

宇宙用熱制御材料の太陽光吸収率の入射角依存性と 全半球放射率の温度依存性に関する測定データ

大西 晃

(2000年12月7日受理)

Measurement Data of Incidence Angle Dependence of Solar Absorptance and Temperature Dependence of Total Hemispherical Emittance Obtained on Thermal Control Materials for Spacecraft

By

Akira OHNISHI

Abstract : This paper presents data on the incidence angle dependence of the solar absorptance and temperature dependence of the total hemispherical emittance obtained by measuring a variety of thermal control materials for space use. The materials measured are thermal control films, black and white paints, optical solar reflectors, metals, and solar cells with cover glass. The incidence angle dependence of the solar absorptance was measured by spectroscopy with an integrating sphere and the temperature dependence of the total hemispherical emittance was measured by a calorimetric method. The data presented in this paper have already been used in the thermal design of scientific satellites of the Institute of Space and Astronautical Science.

要 旨

本稿は人工衛星用の熱制御フィルム、塗料、熱制御ミラー、金属材料および太陽電池素子等に関して、これ迄に測定によって得てきた太陽光吸収率の入射角依存性と全半球放射率の温度依存性等のデータを広く利用できるように整理し、まとめたものである。太陽光吸収率に関しては入射角依存性の測定が可能な可視分光法を、全半球放射率については低温域から高温域の温度依存性の測定が可能なカロリメータ法を採った。これらのデータは宇宙科学研究所がこれ迄に打ち上げた地球周回衛星や惑星探査機の熱設計に有効に使用されてきている。

重要語 : 太陽光吸収率, 全半球放射率, 熱制御材料, 熱設計

1. はじめに

人工衛星の熱設計では、構体や電子機器に用いられる材料の熱伝導率と構造の組み立て方あるいは機器の取り付け方法に依存する接触熱伝導率とで定まる熱伝導モードと、構造体および搭載機器の幾何学的形状ならびにそれら表面の太陽光吸収率と半球放射率とで定まるふく射伝熱モードを共に考慮する。中小規模の人工衛星においては温度ポテンシャルが人工衛星表面の太陽光吸収率と半球放射率の比によってほぼ決まることが知られている。

本稿は、宇宙科学研究所の地球周回衛星や惑星探査機等に用いてきた熱制御材料、熱制御フィルム、塗料、熱制御ミラー、金属材料および太陽電池素子等、計29種類の材料に関して太陽光吸収率の入射角依存性と半球放射率の温度依存性を測定したデータを整理し、まとめたものである。特に、熱制御材料については、それらが紫外線、電子線、陽子線等に耐性のある優れた材料でもあり、今後も幅広く使われていくことが期待されるので、データを利用しやすいようにまとめておくことは有意義と考える。太陽光吸収率の入射角依存性は分光器と積分球を組合せた可視分光法により測定した。入射角は $0 \sim 60^\circ$ の範囲である。また、半球放射率の温度依存性はカロリメータ法により測定した。温度範囲は $173.15 \sim 373.15 \text{ K}$ である。測定の不確かさは太陽光吸収率において -2.0% 、 $+1.0\%$ 、半球放射率では低温域 $\pm 1.5\%$ 、高温域 $\pm 1.0\%$ である。以下、はじめに熱制御材料の諸元を述べ、次いで、太陽光吸収率の入射角依存性と半球放射率の温度依存性の測定データをまとめる。付録に測定装置の構成と測定の不確かさを記す。

2. 熱制御材料

測定の対象とした熱制御材料である熱制御フィルム、塗料、熱制御ミラー、金属材料と太陽電池素子等の性質と諸元を次ぎに述べる。表1はそれらのまとめである。

(1) 熱制御フィルム

熱制御フィルムはポリイミド系とフッ素系のフィルムを基本に、裏面にAlやAg等の金属薄膜を施したもので、必要に応じて表面に透明導電性膜が施される。これらの材料は宇宙環境において耐熱性、耐紫外線性および耐放射線性に優れ、かつ軽量で取扱いが容易である等の利点がある。一般に、多層膜断熱材 (MLI: Multilayer Insulation) の最外層や放熱面材料として使われる。太陽光吸収率、半球放射率の値は熱制御フィルムの膜厚に依存するが、ここでは宇宙用によく用いられる $12 \sim 250 \mu\text{m}$ の膜厚についてデータを整理している。

a. ポリイミド系

- ・ Al蒸着ユーピレックスR (Upilex-R/Al, 宇部興産社製) : ユーピレックスRのフィルム (ガラス転移温度 $T_g = 303^\circ\text{C}$) 裏面にAl蒸着。
- ・ 導電性Al蒸着ユーピレックスR (TCC/Upilex-R/Al, 宇部興産社製, TCC: Transparent Conductive Coating) : ユーピレックスRのフィルム表面に透明導電膜 (スズ添加酸化インジウム) を、裏面にAl蒸着。
- ・ Al蒸着ユーピレックスS (Upilex-S/Al, 宇部興産社製) : ユーピレックスSのフィルム ($T_g = 359^\circ\text{C}$) 裏面にAl蒸着。
- ・ Al蒸着カプトン (Kapton/Al, シェルダール社製) : カプトンフィルム ($T_g = 428^\circ\text{C}$) 裏面にAl蒸着。
- ・ 導電性Ag蒸着ポリエーテルイミド (PEI/Ag, 住友ベークライト社製) : ポリエーテルイミドフィルム ($T_g = 310^\circ\text{C}$) の表面に紫外線劣化防止膜の酸化セリウムと導電膜を、裏面にAg蒸着。

これらのうち、導電膜付熱制御フィルムは、導電膜が機械的に弱いので、取り扱いに注意を要する。

b. フッ素系

- ・ Al蒸着テフロン (Teflon/Al, シェルダール社製) : テフロンフィルム (FEP, $T_g = 260^\circ\text{C}$) の裏面にAl蒸着。

- ・Ag蒸着テフロン (Teflon/Ag, シェルダール社製) : テフロンフィルム裏面にAg蒸着.

