

宇宙航空研究開発機構研究開発資料

JAXA Research and Development Memorandum

環境試験技術報告

熱真空試験用熱流束センサの測定原理

明神 絵里花, 齋藤 幹雄

2006年3月

宇宙航空研究開発機構

Japan Aerospace Exploration Agency

正誤表 (RM-05-009)

ページ・行	誤	正
17 ページ 5 行目	視野に <u>シュラウ</u> 以外が入る場合は形態係数を考慮	視野に <u>シュラウド</u> 以外が入る場合は形態係数を考慮
21 ページ 8 行目	起電力 \underline{v} が発生する	起電力 \underline{v} が発生する
23 ページ 18 行目	るセンサである。 <u>2 項、3 項</u> で述べた熱エネルギー	るセンサである。 <u>3 項、4 項</u> で述べた熱エネルギー
26 ページ 15 行目	短絡電流(Isc) : 太陽電池の両端をショートさせた短絡状態で、 <u>ショートした電流</u>	短絡電流(Isc) : 太陽電池の両端をショートさせた短絡状態で <u>の電流</u>

目次

ABSTRACT	1
1 はじめに	1
2 放射エネルギー測定の基本原理	2
3 熱真空試験用カロリメータの測定原理	4
3.1 基本原理	4
3.2 測定原理	6
3.3 赤外線による熱入力の場合	8
3.4 可視光による熱入力の場合	10
3.5 断熱材のコンダクタンスの求め方	15
3.6 カロリメータを使用する上での注意	17
4 熱真空試験用放射照度計の測定原理	18
4.1 基本原理	18
4.2 測定原理	21
4.3 放射照度計を使用する上での注意	23
5 太陽電池セルの測定原理	23
APPENDIX	
1 太陽電池の原理	24
1.1 p型半導体とn型半導体	24
1.2 pn接合	24
1.3 光起電力効果	25
2 太陽電池の特性	26
2.1 出力特性 (I-V 特性)	26
2.2 放射照度特性	27
2.3 分光(スペクトル)感度特性	27
2.4 温度特性	28

環境試験技術報告

熱真空試験用熱流束センサの測定原理*1

明神 絵里花*2、齋藤 幹雄*2

Measurement Principle of Thermal Sensor for Thermal Vacuum Tests

Erika MYOUJIN, Mikio SAITOH

概 要

宇宙機の地上試験のひとつである熱真空試験では、宇宙での太陽光や地球赤外、機器の発熱等の熱的環境及び真空環境における宇宙機の耐環境性を確認する。

地上で宇宙空間の高真空、冷暗黒を模擬する設備としてはスペースチャンバが利用され、軌道上での熱入力模擬には、IR ランプ、ロッドヒータ、ソーラシミュレータ等が用いられる。熱真空試験においては宇宙機への熱入力量を測定する必要があり、そのためにカロリメータ、放射照度計及び太陽電池セルなどの熱流束センサが用いられる。熱流束センサはその原理によって大きく二つに分けられる。

熱型センサ：放射エネルギーを熱エネルギーに変換してその量を測定するセンサ

量子型センサ：光電効果により太陽放射エネルギーを電気エネルギーに変換してその量を測定するセンサ

カロリメータと放射照度計は熱型センサであり、太陽電池セルは量子型センサである。

本資料では、スペースチャンバという高真空、極低温条件という特殊な環境で、IR ランプ、ロッドヒータ、ソーラシミュレータ等からの放射エネルギーの測定をする熱流束センサについて、その測定原理を解説する。

1. はじめに

宇宙機は地上環境試験において、軌道上における熱による耐環境性を確認する必要がある。この耐環境性確認は、スペースチャンバと呼ばれる宇宙空間の高真空、冷暗黒を模擬する設備で行われる。

このスペースチャンバで耐環境性確認を行う際には、宇宙機の内部発熱及び宇宙機外部からの軌道熱入力を模擬し、その熱入力量を把握する必要がある。

ここで、宇宙機外部からの軌道熱入力の模擬には、赤外域の熱源である IR ランプ、ロッドヒータや可視光域の熱源であるソーラシミュレータを使用する。これらによる宇宙機への軌道熱入力量を把握するためには、カロリメータ、放射照度計及び太陽電池セルなどの熱流束センサを用いている。

カロリメータと放射照度計はいずれも放射エネルギーを熱エネルギーに変換してその量を測定する熱型センサであり、太陽電池セルは光起電力効果を利用し、太陽放射エネルギーを電気エネルギーに変換してその量を測定する量子型センサである。

軌道上熱入力模擬の熱源とその測定に使用する熱量計を表 1-1 に示す。

表 1-1に示すように、赤外域の熱源である IR ランプ、ロッドヒータ等の測定にはカロリメータを使用し、可視光域の熱源であるソーラシミュレータの測定には放射照度計及び太陽電池セルを使用している。

カロリメータは可視光域及び赤外域いずれの熱量も測定できるが、可視光域ではより応答速度の速い太陽電池セルや放射照度計が用いられる。赤外域の熱源は拡散光であり場所によって放射エネルギーが異なるため、小型軽量のカロリメータを複数個使用して測定を行う。

以下の項で各熱流束センサの原理について述べる。

*1 平成 18 年 3 月 22 日受付 (received 22 March, 2006)

*2 宇宙基幹システム本部 試験センター (Environmental and Structural Test Laboratory, Office of Space Flight and Operations)

表 1-1 軌道上熱入力模擬の熱源と熱量計

スペースシャトル での熱源	熱量計	特徴
IR ランプ ロッドヒータ等 (赤外域)	カロリメータ	応答速度が遅い 広域帯の波長感度を有する (放射照度計に比べて)小型、軽量
ソーラシミュレータ (可視光域)	放射照度計	応答速度が速い 広域帯の波長感度を有する
	太陽電池セル	応答速度が速い 波長帯域が狭い (可視光で使用)

2. 放射エネルギー測定の基本原理

先に述べたように、放射エネルギーを測定する熱流束センサはその測定原理によって熱型センサと量子型センサの 2 種類に分けられる。

熱型センサ

放射エネルギーを熱エネルギーに変換してその量を測定するセンサ

一般的に感度は低く、応答速度が遅い、波長帯域が広い

⇒カロリメータ、放射照度計

量子型センサ

光電効果により太陽放射エネルギーを電気エネルギーに変換してその量を測定するセンサ

一般的に検出感度が高く、応答速度が速い、波長帯域が狭い(分光感度を有する)

⇒太陽電池セル

さらに、熱型センサはその構造と原理の違いによって 2 つに分けられ、断熱型センサ/恒温型センサと呼ぶことができる。量子型センサはその原理から 3 つに分けられ、光起電型、光導電型及び光電子放出型がある。図 2-1 に熱流束センサの分類を示す。

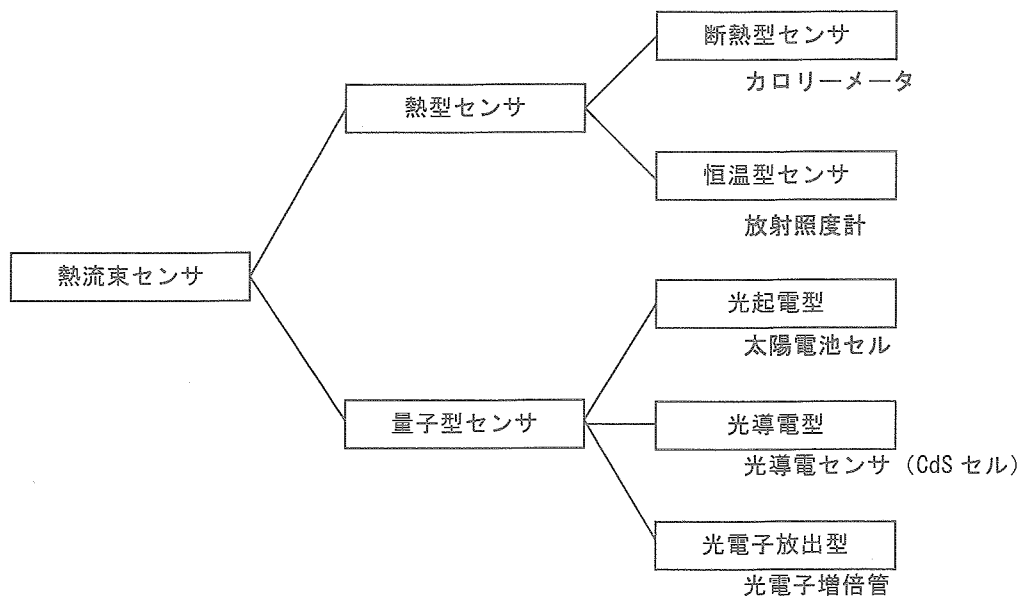


図 2-1 熱流束センサの種類

熱型センサである断熱型センサと恒温型センサの特徴は以下のとおりである。

断熱型センサ

受光面裏面を断熱した構造

裏面が断熱されているため、受光面からの熱は周囲への輻射が支配的

放射エネルギーによって上昇した受光面の温度を計測することで、周囲への輻射量を測定し、放射エネルギーを算出
⇒カロリーメータ

恒温型センサ

受光部の周囲を恒温のヒートシンクで囲んだ構造

受光部とヒートシンクの間は熱伝導率を高くし、受光部からヒートシンクに熱が流れやすい構造としている

放射エネルギーによって受光面からヒートシンクに流れる伝導量を測定し、放射エネルギーを算出

⇒放射照度計

断熱型センサ及び恒温型センサの放射エネルギー測定時の主な熱の流れを図 2-2 に示す。カロリーメータ及び放射照度計による放射エネルギーの測定原理は 3 項及び 4 項で詳しく述べる。

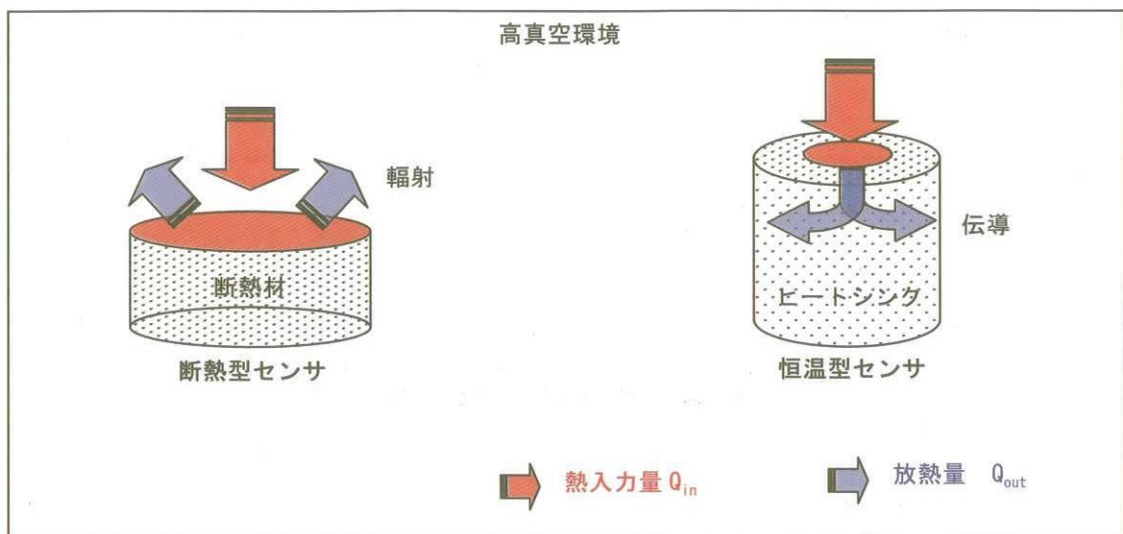


図 2-2 断熱型センサと恒温型センサの主な熱の流れ

量子型センサである光起電力型、光導電型及び光電子放出型の特徴は以下のとおりである。

光起電力型

半導体 pn 接合に光が照射したときに起電力が発生する光起電力効果により放射エネルギーを測定

⇒太陽電池セル

光導電型

半導体の一種である光導電体に光が照射したときに、抵抗が減少する光導電効果により放射エネルギーを測定

⇒光導電センサ (CdS セル)

