

15  
21  
1996  
46

熱放射特性の同時測定法と  
その宇宙用熱制御材料への応用に関する研究

1997年3月

大西 晃

寄	贈
大西晃氏	平成 年 月 日

# 目 次

本文中の主な使用記号	1
第1章 はじめに	3
1.1 背景	3
1.2 具体的な測定技術と手法	4
1.3 本論文の構成	6
第2章 熱放射特性の測定技術の評価法	8
2.1 概 要	8
2.2 熱放射特性の測定に関する従来手法	9
2.2.1 定義	9
a) 太陽光吸収率	9
b) 全半球放射率	10
2.2.2 熱放射特性の測定技術	11
a) 太陽光吸収率	11
b) 全半球放射率	15
2.3. 熱放射特性の測定技術の改善と評価	19
2.3.1 分光法による太陽光吸収率の入射角依存性の測定	20
a) 多重反射率の消去法	20
b) 太陽光吸収率の入射角依存性測定装置	24
2.3.2 カロリメータ法による全半球放射率の温度依存性の測定	27
a) 測定装置と試料の構成	27
b) カロリメータ法による全半球放射率の算出	31
2.3.3 誤差要因の検討	32
a) 分光法	32
b) カロリメータ法	33
2.4 標準的熱制御材料の熱放射特性の測定結果	36
2.4.1 太陽光吸収率の入射角依存性	36

2.4.2	全半球放射率の温度依存性	40
2.4.3	太陽光吸収率と全半球放射率の特性	43
2.5	結 言	44
第3章	熱放射特性の同時測定法の提案	46
3.1	概 要	46
3.2	測定原理	47
3.3	地上における同時測定法	48
3.3.1	地上用同時測定装置と試料の構成	48
a)	地上用同時測定装置	49
b)	試料の構成	50
3.3.2	太陽光吸収率と全半球放射率の算出	52
3.3.3	地上用同時測定装置による測定方法	54
3.4	同時測定法の宇宙への適用	54
3.4.1	科学衛星「あけぼの」の諸元	55
3.4.2	搭載用同時測定装置の構成	56
a)	試料ユニットの構成	56
b)	テストモジュールの構成	58
c)	搭載用同時測定装置のデータの取得方法	59
3.4.3	宇宙空間における太陽光吸収率と全半球放射率の算出	60
3.4.4	搭載用同時測定装置による測定方法	61
3.5	結 言	62
第4章	同時測定法による熱放射特性の測定結果と評価	64
4.1	概 要	64
4.2	誤差要因の検討	64
4.2.1	地上用同時測定装置の場合	65
4.2.2	搭載用同時測定装置の場合	68
4.3	同時測定法による測定結果と評価	69
4.3.1	地上用同時測定装置による測定結果と考察	69

a) 地上用測定試料の諸元	70
b) 地上用同時測定装置による測定結果	71
c) 測定結果の考察	75
4.3.2 搭載用同時測定装置の測定結果と考察	76
a) 搭載用測定試料の諸元	76
b) 搭載用同時測定装置による測定結果	77
c) 測定結果の考察	88
4.4 結 言	90
第5章 まとめ	92
謝辞	94
参考文献	95

## 本文中の主な使用記号

$A$	= 試料の入射断面積
$A_a$	= 試料全表面積
$A_1$	= 疑似太陽光に対向した試料面積
$A_2$	= シュラウド壁面に対向した試料面積
$D_d$	= 拡散反射に対応した検出器効率
$D_h$	= 多重反射に対応した検出器効率
$D_n$	= 正反射に対応した検出器効率
$F_{SC}$	= 試料と測定室壁面間の形態係数
$F_{SQ}$	= 試料と石英窓間の形態係数
$I$	= 照射エネルギー
$J_\lambda$	= 太陽光の分光ふく射エネルギー
$K$	= 熱コンダクタンス
$O_{RD}$	= 標準試料のデュアルビームの検出器出力
$O_{RS}$	= 標準試料のシングルビームの検出器出力
$O_{Rd}$	= 標準試料の拡散反射の検出器出力
$O_{Rn}$	= 標準試料の正反射の検出器出力
$O_S$	= 検出器出力
$O_{SD}$	= 試料のデュアルビームの検出器出力
$O_{SS}$	= 試料のシングルビームの検出器出力
$O_{Sd}$	= 試料の拡散反射の検出器出力
$O_{Sn}$	= 試料の正反射の検出器出力
$P_0, P_1, P_2$	= ステップ的に供給される電力
$Q$	= 供給電力
$S$	= 太陽光の照度
$T_{B0}, T_{B1}, T_{B2}$	= 供給電力変化に対応した試料ホルダ底部温度
$T_C$	= 壁面温度

$T_Q$	= 石英窓温度
$T_S$	= 試料温度
$T_{S0}, T_{S1}, T_{S2}$	= 供給電力変化に対応した試料温度
$T_{S11}, T_{S12}$	= 供給電力変化に対応した疑似太陽光面の試料温度
$T_{S21}, T_{S22}$	= 供給電力変化に対応したシュラウド面の試料温度
$q_w$	= リード線の総熱損失量
$q_{w1}, q_{w2}$	= 供給電力変化に対応したリード線総熱損失量
$\alpha_H$	= 全半球吸収率
$\alpha_{Ra\lambda}$	= 標準試料の絶対分光反射率
$\alpha_S$	= 太陽光吸収率
$\alpha_{Sa\lambda}$	= 絶対分光吸収率
$\epsilon_{b\lambda}$	= 黒体の分光全半球ふく射エネルギー
$\epsilon_C$	= 測定室壁面の全半球放射率
$\epsilon_H$	= 全半球放射率
$\rho_I$	= 積分球内壁の拡散反射率
$\rho_{Rd}$	= 標準試料の拡散反射率
$\rho_{Rh}$	= 標準試料の多重反射率
$\rho_{Rt}$	= 標準試料の全反射率
$\rho_{SD}$	= デュアルビーム相対反射率
$\rho_{SS}$	= シングルビーム相対反射率
$\rho_{Sd}$	= 試料の拡散反射率
$\rho_{Sh}$	= 試料の多重反射率
$\rho_{Sn}$	= 試料の正反射率
$\rho_{St}$	= 試料の全反射率
$\epsilon_\lambda$	= 分光全半球放射率
$\rho_{Sa\lambda}$	= 試料の絶対分光全反射率
$\rho_{St\lambda}$	= 試料の分光全反射率
$\sigma$	= ステファンボルツマン定数
下付き添字	
$\lambda$	= 波長

# 第1章 はじめに

## 1.1 背景

地球近傍を回る地球周回衛星，地球から約36,000km離れた赤道面軌道上の円軌道を回る静止衛星，惑星を周回あるいは軟着陸する惑星探査衛星に至るまで，学術的あるいは実用的な立場から数多くの宇宙船が打ち上げられてきた．そして，学術的には宇宙の謎を解き明かすためのデータが積み重ねられ，実用的には気象衛星，放送衛星，通信衛星など今日の我々の日常生活に欠かせない情報が提供されている．これからの社会においても宇宙の有効利用は益々増えていくものと予想される．このような宇宙船のミッションを遂行するためには構造，熱制御，姿勢制御，通信，観測機器，データ処理と多岐にわたる専門技術とこれらを統合，管理するシステム工学が要求されている．この中で熱設計の果たす役割は大きく，宇宙船システムや搭載機器の全運用に係わっているが，特に宇宙船の寿命を左右するという点が特徴的である．

宇宙船の熱設計では，熱伝導とふく射伝熱の2つの伝熱モードが支配的となる．熱伝導モードには，宇宙船の構体や搭載される電子機器に用いられる材料の特性で決まる熱伝導率と構造の組立方あるいは機器の取り付け方法，つまりハードウェアの構成で決まる接触熱伝導率がある．また，ふく射伝熱モードは，構造および搭載機器の幾何学的形状と材料表面の熱放射特性である太陽光吸収率と全半球放射率で定まる<sup>[1-3]</sup>．すなわち，中小規模の宇宙船の温度はこれら4つのパラメータにより規定され，その温度ポテンシャルは宇宙船表面の太陽光吸収率と全半球放射率の比によってほぼ一義的に決められる．したがって，熱設計の要点は，これらのパラメータの組合せを種々選択し，外部からの熱入力量と内部機器等の放熱量を処理することにより宇宙船全体の温度が最適になるように調整することにある<sup>[4]</sup>．このような熱対策方法を受動型熱制御法と呼ぶ．そして，受動型熱制御法による熱設計の信頼性を高めるには宇宙船の表面に施される熱制御材料の熱放射特性，つまり太陽光吸収率と全半球放射率の特性を温度依存性も含めて高精度で測定する測定技術が必要となる．

本論文は，材料の基本的な熱放射特性，太陽光吸収率と全半球放射率に関する新しい測定法（同時測定法）を提案すると共に，既存の測定技術の改善策も提案する．そして，それらの測定技術を基にして宇宙用熱制御材料を評価する．この章では，熱制御材料の熱放射特性の測定

技術を改善および提案することの必要性和意義を明らかにするために、従来の熱放射特性の測定技術について地上用と宇宙用に分類して記述する。

## 1.2 具体的な測定技術と手法

一般に、材料の熱放射特性やその測定技術は熱物性の分野で論じられ、これまで数多くの報告がなされてきた。しかし、宇宙用材料の特殊性や使用される環境を考えると必ずしも従来の測定方法で得られたデータでは十分とはいえない。それは、宇宙で用いられる材料は複合的なものが多く、例えば、太陽電池素子のようにそれ単体で用いられることはなく表面には紫外線や荷電粒子から保護するためにカバーガラスが貼り付けられ、しかもその表面には反射防止膜、あるいは透明導電膜の薄膜が施される多層構造になっている。そして、これらの材料が遭遇する宇宙環境は超高真空と、低温域から高温域に渡り幅広く温度が変化する場である。したがって、熱放射特性の測定も材料の構造や使われる環境を考慮して行われる必要がある。たしかに、これまでの熱設計では熱放射特性データの不備な点、主に測定誤差や特性のバラツキなどは設計のマージンをとることで補償されてきたが、今日のように多様化した宇宙船の設計を考えると、このような設計のマージンは重量や電力の増加を招くので必ずしも許されることではなく、宇宙船のミッション達成の成否に係わる問題になる。

本論文で述べる測定装置の開発に関する基本事項を要約すると、以下の2点である。

- (i) 太陽光吸収率の測定については、入射角依存性の測定が可能な分光法による測定装置を、また、全半球放射率の測定では、低温域から高温域の温度範囲の温度依存性の測定が可能なカロリメータ法による測定装置をそれぞれ提案、試作する。
- (ii) 一つの測定装置から同一試料の太陽光吸収率と全半球放射率の二つの熱物性値をそれぞれ独立に、しかも簡便に求めることが可能な測定方法、同時測定法を新たに提案し、地上と宇宙空間でこれを実証する。

次に、従来の太陽光吸収率と全半球放射率の測定技術について具体的に記述する。

太陽光吸収率の地上での測定は、古くは配光法が用いられていたが、測定に時間を要するために、測定中の光源や検出器の安定性が得られないことから現在では余り利用されていない。これに代わるものとして積分球が用いられ、精度よく全反射率の測定が可能なことから可視分光器と組み合わせた装置が標準的である。この方法にはシングルビーム方式とシングルビームデュアル方式があり、いずれの方式も全反射率の測定は試料の反射量と標準試料の反射量を比

較して求められる。しかし、これらの方式は、いずれも入射角がほぼ垂直入射に限られており、任意の入射角の太陽光吸収率は求められない。

全半球放射率の地上の測定については、固体のふく射性質の計測の立場から①試料の性質と形状、②測定波長範囲、あるいは測定温度範囲、③垂直方向また半空間方向、などの条件によっていろいろな方法が開発されてきている。その測定方法は大きく別けて赤外域分光測定法と熱量測定法に分類される。

赤外域分光測定法は、5～25  $\mu\text{m}$ の波長範囲の分散型赤外分光器を基本に、試料からのふく射を測定するふく射測定法と、試料の反射を測定する反射測定法がある。①ふく射測定法は、参照黒体を用いられ、試料の放射量と試料と同温度の参照黒体の放射量を比較して垂直放射率が求められる。②反射測定法は、試料の全反射量と金などの標準試料の全反射量を比較して半球放射率が求められる。しかし、上述のように赤外域分光測定法では、測定波長範囲の制限があるために低温域の全半球放射率が求められない。

一方、熱量測定法は、試料から単位時間、単位面積当たりふく射で失われる熱損失量を測定して求められるもので定常法と非定常法に分けられる。これらの装置は、基本的には水または液体チッ素冷却が可能な真空容器と試料温度を制御するヒータから構成される。①定常法は、試料表面からのふく射熱損失量をヒータで補い試料を定常温度に保ち、そのときの試料温度、ヒータ供給電力、周りの温度などを測定して全半球放射率が求められる。②非定常法は、始めに試料をヒータで加熱してある温度に設定する。次にヒータ電源を切り、このときの試料温度の時間変化、周囲温度、試料の比熱と質量などがわかれば全半球放射率が求められる。しかし、熱量測定法では測定試料が導電性のもので、その形状もまた試料内の温度分布の一様性が得られる棒状、もしくは細線のものとの制約が多く、絶縁性や多層膜構造の試料に適用することができない。また、全半球放射率の測定温度範囲も室温から高温の温度範囲では測定されているが、低温域における測定例は少なく、材料の性質も限られている。

地上に対して宇宙での太陽光吸収率と全半球放射率の測定技術は、当然のことながら宇宙船に搭載するために小型、軽量化が要求され、地上で開発された装置をそのまま適用することはできない。これまでは、搭載された試料に太陽光が垂直に入射しているときの定常状態の試料温度を測定して、そこから導かれる太陽光吸収率と全半球放射率の比が求められている。この

方法では、太陽光吸収率と全半球放射率をそれぞれ単独に求められないために紫外線、電子線、陽子線などの照射による宇宙環境での試料の劣化に関する知見を得ることができない。

以上、太陽光吸収率と全半球放射率の測定技術について整理すると、太陽光吸収率については入射角の変化に対応して太陽光吸収率が求められる測定装置が必要になり、また、全半球放射率については絶縁性や多層膜構造の宇宙用材料に適用でき、かつ低温域から高温域の測定が可能な測定装置が求められる。これに対して、新しく開発した材料などを宇宙環境において評価するために、太陽光吸収率と全半球放射率がそれぞれ単独にかつ同時に求められる測定方法を確立することが必要である。

したがって、本論文が目的とする太陽光吸収率と全半球放射率に関する新しい測定法の提案と、既存の測定技術の改善案を提案する。このように新しく提案された測定技術の成果を宇宙船の熱設計に反映することにより、次のような効果が期待される。

- (i) 熱設計の解析精度の向上により、熱設計のマージンとされていた熱計装重量やヒータ電力容量が軽減される。
- (ii) 宇宙船の構造や搭載機器の熱歪みを予測、除去することができ、正しい姿勢決定と高精度の観測位置の決定が可能になる。
- (iii) 宇宙環境において熱制御材料の劣化に関するデータを高精度で取得することにより、長寿命衛星の熱設計に際して信頼性が得られる。

そして、これら有効な成果を科学衛星の熱設計に適用することにより、従来の熱設計と比較してより優れていることが実証された。

## 1.2 本論文の構成

本論文は5章から成っている。以下に各章の論点を説明する。第1章では、本研究が必要になってきた背景を述べる。第2章では、始めに太陽光吸収率と全半球放射率の測定技術に関する現状を概観する。次に、既存の測定技術の改善原理を具体的に説明する。すなわち、太陽光吸収率については従来の積分球を改善して入射角依存性の精度の得られる分光法を、全半球放射率については多層膜構造材料の低温域から高温域の温度依存性が求められるカロリメータ法をそれぞれ考案、試作する。最後にこれらの装置により代表的な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を求め、これら測定装置が有効であることを示す。

第3章は、一組の測定装置から二つの熱物性値、つまり太陽光吸収率と全半球放射率をそれぞれ分離して、しかも簡便に求められる新しい手法、以下同時測定法と呼ぶ、を提案し、この測定法が地上および宇宙に適用できることを理論的に明らかにする。そして、地上用と搭載用の同時測定装置の開発を行う。この同時測定法の特徴は、①同一試料の太陽光吸収率と全半球放射率が一度に明らかにされること、②測定時間が短縮でき装置の制作費が安価であること、③宇宙に適用した場合、測定装置の小型、軽量化が図れること、などが挙げられる。第4章では、始めに地上用および搭載用装置のそれぞれの誤差要因を検討する。次に、地上用および搭載用同時測定装置で得られた測定結果を評価する。これら同時測定法により得られる太陽光吸収率と全半球放射率を、第2章で得られた分光法とカロリメータ法によるデータと対比して同時測定法の妥当性を検証する。また、地上用同時測定装置では、疑似太陽光光源の照度を調整することにより全半球放射率の温度依存性が求められることを確認する。さらに搭載用同時測定装置では、宇宙用材料を第12号科学衛星「あけぼの」に搭載し、打ち上げ初期と合わせて長期飛行データから太陽光吸収率と全半球放射率を求める。第5章では、本論文の全体像をまとめる。

## 第2章 熱放射特性の測定技術の評価法

### 2.1 概要

本章では、最初に従来の太陽光吸収率と全半球放射率の測定技術について記述する。

次に、従来の測定技術の機能の向上を目的として宇宙船の熱設計、および宇宙用材料などで要求される太陽光吸収率の入射角依存性や全半球放射率の温度依存性の測定が可能な測定装置を提案をする。

太陽光吸収率の測定には、一般に可視分光測定法が用いられ、積分球と可視分光器を組み合わせた測定装置と測定手順が簡便な簡易測定装置などの報告がある。しかし、これらの測定装置ではほぼ垂直入射の太陽光吸収率の測定は可能であるが、宇宙船の熱設計などで必要な任意の入射角の太陽光吸収率が求められた例はない。

一方、全半球放射率の測定は赤外分光測定法と熱量測定法に分類される。赤外分光測定法には、赤外分光器と積分鏡面を組み合わせた測定装置と測定操作が容易な簡易測定装置がある。これらは垂直放射率の測定には有効であるが、試料表面から $2\pi$ 空間にふく射する全エネルギーを測定するには不十分で、全半球放射率を求めるには計算で解くことが必要になる。また、これらの測定装置により低温域の全半球放射率の温度依存性を求めようとする、測定波長範囲の制限があり求められない。これに対して、熱量測定法は大別すると定常法と非定常法の2種類に分類される。これらの測定方法では、測定材料が導電性の物質、あるいは細線の棒などの制約がある。また、測定温度範囲も室温から高温域の全半球放射率は求められるが、低温域の測定はなされていない。このように、従来の赤外分光測定法、および熱量測定法では宇宙用材料で要求される低温域から高温域の全半球放射率の温度依存性が求められないことと、絶縁性、あるいは多層膜構造の材料には適用できない。

従来の測定装置の改善案としては以下の2点を考える。

- (1) 太陽光吸収率については、積分球を改善して入射角が可変できる入射角可変積分球を試作し、可視分光器と組み合わせて太陽光吸収率の入射角依存性が求められる分光法を試

作する。

- (2) 全半球放射率については、低温用装置とヒータを内蔵したサンドイッチ構造の試料を組み合わせて不透明物質の材料に適用でき、かつ低温域から高温域の温度範囲の温度依存性が求められるカロリメータ法を提案、試作する。

最後に、試作した分光法とカロリメータ法のそれぞれの測定装置を用いて代表的な宇宙用材料の熱放射特性の測定例を示す。

## 2.2 熱放射特性の測定に関する従来手法

始めに太陽光吸収率と全半球放射率のそれぞれの定義について説明し、次に、太陽光吸収率と全半球放射率の測定技術について従来の研究を述べる [5]。

### 2.2.1 定義

太陽光吸収率と全半球放射率のそれぞれの定義について記述する。

#### a) 太陽光吸収率

太陽光吸収率はある物質表面に任意の入射角で入射する太陽光の全ふく射エネルギーが、その物質表面で吸収される割合を示すものとして定義される。ここでは不透明物質を扱うことから太陽光吸収率は、(2-1)式で与えられる [6]。

$$\alpha_S = \frac{\int_0^{\infty} \alpha_{Sa\lambda} J_{\lambda} d\lambda}{\int_0^{\infty} J_{\lambda} d\lambda}$$
$$= \frac{\int_0^{\infty} (1 - \rho_{Sa\lambda}) J_{\lambda} d\lambda}{\int_0^{\infty} J_{\lambda} d\lambda} \quad (2-1)$$

ここで、 $\alpha_{Sa\lambda}$ は試料の絶対分光吸収率、 $\rho_{Sa\lambda}$ は試料の絶対分光全反射率、 $J_{\lambda}$ は太陽光の分

光ふく射エネルギーである。なお、試料とは測定用の試料のことを言う。

また、太陽光吸収率の算出に必要な試料の絶対分光全反射率  $\rho_{Sa\lambda}$  は、試料の相対分光全反射率に標準試料の絶対分光全反射率  $\rho_{Ra\lambda}$  [7] を掛け合わせるにより、(2-2) 式で与えられる。

$$\rho_{Sa\lambda} = \left( \frac{\rho_{St\lambda}}{\rho_{Rt\lambda}} \right) \rho_{Ra\lambda} \quad (2-2)$$

ここで、 $\rho_{St\lambda}$  は任意の入射角の試料の分光全反射率、 $\rho_{Rt\lambda}$  は任意の入射角の標準試料の分光全反射率である。

$J_{\lambda}$  には、黒体ふく射式 [8] あるいはJohnson曲線 [9] が使われるが、ここでは高度約 11.6 km の上空で測定された太陽光の分光分布を用いた [9]。大気圏外の太陽光の分光分布は約 6,000 K の黒体ふく射に相当し、波長  $0.48 \mu\text{m}$  をピークに  $0.20 \sim 100.00 \mu\text{m}$  の広い波長範囲に存在している。

## b) 全半球放射率

全半球放射率は、ある温度  $T$  (表面) の物質表面から単位時間、単位面積当たり  $2\pi$  空間にふく射するエネルギーと、それと同温度にある黒体表面から単位時間、単位面積当たりふく射するエネルギーの比として定義され、(2-3) 式で与えられる [10]。

$$\begin{aligned} \varepsilon_H(T) &= \frac{\int_0^{\infty} \varepsilon_{\lambda} e_{b\lambda} d\lambda}{\int_0^{\infty} e_{b\lambda} d\lambda} \\ &= \frac{\int_0^{\infty} \varepsilon_{\lambda} e_{b\lambda} d\lambda}{\sigma T^4} \end{aligned} \quad (2-3)$$

ここで、 $e_{b\lambda}$  は黒体の分光全半球ふく射エネルギー、 $\varepsilon_{\lambda}$  は分光全半球放射率、 $\sigma$  はステファン

ボルツマン定数である。

## 2.2.2 熱放射特性の測定技術

ここでは、これまで地上において行われてきた太陽光吸収率と全半球放射率のそれぞれの測定法について記述する。

### a) 太陽光吸収率

太陽光吸収率の測定には、一般に積分球と可視域の分光器を組み合わせた可視分光測定法が、また宇宙工学の分野では宇宙船の熱設計に必要なデータを取得するために、GierとDunkleらが開発した簡便な測定装置（Gier Dunkle MS-251）<sup>〔11〕</sup>が使われている。

#### (1) 可視分光測定法

可視分光測定法は積分球と可視域の分光器から構成され、 $0.25 \sim 2.60 \mu\text{m}$ の波長範囲のほぼ垂直入射の絶対全反射率の測定が可能である。積分球の特徴は正反射率、拡散反射率、全反射率がそれぞれ独立に測定され（以後、反射率は断らない限り相対反射率として扱う）、太陽光吸収率の算出に必要な全反射率が直接求められる点にある。積分球の考え方は、標準試料と試料の測定をほぼ同時に行うか否かによって異なり、基本的にはシングルビーム方式とシングルビームデュアル方式の2つに分類される<sup>〔12〕</sup>。なお、積分球の測定では、標準試料または試料の正反射成分が入射ビームポートから失われないように入射角はほぼ垂直入射、つまり $5^\circ$ 付近の入射角で通常測定が行われている。

以下に、シングルビーム方式とシングルビームデュアル方式の概要を記述する。

#### (i) シングルビーム方式

図2-1にシングルビーム方式の概念図を示す。積分球は入射ビームポート、光トラップポート、試料または標準試料を取り付ける試料ホルダと検出器ホルダから構成されている。試料の相対全反射率は、始めに標準試料の全反射を測定し、それを試料の全反射と比較することにより求められる。

以下に、シングルビーム方式による試料の全反射率の算出方法について説明する。

強度 $I$ のビームが標準試料と試料にほぼ垂直に入射するときのシングルビーム時の検出器の受光量 $O_{RS}$ ,  $O_{SS}$ は, それぞれ(2-4)式と(2-5)式で与えられる.

$$\begin{aligned}
 O_{RS} &= I \rho_{Rt} + I \rho_{Rt} \rho_{Rh} \\
 &= I \rho_{Rt} (1 + \rho_{Rh})
 \end{aligned}
 \tag{2-4}$$

$$\begin{aligned}
 O_{SS} &= I \rho_{St} + I \rho_{St} \rho_{Sh} \\
 &= I \rho_{St} (1 + \rho_{Sh})
 \end{aligned}
 \tag{2-5}$$

ここで,  $\rho_{Rt}$ ,  $\rho_{St}$ は標準試料と試料のほぼ垂直入射の全反射率,  $\rho_{Rh}$ ,  $\rho_{Sh}$ は標準試料と試料の多重反射率である. なお, 多重反射率とは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のことを言う.

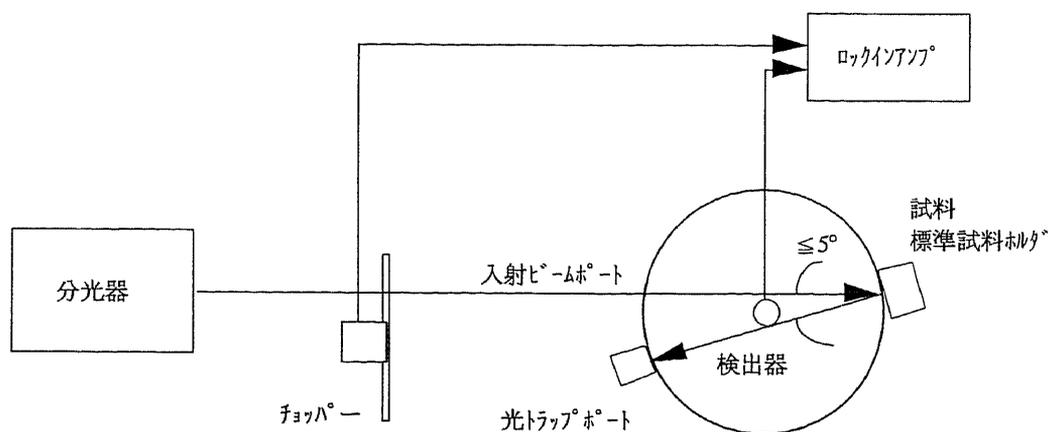


図 2-1 シングルビーム方式

(2-4) 式、(2-5) 式により、ほぼ垂直入射の試料のシングルビームの相対反射率  $\rho_{SS}$  は、(2-6) 式で与えられる。

$$\rho_{SS} = \frac{O_{SS}}{O_{RS}} = \frac{I \rho_{St} (1 + \rho_{Sh})}{I \rho_{Rt} (1 + \rho_{Rh})} \quad (2-6)$$

(2-6) 式により、シングルビーム方式では単純に標準試料と試料の比を求める方法では標準試料と試料の多重反射率  $\rho_{Rh}$ 、 $\rho_{Sh}$  の項が消去されない。ここでは、この影響を調べるために白色塗料と黒色塗料の試料を例にして試料表面積と積分球表面積の比をパラメータにして多重反射率を求めた。この結果を図 2-2 に示す。多重反射率の影響は、黒色塗料のように吸収率の高い物質ほど顕著になることが認められた。そこで、一般に使われている内径 200 mm、直径 15 mm の試料ホルダの積分球について太陽光吸収率 0.95 の黒色塗料を例にして多重反射率の影響を評価した。この積分球の多重反射率は図 2-2 により約 0.967 になり、多重反射率が太陽光吸収率に及ぼす影響は (2-1) 式により約 3% になることが確認された。

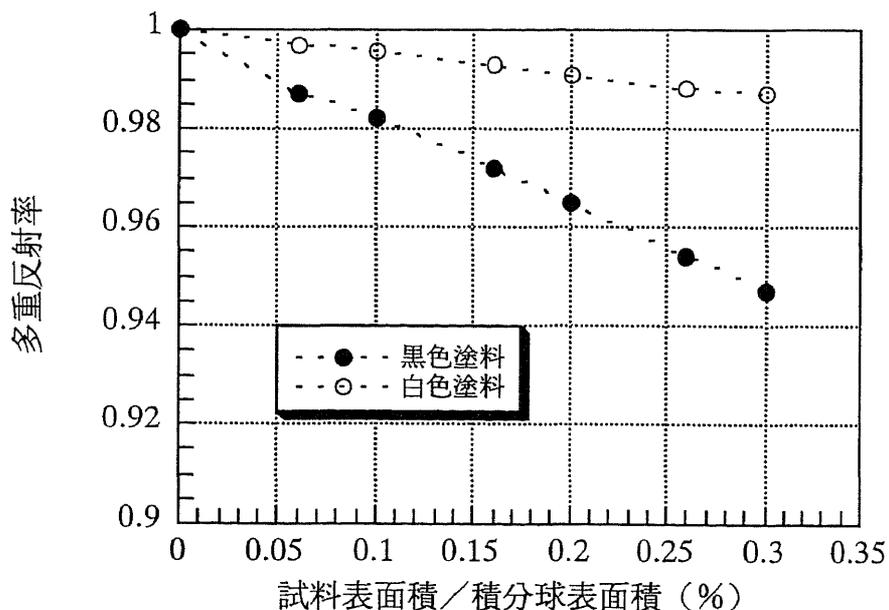


図 2-2 多重反射率の影響

(ii) シングルビームデュアル方式

図 2-3 にシングルビームデュアル方式の概念図を示す。本方式は標準試料と試料が球内壁に取り付けられ、標準試料および試料の入射ビームポートに対して共用の光トラップポートがある。入射ビームは、積分球の手前に置かれた回転ミラーの切り替えによって交互に標準試料と試料に導かれ、試料の全反射率がほぼ同時に求められる。