(2) 塗料

白色塗料, 黒色塗料および耐熱性塗料の3種類について測定した. 白色塗料は紫外線劣化を招くが, 太陽光の入熱を抑え, かつ放熱能力に優れており, 人工衛星の暴露部に用いられることが多い. 黒色塗料は拡散性の放熱能力に優れているので, 搭載機器表面や人工衛星の内部表面に用いられ, 人工衛星内の温度分布の均一化を図っている. 導電性黒色塗料は熱制御フィルムより機械的強度が大きいので, 人工衛星の外表面に用いられる.

a. 白色塗料

- ・ケミグレイズZ202 (白色Z202, ロードケミカル社製) : ポリウレタン樹脂.
- ・ニッペノバ500アストロホワイト (アストロホワイト, ニッサンペイント社製) : シリコン樹脂

b. 黒色塗料

- ・エアログレイズZ306 (黒色Z306, ロードケミカル社製) : ポリウレタン樹脂.
- ・ニッペノバ500アストロブラック (アストロブラック, ニッサンペイント社製) : ウレタン樹脂.

c. 導電性黒色塗料

- ・ケミグレイズL300 (黒色L300, ロードケミカル社製) : ポリウレタン樹脂.
- ・導電性ブラックカプトン (Black-Kapton, シェルダール社製) : カプトンフィルム表面に導電性黒色塗料.

d. 耐熱性塗料 (耐熱温度約 1000 °C)

- ・灰色チラノコート (宇部興産社製チラノコート,)

(3) 熱制御ミラー

熱制御ミラー (OSR: Optical Solar Reflector) は石英やホウケイ酸ガラスの裏面にAlやAgを蒸着したものである. 太陽光の入射面に取付けられ, 太陽光の入熱阻止と, 人工衛星自身の放熱を促進する役目を担う. 従来, ミラーのガラス板厚は100~200 μm のものが使用されているが, 軽量化を図るため, 最近では, ガラス板厚12 μm の製品も作られている.

- ・熱制御ミラー (12 OSR/Ag, ピルキントン社製) : 板厚12 μm の石英ガラスの裏面にAg蒸着.
- ・導電性熱制御ミラー (TCC/200 OSR/Ag, 日本電気ガラス社製) : 板厚200 μm のホウケイ酸ガラスの表面に透明導電 (添加酸化インジウム) を, 裏面にAg蒸着.

(4) 金属

バフ研磨処理の異なるAl, ポリイミド系熱制御フィルムにAl蒸着したもの, メッキ処理のAg, アルコール洗浄のSUS304について測定している.

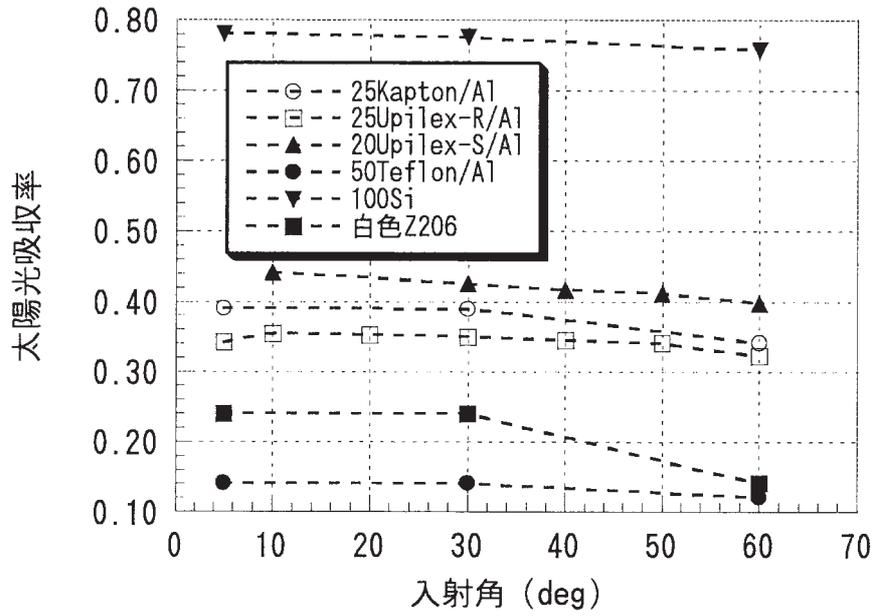
- ・Alバフ研磨 (Alバフ研磨A, B).
- ・ユーピレックスRフィルム表面にAl蒸着 (Al蒸着).
- ・Agメッキ処理 (Agメッキ).
- ・アルコール洗浄SUS304 (SUS304).

(5) 太陽電池素子

太陽電池素子の太陽光吸収率, 全半球放射率のデータは熱設計を行う上で必要である. Si, GaAs, Inpの3素子にカバーガラスを貼り付けた試料について測定した.

- ・ホウケイ酸カバーガラス付Si (100 Si, シャープ社製) : 100 μm ホウケイ酸カバーガラス (日本電気ガラス社製)
- ・石英カバーガラス付GaAs (50 GaAs, 三菱電機社製) : 50 μm 石英カバーガラス (ピルキントン社製)
- ・ホウケイ酸カバーガラス付Inp (50 Inp, 日本鉱業社製) : 50 μm ホウケイ酸カバーガラス (日本電気ガラス社製)

表1. 熱制御材料の諸元



3. データ

3.1. 太陽光吸収率と半球放射率

表2に測定した熱制御材料の入射角 5° の太陽光吸収率と温度293 Kの半球放射率を示す[1].

(1) 熱制御フィルム

フィルムの構造、膜厚、裏面金属蒸着物、および導電性の有無等をパラメータにデータを整理してある。フィルムの膜厚とともに太陽光吸収率と半球放射率は単調増加している。ロットによるフィルムの膜厚のバラツキは $\pm 5\%$ であったが、これによる影響は太陽光吸収率で $\pm 1.0\%$ 、半球放射率では約 $\pm 4.0\%$ である。

(2) 塗料

塗膜を構成している樹脂、および導電性の有無等によりデータを整理している。塗膜の厚さは $100\ \mu\text{m}$ とした。白色、黒色塗料とも、樹脂の違いによる太陽光吸収率、半球放射率の差は認められない。ただし、塗布の方法や塗膜の厚さにより太陽光吸収率、半球放射率のデータが数パーセントバラツクことがある。

(3) 熱制御ミラー

太陽光吸収率、半球放射率はガラスの板厚に依存して変化し、板厚が薄くなるほど半球放射率は小さくなる傾向にある。しかし、板厚 $12\ \mu\text{m}$ 熱制御ミラーでは板厚 $200\ \mu\text{m}$ と比較して半球放射率の値はほぼ同等か、それ以上の値が示され、軽量化を図る上で優れた材料となっている。

(4) 金属

表面の形成方法や処理方法の違いによって太陽光吸収率、半球放射率は顕著に変わる。金属材料については、ここで示されたデータは参考程度に留め、材料毎その都度測定することが望ましい。

(5) 太陽電池素子

Si素子の太陽光吸収率はカバーガラスの影響により、他の素子に比べ小さくなっている。半球放射率に関してはInP素子が一番小さいが、これはカバーガラスの板厚によるものではなく、素子自身の半球放射率が小さいためである。

3.2. 太陽光吸収率の入射角依存性

図1に代表的な熱制御材料である①Al蒸着カプトン(25 Kapton/Al)、②Al蒸着ユーピレックスR(25 Upilex-R/Al)、③Al蒸着ユーピレックスS(20 Upilex-S/Al)、④Al蒸着テフロン(50 Teflon/Al)、⑤白色塗料(白色Z206)、および⑥カバーガラス付Si太陽電池素子(100 Si)の太陽光吸収率の入射角依存性を示す。

各材料とも、太陽光吸収率は入射角 $5\sim 30^\circ$ の範囲ではほぼ一定で、 30° 以上では角度ともにしだいに減少する。減少の傾向は白色塗料で最も顕著であった[2].

