

非接触電磁誘導法を用いたピストン温度計測例

Real-time Piston Temperature Measurement Using Electromagnetic Induction Telemetry

鈴木 正 剛*
Masatoshi SUZUKI

植 田 真 悟*
Shingo UEDA

要 旨

ピストンの耐久性はエンジンの性能を限界付ける重要な要素であり、その温度を知ることでエンジン開発上有用な情報を得ることができる。従来用いられてきた材料硬度法は、一定速運転のデータしか取れない欠点があり、多様なピストン温度測定要求に対応しきれなくなっている。そこでサーミスタによりピストンの温度を直接計測し、下死点近くで計測情報を受け渡しできる軽量小型な電磁誘導法を用いて高速回転に耐えるピストン温度計測システムを開発した。使用回転速度の高い二輪車用エンジンに適用して、15 300 r/min までの計測が可能になり、同時に 10 時間以上の耐久信頼性を確保することができた。

本研究では、この電磁誘導法を用いて、エンジン実働運転時の代表的なパラメータを変化させたときのピストン温度変化の実例を紹介し、高速回転時は各パラメータを変化させてもピストン温度が鈍感になる理由を入熱側と放熱側の熱伝達率の違いという概念を用いて説明することができた。

ABSTRACT

As piston durability is a decisive factor in the limits of engine performance, piston temperatures are useful information for engine development. Because these temperatures are typically available only under constant-speed operating conditions, conventional material hardness measurements can no longer satisfy the diversifying requirements of piston temperature measurement. Therefore, we have developed a piston temperature measurement system that directly measures piston temperatures using a thermistor, which allows the transfer of measurement information at bottom dead center using a light, compact electromagnetic induction system. This measurement system can be applied to motorcycle engines, which are often subjected to high engine speeds, and allows measurement up to 15300 r/min while ensuring endurance reliability of more than 10 hours.

In this study we introduce some actual examples of piston temperature changes measured by this electromagnetic induction system with the typical parameters altered when the engine is running. The phenomenon that the piston temperatures become less sensitive to changes of parameters under high engine speed conditions is thus explained by the difference in the heat transfer rate of the heat-input side and the heat-release side.

1. はじめに

1998 年に高松らが「高速ガソリン機関のピストン温度測定法」⁽¹⁾と題して自動車技術会に発表した計測法はピストン本体の測定したい箇所に埋め込んだサーミスタからの出力信号を下死点付近で接点を介して受け渡して温度データに変換するものであった。この測定法の特徴は、最高回転速度 12 000 r/min で 6 時間の使用に耐え、誤差は CA 熱電対と比べて 1 % というものであった。

しかしながら信号の受け渡しに接点を用いるためさらに高速運転時のピストン温度をリアルタイムで測定するには限界があった。そこでこのようなニーズに対応するため、下死点付近でデータの受け渡しをする際、接点を持たない

非接触式の電磁誘導法を利用したリアルタイム測温技術を完成させ、エンジン稼働中の代表的なパラメータである冷却用オイルジェットの効果、空燃比や点火時期の影響を測定したのでその結果を報告する。

2. 電磁誘導法の原理

電磁誘導法を用いたピストン温度測定技術は 2000 年には松井らが⁽²⁾、また 2002 年には稲見らが CART エンジンの実働時の温度計測⁽³⁾と題して共に自動車技術会で報告されている。またこれに先立って 1993 年には松浦の博士論文⁽⁴⁾のなかに詳細な報告^{(5), (6)}がある。

本方式は基本的にこれらと同じである。その測定原理に

基づく各コイルの構成を Fig. 1 に示す。

シリンダブロック側に送受信コイルを固定する一方でピストン側に共振コイルとサーミスタの閉回路を配置して下死点近傍で双方のコイル中心が一致するように取り付ける。

送信コイルに交流電流をかけると受信コイル側にも同じ周期の交流電流が流れる。このときコイル同士の相対位置による受信信号への影響を少なくするため、それぞれ2組ずつ組み合わせてある。