以下に、シングルビームデュアル方式による全反射率の算出方法を記述する。

強度  $I$  のビームが標準試料と試料にほぼ垂直に入射するときのデュアルビームの検出器の出力  $O_{RD}$ ,  $O_{SD}$  は、それぞれ (2-7) 式, (2-8) 式で与えられる。

$$\begin{aligned} O_{RD} &= I \rho_{Rt} + I \rho_{Rt} \rho_{Rh} + I \rho_{Rt} \rho_{Sh} \\ &= I \rho_{Rt} (1 + \rho_{Rh} + \rho_{Sh}) \end{aligned} \quad (2-7)$$

$$\begin{aligned} O_{SD} &= I \rho_{St} + I \rho_{St} \rho_{Sh} + I \rho_{St} \rho_{Rh} \\ &= I \rho_{St} (1 + \rho_{Sh} + \rho_{Rh}) \end{aligned} \quad (2-8)$$

(2-7) 式, (2-8) 式により、ほぼ垂直に入射する試料のデュアルビームの相対反射率  $\rho_{SD}$  は、(2-9) 式で与えられる。

$$\begin{aligned} \rho_{SD} &= \frac{O_{SD}}{O_{RD}} = \frac{I \rho_{St} (1 + \rho_{Sh} + \rho_{Rh})}{I \rho_{Rt} (1 + \rho_{Rh} + \rho_{Sh})} \\ &= \frac{\rho_{St}}{\rho_{Rt}} \end{aligned} \quad (2-9)$$

(2-9) 式により、試料の全反射率は多重反射率が消去されて求められ、ほぼ垂直入射の太陽光吸収率を求めるにはシングルビームデュアル方式を用いて測定するとよいことになる。

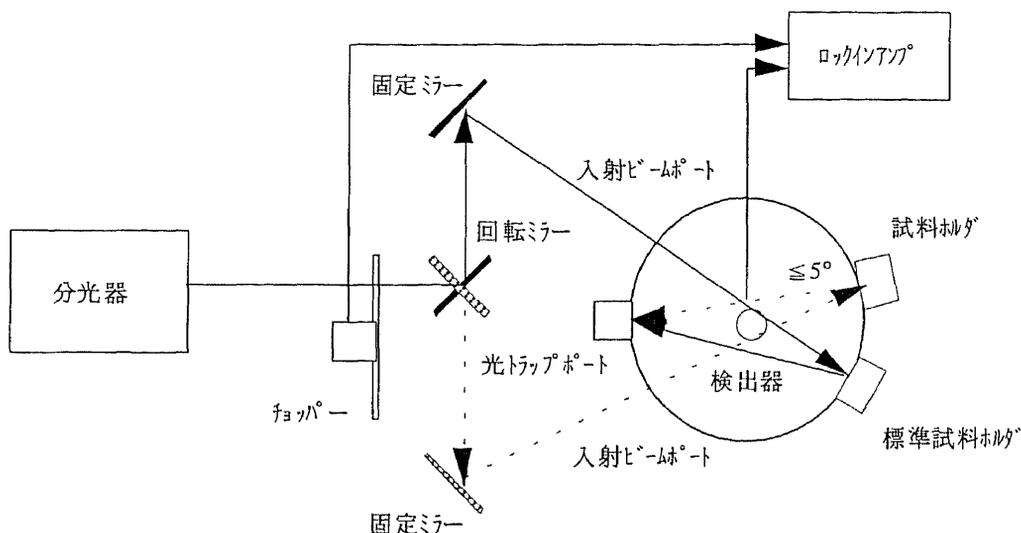


図 2-3 シングルビームデュアル方式

(2) Gier Dunkle MS-251

Gier Dunkleの開発したMS-251測定装置は[13]，クセノン・アークランプに紫外から赤外の4枚のフィルタを取り付けた疑似太陽光光源，小型の積分球および検出器からなり， $0.3 \sim 2.5 \mu\text{m}$ の波長範囲の全反射率の測定が可能である．この測定方法は，基本的には既に述べたシングルビーム方式と同様で，ただ異なることは分光器の代わりに疑似太陽光光源が用いられている．試料の全反射率は，始めに積分球の内壁の一部である標準試料にほぼ垂直に疑似太陽光光源の光束を入射させ，そのときの出力が100%になるように合わせられる．次に，試料に置き換えてデータが取得される．そのデータが直接試料の相対全反射率を表している．この測定装置では分光データが得られないことと，多重反射率の項が消去されないことが確認されている．

b) 全半球放射率

全半球放射率の測定法は，これまで赤外域の分光測定法と熱量測定法から検討されている．以下にそれぞれの測定技術の現状について述べる．

## (1) 赤外域分光測定法

赤外域の分光測定法による全半球放射率の測定には、積分鏡面と分光器を組み合わせた装置の赤外分光法と、またGireとDunkleらが開発した、太陽光吸収率の測定と同様に測定方法が簡便な測定装置（Gire Dunkle DB-100）がある。

### (i) 赤外分光法

赤外分光法による全半球放射率は分光器と積分鏡面から構成され、 $5 \sim 25 \mu\text{m}$ の波長範囲の測定が可能である。この方法には2種類の測定方法があり、1つはある温度の試料表面のふく射エネルギーとそれと同温度の黒体表面のふく射エネルギーの比から直接全半球放射率が求められるふく射測定法と、他は牧野らが<sup>[14-15]</sup>開発した金などの試料を標準にして試料の分光半球反射率が求められる反射測定法である。図2-4(a), (b)にふく射測定法と反射測定法の概念図を示す。

### (ii) Gire Dunkle DB-100

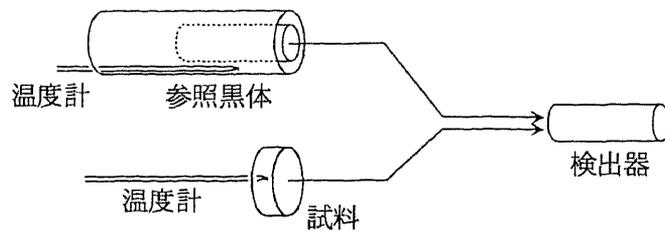
Gire DunkleのDB-100測定装置は<sup>[16]</sup>、高温と低温の2つの円筒形の光源、検出器、および2種類の標準試料からなり、 $5 \sim 25 \mu\text{m}$ の波長範囲の垂直放射率が求められる。その概念図を図2-5に示す。標準試料にはそれぞれ金蒸着を施した高反射率標準試料と黒色塗料を塗布した低反射率標準試料を用いている。この測定方法は、始めに2つの標準試料により低反射率と高反射率の基準値が設定される。次に試料を置くことにより垂直反射率が測定され、この結果、垂直放射率が求められる。しかし、垂直放射率から全半球放射率を算出するにはJakobらによる換算式<sup>[17]</sup>が必要になる。このため電気良導体や絶縁体のような表面の材料では、室温付近で後述著者の提案するカロリメータ法の測定結果と比較的良好一致が得られるが、半導体のような物質の表面では換算式が不備なため余り良好一致が得られない。

## (2) 熱量測定法

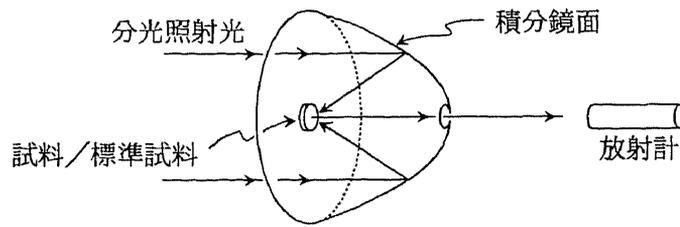
試料の表面から単位時間、単位面積当たり半球空間にふく射で失われる熱量を測定して求められるもので定常法と非定常法がある。

### (i) 定常法

R.E.Taylorらが開発した多重物性測定は、電気抵抗率、熱伝導率、比熱、熱拡散率、全半球放射率がほぼ同時に求められる方法である<sup>[18]</sup>。図2-6に全半球放射率を測定するときの概念図を示す。この測定装置により全半球放射率を測定するには、水冷却された真空容器の中央に置かれた導電性で極細線の試料に直接通電加熱をする。このとき試料が十分に長ければ、試



(a) 透射測定法



(b) 反射測定法

図 2-4 赤外分光法の透射測定法と反射測定法の概念図

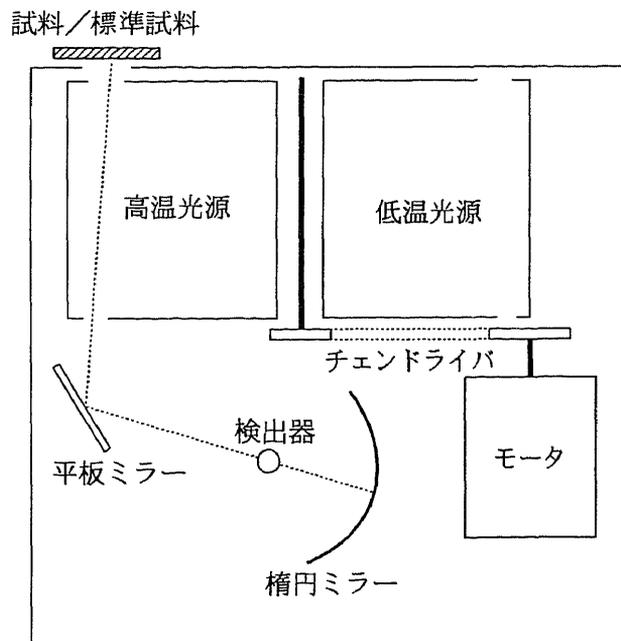


図 2-5 Gire Dunkle DB-100 測定装置概念図

料の中央部分に定常状態の温度の部分が生じ（例えば、A点とB点とする）、このときの熱伝導方程式が導かれ、A、Bの2点間の距離と電圧降下および電流、試料と周囲の温度、試料の円周の長さがわかれば、熱伝導方程式を整理することにより全半球放射率が求められる。この測定方法では、試料が導電性で、極細線の物質に限られている。また、全半球放射率は、室温から2, 200 Kおよび2, 700 Kと非常に高温領域で求められている。

(ii) 非定常法 [19]

日向野らが [20] 提案した測定方法では、液体チッ素冷却された真空容器に金属の棒状試料が吊り下げられ、試料全体は移動式の円筒状のヒータでふく射加熱されている。試料の温度が十分定常状態に達したら、円筒状ヒータを試料に影響を及ぼさない所まで移動する。このとき試料温度の時間的変化を測定し、周囲の温度、試料の比熱および質量がわかれば全半球放射率が求められる。この測定方法は、測定中は試料表面の温度分布が一様であることと、試料の比熱が既知であることが必要になる。図 2-7 に測定装置の概念図を示す。

以上、全半球放射率の測定方法をまとめると次の通りである。

- (1) 赤外域分光測定法による全半球放射率は、測定波長範囲が5～25  $\mu\text{m}$ のために室温付近の測定に限られる。したがって、低温域から高温域の全半球放射率の温度依存性を求

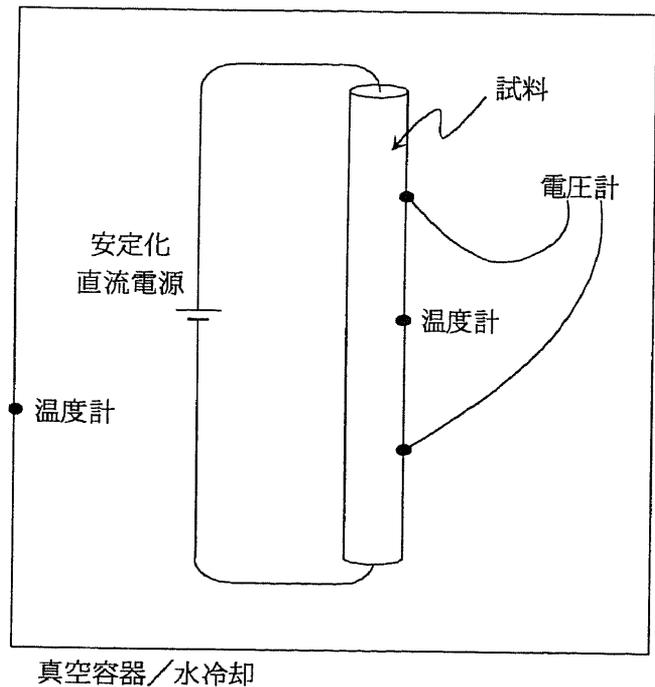


図 2-6 定常法による全半球放射率測定装置概念図

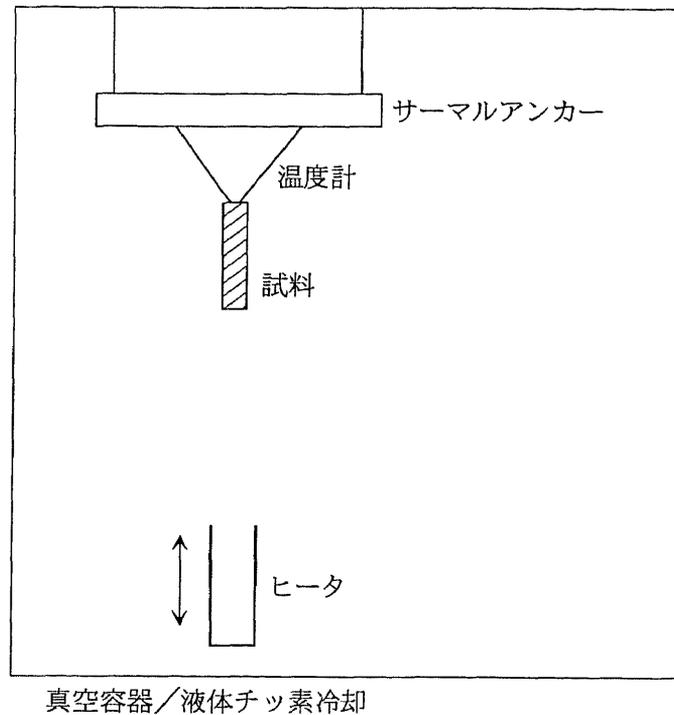


図 2-7 非定常法による全半球放射率測定装置概念図

めるためには、広範囲の分光測定が必要になる。例えば、170 Kの低温から400 Kの高温の全半球放射率の温度依存性を赤外域分光測定法で求めるためには、2～100  $\mu\text{m}$ の波長範囲の分光測定が必要になる。それは、170 Kの黒体の場合、ふく射エネルギーが波長17  $\mu\text{m}$ をピークに4～100  $\mu\text{m}$ の波長範囲に分布し、また400 Kの場合、波長8  $\mu\text{m}$ をピークに2～42  $\mu\text{m}$ の波長範囲に分布していることによる。

- (2) 熱量測定法による全半球放射率は、定常法、非定常法とも測定試料には導電性が要求され、その測定温度範囲も室温から高温域である。したがって、多層膜構造や絶縁性物質などの宇宙用材料にはこの測定方法は適用できない。

### 2.3 熱放射特性の測定技術の改善と評価

宇宙空間を飛翔する宇宙船の表面では、各表面に入射する太陽光の入射角が任意であることと、また各表面の温度が場所によって低温から高温と大きく隔たっていることなどが考えられ

る。したがって、従来の測定技術で求められている、ほぼ垂直入射の太陽光吸収率、および室温の全半球放射率の値を用いて、宇宙船の温度を十分に予測できるとは言いがたい。

そこで本節では、太陽光吸収率については入射角依存性が求められる分光測定法による測定装置を改善、試作する。以後分光法と言う。また、全半球放射率については低温から高温の温度依存性が求められる熱量測定法による測定装置を提案、試作する。以後カロリメータ法と言う。そして、それぞれの測定装置の誤差要因について検討する。

### 2.3.1 分光法による太陽光吸収率の入射角依存性の測定 [21]

ほぼ垂直に入射する太陽光吸収率の測定方法としてシングルビーム方式とシングルビームデュアル方式について説明し、シングルビームデュアル方式が優れていることを述べた。そこで、全反射率の測定が可能な積分球の利点を生かして、太陽光吸収率の入射角依存性を測定する方法として、次の2案について検討を行った。

- ①第1案は積分球の中心に標準試料または試料を置き、入射ビームに対して試料を回転させ、入射角を変える。
  - ②第2案は入射ビームに対して試料の表面を回転軸にして積分球全体を回転させ、入射角を変える。
- ①項の案は、試料が積分球の中心に置かれるために、積分球内の光の一様性が失われることから採用を取りやめた。②項の案は図2-3によりシングルビームデュアル方式の構造では標準試料と試料の入射角を同時に同じ角度に変えることが不可能なために、ここでは採用を取りやめた。他方、シングルビーム方式を検討した結果、②項の案が可能であることからこの方式を採用することにした。但し、シングルビーム方式では多重反射率の問題があるために、以下の実験手順により消去する。

#### a) 多重反射率の消去法

不透明物質の表面の反射を積分球で測定すると、図2-8のように正反射率 $\rho_{Sn}$ 、拡散反射率 $\rho_{Sd}$ および分光多重反射率 $\rho_{Sh}$ に分類され、その検出器の出力 $O_S$ は、(2-10)式で与えられる。

$$\begin{aligned}
O_S &= I\rho_{Sn}D_n + I\rho_{Sd}D_d + (I\rho_{Sn}D_n + I\rho_{Sd}D_d)\rho_{Sh}D_h \\
&\quad + \{(I\rho_{Sn}D_n + I\rho_{Sd}D_d)\rho_{Sh}D_h\}\rho_{Sh}D_h + \dots \\
&\quad + \{(I\rho_{Sn}D_n + I\rho_{Sd}D_d)\rho_{Sh}D_h\}\rho_{Sh}D_h^{n-1} + \dots \\
&= X(\rho_{Sh}D_h)^0 + X(\rho_{Sh}D_h)^1 + X(\rho_{Sh}D_h)^2 + \dots \\
&\quad + X(\rho_{Sh}D_h)^{n-1} + X(\rho_{Sh}D_h)^n \tag{2-10}
\end{aligned}$$

ただし,  $X = I\rho_{Sn}D_n + I\rho_{Sd}D_d$

ここで,  $I$ は試料にほぼ垂直に入射する入射ビーム強度,  $D_n$ ,  $D_d$ および $D_h$ は正反射, 拡散反射, 多重反射に対するそれぞれの検出器効率である.

さらに(2-10)式を整理すると, (2-11)式で表される.

$$O_S = \frac{\rho_{Sn}D_n + \rho_{Sd}D_d}{1 - \rho_{Sh}D_h} I \tag{2-11}$$

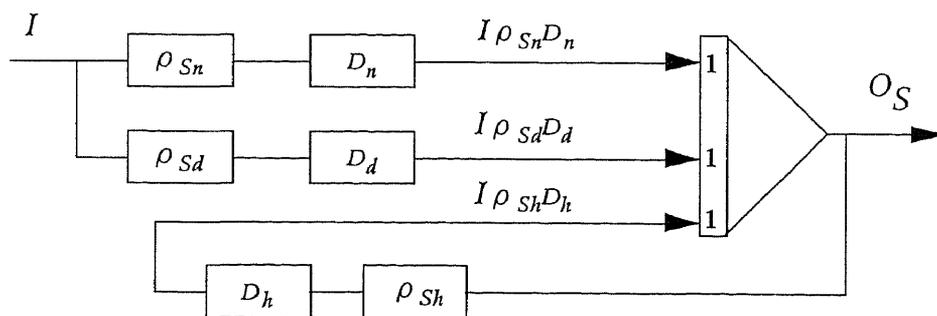


図 2-8 積分球内における反射の概念図

ここで、試料が拡散性の表面であれば、(2-11)式の分子第1項の正反射の項は無視でき(2-12)式で与えられる。

$$O_s = \frac{\rho_{sd} D_d}{1 - \rho_{sh} D_h} I \quad (2-12)$$

次に、図2-9に従って多重反射率を消去する手順について説明する。

図の(a)、(b)に示すように、試料にほぼ垂直入射と、拡散入射の検出器の出力はそれぞれ $O_{Sn}$ 、 $O_{Sd}$ とすると、(2-12)式より(2-13)式、(2-14)式で与えられる。拡散入射とは入射ビームをいったん積分球内壁に照射させ、積分球の内壁で拡散反射された光の入射を言う。

$$(a) \quad O_{Sn} = \frac{\rho_{sd} D_d}{1 - \rho_{sh} D_h} I \quad (2-13)$$

$$(b) \quad O_{Sd} = \frac{\rho_I D_d}{1 - \rho_{sh} D_h} I \quad (2-14)$$

ここで、 $\rho_I$ は積分球内壁にほぼ垂直に入射するときの内壁の拡散反射率である。

同様に、図2-9の(c)、(d)から標準試料にほぼ垂直に入射と、拡散入射の検出器の出力はそれぞれ $O_{Rn}$ 、 $O_{Rd}$ とすると、(2-12)式より(2-15)式、(2-16)式で与えられる。

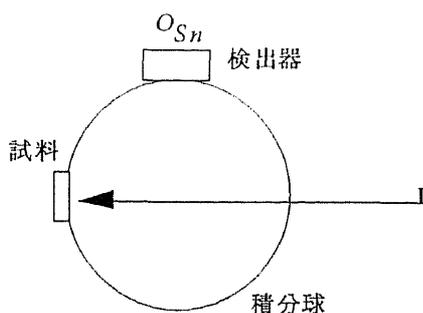
$$(c) \quad O_{Rn} = \frac{\rho_{Rd} D_d}{1 - \rho_{Rh} D_h} I \quad (2-15)$$

$$(d) \quad O_{Rd} = \frac{\rho_I D_d}{1 - \rho_{Rh} D_h} I \quad (2-16)$$

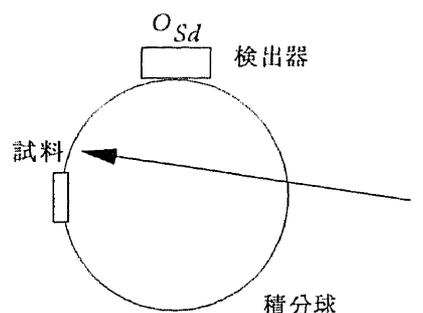
ここで、 $\rho_{Rd}$ は標準試料にほぼ垂直に入射するときの標準試料の拡散反射率、 $\rho_{Rh}$ は標準試料の多重反射率である。

(2-13)式、(2-14)式、(2-15)式、および(2-16)式より、標準試料に対する試料の比を求めることにより試料と標準試料の多重反射率 $\rho_{Sh}$ 、 $\rho_{Rh}$ が消去され、試料の全反射率が(2-17)式で与えられる。

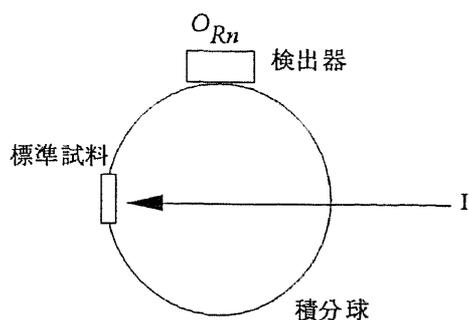
$$\frac{O_{Sn} O_{Rn}}{O_{Sd} O_{Rd}} = \frac{\rho_{Sd}}{\rho_{Rd}} \quad (2-17)$$



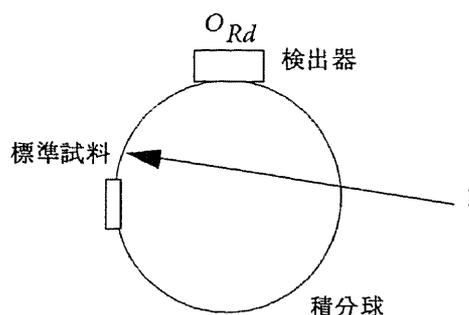
(a) 試料に垂直入射したときの反射率



(b) 試料に拡散入射したときの反射率



(c) 標準試料に垂直入射したときの反射率



(d) 標準試料に拡散入射したときの反射率

図 2-9 多重反射率の消去法

## b) 太陽光吸収率の入射角依存性測定装置

### (1) 入射角可変積分球

シングルビーム方式を基本にして入射角が変えられる入射角可変積分球を試作した。この積分球には8つの入射ビームポート、試料ホルダ、検出器用ホルダ、および拡散反射率測定用ホルダがある。図2-10にその概念図を示す[22]。この寸法は、内径300mm、試料部の直径18mmである。入射角は試料表面の中心部を回転軸に積分球全体を回転し、 $0^{\circ}$ 、 $5^{\circ}$ に加えて $10^{\circ}$ ～ $60^{\circ}$  ( $10^{\circ}$  毎)の範囲で変えられる。各入射ビームポートの開口部の大きさは、ここから出射する光量が一様になるように開口部の面積は全て等しくなるように製作されている。

円盤形状の試料ホルダには標準試料の他に3枚の試料を取り付けることが可能である。標準試料と積分球の内壁には $\text{BaSO}_4$ を基材にした塗料(コダック社製: Eastman white reflectance coating 6080)をスプレー(コダック社製: Eastman 13270)で塗装を行っている。

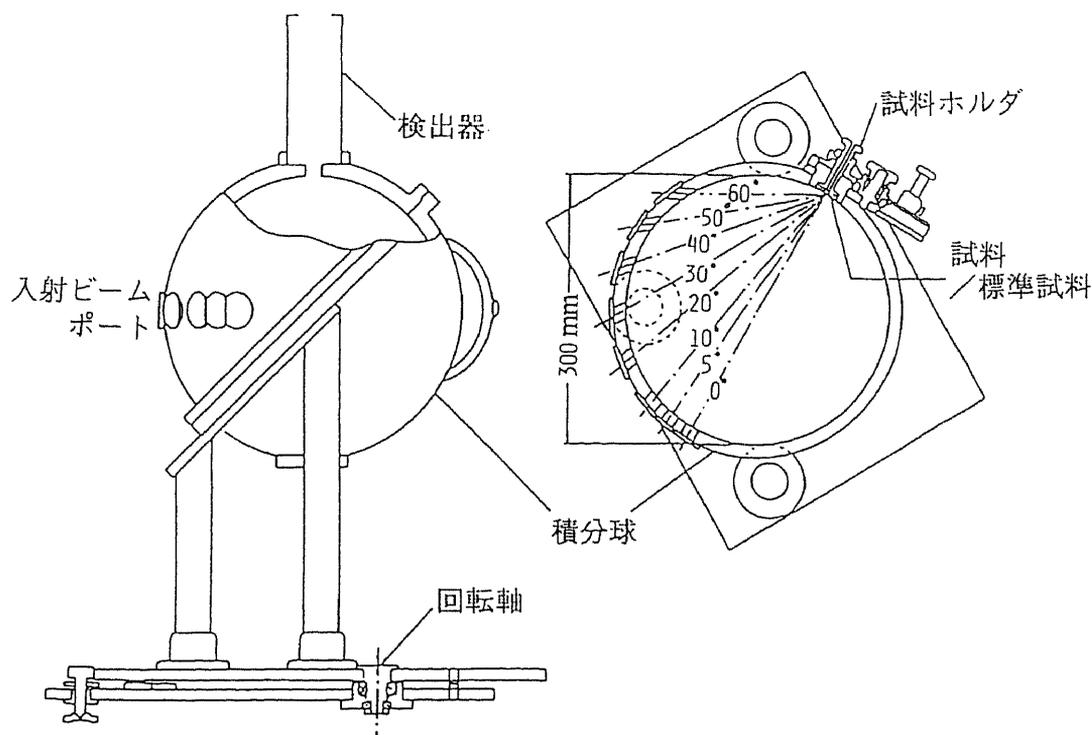


図2-10 入射角可変積分球

(2) 入射角可変積分球と可視分光装置

本測定装置は、ツェ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み合わせた光学系およびデスクトップコンピュータ（YHP社製：HP9000/300）から構成され、 $0.26 \sim 2.50 \mu\text{m}$ の波長範囲の分光全反射率および分光透過率の測定が可能である。図2-11にその概念図を示す。また、表2-1に可視分光器の諸元を示す。分光器は焦点距離500mm、明るさ $f=6.2$ 、ブレイズ波長300nm, 755nm,  $1 \mu\text{m}$ ,  $1.6 \mu\text{m}$ の4種類の回折格子、5種類の波数分離フィルタと250Wのタンゲステンハロゲンランプ光源からなる。検出器は $0.26 \sim 1.00 \mu\text{m}$ の波長範囲では光電子増倍管（浜松ホトニクス社製：R1104/R316）を、 $1.00 \sim 2.50 \mu\text{m}$ の波長範囲ではPbSセル（浜松ホトニクス社製：PS-1002）が使用されている。出力信号はロックインアンプ（ITHACO社製：397EO）で増幅された後、デスクトップコンピュータに送出される。このデスクトップコンピュータでは次のような処理が行える。

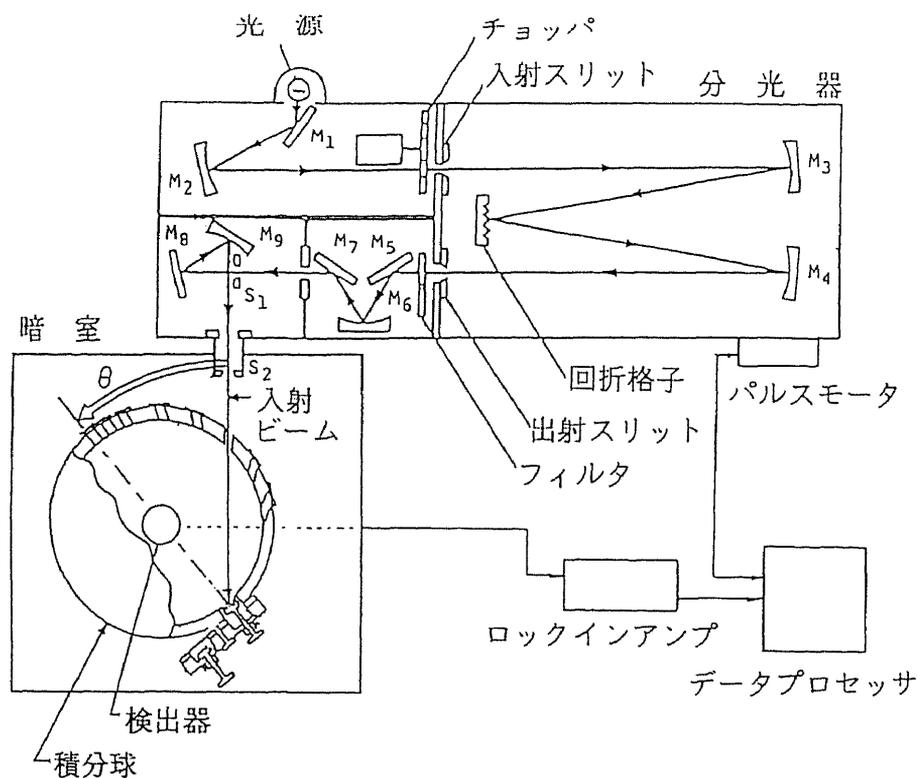


図2-11 分光法による太陽光吸収率入射角依存性測定装置

表 2-1 可視分光器の諸元

型 式	ツェルニターナ型ソグレルビーム
波長範囲	0.26~2.50 $\mu\text{m}$
焦点距離	500mm
明るさ	f=6.2
回折格子 ブレース波長	300nm, 755nm, 1 $\mu\text{m}$ , 1.6 $\mu\text{m}$
光 源	250Wタンクステソハロゲンランプ
検出器	光電子増倍管 (0.26~1.00 $\mu\text{m}$ ) PbSセル (1.00~2.50 $\mu\text{m}$ )

①分光透過率や分光反射率のグラフ表示, および太陽光吸収率の計算処理等.