3.3. 半球放射率の温度依存性

(1) 熱制御フィルム

a. ポリイミド系

図2にポリイミド系熱制御フィルムの半球放射率の温度依存性を示す。Al蒸着ユーピレックスR、SやAl蒸着カプトン等の半球放射率は低温から高温にむけて顕著に増大する。測定した温度範囲($173.15\sim 373.15\text{ K}$)での半球放射率の変化量(以降、放射率変化量という.)は $0.18\sim 0.20$ に達する。Ag蒸着ポリエーテルイミド(75 PEI/Al)では、他のポリイミド系熱制御フィルムに比べ半球放射率は大きい、放射率変化量は 0.08 と小さい。

図3はフィルムの膜厚を変えた場合のAl蒸着ユーピレックスRの半球放射率の温度依存性である。半球放射率(273.15 K)はフィルムの膜厚 $12\ \mu\text{m}$ で 0.42 、 $75\ \mu\text{m}$ では 0.70 と、膜厚に依存して大きく変わる。ただし、透明導電膜付Al蒸着ユーピレックスR(TCC/25 Upilex-R/Al)では、同じ膜厚($25\ \mu\text{m}$)の透明導

電膜なしに比べて全半球放射率，放射率変化量とも小さい。

b. フッ素系

図4はフッ素系熱制御フィルムの全半球放射率の温度依存性である。ポリイミド系熱制御フィルムと同様に，全半球放射率はフィルムの膜厚に依存して顕著に変る。全半球放射率は低温から常温の温度範囲では温度とともに増大するが，それ以上の高温領域では変化は小さい。放射率変化量は0.1程度で，ポリイミド系熱制御フィルムに比べ小さい。

(2) 塗料

a. 白色塗料・耐熱性塗料

図5に白色塗料と耐熱性塗料の全半球放射率の温度依存性を示す。白色塗料の全半球放射率は0.8以上と大きい。放射率変化量は白色Z202で0.04，アストロホワイトでは0.08と，アストロホワイトの方が大きい。耐熱性塗料チラノコートでは全半球放射率は低温から高温にかけて直線的に増大し，放射率変化量は0.08である。

b. 黒色塗料・導電性黒色塗料

図6に黒色塗料および導電性黒色塗料の全半球放射率の温度依存性を示す。アストロブラックの全半球放射率は直線的に変化し，放射率変化量は0.04である。黒色Z306の場合は，173 Kから273 Kの温度範囲で全半球放射率は温度とともに増大するが，273 Kより高温域ではほぼ一定になる。これは顔料の中赤外域の分光吸収特性によるものと推測される。

導電性黒色塗料ケミグレイズL300（黒色L300）とブラックカプトン（Black-Kapton）の全半球放射率は直線的に変化し，放射率変化量は0.05程度である。導電性黒色塗料の全半球放射率は黒色塗料に比べ小さい。導電性を得るために，樹脂に屈折率の高い導電性物質が含まれているためと推測される。

(3) 熱制御ミラー

図7は熱制御ミラーの全半球放射率の温度依存性である。全半球放射率は12 OSRで約280 Kに，TCC/200 OSRでは約220 Kにピークを持つ。これはガラスの近赤外域の吸収特性の違いによるものと判断される。放射率変化量は前者で0.04，後者では0.06である。

(4) 金属

図8に3種類の金属材料の全半球放射率の温度依存性を示す。金属材料の全半球放射率は表面処理の方法によって顕著に変る。例えば，同一材料のAlにおいて，バフ研磨処理が異なるA，Bでは約0.08（300 K），またAl蒸着とAlバフ研磨Bでは約0.07（300 K）異なる。また，金属材料の放射率変化量は0.02と小さい。このように金属材料では全半球放射率が小さいため，表面の形成方法や処理方法によって全半球放射率が大きく変ることから，熱制御材料として使用する場合には，その都度測定する必要がある。

(5) 太陽電池素子

図9はカバーガラス付Si，GaAs，InP太陽電池素子の全半球放射率の温度依存性である。カバーガラスの板厚の影響もあるがSi太陽電池素子の全半球放射率が，最も大きい。放射率変化量はSiで0.01，GaAsで0.02，InPでは0.15と，3素子共小さめである。

4. ま と め

代表的な熱制御用材料である熱制御フィルム，塗料，熱制御ミラー，金属材料，および太陽電池素子等の太陽光吸収率の入射角依存性と全半球放射率の温度依存性について，測定データを整理し，広く利用できるようにまとめた。今後の人工衛星の熱設計において有効に活用されることを期待したい。

