

無線技術を応用したピストン温度測定に関する研究

Piston Temperature Measurement System used RF-MEMS

土屋 高志*

Takashi TSUCHIYA

It is extremely important to save energy for prevention of global warming. New generation automotive engine is made up by high compression ratio and low friction by small engine for better fuel consumption.

However with higher compression increase the piston's temperature exceeds a melting point of the aluminum and a piston is damaged. The measurement of good piston temperature of the precision is very important for higher compression piston and good fuel consumption.

In this paper we made the measurement of good piston temperature of the precision by RF-ID systems.

1. 研究の目的

エンジンを小型・高出力にするためには、エンジンの高速化が必要であり、高速化するためにピストンを軽量化し、慣性力を抑えるということが重要である。現在、ピストンの軽量化をおこなうために、ピストンの材質は軽く、熱伝導率の大きいアルミニウム合金が使用されている。アルミニウムの特性として、加工性・表面処理性・耐食性・溶接性・電気伝導性・熱伝導性などが優れているが、欠点としては融点が660℃と低いという問題がある。エンジンの省燃費化を進めるためには、摺動抵抗（フリクション）の少ない小型エンジンを高い高圧縮比化をおこない高い比出力を得ることが最も良い方法であるが、高圧縮比化を進めるに伴いピストンの熱負荷は上昇し、ピストン温度がアルミの融点を超えてピストンが破損するという問題が発生する。このようなトラブルを回避して、最適な状態での運転ができるように、ピストンに対する熱負荷を設定するためにも精度の良いピストン温度の測定は非常に重要であると言える。

本研究では、ピストンの温度を精度良く測定するため、近年発展のめざましいRF技術（デジタル無線技術）を応用し、軽量かつ信頼度の高い温度測定システムを構築することを目的とする。

2. 過去に実施された測定方法

2.1 リンク方式

リンク方式は、英国のA. E. Dやドイツのカール・シュミット社などで開発されている。装置としては、温度センサを取り付けたピストンからリード線によって、エンジンの内部から外部に取り出せるようにリンクをピストンに取り付けて、温度を測定する方法である。そのリンクを外部に取り出すために、クランク室に穴を開ける必要がある。ピ

ストンに取り付けられた温度センサからリンクおよびリード線は、線の切断、絶縁被服のはくり、リード線の引張り・圧縮・曲げおよびねじれなどの変形が起きるといった問題があり、最も工夫が必要である。装置としてピストンが往復運動をしているので何らかの影響があり、高速回転での運転は不可能である。

2.2 燃焼貫通法

前項のリンク式ではリンクをクランク室に取り付けるため、クランクケースが狭小なもの、特に二サイクルエンジンには応用できないが、燃焼室貫通法は、クランク室に関係なく使用することができる。装置としては、ピストン頂面にロッドを立てて、燃焼室を貫通させることにより、熱電対を導出し、外部にリンクを取り付ける方法である。ロッドは、燃焼室内を往復運動するので、耐熱性と素線の接着剤の耐熱性が使用限界あるという問題がある。

また、外部でリンクを使用するため、リンク式と同様に高速回転での運転が不可能であり、またピストンが拘束されているので、ピストン揺動時の測定が不可能である。

2.3 電磁誘導法

二つのコイルを用いて磁界の変化を利用して伝送することによって無線伝送する方法であり、トヨタCART等で使用された実績がある。この実績のある電磁誘導法の装置としては、温度センサは小型のサーミスタを用いて、大きさはセンサ部でφ0.8である。ピストンおよびライナ部に送受信コイルを取り付け、ライナ側送信コイルに高周波を印加し、ピストン温度によりピストン側コイルのインピーダンスが変化することによって、受信側コイルの出力が変化する。これによって温度を取り出すものである。

非接触で信号を取り出す方法であるため、高回転での測定が可能である。又、温度と電磁誘導量の関係が解っていれば、リアルタイムでの温度測定が可能であるが、ピスト

ン側コイルとライナ側コイルが重なっている時のみ測定が可能となり連続したデータが測定できないという問題や、コイル部の温度によるドリフトが大きいという問題が残されている。

2.4 硬度法

混み入った箇所や密閉空間、小部品等での温度測定としては、温度により硬度の変化する金属をピストンに埋込み、運転後に金属の素材から硬度の度合いを測定することで、実際の温度を測定する。一定時間運転することで最高温度のみ測定が可能である。