②パルスモータの駆動制御.

一般の分光器の波長駆動は, 一定時間内にある波長範囲を走行するために, 必ずしも検出器の応答時間を考慮した測定, つまり検出器の出力が安定しているか否かを確認した上での測定が行われていない. そこで本装置では, 検出器の出力が安定したことを確認した後, パルスモータを駆動するようにした. この方法により標準試料と試料の分光反射率の違いによる検出器の応答時間差から生じる測定誤差が消去される.

### (3) 太陽光吸収率の入射角依存性の測定方法

入射角  $5^\circ$  の測定を例にして太陽光吸収率の入射角依存性の測定方法を述べる. 基本的には図 2-9 に従って求められている.

①入射角  $5^\circ$  の試料の検出器の出力  $O_{Sn}$  の測定を行う, (2-13) 式.

試料は試料ホルダに, 標準試料は拡散反射率測定用ホルダにそれぞれ設置される.

②拡散入射の試料の検出器の出力  $O_{Sd}$  の測定を行う, (2-14) 式.

標準試料は試料ホルダに、試料は拡散反射率測定用ホルダにそれぞれ設置される。

③入射角  $5^\circ$  の標準試料の検出器の出力  $O_{Rn}$  の測定を行う、(2-15)式。

標準試料は試料ホルダと拡散反射率測定用ホルダにそれぞれ設置される。

④拡散入射の標準試料の検出器の出力  $O_{Rd}$  の測定を行う、(2-16)式。

標準試料は試料ホルダと試料拡散反射率測定用ホルダにそれぞれ設置される。

⑤ ①, ②, ③, ④, の測定結果を(2-17)式に代入すると試料の相対全反射率が算出される。そのとき標準試料の絶対全反射率の重みを掛けて試料の絶対全反射率を求めておく。

⑥ ⑤の算出結果を(2-1)式に代入して太陽光吸収率が求められる。

以上のことを各入射角毎に行えば、太陽光吸収率の入射角依存性が求められる。

### 2.3.2 カロリメータ法による全半球放射率の温度依存性の測定 [21, 23]

全半球放射率の測定技術に関して赤外域分光測定法と熱量測定法について検討を行い、従来の装置では宇宙船の熱設計に必要な低温域から高温域の全半球放射率の温度依存性が求められないことが確認された。

そこで、本節では不透明物質に適応でき、かつ  $273 \sim 373$  K の温度範囲の全半球放射率の温度依存性が求められるカロリメータ法による測定装置を提案、試作する。

#### a) 測定装置と試料の構成

##### (1) 測定装置の構成

全半球放射率については、 $273 \sim 373$  K の温度範囲の温度依存性が測定可能なカロリメータ法による測定装置を提案、試作する。図 2-12 にその概念図を示す。本測定装置は測定室、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を行うデスクトップコンピュータ (YHP社製: HP9000/300) から構成されている。測定室の寸法は内径  $250$  mm の球形で、その材質は温度分布の一様性と時間的安定性の得られる熱容量の大きい銅が選定されている。測定室の内壁には吸収率の高い黒色塗料 (ケミグレイズ社製: ケミグレイズ Z306) が塗布されている。

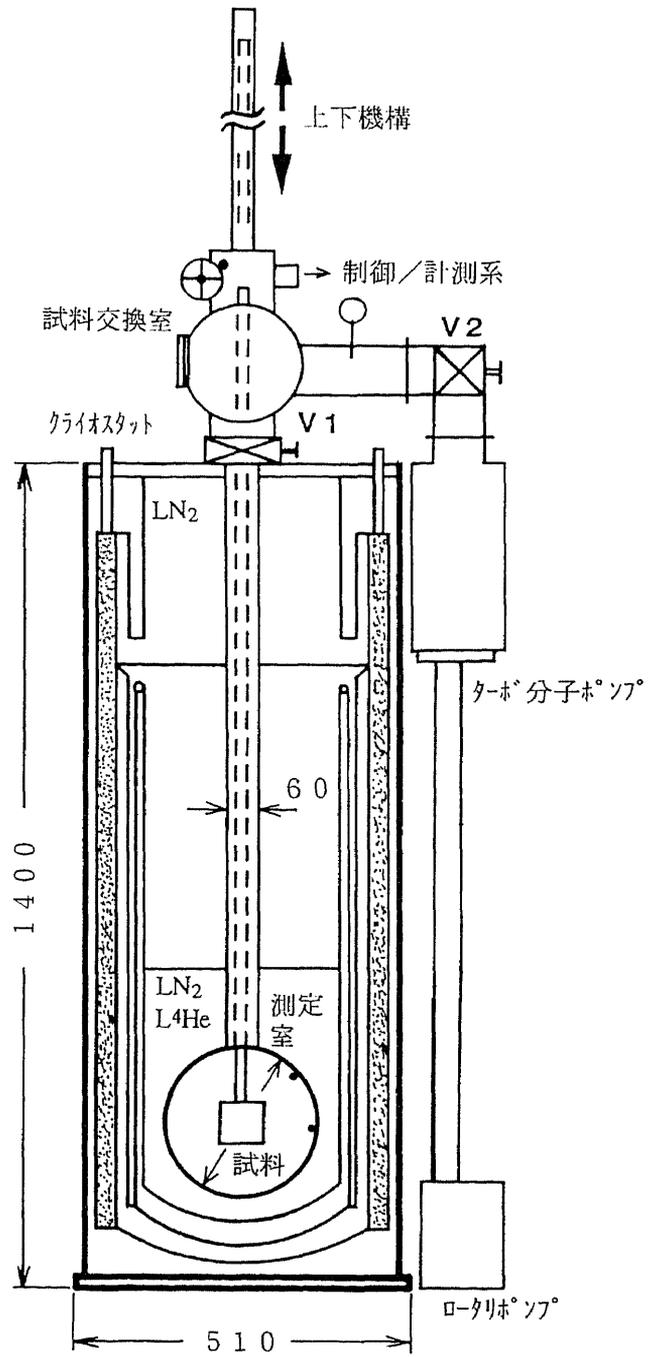


図 2-1 2 カロリメータ法による全半球放射率温度依存性測定装置

測定室は直径510mm、深さ1400mmのクライオスタットの底部に設置され、液体チッ素または液体ヘリウムによる冷却が可能である。試料の交換は、上下機構により試料を測定室から試料交換室に移動して行われる。この方法により、試料の交換毎に測定室を室温に戻すことなく、低温の安定した状態を保つことができ、連続して測定が可能になる。測定室の温度は、金+0.07%鉄対クロメル熱電対線を用いて上部と側部の2ヶ所が測定される。測定室はターボ分子ポンプ（大阪真空社製：TH300）により $10^{-5}$  Pa以下の真空度に保たれる。

## （2）試料の構成

試料の構造は、塗料、多層薄膜フィルム、カバーガラス付き太陽電池素子、および金属板などの不透明物質の材料に適用できるように板厚0.5mm、一辺30mmの正方形の2枚のAl板の間にシートヒータを挟んだサンドイッチ構造が基本になっている。図2-13に試料の構成を示す。したがって、塗料類の場合は基本構造に直接塗布し、AlやAg蒸着の熱制御フィルムの場合は基本構造に接着剤で貼り合わせた形になる。ただし、カバーガラス付き太陽電池素子の場合は基本構造の上に接着剤で貼り付けられ、その側面には表面と材質が異なるために、全半球放射率の温度依存性が既知であるAl蒸着フィルムが貼り合わせられる。

試料はサンドイッチ構造であるために、表裏試料の表面の分光特性の同一性が要求される。ここでは、フーリエ変換分光器（デジラボ社製：FTS-15E）を用いて入射角 $15^\circ$ の $2.5\sim 40.0\mu\text{m}$ の波長範囲の表裏試料の表面の分光反射率が等しいことを確かめてから試料の作製を行っている。

試料の温度測定は試料からの熱伝導損失を小さくするために、抵抗値の高い線径 $50\mu\text{m}$ のクロメル-アルメル熱電対線を用い、Al板表面の中央部が測定される。熱電対の校正は $13.8\sim 373.15\text{K}$ の温度範囲で正確さ $\pm 0.05\text{K}$ の標準白金測温抵抗体（千野製：R800-0）を用いて各ロット毎に行っている。この結果、 $173.15\sim 373.15\text{K}$ の温度範囲で正確さ $\pm 0.32\text{K}$ で計れることが確認されている。試料の温度制御用ヒータは、試料表面の温度分布の均一性が得られるように図2-13に示すパターンのシートヒータが用いられる。試料の供給電力量は、シートヒータの端子電圧と電流値をそれぞれ $1\mu\text{V}$ 、 $1\mu\text{A}$ の分解能で測定して算出される。電力供給線と電圧測定線は、試料からの熱伝導損失を考慮して抵抗値の高い銅、コンスタンタンを素材にした線径 $50\mu\text{m}$ のアドバンス線が用いられる。

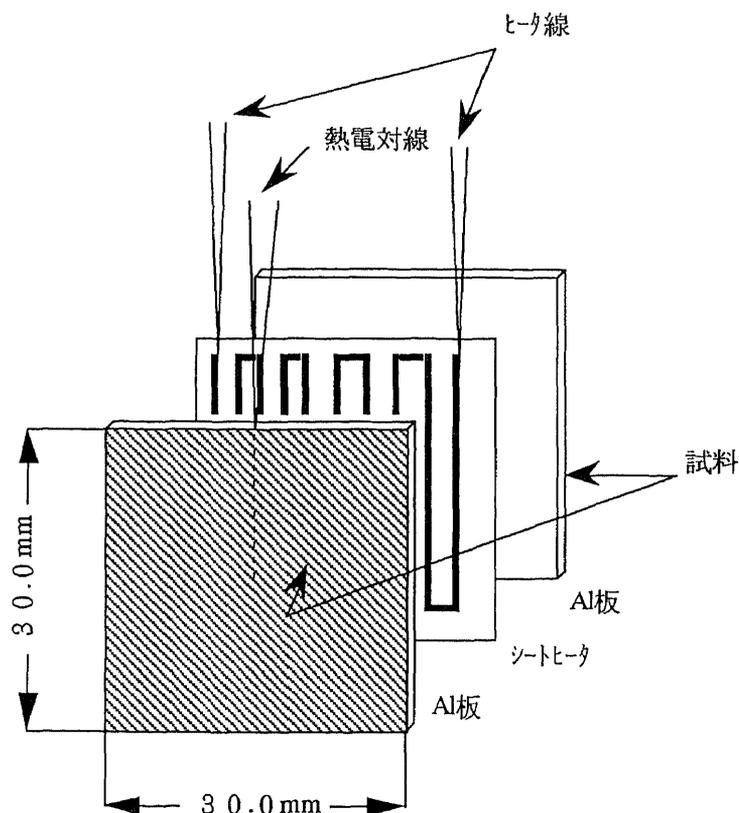


図 2-1 3 試料の基本構造

### (3) 全半球放射率の温度依存性の測定方法

全半球放射率の温度依存性の測定は、試料温度 173～373 K の温度範囲で比例制御方式により試料温度の制御を行い、計測の自動化が図られている。また、測定室は液体ヘリウムと液体チッ素の冷却が可能であるが、ここでは液体チッ素を用いたときの測定手順を説明する。

- ①液体チッ素で冷却された測定室に試料を設置し、低温に冷却された測定室と試料上下機構のポールの温度が電圧出力にして  $\pm 1 \mu\text{V}$  に安定するまで放置（約 12 時間程度）される。この間、試料温度は 350 K から 370 K に保持される。これは試料に吸着されたアウトガスを放出するために行われる。
- ②試料をある温度に設定して定常状態を得る。ここで試料温度の定常状態の判定は、目標温度の熱電対起電力に対して  $\pm 5 \mu\text{V}$  以内に収まり、かつ 20 分間連続して  $\pm 1 \mu\text{V}$  の安定度が得られたときとする。
- ③定常状態時の試料用ヒータの端子電圧と電流、測定室壁面の温度を測定する。

④試料温度，測定室温度，ヒータ端子電圧，電流などのデータの取得方法は，高温から低温，低温から高温と1サイクル行われ，データの再現性を確認しながら取得される．このときアウトガスの影響も調べられる．

試料の表面積と後述説明する試料に配線された熱電対線，電力供給線，端子電圧測定線の計6本のケーブル類の総熱損失量がわかれば，次に示す(2-19)式により全半球放射率は任意の温度で求められる．

全半球放射率の温度依存性は自動的に測定スケジュールに従って測定される．通常は373 Kの高温から始まり173 Kの低温まで20 K毎にデータが取得され，さらに低温から高温のデータが取得されデータの再現性が検証される．ただし，データの取得間隔は任意に選ぶことが可能である．

#### b) カロリメータ法による全半球放射率の算出

図2-14に示すようにヒータを内蔵したサンドイッチ構造の試料が $10^{-5}$  Pa以下の真空度に保たれ，かつ液体窒素温度に冷却された測定室の中央部にヒータケーブルで吊り下げられているものとする．この試料用ヒータに外部から電力を供給し，試料をある定常温度 $T_S$ に保つものとする，エネルギー保存式は，(2-18)式で与えられる．

$$Q = A_a \varepsilon_H (T_S) \sigma T_S^4 - \alpha_H (T_C) A_a F_{SC} \varepsilon_C (T_C) \sigma T_C^4 + q_w \quad (2-18)$$

ここで， $Q$ は試料に供給される電力， $F_{SC}$ は試料から測定室内壁を見る形態係数（試料は測定室内壁に比べて十分に小さい $F_{SC}=1$ である）， $\varepsilon_H$ は試料の全半球放射率， $\alpha_H$ は試料の全半球吸収率， $\varepsilon_C$ は測定室内壁の全半球放射率， $T_S$ は定常状態の試料温度， $T_C$ は定常状態の測定室温度， $A_a$ は試料全表面積， $q_w$ はリード線による熱損失量とジュール発熱量をまとめた総熱損失量， $\sigma$ はステファンボルツマン定数である．

したがって，全半球放射率は(2-18)式から(2-19)式のように導かれる．

$$\varepsilon_H(T_S) = \frac{Q - q_w}{A_a \sigma (T_S^4 - T_C^4)} \quad (2-19)$$

ただし、(2-19)式を導くための仮定条件は

(i) 黒色塗料で処理された内壁の全半球放射率  $\varepsilon_C = 1$ ,

(ii) 試料の全半球放射率と全半球吸収率は等しい ( $\varepsilon_H(T_S) = \alpha_H(T_C)$ ),

である。これらの影響については次節で評価する。

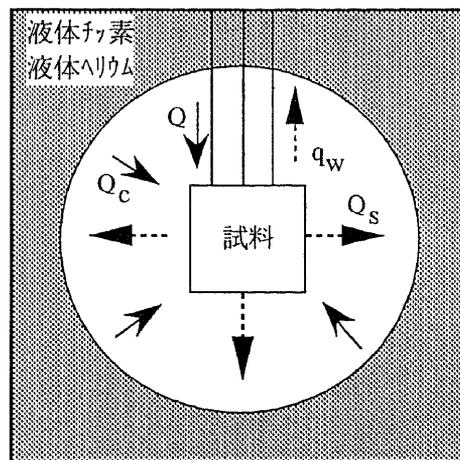


図 2-14 全半球放射率の算出方法

### 2.3.3 誤差要因の検討

分光法とカロリメータ法のそれぞれの測定装置の誤差要因について検討し、太陽光吸収率および全半球放射率の値に及ぼす影響を評価する。

#### a) 分光法

分光法による誤差要因とその検討を以下に示す。

(1) 標準試料の絶対反射率の値の影響。

標準試料BaSO<sub>4</sub>の絶対反射率の値は文献値を参照し、この誤差は±1%であるため太陽光吸収率に及ぼす影響は±1%である。

(2) 入射角可変積分球の各入射ビームポートの開口部による光の損失量の影響。

この積分球には入射ビームを導くための開閉可能な入射ビームポートが8つ設けられており、各ポートの開口部による光損失量の一樣性が必要になる。これは各開口部の一樣性が失われると入射角依存性を求める際に誤差を招くことになる。ここでは拡散性の黒色塗料と指向性の金蒸着のそれぞれ反射特性の異なる試料を例にして入射ビームポートによる光損失量を次のように調べた。

① 黒色塗料もしくは金蒸着試料の入射角5°の全反射率を100%に設定する。

② 5°以外の入射ビームポートを1ポート毎に開閉し、このとき開口部の全反射率の変化量が調べられ、この変化量が開口部の光損失量として表される。

③ ①の入射角を順次変えて②の項を調べる。

この結果、各入射ビームポートの開口部の光損失量は約1%で、一樣性が得られていることが確認された。

太陽光吸収率に及ぼす影響は-1%である

したがって、2項の誤差要因による太陽光吸収率の測定に及ぼす全誤差は+1%、-2%であることが確認された。

## b) カロリメータ法

カロリメータ法による誤差要因とその検討を以下に示す。

(1) 熱電対の校正の正確さの影響

正確さ±0.05Kの標準白金測温抵抗体を用い、173.15~373.15Kの温度範囲で校正し、正確さ±0.32Kで計れることが確かめられた。

全半球放射率に及ぼす影響は±1%である。

(2) 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本の熱伝導損失量と4本のジュール発熱量の影響。

(2)項は、次の手順により補正除去する。

① 試料に配線された各リード線の端点は低温で、かつ安定な上下機構のポール先端部に固定される。

- ② 試料は任意の定常状態の温度に設定される。このときのヒータ電流 $I_1$ と端子電圧 $V_1$ が測定され、試料に供給した電力 $W_1 (=V_1 \cdot I_1)$ とヒータ抵抗 $R_1$ が算出される。
- ③ 試料から2本の端子電圧測定線を取り除き、再び試料を②項と同じ定常状態の温度に設定される。試料温度が安定したとき電流 $I_2$ を測定し、②項で求めた抵抗値から供給電力 $W_2 (=R_1 \cdot I_2^2)$ が算出される。ここで試料温度は②項で設定した温度に対して $\pm 1 \mu V$ 以内に設定することを条件とした。
- ④ ②項の供給電力量 $W_1$ から③項の供給電力量 $W_2$ を差し引くことにより2本のリード線からの熱損失量とジュール発熱量を合わせた熱損失量( $q_1 = W_1 - W_2$ )が求められる。次に、クロメル-アルメル熱電対線の熱損失量については通常の測定に熱電対を一对多く加えて、その一对の有無によって生じる熱損失量( $q_2$ )が求められる。
- 以上により、試料に配線された6本のリード線の総熱損失量( $q_w = 2q_1 + q_2$ )を試料温度の関数として図2-15に示す。

### (3) 測定室のふく射の影響

試料表面と測定室壁面のふく射交換は測定室壁面の温度に依存して影響される。例えば、試料の表面温度が173Kの場合、測定室壁面が液体ヘリウムで冷却されるとき測定室壁面の影響は無視できるが、液体チッ素で冷却されるときは試料の表面温度に対して測定室壁面の温度の割合が約4.6%になり測定室壁面の影響を無視することができない、そこで、黒色塗料を例にして測定室を液体ヘリウムと液体チッ素で冷却したときの全半球放射率を求めた。この結果を図2-16に示す。全半球放射率は、試料温度173Kにおいて液体チッ素冷却の場合、液体ヘリウム冷却と比較して $\pm 0.5\%$ 以内であることが確かめられた。したがって、全半球放射率を導く際の2つの仮定条件は成立するものと判断する。

この測定室壁面のふく射が全半球放射率に及ぼす影響は $\pm 0.5\%$ である。

ゆえに、全半球放射率の測定で考えられる全誤差は低温域で $+1.5\%$ 、高温域で $\pm 1.0\%$ であることが確かめられた。

表2-2に分光法とカロリメータ法のそれぞれの誤差要因と誤差量、および全誤差をまとめて示す。

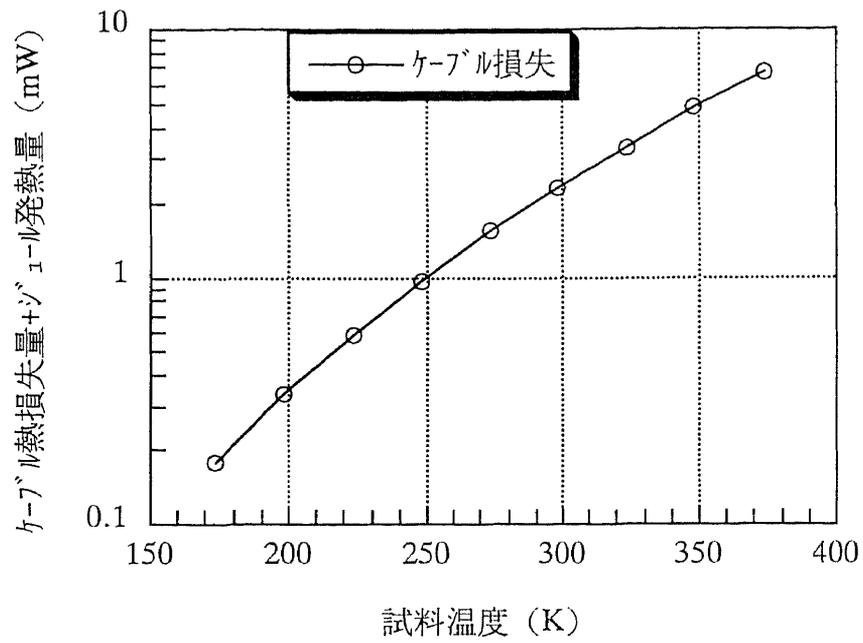


図 2-15 リード線による総熱損失量

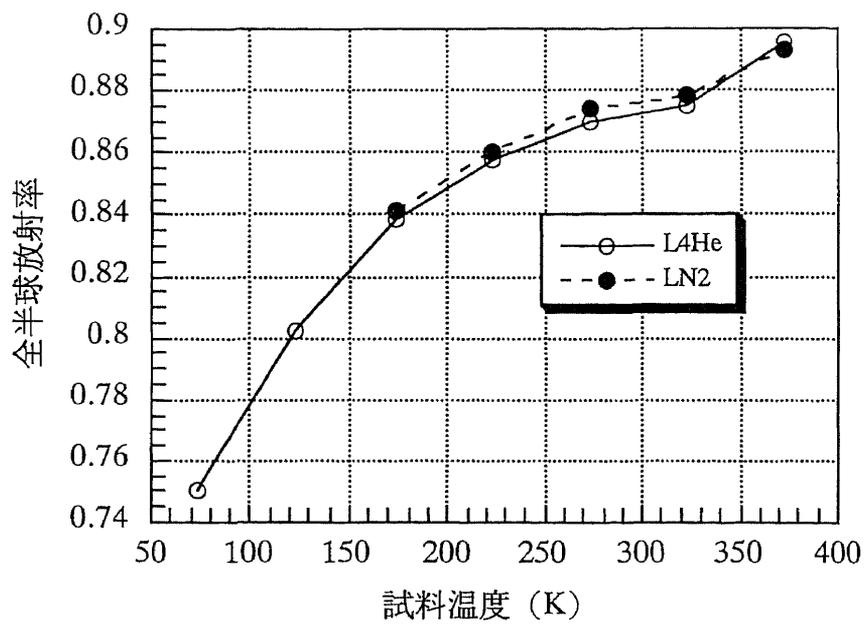


図 2-16 黒色塗料の全半球放射率

表 2-2 分光法とカロリメータ法の誤差要因と誤差量

	誤差要因	誤差量 (%)	全誤差 (%)
分光法	(1) 標準試料の絶対値 (2) 入射ビームポート開口部の光損失量	±1.0 +1.0	+1.0 -2.0
カロリメータ法	(1) 熱電対の校正の確かさ (2) 測定室のふく射の影響	±1.0 ±0.5	低温側 ±1.5 高温側 ±1.0

## 2.4 標準的熱制御材料の熱放射特性の測定結果

ここでは、改善および提案した測定装置，すなわち分光法（図 2-1 1）とカロリメータ法（図 2-1 2）により測定された代表的な宇宙用材料の太陽光吸収率とその入射角依存性，全半球放射率とその温度依存性をそれぞれ示す [24]。

### 2.4.1 太陽光吸収率の入射角依存性

表 2-3 に太陽光吸収率の入射角依存性の測定に用いた試料の諸元を示す。試料は、太陽光吸収率の入射角依存性を評価する便宜上 1～3 層構造から成り、その表面は拡散性、あるいは指向性のある物質が選択されている。

図 2-1 7～図 2-1 9 に白色塗料，Al 蒸着カプトン，および Al 蒸着テフロンそれぞれのそれぞれ入射角 5° と 60° の 0.26～2.00 μm の波長範囲の絶対分光全反射率を示す。入射角 60° の絶対分光全反射率は入射角 5° に対して、白色塗料は 0.26～0.40 μm の波長範囲で約 7～8% 増加し、Al 蒸着カプトンは 0.26～0.50 μm の波長範囲で約 8%，1.00～2.00 μm の波長範囲で約 5% 増加することが確認された。また、Al 蒸着テフロンは 0.26～0.70 μm の波長範囲で約 3% 減少し、逆に 1.00～2.00 μm の波長範囲で約 5% 増加す

- ② 試料は任意の定常状態の温度に設定される。このときのヒータ電流 $I_1$ と端子電圧 $V_1$ が測定され、試料に供給した電力 $W_1 (=V_1 \cdot I_1)$ とヒータ抵抗 $R_1$ が算出される。
- ③ 試料から2本の端子電圧測定線を取り除き、再び試料を②項と同じ定常状態の温度に設定される。試料温度が安定したとき電流 $I_2$ を測定し、②項で求めた抵抗値から供給電力 $W_2 (=R_1 \cdot I_2^2)$ が算出される。ここで試料温度は②項で設定した温度に対して $\pm 1\mu\text{V}$ 以内に設定することを条件とした。
- ④ ②項の供給電力量 $W_1$ から③項の供給電力量 $W_2$ を差し引くことにより2本のリード線からの熱損失量とジュール発熱量を合わせた熱損失量 ( $q_1 = W_1 - W_2$ ) が求められる。次に、クロメル-アルメル熱電対線の熱損失量については通常の測定に熱電対を一对多く加えて、その一对の有無によって生じる熱損失量 ( $q_2$ ) が求められる。
- 以上により、試料に配線された6本のリード線の総熱損失量 ( $q_w = 2q_1 + q_2$ ) を試料温度の関数として図2-15に示す。

### (3) 測定室のふく射の影響

試料表面と測定室壁面のふく射交換は測定室壁面の温度に依存して影響される。例えば、試料の表面温度が173Kの場合、測定室壁面が液体ヘリウムで冷却されるとき測定室壁面の影響は無視できるが、液体チッ素で冷却されるときは試料の表面温度に対して測定室壁面の温度の割合が約4.6%になり測定室壁面の影響を無視することができない、そこで、黒色塗料を例にして測定室を液体ヘリウムと液体チッ素で冷却したときの全半球放射率を求めた。この結果を図2-16に示す。全半球放射率は、試料温度173Kにおいて液体チッ素冷却の場合、液体ヘリウム冷却と比較して $\pm 0.5\%$ 以内であることが確かめられた。したがって、全半球放射率を導く際の2つの仮定条件は成立するものと判断する。