光電子放出型

照射した光によって物質から電子が放出される量により放射エネルギーを測定

x 線、可視・紫外領域で用いられる。

⇒光電子増倍管

光起電力型である太陽電池セルの測定原理は 5 項及び Appendix にまとめた。

3. 熱真空試験用カロリメータの測定原理

本項では、熱真空試験用カロリメータによる放射エネルギー測定の基本原則（3.1 項）と実際の物理現象を考慮した測定原理（3.2 項）を解説する。さらに 3.3 項、3.4 項で熱源別、則ち赤外線である IR ランプ、ロッドヒータ等と、可視光であるソーラシミュレータによる放射エネルギーの求め方の詳細について述べる。3.5 項ではカロリメータによる放射エネルギー測定で必要となる断熱材コンダクタンスの求め方について解説する。最後に 3.6 項にカロリメータを使用する上での注意点をまとめた。

3.1 基本原則

図 3-1 にカロリメータに関する熱の流れを示す。

カロリメータに放射エネルギーが入射すると、受光板に対する熱入力量と、受光板からの放熱量が等しい熱平衡状態となる。このときの受光面と周囲の温度を計測することによって放熱量 Q_{out} (= 熱入力 Q_{in}) を求め、放射エネルギー P を算出することがカロリメータの基本原則である。詳細を以下に述べる。

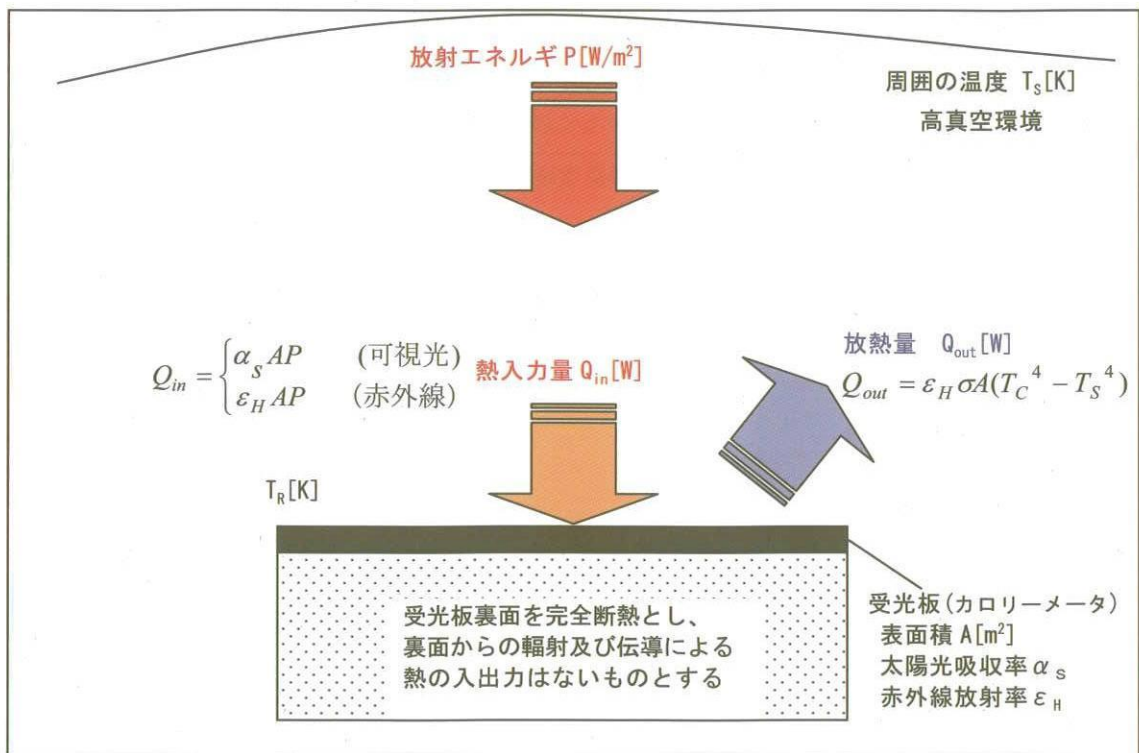


図 3-1 基本原則の模式図

一般に、ある物体へ Q_{in} の熱入力があり、物体から Q_{out} の放熱があるとき、その物体の温度 T は熱平衡方程式 (3-1) 式で表される。

$$C \frac{dT}{dt} = Q_{in} - Q_{out} \quad (3-1)$$

C : 物体の熱容量 [W · s / K]

T : 物体の温度 [K]

t : 時間 [s]

Q_{in} : 熱入力量 [W]

Q_{out} : 放熱量 [W]

熱平衡状態とは、熱入力量 Q_{in} と放熱量 Q_{out} が等しくなり、その物体の温度変化がなくなり、一定温度となった状態をいう。すなわち、(3-2) 式の状態をさす。

$$C \frac{dT}{dt} = Q_{in} - Q_{out} = 0 \rightarrow Q_{in} = Q_{out} \quad (3-2)$$

カロリメータに、ある一定の放射エネルギー P が入射すると、受光板の温度が上昇する。しかし受光板から、より温度が低い周囲に対して熱を放熱するため、一定温度に達し、熱平衡状態となる。

ここで、図 3-1 における受光板への熱入力量 Q_{in} は放射エネルギー P に受光板面積 A と受光板の吸収率を掛けた(3-3)式で表される。物体の吸収率は波長によって異なるため、熱源が赤外線の場合と可視光の場合に分かれる。

$$Q_{in} = \begin{cases} \varepsilon_H AP & (\text{熱源が赤外線の場合}) & (3-3a) \\ \alpha_S AP & (\text{熱源が可視光の場合}) & (3-3b) \end{cases} \quad (3-3)$$

α_S : 受光板の太陽光吸収率

ε_H : 受光板の赤外線放射率

A : 受光板面積 [m^2]

P : 放射エネルギー [W / m^2]

また、図 3-1 における受光板からの放熱量 Q_{out} については、受光板から周囲(※)への輻射による放熱のみであり、(3-4) 式で表される。

※熱真空試験において周囲とは、極低温の黒色壁(以下、シュラウド)である。

$$Q_{out} = \varepsilon_H \sigma A (T_R^4 - T_S^4) \quad (3-4)$$

σ : ステファン・ボルツマン定数 $5.67 \times 10^{-8} [W / m^2 K^4]$

T_R : 受光板温度[K]

T_S : シュラウド温度[K]

なお、測定は真空環境で行われるため対流による放熱はなく、受光板の裏面は完全断熱と仮定しているため受光板裏面からの輻射及び伝導による熱の入出力は考慮していない。

受光板が一定温度に達し、熱平衡状態となったときは $Q_{in} = Q_{out}$ であるため(3-3)、(3-4)式から(3-5)式が成り立つ。

$$\varepsilon_H AP = \varepsilon_H \sigma A (T_R^4 - T_S^4) \quad (\text{熱源が赤外線の場合}) \quad (3-5a)$$

$$\alpha_S AP = \varepsilon_H \sigma A (T_R^4 - T_S^4) \quad (\text{熱源が可視光の場合}) \quad (3-5b) \quad (3-5)$$

したがって放射エネルギー P は(3-6)式で表される。

$$P = \begin{cases} \sigma (T_R^4 - T_S^4) & (\text{熱源が赤外線の場合}) & (3-6a) \\ \varepsilon_H \sigma (T_R^4 - T_S^4) / \alpha_S & (\text{熱源が可視光の場合}) & (3-6b) \end{cases} \quad (3-6)$$

このようにして、表面の熱光学特性(ε_H, α_S)のわかっている受光板の温度 T_R とシュラウドの温度 T_S を測定することによって受光板からの放熱量 Q_{out} (=熱入力 Q_{in})がわかり、熱源からの放射エネルギー P を求めることができる。

3.2 測定原理

カロリメータは、図 3-2 に示すように受光板、断熱材、裏面板から構成されており、受光板裏面は断熱材によって断熱している。しかし、基本原理で仮定したような完全断熱は不可能であり、受光板裏面からのヒートロスが生じる。実際に放射エネルギーを測定するためには、このヒートロスを考慮する必要がある。このヒートロスを考慮した場合の放射エネルギーの求め方を以下に示す。

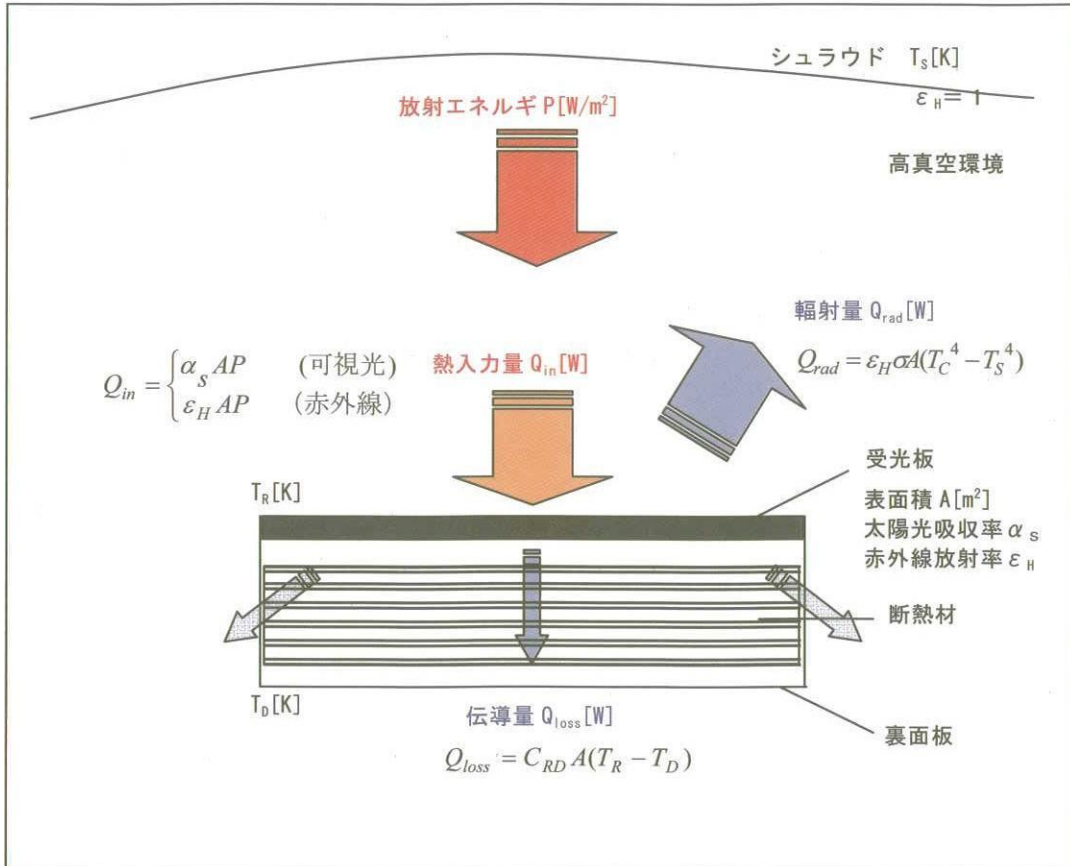


図 3-2 カロリメータの測定原理

受光板裏面が完全断熱でないことによるヒートロス Q_{loss} は伝導と輻射によるものであるが、それらを合わせて熱伝導の式で表す。よって、伝導と輻射を含めた断熱材のコンダクタンス C_{RD} により、ヒートロスの合計量は (3-7) 式となる。

$$Q_{loss} = C_{RD} A (T_R - T_D) \quad (3-7)$$

T_D : 裏面板温度 [K]

C_{RD} : 断熱材コンダクタンス [$W / m^2 \cdot K$]