表 2. 代表的な熱制御材料の太陽光吸収率と全半球放射率

熱制御材料	太陽光吸収率 (at 5°)	全半球放射率 (at 293K)	グラフ・表用記号 数値はフィルム膜厚, ガラス板厚
1. 熱制御フィルム			
a. ホリミド系			
Al 蒸着ユニベックス-R 7.5 μ m	0.30	0.38	7.5 Upilex-R/Al ⁽¹⁾
12 μ m	0.31	0.45	12 Upilex-R/Al
25 μ m	0.34	0.57	25 Upilex-R/Al
50 μ m	0.37	0.68	50 Upilex-R/Al
75 μ m	0.43	0.71	75 Upilex-R/Al
導電性/25 μ m	0.37	0.48	TCC/25 Upilex-R/Al
Al 蒸着ユニベックス-S 20 μ m	0.43	0.51	20Upilex-S/Al ⁽¹⁾
Al 蒸着カプトン 25 μ m	0.38	0.59	25Kapton/Al ⁽²⁾
導電性 Ag 蒸着ホリエーテルミド 75 μ m	0.15	0.74	75 PEI/Ag ⁽³⁾
b. フッ素系			
Al 蒸着テフロン 50 μ m	0.14	0.65	50Teflon/Al ⁽²⁾
250 μ m	-----	0.83	250 Teflon /Al
Ag 蒸着テフロン 125 μ m	0.22	0.77	125 Teflon / Ag ⁽²⁾
2. 塗料			
a. 白色塗料			
ケミグレイズ Z202	0.25	0.83	白色 Z202 ⁽⁴⁾
ニッパノハ 500 アストロホワイト	-----	0.85	アストロホワイト ⁽⁵⁾
b. 黒色塗料			
アイログレイズ Z306	0.92	0.83	黒色 Z306 ⁽⁴⁾
ニッパノハ 500 アストロブラック	-----	0.82	アストロブラック ⁽⁵⁾
導電性ケミグレイズ L300	0.95	0.79	黒色 L300 ⁽⁴⁾
導電性ブラックカプトン	-----	0.80	Black-Kapton ⁽²⁾
c. 耐熱塗料 灰色チラコート			
	0.82	0.81	チラコート ⁽¹⁾
3. 熱制御ミラー			
熱制御ミラー 12 μ m	-----	0.79	12OSR/Ag ⁽⁶⁾
導電性熱制御ミラー 200 μ m	0.11	0.76	TCC/200OSR/Ag ⁽⁷⁾
4. 金属			
Al ハーフ研磨 A	0.16	0.04	Al ハーフ研磨 A
Al ハーフ研磨 B	-----	0.12	Al ハーフ研磨 B
Al 蒸着	-----	0.05	Al 蒸着
Ag メッキ	-----	0.11	Ag メッキ
SUS304	-----	0.11	SUS304
5. 太陽電池素子			
Si 100 μ m	0.76	0.81	100Si ⁽⁸⁾
GaAs 50 μ m	0.82	0.74	50GaAs ⁽⁹⁾
InP 50 μ m	0.86	0.56	50InP ⁽¹⁰⁾

- (1) 宇部興産社製, (2) シュルガー社製, (3) 住友ベークライト社製, (4) ロートケミカル社製, (5) ニッパノハ社製, (6) ヒルキントン社製, (7) 日本電気ガラス社製, (8) シャープ社製, (9) 三菱電機社製, (10) 日本鉱業社製

