

2 タイプ宇宙用温度計測システム

○大西晃 太刀川純孝 (宇宙研/JAXA)

Two types of temperature measurement systems for space use

* A. Ohnishi and S. Tachikawa (ISAS/JAXA)

Abstract— Two types of temperature measurement systems developed for space use are described. One is the wireless multichannel temperature measurement system, it's possible to acquire 3200 channels in 2 minutes. The system is composed of temperature sensors, sensor modules, a base unit with antenna and a PC. The temperature range for the measurement is from 153K to 392K. And the other is the no contact wide range temperature measurement system using Christiansen effect that is emissivity is unity at the Christiansen wavelength. The system is consists of a standard sample with Christiansen effect, a thermopile module, a narrow band pass filter with Christiansen wavelength and a dimmer filter. In the temperature range is from 173K to 1500K.

Key Words: wireless multichannel measurement, Christiansen effect, wide range measurement

1. はじめに

ここでは、宇宙機やロケットの設計および開発において必要不可欠な温度計測システムについて、2 例述べる。

宇宙機の熱設計では、その熱設計を検証するために宇宙空間を模擬した熱真空試験が行われる。それは、大型の真空チャンバ内に設置された宇宙機に、外部から時々刻々変化する太陽光、太陽光の地球表面での反射、地球自身の赤外放射等の熱入力を与え、その時の温度変化を測定し、熱設計と比較・検証を行う。温度センサは重量 1t を超える宇宙機では 500CH 以上が使われる。そのため、宇宙機に接続された熱電対による熱損失や測定の不確かさ等から熱設計の信頼性が劣ること、加えて多数の測定点が必要なことから設備経費等のコストが高価になるなどの問題がある。ここでは、これらの課題の改善を図ることを狙って、ワイヤレス・マルチチャンネル温度計測システムを提案する。

また、ロケットの飛翔性能を評価する燃焼試験では、低温から高温の広範囲の温度計測システムが要求される。熱電対では複合材料や高温表面の温度測定において不確かさが生じる。また、放射温度計では測定試料表面の放射率の変化により、正確に温度が測れない等の問題が起こる。ここでは、任意の波長において広い温度範囲に渡り放射率が常に 1 になるクリスチヤンセン効果を用いた広レンジの温度測定が可能な放射温度計を提案する。

2. ワイヤレス・マルチチャンネル温度計測システム^{1,2)}

2.1 システム構成

ワイヤレス・マルチチャンネル温度計測システムは PC 付ベース・ユニット、センサ・モジュール、温度センサから構成される(宇宙研と共同開発)。以下に各装置の機能について述べる。また Table 1 にその性能をまとめて示す。

a) ベース・ユニット (Base unit)

ベース・ユニットはデジタル温度の取得・処理装置、送受信機、アンテナ等から構成される(Fig.1)。機能は各温度センサの温度と ID 管理、センサ・モジュールとの無線によるデータの交換、

および取得したデータの RS-232C による PC への送付等が行われる。PC ではデータの処理、保存、表示が行われる。



Fig. 1 Base unit.

Table 1 Performance of system components.

• Base unit	
Frequency	312.23(Rx), 312.31(Tx) (MHz)
• Sensor module	
Frequency	312.23(Rx), 312.31(Tx) (MHz)
Size	101×32×13(mm)
Weight	37(g)
Range	-20~+60(°C)
Channel	Max 25CH(four branch connector)
Battery	3(V)
• Temperature sensor	
Type	Flip chip / T092
Size	2×1.4×0.7 / 5×5×4 (mm)
Range	-125~+125(°C)
Resolution	0.0625(°C) /
Accuracy	±0.5(°C)

b) センサ・モジュール(Sensor module)

センサ・モジュールはデータ処理装置、内臓アンテナ付送受信機、バッテリーからなる(Fig.2)。機能は各温度センサから取得されたデジタル温度データとIDを無線でベース・ユニットに送る。センサ・モジュールは小型(101×32×13mm)、軽量化(37g)が図られ、広い温度範囲(-20~+60℃)と真空環境の使用に耐える。バッテリーの寿命は温度センサの数に依りし1pcsで約300日、25pcsでは50日である。