この断熱材のコンダクタンス C_{RD} は伝導及び輻射による熱伝達のしやすさを表す係数であり、図 3-3 に示すような温度依存性をもつ。したがって、断熱材コンダクタンスは受光板及び裏面板温度の関数として、(3-8) 式に示す 2 次関数で近似するものとする。計測によるコンダクタンス C_{RD} の求め方は 3.4 項で述べる。

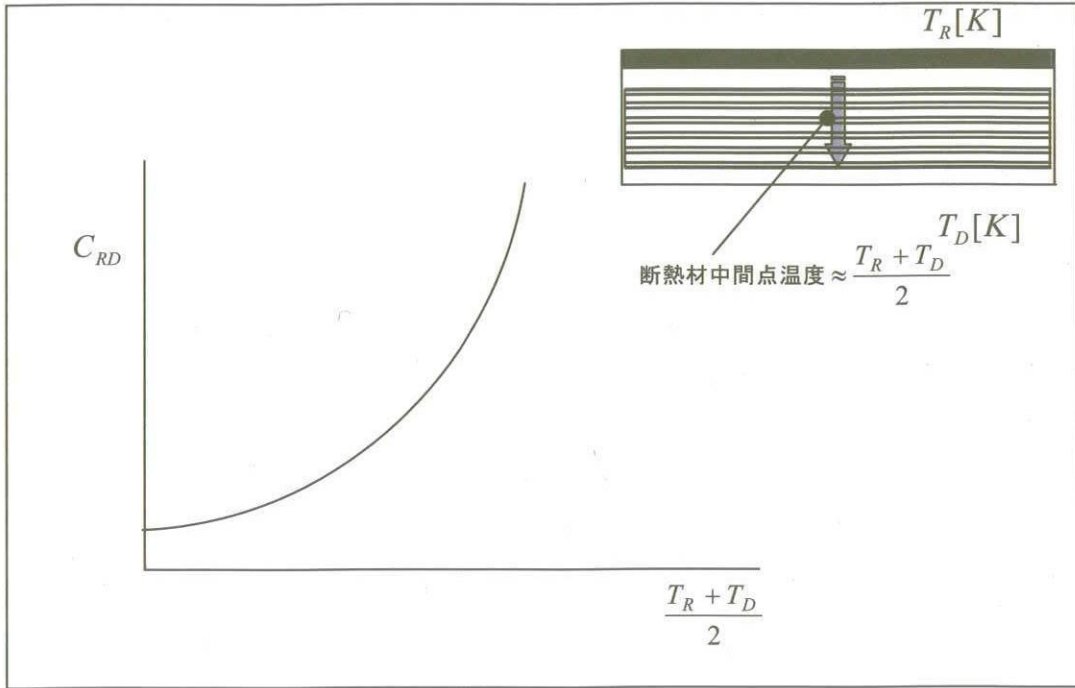


図 3-3 断熱材コンダクタンス C_{RD} の温度依存性

$$C_{RD} = C_1 + C_2 \times T + C_3 \times T^2, \quad T = \frac{T_R + T_D}{2} \quad (3-8)$$

(C_1, C_2, C_3 は各カロリメータ固有の値)

よって、受光板から放熱される熱量 Q_{out} は、黒色極低温面であるシュラウドへの輻射量 Q_{rad} と受光板裏面からディスク面へのヒートロス Q_{loss} の和となり、(3-9)式で表される。

$$Q_{out} = Q_{rad} + Q_{loss} = \varepsilon_H \sigma A (T_R^4 - T_S^4) + C_{RD} A (T_R - T_D) \quad (3-9)$$

また、図 3-2 における受光板に対する熱入力量 Q_{in} は基本原理の (3-3) 式で表される。

$$Q_{in} = \begin{cases} \varepsilon_H AP & (\text{熱源が赤外線の場合}) \\ \alpha_S AP & (\text{熱源が可視光の場合}) \end{cases} \quad (3-3)$$

受光板が一定温度に達し、熱平衡状態となったときは $Q_{in} = Q_{out}$ であるため(3-9)式及び(3-3)式から (3-10) 式が成り立つ。

$$\varepsilon_H AP = \varepsilon_H \sigma A (T_R^4 - T_S^4) + C_{RD} A (T_R - T_D) \quad (\text{熱源が赤外線の場合}) \quad (3-10a)$$

$$\alpha_S AP = \varepsilon_H \sigma A (T_R^4 - T_S^4) + C_{RD} A (T_R - T_D) \quad (\text{熱源が可視光の場合}) \quad (3-10b)$$

したがって放射エネルギー P は (3-11) 式を用いて求めることができる。

$$P = \begin{cases} \left(\varepsilon_H \sigma (T_R^4 - T_S^4) + C_{RD} (T_R - T_D) \right) / \varepsilon_H & (\text{熱源が赤外線の場合}) & (3-11a) \\ \left(\varepsilon_H \sigma (T_R^4 - T_S^4) + C_{RD} (T_R - T_D) \right) / \alpha_S & (\text{熱源が可視光の場合}) & (3-11b) \end{cases} \quad (3-11)$$

3.3 赤外線による熱入力の場合

赤外線である IR ランプ、ロッドヒータ等による放射エネルギーは『拡散光』という特徴をもつ。そのため、カロリメータの設置場所によって受ける熱量が変化する。

図 3-4 に IR ランプ、ロッドヒータの放射エネルギーの測定原理を示す。

IR ランプやロッドヒータを熱源として使用する場合は、受光板が近接する熱源とシュラウドの両方を見ておりシュラウドを見ていない分だけ放熱量が減るので、熱源と受光板の形態係数を考慮する必要がある。

カロリメータは熱源とシュラウドしか見ていないと仮定すると、受光板から見た IR ランプもしくはロッドヒータに対する形態係数を F_{RH} 、シュラウドに対する形態係数は $F_{RS}(=1-F_{RH})$ となる。

そのため受光板からシュラウドへの輻射量 Q_{rad} は放熱量を表す (3-4) 式に F_{RS} を掛けた式となる。

$$Q_{rad} = \varepsilon_H \sigma A F_{RS} (T_R^4 - T_S^4) \quad (3-12)$$

よって、受光板から放熱される熱量 Q_{out} は受光板裏面からのヒートロス Q_{loss} と合わせて (3-13) 式となる。

$$Q_{out} = Q_{rad} + Q_{loss} = \varepsilon_H \sigma A F_{RS} (T_R^4 - T_S^4) + C_{RD} A (T_R - T_D) \quad (3-13)$$

カロリメータの設置場所での熱源からの放射エネルギーを P とすると、熱入力 Q_{in} は (3-3a) 式 (熱源が赤外線の場合) となる。

$$Q_{in} = \varepsilon_H A P \quad (3-3a)$$

よって、熱平衡状態 $Q_{in} = Q_{out}$ における放射エネルギー P は (3-14) 式で求められる。

$$P = \frac{Q_{in}}{\varepsilon_H A} = \frac{Q_{out}}{\varepsilon_H A} = (\varepsilon_H \sigma F_{RS} (T_R^4 - T_S^4) + C_{RD} (T_R - T_D)) / \varepsilon_H \quad (3-14)$$

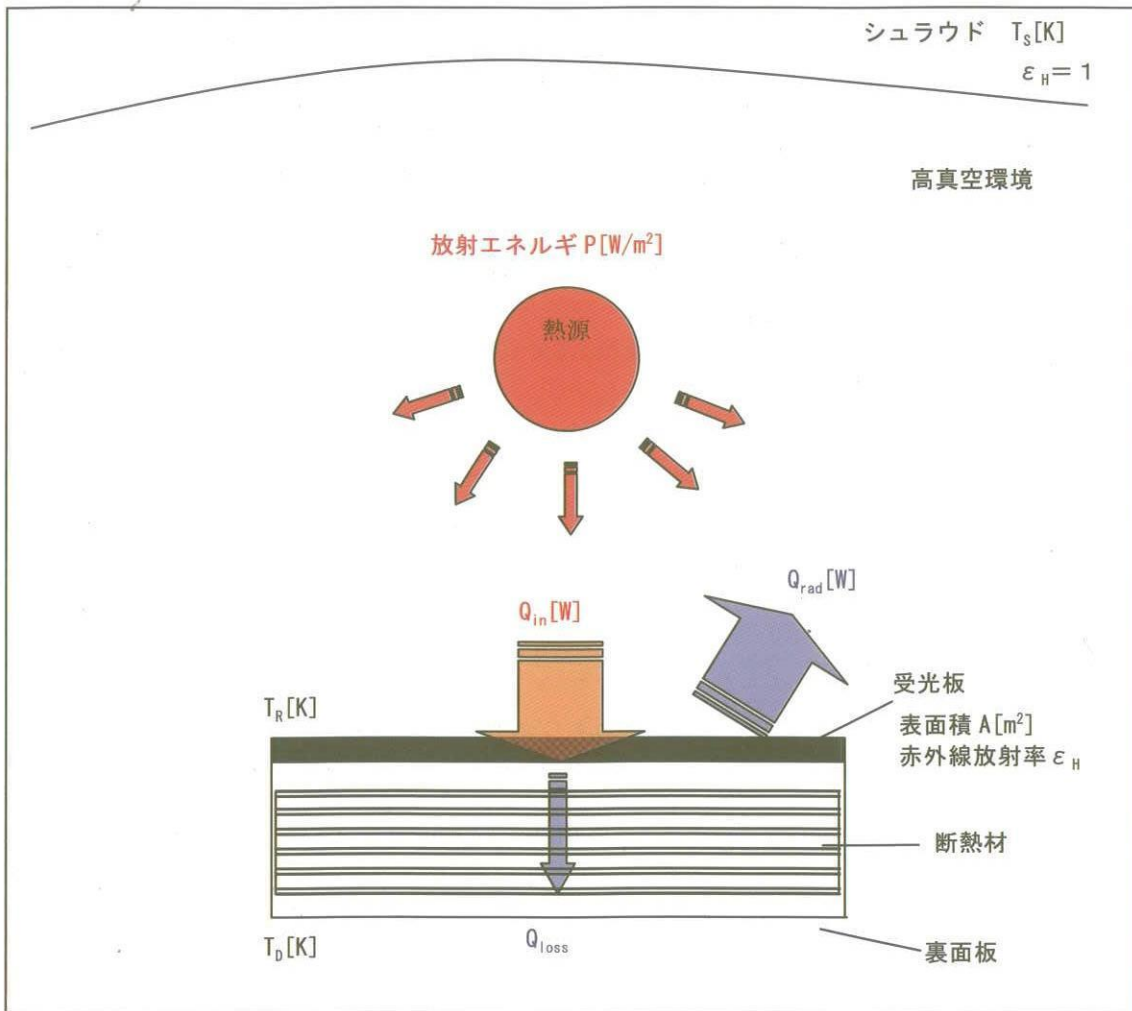


図 3-4 カロリーメータの測定原理 (IR ランプ or ロッドヒータ)

3.4 可視光による熱入力の場合

可視光であるソーラーシミュレータによる放射エネルギーは『直進する平行光』という特徴をもつ。

そのため、擬似太陽光の入射方向に対するカロリメータの設置角を考慮する必要がある。カロリメータを入射光に垂直に設置した場合は、(3-11b)式で放射エネルギー P を求めることができる。

以下に詳細を述べる。

図 3-5 にソーラーシミュレータの放射エネルギーの測定原理を示す。

可視光の熱入力量を表す (3-3b) 式において、光軸方向に対するカロリメータの設置角 θ を考慮すると、受光板への擬似太陽光の熱入力 Q_{in} は、(3-15) 式となる。

$$Q_{in} = \alpha_s AP \sin \theta \quad (3-15)$$

受光板から放熱される熱量 Q_{out} は、(3-9) 式と同様に、シュラウドへの輻射量 Q_{rad} と受光板裏面からのヒートロス Q_{loss} で表される。

$$Q_{out} = Q_{rad} + Q_{loss} = \varepsilon_H \sigma A (T_R^4 - T_S^4) + C_{RD} A (T_R - T_D) \quad (3-9)$$