2. アクティブ型温度測定システムの仕様

本研究では、市販されている軽量かつ小型の汎用無線モジュールを使用して小型で軽量の測定器を製作した。

構成した温度測定システムは Fig. 2.1 に示すようにセンサ・A/D変換器・送信機・受信機に大別される。個々の仕様については下記に示す。

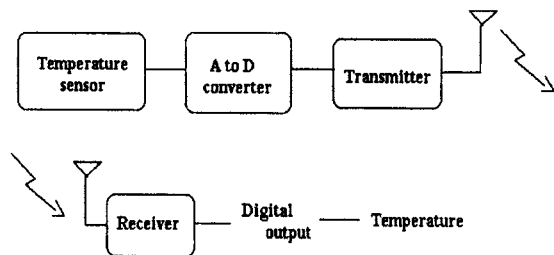


Fig. 2.1 システム構成図

2.1. 送信機仕様

送信機には一般的にノイズに強いとされるパルス幅変を用いたデジタル通信方式のアイテック (株) 製 iTX315A 型を使用した。(Fig. 2.2)

送信機仕様としては、FSK 変調方式の微弱電波送信モジュールを使用し送信周波数 315MHz, 出力-25dBm 以上、消費電力 2mA, 定格電圧 3V である。

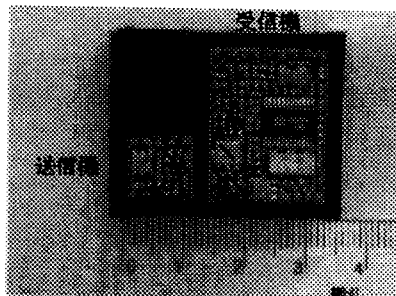


Fig. 2.2 送信機ユニット外観

2.2 A/D 変換器仕様

A/D変換器には4チャンネルの入力を持ち入力電圧をTTLレベルのデジタル出力に変換することができるマキシム社製MAX6691型A/D変換ユニットを用い、サーミスタからの出力電圧と基準電圧の比較により温度を推定し、各チャンネル順にPWM変換をおこなう。チップの動作温度の範

囲は、-55℃~+125℃である。

MAX6691 は、それぞれのサーミスタと外部固定抵抗器 (R_{EXT}) は、MAX6691 の内部基準電圧 (V_{REF}) で運転されて分圧器を形成して V_{REF} と R_{EXT} を通した電圧を PWM デジタル出力 (TTL レベル) に変換させる。

このA/D変換器は、それぞれ4つのサーミスタと固定抵抗器によって内部電圧から分圧器を形成され、パルスに変えられるため、パルス幅とR_{EXT}およびサーミスタ抵抗 (R_{TH}) の関係を次式で表すことができる。

$$\frac{T_{HIGH}}{T_{LOW}} = \frac{V_{EXT}}{V_{REF}} - 0.0002 = \frac{R_{EXT}}{R_{EXT} + R_{TH}} - 0.0002$$

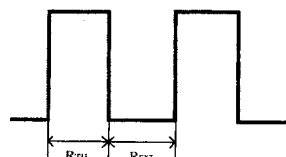


Fig. 2.3 A/D 変換のデータ出力信号

2.3 温度センサ仕様

温度センサには立山科学工業 (株) 製ラジアル型サーミスタを使用した。サイズは約φ2.0×4.0mm の円筒形、質量 0.4g, 20℃で約 16MΩ, 200℃で約 23.4kΩ の逆特性をもつサーミスタ (NTC サーミスタ) である。(Fig. 2.4)

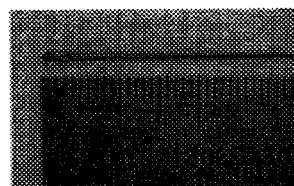


Fig. 2.4 サーミスタ

2.4 送信機ユニット

送信機・A/D 変換器を組み合わせた物を Fig2.5 に示す。サイズは縦 14×横 14mm, 厚さ 5mm, 質量は約 1.3g となっており、非常に小型・軽量となっている。