この測定室壁面のふく射が全半球放射率に及ぼす影響は $\pm 0.5\%$ である。

ゆえに、全半球放射率の測定で考えられる全誤差は低温域で $+1.5\%$ 、高温域で $\pm 1.0\%$ であることが確かめられた。

表2-2に分光法とカロリメータ法のそれぞれの誤差要因と誤差量、および全誤差をまとめて示す。

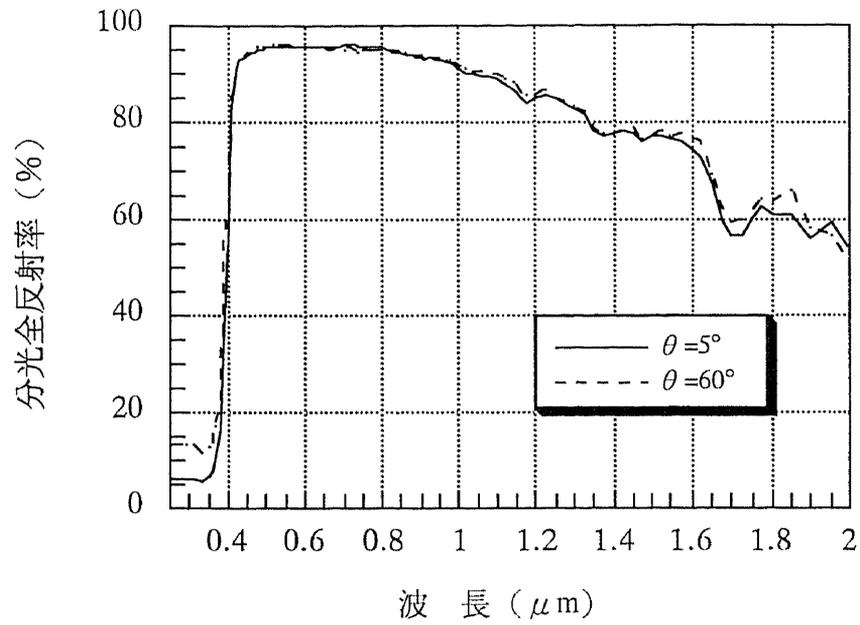


図 2-1 7 白色塗料の絶対分光全反射率の入射角依存性

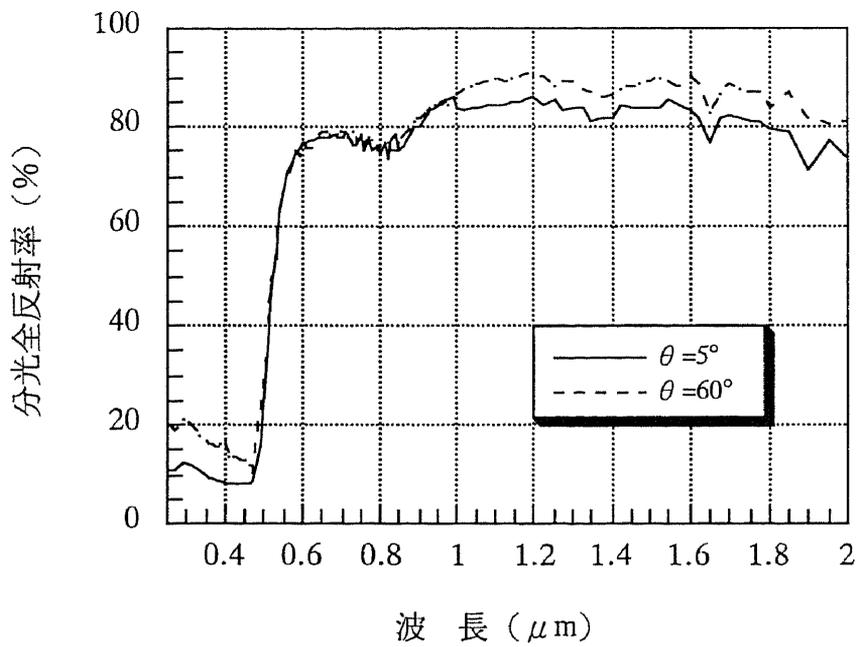


図 2-1 8 Al蒸着カプトンの絶対分光全反射率の入射角依存性

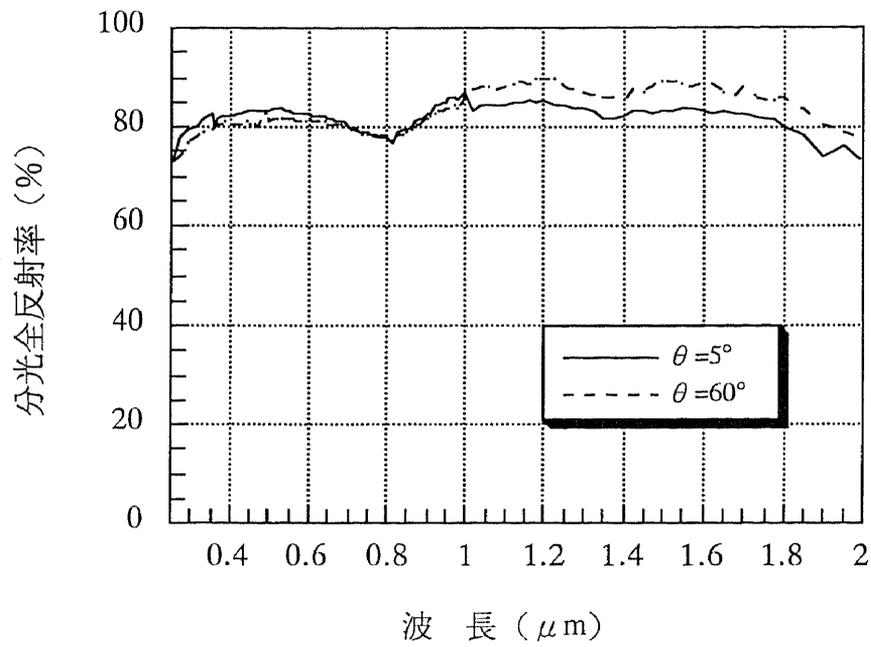


図 2-19 Al蒸着テフロン の絶対分光全反射率の入射角依存性

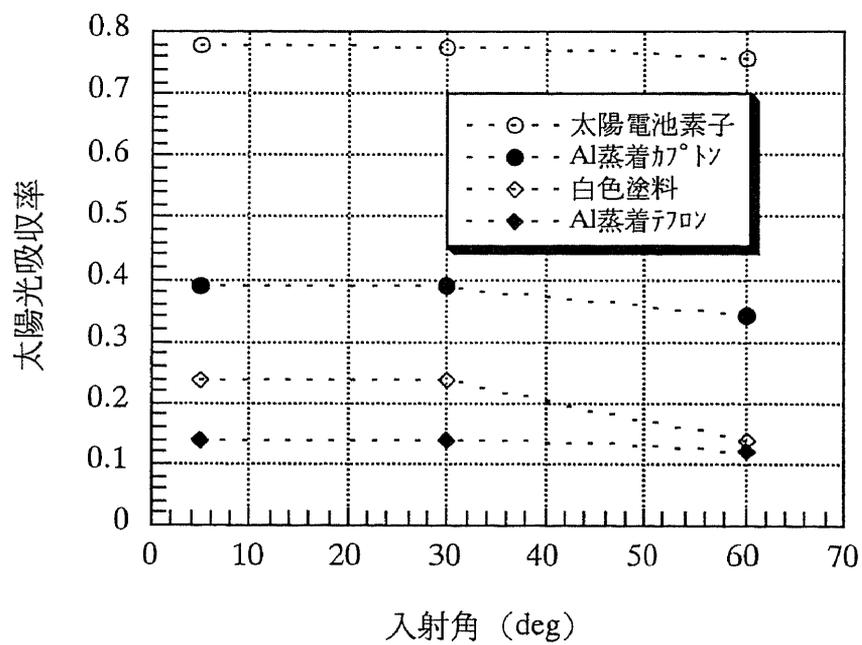


図 2-20 太陽光吸収率の入射角依存性

## 2.4.2 全半球放射率の温度依存性

ここでは塗料、Al蒸着ポリマーフィルム、金属、太陽電池素子等に分類した173～373 Kの温度範囲の全半球放射率の温度依存性を示す。

図2-21に塗料類の全半球放射率の温度依存性を示す。白色塗料Z202と黒色塗料Z306は低温域から高温域において余り変化が認められなかった。また、導電性塗料L300の全半球放射率はZ306に比べやや劣ることがわかった。これは導電性を得るために、バインダーに屈折率の高い導電性の物質が含まれているためと推定する。灰色塗料チラノコートの全半球放射率は高温になるにしたがい高くなる傾向が示された。

図2-22にAl蒸着ポリマーフィルムの全半球放射率の温度依存性を示す。耐熱性温度の異なるポリイミド系の熱制御フィルム、Al蒸着ユーピレックスR、Sおよびカプトンの全半球放射率は、低温域から高温域にかけて直線的に増加し、その変化率はAl蒸着ユーピレックスSで約62%と温度変化に対して顕著であることが認められた。一方、フッ素樹脂のAl蒸着テフロンフィルムは、173～273 Kの温度範囲内では直線的に変化するが、273 K以上の温度範囲ではほぼフラットになる特性が示された。

図2-23に金属類の全半球放射率の温度依存性を示す。金属材料の特性は、AlバフとAl蒸着では同一材料でも表面処理の違いにより約50%異なり、また異種金属のAlバフとSUS304では200%異なる結果が得られた。

図2-24にカバーガラス付きSi、GaAs、InPの3種類の太陽電池素子の全半球放射率の温度依存性を示す。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、最も高い特性になることが確認された。

以上、全半球放射率の温度依存性の測定により得られた結果をまとめると次の通りである。

- (1) 宇宙船の最外表面で熱制御材料として用いられる熱制御フィルムでは、200 Kの温度変化に対して全半球放射率は40～60%変わり、温度依存性が顕著であることが確かめられた。
- (2) 金属材料などの全半球放射率は、表面処理や表面の酸化膜の影響を受けるために、ハンドブック等のデータのみ信頼するのではなく、そのつど測定することが必要であることを示唆しているものとする。

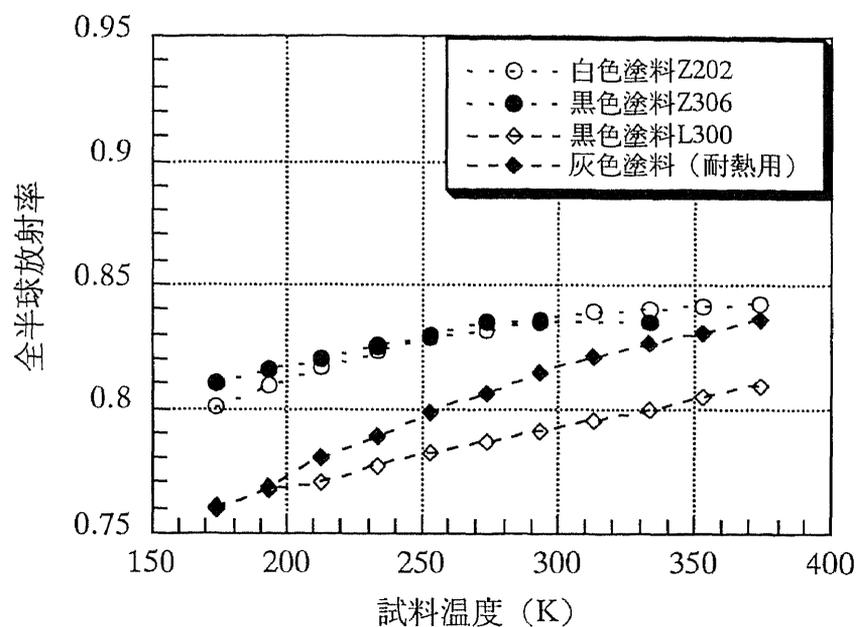


図 2-2 1 塗料類の半球放射率の温度依存性

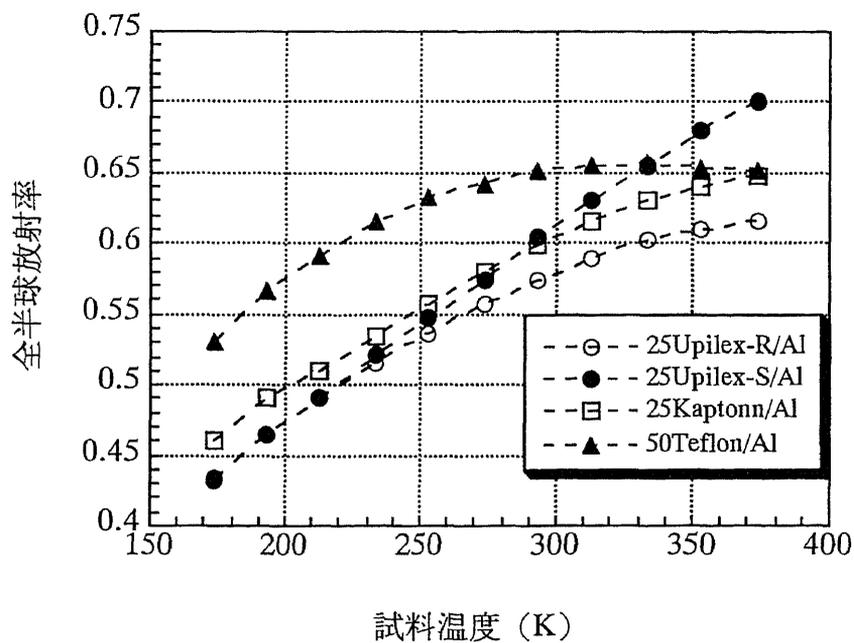


図 2-2 2 Al蒸着ポリマーフィルムの半球放射率の温度依存性

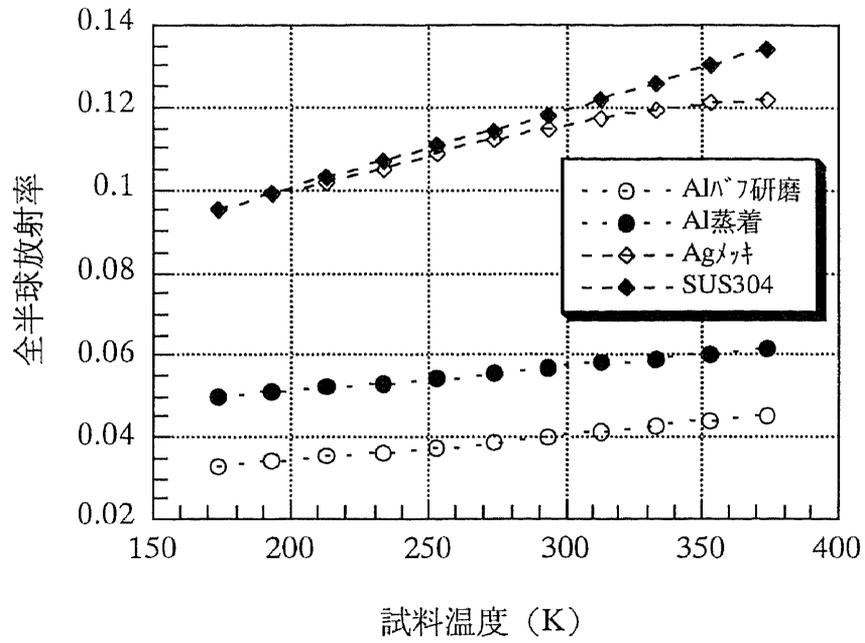


図 2-2 3 金属類の全半球放射率の温度依存性

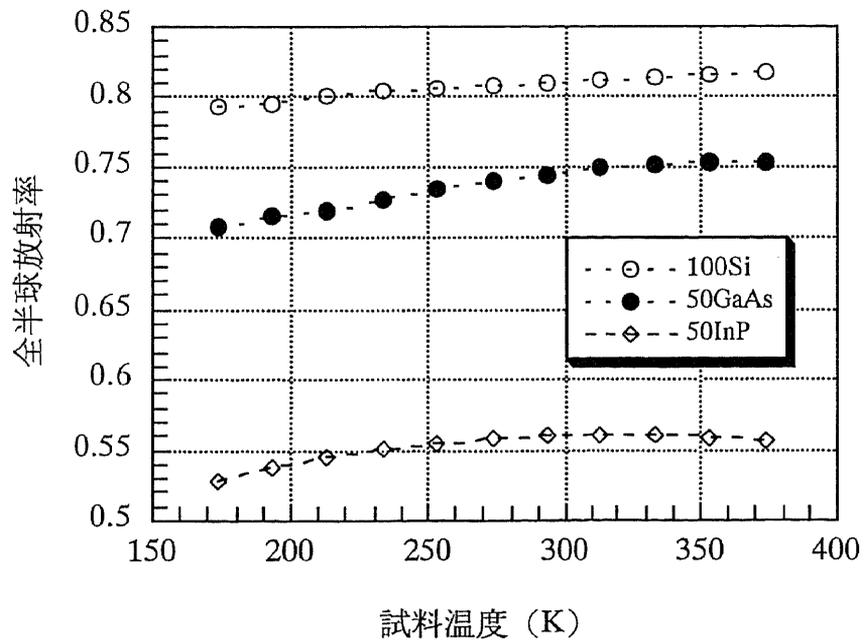


図 2-2 4 太陽電池素子の全半球放射率の温度依存性

### 2.4.3 太陽光吸収率と全半球放射率の特性

表2-4に代表的な宇宙用材料の太陽光吸収率と全半球放射率をそれぞれまとめて示す。

表2-4 熱制御材料と太陽電池素子の太陽光吸収率と全半球放射率 (at 293K)

試料	太陽光吸収率	全半球放射率 at 293K
白色塗料 ケミグレイズ Z202	0.25	0.82
黒色塗料 ケミグレイズ Z306	0.92	0.87
ケミグレイズ L300	0.95	0.79
灰色塗料	0.82	0.82
Kaputon/Al 25 $\mu$ m	0.38	0.65
50 $\mu$ m	0.41	0.72
TCC/25 $\mu$ m	0.44	0.61
Upilex-R/Al 25 $\mu$ m	0.33	0.58
TCC/25 $\mu$ m	0.37	0.48
Upilex-S/Al 25 $\mu$ m	0.41	0.60
TCC/25 $\mu$ m	0.43	0.58
PIE/Ag 75 $\mu$ m	0.15	0.82
Teflon/Al 25 $\mu$ m	0.14	----
50 $\mu$ m	0.14	0.60
TCC/50 $\mu$ m	0.19	0.58
金 属 Al $\gamma$ 7研磨	0.16	0.04
Al蒸着	----	0.05
Agメッキ	----	0.11
SUS304	----	0.11
太陽電池素子 Si100 $\mu$ mBDX	0.76	0.80
GaAs50 $\mu$ mBDX	0.82	0.75
InP50 $\mu$ mBDX	0.86	0.76
熱制御ミラ- TCC/200 $\mu$ mBDX/Ag	0.11	0.76
TCC/100 $\mu$ mAS/Ag	0.05	0.52

TCC: Transparent Conductive Coating

BDX: 日本電気硝子社製ガラス, AS: 旭硝子社製ガラス

## 2.5 結 言

宇宙船の熱設計、および宇宙用材料の開発のために従来の熱放射特性の手法と装置の特徴を概観した。その後、従来の測定技術の向上を図ることを目的として太陽光吸収率については、入射角依存性の測定が可能な入射角可変積分球と可視分光器を組み合わせた分光法を、また全半球放射率については、低温から高温における温度依存性が求められる低温装置とサンドイッチ構造の試料の構成からなるカロリメータ法を、それぞれ考察しその性能を確認した。

本章の結論を要約すると次の通りである。

分光法による太陽光吸収率の入射角依存性の測定について。

- (1) 太陽光吸収率の入射角依存性の測定には積分球の改善を図り、入射角が $0^{\circ}$ 、 $5^{\circ}$ 、 $10 \sim 60^{\circ}$  (10 毎) の範囲で変えられる入射角可変積分球を試作し、可視分光器と組み合わせて $0.26 \sim 2.50 \mu\text{m}$ の波長範囲の絶対分光反射率の測定が可能な分光法による測定装置を構築し、その特性が確認された。また、ここではシングルビーム方式の固有の誤差である多重反射率の消去方法が明らかにされた。
- (2) 各入射ビームポートの開口部の大きさのばらつきが太陽光吸収率の入射角依存性に影響を及ぼすために評価を行い、各入射角の入射ビームポートの開口部による光の損失量は一律で、1%以内であることが確認された。この誤差を含めて分光法による太陽光吸収率の全誤差は、+1%、-2%であることが明らかにされた。
- (3) 分光法により1層構造の拡散性試料および2層構造と3層構造の指向性試料の入射角特性を、それぞれ $0.26 \sim 2.50 \mu\text{m}$ の波長範囲の絶対分光反射率と太陽光吸収率について求めた。この結果、これら試料の絶対分光反射率の特性は、入射角が大きくなるにしたがい紫外域と近赤外域において顕著に変化することが認められ、入射角に対して波長依存性があることが確かめられた。また、太陽光吸収率の入射角依存性は、入射角 $5^{\circ}$ に対して拡散性の試料では約42%、2層膜構造や3層構造の指向性の試料では膜の構成によらず約10%程度減少することが明らかにされた。
- (4) 太陽光吸収率の入射角依存性の測定には分光法を推奨する。

次に、カロリメータ法による全半球放射率の温度依存性の測定について。

- (1) 全半球放射率の温度依存性の測定が可能なカロリメータ法を提案し、不透明物質の 173～373Kの温度範囲の全半球放射率の温度依存性が求められることが確認された。また、本測定法で誤差要因となる試料に配線されたリード線からの総熱損失量を、試料温度173～373Kの範囲で、定量的に見積もる方法が確立された。
- (2) 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とし、試料の全半球吸収率と全半球放射率は等しくおく、など2つの仮定条件が必要になる。これらの仮定条件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全半球放射率が求められ、試料温度173Kにおいて液体チッ素冷却では液体ヘリウム冷却と比較して約0.5%の差で得られることが確認され、2つの仮定条件が成立することが明らかにされた。この結果、173～373Kの温度範囲であれば、必ずしも高価な液体ヘリウムを用いなくても全半球放射率の温度依存性を求められることが検証された。そして、その他の誤差要因を付加した結果、本測定装置による全半球放射率の全誤差は、低温域で+1.5%、高温域で±1.0%であることが確認された。
- (3) 代表的な宇宙用材料である塗料、高分子フィルム、金属および太陽電池素子等の全半球放射率の温度依存性を173～373Kの温度範囲でそれぞれ測定した結果、宇宙船の最外表面で熱制御材料として使われる高分子フィルムが最も顕著に変わることが判明した。
- このことから、全半球放射率の温度依存性の重要性が確認された。
- (4) 全半球放射率の温度測定にはカロリメータ法が有効であることが明らかにされた。

## 第3章 熱放射特性の同時測定法の提案

### 3.1 概要

第2章では、主に宇宙用材料を対象にして熱放射特性の測定技術について、太陽光吸収率は分光法を、全半球放射率はカロリメータ法を、それぞれ提案してその有効性を明らかにした。しかし、これらの測定技術は、従来の測定技術と同様に一組の測定装置から一つの物性、つまり太陽光吸収率、あるいは全半球放射率を求めるもので、それぞれ別々に測定されるために時間と費用の掛かる方法である。ましてや、これらの測定技術をそのまま衛星に搭載して宇宙空間の場で太陽光吸収率や全半球放射率を測定するには重量や容積などの点から実用的ではない。

最近の熱物性の測定では、金属やグラファイトなどのように測定される材料に制限があるものの、同一の試料について、一つの測定装置により熱膨張率、熱伝導率、比熱、熱拡散率など種々の熱物性を同時、または順次求められる多重性測定装置の考え方が試みられている[25]。しかし、このような手法で太陽光吸収率と全半球放射率を同時に求められた例はない。

本章では分光法やカロリメータ法とは別に、一組の測定装置から同一の試料の太陽光吸収率と全半球放射率をそれぞれ独立に、しかも同時に求めることができる測定方法、つまり新たに同時測定法を提案する。この方法の利点は、材料の太陽光吸収率と全半球放射率の温度依存性をも含めて一度に明らかにされること、測定の迅速性と装置を作製する際の経済性に優れていること、などが挙げられる。また、この同時測定法を宇宙に適用した場合、当然のことながら測定装置の小型、軽量化が図れる。そして、宇宙用材料の太陽光吸収率と全半球放射率を宇宙環境のその場で評価することが可能になる。

はじめに、同時測定法の測定原理について説明する。次に、これに基づく地上用および宇宙用の測定装置を開発し、その性能を明確にする。特に宇宙用に開発した装置は、第12号科学衛星「あけぼの」に搭載して検証する。最後に地上用および宇宙用の測定装置による太陽光吸収率と全半球放射率の算出方法を明らかにする。

### 3.2 測定原理

はじめに、宇宙環境を想定して同時測定法の測定原理を説明する。その概念図を図 3-1 に示す。宇宙空間に置かれた試料に照度 $S$ の太陽光が垂直に入射しているものとする。この条件の下で試料用ヒータに電力 $P_0$ を供給し、試料温度 $T_{S0}$ の定常状態にする。さらに $T_{S0}$ の試料温度に対して $\Delta T_S$ の温度差を付加するために、ヒータにステップ的に電力 $P_1$  ( $P_0 < P_1$ ) を供給し、試料温度を $T_{S1}$  ( $T_{S0} < T_{S1}$ ) の定常状態に設定する。これら $T_{S0}$ ,  $T_{S1}$ の関係から得られるエネルギー保存式は、それぞれ (3-1) 式, (3-2) 式で与えられる。

$$P_0 + SA\alpha_S = 2A\varepsilon_H\sigma T_{S0}^4 \quad (3-1)$$

$$P_1 + SA\alpha_S = 2A\varepsilon_H\sigma T_{S1}^4 \quad (3-2)$$

ここで、 $\alpha_S$ は太陽光吸収率、 $\varepsilon_H$ は全半球放射率、 $A$ は試料の入射断面積、 $\sigma$ はステファンボルツマン定数である。

したがって、(3-1) 式, (3-2) 式を整理することにより太陽光吸収率および全半球放射率は、それぞれ (3-3) 式, (3-4) 式に示すように分離して導かれる。

$$\alpha_S = \frac{(P_1 T_{S0}^4 - P_0 T_{S1}^4)}{SA(T_{S1}^4 - T_{S0}^4)} \quad (3-3)$$

$$\varepsilon_H = \frac{(P_1 - P_0)}{2A\sigma(T_{S1}^4 - T_{S0}^4)} \quad (3-4)$$

ただし、ここでは試料の温度差  $\Delta T_S (\equiv T_{S1} - T_{S0})$  の変化範囲内では太陽光吸収率と全半球放射率の温度依存性は無視できるものと仮定し、試料温度は  $(T_{S0} + T_{S1}) / 2$  とする。

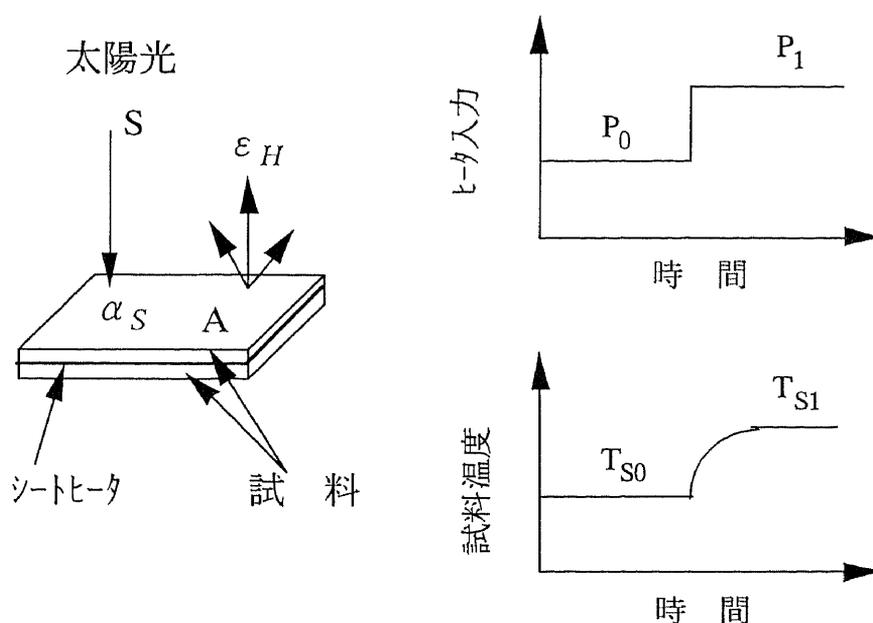


図 3-1 測定原理の概念図

### 3.3 地上における同時測定法 [26-27]

ここでは、地上で同時測定法を適用するために測定装置、つまり地上用同時測定装置の開発を行い、その性能を確認する。また、その装置の構成から導かれる太陽光吸収率と全半球放射率の計算方法を明らかにする。そして、最後に測定方法を説明する。

#### 3.3.1 地上用同時測定装置と試料の構成

地上用に開発した地上用同時測定装置の構成とその性能、および試料の構成について記述する。

### a) 地上用同時測定装置

図3-2に地上用に開発した地上用同時測定装置の図式を示す。本装置は疑似太陽光光源、Al合金製の真空容器およびデータ処理系から構成される。

疑似太陽光光源は、パラボラ反射鏡を有したXeランプと分布の一様性を得るためのインテグレートレータおよび2枚の反射ミラーから成る。表3-1に疑似太陽光光源の諸元を示す。この光源は、 $0.25 \sim 2.00 \mu\text{m}$ の波長範囲で $0.7 \sim 1.4 \text{ kw/m}^2$ の照度の調整が可能である。その分光分布は大気圏外の太陽光の分光分布に相当している。試料表面に入射する照度とその分布は、試験前後にサーモパイル（エプレイ・ラボラトリ社製）で測定され、一辺 $30.0 \text{ mm}$ の正方形の試料面内で一様であることが確認される。また、試験中の照度とその安定度は、石英窓の