よって、熱平衡状態 $Q_{in} = Q_{out}$ における放射エネルギー P は (3-16) 式で求められる。

$$P = \frac{Q_{in}}{\alpha_s A \sin \theta} = \frac{Q_{out}}{\alpha_s A \sin \theta} = (\varepsilon_H \sigma (T_R^4 - T_S^4) + C_{RD} (T_R - T_D)) / \alpha_s \sin \theta \quad (3-16)$$

通常は、試験で使用する場合は設置角の影響をなくするために光軸に対して垂直 (設置角 90 度) に設置する。その場合受光板への熱入力は (3-3b) 式 (熱源が可視光の場合) と等しくなる。

$$Q_{in} = \alpha_s AP \quad (3-3b)$$

したがって、カロリメータを光軸に対して垂直に取り付けた場合は、放射エネルギー P を (3-11b) 式で求めることができる。

$$P = \frac{Q_{in}}{\alpha_s A} = \frac{Q_{out}}{\alpha_s A} = (\varepsilon_H \sigma (T_R^4 - T_S^4) + C_{RD} (T_R - T_D)) / \alpha_s \quad (3-11b)$$

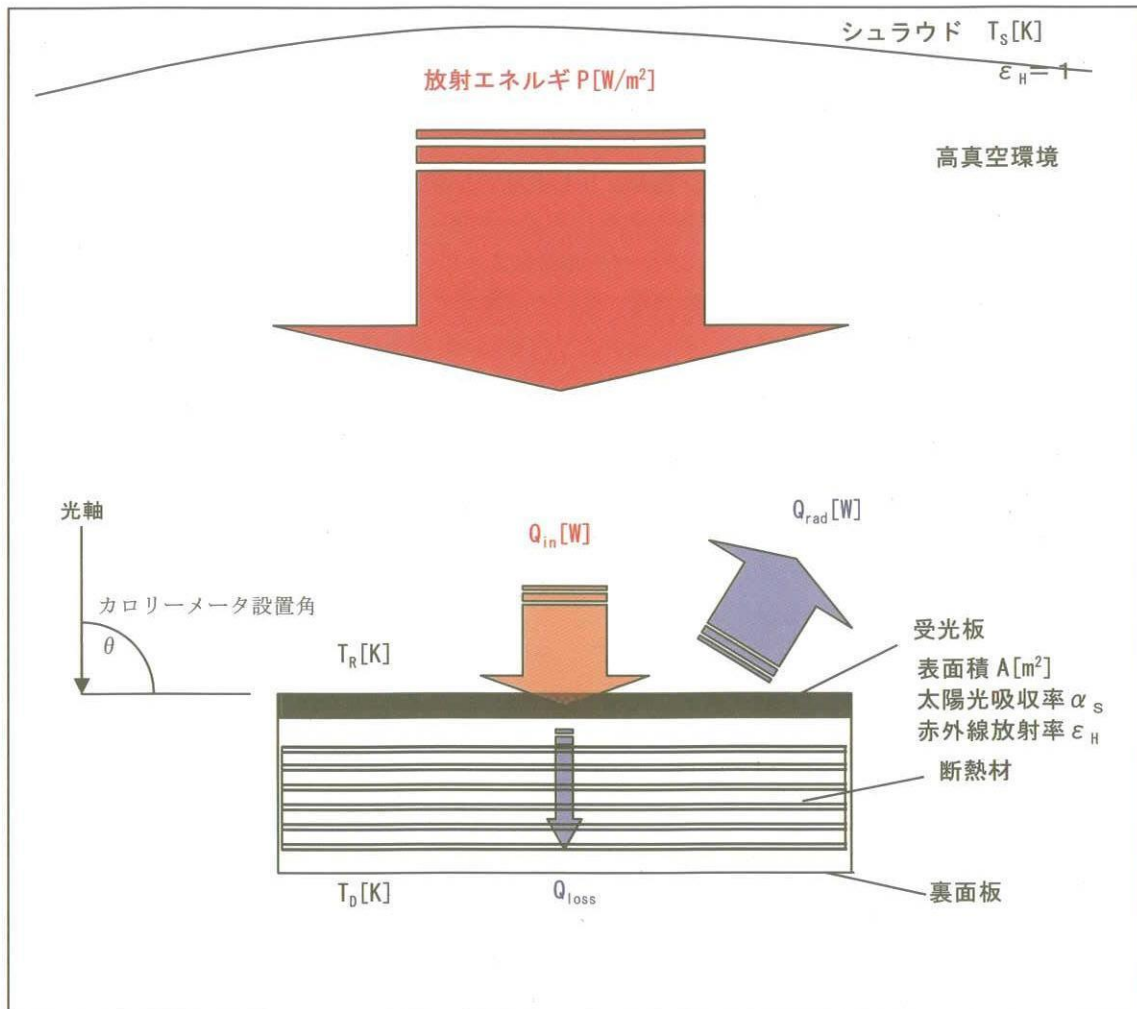


図 3-5 カロリメータの測定原理 (ソーラーシミュレータ)

<ソーラーシミュレータ使用時のコリメータ鏡の影響の有無>

本項のソーラーシミュレータの放射エネルギーの測定原理の中では、カロリメータの周囲への輻射をシュラウド(100K程度)に対するもののみと仮定し、(3-9)式で表した。

実際は、熱真空試験でソーラーシミュレータを熱源として使用する場合は、図3-6に示すようにカロリメータ周囲には黒色極低温面であるシュラウド以外に熱源であるコリメータ鏡(模擬太陽光であるキセノンランプの光を平行光にする凹面鏡、300K程度)が存在し、カロリメータの視野に入っている。

しかし、コリメータ鏡とカロリメータの熱交換は、互いの位置が十分離れているため、無視することができる。カロリメータによる放射エネルギー測定において、コリメータ鏡の存在を無視し、シュラウドのみを見ていると考えることができる理由については以下に詳細を述べる。

コリメータ鏡の影響を考慮しない場合(周囲はシュラウドのみと考えた場合)の放射エネルギー P とコリメータ鏡を考慮した場合の放射エネルギー P' を比較する。ここでは単純化してカロリメータは光軸に垂直に設置していると仮定した。

a)コリメータ鏡を考慮しない場合の放射エネルギー P

放射エネルギー P は、(3-11b)式で表される。

$$P = \frac{Q_{in}}{\alpha_S A} = \frac{Q_{out}}{\alpha_S A} = (\varepsilon_H \sigma (T_R^4 - T_S^4) + C_{RD} (T_R - T_D)) / \alpha_S \quad (3-11b)$$

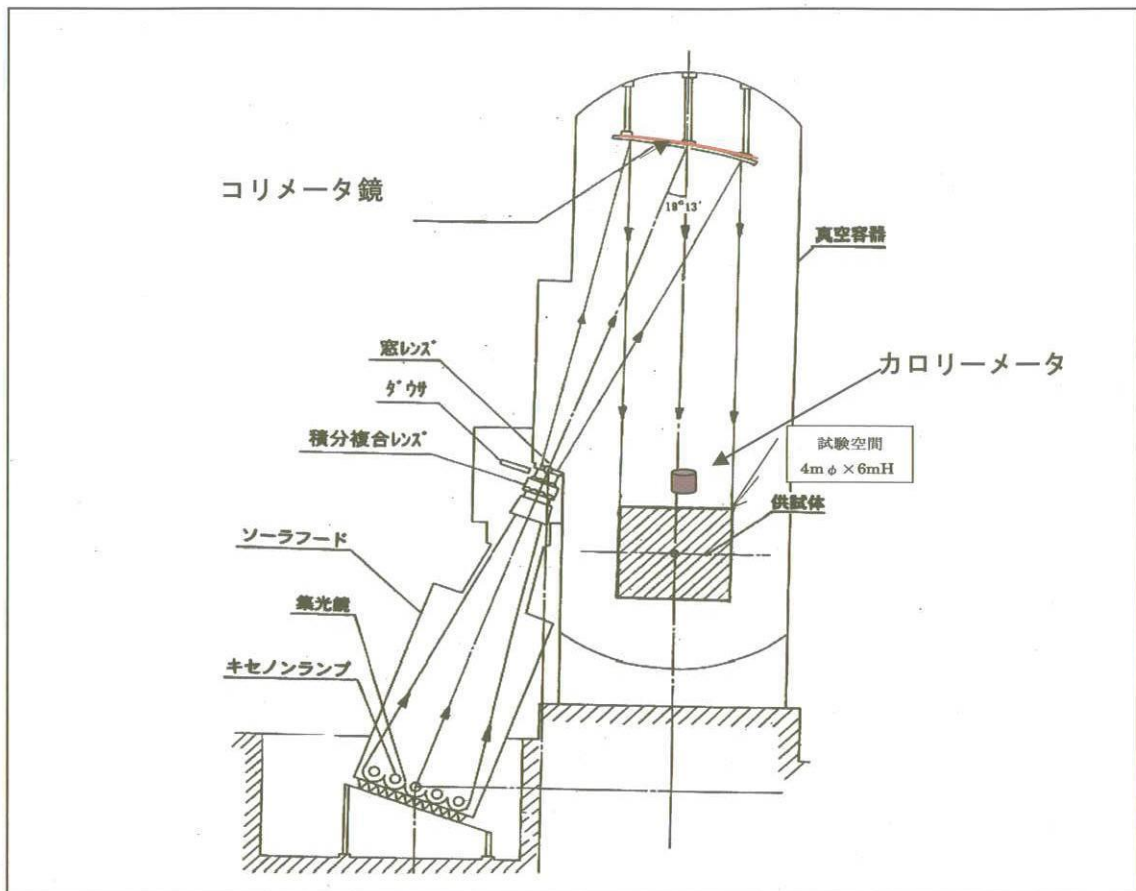


図3-6 コリメータ鏡とカロリメータ
(例：筑波宇宙センター8 m φスペースチャンバ)

b) コリメータ鏡を考慮した場合の放射エネルギー P'

放射エネルギー P' は、以下のようになる。

カロリメータはコリメータ鏡とシュラウドしか見ていないと仮定して、受光板から見たコリメータ鏡に対する形態係数を F_{RM} 、シュラウドに対する形態係数を $F_{RS}(=1-F_{RM})$ とする。

受光板からシュラウドへの輻射量 Q_{rad} は、(3-4) 式に F_{RS} をかけた (3-17) 式となる。なお、受光板からコリメータ鏡への輻射量は無視した。

$$Q_{rad} = \varepsilon_H \sigma A F_{RS} (T_R^4 - T_S^4) \tag{3-17}$$

よって、受光板からの放熱量 Q_{out} は輻射量 Q_{rad} とヒートロス Q_{loss} と合わせて (3-18) 式となる。

$$Q_{out} = Q_{rad} + Q_{loss} = \varepsilon_H \sigma A F_{RS} (T_R^4 - T_S^4) + C_{RD} A (T_R - T_D) \tag{3-18}$$

また、受光板への熱入力は (3-3b) 式 (熱源が可視光の場合) で表される。

$$Q_{in} = \alpha_s A P \tag{3-3b}$$

したがって、熱平衡状態 $Q_{in} = Q_{out}$ における放射エネルギー P' は (3-19) 式で求められる。

$$P' = \frac{Q_{in}}{\alpha_s A} = \frac{Q_{out}}{\alpha_s A} = (\varepsilon_H \sigma F_{RS} (T_R^4 - T_S^4) + C_{RD} (T_R - T_D)) / \alpha_s \tag{3-19}$$

a) 項、b) 項で求めた放射エネルギー P と P' の値を比較するために、受光板から見たシュラウドに対する形態係数 F_{RS} を求める。

受光板とコリメータ鏡が平行に設置されていると仮定すると、形態係数は図 3-7 に示すような関係式を用いて求められる。

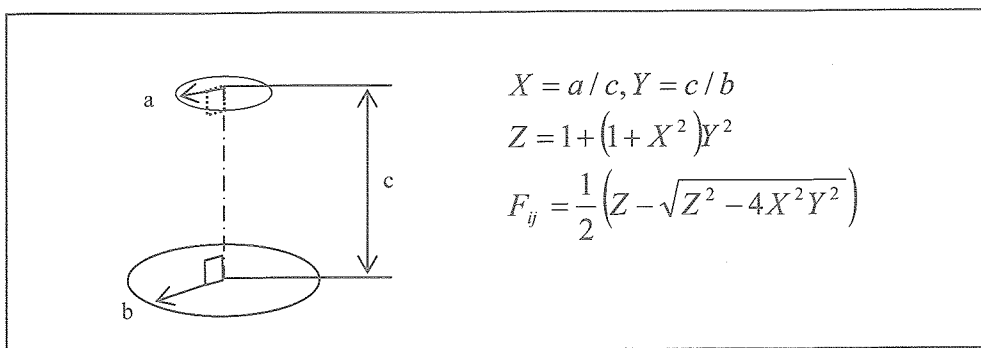


図 3-7 平行な円盤の形態係数 (朝倉書店「熱設計ハンドブック」より)