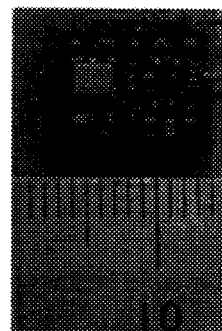


Fig. 2.5 送信機ユニット外観

2.5 受信機仕様

受信機は、送信機と対になるアイテック (株) 製の iRX315A 型を使用した。受信機仕様としては、FSK 復調、シングルスーパーヘテロダイン方式の受信機を用いた。電源電圧は 3V, サイズは約 24×18mm, 標準復調速度 9600bps, 単信方式の受信機を用いた。

2.6 電源仕様

電池は松下電器製 BR425 ピン形リチウム電池を使用した。電圧 3V、容量 25mAh、サイズはφ4.2×25.9mm、質量は約 0.6g と非常に小型かつ軽量である。(Fig. 2.6)



Fig. 2.6 リチウム電池

3. ピストン温度測定システムの基本特性試験

3.1 データ出力確認試験

本研究のシステムでは送信機から受信機の間でパルス幅変調によりデータを送信しており、受信機からの出力波形を Fig. 3.1 に記す。温度センサは 4 箇所分接続してあり、No1 から No4 までが順次送信されている。No1 センサの判別の為に No1 の立ち上がりの前に 5μ秒のブルダウン信号が入っている。また、温度の判定はブルアップ時間とブルダウン時間との比率となっておりブルダウン時間は一定で、5m 秒としている。本研究では 238℃ の場合に (ブルアップ時間)/(ブルダウン時間)=0.5 としている。この比率はピストン温度により変化するサーミスタ抵抗値と基準抵抗との比率と等価となっており、測定を希望する温度抵抗値を中心として基準抵抗値を設定することにより温度感度の良い測定が可能となっている。

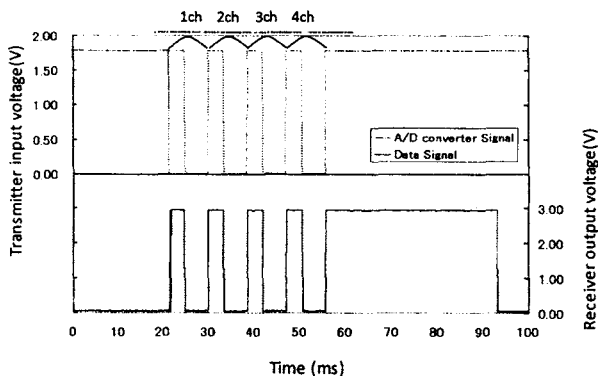


Fig. 3.1 データ出力確認試験結果

3.2 電源電圧試験

電源電圧を徐々に下げることで電源電圧低下によるシステムダウンを確認した。結果、電圧が 2.01V 以下になると PWM 変換誤差が発生し、1.93V 以下で送信電波が停止、1.91V 以下で A/D 変換チップからの PWM 変換が停止した。結果、送信機側電圧としては、最低 2.01V 以上が必要であり、システム動作の電源電圧としては 2.01V 以上が必要であることがわかった。

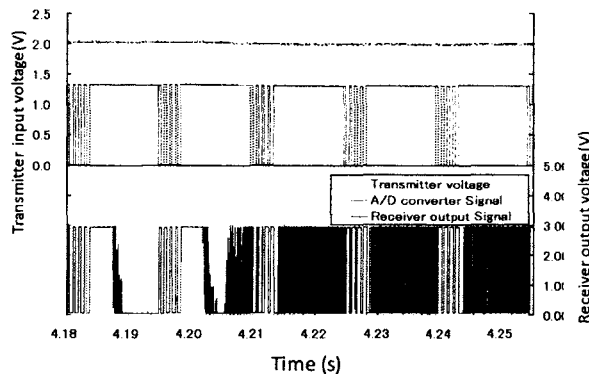


Fig. 3.2 電源電圧試験結果

3.3 温度直線性試験

サーミスタと T 熱電対を同位置に取り付けて、半田ごとの温度 (温度範囲は 25~370℃) を測定した。結果は、Fig. 3.3 に示すように 100~370℃ までは、ほぼ直線に保ち温度誤差は ±4℃ 以下で、100℃ 以下では PWM 応答性の問題により測定不能であったが、実際の熱負荷が問題となるピストンの温度は、過去の温度測定より 150℃ 以上であるので本システムでの測定には問題ないと考えられる。