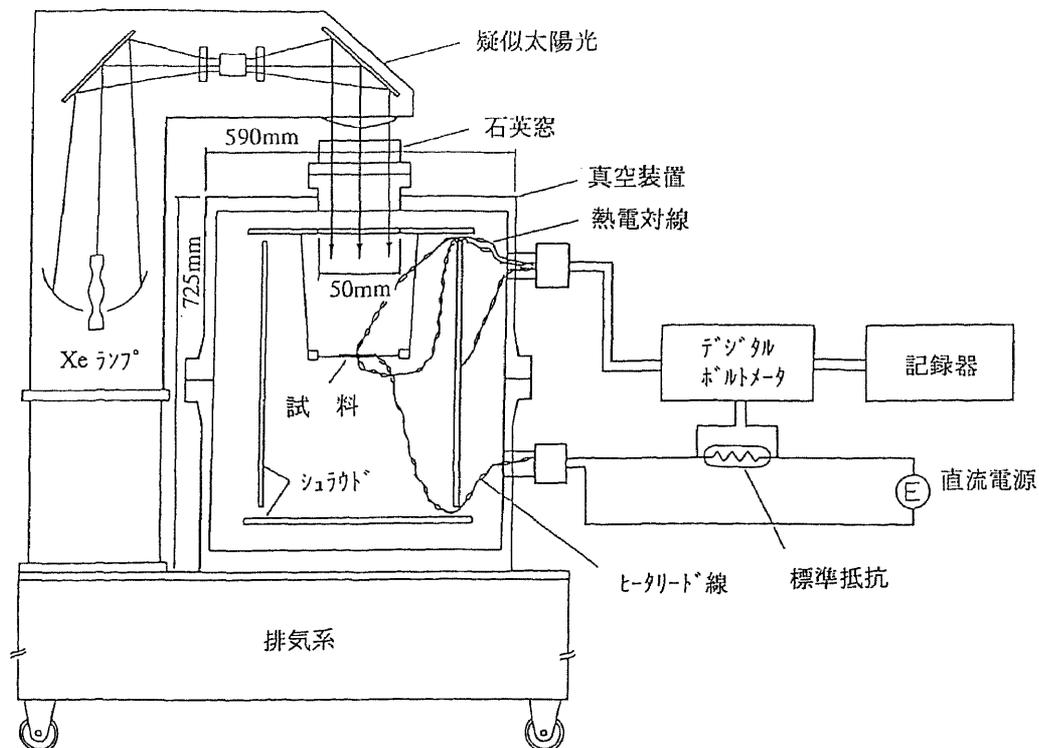


図3-2 地上用同時測定装置の概念図

表 3-1 疑似太陽光光源の諸元

疑似太陽光光源	諸 元
ビームの分布	±3 %
ビームの拡がり角度	±3°
ビームの安定度	±1 %
ビームの出力	0.7~1.4 kW/m <sup>2</sup>

面に疑似太陽光の出力に対してサーモパイルとの相関がとれている太陽電池素子の二次センサを設置して確かめられる。したがって、本試験におけるデータの良否は、照度の安定度が±0.5%以下で得られたときに有効とみなされる。なお、石英窓の前面には疑似太陽光の光束が試料のみに入射するように遮蔽板が設けられている。これは、入射光束がシュラウド内で乱反射して試料に再入射することを防ぐことと、シュラウドの上部および底部の温度分布の一様性を乱すことのないようにするためのものである。

真空容器は、液体チッ素の冷却が可能なシュラウドと疑似太陽光を導入するための外径50 mmの石英窓から成る。シュラウドは、上下部および側部の温度分布の一様性の得られる構造とされ、その内壁は放出ガス量が少なく、低温で使用可能な黒色塗料（ケミグレーズ社製：Z306、）が施されている。温度の測定は、熱電対線を用いてシュラウドの上下部および側部のそれぞれ3ヶ所と光が入射しない部分の石英窓について行われる。また、試験中は、ターボ分子ポンプ（大阪真空社製：TH150）を用いて0.1 mPa以下の真空度が得られる。

#### b) 試料の構成

図 3-3 に試料の構成を示す。試料は、第 2 章で既に記述したカロリメータ法の測定で使用されている試料構成と同様に作られる。寸法は板厚 0.5 mm、一辺 30.0 mm で、正方形の 2 枚の Al 板の間にヒータを挟んだサンドイッチ構造が基本とされる。したがって、試料の製作方

法も同じように、塗料は基板の上に直接スプレー塗装が施され、また熱制御フィルムなどは基板に接着剤で直接貼り付けられる。

試料の温度は、熱電対線により試料の疑似太陽光の入射面とシュラウド壁下部を見る裏面のそれぞれ中央部が測定される。熱電対線は、線径  $50\ \mu\text{m}$  のクロメル-アルメル線を用い、その校正は第 2 章のカロリメータ法による測定技術と同様に、 $173\sim 373\ \text{K}$  の温度範囲内で行われ、正確さ  $\pm 0.32\ \text{K}$  が得られている。

電力供給線と端子電圧測定線は、それぞれ線径  $50\ \mu\text{m}$  のコンスタンタン線が使用され、計 4 本のヒータが配線される。

試料温度は、電圧にして  $\pm 1\ \mu\text{V}$  の精度で測定され、またヒータの端子電圧と電流は、それぞれ  $\pm 1\ \mu\text{V}$ 、 $\pm 1\ \mu\text{A}$  の分解能で測定される。これら取得したデータはデスクトップコンピュータ（HP社製：9000/300）に送出して処理される。なお、試料は疑似太陽光が垂直に入射するように電力供給線と熱電対線によりシュラウドの中央部に固定される。

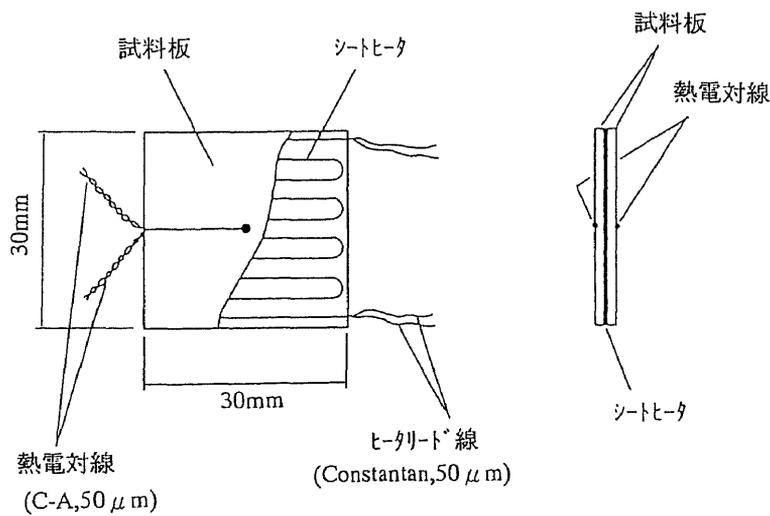


図 3-3 試料の構成

### 3.3.2 太陽光吸収率と全半球放射率の算出

地上用同時測定装置による太陽光吸収率と全半球放射率の算出方法を以下に記述する。

疑似太陽光が、石英の窓を通してシュラウドの中央部に置かれた試料に垂直に入射した状態で、試料用ヒータに外部から電力 $P_1$ を供給し、試料温度 $T_{S11}$ の定常状態にする。さらに、 $T_{S11}$ の温度から $\Delta T_S$ の温度差がつくように電力 $P_2$  ( $P_1 < P_2$ )をヒータに供給し、試料温度を $T_{S12}$  ( $T_{S11} < T_{S12}$ )の定常状態にする。このとき、試料温度 $T_{S11}$ 、 $T_{S12}$ におけるエネルギーの保存式は、それぞれ(3-5)式、(3-6)式で与えられる。

$$P_1 + SA_1\alpha_S = A_1 F_{SQ} \varepsilon_H \sigma (T_{S11}^4 - T_Q^4) + \varepsilon_H \sigma \left\{ A_1 (1 - F_{SQ}) (T_{S11}^4 - T_C^4) + A_2 (T_{S21}^4 - T_C^4) \right\} + q_{w1} \quad (3-5)$$

$$P_2 + SA_1\alpha_S = A_1 F_{SQ} \varepsilon_H \sigma (T_{S12}^4 - T_Q^4) + \varepsilon_H \sigma \left\{ A_1 (1 - F_{SQ}) (T_{S12}^4 - T_C^4) + A_2 (T_{S22}^4 - T_C^4) \right\} + q_{w2} \quad (3-6)$$

ここで、 $T_{S11}$ 、 $T_{S12}$ は疑似太陽光の入射面の試料温度、 $T_{S21}$ 、 $T_{S22}$ はシュラウドに面した試料温度、 $T_Q$ は石英窓の温度、 $T_C$ はシュラウド壁の温度、 $\varepsilon_C$ はシュラウド壁の全半球放射率、 $A_1$ は疑似太陽光に面した試料表面積、 $A_2$ はシュラウドに面した試料の表面と側面の面積、 $F_{SQ}$ は試料と石英窓との形態係数、 $q_{w1}$ 、 $q_{w2}$ はリード線の総熱損失量（電力供給線および熱電対線からの熱損失とジュール発熱）、 $\sigma$ はステファンボルツマン定数である。

(3-5)式、(3-6)式で与えられるエネルギー保存式で、左辺第1項は試料への供給電力量を、第2項は疑似太陽光による入力量を、また左辺第1項は、それぞれ試料と石英窓、および試料とシュラウド壁のふく射交換量を、第2項は試料に配線されたリード線類の総熱損失量を表している。

したがって、(3-5)式、(3-6)式から、太陽光吸収率と全半球放射率は、それぞれ(3-7)式、(3-8)式のように導くことができる。

$$\alpha_S = \frac{\varepsilon_H \sigma A_1 \{ F_{SQ} (T_C^4 - T_Q^4) + (T_{S11}^4 - T_C^4) \}}{SA_1} + \frac{\varepsilon_H \sigma A_2 (T_{S21}^4 - T_C^4) - (P_1 - q_{w1})}{SA_1} \quad (3-7)$$

$$\varepsilon_H = \frac{P_2 - P_1}{\sigma \{ A_1 (T_{S12}^4 - T_{S11}^4) + A_2 (T_{S22}^4 - T_{S21}^4) \}} \quad (3-8)$$

ただし、(3-5)式、(3-6)式から、(3-7)式、(3-8)式を導くための仮定条件は以下の通りである。

- (i) 試料の温度差  $\Delta T_S$  ( $\equiv 2\text{ K}$ ) の範囲では、全半球放射率の温度依存性は無視できる。
- (ii) (i) と同様に  $\Delta T_S$  の範囲では、試料に配線されたリード線類の総熱損失量は  $q_{w1} = q_{w2}$  とする。
- (iii) 石英窓の全半球放射率とシュラウド壁の全半球放射率は1とする。
- (iv) 試料の全半球吸収率と全半球放射率を等しく置く。

これら仮定条件は第4章の誤差のところでは評価する。

(3-7)式、(3-8)式により、地上において太陽光吸収率と全半球放射率をそれぞれ独立して求められることが証明された。また、疑似太陽光光源の分光分布の許す範囲、すなわち太陽光の分光分布が相対的に変わる範囲で照度を調整することにより全半球放射率の温度特性も含めて求められることが確認された。そして、この方法の利点は全半球放射率を導く際に、リード線による総熱損失量の項を消去して求められることである。

### 3.3.3 地上用同時測定装置による測定方法

地上用同時測定装置による太陽光吸収率と全半球放射率の測定方法を以下に記述する。

- ①試験前に、サーモパイルで試料表面に入射する照度とその分布が測定される。このとき、石英窓の前面に設置された太陽電池素子の二次センサの出力データも合わせて取得される。
- ②試料が電力供給線と熱電対線によりシュラウドの中央部に固定される。その後、真空容器の排気とシュラウドの液体チッ素冷却により、それぞれ  $0.1 \text{ mPa}$  以下の真空度と  $78.5 \pm 0.7 \text{ K}$  の温度に保たれる。
- ③疑似太陽光の照射と試料用ヒータの電力供給により試料が定常状態の温度に設定される。但し、データは照度が  $\pm 0.5\%$  以内の安定度で得られたときにのみ採用される。このとき、次のデータが取得される。
  - (i) 疑似太陽光の入射面とシュラウド面の試料温度 (K)。
  - (ii) 石英窓とシュラウド壁の温度 (K)。
  - (iii) 二次センサの出力 (I)。
  - (iv) 試料用ヒータの供給電圧 (V) と電流量 (I)。
- ④疑似太陽光の照射状態で、③項の試料温度より  $2 \text{ K}$  の温度差がつくようにヒータ電力が調節される。また、データは③と同じ条件で取得される。
- ⑤③、④の項から得られたデータを (3-7) 式と (3-8) 式に代入すると、それぞれ太陽光吸収率と全半球放射率が算出される。
- ⑥全半球放射率の温度依存性は疑似太陽光光源の照度を調整し、試料温度のポテンシャルを変えて③～⑤項と同様な手順を行うことにより求められる。

### 3.4 同時測定法の宇宙への適用

宇宙における熱放射特性の測定技術は、これまで宇宙環境に置かれた試料の定常状態の温度から導かれる太陽光吸収率と全半球放射率の比が求められており、これらを分離した方法で求められた例はない [28-29]。したがって同時測定法を宇宙に適用することにより、地上では模擬できない紫外線、電子線、陽子線等の複合照射が存在する宇宙環境での宇宙用材料の太陽光

吸収率と全半球放射率の長期飛翔データを評価することが可能になり，劣化に関する知見が得られる．また，地上で行われる紫外線，電子線，陽子線などの照射試験と合わせて比較することにより，劣化のメカニズムの理解をより深められること，更に地上で宇宙環境を模擬して行われる照射試験の方法と内容について検討すること，などの上で有効である．

ここでは，小型で軽量の搭載用同時測定装置を開発して第12号科学衛星「あけぼの」に搭載される．この搭載用同時測定装置が宇宙に置かれたときの条件から太陽光吸収率と全半球放射率を算出する．また，搭載用同時測定装置による太陽光吸収率と全半球放射率の測定方法を説明する．

### 3.4.1 科学衛星「あけぼの」の諸元

図3-4に，第12号科学衛星「あけぼの」の概観図と搭載用同時測定装置（Simultaneous Measurement Experiment）の搭載位置を示す．本衛星は，主にオーロラの観測を目的として1989年2月に打ち上げられ，近地点高度約300km，遠地点高度約10,000kmの長

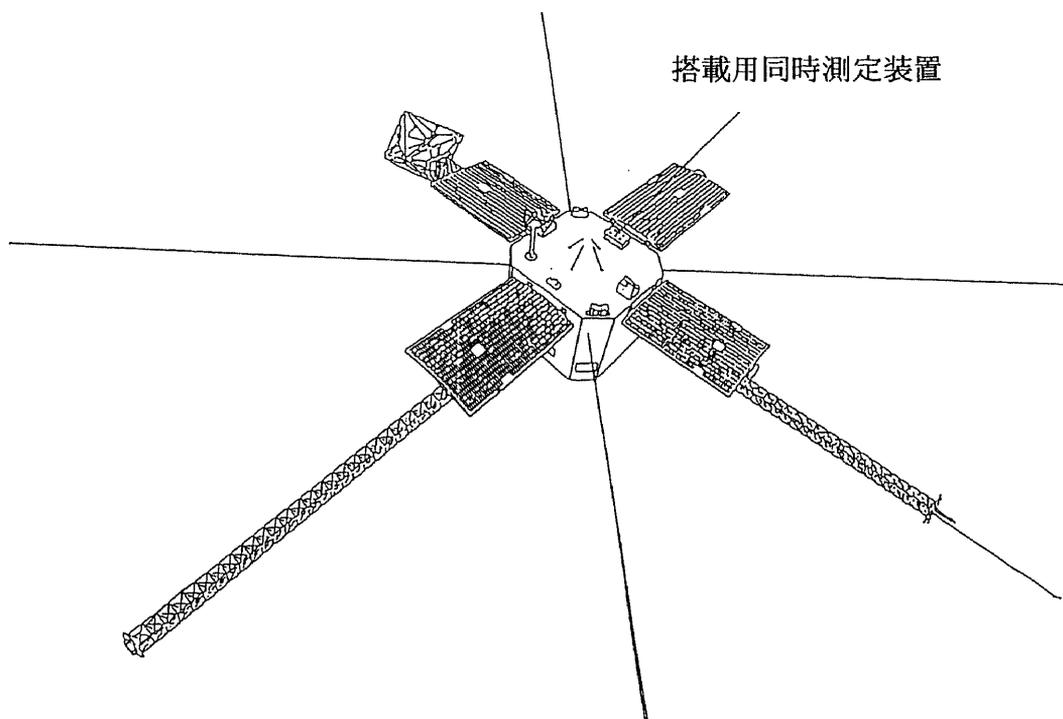


図3-4 第12号科学衛星「あけぼの」の外観図

楕円軌道に投入された。衛星の外観形状は内径1.4 m、高さ1.0 mの多角柱で、展開型の4枚のパドルをもち、その全重量は約295.4 kgである。衛星は、スピン軸が太陽光方向から常に+3.0°以内に姿勢制御され、そのスピン数は約7.5 rpmである。

なお、搭載用同時測定装置は、試料に太陽光のみがほぼ垂直(+3.0°以内)に入射する衛星の上部パネル部に搭載される。

このように搭載用同時測定装置を「あけぼの」衛星に搭載することにより、以下のことが期待できる。

- (i) 姿勢制御により測定試料には太陽光のみがほぼ垂直に入射するため、紫外線による劣化を評価することができる。
- (ii) 長楕円軌道によりバンアレン帯を飛翔するため、広範囲の加速電圧の電子線と陽子線の荷電粒子の照射による劣化を評価することができる。

### 3.4.2 搭載用同時測定装置の構成

搭載用同時測定装置を構成する、すなわち各試料を取り付けるための試料ユニット、および各試料ユニットを組み込むためのテストモジュールの構成と性能について記述する。また、この装置のデータの流れとその取得方法を衛星と地上局から説明する。

#### a) 試料ユニットの構成

図3-5に試料ユニットの概念図を示す。各試料は1ユニット毎にそれぞれ独立した構造で、試料、試料取付板、試料ホルダ、多層サーマルブランケット、温度センサおよびヒータから構成される。

試料取付板は、板厚0.5 mmの一辺40.6 mmの寸法の正方形のAl平板で、その表面には試料を、また裏面にはヒータと温度センサが取り付けられる。

試料ホルダは、試料を支えることと、衛星構体との断熱を図るために用いられる。ここでは熱コンダクタンスの異なるA、B、2つのタイプの試料ホルダが作製される。タイプAは、FRPを素材にした直径15 mmの円柱を3本と直径10 mmの円柱を1本、計4本を支柱にポリウレタンフォームを発砲させ充填したブロックで、またタイプBは、ポリウレタンフォームのみを発砲させたブロックから形成される。それぞれの外形寸法は、一辺40.0 mmの立方体で、軽量化が図られる。タイプA、Bの熱コンダクタンスは実験によりそれぞれ求められ、

$14.5 \times 10^{-3}$  (W/K),  $3.5 \times 10^{-3}$  (W/K) である。ここで、熱コンダクタンスの大きいタイプAの試料ホルダは、試料の高温化を防ぐために用いられる。A, B両試料ホルダの側面には、10層から成る多層サーマルブランケットが施される。これにより、各試料ホルダの側面間のふく射断熱が図られる。各試料ホルダは板厚5mmの円柱のFRPの断熱材を介してテストモジュールに取り付けられる。

温度センサは1k $\Omega$ の白金抵抗センサが用いられ、試料取付板の裏面と試料ホルダの底部に取り付けられる。センサの温度校正は、2次校正された銅-コンスタンタン熱電対線をセンサと並行に配置され、1ユニットごとに恒温槽内で行われる。この結果、温度の測定は223.15~373.15Kの温度範囲で正確さ0.35Kが得られる。この試料温度の校正時に試料ヒータの抵抗値も合わせて校正される。

温度センサとヒータ用のリード線は、線材からの熱損失の影響を少なくするために線径0.24mmの細線が選ばれ、かつリード線両端で急激な温度差が生じないように長さ23cmとされる。温度センサ用リード線は試料ホルダ内に固定され、ヒータ用リード線は試料ホルダの周りを取り付けられる。

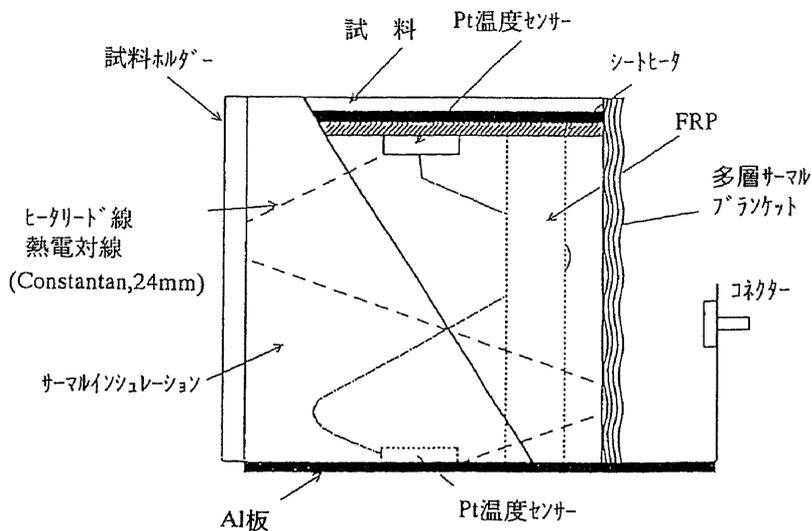


図 3-5 試料ユニットの概念図

### b) テストモジュールの構成

図3-6に各試料ユニットが組み込まれたテストモジュールを示す。タイプAの試料ホルダにはInPとSiの2種類の太陽電池素子、タイプBの試料ホルダには熱制御ミラーCSSM、およびTCC/25R/Al、TCC/25S/Alの2種類の熱制御フィルムがそれぞれ取り付けられる。また、ここには太陽電池計測装置SCMが取り付けられ、太陽電池素子の出力特性、開放電圧と短絡電流のデータが取得される。同時測定法では太陽光の照度がこの装置から推算される。テストモジュールの寸法は、縦160mm、横205mm、高さ43.2mmで、総重量 $0.9 \pm 0.1$ kgの小型、軽量化が図られている。その内部の側面と底面には10層から成る多層サーマルブランケットが施され、各試料ホルダとのふく射断熱が図られる。テストモジュール全体は板厚5mmのFRPの断熱材を介して衛星には取り付けられる。

搭載された装置のヒータ電圧の制御は、 $0 \sim 10.01$ Vの範囲で可能で、その制御電圧の分解能は $\pm 4.0$ mVである。これに対して測定電圧の分解能は $\pm 5.0$ mV以内である。

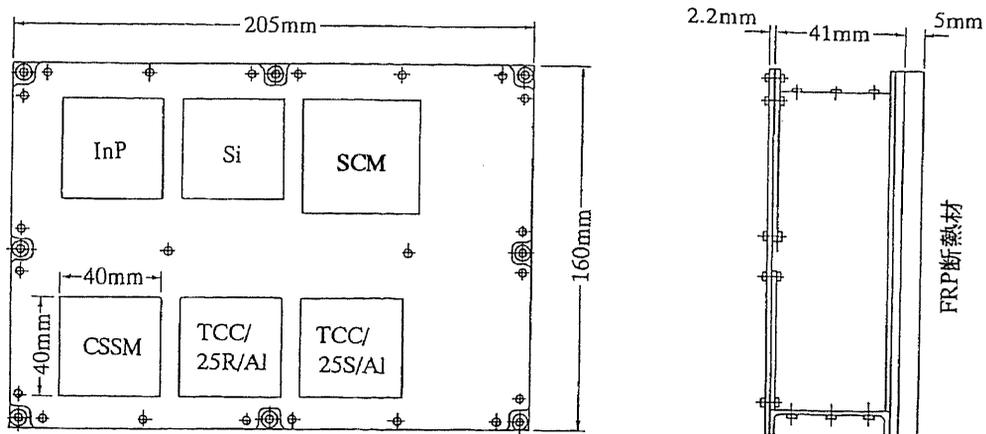


図3-6 テストモジュールの概念図

c) 搭載用同時測定装置のデータの取得方法

図3-7に搭載用同時測定装置によるデータの流れ方とそのデータの取得方法の概念を示す。データの流れは、大きく衛星と地上局に分けられる。試料ヒータの制御電圧は、点線の矢印で示されるように、地上局のコマンド送信機から衛星に送信される。衛星で受けた制御電圧は、衛星のコマンド受信機を介してヒータ制御装置に一旦送られる。そこから搭載用同時測定装置の各試料のヒータに制御電圧が指示される。

一方、衛星の搭載用同時測定装置で計測された試料温度とヒータ電圧のデータは、実線の矢印で示されるように、試料温度計測とヒータ電圧計測装置で12ビットのデジタル変換され、Sバンドテレメータ送信機を介して地上局に送信される。これらデータは、地上局のSバンドテレメータ受信機で受信された後、データ処理装置に送られ試料温度とヒータ電圧の物理量に変換される。ここではじめて太陽光吸収率と全半球放射率の計算が行われる。なお、データの取得間隔は、4秒毎に行われる。

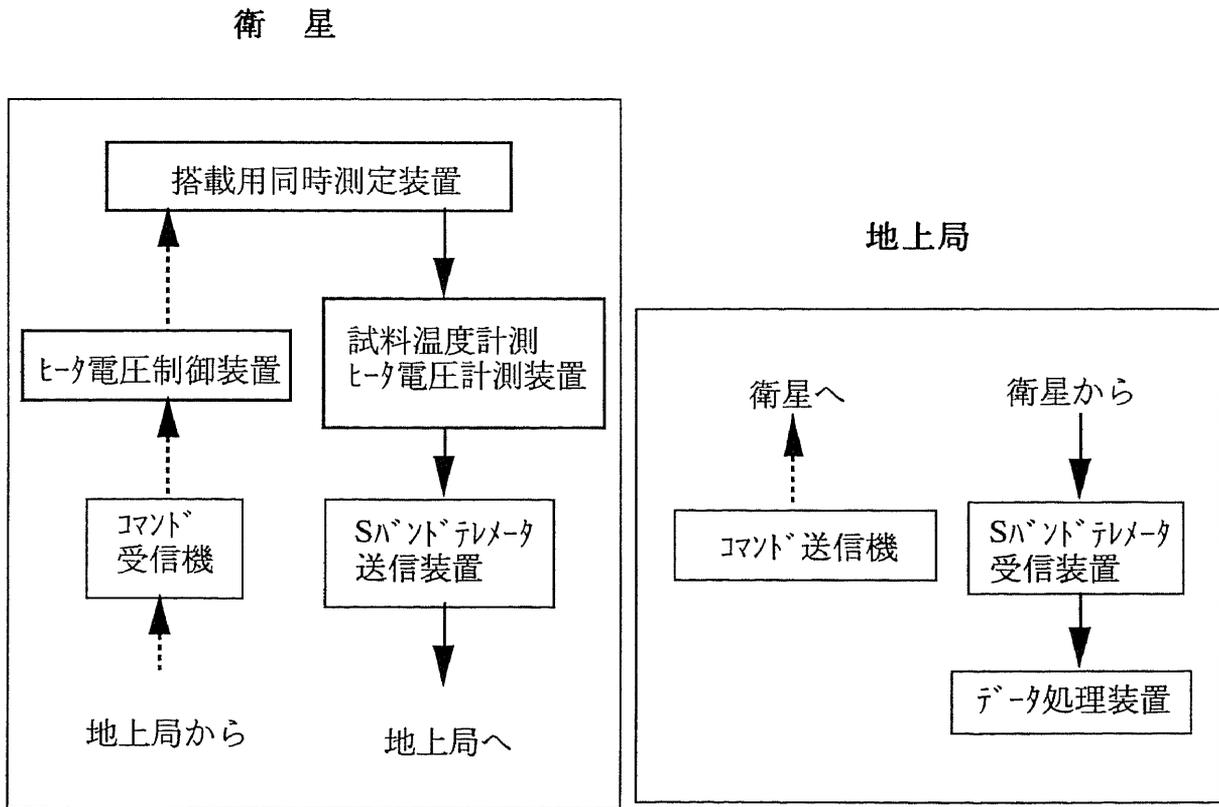


図3-7 搭載用同時測定装置のデータ処理法

### 3.4.3 宇宙空間における太陽光吸収率と全半球放射率の算出

ここでは、搭載用同時測定装置の条件から導かれる太陽光吸収率と全半球放射率の算出方法について記述する。

宇宙空間に置かれた試料に照度 $S$ の太陽光が垂直に入射し、かつ試料用ヒータに外部から電力 $P_0$ を供給すると、試料は温度 $T_{S0}$ の定常状態になる。このとき、エネルギー保存式は(3-9)式で与えられる。さらに、電力を $P_1$ 、 $P_2$  ( $P_1 < P_2$ ) とステップ的にヒータに供給すると、それぞれの電力に対応して試料の温度は、 $T_{S1}$ および $T_{S2}$ の定常状態 ( $T_{S1} < T_{S2}$ ) に移行する。このとき、エネルギーの保存式は、それぞれ(3-10)式、(3-11)式で与えられる。

$$P_0 + SA\alpha_S = A\epsilon_H\sigma T_{S0}^4 + K(T_{S0} - T_{B0}) \quad (3-9)$$

$$P_1 + SA\alpha_S = A\epsilon_H\sigma T_{S1}^4 + K(T_{S1} - T_{B1}) \quad (3-10)$$

$$P_2 + SA\alpha_S = A\epsilon_H\sigma T_{S2}^4 + K(T_{S2} - T_{B2}) \quad (3-11)$$

これらの式で、それぞれ左辺第1項は試料ヒータへの電力供給量を、第2項は太陽光の試料への入射量を、また、右辺第1項は試料表面から宇宙空間へのふく射熱損失量を、第2項は試料ホルダによる熱伝導損失量を表している。

したがって、(3-9)式、(3-10)式、および(3-11)式により、太陽光吸収率、全半球放射率、および熱コンダクタンスは、それぞれ(3-12)式、(3-13)式、および(3-14)式によって与えられる。

$$\alpha_S = \frac{(T_{S0}^4 P_1 - T_{S1}^4 P_0) - K(\Delta T_1 T_{S0}^4 - \Delta T_0 T_{S1}^4)}{SA(T_{S1}^4 - T_{S0}^4)} \quad (3-12)$$

$$\varepsilon_H = \frac{(P_1 - P_0) - K(\Delta T_1 - \Delta T_0)}{A\sigma(T_{S1}^4 - T_{S0}^4)} \quad (3-13)$$

$$K = \frac{P_0(T_{S2}^4 - T_{S1}^4) + P_1(T_{S0}^4 - T_{S2}^4) + P_2(T_{S1}^4 - T_{S0}^4)}{(\Delta T_2 - \Delta T_1)(T_{S1}^4 - T_{S0}^4) - (\Delta T_1 - \Delta T_0)(T_{S2}^4 - T_{S1}^4)} \quad (3-14)$$

$$\text{ただし, } \Delta T_0 = T_{S0} - T_{B0}, \quad \Delta T_1 = T_{S1} - T_{B1}, \quad \Delta T_2 = T_{S2} - T_{B2}$$

ここで、 $S$ は太陽光の入射照度、 $P_0$ 、 $P_1$ 、 $P_2$  は供給電力、 $T_{S0}$ 、 $T_{S1}$ 、 $T_{S2}$  は試料温度、 $T_{B0}$ 、 $T_{B1}$ 、 $T_{B2}$  は試料ホルダ底部温度、 $A$ は試料の入射断面積、 $K$  は試料ホルダの熱コンダクタンスである。

なお、上記解析では次のような仮定を置いている。

(i) 試料ホルダの側面からのふく射による熱損失はないものとする。

以上のように、搭載用同時測定装置における同時測定法が成り立ち、簡便に太陽光吸収率と全半球放射率をそれぞれ独立に求められる。

#### 3.4.4 搭載用同時測定装置による測定方法

宇宙環境での搭載用同時測定装置による太陽光吸収率と全半球放射率の測定方法を以下に記述する。

①衛星の姿勢制御により試料には太陽光がほぼ垂直（3°以内）に入射される。

太陽光の照度と入射角度は衛星に搭載された、太陽電池計測器の開放電圧と短絡電流、および測定精度±1°の太陽センサーでそれぞれ確認される。

②地上から試料用ヒータに制御電圧が送信され、試料が定常状態の温度に設定される。

データの取得条件を以下に示す.