ピストンが下死点にくると電磁誘導により共振コイルに電流が流れ、受信コイルの電流が低下する。そのときの低下量がサーミスタの抵抗変化すなわち温度変化により増減することを利用してピストンの温度を求める。

実際のピストンに装着した例を Fig. 2 に示す。

本実施例ではサーミスタの埋め込み深さをピストン頂面中央で表面から 2 mm の位置とした。

3. リアルタイム計測事例

Table 1 に測定に用いたエンジンの主要諸元を示す。

ピストン温度の測定はあらかじめ硬度法で4気筒エンジンの第3気筒の温度が高いことがわかっていたのでこの気筒のピストン中心の表面から 2 mm 内側にサーミスタを埋め込み、各回転速度に設定後データが安定する約 60 s 後に

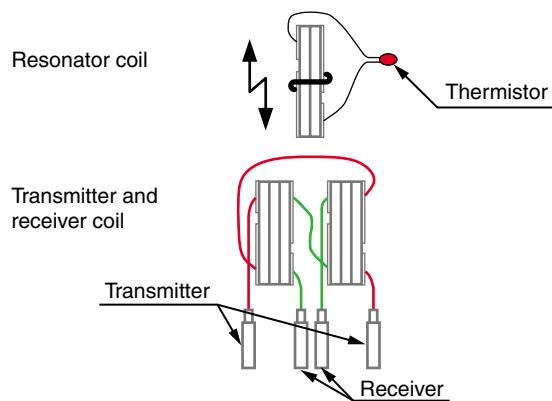


Fig. 1 Construction of electromagnetic telemetry method

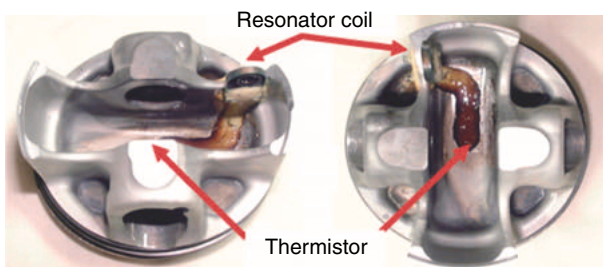


Fig. 2 Illustration of actual piston with measurement device

Table 1 Engine specifications

Engine type	Water cooled, DOHC 4-stroke 4-cylinder, gasoline
Bore × Stroke (mm)	67 × 42.5
Displacement (cm ³)	599
Compression ratio	12 : 1
Max. engine speed (r/min)	15 300
Piston cooling jet (mm)	φ0.9
Oil pressure (kPa)	590

計測をおこなった。以下に計測事例として、ピストン裏オイル冷却、燃料冷却、点火時期の効果について説明する。

3.1. ピストン冷却

点火時期は各回転とも MBT、空燃比は出力が最大となる 13 付近とし、ピストン裏側冷却用のオイルジェット有無について比較した。冷却ジェットはノズル径が 0.9 mm で 590 kPa の油圧をかけている。そのときの測温結果を Fig. 3 に示す。

ピストン冷却用オイルジェットの効果は大きく中速回転域で実に 50°C あまりの低減効果がある。一方で高速回転域ではその差が徐々に小さくなり、ついには効果がなくなっている。理由は非常に高速回転条件下では冷却ジェットが存在しなくてもピストン下部の潤滑油の状態はオイルジェット付きと同様に激しくかくはんされているためではないかと考えられる。

3.2. 燃料冷却

空燃比をストイキよりリッチにし、燃焼に関与しない燃料の気化潜熱を利用してピストン温度を下げる手法は古くから焼き付き防止、ノッキングによるピストン溶損の予防、レースにおいては過酷な条件下での運転中にピストンを冷やして残りの周回での延命効果をねらうなど、経験的におこなわれてきた。

一例として空燃比の代わりに排出ガス中の CO 濃度を変化させたときのピストン温度を回転速度 11 700 と 15 000 r/min について Fig. 4 に示す。