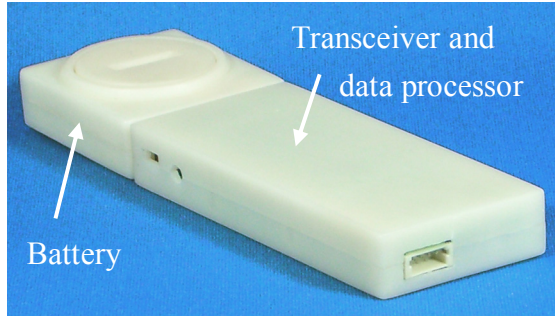


Fig. 2 Sensor module.

c) 温度センサ(Temperature sensor)

温度センサはフリップチップ(Fig.3)とTO92パッケージの2タイプの使用が可能である。フリップチップは温度範囲-125~+125℃(単体で温度校正)、分解能0.0625℃、精度±0.5℃である。各温度センサにはIDナンバーが与えられている。寸法はフリップチップで2×1.4×0.7mm、TO92パッケージでは5×5×4mmである。

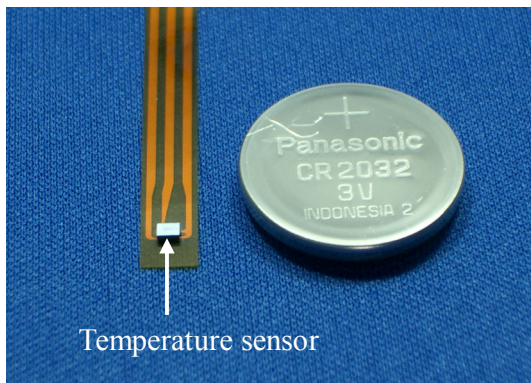


Fig. 3 Flip chip type temperature sensor.

d) システム性能

このシステムはFig.4に示すようにセンサ・モジュールには直接25CHの温度センサの接続が可能で、最大20mまで延長が可能である。配線方法は4端子コネクタを使用して自由な形状を選ぶことができる。1システムはセンサ・モジュール128個を用いて最大3200CHの温度データを2分で処理することが可能である。それは、新しい通信アルゴリズムの開発により、ベース・ユニットと多数のセンサ・モジュール間を同一周波数で、しかも短時間で通信を可能にしている。通信方式は312.23MHz(Uplink)、312.31MHz(Downlink)を採用し、ベース・ユニットのアンテナから10mの範囲で有効である。変調方式はFSK(Frequency Shift Keying)、ベースバンド信号はマンチェスタ符号を使用した。

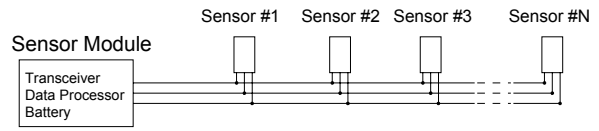
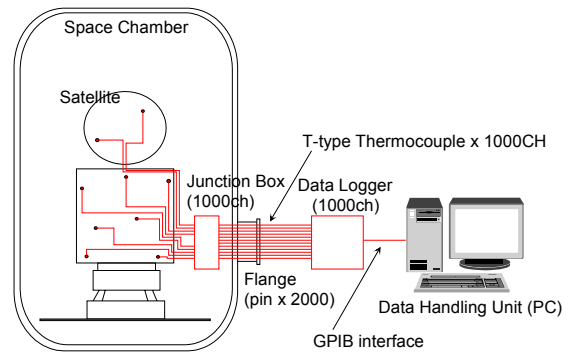


Fig. 4 Plugging chart of sensor module and temperature sensors.

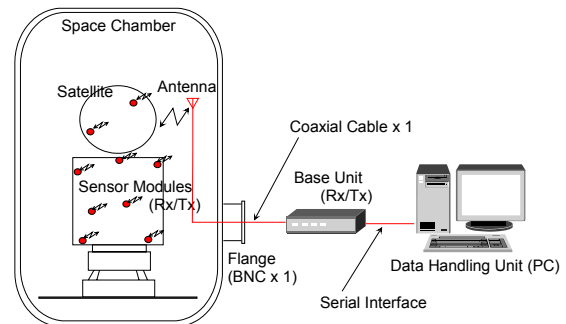
2.2 熱真空試験装置への提案

熱真空試験における温度計測のシステムについて、Fig.5の(a)に従来のシステム、(b)にはワイヤレス・マルチチャンネル温度計測システムをそれぞれ示す。従来のシステムは熱電対センサ、熱電対コネクタボックス、熱電対用真空フランジ、データロガ、PCで構成される。一方、ワイヤレス・マルチチャンネル温度計測システムは前述したようにシンプルな構成となり、従来のシステムに比べ次の利点がある。