- (i) 地球周回衛星が外部から受ける熱入力は、太陽光入射の他に、太陽光が地球表面で反射するアルベド入射と地球自身の赤外ふく射による入射が考えられる. ここでは、搭載用測定装置の試料温度データと太陽電池計測器の出力のデータから、太陽光のみがほぼ垂直に入射していることが確認された試料温度データが解析に使用される.
- (ii) 試料温度データの取得条件は、データの出力信号が±1ビット、すなわち±0.32K以内に安定し、かつ20分間連続して定常状態が得られたときとする.

上記条件が確認されたときに、次のデータが取得される.

- (i) 試料および試料底部の温度 (K), 試料用ヒータの計測電圧 (V).
- (ii) 太陽光照度, 太陽電池計測器の開放電圧 (V) と短絡電流 (I).

- ③太陽光の照射状態で、②項の温度より約2Kの温度差がつくようにヒータ電力が調節される. またデータは②の項と同様な条件で取得される.
- ④②, ③の項から得られたデータを(3-12)式, (3-13)式に代入すると、それぞれ太陽光吸収率と全半球放射率が算出される.

### 3.5 結 言

本章の結論を要約すると以下の通りである.

太陽光吸収率と全半球放射率の測定方法として新たに同時測定法を提案した. この方法は、第2章で示したように、一つの測定装置から一つの熱物性値を測定する従来の考え方と異なり、一組の測定装置から同一試料の二つの熱物性値、つまり太陽光吸収率と全半球放射率を同時に、しかも簡便に求めるものである.

具体的には以下の結論が得られた.

- (1) 同時測定法の測定原理が宇宙環境を想定して明らかにされた.
- (2) 地上用の同時測定法として、疑似太陽光光源と液体チッ素冷却が可能な真空装置から構成される測定装置を提案し、その性能が確認された. また、この方法では疑似太陽光光源の照度の調整を行うことにより、全半球放射率の温度依存性の測定も可能であることが確認された. 特に、この測定法では疑似太陽光光源の照度の安定度が太陽光吸収率と

全半球放射率の測定に影響を及ぼすことから、計算による感度解析から±0.5%以下の安定精度が必要になることが明らかにされた。

- (3) 第12号科学衛星「あけぼの」に搭載するために小型で軽量の搭載用同時測定装置を開発し、その性能を検証した。太陽光吸収率と全半球放射率の算出精度を得るために、搭載用の温度の校正は地上において±0.35 Kの正確さで行い、また、試料用ヒータに供給される設定電圧の分解能は±40.0 mV、その測定分解能は±5.0 mVに設計されている。
- (4) 地上用および宇宙用において、それぞれ測定装置の条件による太陽光吸収率と全半球放射率の算出方法が明らかにされた。これにより、同時測定法が地上あるいは宇宙において適用できることが確認された。また、同時測定法を導くための試料の温度差 $\Delta T_S$ は、全半球放射率の温度依存性と、試料に配線されたリード線類の総熱損失量を考慮した結果、2 Kが推奨される。

## 第4章 同時測定法による熱放射特性の測定結果と評価

### 4.1 概要

第3章において一組の測定装置から二つの熱物性値が求められる同時測定法を提案し、この測定法が地上および宇宙において適用できることを理論的に明らかにした。

本章では、同時測定法のために開発を行った地上用および搭載用同時測定装置のそれぞれの測定誤差の要因を吟味し、太陽光吸収率と全半球放射率の算出の際に含まれる全誤差を明らかにする。地上用同時測定装置では、疑似太陽光の光束を導くための石英窓と試料の幾何学的関係から決まる形態係数を実験的に確かめる。また、この測定では疑似太陽光光源の照度の安定度が重要になるため、非安定度が誤差に及ぼす影響を検討する。一方、搭載用同時測定装置では、搭載装置および衛星のアナログとデジタルデータ処理装置のそれぞれ性能により試料温度やヒータ電圧の分解能が定められる。この分解能の制約により測定に及ぼす影響は各試料毎によって異なるために、ここでは各試料毎に検討して搭載された各試料の測定値の全誤差を明確にする。

次に、同時測定法で得られる太陽光吸収率と全半球放射率について評価する。地上用同時測定装置では分光反射率の異なる3種類のデータを、また、搭載用同時測定装置では第12号科学衛星「あけぼの」に宇宙用として新たに開発した5種類の材料の打ち上げ初期のデータを、それぞれ第2章で既に試作した分光法とカロリメータ法で得られたデータと比較して、同時測定法の妥当性を検証する。さらに地上用では、疑似太陽光光源の照度を調整することにより全半球放射率の温度依存性が求められることを確認する。また、搭載用では、宇宙環境において長期飛翔データを取得して装置の機能確認と材料の評価を行う。

### 4.2 誤差要因の検討

ここでは、同時測定法の地上用同時測定装置と搭載用同時測定装置のそれぞれの測定誤差の

要因について検討し、太陽光吸収率と全半球放射率に及ぼす影響を明らかにする。

#### 4.2.1 地上用同時測定装置の場合

地上用同時測定装置の測定誤差の要因について、太陽光吸収率と全半球放射率のそれぞれの場合に分けて検討を行う。

太陽光吸収率を求める際に生じる誤差要因とその検討結果を以下に示す。

(1) 照度計サーモパイルの校正の正確さ。

測定に用いたサーモパイルはエプレイラボラトリ社により既に校正されており、その校正値の正確さは±1%であり、太陽光吸収率に及ぼす影響は(3-7)式より、±1%である。

(2) 疑似太陽光光源の照度の非安定度。

解析では測定中の照度が±0.5%の変化範囲で得られたデータのみを使用し、その非安定度による太陽光吸収率に及ぼす影響は(3-7)式より、±0.5%である。

(3) 試料の全半球吸収率と全半球放射率を等しくおく影響。

2.3.3節の結果と同じく、全半球吸収率に及ぼす影響は±0.5%である。

(4) 試料と石英窓の形態係数。

外径50mmの石英窓の形態係数を検証するために、黒色塗料の試料を例にして次に示す3条件に基づいて(3-6)式より(疑似太陽光光源の照度,  $S = 0$ )全半球放射率を算出して評価を行った。

①実験では石英窓があり、その窓の形態係数を幾何学的に算出した $F_{SQ} = 0.0145$ を用いて全半球放射率を算出する[▲]。つまり形態係数が考慮される。

②①の実験と同様に石英窓が取り付けられているが、全半球放射率はシュラウド壁で囲まれているものとして算出する[□]。つまり形態係数が考慮されない。

③実験では石英窓の代わりに液体チッ素で冷却された平板に置き換え、全半球放射率はカロリメータ法と同様に試料が、液体チッ素冷却されたシュラウド壁で完全に囲まれた状態で算出する[○]。

これらの測定結果を図4-1に示す。形態係数を考慮しない②の結果は試料が低温にな

るに従い③の結果と一致しなくなる，しかし，①の結果のように形態係数を考慮することにより③の結果と比較して良い一致が得られた．したがって，先に求められた形態係数 $F_{SQ}=0.0145$ が，この測定装置では妥当であると判断する．

(5) 疑似太陽光光源と大気圏外の太陽光の分光分布の相違．

疑似太陽光の分光分布が，太陽光の分光分布と相違する点を補正する意味で，疑似太陽光の出射照度を $0.25 \sim 2.00 \mu\text{m}$ の波長範囲の太陽光照度と等しくなるように調整した．後述の測定結果より，補正を行うことにより太陽光吸収率の顕著な差は認められなかった．

(6) 試料に配線されたリード線類の総熱損失量．

第2章の図2-14で求められた総熱損失量を用いて補正を行った．

以上の誤差要因の検討結果から，地上用同時測定装置により求められる太陽光吸収率に含まれる全誤差は， $\pm 2\%$ になることが確かめられた．

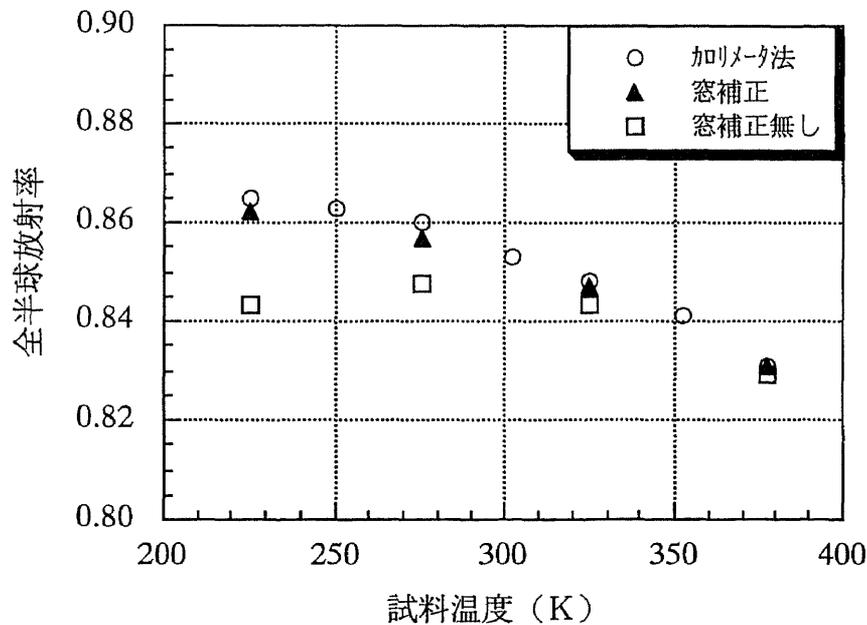


図4-1 石英窓の形態係数の評価

一方、全半球放射率の測定誤差の要因は、(3-8)式により太陽光吸収率に比べ単純になり、次の通りである。

(1) 試料用ヒータに供給される電力測定の不確かさ。

試料用ヒータに供給される電圧と電流の測定分解能が、それぞれ $\pm 1 \mu\text{V}$ 、 $\pm 1 \mu\text{A}$ で、全半球放射率に及ぼす影響は(3-8)式より $\pm 0.6\%$ である。

(2) 試料温度の校正の正確さ。

試料温度の校正が $173 \sim 373 \text{K}$ の温度範囲で正確さ $\pm 0.32 \text{K}$ で行われており、全半球放射率に及ぼす影響は(3-8)式より $\pm 0.3\%$ である。

以上の誤差要因を検討することにより、地上用同時測定装置より得られる全半球放射率の全誤差は、約 $\pm 1\%$ であることが確認された。

表4-1に太陽光吸収率と全半球放射率の上記誤差要因と誤差量、および全誤差をまとめて示す。

表4-1 地上用同時測定装置の誤差の検討

	誤差要因	誤差量 (%)	全誤差 (%)
太陽光吸収率	(1) サーミスタ校正の確かさ	$\pm 1.0$	$\pm 2.0$
	(2) 光源の非安定度	$\pm 0.5$	
	(3) 測定室のふく射交換	$\pm 0.5$	
	(4) 石英窓の形態計数	--	
	(5) 疑似光源の分光分布	--	
	(6) リード線の総熱損失量	--	
全半球放射率	(1) 試料用ヒータの供給電力	$\pm 0.6$	$\pm 1.0$
	(2) 測定室のふく射交換	$\pm 0.5$	

\* --は補正または実測値を使用した。

#### 4.2.2 搭載用同時測定装置の場合

衛星で取得されるデータの測定精度は、そこに搭載される装置と衛星全体のデータを処理、すなわちアナログおよびデジタル変換処理をする装置の性能できまる。「あけぼの」衛星に搭載された搭載用同時測定装置の試料温度やヒータ電圧の測定分解能や精度は以下の通りである。

- (1) 試料用ヒータの測定電圧の分解能は、 $\pm 5.0$  mVである。
- (2) 試料温度の測定精度は、 $223.15 \sim 373.15$  Kの温度範囲で $\pm 0.35$  Kである。

したがって、本測定装置ではこれらの要因が誤差に及ぼす影響は各試料毎に異なるため、ここでは各試料毎に誤差の検討を行った。また、共通した誤差要因として、次の項が挙げられる。

- (3) 試料ホルダの熱コンダクタンス不確かさは、 $\pm 1\%$ である。

以上、3項の誤差要因が各試料の太陽光吸収率と全半球放射率に及ぼす影響を表4-2にまとめて示す。

各試料の全誤差は、熱制御ミラーを除いて太陽光吸収率は $\pm 2\%$ 以下、全半球放射率は $\pm 3\%$ 以下であることが確認された。熱制御ミラーでは、太陽光吸収率と全半球放射率の絶対値が小さくなるために、試料温度の測定精度の感度が太陽光吸収率と全半球放射率の測定に直接影響を及ぼし、誤差が大きくなる結果になった。

表 4 - 2 搭載用同時測定装置の誤差の検討

試料	熱放射特性	ヒータ電圧	試料温度	熱コンタクト	全誤差
50TCC/Si	$\alpha_S$	$\pm 0.2$	$\pm 1.5$	$\pm 1.0$	$\pm 1.8$
	$\epsilon_H$	$\pm 0.3$	$\pm 2.1$	$\pm 1.0$	$\pm 2.3$
Ar/InP	$\alpha_S$	$\pm 0.1$	$\pm 1.5$	$\pm 1.0$	$\pm 1.8$
	$\epsilon_H$	$\pm 0.3$	$\pm 1.4$	$\pm 1.0$	$\pm 1.7$
TCC/25R	$\alpha_S$	$\pm 0.2$	$\pm 0.9$	$\pm 1.0$	$\pm 1.3$
	$\epsilon_H$	$\pm 0.3$	$\pm 1.1$	$\pm 1.0$	$\pm 1.5$
TCC/25S/Al	$\alpha_S$	$\pm 0.2$	$\pm 1.2$	$\pm 1.0$	$\pm 1.5$
	$\epsilon_H$	$\pm 0.3$	$\pm 1.4$	$\pm 1.0$	$\pm 1.7$
CSSM	$\alpha_S$	$\pm 0.7$	$\pm 6.8$	$\pm 1.0$	$\pm 6.9$
	$\epsilon_H$	$\pm 0.3$	$\pm 3.2$	$\pm 1.0$	$\pm 3.3$

### 4.3 同時測定法による測定結果と評価

地上用および搭載用同時測定装置から得られる測定結果について評価を行う。また、太陽光吸収率は分光法で、全半球放射率はカロリメータ法でそれぞれ求められた値と対比し、地上用および搭載用同時測定装置を検証する。

#### 4.3.1 地上用同時測定装置による測定結果と考察

地上用同時測定装置では、同時測定法の検証と、疑似太陽光光源の照度の調整により全半球放射率の温度依存性が求められることを確認する。

#### a) 地上用測定試料の諸元

同時測定法の特徴は、波長で考えると $0.25\ \mu\text{m}$ の紫外域から $50.0\ \mu\text{m}$ の中赤外域の広範囲の波長域にわたる熱物性を評価できることにある。したがって、本測定法を検証する意味で、試料には標準的な1層構造の黒色塗料と白色塗料および2層構造のAl蒸着テフロンの計3種類を選定した。

表4-3に測定に用いた試料のそれぞれの諸元を示す。各試料の分光反射特性は著者が既に取り得たデータを基に説明する。①黒色塗料の試料は塗装膜厚が約 $70\ \mu\text{m}$ で、紫外から中赤外の波長範囲においてほぼフラットで低い分光反射特性を有している。②白色塗料は塗装膜厚が約 $100\ \mu\text{m}$ で、紫外から可視の波長範囲では高い分光反射特性をもつが、それ以上の長波長域では逆に黒色塗料と同様に低い分光反射特性になる。③Al蒸着テフロンは $50\ \mu\text{m}$ のテフロンフィルムに約 $1000\ \text{\AA}$ のAl蒸着を施した試料で、テフロンフィルム表面が測定される。この分光特性は、白色塗料と同様に紫外から可視の波長範囲では高い分光反射特性をもつが、それ以上の波長域では高分子フィルム特有の複雑な分光反射特性になる。したがって、このフィルムでは中赤外域の分光反射特性が複雑な試料でも全半球放射率の温度依存性の測定が可能か否か、を検証する。

表4-3 地上用測定試料の諸元

試料	膜厚
黒色塗料	$70\ \mu\text{m}$
白色塗料	$100\ \mu\text{m}$
Al蒸着Teflon	Teflon = $50\ \mu\text{m}$ Al $\approx 1000\ \text{\AA}$

## b) 地上用同時測定装置による測定結果 [30]

図4-2～図4-7に黒色塗料，白色塗料，Al蒸着テフロンの各試料の同時測定法の太陽光吸収率と全半球放射率の温度依存性の測定結果を示す．横軸は試料温度を表し，その温度は疑似太陽光光源の照度の変化により調整される．図中では分光法とカロリメータ法でそれぞれ求められた値を合わせて示す．

以下で扱う同時測定法の太陽光吸収率の値は，測定値の平均値を示す．

同時測定法による黒色塗料の太陽光吸収率（図4-2）は $0.970 \pm 0.002$ に収まり，試料温度の変化に対してもばらつきの少ないデータが得られた．また，各温度の全半球放射率（図4-3）はカロリメータ法で得られた結果と良い一致が得られた．

白色塗料の太陽光吸収率（図4-4）は $0.244 \pm 0.006$ と，試料温度の変化に対して平均値から $\pm 2.4\%$ のばらつきが生じた．しかし，全半球放射率（図4-5）はカロリメータ法と比べ各温度とも良い一致が得られた．この理由は，疑似太陽光光源の照度の非安定度が太陽光吸収率の算出には顕著であるが，全半球放射率には余り影響を及ぼさないことによるものである．この結果，試料温度に対して太陽光吸収率と全半球放射率のデータの対応が一部とれていないところが生じた．

Al蒸着テフロンの太陽光吸収率（図4-6）は，低温から高温の試料温度変化に対して $0.142 \pm 0.002$ と，安定したデータが得られた．全半球放射率（図4-7）のデータもカロリメータ法の温度依存性と一致する結果が得られた．

同時測定法による太陽光吸収率は試料温度変化に対してばらつきの小さいデータが得られることが確かめられた．また，全半球放射率は疑似太陽光光源の照度の調整により温度依存性が求められることが確認された．

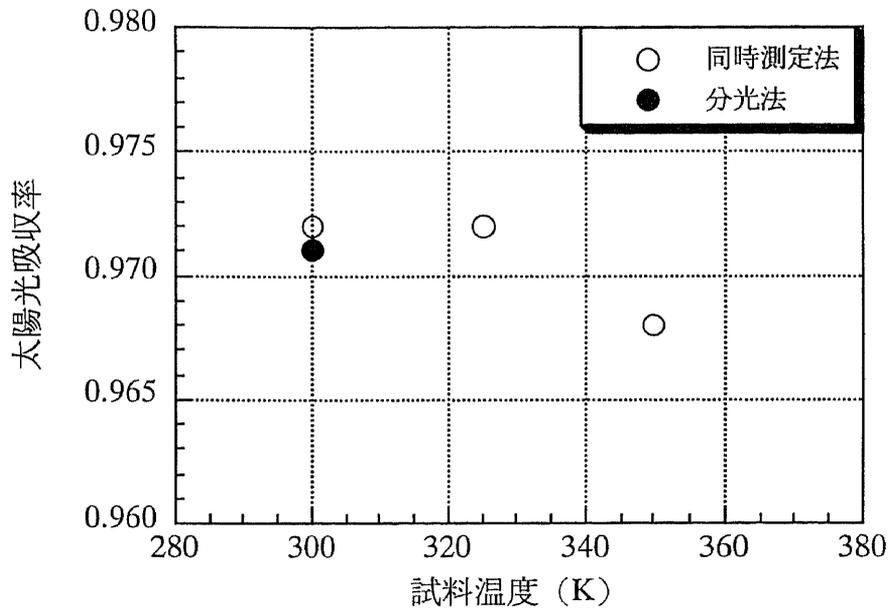


図 4-2 黒色塗料の太陽光吸収率

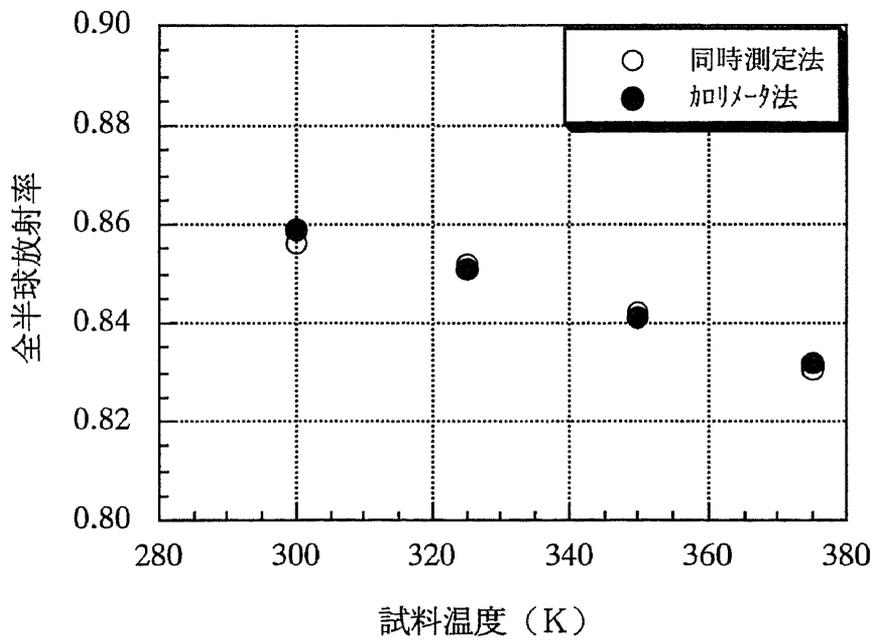


図 4-3 黒色塗料の全半球放射率の温度依存性

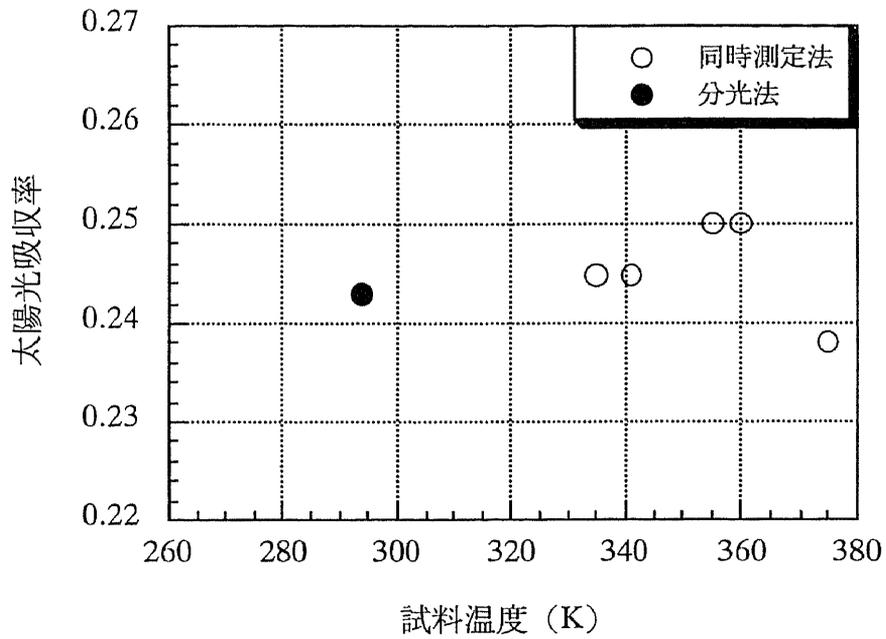


図 4-4 白色塗料の太陽光吸収率

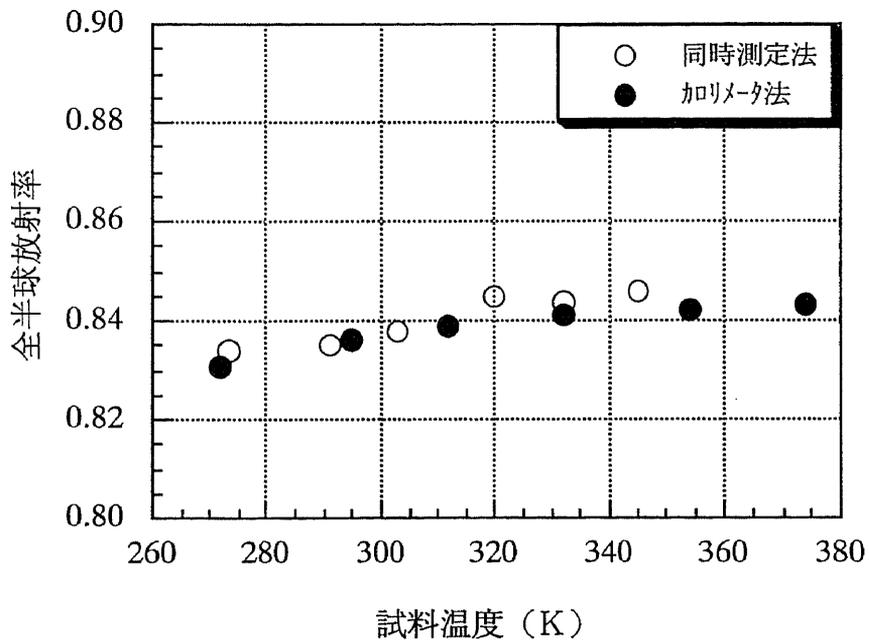


図 4-5 白色塗料の全半球放射率の温度依存性

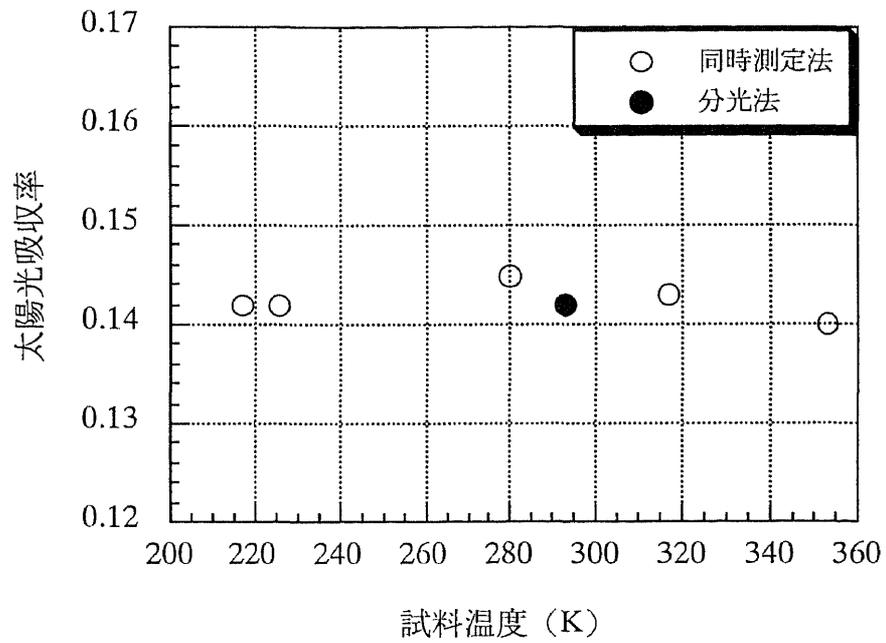


図 4-6 Al蒸着テフロンの太陽光吸収率

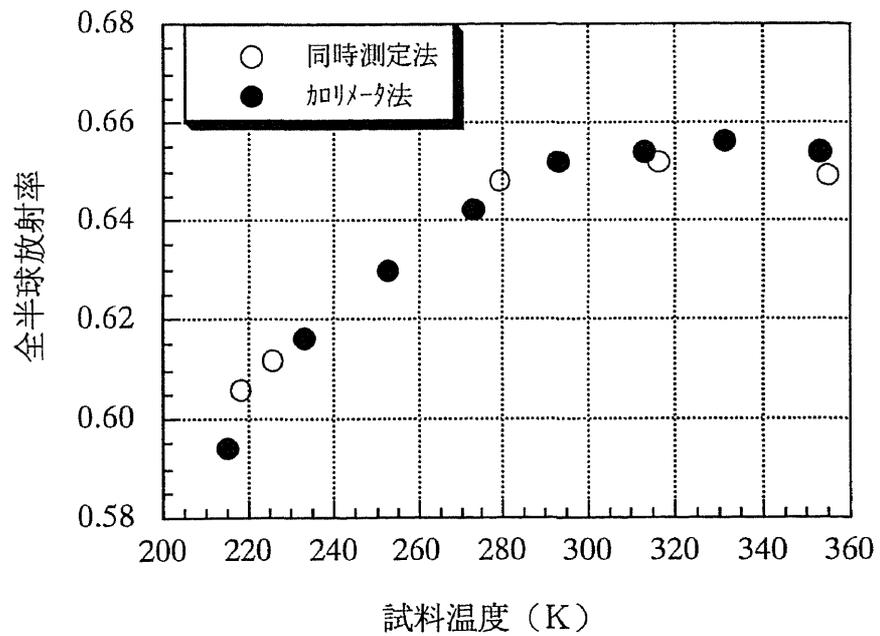


図 4-7 Al蒸着テフロンの全半球放射率の温度依存性

### c) 測定結果の考察

表4-4に各試料の同時測定法の測定結果をまとめて示す。また、表中では同時測定法の測定結果と分光法およびカロリメータ法の測定結果との差も示している。同時測定法による太陽光吸収率の値は測定値の平均値を、全半球放射率では同時測定法とカロリメータ法との差が最も顕著に現れた値をそれぞれ示す。