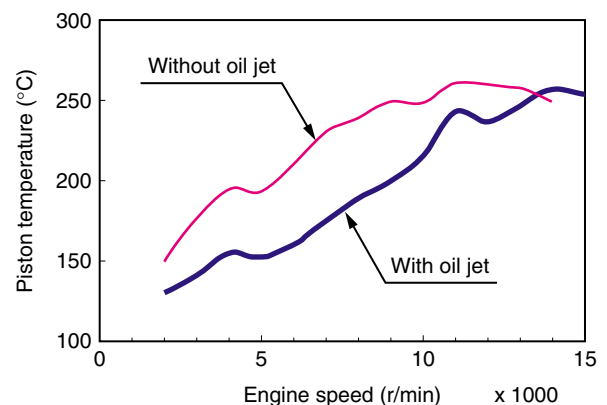


Fig. 3 Effect of piston cooling jet

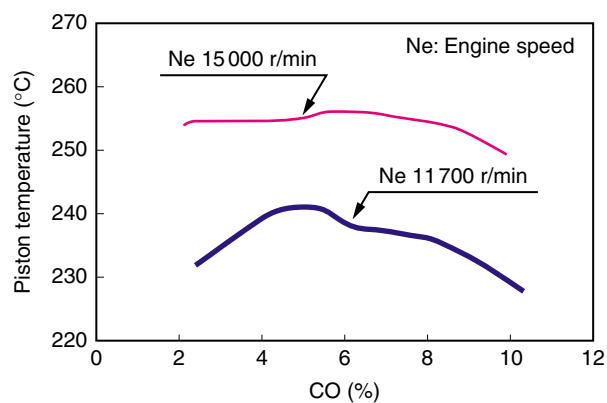


Fig. 4 Piston temperature against CO concentration

Fig. 4 からピストンの温度は回転速度が比較的低い 11 700 r/min のときは CO 濃度の影響を大きく受けるが、速度が高い 15 000 r/min になると CO 濃度に対して鈍感になっていることがわかる。

従来、経験的におこなわれてきた CO 濃度をリッチにしてピストンの耐久性を確保するという手法は、こと高速域のピストン中央部の温度に関するかぎりあまり効果的ではないという結果となった。

Fig. 5 は Fig. 4 のデータを図示平均有効圧で整理し直したものである。ピストン温度は図示仕事にほぼ比例して上昇するが、CO 濃度をリッチにすると 11 700 r/min ではピストン温度は急激に低下するのに対して 15 000 r/min では緩やかに低下する。一方、Fig. 5 の図中で丸で囲んだところのように、リーンにするとピストン温度はほとんど変化しない。

3.3. 点火時期の影響

Fig. 6 に点火時期を変化させたときの筒内最大圧とピストン温度の関係を 3.2. 節と同様にエンジン回転速度 11 700 と 15 000 r/min について示す。

点火時期を進角させると最大圧発生クランク角が上死点に近づき最大圧は高くなる。そのとき回転速度が中速の 11 700 r/min では最大圧同様に点火時期の進角に伴ってピ