図 3-7 に対応する筑波宇宙センター 13m φ スペースチャンバにおける長さを以下に示す。

- $a = 3m$: コリメーションミラー半径
- $b = 0.021m$: カロリメータ受光面半径
- $c = 20m$: カロリメータとコリメーションミラーの距離

図 3-7 に示した関係式より、

$$\begin{aligned} X &= a/c = 3/20 = 0.15 \\ Y &= c/b = 20/0.021 = 952.4 \\ Z &= 1 + (1 + X^2)Y^2 = 1 + (1 + 0.15^2) \times 952.4^2 = 927439 \end{aligned}$$

よって受光板のコリメータ鏡に対する形態係数は

$$F_{RM} = \frac{1}{2} \left(Z - \sqrt{Z^2 - 4X^2Y^2} \right) = \frac{1}{2} \left\{ 927439 - \sqrt{927439^2 - 4 \times 0.15^2 \times 952.4^2} \right\} = 0.022$$

したがって、受光板のシュラウドに対する形態係数は

$$F_{RS} = 1 - 0.022 = 0.978$$

この受光板のシュラウドに対する形態係数 F_{RS} を用いて、(3-11b) 式と (3-19) 式から、コリメータ鏡の影響を考慮しない場合の放射エネルギー P と考慮する場合の放射エネルギー P' を比較する。

以下の計算例では、過去の熱真空試験時の受光板、裏面板の温度を用いて、コンダクタンス C_{RD} の値は任意のカロリメータのデータを利用した。

例 1) 受光板温度 $T_R = 400K$ 、裏面板温度 $T_D = 273K$ (約 $1300W/m^2$) のとき

$$\frac{P}{P'} = 1.002$$

例 2) 受光板温度 $T_R = 300K$ 、裏面板温度 $T_D = 210K$ (約 $400W/m^2$) のとき

$$\frac{P}{P'} = 1.006$$

したがって、カロリメータによる放射エネルギー測定において、シュラウドと温度が異なるチャンバ内コリメータ鏡の影響は無視できるほど小さいと言える。

3.5 断熱材のコンダクタンスの求め方

受光板裏面からディスク面へのヒートロス Q_{loss} の影響を表す (3-7) 式 $Q_{loss} = C_{RD}A(T_R - T_D)$ に用いた断熱材コンダクタンス C_{RD} を計測によって求める方法について以下に述べる。

熱真空試験用カロリメータには示すように、受光板裏面に自己校正ヒータを有する。この自己校正ヒータの発熱により受光板に入射する放射エネルギー P を模擬することができ、その熱入力量 Q_{in} を正確に把握することができる。このときの受光板からの放熱量 Q_{out} は断熱材コンダクタンス C_{RD} を含んだ (3-9) 式で求めることができる。これらの熱入力量 Q_{in} 及び放熱量 Q_{out} を熱平衡状態 $Q_{in} = Q_{out}$ において比較することで断熱材コンダクタンス C_{RD} を求めることができる。

なお、この断熱材コンダクタンス C_{RD} の測定は、実際の測定環境と同じ高真空極低温環境で行うことが重要である。

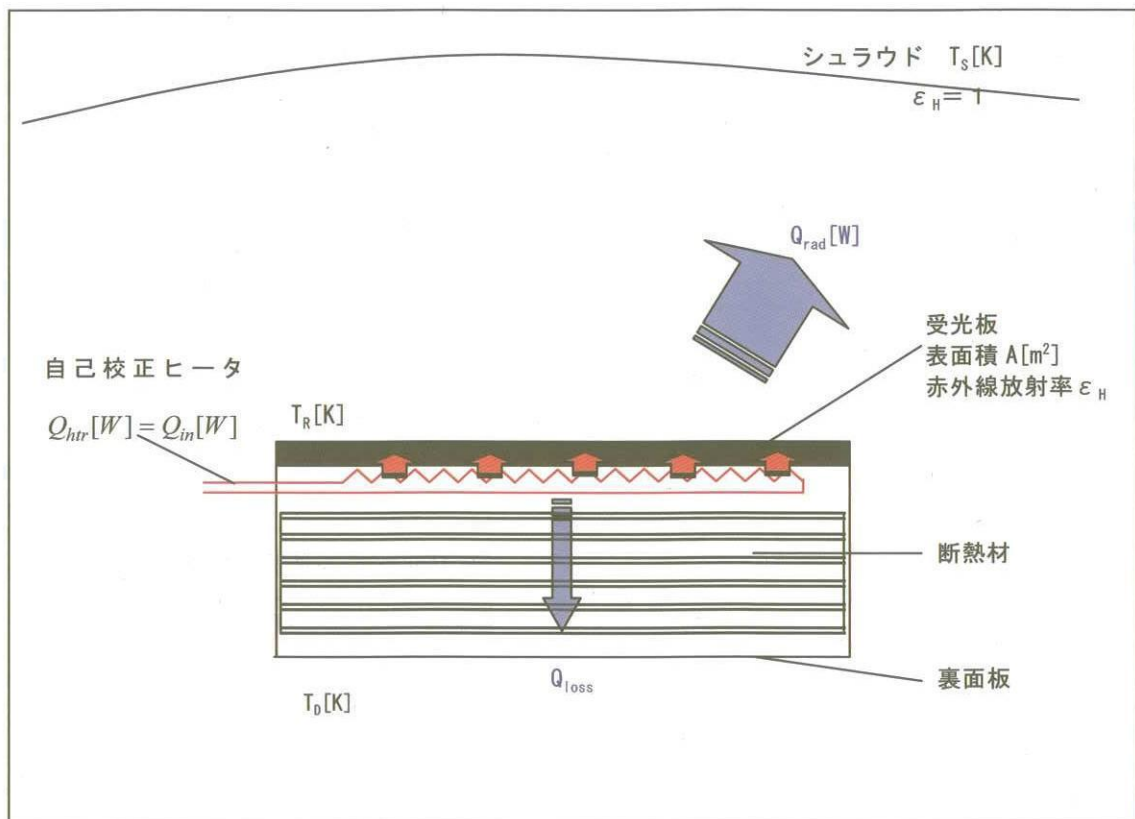


図 3-8 カロリメータの自己校正機能

自己校正ヒータによって模擬される放射エネルギーによる受光板への熱入力 Q_{in} は、ヒータの放射エネルギーがすべて受光板に入力されると考えて、(3-20) 式で表される。

$$Q_{in} = Q_{htr} = AP \tag{3-20}$$

Q_{htr} : ヒータ出力[W]

受光板から放熱される熱量 Q_{out} は、(3-9) 式で表される。

$$Q_{out} = Q_{rad} + Q_{loss} = \epsilon_H \sigma A (T_R^4 - T_S^4) + C_{RD} A (T_R - T_D) \tag{3-9}$$

熱平衡状態ではヒータによる受光板への熱入力量 Q_{in} と受光板からの放熱量 Q_{out} が等しくなるため、(3-20)、(3-9)式より(3-21)式が成り立つ。

$$Q_{hr} = \varepsilon_H \sigma A (T_R^4 - T_S^4) + C_{RD} A (T_R - T_D) \quad (3-21)$$

したがって、断熱材コンダクタンス C_{RD} は(3-22)式で表される。

$$C_{RD} = \frac{Q_{hr} - \varepsilon_H \sigma A (T_R^4 - T_S^4)}{A (T_R - T_D)} \quad (3-22)$$

断熱材コンダクタンス C_{RD} を計測によって求める際は、自己校正ヒータの出力 Q_{hr} を変えて熱入力量 Q_{in} を変化させる。熱入力量 Q_{in} の変化に対応してカロリメータの温度 T_R, T_D が変化する。これら自己校正ヒータの出力 Q_{hr} 、カロリメータの温度 T_R, T_D 、周囲の温度 T_S を測定し、(3-22)式に代入することで C_{RD} を求める。

求めた C_{RD} は断熱材温度 $\left(\equiv \frac{T_R + T_D}{2} \right)$ の関数となり、図3-9のような校正曲線が得られる。2次曲線として(3-8)

式で近似して、 C_1, C_2, C_3 を求める。

$$C_{RD} = C_1 + C_2 \times T + C_3 \times T^2, \quad T = \frac{T_R + T_D}{2} \quad (3-8)$$

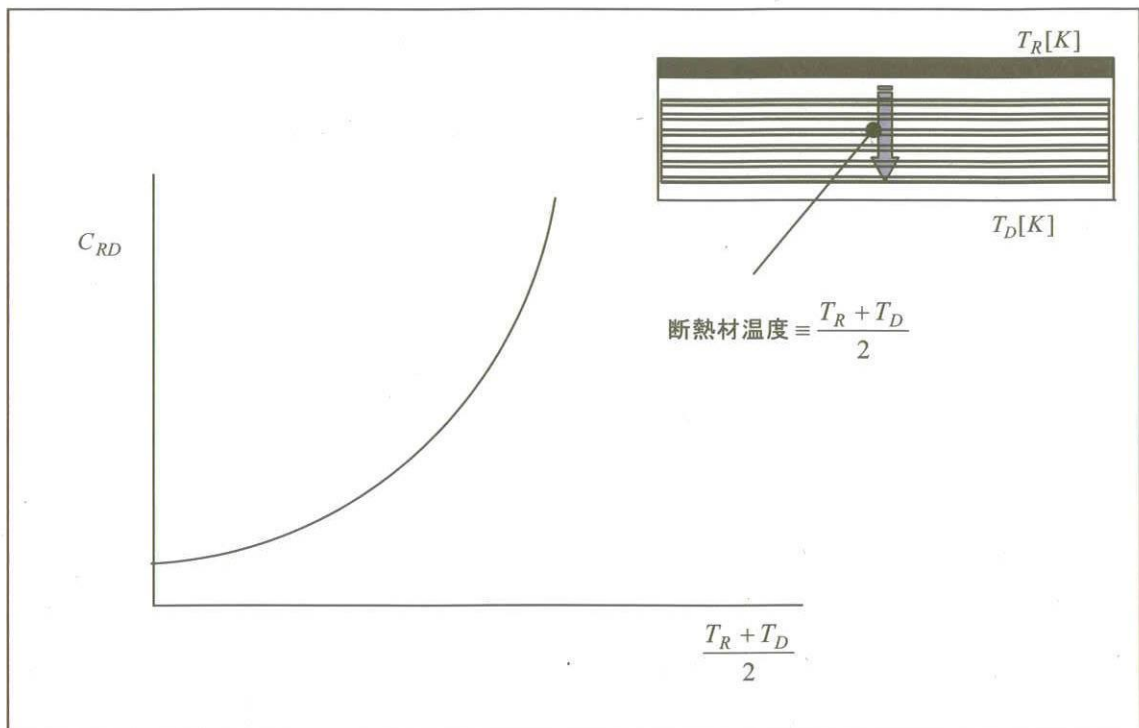


図3-9 コンダクタンスの校正曲線

3.6 カロリーメータを使用する上での注意

カロリーメータの構造上・原理上、使用する際は以下のことに注意する。

<設置に関する注意>

受光板の視野に供試体、治具が入らないように設置する。

視野にシュラウド以外が入る場合は形態係数を考慮しなければ正確な放射エネルギーを求めることはできない。

また、受光板の視野を IR パネル等の熱源で完全に塞ぎ、シュラウド面を見ていない（放熱環境が十分ではない）状況では測定できない。

<計測に関する注意>

受光面の表面熱光学特性 ε_H, α_S 及び断熱材コンダクタンス C_{rd} は各カロリーメータ固有値であるため、測定前に把握しておく必要がある。

<保管時の注意>

湿気、酸化によって断熱材のコンダクタンスが変化しないよう、デシケータ等、よく乾燥した所で保管する。

4. 熱真空試験用放射照度計の測定原理

放射照度計は、高真空極低温のスペースチャンバ内で、ソーラシミュレータの放射エネルギーを測定する機器である。本項では、熱真空試験用放射照度計の放射エネルギー測定の基本原則を解説する。(4.1項)さらに4.2項で実際の測定原理について詳細を述べる。4.3項では放射照度計を使用する上での注意点をまとめた。