以下に、地上用同時測定装置による黒色塗料、白色塗料、Al蒸着テフロンの測定結果をそれぞれ整理する。

- (i) 太陽光吸収率の値は、平均値からのばらつきが最大で±0.006と小さい結果が得られた。その理由は、各試料の分光反射特性によらず、すなわち黒色塗料のように分光反射特性が0.03と小さい試料に対しても、また、逆にAl蒸着テフロンのように0.86と大きい試料に対しても疑似太陽光光源の照度を安定に保つことができるからである。また、分光法と比較して太陽光吸収率の絶対値の差は±0.001と小さく、良い一致が得られた。
- (ii) 全半球放射率は疑似太陽光光源の照度の調整を図ることにより、Al蒸着テフロンで代表されるように中赤外域において複雑な分光反射特性をもつ試料に対しても温度依存性の測定が可能であることが確かめられた。また、各試料の温度依存性はカロリメータ法と比較して良い一致が得られた。その絶対値の差は、最も顕著に現れて0.009である

表4-4 地上用同時測定装置による測定結果

試料	太陽光吸収率			全半球放射率		
	同時測定法	分光法	差	同時測定法	カロリメータ法	差
黒色塗料	0.970	0.971	-0.001	0.856	0.859	-0.003
白色塗料	0.244	0.243	+0.001	0.845	0.840	+0.005
Al蒸着テフロン	0.142	0.142	0	0.606	0.600	+0.006

ことが確かめられた。したがって、試料の温度差  $\Delta T_S$  が 2 K 以内であれば、全半球放射率の温度依存性を無視する仮定条件が許されるものと判断した。

- (iii) 太陽光吸収率と全半球放射率の測定結果から同時測定法が地上において成り立つことが検証された。

#### 4.3.2 搭載用同時測定装置の測定結果と考察

第 1 2 号科学衛星「あけぼの」に搭載された搭載用同時測定装置の飛翔データから太陽光吸収率と全半球放射率を算出した。ここでは、紫外線や荷電粒子などの宇宙環境による試料の劣化が生じる前<sup>[31-34]</sup>、すなわち打ち上げ初期の飛翔データから得られた値と、地上において分光法およびカロリメータにより得られた同じロットの試料の値を比較する。次いで、宇宙環境における長期飛翔データについて評価を行う。

##### a) 搭載用測定試料の諸元

表 4-5 に搭載した試料の諸元を示す。2 種類の太陽電池素子と熱制御フィルム、および熱制御ミラーの計 5 種類の試料を選択した。

表 4-5 搭載用試料の諸元

試料	記号	諸元
Si 太陽電池素子	50TCC/Si	BDX $t_g=50 \mu m$
InP 太陽電池素子	Ar/InP	カバーガラスなし
UPILEX-R 熱制御フィルム	TCC/25R/Al	$t_f=25 \mu m$
UPILEX-S 熱制御フィルム	TCC/25S/Al	$t_f=25 \mu m$
熱制御ミラー	CSSM	BDX $t_g=200 \mu m$

TCC：透明導電膜付カバーガラス， Ar：反射防止膜， BDX：硼珪酸ガラス，

$t_g$ ：カバーガラス板厚，  $t_f$ ：フィルム膜厚

Si太陽電池素子を除き、InP太陽電池素子は山口らが（日本電信電話）[35]、TCC/25R/AlとTCC/25S/Alの熱制御フィルムは著者と佐藤らが（宇部興産）[36-42]、また、CSSMのカバーガラスと熱制御ミラーは著者と山本らが（日本電気硝子）[43-45]、宇宙用試料として新たに開発されたもので、宇宙環境で評価するために搭載された。試料の概略は、①板厚 $50\mu\text{m}$ のカバーガラス（硼珪酸ガラス）の表面に透明導電膜を施したカバーガラス付きの3層構造のSi太陽電池素子、②宇宙用として初めて採用された反射防止膜付きの2層構造のInP太陽電池素子、③膜厚 $25\mu\text{m}$ のポリイミド系フィルム、ユーピレックスRおよびSに、それぞれ表面に透明導電膜を、裏面にAl蒸着を施した3層構造の2種類の熱制御フィルム、④板厚 $200\mu\text{m}$ の硼珪酸ガラスの表面に透明導電膜を、裏面にAg蒸着を施した3層構造の熱制御ミラーである。

## b) 搭載用同時測定装置による測定結果 [46]

### (1) 打ち上げ初期の飛翔データの解析

図4-8～図4-17にSiとInPの太陽電池素子、ユーピレックスRとSの熱制御フィルム、および熱制御ミラーの各試料の同時測定法の測定結果をそれぞれ示す。これらデータの取得条件と取得方法は第3章で既に説明したように、試料には太陽光のみが垂直に入射し、かつ試料温度の定常状態が20分間連続して得られたデータについて解析する。図中、分光法とカロリメータ法でそれぞれ求められた値と対比されている。なお、カロリメータ法の全半球放射率は、各試料の温度依存性を考慮して飛翔データの各試料温度に合わせて求めた値を示す。図の横軸ESH（Equivalent Sun Hours）は、太陽光に照射されている時間とその照射照度の積で、大気圏外の太陽光に照射されているトータル時間を表す。「あけぼの」衛星の場合、50ESHでは打ち上げ後約1.5日、90ESHでは約3日に相当する。

以下に、搭載用同時測定装置による測定結果を具体的に評価する。ここでは同時測定法の値は、それぞれ測定値の平均値で記述する。

Si太陽電池素子の太陽光吸収率（図4-8）は平均値 $0.724$ に対して $\pm 0.005$ ばらつき、全半球放射率（図4-9）は $0.797 \pm 0.007$ と、両データとも打ち上げ初期では安定した結果が得られた。

InP太陽電池素子の太陽光吸収率（図4-10）は、打ち上げ初期の50と53ESHでは $0.814$ とデータは安定しているが、90ESHでは $0.792$ と $0.02$ 低下し、平均すると $0.803 \pm 0.01$ となり、データのばらつきが生じた。同様に全半球放射率（図4-11）も

打ち上げ後50ESHでは0.570とカロリメータ法と良い一致が得られたが、90ESHでは0.605と高い値となり、平均すると $0.587 \pm 0.017$ の結果が得られた、InP太陽電池素子はSi太陽電池素子に比べ安定したデータが得られなかった。この要因として、InP太陽電池素子の太陽光吸収率と全半球放射率の比が他の試料より大きいために、90ESHでは試料温度が定常状態になっていないものと推定する。

ユーピレックスRタイプの熱制御フィルムの太陽光吸収率（図4-12）は $0.372 \pm 0.001$ と安定したデータが得られた。全半球放射率（図4-13）も同様に、 $0.493 \pm 0.001$ と安定し、カロリメータ法と良い一致が得られた。

ユーピレックスSタイプの熱制御フィルムの太陽光吸収率（図4-14）は $0.433 \pm 0.001$ とばらつきの少ないデータが得られた。同じく全半球放射率（図4-15）も $0.590 \pm 0.003$ と良い結果が得られた。

熱制御ミラーの太陽光吸収率（図4-16）は50ESHのデータでは分光法と良い一致が得られたが、時間とともに小さくなり、平均すると $0.091 \pm 0.018$ とこれまでの試料と比べばらつく傾向が示された。一方、全半球放射率（図4-17）も同様に、50ESHではカロリメータ法と良い一致が得られているが、その後、データは大きくばらつくことが確認された。この要因は、90ESHでは解析からデータが正常になることを考えると[43]、この試料の温度ポテンシャルが周りに比べ低いため、打ち上げ初期に衛星から発生したアウトガス、つまり接着材や塗料などのガスが試料表面に吸着し、その後ガスが脱着したものと推定する。

## （2）長期飛翔データの解析

図4-18～図4-19に各試料の太陽光吸収率と全半球放射率の打ち上げから15,000ESH（680日）までのデータをそれぞれ示す。

SiとInPの2種類の太陽電池素子の太陽光吸収率（図4-18）は、2素子とも打ち上げ後5000ESHまで変化は認められないが、その後徐々に増加し、15,000ESHではSi素子で初期の0.72から0.02、InP素子で0.83から0.05とそれぞれ僅かではあるが劣化していることが確認された。カバーガラス無しのInP素子の方がSi素子に比べより劣化が進行していることが明らかにされた。また、全半球放射率は（図4-19）、2素子共僅かに15,000ESHでSi素子で初期の0.78から0.01、InP素子で0.57から0.027とそれぞれ劣化が認められた。

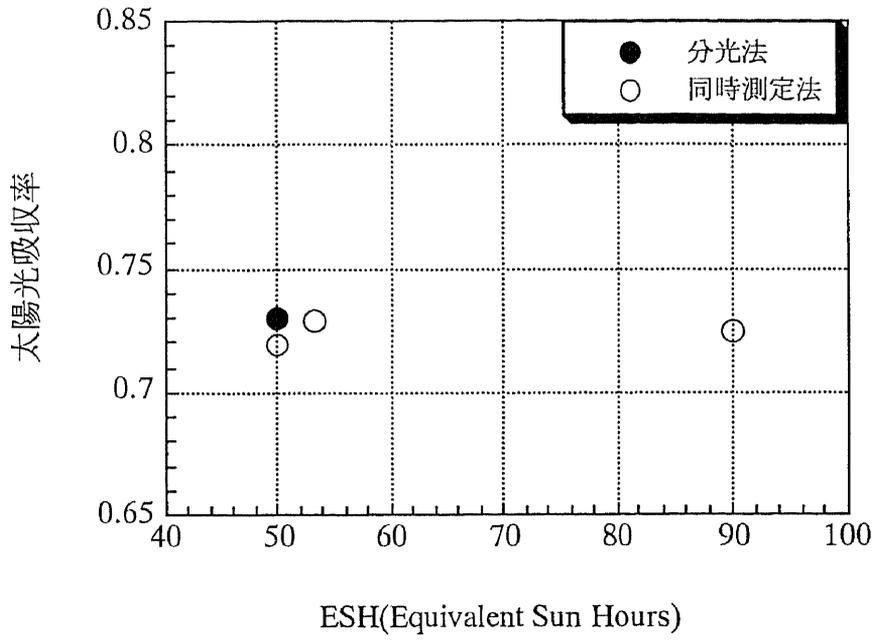


図 4 - 8 Si太陽電池素子の太陽光吸収率

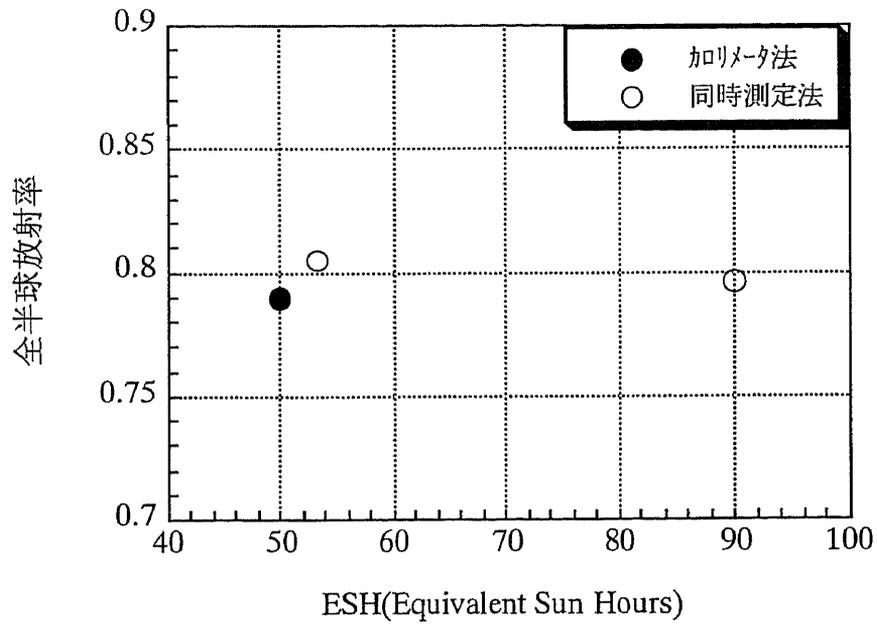


図 4 - 9 Si太陽電池素子の全半球放射率

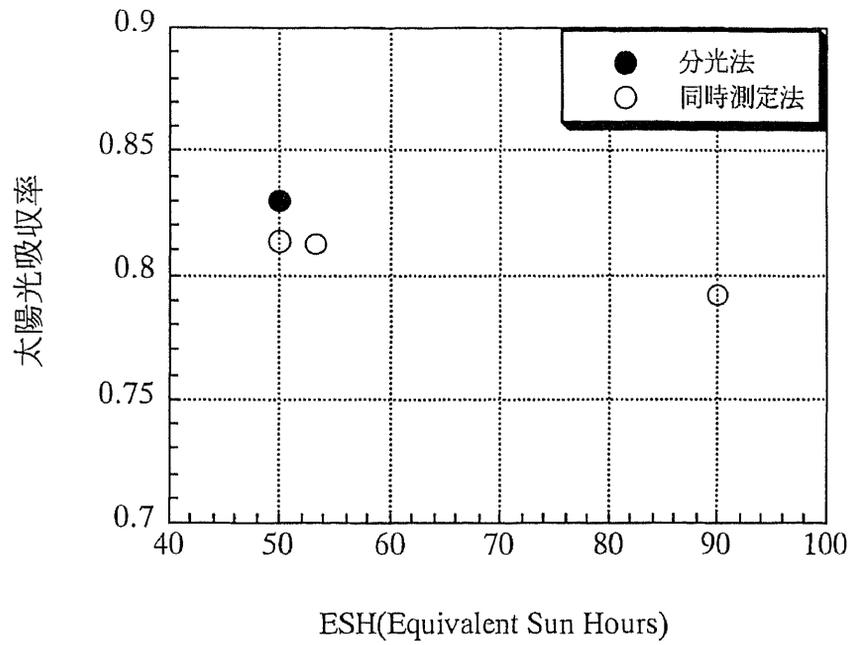


図 4 - 1 0 InP太陽電池素子の太陽光吸収率

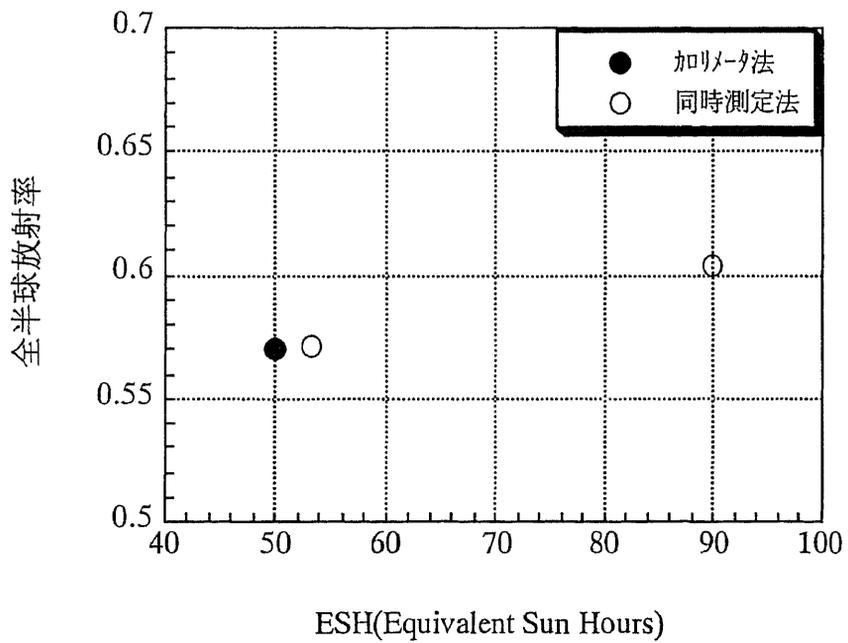


図 4 - 1 1 InP太陽電池素子の全半球放射率

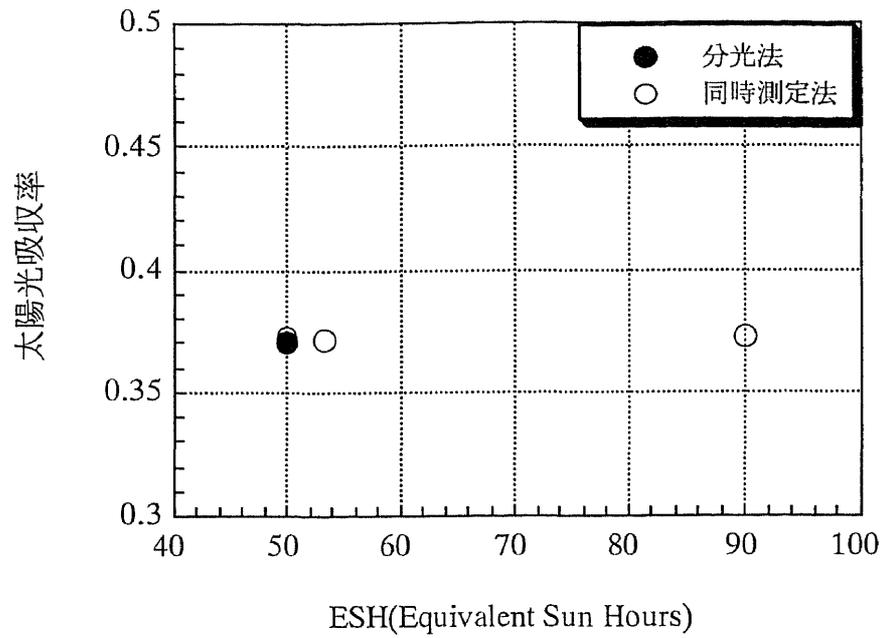


図 4-1 2 ユープレックスR熱制御フィルムの太陽光吸収率

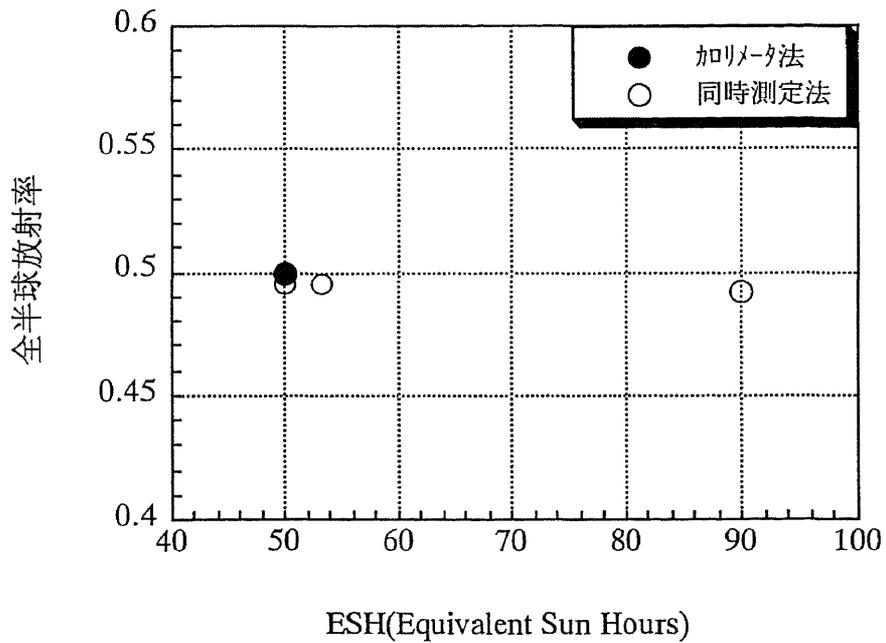


図 4-1 3 ユープレックスR熱制御フィルムの半球放射率

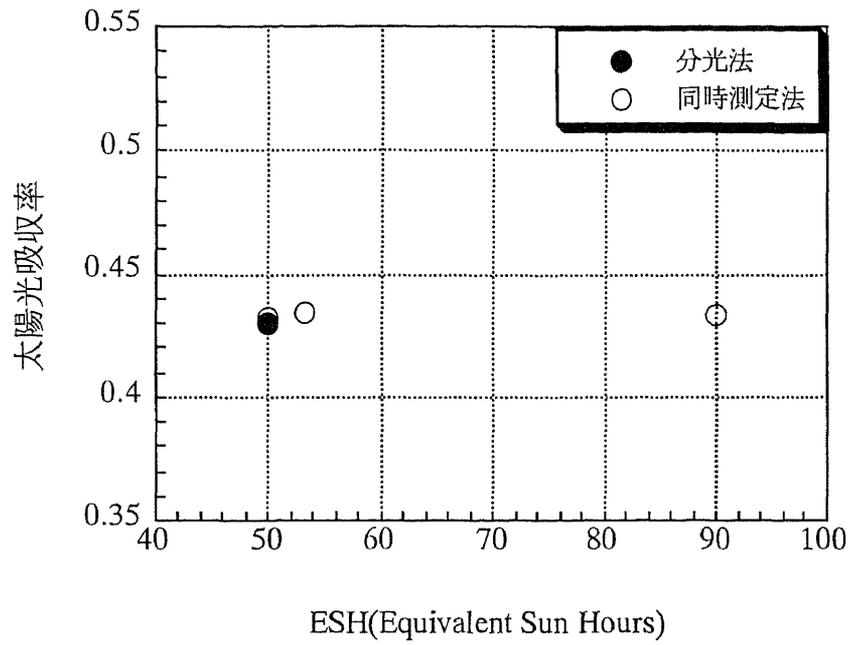


図 4-1 4 ユープレックスS熱制御フィルムの太陽光吸収率

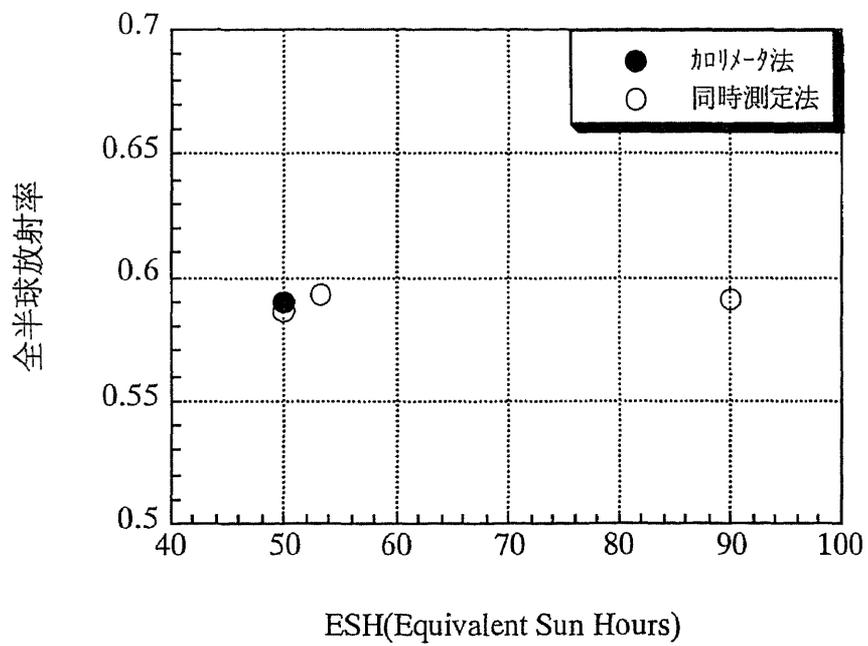


図 4-1 5 ユープレックスS熱制御フィルムの半球放射率

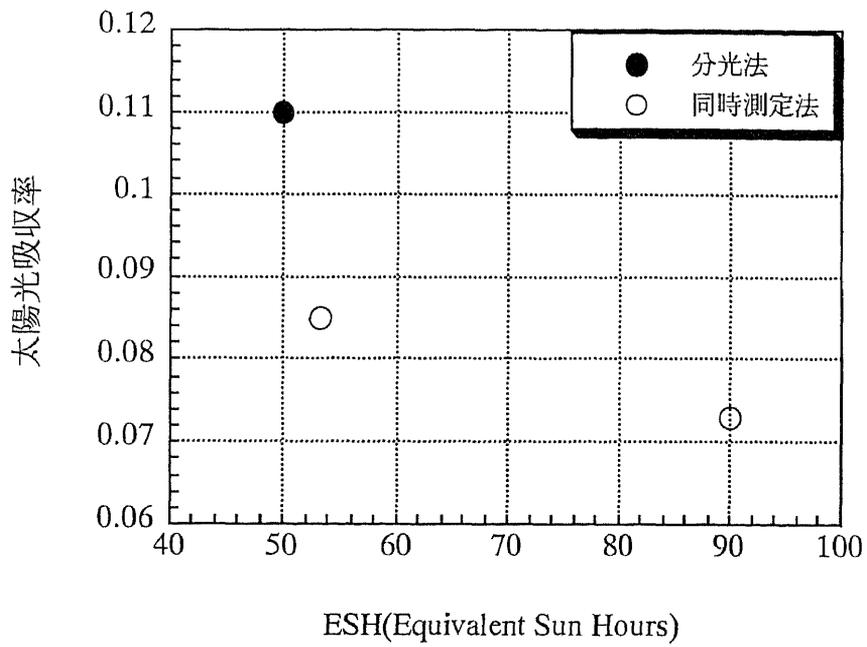


図 4-1 6 熱制御ミラーの太陽光吸収率

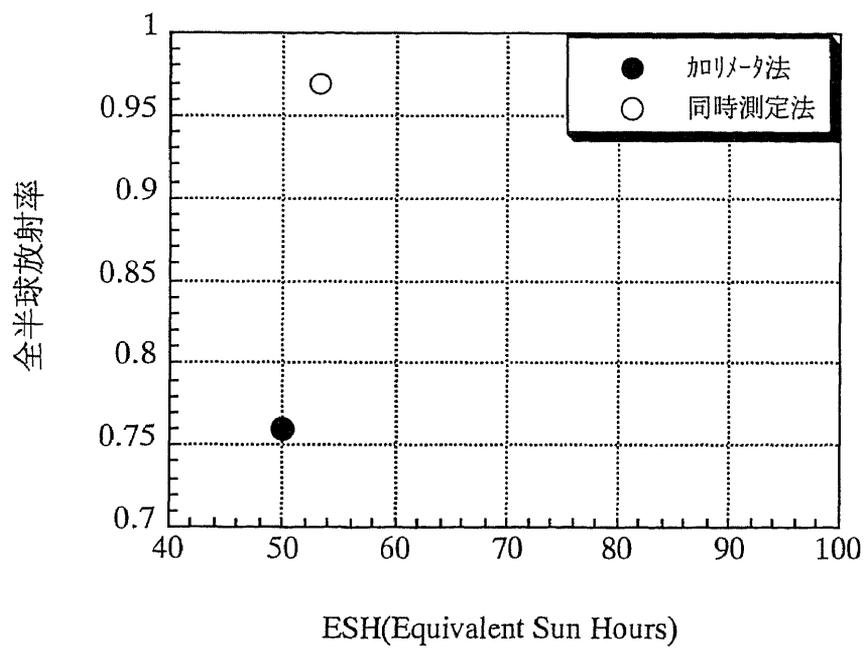


図 4-1 7 熱制御ミラーの全半球放射率

ユープレックスRとSの2種類の熱制御フィルムの太陽光吸収率（図4-20）は、Rタイプでは15,000ESHで初期の0.37から0.025、Sタイプでは14,077ESHで初期の0.43から0.04程度、それぞれ変化していることが確認された。Sタイプの熱制御フィルムが明らかに劣化していることが認められた。全半球放射率は（図4-21）、Rタイプで0.01、Sタイプで0.018と僅かではあるがそれぞれ変化していることが確認された。

熱制御ミラーの太陽光吸収率（図4-22）は、打ち上げ初期でアウトガスの影響によりデータがばらついていたが、その後吸着したガスが脱着して正常なデータが得られるようになった。図4-22で分かるように太陽光吸収率のデータは、全体として他の試料のデータよりばらつく傾向が示されたが、しかし顕著な劣化は認められなかった。一方、全半球放射率（図4-23）はデータも安定し、劣化が確認されなかった。

