

## 薄膜サーモパイル

ニッコーム株式会社営業部、2000/09/20、追記 2009/06/01

### 1. 薄膜サーモパイル

薄膜サーモパイルは、ニッコームが薄膜技術によって1966年に原型を完成し、その後改良が加えられ今日にいたった放射エネルギーの検出素子である。放射エネルギーとは、紫外光から可視光、赤外光などのエネルギーであって、検出素子のエネルギーの波長帯域がきわめて広く、量子形の検出素子に比較して、検出感度が波長に対して平坦であることが特長である。さらに検出素子の出力は、入力エネルギーに対して直流電圧であり、入力の微分出力を検出する焦電素子に比較して、入力エネルギーをチョッピングする必要がなく、きわめて使いやすい素子である。さらに、サーモパイル、LP-111S は、薄膜の特長を生かし、その応答速度が極めて高速であり、CO<sub>2</sub>レーザーの出力制御用として使用されており、これまでの累計生産実績は数十万個に達する。

薄膜サーモパイルの用途は、非接触放射温度計、赤外領域のレーザーパワーの検出素子、RMS-DC変換モジュール、サーマルコンバータなどであり、放射エネルギーに関する国家標準としても使用された実績がある。

### 2. 構造と動作原理

薄膜サーモパイルの動作は、原理的には熱電対の動作原理に基づくものである。熱電対は、適切な2種類の金属を接触させると熱電力を生じる現象を応用して、精密温度計測に使用される。

金属	-100°C	+100°C
銅	-0.37mV	+0.76mV
コンスタンタン 50/50	+2.98mV	-3.51mV
ビスマス	+7.54mV	-7.34mV
アンチモン	-	+4.89mV

金属の白金に対する起電力、符号+は電流が0°Cの接続点を通して白金のほうへ、-はその逆方向を示す。

表1. 金属の熱電力

薄膜サーモパイルは、熱起電力差の大きい材料、ビスマス薄膜とアンチモン薄膜との組み合わせを使用している。その代表的な構造は図1に示すとおりであり、内蔵されたパターンのモデル図は、図2に示したとおりである。放射エネルギーは金属リング中心の穴を通過して、メタルブラックで吸収され、熱に変換され、パターンのホットジャンクションを加熱する。一方、コールドジャンクションは熱容量の大きい金属リングに接しているため、一定温度に保たれている。ホットジャンクションとコールドジャンクションの温度差とによって、ビスマスとアンチモンの熱電対に起電力を発生する。端子に現れる直流電圧は、直列に接続された熱電対の対(ついで)数倍になって端子で観測される。周囲温度が変化すれば、金属リングの温度は緩やかに変化し、コールドジャンクション温度は変化するが、放射エネルギーがホットジャンクションに入射することによる温度上昇分、すなわちホットジャンクションとコールドジャンクションの温度差は周囲温度によって変化せず、原理的には、端子出力電圧は周囲温度によって変化することはない。リング温度が急速に変化すれば、ホットジャンクションとコールドジャンクションの温度差は過渡的にバランスを失い、端子電圧が大きく振れることがあるので、コールドジャンク