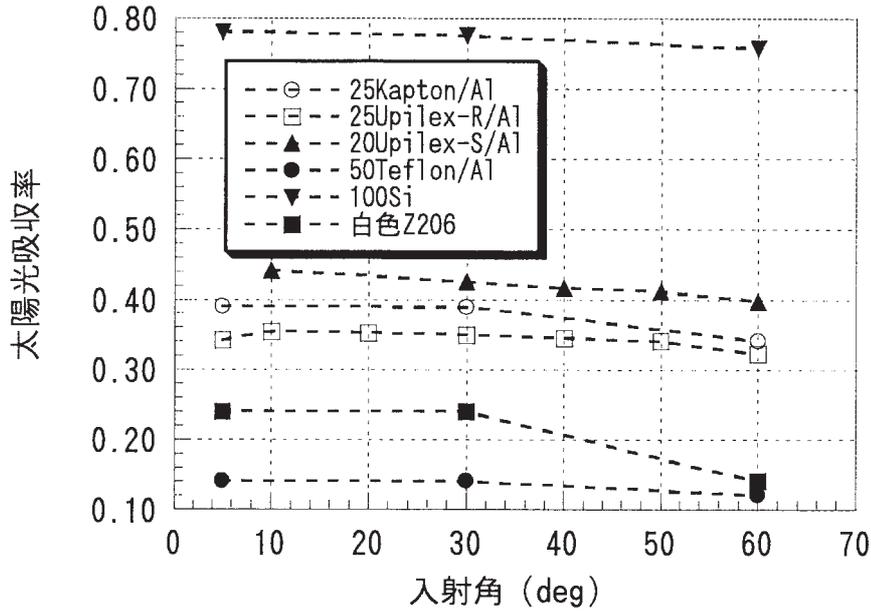


図1. 代表的な熱制御材料の太陽光吸収率の入射角依存性

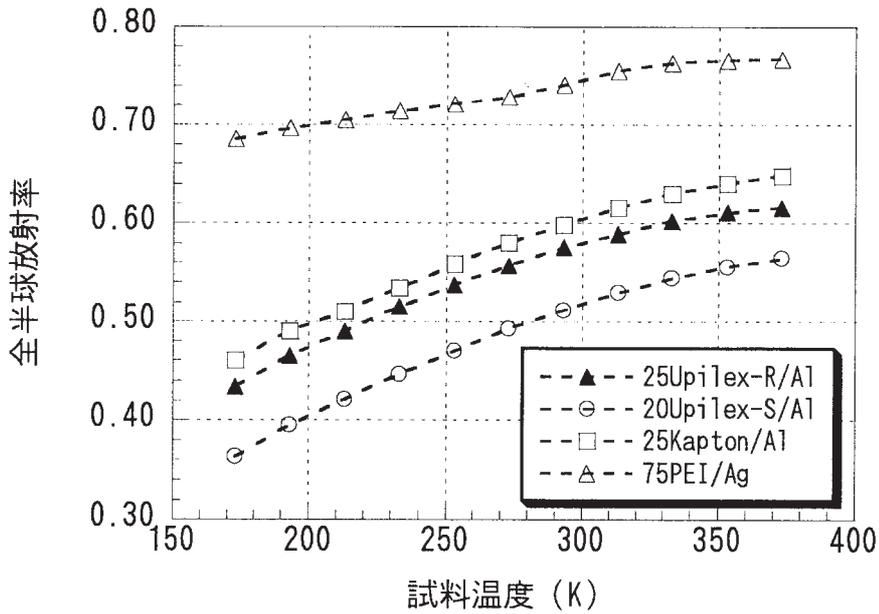


図2. ポリイミド系熱制御フィルムの半球放射率の温度依存性

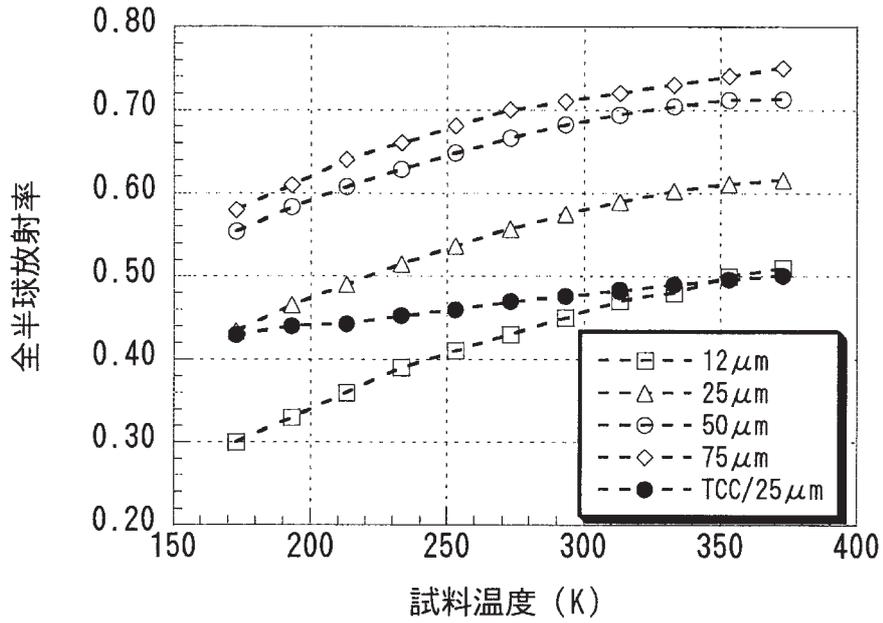


図3. Al蒸着ユープレックスRの半球放射率の温度依存性

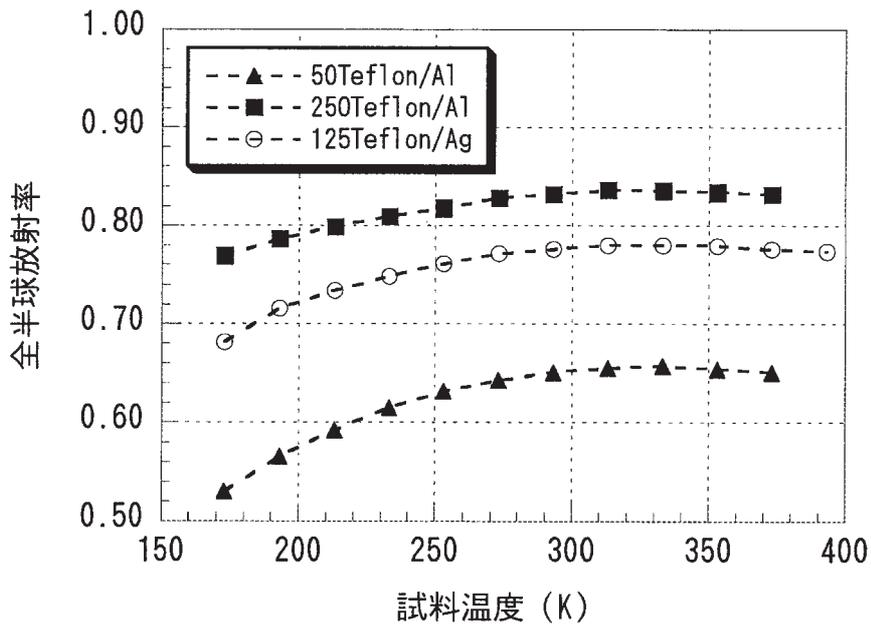


図4. フッ素系熱制御フィルムの半球放射率の温度依存性

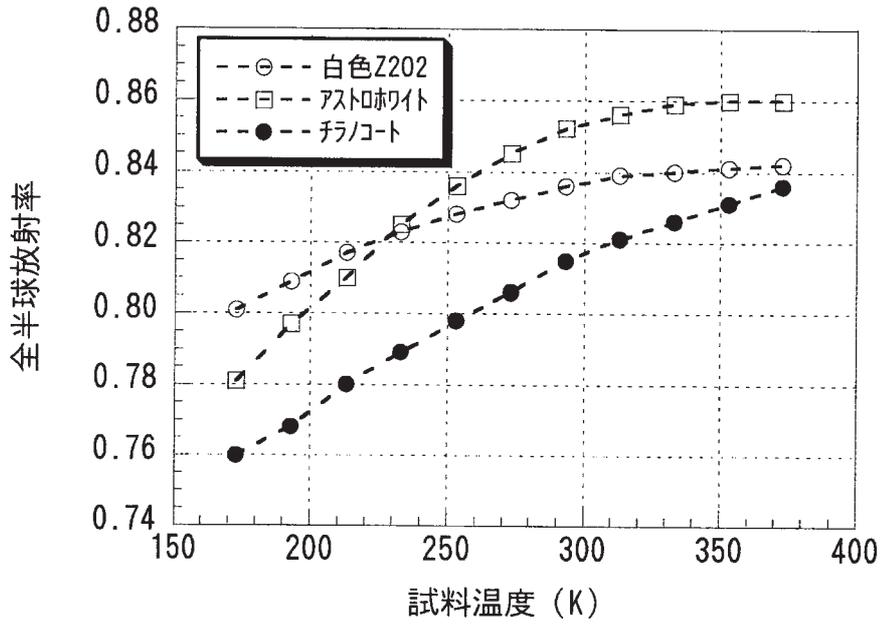


図5. 白色塗料と耐熱塗料の半球放射率の温度依存性

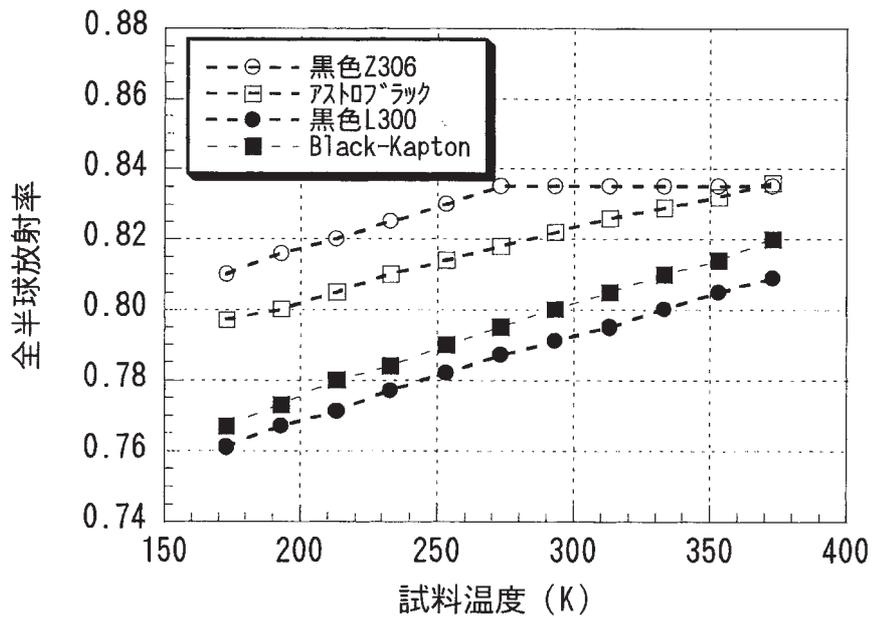


図6. 黒色塗料と導電性黒色塗料の半球放射率の温度依存性

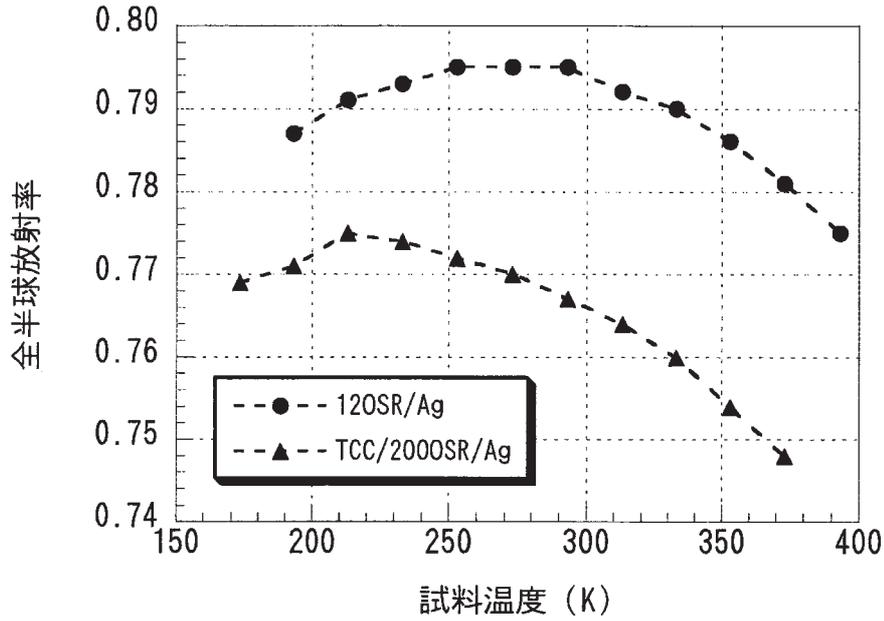


図7. 熱制御ミラーの半球放射率の温度依存性

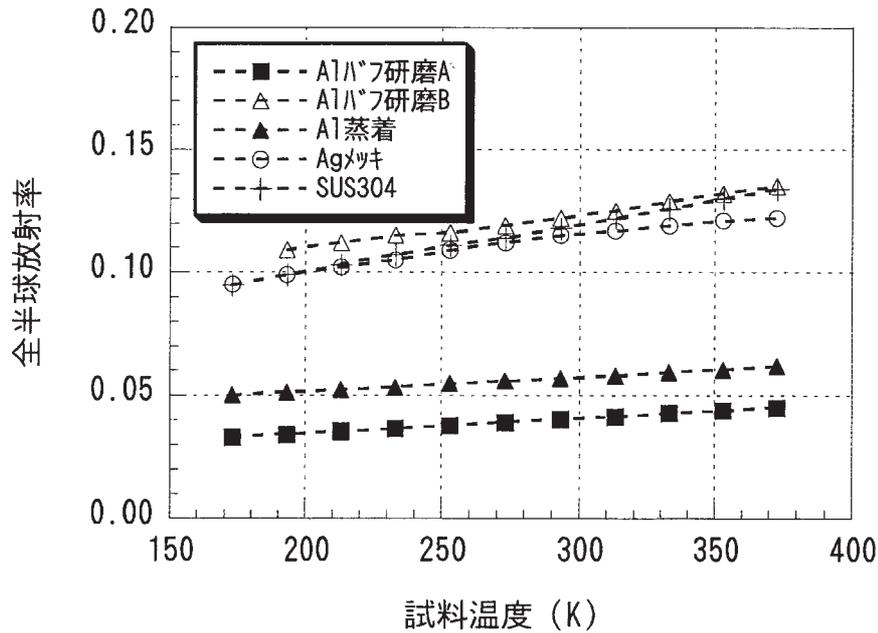


図8. 金属材料の半球放射率の温度依存性

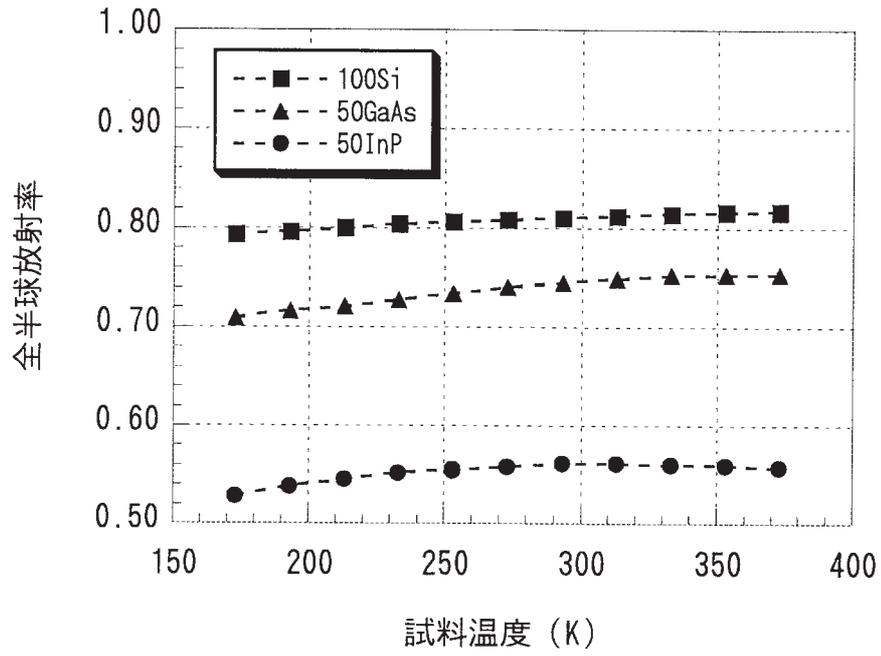


図9. 太陽電池素子の半球放射率の温度依存性

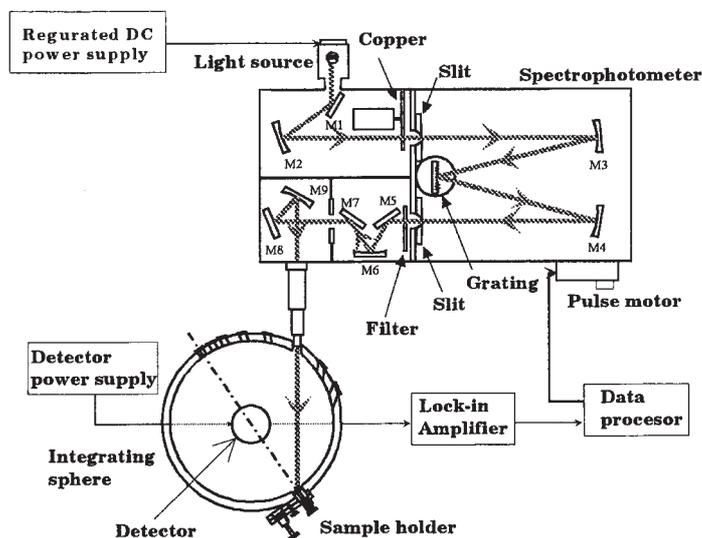
付録 測定装置性能と測定の不確かさ

1. 太陽光吸収率の入射角依存性測定装置

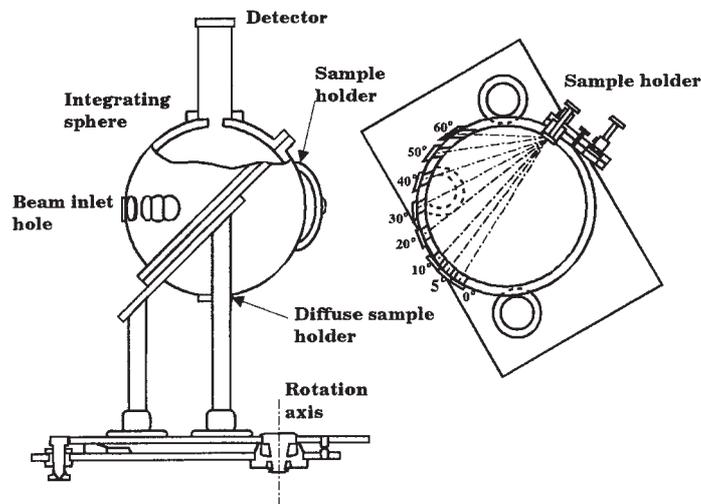