- ・ 熱電対が不要になり、熱電対による宇宙機からの熱損失がなくなり熱設計の信頼性が向上する。
- ・ 設計・製造の初期の時点で温度センサや配線等を組み込むことが可能になり、熱真空試験前後で行われている熱電対の貼付け、取外し等の作業がなくなり、時間の短縮とコストの削減が図られる。
- ・ 熱電対コネクタボックス、熱電対用真空フランジ、データロガ等の試験設備が不要になり、設備経費の削減と計測の信頼性の向上が図れる。
- ・ 熱電対の場合、校正は測定系全体で行う必要があるが、温度センサではセンサ単体のみですみ、計測の信頼性が向上する。



(a) Conventional measurement system.



(b) Wireless measurement system.

Fig. 5 Multichannel temperature measurement system.

3. 広レンジ放射温度計測システム^{3,4)}

3.1 クリスマン効果

クリスマン効果を有する物質はクリスマン波長において温度に依存しないで放射率が常に1(反射率は0)になる。

Fig.6はクリスマン効果を示す代表的な物質 ZrO_2 , Al_2O_3 , Si_3N_4 の分光反射率である(室温・大気, 入射角 20°)。 ZrO_2 , Al_2O_3 , Si_3N_4 のクリスマン波長はそれぞれ $12.7\mu m$, $9.5\mu m$, $8.3\mu m$ において示された。 ZrO_2 の場合, 分光反射率0を示さないのは測定のパラッキによるものである。 クリスマン効果は, その他ペロブスカイト系酸化物においても現れている。

Fig.7に ZrO_2 のS偏光の分光反射率の入射角度依存性を示す(室温・大気)。 分光反射率は入射角 $0\sim 30^\circ$ の範囲で, 波長範囲 $12.676\sim 12.707\mu m$ において0を示し, クリスマン効果が確認された。 Table 2はS・P偏光の分光反射率から得られた ZrO_2 , Al_2O_3 , Si_3N_4 のクリスマン効果を満足する入射角度の範囲を示す。

Fig.8に ZrO_2 の分光反射率の $173\sim 300K$ の温度依存性を示す(真空, 入射角 20°)。 波長範囲 $12.645\sim 13.159\mu m$ において分光反射率0を示し, 低温域においてもクリスマン効果が確認された。 また, 分光反射率は低温域では顕著な温度依存性が示されなかった。

Fig.9に ZrO_2 の $573\sim 1182K$ の高温域の垂直分光放射率を示す(真空)。 垂直分光放射率は, Work1では $12.403\sim 12.707\mu m$ の波長範囲で, また, Work2では波長 $12.707\mu m$ でそれぞれ1を示し, 高温域においてもクリスマン効果が確認された。 Work1とWork2の垂直分光放射率の差は, 参照黒体と装置の違いによる影響が現れたものと考えられる。 垂直分光放射率は参照黒体を基準とする分離黒体法により測定された。

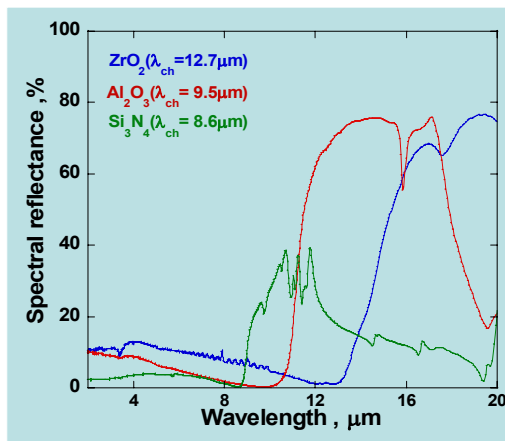


Fig. 6 Spectral reflectance for ZrO_2 , Al_2O_3 , Si_3N_4 at incidence angle 20° .

