

特集 エンジン運動部品計測用テレメータ*

New Telemeter to Measure Engine Parts during Operation

小井良治 杉野正芳 森次通泰 中村光宏
 Ryoji ISARAI Masayoshi SUGINO Michiyasu MORITSUGU Mitsuhiro NAKAMURA

The authors have developed a measurement technique using a new digital telemeter to measure the temperature, strain and gap of engine parts under high speed running operation with a high degree of accuracy. This telemeter has an original signal processing method in which the sensor outputs are directly converted to digital signals without using conventional amplifiers and A/D converters. This telemeter enables multipoint measurements at high engine speeds above 6000 r/min in small gasoline engines because of its compact and lightweight design. Furthermore, it can be used continuously for extended periods of engine testing without concern over battery life because of its low power consumption and self-contained power generation. We applied the newly developed digital telemeter to the measurement and analysis of several pistons.

Key words: Engine component, Piston, Measurement / Telemeter, Temperature, Strain, Gap

1. まえがき

近年の環境問題に対し、エンジンの低燃費化、コンパクト化などへの要求は大きく、各エンジン部品の軽量化、低フリクション化が必須となっている。ピストン、コンロッドなどのエンジン運動部品はより薄く、軽くなる一方で、高回転化、高出力化を達成する耐久性が求められる。エンジン開発において、性能と耐久性を高いレベルで両立させるには、シミュレーションによる解析技術と、高回転、高負荷での実機計測技術の確立が重要である。

従来、エンジン運動部品の評価に必要な温度、歪み、ギャップなどを計測するには、リンクシステムやスリップリングなどの有線方式が用いられた。しかし、断線など耐久性の問題から 6000 r/min 以上の高回転への適用は困難であった。近年、これを解決するため無線方式を用いた計測が多く試みられているが¹⁾²⁾ 市販のテレメータ³⁾⁴⁾ は 体格、ノイズ、電源供給などに問題がある場合が多く、未だエンジン運動部品計測の主流となっていない。

そこで著者らは、高回転、高負荷でエンジン運動部品の温度、歪み、ギャップを高精度に計測できるテレメータを開発した。センサ出力を直接デジタル値に変換する独自の信号処理回路により小型化と省電力化を実現し、6000 r/min 以上の高回転での多点計測を可能にした。また電源供給にはエンジン部品の運動を利用した自己発電を採用し、電池交換などの手間なく長時間の計測を可能にした。本稿では、開発したテレメータの概要と、ピストン歪み、ピストンリング挙動の計測に適用した事例を紹介する。

2. テレメータの開発

2.1 動作原理

開発したテレメータの信号処理回路は、市販のそれとは全く異なる。従来のアンプや A/D コンバータの代わりに、センサ、充放電器、コンデンサ、パルス発生器から成る「デジタル化回路」を開発した。動作原理を Fig. 1 に示す。センサの抵抗またはインダクタンスは、検知する物理量（温度、歪み、ギャップ）により変化する。センサの抵抗・インダクタンスが変化するとコンデンサの充放電時間が変化するため、その間に含まれるパルス数をカウントすればセンサの出力を直接デジタル値として得られる。パルス発生器は、高い分解能を実現するため 100 MHz 以上とした。従来のアンプに比べ省電力化できるため、電源供給には自己発電を採用し、長時間計測を可能にした。