太陽光吸収率の測定には、可視域の分光器を組合わせた可視分光法が一般的であるが、本研究では、シングルビーム方式の積分球を改善して、多重反射の影響を消去するとともに、不透明物質における太陽光吸収率の入射角依存性の測定が可能な装置を製作した。測定装置は、ツエルニターナ型シングルビーム分光器（日本分光社製：SS-50型）と入射角可変積分球を組合わせた光学系、およびPC（YHP社製：HP 9000/300）から成り、 $5 \sim 60^\circ$ の入射角において $0.26 \sim 2.50 \mu\text{m}$ の波長範囲の分光絶対全反射率と分光透過率を測定できる。付図1に分光器概念図を[3, 4, 5]、付図2に入射角可変積分球の概念図を示す。また、付表1には分光器と入射角可変積分球の性能と諸元を示した。

付表1. 太陽光吸収率の入射角依存性測定装置性能

1. 分光器性能	ツエルニターナ型シングルビーム（日本分光社製：SS-520）
型式	
波長範囲	$0.26 \sim 2.50 \mu\text{m}$
焦点距離	500mm
明るさ	$f : 6.2$
回折格子	300nm, 755nm, $1 \mu\text{m}$, $1.6 \mu\text{m}$
ブレース波長	
光源	250W タンクステン・ハロゲンランプ
検出器	
・光電子増倍管	$0.26 \sim 1.00 \mu\text{m}$ （浜松ホトクス社製：R1104, R316）
・PbSセル	$1.00 \sim 2.50 \mu\text{m}$ （浜松ホトクス社製：PS-1002）
2. 積分球性能	
内径	300mm