4.1 基本原則

図4-1に放射照度計に関する熱の流れを示す。

放射照度計にソーラシミュレータからの模擬太陽光を照射すると、その照度に比例した熱入力 Q_{in} をキャビティが受け、より温度の低いヒートシンクに伝導によって熱が流れる(Q_{cond})。また熱入力の有り無しに関わらず、キャビティの温度と周囲の温度が異なるため、キャビティから周囲への輻射 Q_{rad} が存在する。

放射照度計の基本原則はこのキャビティから周囲への放熱量($Q_{cond} + Q_{rad}$)を測定し、放射エネルギー P を求めることである。

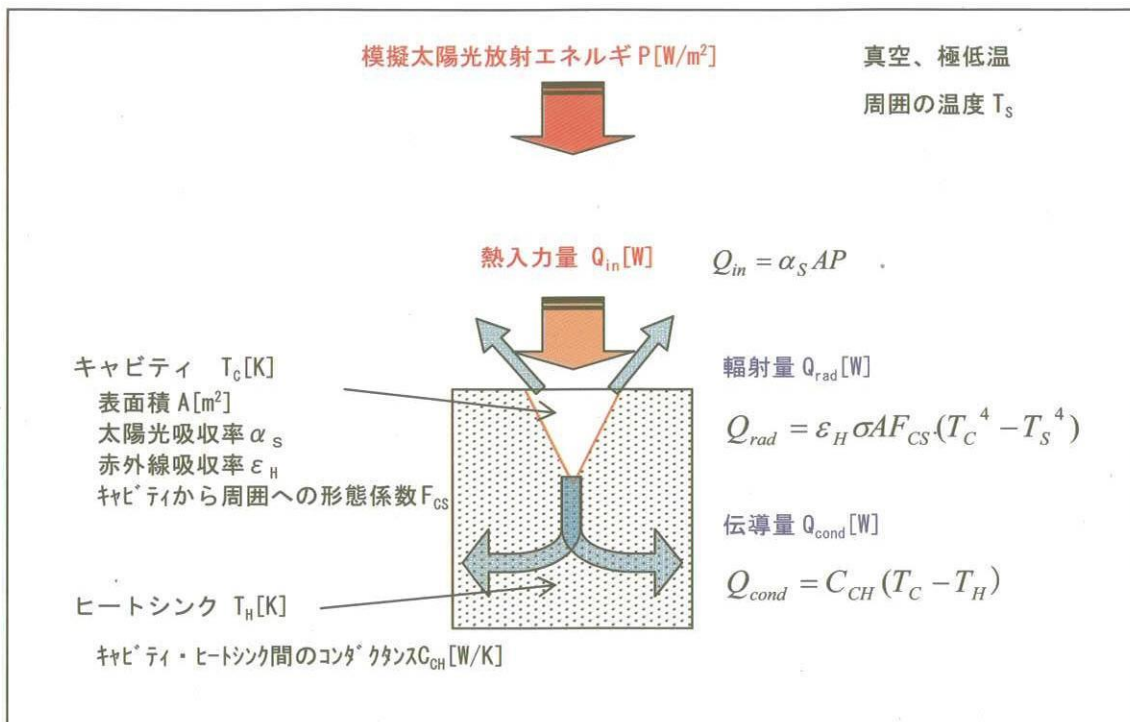


図4-1 放射照度計の基本原則

一般に、ある物体へ Q_{in} の熱入力があり、物体から Q_{out} の放熱があるとき、その物体の温度は熱平衡方程式(4-1)式で表される。

$$C \frac{dT}{dt} = Q_{in} - Q_{out} \quad (4-1)$$

C : 物体の熱容量 [$W \cdot s / K$]

T : 物体の温度 [K]

t : 時間 [s]

Q_{in} : 熱入力量 [W]

Q_{out} : 放熱量 [W]

熱平衡状態とは、熱入力量 Q_{in} と放熱量 Q_{out} が等しくなり、その物体の温度変化がなくなり、一定温度となった状態をいう。すなわち、(4-2) 式の状態をさす。

$$C \frac{dT}{dt} = Q_{in} - Q_{out} = 0 \rightarrow Q_{in} = Q_{out} \quad (4-2)$$

キャビティにある一定の放射エネルギー P が入射すると、キャビティ温度は上昇するが、より温度が低いヒートシンクに対して熱が流れ一定温度に達し、熱平衡状態となる。

ここで、図 4-1 におけるキャビティに対する熱入力量 Q_{in} は(4-3)式で表される。

$$Q_{in} = \alpha_S AP \quad (4-3)$$

α_S : キャビティの太陽光吸収率

A : キャビティ開口部面積 [m^2]

P : 放射エネルギー [W / m^2]

キャビティからの放熱量 Q_{out} は、キャビティからヒートシンクへ流れる伝導量 Q_{cond} とキャビティから開口部周囲への輻射量 Q_{rad} の和となる。なお、真空中のため対流による熱の入出力はない。

キャビティからヒートシンクへ流れる伝導量は、(4-4)式で表される。

$$Q_{cond} = C_{CH}(T_C - T_H) \quad (4-4)$$

C_{CH} : キャビティ・ヒートシンク間のコンダクタンス [W / K]

T_C : キャビティ温度 [K]

T_H : ヒートシンク温度 [K]

キャビティの温度とキャビティ開口部周囲(※)の温度差によるキャビティから周囲への輻射 Q_{rad} は、(4-5)式となる。
※熱真空試験においてキャビティ開口部周囲とは極低温の黒色壁(以下、シュラウド)である。

$$Q_{rad} = \varepsilon_H \sigma A F_{CS} (T_C^4 - T_S^4) \quad (4-5)$$

T_S : シュラウド温度 [K]

ε_H : キャビティの赤外線放射率

σ : ステファン・ボルツマン定数 $5.67 \times 10^{-8} [W / m^2 K^4]$

F_{CS} : キャビティからシュラウドに対する形態係数

よって、キャビティから放熱される熱量 Q_{out} は、伝導量 Q_{cond} と輻射量 Q_{rad} の和である(4-6)式で表される。

$$Q_{out} = Q_{cond} + Q_{rad} = C_{CH}(T_C - T_H) + \varepsilon_H \sigma A F_{CS} (T_C^4 - T_S^4) \quad (4-6)$$

キャビティが一定温度に達し、熱平衡状態となったときは $Q_{in} = Q_{out}$ であるため(4-3)式及び(4-6)式から(4-7)式が成り立つ。

$$\alpha_S AP = C_{CH}(T_C - T_H) + \varepsilon_H \sigma A F_{CS}(T_C^4 - T_S^4) \quad (4-7)$$

したがって放射エネルギー P は(4-8)式で表される。

$$P = \frac{C_{CH}}{\alpha_S A} (T_C - T_H) + \frac{\varepsilon_H \sigma F_{CS} (T_C^4 - T_S^4)}{\alpha_S} \quad (4-8)$$

ここで、(4-8)式を簡単化する。放射照度計のキャビティはその空洞形状と黒色であることから、熱光学特性は $\alpha_S \approx 1, \varepsilon_H \approx 1$ とみなせる。よって、(4-9)式となる

$$P = \frac{C_{CH}}{A} (T_C - T_H) + \sigma F_{CS} (T_C^4 - T_S^4) \quad (4-9)$$

このようにして、コンダクタンス C_{CH} がわかっているキャビティの温度 T_C とヒートシンク温度 T_H 、シュラウド温度 T_S を測定することによってキャビティからの放熱量 Q_{out} (= 熱入力 Q_{in}) がわかり、熱源からの放射エネルギー P を求めることができる。

4.2 測定原理

放射照度計による放射エネルギーの測定は(4-9)式に表した。第1項がキャビティからヒートシンクへの伝導を、第2項がキャビティからシュラウドへの輻射を表している。

$$P = \frac{C_{CH}}{A} (T_C - T_H) + \sigma F_{CS} (T_C^4 - T_S^4) \tag{4-9}$$

実際の放射照度計による放射エネルギーの測定では、温度差 $T_C - T_H$ に比例したサーモパイル出力を計測する。

サーモパイルとは多数の熱電対を直列に接続して出力電圧を高くしたものである。図4-2に示すように、サーモパイルはキャビティとヒートシンクの間であり、放射エネルギーによって生じる温度差 $(T_C - T_H)$ に比例したサーモパイル起電力 v が発生する。

したがって、このサーモパイル起電力 v を用いて、(4-9) 式の第1項は(4-10)式で表すことができる。サーモパイル起電力 v にかかる係数をまとめてゲイン (SCALE) と表す。

$$\frac{C_{CH}}{A} (T_C - T_H) = \frac{C_{CH}}{A} k v = (SCALE) \times v \tag{4-10}$$

k : 温度差 $(T_C - T_H)$ を起電力 v で表現する際の比例定数 $[K/mV]$
 (サーモパイル毎に決まる)

v : サーモパイル起電力 $[mV]$

また、(4-9)式の第2項はオフセット (TARE) と呼ばれ、このオフセット値は熱入力の有無に関わらずほとんど変化しない。これはキャビティとヒートシンクの熱結合が大きく、キャビティ温度の上昇が小さいためである。

$$\sigma F_{CS} (T_C^4 - T_S^4) \equiv (TARE) \tag{4-11}$$

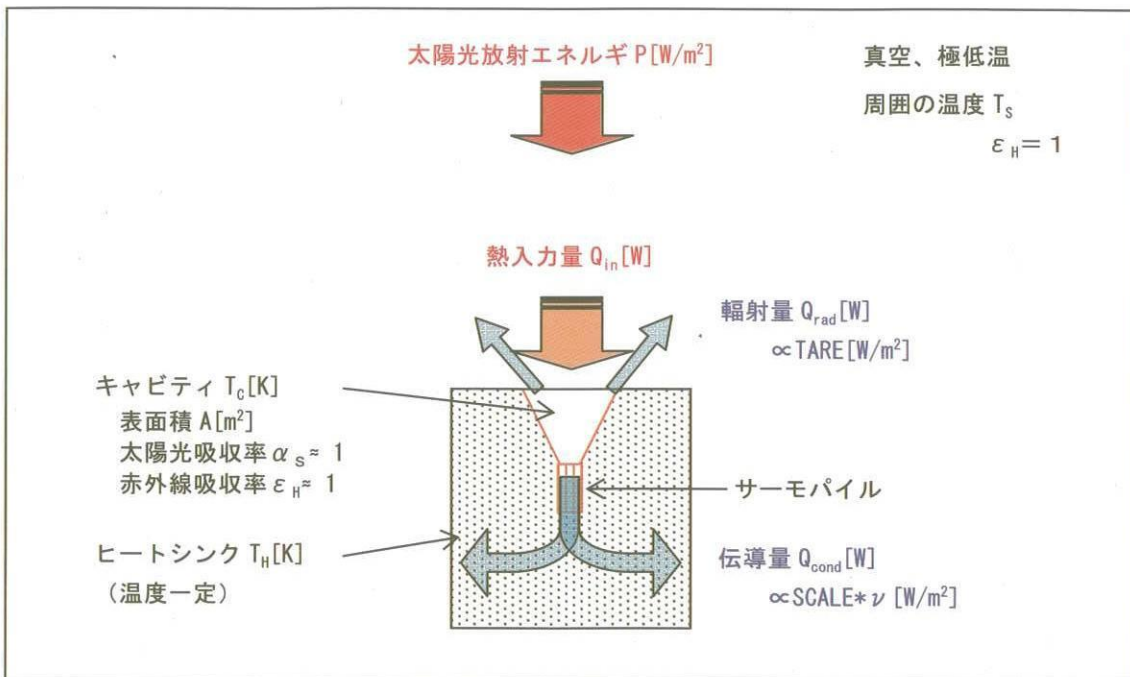


図 4-2 放射照度計の測定原理

(4-9)、(4-10)及び(4-11)式から、放射エネルギー P は (4-12)式で表すことができる。

$$P = (SCALE) \times v + (TARE) \quad (4-12)$$

このゲインとオフセットは放射エネルギーの測定前に、計測によって求める値である。計測方法を以下に説明する。このゲインとオフセットの測定は、実際の測定環境と同じ高真空極低温環境で行うことが重要である。

a)ゲイン(SCALE)