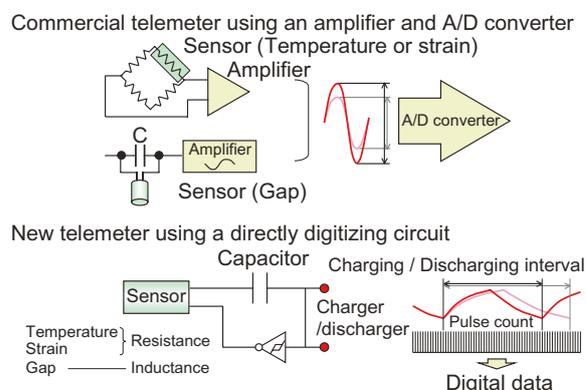


Fig. 1 Working principle

* (社)自動車技術会の了解を得て、「2007年春季大会学術講演会前刷集」No. 62-07より、一部加筆して転載

信号処理回路は、16chのセンサ接続端子、3種類の物理量（温度、歪み、ギャップ）に対応したデジタル化回路、カウンタとエンコーダをもつ（Fig. 2）。センサとそれに対応したデジタル化回路はセレクタで個別に選択できるため、センサを自由に組み合わせて計測できる。カウンタは選択されたセンサ、デジタル化回路での充放電時間内に含まれるパルス数を24μs以内にカウントする。エンコーダは計測されたデータにセンサIDとヘッダ、フッタを追加して送信パケットを生成する。そして、無線回路から100kBPSで送信される。データが送信されると、センサ、デジタル化回路を切り替えて上記動作が繰り返される。

2.2 計測仕様

開発したテレメータの計測仕様をTable 1に示す。各物理量によりセンサとデジタル化回路のマッチングを行い、エンジン開発に十分な計測範囲、精度、時間分解能を達成した。テレメータモジュールの計測点数は16点で、物理量は自由に組み合わせることができる。また、異なる無線周波数を用いると、1気筒あたり17点以上の計測や複数気筒での計測にも対応できる。

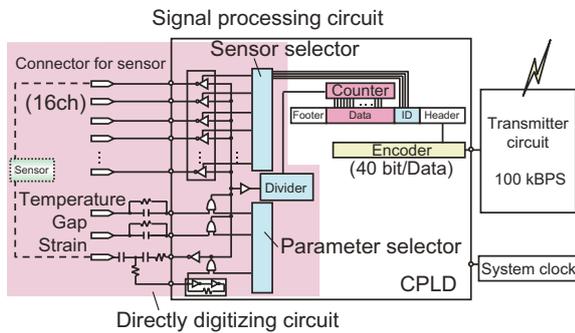


Fig. 2 Signal processing circuit

Table 1 Measurement specifications

Physical parameter	Temperature	Strain	Gap
Sensor	Thermistor or resistance temperature detector	Strain gauge (Semiconductor type)	Eddy current gap sensor
Range	-30 °C ~ +400 °C	-5000 ~ +3000 μstrain	0 ~ 500 μm
Accuracy	±3 °C	±20 μstrain	±5 μm
Time resolution	1.5 s	24 μs (1CA@7000 r/min)	
Number of measurement point	16 points / 1 module (for temperature strain gap at user's choice)		
Transmission rate	400 μs / data		

2.3 応答性の検証

計測にデジタル回路を利用する場合、データの連続性や遅れが懸念される。そこでテストピースをハンマリングした際の歪みを、デジタル化回路とアナログアンプで同時計測し比較した（Fig. 3）。ピストン歪みのシミュレーション結果の倍以上のスピードで変化させても計測波形はほぼ一致しており、開発したテレメータの応答性は十分と判断した。

2.4 テレメータ搭載ピストン

テレメータモジュールは、発電用コイル、電源回路、前記デジタル化回路を含む信号処理回路、無線回路、送信アンテナから構成される。ピストン系部品の計測では、エンジンの動作を妨げない狭い領域に4本のボルトでコンロッドに取り付けられる（Fig. 4）。

モジュールの厚さは5mm以下、質量は20~30g（発電用コイルを除くと約5g）と小型・軽量で、アイドル~6000 r/min以上の回転数で計測できる耐久性を持つ。また、耐熱は-30~125℃である。