内面処理	BaSO_4 （コタック社製：Eastman white reflectance coating 6080）
入射角	$0^\circ, 5^\circ, 10 \sim 60^\circ$ （ 10° 毎可変）
試料ホルダー	
・任意入射用	標準試料1, 測定試料3
・拡散入射用	標準試料と測定試料を交換



付図1. 太陽光吸収率の入射角測定装置



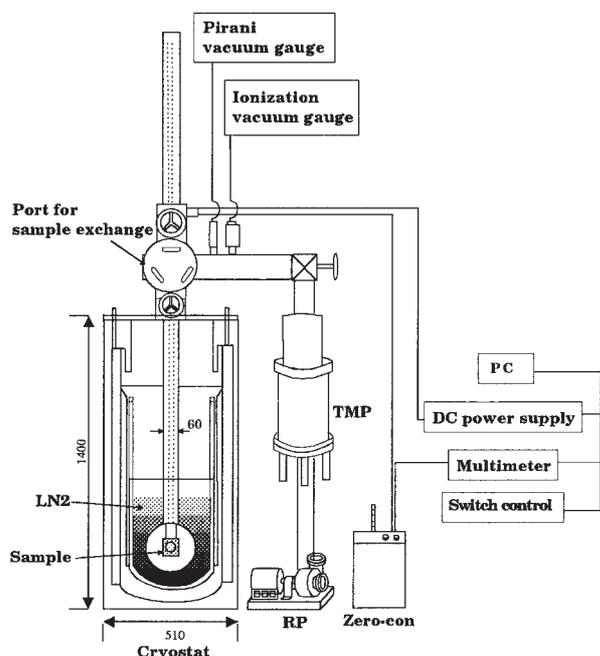
付図2. 入射角可変積分球

2. 全半球放射率の温度依存性測定装置

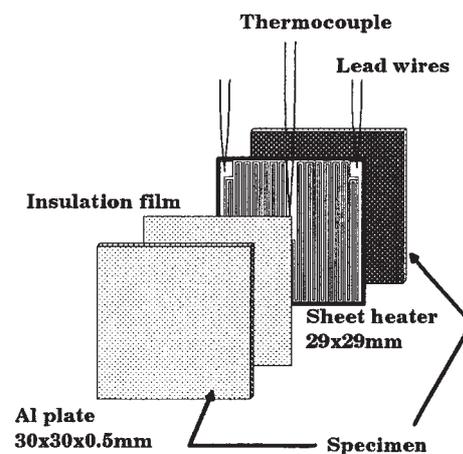
全半球放射率の測定のために、カロリメータ法を基本に不透明物質における全半球放射率の温度依存性の測定が可能な装置を製作した [6, 7]。装置は測定室、試料交換室、試料上下機構、クライオスタット、排気系、および試料の自動温度制御とデータ処理用のPC（YHP社製：HP 9000 / 300）から構成されている [8, 9]。付図3に概念図を、付表2に性能を示す。試料交換を試料交換室で行うので、測定室を大気圧や常温に戻すことなく、高真空で低温の安定した状態に保つことができる。すなわち連続測定が可能である。試料は板厚0.5 mm、一辺30 mmの正方形のAl板2枚の間にシートヒータを挟んだサンドイッチ構造が基本である。付図4に概念図を、付表2に諸元を示す。塗料の場合は、基本構造に直接塗料を塗布しており、熱制御フィルムでは基本構造に接着剤でフィルムを貼り合せた。カバーガラス付き太陽電池素子は基本構造に接着剤で貼り付け、表面と材質が異なる側面には全半球放射率の温度依存性が既知であるAl蒸着フィルムを貼り付けた。