Table 2 Incidence angle dependence of Christiansen effect.

Sample	P polarization	S polarization
ZrO_2	$10\sim 40^\circ$	$10\sim 30^\circ$
Al_2O_3	$10\sim 30^\circ$	$10\sim 30^\circ$
Si_3N_4	$10\sim 40^\circ$	$10\sim 50^\circ$

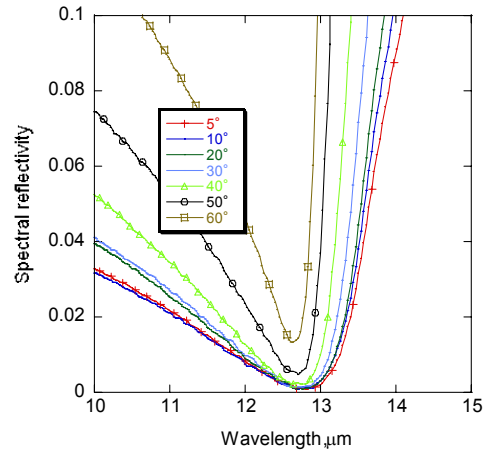


Fig. 7 Incidence angle dependence of spectral reflectance for ZrO_2 at S polarization (room temperature).

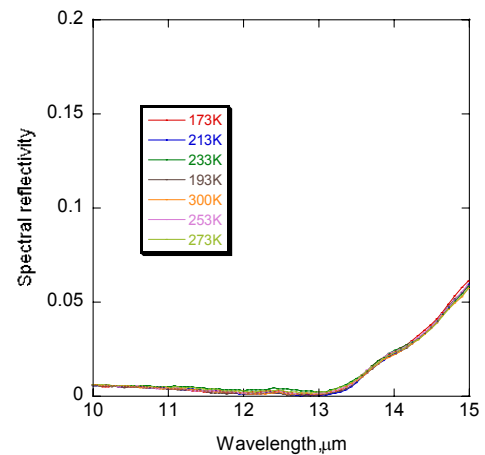


Fig. 8 Low temperature dependence of spectral reflectance for ZrO_2 at incidence angle 20° .

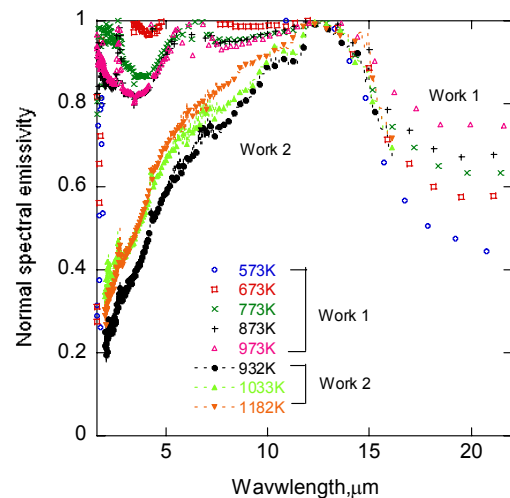


Fig. 9 High temperature dependence of normal spectral emissivity for ZrO_2 .

3.2 広レンジ放射温度計測のシステム構成

Fig.10 に広レンジ放射温度計測のシステムを示す。システムはクリスチャンセン効果を有する基準試料(ZrO_2)、バンドパスフィルタ、ダイヤモンド、サーモパイルから構成される。基準試料は測定試料との熱伝導損失を小さくするため、密着して貼り付ける必要がある。ここでは、基準試料に ZrO_2 を選定した。そのため、バンドパスフィルタは中心波長 $11.96\mu m$ 、透過率約 80%とした。ダイヤモンドは基準試料のふく射に対応して挿入され、サーモパイルの入力を調整する役目を担っている。これにより、1 台の放射温度計測システムで低温から高温の広い温度範囲の計測が可能である。

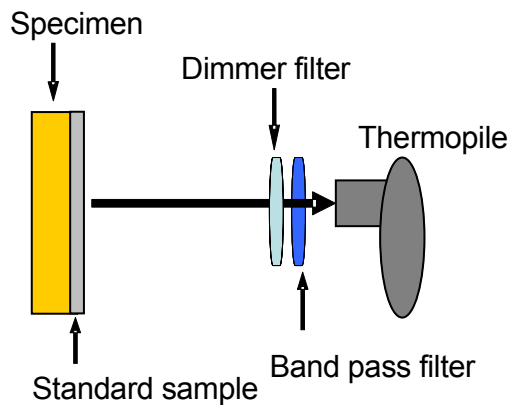


Fig. 10 Wide range temperature measurement system.