ション、すなわち、薄膜サーモパイル素子のケースをなるべく一定温度に保つか、熱容量の大きなケースで覆う必要がある。

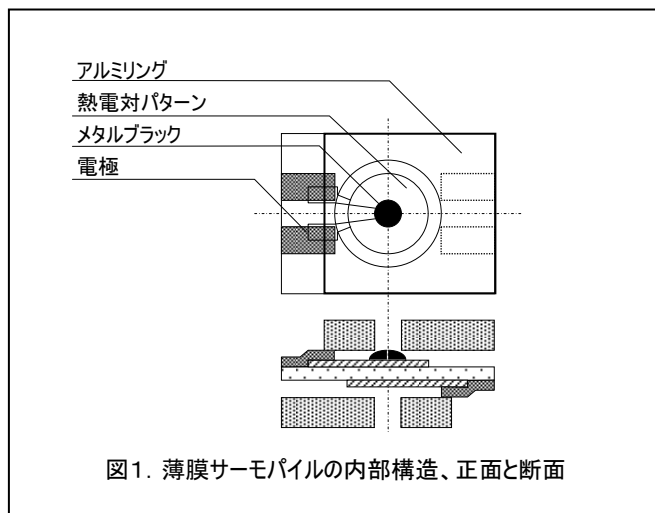


図1. 薄膜サーモパイルの内部構造、正面と断面

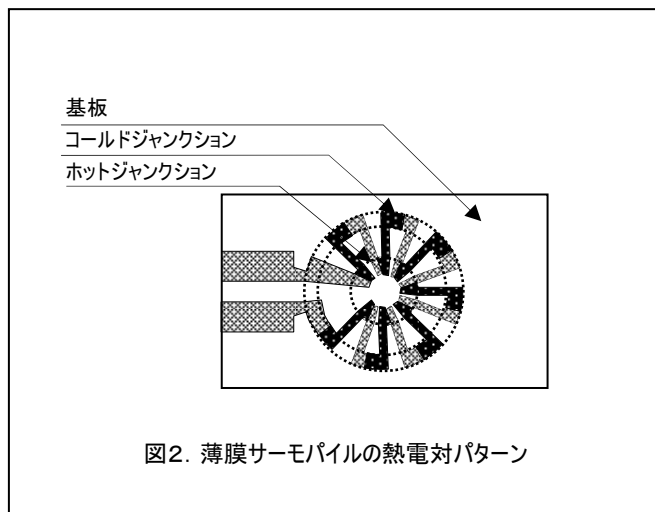


図2. 薄膜サーモパイルの熱電対パターン

### 3. 薄膜サーモパイルの製品と仕様

ニッコームのサーモパイルには、小型で高速応答に特長があるLP-111S、受光直径の大きい許容入力パワーの大きいLP-231S、入射パワーの絶対測定が可能な計測用のLP-31Bがある。それぞれの外観を図3、図4、図5に示す。

表2の、波長範囲はこの波長の帯域で検出感度が平坦であることを示す。最大入力、この入力パワーまでの放射エネルギーを連続的に測定できることを示す。絶対最大入力、3秒間以内の過大入力までは許容できるが、連続的に入射すると劣化する恐れがある値である。

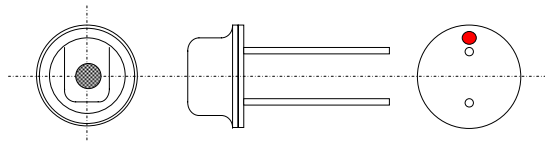


図3. LP-111Sの外観

リードの赤印は、高温入射にて+電圧を発生する側

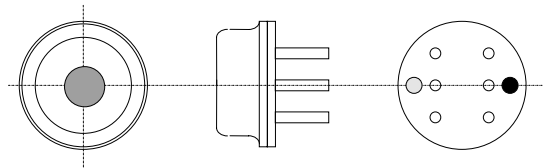


図4. LP-231Sの外観

リードの赤マークは、高温入射にて+電圧を発生する側

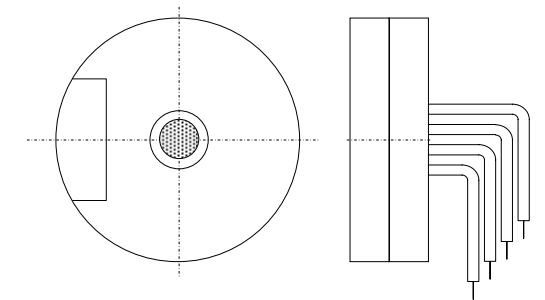


図5. LP-31Bの外観

赤リードは+、黒リードは-、2本の青リードは校正用抵抗のリード

項目	LP-111S	LP-231S	LP-31B
波長範囲	0.4-20.0um		
最大入力	10mW		
絶対最大入力	20mW	50mW	200mW
感度	10mV/mW	4.5mV/mW	0.45mV/mW
直線性誤差	±2%	±2%	±2%
63%時定数	45m sec.	200msec.	4000msec.
受光直径	1.0mm	4.5mm	5.0mm
接点数	22	30	36
内部抵抗値	2+/-1kohm	4+/-2kohm	6.5+/-3.5kohm
校正用抵抗	none	none	250-550ohm
保存温度	0-40deg C		
動作温度	0-40deg C		