付表1. 太陽光吸収率の入射角依存性測定装置性能

1. 測定室 内径 材質 内面処理 測温素子 真空度	250mm 銅性 黒色塗料（ケグレイズ社製：ケグレイズ Z306） 金+0.07%鉄-ケル熱電対線（100 μ m） 測定室の上部と側部を測定 10 ⁻⁵ Pa 以下（ターボ分子ポンプ）
2. クライオスタット 寸法 使用冷媒	直径 510mm, 深さ 1400mm 液体ネオ素, 液体ヘリウム
3. 試料 形状 測温素子 校正精度 シートヒータ 電力供給線・電圧測定線	一辺 30mm の正方形・サンドイッチ構造 ケル-アル熱電対線（50 μ m） ±0.32K（173.15~373.15K） 抵抗値：240 Ω アトム線（50 μ m）



付図3. 半球放射率の温度依存性測定装置



付図4. 試料構成

3. 測定の不確かさ

可視分光法における不確かさの要因をまとめると、次の通りである。

- 標準試料の絶対反射率の影響

標準試料BaSO₄の絶対反射率の値は文献値を参照しているが、その不確かさは±1.0%である[5]ため、太陽光吸収率に及ぼす影響は±1.0%である。

- 入射ビームポートの光損失量の影響

積分球には入射角依存性を測定するための入射ビームポートを8つ設けており、入射ビームポートによる光の損失量のバラツキは約1.0%以内であることを確認している。太陽光吸収率に及ぼす影響は約±1.0%である。

- 多重反射の影響

多重反射はシングルビーム方式固有の不確かさで、試料表面で反射された光がいったん積分球内壁で拡散反射し、その一部が再び試料表面に拡散入射する、いわゆる繰り返し入射に対する反射（以降、多重反射という。）である。この多重反射は試料表面積と積分球表面積の比と、試料の吸収特性に依存し、例えば、試作した積分球の場合、黒色塗料のように吸収率の高い物質では多重反射率が0.019になり、太陽光吸収率に及ぼす影響は約1.9%である[8]。多重反射の影響を小さくするには、積分球を大きくして試料表面積と積分球表面積の比を小さくする必要があるが、装置が大掛かりになり安価ではない。ここでは積分球に拡散入射用ホルダーを設け（付図2）、測定手順により多重反射の項を消去する方法を採用している[8]。以上総合すると、太陽光吸収率の入射角依存性の測定で考えられる全不確かさは±2.0%、±1.0%以内の範囲であると言える。

カロリメータ法による不確かさの要因をまとめると、次の通りである。

- 熱電対校正の不確かさの影響

熱電対校正の不確かさは173.15～373.15 Kの温度範囲で±0.32 Kである。この不確かさが半球放射

率に及ぼす影響は±1.0%である。

・試料配線類の熱伝導損失の影響

試料に配線された熱電対線，電力供給線および端子電圧測定線の計6本の熱伝導による熱損失と4本のジュール発熱量を併せた総熱損失量を試料温度の関数として実験的に求め，全半球放射率の算出式において補正している[8]。

・全半球放射率算出の際の仮定条件の影響

本測定法では，試料表面と測定室壁面のふく射結合を解く際に，測定室の全半球放射率を1とすること，試料の全半球吸収率と全半球放射率は等しいとおくこと，などの2つの仮定が必要になる。これらの仮定が全半球放射率を導く際に及ぼす影響を見積もるために，測定室壁面を液体ヘリウムと液体チッ素で冷却したときの黒色塗料(3M)の全半球放射率を求めた[8]。その結果，試料温度173Kにおいて，液体チッ素冷却と液体ヘリウム冷却の場合の全半球放射率の差は約±0.5%であることが確かめられた。この値±0.5%を全半球放射率に及ぼす影響と見なすことができる。

以上を総合して，全半球放射率の測定で考えられる全不確かさは低温域で±1.5%，高温域で±1.0%となる。付表3に可視分光法とカロリメータ法の不確かさを整理して示す。

付表3. 可視分光法とカロリメータ法の不確かさ

	不確かさの要因	不確かさ(%)	全不確かさ(%)
1. 可視分光法	(1) 標準試料の絶対値	±1.0	-2.0 +1.0
	(2) 入射ビームポート開口部の 光量損失	-1.0	
2. カロリメータ法	(1) 熱電対の校正精度の 不確かさ	±1.0	低温側±1.5 高温側±1.0
	(2) 測定室のふく射の影響 (低温側)	±0.5	

参 考 文 献

- [1] 日本熱物性学会編，「熱物性ハンドブック」，養賢堂，pp.320-330，1990。
- [2] T. Hashizume, A. Ohnishi and T. Hayashi: "The Evaluation of the Emittance of Coating paints," AIAA 20th Thermophysics Conference, pp. 1-7, Williamsburg, Virginia, June 1985.
- [3] A. Ohnishi and T. Hayashi: "Measurement of Incidence Angle Dependence of Solar Absorptance," Int. Symposium Environmental and Thermal Control Systems for Space Vehicles, Toulouse, France, Oct. 4-7, 1983, (ESA SP-200, Dec. 1983, pp. 467-470).
- [4] M. P. Tbeakaera: "The Solar Constant and the Solar Spectrum Measured from a Research Aircraft", NASA TR R-351, Oct. 1970.
- [5] F. Grum and T. E. Wightman, Appl. Opt., 16, p. 2775, 1977.
- [6] R. Siegel and J. R. Howell: "Thermal Radiation Heat Transfer," Taylor & Francis.
- [7] E. M. Sparrow and R. D. Cess: "Radiation Heat Transfer," Hemisphere Publishing Corporation, pp. 33-64.
- [8] 大西 晃，豊留法文，二宮敬虔，林 友直：「太陽光の吸収率および半球面熱放射率の測定法」，電気学会論文誌，昭和58年1月，103巻，C分冊1号，pp. 9-16。
- [9] 大西 晃，林 友直，永野 弘：「宇宙用表面材料の半球面熱放射率の測定」，第4回日本熱物性シンポ.，pp. 1-4, 1983.