熱真空試験用放射照度計は、キャビティ裏に自己校正ヒータを有する。この自己校正ヒータの発熱によりキャビティに入射する放射エネルギーを模擬し、その発熱量($Q=VI=V^2/R$)を測定することで放射エネルギー P を正確に把握することができる。このときのサーモパイル起電力 v を計測することによりゲインを求めることができる。

$$\text{模擬熱入力ありの場合 } P = (SCALE) \times v + (TARE) \quad (4-13)$$

$$\text{熱入力なしの場合 } 0 = (SCALE) \times v_0 + (TARE) \quad (4-14)$$

(4-13)式-(4-14)式より

$$(SCALE) = P / (v - v_0) \quad (4-15)$$

b)オフセット(TARE)

オフセットの値は、熱入力なしの(4-14)式の状態におけるサーモパイル起電力 v_0 より求めることができる。

$$\text{熱入力なしの場合 } 0 = (SCALE) \times v_0 + (TARE) \quad (4-14)$$

よって

$$TARE = (SCALE) \times v_0 \quad (4-16)$$

ゲイン(SCALE)は(4-15)式で求めた値を用いる。

4.3 放射照度計を使用する上での注意

放射照度計の構造上・原理上、使用する際は以下のことに注意する。

<設置に関する注意>

放射照度計の視野に供試体、治具が入らないように設置する。

放射照度計に近接して治具等を置くと、ヒートシンクの温度が一定に保たれなくなり、キャビティ温度が上昇し、オフセット(TARE)が一定でなくなる可能性がある。

<計測に関する注意>

自己校正ヒータによるゲイン計測、オフセットの測定は外部からの熱入力なしの状態、測定時と同様の環境条件下で行う。

計測中の環境条件は変化させない。放射照度計の視野内で環境温度が変化すると照度に変化する。

<保管時の注意>

キャビティの表面汚染による熱光学特性の変化を防止するため、保管時はカバーを掛けておき、キャビティをクリーンに保つ。

5. 太陽電池セルの測定原理

筑波宇宙センターでは真空極低温の熱真空試験時のソーラシミュレータの熱流束測定その他、常温大気圧下でのソーラシミュレータのソーラ光均一度測定に太陽電池セルが使用されている。

太陽電池セルは光起電力効果を利用し、入射した太陽光の強度に比例して発生した起電力により光の強さを測定するセンサである。2項、3項で述べた熱エネルギーの測定によって放射エネルギーの強さを測定するカロリメータ、放射照度計とは原理が異なる。太陽電池についてはその原理と特性が広く知られているため、Appendix に概要をまとめた。

Appendix

1. 太陽電池の原理

太陽電池は p 型半導体と n 型半導体でできており、その pn 接合面では電位差が生じている。光が太陽電池に入射すると電子(-)と正孔(+)の対が生成される。この生成された正孔-電子対が pn 接合面の電位差により p 層と n 層へ振り分けられるため、p 層と n 層の間に起電力(電圧)が発生する。p 層の電極と n 層の電極に外部負荷をつなぐと、p 層と n 層の間の電圧により電流が流れる。これが太陽電池の基本原理解である。以下、半導体の性質と太陽電池の原理について記述する。

1.1 p 型半導体と n 型半導体

不純物の添加されていない純粋な半導体を真性半導体といい、半導体に不純物を添加したものを不純物半導体という。

この不純物半導体のうち、不純物として 5 価の P(磷)を与えて過剰の電子を持った半導体を n 型半導体という。逆に不純物として 3 価の B(硼素)や Al(アルミニウム)を加え電子が足りなくなり電子の穴(正孔またはホール)生じた半導体を p 型半導体という。

図 1-1 に光起電力効果の概略図を示す。

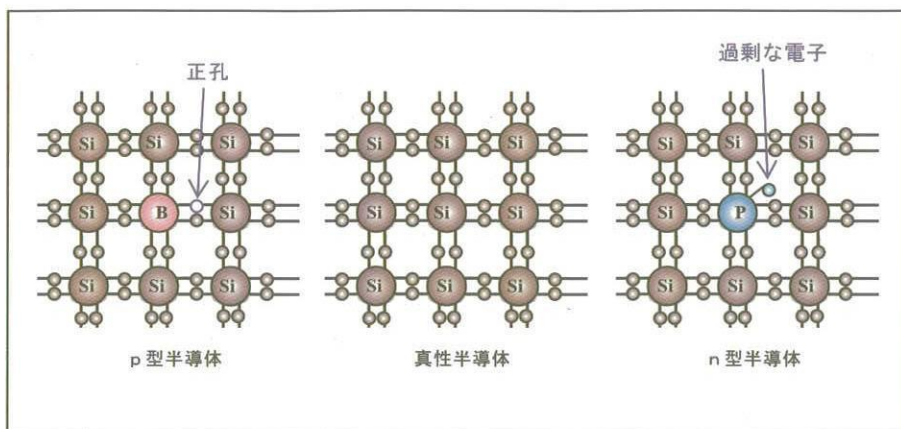


図 1-1 半導体の構造

1.2 pn 接合

太陽電池は p 型半導体と n 型半導体の 2 種類の半導体でできており、その接合部は pn 接合部と呼ばれる。電子及び正孔の濃度が p 型と n 型で異なるため、拡散によって n 層の接合部付近の電子は p 層へ、p 層の接合部付近の正孔は n 層へ流れ込む。その結果、接合部の付近では電子と正孔は結合して消滅した領域が生じる。これを空乏層と呼ぶ。

この pn 接合によって接合部で電子と正孔が対消滅することにより、正孔が無くなった空乏層中の p 層領域は負に、電子が無くなった空乏層中の n 層領域は正に帯電するため、空乏層では電位差が生じる。これを拡散電位という。

図 1-2 に光起電力効果の概略図を示す。

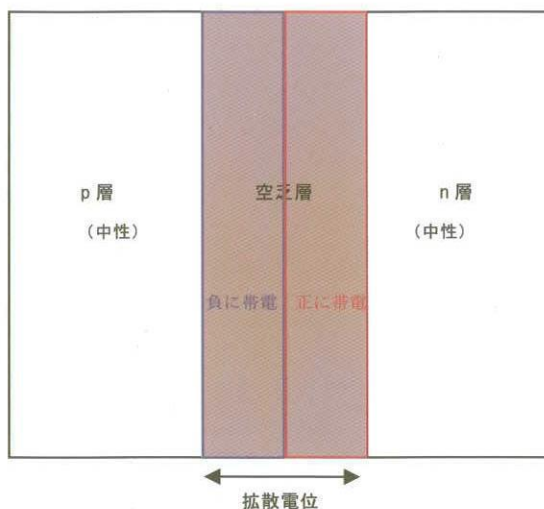


図 1-2 pn 接合

1.3 光起電力効果

光を受けていない太陽電池では、そのpn接合部で空乏層が形成され、n層側が正に、p層側が負に拡散電位が形成されている。

この状態に、ある値以上のエネルギーを持つ光が入射すると、結晶中に正孔-電子対が生成され、電子および正孔は結晶中を拡散してpn接合部へ達し、pn接合の電位差により電子はn層に、正孔はp層へ分離される。この過程によりn層は過剰な電子が集まり負に、p層は正に蓄電される。これを光起電力効果という。

図1-3に光起電力効果の概略図を示す。

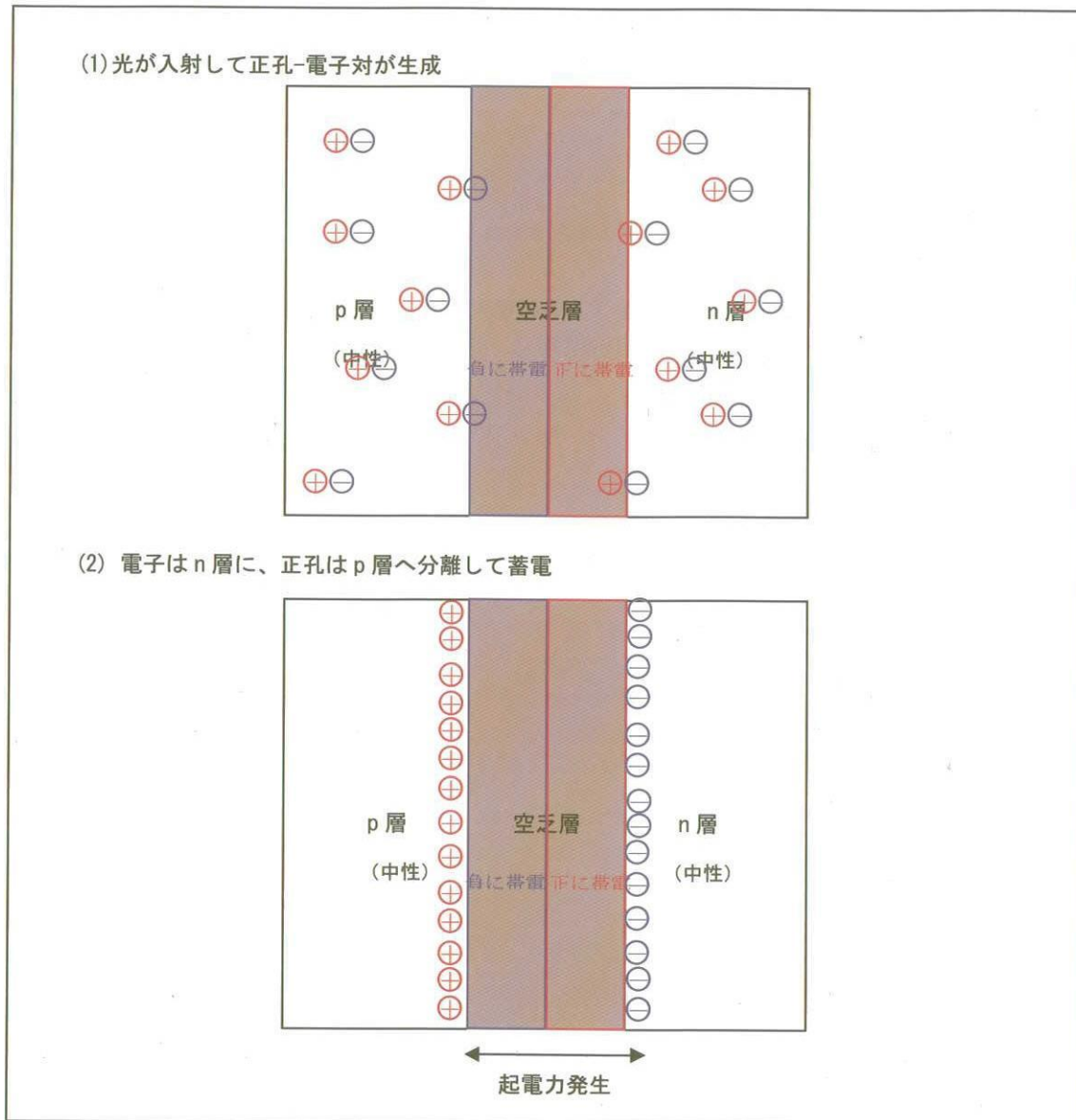


図1-3 太陽電池セルの光起電力効果

2. 太陽電池の特性

太陽電池の特性には、出力特性(I-V 特性)・放射照度特性・分光感度特性・温度特性があり、これらは太陽電池の構造によって異なる。

- (1) 出力特性 (I-V 特性)
 - : 太陽電池の出力電圧と電流の相関関係
- (2) 放射照度特性
 - : 入射する放射照度と発生電流との相関関係
- (3) 分光感度特性
 - : 入射光の波長と変換効率との相関関係
- (4) 温度特性
 - : 太陽電池セルの温度と出力特性の相関関係