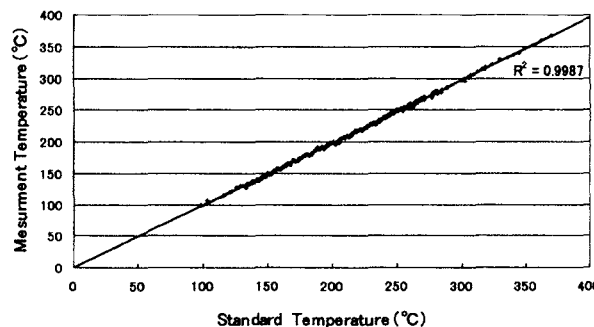


Fig. 3.3 温度直線性試験結果

3.4 周囲温度影響試験 (周囲によるドリフト試験)

本システムの送信機ユニットに温度計を当て、ヒータにより周囲温度を温めデータ出力の変化を確認した。また、各周囲の温度を 50℃・70℃・80℃で行い、各 7 回行った。結果、送信機ユニットの周囲温度が 80℃でもデータの変化はなく、各周囲の温度による平均温度誤差は ±1℃ 以下であった。周囲を温めてもシステムの動作を確認することができたので、ピストンに直接、送信機の取付けが可能であると考えられる。

3.5 連続測定時間確認試験

送信機ユニットには、リチウム電池を取り付けることでピストンの温度を測定するため、リチウム電池を 1 本使用し、データを測定できる時間の測定を行った。送信機ユニットから温度信号が受信機に一定の間隔 (Fig. 3.4) で入るようになっており、結果、信号の乱れが発生する時間は約 9 時間であった。この時点で電池の電圧は 3.3V から 2.4V まで低下していた。

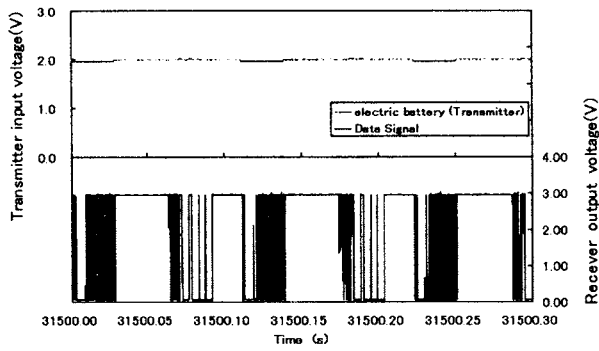


Fig. 3.4 データ出力可能時間試験結果

4. 電池式温度測定システム実機温度測定結果

送信機ユニットをピストンに取り付け、本システムが測定可能であるか確認するために小型エンジンを使用してピストン温度の測定を試みた。

供試エンジンには、富士重工製汎用4サイクル単気筒小型ディーゼルエンジンを使用し、ピストン径φ75mm、行程60mm、定格出力(出力軸) 3.1kW/1800rpmである。その主要諸元を以下のTable 4.1に示す。

Table 4.1

名称	DY23-2BS
冷却方式	空冷
シリンダ数	1
ボア×ストローク	70×60 mm
排気量	230 cc
圧縮比	21
最大出力(出力軸)	3.1kW/1800rpm
最大トルク(出力軸)	21.6N・m/1150rpm

送信機システムの取り付け位置は Fig. 4.1 に示すようにピンボス部横付近に耐熱接着剤により固定している。

また、送信機用のピン形リチウム電池は、送信機側面に取り付けたホルダにより送信機およびピストンに固定し、耐熱はんだにより配線を固定している。

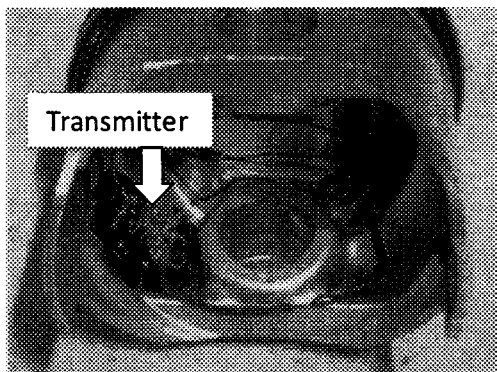


Fig. 4.1 送信機ユニット取り付け位置

温度の測定位置は Fig. 4.2 のように、ピストンの中央(燃焼室ホットプラグ部中央)・スラスト側 2 点(排気弁側と吸気弁側)と反スラスト側 1 点(上面より見て右側)の計 4 点である。