Test condition: A steel test piece was hammered impulsively

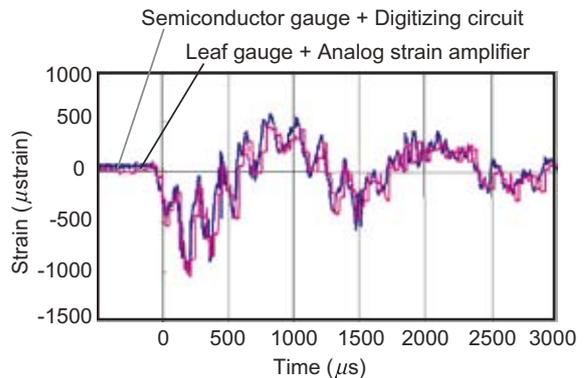


Fig. 3 Response of digitizing circuit

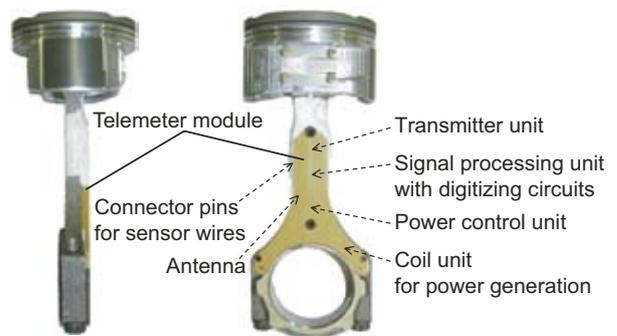


Fig. 4 Telemeter module assembled to piston

2.5 計測システム

ピストン系部品の計測システムの一例を Fig. 5 に示す。ピストンに取付けられたセンサの配線は、ピストンピンを通してテレメータモジュールの配線ピンに接続される。発電用コイルは、クランクシャフトに埋め込まれた磁石との相対回転により発電し電源を供給する。受信アンテナは、全クランク角で信号を受信するために必要な数（通常2以下）がクランクケース内に取付けられる。

受信されたデータは中継ボックスでシリアルデータに変換され、受信装置でシリアルデータのエラーを判定・選択後パラレルデータに変換され、クランク角、アナログデータとの同期を取り、パソコンで処理される。

試験時には、エンジンから出たアンテナ線の中継ボックスに繋ぐだけで電池交換などの必要がなく、取り扱いが簡単で効果的な計測が可能である。

3. エンジン計測への適用

近年のエンジンは、高出力、低燃費、低エミッションなどの性能と耐久性を高いレベルで両立させる必要がある。ピストンに関しては、高出力化、低フリクション化に伴い、作用するスラスト力の増大、且つ摺動面積縮小による面圧増大のため、信頼性の確保が重要である。またピストンリングに関しては、低フリクション化に有効な低張力化、薄幅化に伴い、リング溝内での上下動やツイスト挙動が発生し易くなり、オイル消費、ブローバイの悪化が懸念される。⁵⁾⁶⁾

このような状況の中、ピストン系部品の温度、歪み、ギャップを高回転、高負荷で計測する要求が高まっている。そこで本稿では、開発したテレメータシステムの適用事例として、ピストンスカート歪み、ピストンリング挙動を計測、解析した結果を紹介する。

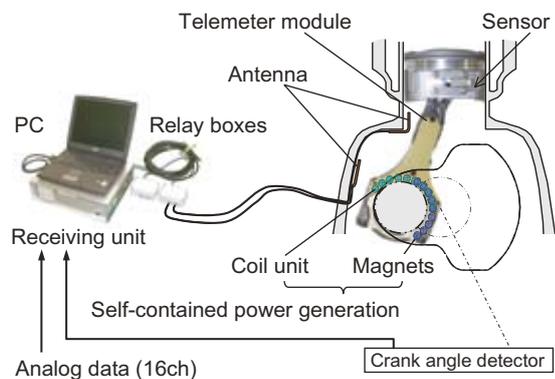


Fig. 5 Measurement system

3.1 ピストンスカート歪み

シミュレーションで最大応力が加わると予想された箇所に歪みゲージを貼り付け、ピストンスカートの歪みを計測した (Fig. 6)。V6 3.0 L のガソリンエンジンでの計測結果を Fig. 7 に示す。二つの波形は、スラスト側と反スラスト側のスカート歪みの挙動を示す。これらは、ピストンピンに加わるスラスト力の計算結果 (破線) とよく対応しており、開発したテレメータの計測の妥当性を裏付けている。また回転数と負荷を変更してピストンスカートの最大歪みを解析した結果、最大歪みはエンジン回転数によらずスラスト力に比例することが分かった (Fig. 8)。

3.2 ピストンリング挙動

筒内圧、慣性力、フリクションなど様々な力が複雑に影響する高回転でピストンリング挙動を計測できるシステムを構築した。センサは絶対値を計測できるよう、一般的な静電容量法では無く、ギャップセンサを用いた。センサモジュールには、ピストン中心から径方向の異なる距離に二つのギャップセンサを埋め込み、上下動とツイスト挙動が計測できる (Fig. 9)。