2.1 出力特性 (I-V 特性)

一般に太陽電池の出力は、に示すような電圧と電流の相関曲線(I-V カーブともいう。)で表される。

開放電圧(**Voc**) : 太陽電池に何もつながない開放状態で、太陽電池両端に発生する電圧

短絡電流(**Isc**) : 太陽電池の両端をショートさせた短絡状態で、ショートした電流

この短絡電流値は光の照度によって変化する。

→2.2 項放射照度特性参照

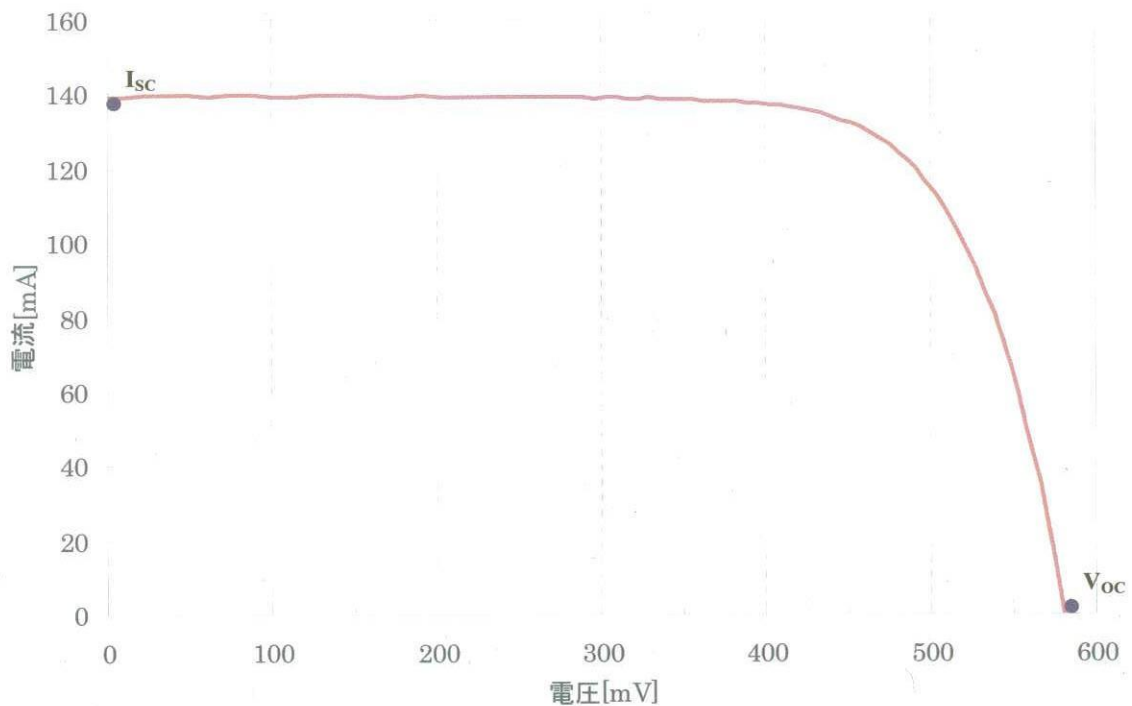


図 2-4 出力特性

筑波宇宙センター13mφ スペースチャンバのソーラ光均一度測定装置に使用している太陽電池セル

2.2 放射照度特性

一般的に太陽電池の短絡電流 I_{sc} は照度の増加に伴い直線的に増加する。放射照度特性を求めるには、異なる照度における I-V 特性を把握する必要がある。

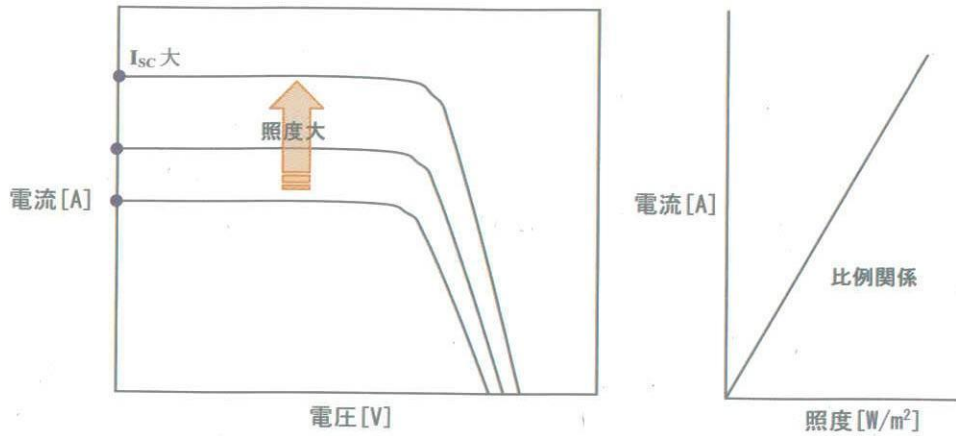


図 2-2 放射照度特性

2.3 分光(スペクトル)感度特性

太陽電池は光エネルギーにより半導体結晶中の電子-正孔対を生成させる。この生成に必要なエネルギーは構成材料の物性により決まる。また、結晶内に入射する光の波長はその太陽電池の構造によるため、太陽電池は材質や構造によって固有のスペクトル応答性を持つ。図 2-3 に 13mφ ソーラ光均一度測定装置の太陽電池セルの分光感度特性を示す。

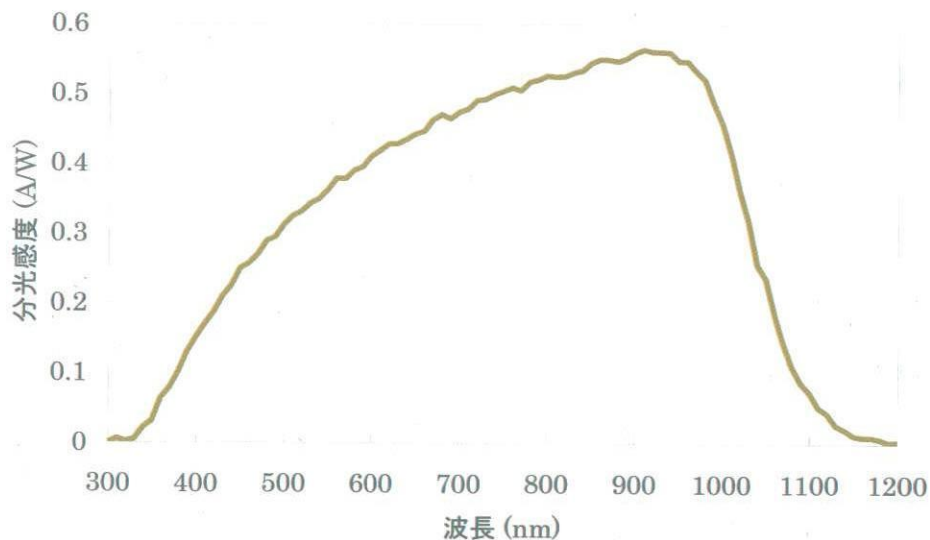


図 2-3 分光感度特性

2.4 温度特性

太陽電池はセル温度の上昇と共に開放端電圧は減少、短絡電流は微小増加する。これは半導体物性を反映したものであり、温度上昇は電子-正孔対生成に必要なエネルギー、電子のエネルギー、結晶中の拡散長等に影響をもたらす出力が変化する。短絡電流値を照度測定に利用する場合、セル温度一定の下で測定を行う必要がある。筑波宇宙センターではソーラ光均一度測定装置の太陽電池セルはペルチェ素子による温調を、真空極低温のスペースチャンバ内ではヒータ加熱と輻射板による冷却を組み合わせた温調を行っている。

図2-4 に筑波宇宙センター13mφスペースチャンバのソーラ光均一度測定装置に使用している太陽電池セルの温度特性を示す。

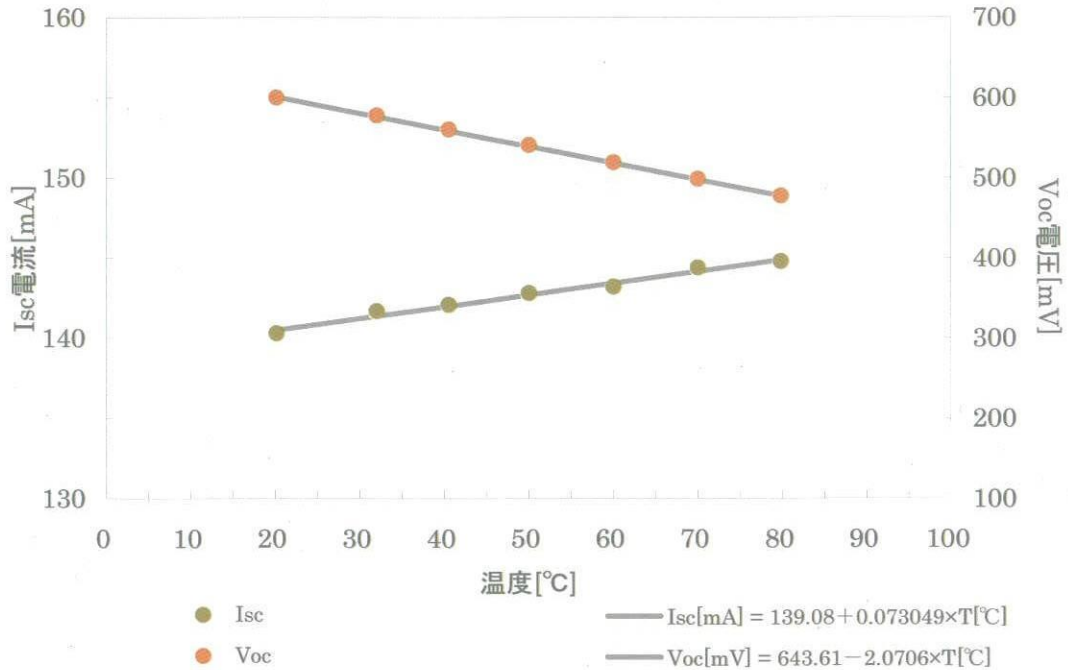


図2-4 温度特性

宇宙航空研究開発機構研究開発資料 JAXA-RM-05-009

発行 平成 18 年 3 月 31 日

編集・発行 宇宙航空研究開発機構

〒182-8522 東京都調布市深大寺東町 7-44-1

URL : <http://www.jaxa.jp/>

印刷・製本 (有) ノースアイランド

本書及び内容についてのお問い合わせは、下記にお願いいたします。

宇宙航空研究開発機構 情報システム部 研究開発情報センター

〒305-8505 茨城県つくば市千現 2-1-1

TEL : 029-868-2079 FAX : 029-868-2956

© 2006 宇宙航空研究開発機構

※ 本書の一部または全部を無断複写・転載・電子媒体等に加工することを禁じます。