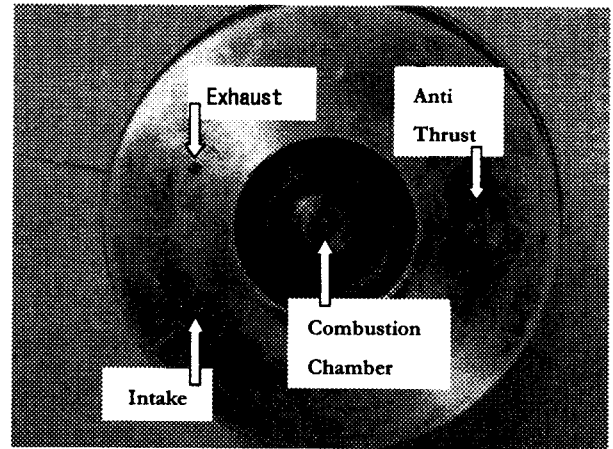


Fig. 4.2 サーミスタ取り付け位置

測定項目は、ピストンの4ヶ所・吸気温度・潤滑油温度・排気温度・エンジン回転数としている。

受信機ユニットは Fig. 4.3, Fig. 4.4 に示すようにクランク軸横側(反スラスト側)のクランクケース内部に構造用接着剤により接着した。また、クランクケースにはφ5.0の貫通穴をあけることにより電源用配線および信号用配線をスタータモータ裏側より外部に導出している。

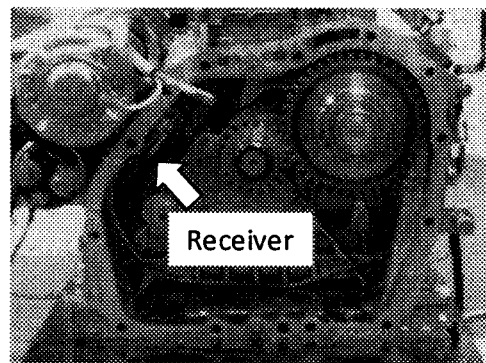


Fig. 4.3 受信機ユニット取り付け位置

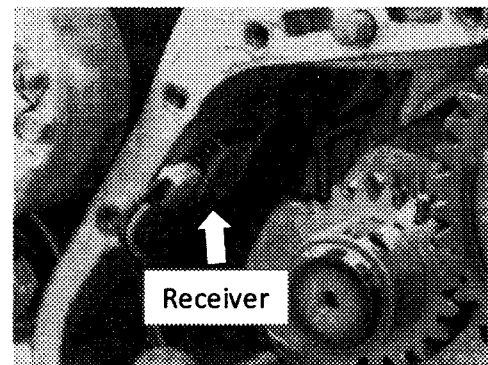


Fig. 4.4 受信機ユニット取り付け位置詳細

実機試験の外観を Fig. 4.5 に示す。

受信機には定電圧電源から電気が供給され、受信機からの

信号はデータローガによりサンプリング・保存している。

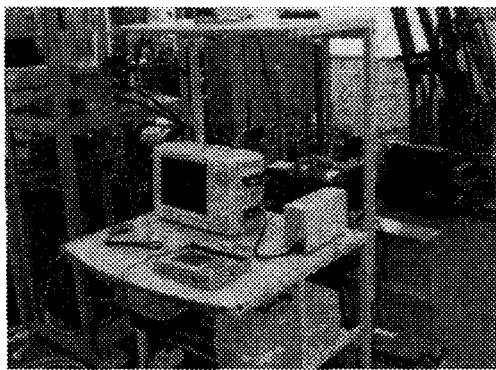


Fig. 4.5 実機試験装置外観

5. 実機試験結果および考察

エンジンを始動し、無負荷最高回転数まで回転数を上昇させて温度を測定した。温度測定データは、温度変換、データとび等の問題は発生せず、全データの取得が可能であった。

Fig. 4.6 にエンジン始動から 3500rpm までの測定結果を、Fig. 4.7 に 3500rpm 一定回転で定格負荷を投入した場合のデータを示す。Fig. 4.6 および Fig. 4.7 より、エンジンの始動時から定格出力が一定になるまでピストンからデータ信号が連続して測定できていることがわかる。