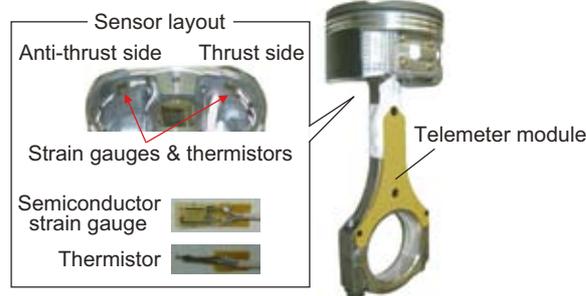


Fig. 6 Sensor layout

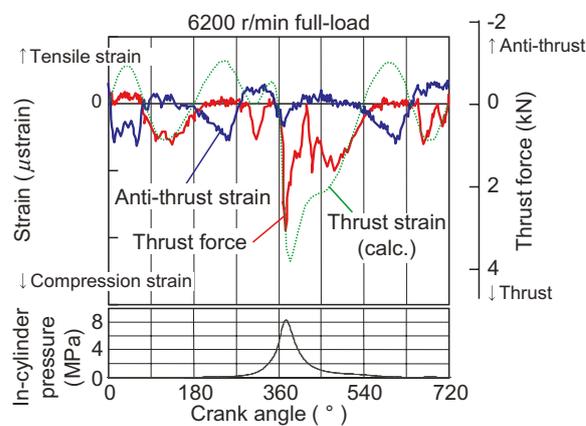


Fig. 7 Piston skirt strain

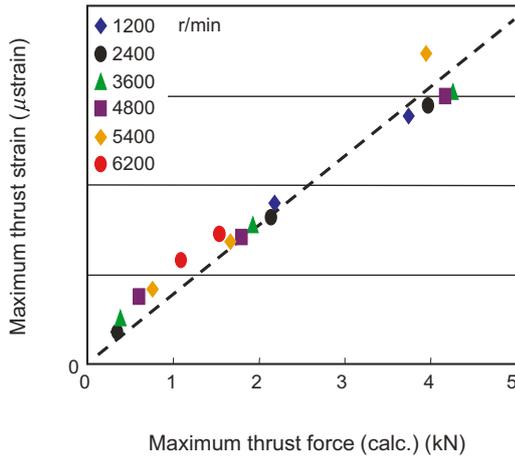


Fig. 8 Relationship between thrust force and thrust strain

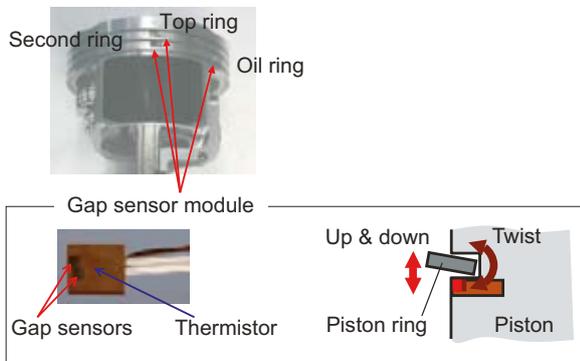


Fig. 9 Sensor layout

ピストンリングの上下動の主要因を解析するため、I4 1.8 Lのガソリンエンジンで負荷の影響 (Fig. 10) を調査した。その結果、各リングを上下動させる力が異なることが分かった。オイルリングは、負荷によらずピストンの下降工程で上に移動し上昇工程で下に移動する挙動を示しており、主にエンジン回転によるフリクションに従って上下動することが確認された。トップリングは、低回転では主に筒内圧に従って上下動することが確認された。

上下動が発生しやすい薄幅リングでの計測結果 (Fig. 11) でトップリングの挙動を詳しく解析した。低回転 (2400 r/min) の吸気工程では、筒内の負圧の影響でリングは上に貼りつくが、圧縮工程に入り正圧になるタイミングで下へ移動する。その後排気工程で筒内圧が小さくなり慣性力が大きくなると上へ移動する。高回転 (6000 r/min) では慣性力の影響が大きくなり、吸気工程で下へ移動するタイミングと排気工程で上へ移動するタイミングが低回転に比べ早くなった。また、圧縮 TDC 近傍ではピストン挙動の影響も現れた。