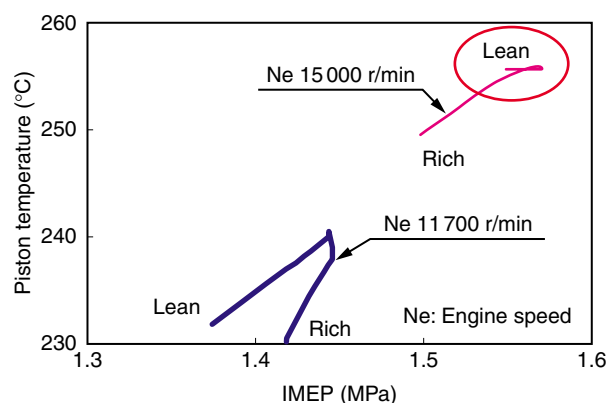


Fig. 5 Fuel cooling effect

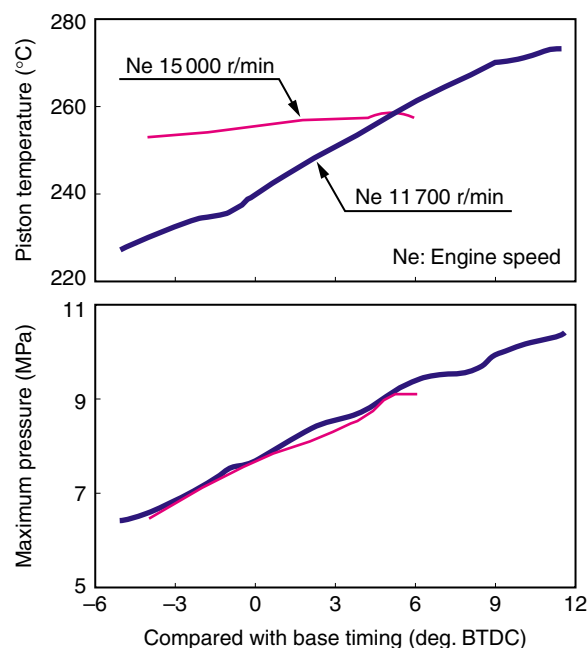


Fig. 6 Piston temperature and maximum pressure against ignition timing

ストン温度は上昇するが、高速の 15 000 r/min では点火が遅角状態からすでに充分温度は高く、さらに進角させて筒内圧が上昇しても、ピストン温度はそれほど顕著には上がらない。

また、Fig. 7 に示すように点火時期によって図示平均有効圧も変化するが、Fig. 5 と同様に 15 000 r/min のピストン温度は筒内圧や図示仕事に対してやはり影響が小さい。

以上述べてきたように、ピストン温度は冷却オイルジェット、空燃比および点火時期による筒内最大圧あるいは図示平均有効圧に大きく影響されるが、それはエンジン回転速度が 11 700 r/min 程度の場合であって、15 000 r/min のような高速回転ではこの限りではない。この原因が高速時のピストン温度計測時の問題によるものか、あるいはピストンへの入熱とピストンからの放熱とのバランスが原因で起こる必然的な理由によるものかを次章に考察する。

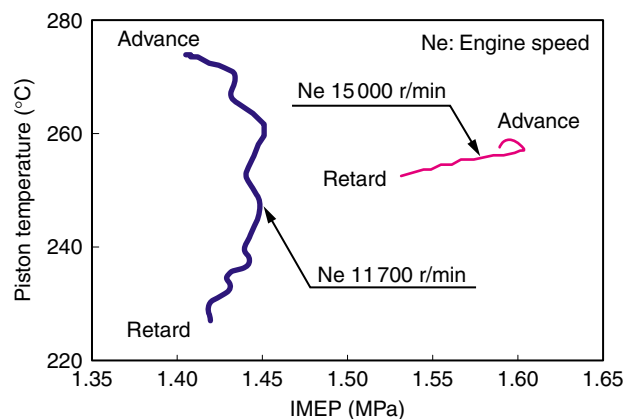


Fig. 7 Piston temperature against IMEP

4. 入熱と放熱のバランスについての考察

今回の測温は各パラメータを変化させてからピストンが定常温度に達する 60 s 後に実施した。この状態は熱伝達も定常状態となり、ピストンへの熱収支は±0である。空燃比や点火時期、回転速度といったパラメータを変化させると筒内温度とともに入熱の熱伝達率が変化すると考えられる。

一方、オイルジェットの有無や回転速度といったパラメータは放熱側の熱伝達率を変化させると考えることができる。Fig. 8は放熱側の熱伝達率を一定として、入熱側の雰囲気温度を変化させたときのピストン温度変化を入熱側の熱伝達率違いで、Microsoft Excel を用いてシミュレートしたもののだが、当然ながら入熱側の熱伝達率が大きいほどピストン温度の変化が敏感になることがわかる。

ピストン温度は入熱量と放熱量のバランスによって決定されるので、中速度域で空燃比や点火時期の変化によりピストン温度変化が顕著となり、高速度域では逆にピストンの温度変化が緩やかになる現象は次のように説明できる。

