荷重分担率と静的荷重分担率がほぼ一致した理由について考察してみる。

Fig. 14 は、カム軸の回転とベルト荷重の変動を示している。カム軸の回転変動とともなってベルト荷重の変動も大きくなり、瞬間的に荷重が零になる点が存在する。

一方、静的荷重測定時は、一度荷重を完全に抜いた状態からベルト荷重を加えている。従って静的及び動的荷重の加え方はほぼ同じであるといえる。

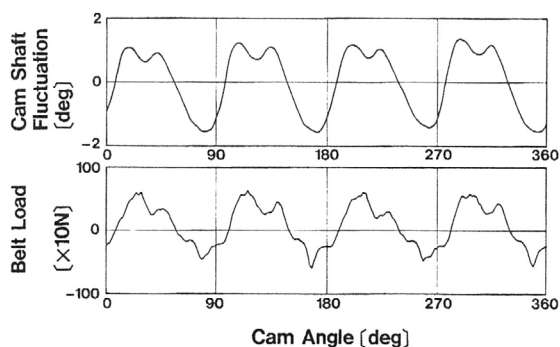


Fig. 14 Cam shaft fluctuation

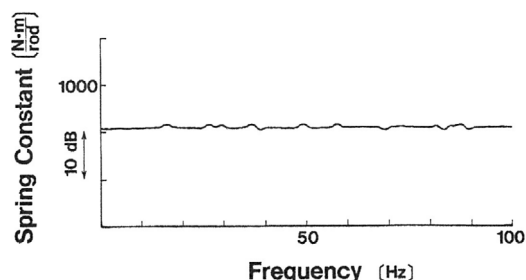


Fig. 15 The dynamic characteristics of the spring constant of the belt layout

また、Fig. 10 で示した単体解析装置のレバーを加振し、ベルト廻りレイアウトにおける周波数変化に対する動バネ定数を調べた結果を Fig. 15 に示す。この結果よりほとんど周波数によるバネ定数変化が少なく、動的時も静的時も同等のバネ定数であることが判断できる。

従って、動的測定時と静的測定時のベルト荷重の加え方とベルト廻りレイアウトにおけるバネ定数がほぼ一致することが、動的荷重分担率と静的荷重分担率がほぼ一致した大きな理由と思われる。

5. 結 論

同一仕様の丸歯タイミングベルトを使用する限り、一般の自動車用エンジンのカム駆動等に使われる 20Hz～200Hz 前後の周波数の範囲ならば、動荷重及び静荷重に係わらず歯元荷重分担率はほぼ一定である。

この結果、エンジン運転中のカムプーリ上の各歯の荷重分担が静的単体解析テストで判断出来るため、ベルトの歯山欠落に対する強度判定が容易になり、エンジン開発の効率改善につながった。

6. 参 考 文 献

- (1) 友野清久、他：エンジン用歯付きタイミングベルトの動的心線荷重測定手法、自動車技術会学術講演会前刷集 912 Vol.1 912177 (1991. 10)
- (2) Yuichi Murakami, Masahiko Watanabe et al.,: “Study of Belt Toughness Through an Examination of the Strain on Belt Cords”, SAE Technical Paper 880415
- (3) 網島貞夫、藤井透：タイミングベルトの歯における荷重分布について、日本機械学会論文集 42 巻 359 号、(1976. 7)
- (4) 篁谷正則、小山富夫、他：歯付ベルトの初張力作用時における荷重分担、日本機械学会論文集 (C 編) 49 巻 448 号 (1983. 12)
- (5) 小山富夫、篁谷正則、他：歯付ベルトの強度に関する研究 (第 1 報)、日本機械学会論文集 (第 3 部) 44 巻 377 号 (1978. 1)
- (6) 水野直比古、稲垣浩、他：タイミングベルト運動解析、自動車技術会学術講演会前刷集 871 (1987. 5)
- (7) J. Reinicke-Murmann, P. Kreuter: “Analysis and Development of Camshaft Drive Systems Using a Computer Simulation Model”, SAE Technical Paper 900448 (1990)

■著 者■



内 田 孝 尚



花 田 尚 喜



山 地 泰 比 古