4. まとめ

本稿では、宇宙機やロケット等の設計の評価を行う上で必要な温度計測システムについて、ワイヤレス・マルチチャンネル温度計測システムとクリスチャンセン効果を適用した広レンジ放射温度計測システムの2例を提案し、その有効性を示した。

ワイヤレス・マルチチャンネル温度計測システムは、新たな通信アルゴリズムの導入により、温度計測システムの簡素化が図られ、従来の熱電対方式に比べ温度測定信頼性の向上と、設備経費等の削減が達成された。Fig.11 に宇宙機の熱真空試験において具体的に使用されたワイヤレス・マルチチャンネル温度計測システムの例を示す。試験は7日間連続して行われ、その間の動作は正常であった。

広レンジ放射温度計測システムは、温度に依存しないで放射率が常に1になるクリスチャンセン効果を基準試料にし、シンプルなシステム構成でありながら、非接触で、しかも1台の装置で低温から高温の広い温度範囲の測定が可能である。Fig. 12 に筆者らが提案する高温域の垂直分光放射率と光学定数同時測定法の試料表面温度の決定に適用された本測定システムを示す。垂直分光放射率は参照黒体を用いた分離黒体法を基に FTIR で測定され、光学定数、膜厚はエリブノメータで求められる。

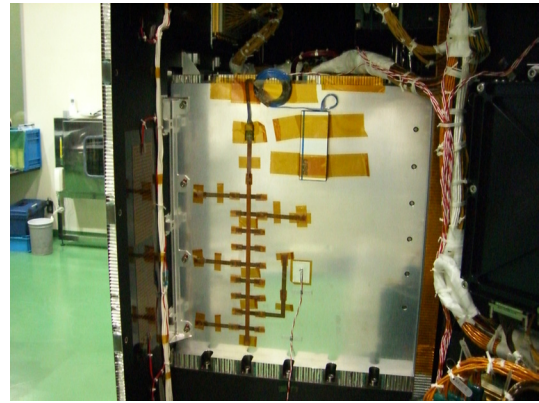


Fig. 11 Temperature sensors and sensor module attached satellite in thermal vacuum test.

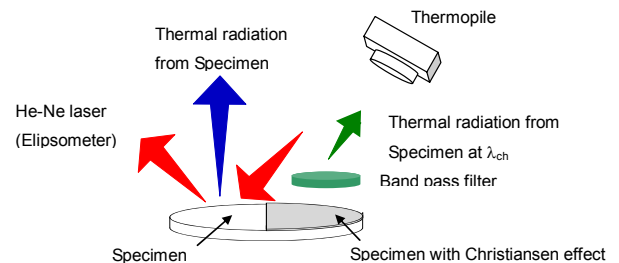


Fig. 12 No contact wide range temperature measurement system.

謝辞

広レンジ放射温度計測システムの開発は、一部谷川技術振興基金の援助を受けて行われました。

参考文献

- 1) S. Tachikawa, A. Ohnishi, H. Nagano, S. Katsuki, T. Tanaka, Y. Saitoh, Design of Wireless Multi-Channel measurement System, SAE Paper No. 2005-01-3027, 35th ICES (2005).
- 2) S. Tachikawa, A. Ohnishi, et al, Wireless 3200 channels Temperature Measurement System, 1st Int. Sympto. on Thermal design and Thermophysical Property for Electronic, (2008).
- 3) D.Yajima, A.Ohnishi and Y.Nagasaka, Simultaneous measurement Method of Normal Spectral Emissivity and Optical Constants at High Temperatures, 14th Sympto. on Thermophysical Properties, (2003).
- 4) K.Nakazawa, A.Ohnishi, Simultaneous measurement Method of Normal Spectral Emissivity and Optical Constants of Solid at High Temperature in Vacuum, ATPC Paper No.134, The 8th Asian Thermophysical Properties Conference, (2007).