中速度域では、トルクの増大と高速域に比べて熱伝達 1 サイクルあたりの入熱時間が充分あるため入熱量の変化に対してピストン温度が敏感になる一方、放熱量は雰囲気温度との差に影響されるため結局入熱側の熱伝達率に支配される。逆に高速域ではトルクの減少と 1 サイクルあたりの入熱時間が減少するために入熱側の温度変化に対してピストン温度が鈍感になる結果放熱側の熱伝達率が増大側で安定支配領域に入ったためと考えられる。

高速域で冷却オイルジェットなしでも温度が上がらなくなったのは、潤滑油によるかくはんがオイルジェットによる冷却と同等にピストン冷却に作用したので多少回転速度が変化して入熱量が変化しても放熱側の熱伝達率が増大側で安定支配領域に入ったためと考えられると説明ができる。

5. 結論

非接触式電磁誘導法を利用したピストン測温技術を完成させ、使用回転速度の高い二輪車用エンジンに適用して

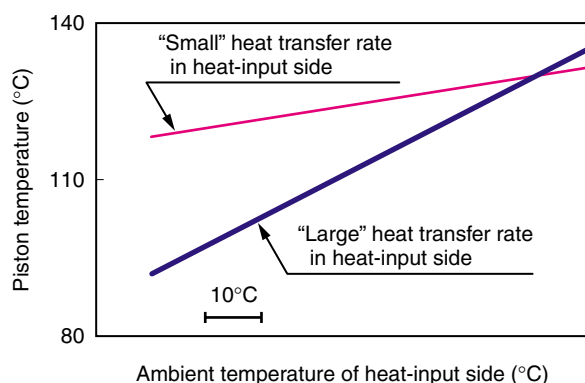


Fig. 8 Piston temperature against heat transfer rate

15 300 r/min までの計測が可能になり、10 時間以上の耐久信頼性を確保することができた。本測定法を用いて実働運転中のピストン温度をリアルタイムで測定した結果以下のような知見を得ることができた。

- (1) ピストン冷却用オイルジェット、空燃比、点火時期といった代表的なパラメータがピストン温度に及ぼす影響を定量的にとらえることができた。
- (2) 本測定法を用いて測定した温度は回転速度が 11 700 r/min のような中速度域のときは各パラメータに応じて変化するが、15 000 r/min のような高速域になるとパラメータを変化させても鈍感になりあたかも飽和状態に達したかのような結果になった。
- (3) この原因解明のために数値計算を試みたらピストンへの入熱時と放熱時の熱伝達率が変化し、中速度域では入熱側熱伝達率が支配する領域である反面高速域では放熱側熱伝達率が支配する領域と考えられると説明できる。

参考文献

- (1) 高松英俊, 金澤卓也: 高速ガソリン機関のピストン温度測定法, 自動車技術会学術講演会前刷集, No.982, p.25-28(1998)
- (2) 松井淳, 志村節, 辻直樹, 森次通泰, 加藤直也: 電磁誘導法を用いたピストン温度測定技術の開発, 自動車技術会学術講演会前刷集, No.47-00, 20005199(2000)
- (3) 稲見規夫, 竹内一雄, 加藤哲也, 大崎理江: 超高速(CART)エンジンにおける実動時のピストン温度計測, 自動車技術会学術講演会前刷集, No.89-02, 20025464(2002)
- (4) 松浦健児: 電磁誘導法による内燃機関運動部の諸測定に関する研究—主としてロータリエンジンのアペックスシールの挙動—博士論文, p.110-124(1993)
- (5) Meinrad, E., Edward, K.: An Evaluation of the Potential Performance Gain From Leakage Reduction in Rotary Engines, SAE Paper, 730117(1973)
- (6) Robert, M., Gray, L.: Advanced Stratified Charge Rotary Engine Design, SAE Paper, 890324(1989)

■ 著 者 ■



鈴木正剛



植田真悟