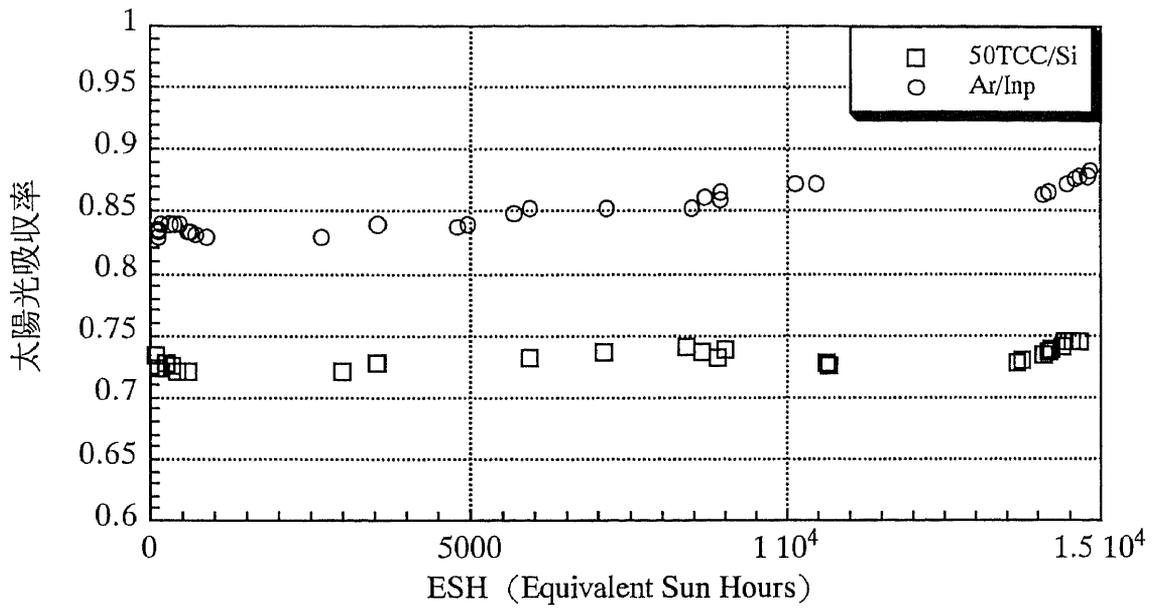


図 4-18 太陽電池素子の太陽光吸収率の飛行データ

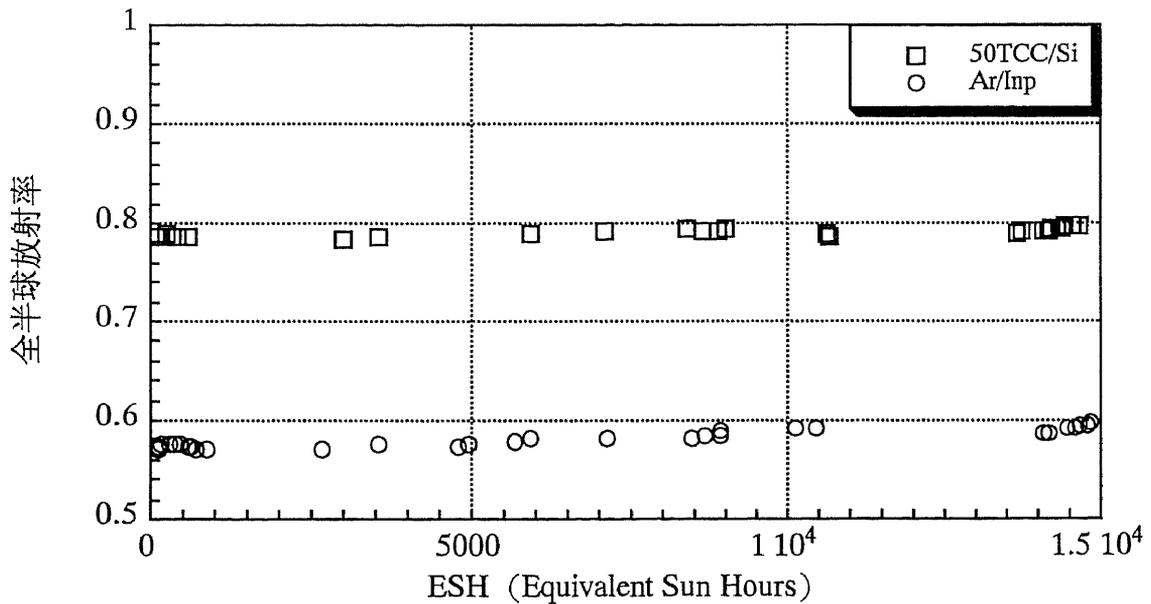


図 4-19 太陽電池素子の全半球放射率の飛行データ

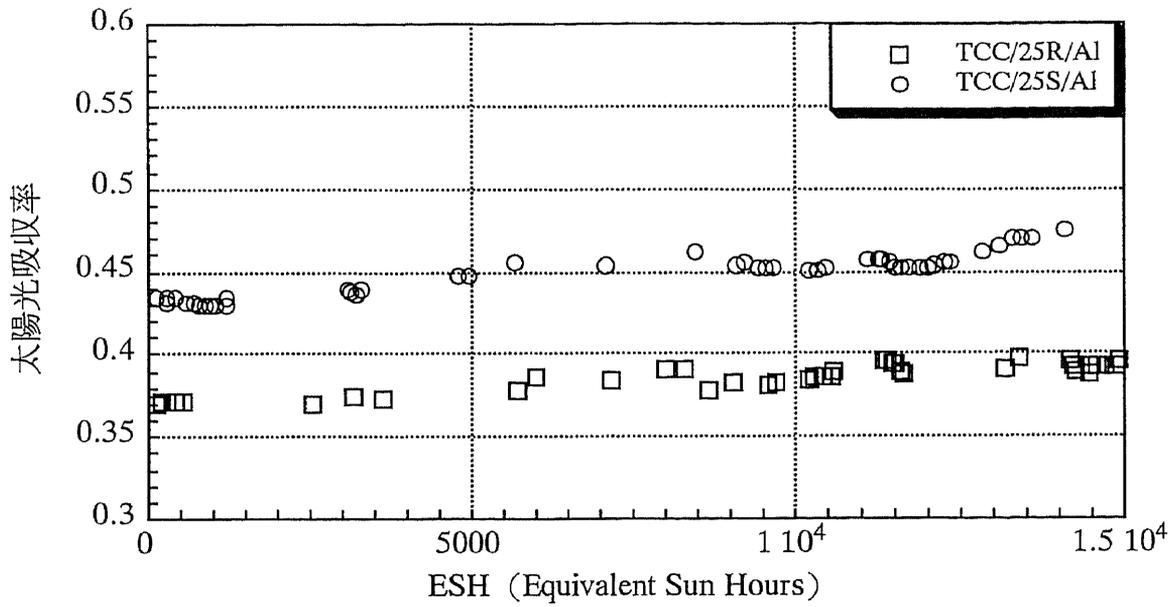


図4-20 熱制御フィルムの太陽光吸収率の飛行データ

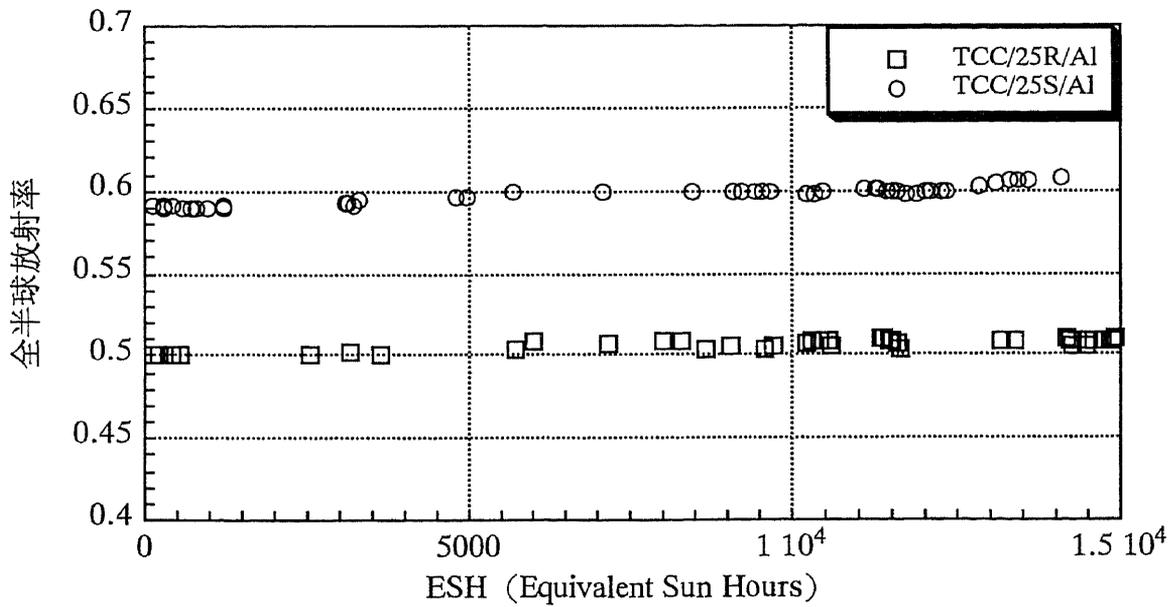


図4-21 熱制御フィルムの全半球放射率の飛行データ

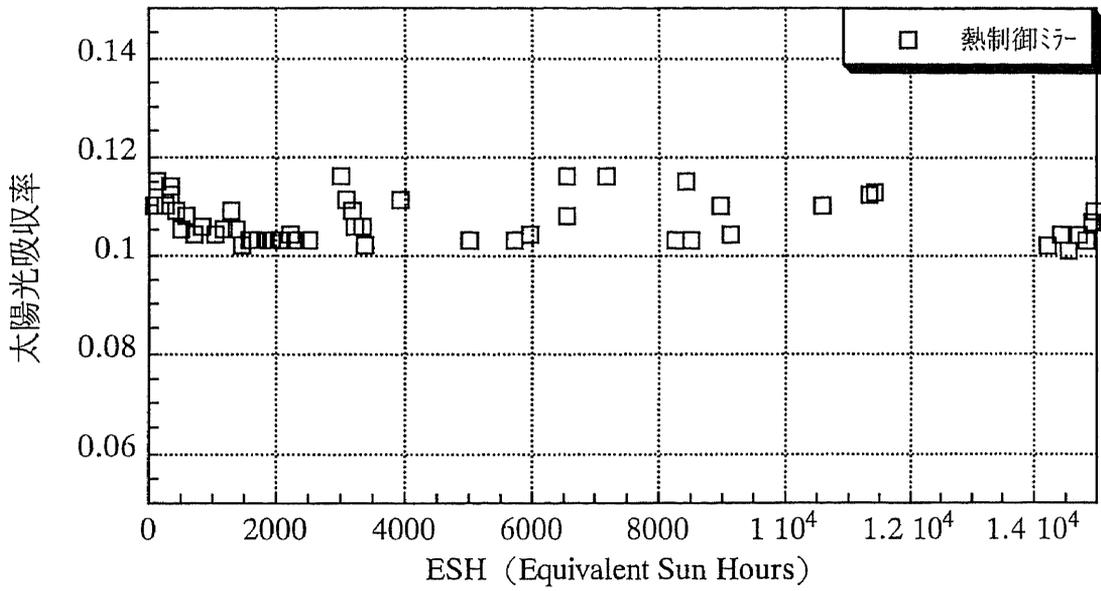


図 4-2 2 熱制御ミラーの太陽光吸収率の飛行データ

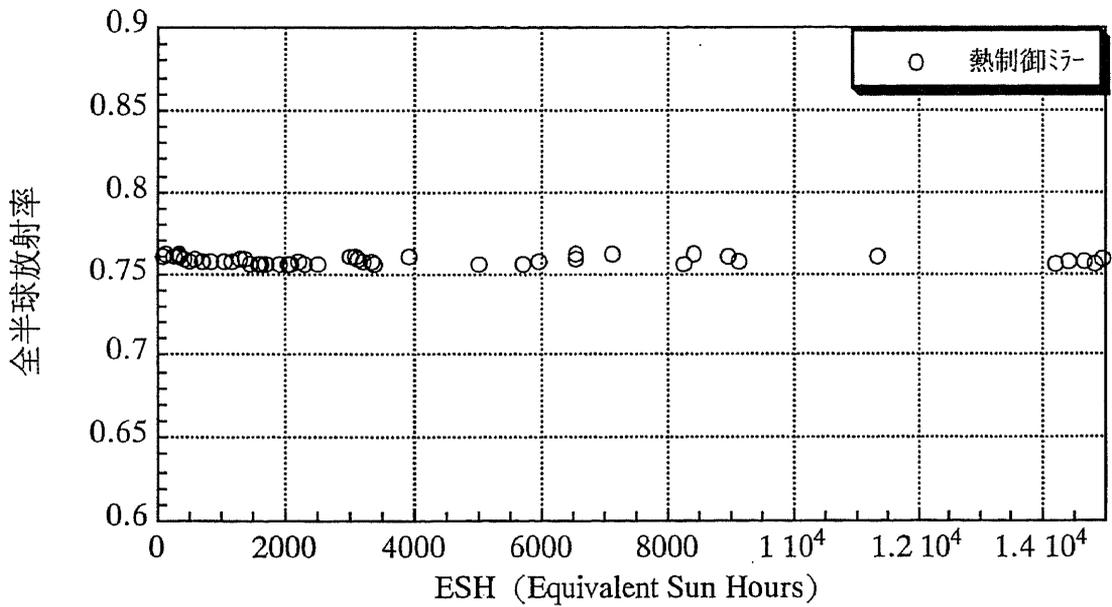


図 4-2 3 熱制御ミラーの全半球放射率の飛行データ

### c) 測定結果の考察

表4-6に搭載用同時測定装置により得られた打ち上げ初期の太陽光吸収率と全半球放射率の測定結果をまとめて示す。表中、同時測定法は、それぞれの測定値の平均値を、またカロリメータ法の全半球放射率は同時測定法で求められた各試料の温度と同温度で求められた値を示す。ここでは、同時測定法の測定結果と分光法およびカロリメータ法の測定結果の絶対値の差を求めて同時測定法を検証する。ただし、熱制御ミラーのデータに関しては、アウトガスの影響を受けていない50ESHのデータを示す。

表4-7に各試料の打ち上げ後約15,000ESHの太陽光吸収率と全半球放射率の劣化量をまとめて示す。

表4-6 同時測定法による太陽光吸収率と全半球放射率の打ち上げ初期の飛翔データ

試料	太陽光吸収率			全半球放射率		
	同時測定法	分光法	差	同時測定法	カロリメータ法	差
50TCC/Si	0.724	0.730	-0.006	0.797 (359K)	0.790	+0.007
Ar/InP	0.803	0.830	-0.027	0.587 (373K)	0.570	+0.017
TCC/25R/Al	0.372	0.370	+0.002	0.493 (349K)	0.500	-0.006
TCC/25S/Al	0.433	0.430	+0.003	0.590 (350K)	0.590	0
CSSM*	0.110	0.110	0	0.760 (290K)	0.760	0

\* 50ESHのデータ

搭載用同時測定装置による測定は、先のデータ取得条件で記述したように、試料には太陽光のみが垂直に入射し、かつ試料温度の定常状態が20分間連続して得られたデータについて解析することにより以下の結論が得られた。

- (i) 宇宙環境における太陽光吸収率は、分光反射特性の異なる試料間でも平均値から  $\pm 0.005$  とばらつきの小さいデータを得ることができた。また、InP太陽電池を除いて分光法の測定結果と比べて太陽光吸収率の絶対値の差は、 $-0.006 \sim +0.003$  の範囲に収まり、良い一致が得られることが確認された。
- (ii) 全半球放射率は、各試料の定常状態の温度が異なるにも係わらず、平均値から  $\pm 0.007$  以内のデータが得られた。またカロリメータ法と比べ全半球放射率の絶対値の差は、太陽光吸収率と同様にInP太陽電池素子を除くと  $-0.006 \sim +0.007$  となり、一致が得られた。

表4-7 同時測定法による太陽光吸収率と全半球放射率の長期飛行データ

試料	太陽光吸収率		全半球放射率	
	打ち上げ初期	$\Delta \alpha_s$ 15000ESH	打ち上げ初期	$\Delta \epsilon_H$ 15000ESH
50TCC/Si	0.724	0.022	0.797	0.010
Ar/InP	0.803	0.077	0.587	0.027
TCC/25R/Al	0.372	0.025	0.493	0.010
TCC/25S/Al	0.433	0.040	0.590	0.018
CSSM	0.110	0	0.760	0

- (iii) 搭載用同時測定装置を用いて宇宙環境において新たに開発した材料の太陽光吸収率と全半球放射率のデータを長期に渡って取得することができた。これら材料は、科学衛星「あけぼの」の飛翔高度から想定してバンアレン帯の内部ゾーンで、電子線で約1MeV、陽子線で約1 KeVから700 MeVの荷電粒子と紫外線の複合環境において評価された。この結果、太陽光吸収率、全半球放射率共に僅かな劣化であることが確認された。
- (iv) 太陽光吸収率と全半球放射率の結果から、同時測定法が宇宙において有用であることが明らかにされた。

#### 4.4 結 言

本章では、まず同時測定法に係わる測定誤差の要因を地上用と宇宙用装置に分けて検討を行った。次いで、地上用、宇宙用の同時測定装置を用いて実際に取得した太陽光吸収率、全半球放射率のデータを示し、分光法、カロリメータ法による値と比較検討した。それらの結果をまとめると以下の通りである。

- (1) 地上用同時測定装置の場合、太陽光吸収率では、疑似太陽光光源の照度の安定度や試料と石英窓の形態計数を評価することにより、全測定誤差は±2%であることが確認された。全半球放射率は、試料温度の校正精度と試料用ヒータの供給電力の測定精度の向上を図ることにより、全誤差は±1%であることが確かめられた。
- (2) 搭載用同時測定装置の場合、測定装置と衛星のデータ処理装置などの性能により試料温度や試料用ヒータ電圧の測定分解能が制約されることから、搭載された各試料毎の太陽光吸収率と全半球放射率の誤差量を明らかにした。その結果、太陽光吸収率の全誤差は±2%以下、全半球放射率の全誤差は±3%以下であることが確かめられた。
- (3) 地上用同時測定装置の測定では、太陽光吸収率は3種類の分光反射特性が異なる試料についても疑似太陽光光源の照度の変化に対して、すなわち試料温度の変化に対してばらつきのない小さい結果が得られた。また分光法と比較した結果も良い一致が得られた。このことは、疑似太陽光光源の照度の出力調整を行うことによる分光分布への影響はないものと判断された。全半球放射率は疑似太陽光光源の照度の調整を図ることにより、Al蒸着テフロンで代表されるように中赤外域で複雑な分光反射特性をもつ試料に対しても温

度特性の測定が可能であることが確かめられ、その傾向もカロリメータ法と良い一致が得られた。以上の結果から地上用同時測定装置の測定誤差の評価が正しく行われたことが確認された。

- (4) 第12号科学衛星「あけぼの」に搭載した搭載用同時測定装置では、新たに開発した宇宙用試料の太陽光吸収率と全半球放射率の劣化の生じる前、すなわち打ち上げ初期の状態で測定した。宇宙環境では当然のことながら太陽光の入力の他に地球アルベドや地球赤外ふく射などの熱入力があり、解析ではこれらの入力条件を吟味することにより太陽光吸収率は安定したデータが得られた。また分光法と対比しても良い一致が得られた。これに対して、全半球放射率は各試料の定常状態の温度がそれぞれ異なるにも係わらず安定したデータが得られ、その結果はカロリメータ法と比較して一致が得られた。以上をまとめると、搭載用同時測定装置の各試料毎に行われた測定誤差の評価が正しく行われたことが明らかにされた。
- (5) 同時測定法を用いて太陽光吸収率と全半球放射率の長期飛翔データを取得して同時測法を宇宙に適用することの有効性が検証された。また、開発したカバーガラス、熱制御ミラーおよび熱制御フィルムは、紫外線、電子線、陽子線照射の複合環境において太陽光吸収率と全半球放射率の劣化量が僅かであることから宇宙用材料として優れていることが実証された。

この章では第3章で既に理論的に明らかにされた同時測定法に基づいて開発された地上用および搭載用同時測定装置を用いて実験を行った。その結果、地上用および搭載用装置による太陽光吸収率と全半球放射率の値は、分光法とカロリメータ法で求められたそれぞれの値と良い一致が得られ、地上および宇宙において同時測定法による太陽光吸収率と全半球放射率の測定が妥当であることが検証された。

## 第5章 まとめ

本論文では、宇宙船の熱設計あるいは熱制御材料の開発に際して重要になる材料の太陽光吸収率と全半球放射率の測定技術の向上を図ることを目的として同時測定法を提案した。この測定法の特徴は、測定原理で示されるように、試料に太陽光が垂直に入射しているときの任意の定常状態で成立するエネルギー保存式を解くことにより太陽光吸収率と全半球放射率をそれぞれ単独に、しかも簡便に求めることにある。この考え方を地上と宇宙に適用して地上用および宇宙用同時測定装置を開発した。地上用の同時測定装置は、疑似太陽光光源、液体チッ素冷却が可能なシュラウドを備えた真空容器から構成され、これにヒータを内蔵した試料が設置される。この装置は、疑似太陽光光源の照度を調整することにより低温域から高温域の全半球放射率の温度依存性が求められる。測定試料は、塗料、薄膜フィルム、金属板、あるいはカバーガラス付きの太陽電池素子などの不透明物質が測定可能である。ここでは、分光吸収率の異なる3種類の試料について測定し、評価された。また、同時測定法を宇宙に導入することにより、小型、軽量化が図られた宇宙用同時測定装置を開発して第12号科学衛星「あけぼの」に搭載し、宇宙用材料の太陽光吸収率と全半球放射率を宇宙環境のその場で評価し、劣化に関する有益なデータが取得された。

地上用および搭載用同時測定装置で求められた太陽光吸収率と全半球放射率のデータの信頼性の評価は、第2章で改善、提案した分光法とカロリメータ法の測定結果と比較して行われた。地上用同時測定では、太陽光吸収率が大きく異なる拡散性の黒色塗料と指向性のAl蒸着テフロンについて評価された。太陽光吸収率は分光法と比較して絶対値の差は、100分の1以下に収まり、また、全半球放射率では温度依存性が顕著なAl蒸着テフロンについて215～355 Kの温度範囲でデータを取得したが、各温度の絶対値の差は0.005以下で、カロリメータ法で求めた温度依存性の傾向と良い一致が得られた。従って、地上用同時測定装置により得られた太陽光吸収率と全半球放射率の値は信頼性の高い有効なデータと判断した。同様に、搭載用同時測定装置については導電膜付きSi太陽電池素子と導電膜付きAl蒸着ユーピレックスRの結果を考察すると、太陽光吸収率は両試料とも分光法に対する絶対値の差は、100分の1以下

であることが明らかにされた。また、全半球放射率は両試料ともカロリメータ法と比較して絶対値の差は、100分の1以下であることが明らかにされた。以上の結論から搭載用同時測定装置により得られた太陽光吸収率と全半球放射率の値は信頼できるデータであると判断された。

同時測定法を検証するために用いられた分光法はシングルビーム方式を改善、提案したものである。その結果、太陽光吸収率の値は入射角の変化に対して拡散性の表面と指向性の表面では異なることが確認された。一方、カロリメータ法は従来の熱量測定法を改善して低温域から高温域の全半球放射率の温度依存性が求められるように構築したものであり、その結果、全半球放射率は材料によっては低温から高温にかけて顕著に変化する事実が明らかにされた。

以上まとめると、本論文で提案された、地上用および搭載用同時測定法の有用性が確認され、同装置により得られた太陽光吸収率と全半球放射率の値も信頼性が高いことが検証された。

## 謝 辞

本論文をまとめるにあたり、終始御指導を賜りました宇宙科学研究所次世代探査機研究センター小林康德教授に謹んで感謝の意を表します。また、筑波大学構造工学系成合英樹教授、村上正秀教授、石黒博助教授、ならびに通商産業省工業技術院計量研究所計量熱物性小野晃部長にも御教示をいただきました。ここに深謝申し上げます。

本研究は文部省宇宙科学研究所で行われたものであり、研究を進めるにあたっては、宇宙探査工学研究系林友直教授（現、千葉工業大学教授）、ならびに宇宙探査工学研究系広澤春任教授に御指導をいただくとともに、横山幸詞助教授に貴重な助言を賜りましたことを深く感謝いたします。

終わりに、科学衛星「あけぼの」の長期飛翔データを取得する際に御協力いただいた方々に厚く御礼申し上げます。

## 参考文献

- [1] C.L.Staugaitis, "Spacecraft Materials Guide", NASA SP-3094, 1975.
- [2] E.W.Spisz, A.J.Weigand, R.L.Bowman, and J.R.Jack, " Solar Absorptances and Spectral Reflectance of 12 Metals for Temperatures Ranging from 300 to 500K", NASA TN D-5353, Aug. 1969.
- [3] J.H.henninger, " Solar Absorptance and Thermal Emittance of Some Common Spacecraft Thermal Control Coatings", NASA Reference Publication 1121, April 1984.
- [4] 大島耕一, 他, "熱設計ハンドブック",初版, 朝倉書房, pp.306-322, 1992.
- [5] 服部 晋, 他, "物性計測技術の動向に関する調査研究報告書",通商産業省工業技術院計量研究所, pp.137-177, May 1985.
- [6] N.J.Broadway, NASA CR-1786, 1971.
- [7] F.Grumb and T.E.Wightman, Appl.Opt., 16, pp.2775, 1977.
- [8] R. Siegel, "Thermal Radiation Heat Transfer", McGraw-Hill, 1869.
- [9] M.P.Tbekaekara, "The Solar Constant and the Solar Spectrum Measured from a Research Aircraft", NASA TR R-351, Oct. 1970.
- [10] E.M.Sparrow and R.D.Cess, "Radiation Heat Transfer", Hemisphere Publishing Corporation, pp.33-64.
- [11] R.B.Pettit, " Evaluation of Portable Optical Property Measurement Equipment for Solar Selective Surfaces", an ASME publication, Jun 1978.
- [12] Labsphere, "Reflectance Measurements", Applications Note No. REL-100.
- [13] J.T.Gier and R.V.Dunkle, "Mobile Solar Reflectometer MS-251 Operating Instructions".
- [14] 小林 正博 他, "各種ホーローのふく射分光特性の測定", 第4回日本熱物性シンポジウム, pp.9-16, 1983.
- [15] T.Kunitimi and M.Sahashi, " Radiative Properties of Construction Materials in Visible and Infrared Regions", Proc. 3 rd Japan Symposium on Thermophysical Properties, pp.109-112, 1982.
- [16] J. T.Gier and R. V.Dunkle "The Two Radiometer Method for the Simultaneous Determination of Emissivity and Surface Temperatures",U.V California , Berkeley, Inst. of Engineering

Research, Report No.6 Report Code NR-015-202,1948.

- [17] M.Jakobb, "Heat Transfer,1", John Wiley Company, Newyork, 1962.
- [18] R.E.Taylor, "Determination of Thermophysical Propertoos by Direct Electro heating , High Temperature High Pressure" Proc. 8th Symp. Termophysical Properties, pp.9-12, 1981.
- [19] R.W. William and J.P. Donald, "The Design and Uncertainty Analysis of an Improved Total Hemispherical Emittance Transient Calorimeter", NASA TN D-510, 1969.
- [20] 日向野 三雄 他, "低温金属の全半球ふく射率の高精度測定法", 日本熱性学会論文通巻27号, pp.9, 1995.
- [21] 大西晃 他, "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58-C2, 103巻1号, pp.9, 1983.
- [22] A.Ohnishi and T.Hayashi, "Measurement of Incidence Angle Dependence of Solar Absoeptance", esa SP-200, pp.467, 1983.
- [23] 大西 晃 他, "宇宙用表面材料の半球面熱放射率の測定", 第4回日本熱物性ソホ°, pp.1, 1983.
- [24] 日本熱物性学会編, "熱物性ハンドブック", 養賢堂, pp.320-330, 1990.
- [25] 服部 晋 他, "物性計測技術の動向に関する調査研究報告書", 通商産業省工業技術院計量研究所, pp.261-270, May 1985.
- [26] A.Ohnishi, T. Hayashi, Y. Kawada and T. Hatada, "Simultaneous Measurement of Solar Absorptance and Total Hemispherical Emittance", Int. ISTS 15, pp.739-743, 1986.
- [27] 大西 晃, 畑田 敏夫, 林 友直, "太陽光吸収率と全半球放射率の同時測定法の評価", 熱物性学会論, 10巻1号.2.pp.10-15, 1996.
- [28] D.F.Hall and A.A.Fote, " $\alpha_s/\epsilon_H$  Measurements of Thermal Control Coatings on the P78-2 (SCATHA)Spacecraft", AIAA 15, No.80-1530, pp.467-486, 1980.
- [29] A.Ohnishi and T.Hayashi, "Measurement of  $\alpha_s/\epsilon_H$  Ratio by Using Sun Pointing Satellite TANSEI-4", esa SP-200, pp.437-440, 1983.
- [30] A.Ohnishi, T. Hayashi, Y. Kawada, T. Hatada and K. Tanaka, "Simultaneous Measurement of Solar Absorptance and Total Hemispherical Emittance", SAE TRANSACTIONS Journal of Aerospace, pp.1.382-1.387, 1988.
- [31] L.Marco, A.Pailous and G.Gourmelon, " Thermal Control Coatings Simulated LEO Degradation Under UV and Particle Radiation", esa SP-368, pp.77, 1994.

- [32] A.Kurokawa, A.Ohnishi and T.Hayashi, "Ultraviolet Irradiation Effects on Thermal Control Coatings", 14th ISTS, pp.571, 1984.
- [33] G.W.Singley and J.I.Vette,"A Model Environment for Outer Zone Electrons", NASA TM-X-69989, 1972.
- [34] D.M.Sawyer and J.I.Vette, "AP-8 Trapped Proton Environment for Solar Maximum and Solar Minimum", NASA TM-X-172605, 1976.
- [35] T.Takamoto et al, "Indium Phosphide Solar Cells for Space Application", Int'I PVSEC-5, pp.547-550, 1990.
- [36] 古屋敷 啓一郎, 大西 晃, 林 友直, "多層膜における熱放射特性の導出", 第10回日本熱物性シンポ., pp.31, 1989.
- [37] 大西 晃, 佐藤 亮一, "ポリイミドフィルムによる宇宙用熱制御材料の開発", 電気学会論文誌A分冊, Vol.116-A, pp.136-142. Feb. 1996.
- [38] 古屋敷 啓一郎, 大西 晃, 林 友直, "ポリイミドによる熱制御フィルムの設計法", 第34宇宙科学連合講演会, pp.104, 1990.
- [39] 大西 晃, 林 友直, 新井 文成, "ポリイミドフィルムにおける紫外線の熱放射特性への影響", 第8回日本熱物性シンポ., pp.97, 1987.
- [40] 渡部 浩一, 大西 晃, "放射線のポリイミドフィルムの光学特性におよぼす影響" , 第12回日本熱物性シンポ., pp.5, 1991.
- [41] 相馬 純吉訳, "高分子の劣化", 裳華房, 1993.
- [42] 三田 達 他, "最新耐熱性高分子", 総合技術センタ, 1987.
- [43] 大西 晃, 他, "宇宙用カバーガラスと熱制御用ミラーの開発", 電気学会論文誌A分冊, Vol.115-A, pp.471-477, Jun. 1996.
- [44] 作花 済夫 他, "ガラスハンドブック", pp.153- 182, pp.825-847, 1975.
- [45] 作花 済夫 他, "ガラスの事典", pp.386-391, 1985.
- [46] A.Ohnishi and T.Hayashi, "Simultaneous Measurement of Solar Absorptance and Total Hemispherical Emittance on a Scientific Satellite AKEBONO", esa SP-324, pp.561-564, Oct. 1991.