この時のデータ信号を温度に換算した結果が Fig. 4.8 である。ピストン温度は、エンジンが始動してから急激に上昇し定格回転でほぼ一定の温度になることがわかった。この時のピストンの最高温度は、排気弁側の 315℃であり、定格負荷時は燃焼室中央の温度と排気弁側の温度がほぼ同一になることがわかった。また、吸気弁側と反スラスト側の温度は一定負荷の場合ほぼ同じ温度となり、排気弁側の温度と約 20℃の差がある事がわかった。

この場合新気の流れが吸気弁から反スラスト側方向に流れ燃焼室内に流入し、燃料が噴射され燃焼し燃焼室から排気弁を介して排気されることを示しており、一般的なターボタイプ直噴ディーゼルエンジンの燃焼形態と一致している事を推定することができる。

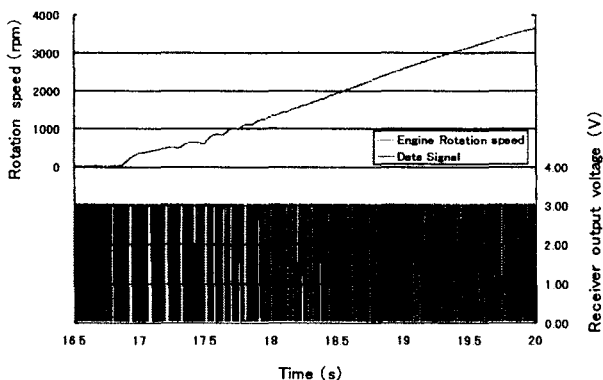


Fig. 4.6 実機試験結果 (始動～3500rpm)

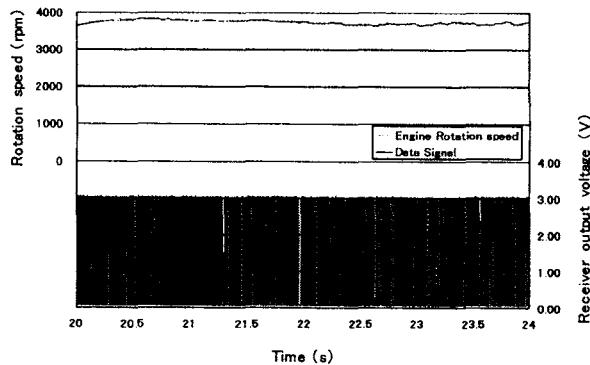


Fig. 4.7 実機試験結果 (3500rpm 定格運転)

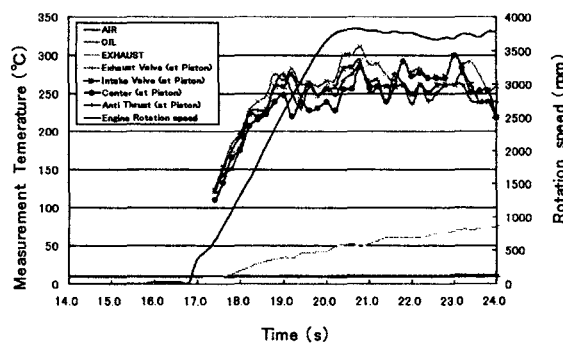


Fig. 4.8 エンジン始動時のピストン温度変化

5. まとめ

本測定システムを使用することにより、軽量かつ安価なエンジン実動時のピストン温度測定システムを使用して、過去、測定することが困難であったピストン温度データをピストンの挙動に影響を与えることなく連続して測定することに成功した。また、問題点としてはデータ測定時間が8時間以内に限定されており、今後は無電源システムの検討をおこなう必要がある。

参考文献

- (1) 独立行政法人 環境再生保全機構: 大気環境の情報館, web ページ, (<http://www.erca.go.jp/taiki/siryou/index.html#5>)
- (2) 古浜庄一ほか: エンジンの温度測定, 日本機械学会 JSME S007 (1986), pp1-3, pp. 70-78
- (3) 福島 淳一, 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 Vol. 58, No. 7 (2004), pp. 69-73
- (4) アイテック株式会社, 汎用無線モジュール, web ページ, (<http://www.itec-corp.co.jp>)
- (5) マキシム・ジャパン株式会社, MAX6691, web ページ (http://www.japan.maxim-ic.com/quick_view2.cfm/qv_pk/3256)
- (6) 立山科学工業株式会社, BM 型サーミスタ, web ページ (http://www.tateyama.jp/product/catalog/2008/pdf/blbmcl_28p29p.pdf)