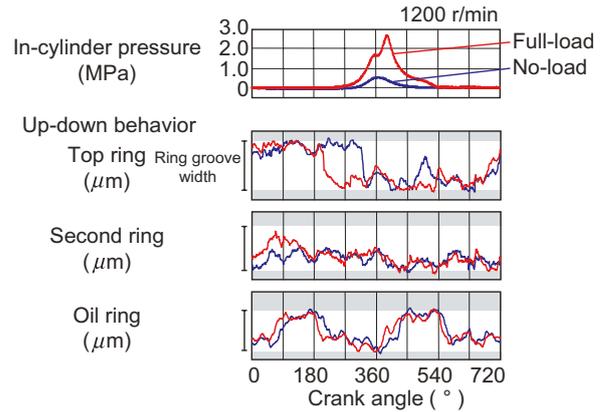


Fig. 10 Piston ring behavior

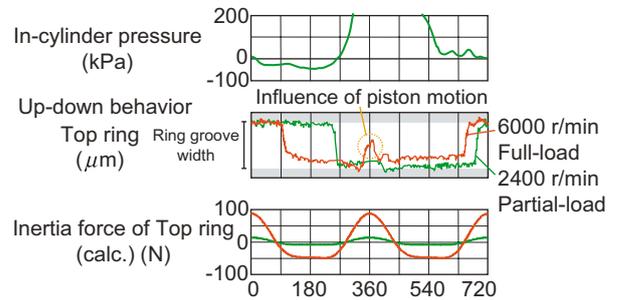


Fig. 11 Top ring behavior

4. むすび

近年のエンジン開発において、シミュレーション技術は効果的なツールであるが、それは実機計測による検証が行われて初めて有用なものとなる。開発したテレメータは、高回転、高負荷での計測が可能であり、実機現象の論理的把握による設計、開発への貢献が期待できる。

今回はピストン系部品の計測に適用し、以下の知見を得た。

- (1) ピストンスカート歪み：最大歪みはエンジン回転数によらずスラスト力に比例する
- (2) ピストンリング挙動：トップリング挙動の主要因は筒内圧であり、高回転では慣性力、ピストン挙動も影響する、オイルリング挙動の主要因はフリクションである

今後は、更なる小型化および多点・高速計測への対応と、他の運動部品計測や燃焼解析への応用を進める。

<参考文献>

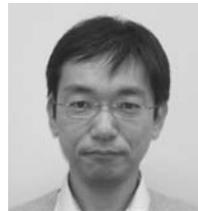
- 1) Franz Maassen et al. : Simulation and Measurement on the Cranktrain, 13.Aachen Colloquium (2004), pp. 333-355.
- 2) Robert W. Burrahm et al. : Development of a Piston Temperature Telemetry System, SAE Paper 920232 (1992).
- 3) datatel TELEMETRY : テレメータシステム, 東京, 三協インタナショナル(株) (2001), p. 15.
- 4) (株)立山電子 : テレメトリーシステム, 東京, (株)立山電子 (2003), p. 18.
- 5) 影山 他 : ピストンスカート部の接触面圧と応力予測手法の開発, 自技会前刷集, No.70-03(2003), pp. 1-4.
- 6) Ishihara et al. : The Designs of Piston and Piston Ring to Reduce Lubricating Oil Flow into the Combustion Chamber, SAE Technical Paper 1999-01-3316 (1999).



<著 者>



小井 良治
(いさらい りょうじ)
(株)日本自動車部品総合研究所
研究1部
パワトレイン分野の研究に従事



杉野 正芳
(すぎの まさよし)
(株)日本自動車部品総合研究所
研究1部
パワトレイン分野の研究に従事



森次 通泰
(もりつぐ みちやす)
(株)日本自動車部品総合研究所
研究1部
パワトレイン分野の研究に従事



中村 光宏
(なかむら みつひろ)
トヨタ自動車(株)
エンジンプロジェクト推進部
エンジン開発に従事