表2. 薄膜サーモパイルの仕様

感度は、1mW あたりの入射パワーに対する検出端子の出力電圧である。直線性誤差は、入射パワーをゼロから最大入力まで変化させたときの、出力電圧の直線性を示す。63%時定数は、ステップ状の入射パワーを加えたときの出力電圧の立ち上がり時定数である。

受光直径は、放射エネルギーを吸収するメタルブラックの有効な直径、接点数は、内部の薄膜熱電対の対数である。

内部抵抗値は、出力端子からみた素子の内部抵抗である。出力端子に接続されるセンサー増幅器の入力インピーダンスが低い場合は、見かけ上の感度が低下することがあるので、素子は内部抵抗が低くなるように設計されている。校正用抵抗はLP-31Bのみに実装しており、素子の外部から電気的なパワーを供給し、電気的なパワーと入射エネルギーとを比較して、入射エネルギーのパワーを求めるためのものである。保存温度範囲、動作温度範囲は、薄膜サーモパイルの応答速度と検出感度の特性を向上させるために、基板材料にきわめて繊細な材料を使用しているために、狭く設定してある。

## 4. 薄膜サーモパイルの特性

### 4-1. 感度測定

薄膜サーモパイルの感度測定法はいろいろあるが、図6のような方式が簡単であり、ニッコームの出荷検査にも使用されている。

図6のように、LP-31B によってHeNeレーザのパワーを校正する。LP-31Bの感度をR、出力電圧をVとすれば、パワーPは、 $P=V/R$  である。つぎに、たとえば LP-111S の直径 1mm のターゲットに、レーザ光が照射されるように距離を調整する。LP-111S の出力電圧をEとすれば、LP-111Sの感度は $R=E/P$ で求められる。通常、He-Ne レーザの出力は、1.4-1.7mW 程度のものである。

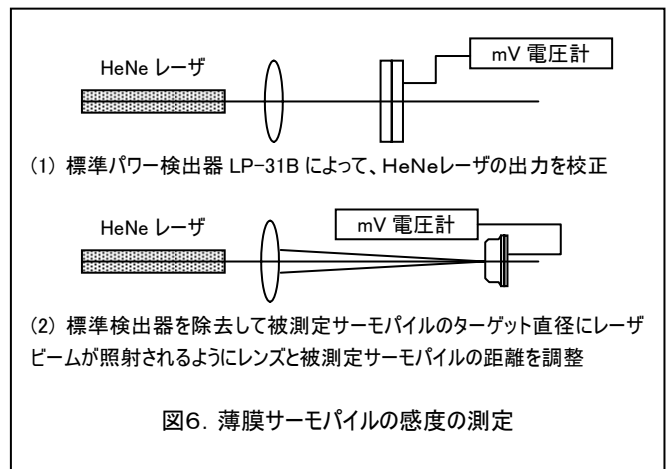


図6. 薄膜サーモパイルの感度の測定

### 4-2. 入出力特性

LP-111S の入射パワーと出力電圧の関係を代表値として図7に示す。入射パワーが 0.0002 mW以下は、薄膜サーモパイルの発生雑音のために出力を検出しがたい。

図7に示すように、入射パワーと薄膜サーモパイル出力電圧の関係は直線的であるが、温度との関係は直線ではなく曲線状である。図8に黒体炉からの放射エネルギーを薄膜サーモパイルで検出した結果を示す。開口 60mmφ 標準黒体炉の正面 120mm の距離に LP-111S をセットし、黒体炉温度を常温から 250°Cまで変化させて出力電圧を測定している。

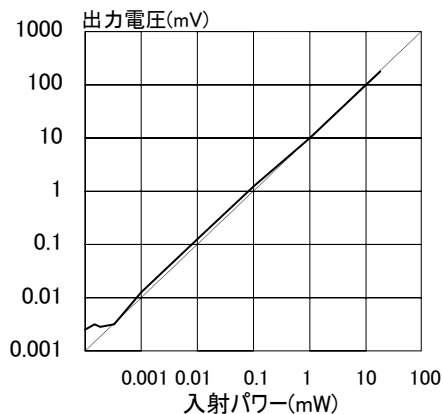


図7. LP-111S の入射パワーと出力電圧

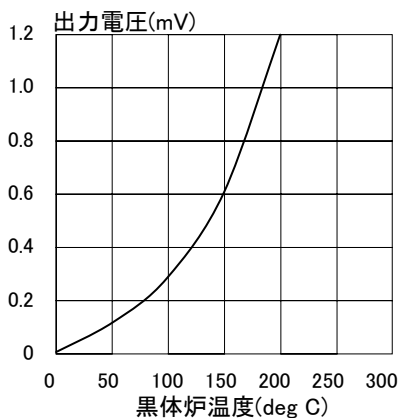


図8. 黒体炉温度と出力電圧(LP-111S)

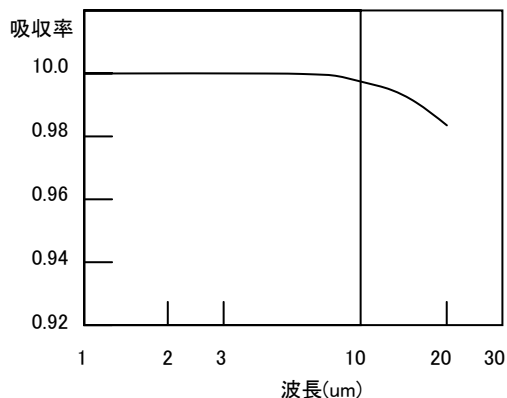


図9. メタルブラックの吸収率(JASCO)

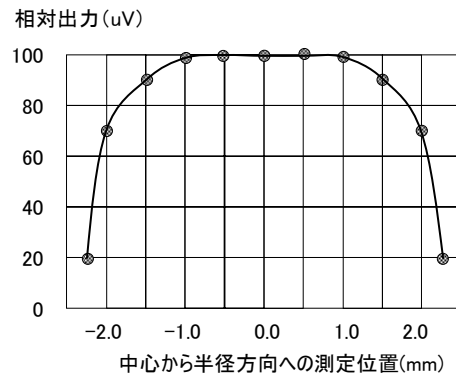


図10. LP-31B のターゲット面内の感度分布

#### 4-3. ターゲットとメタルブラックの反射率

放射エネルギーを吸収するターゲットは、非常に細かい球状の粒子の集まりであり、入射エネルギーは、球体の表面で反射を繰り返し、エネルギーの再放出をしないように考慮して作られている。ターゲットの吸収率の測定結果を代表値として図9に示す。

#### 4-4. ターゲット面内の感度分布

LP-31B あるいは LP-231S では、ホットジャンクションのターゲットの下層に金属の層を設けてあって、たとえ放射エネルギーの細いビームがターゲットのいずれの位置にあたって、正確にパワーを測定できるように考慮してある。むしろ、それだけ熱容量が増加するので、応答速度は低下し、感度は低下する。LP-31B の面内の感度分布を、スポット径 0.2mm のレーザービームで測定した結果を図10に示す。

#### 4-5. 応答速度、時定数

薄膜サーモパイルのターゲットに一定のパワーのビームが照射されるとその時点からターゲットの温度は上昇し始め、同時に熱流はホットジャンクションからコールドジャンクションに向かって流れ、ある時間が経過した後にホットジャンクションの温度は一定になる。

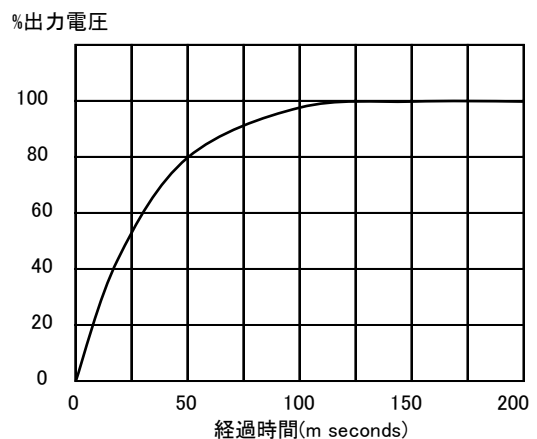


図11. LP-111S の応答時間

## Technical Note

したがって、チョップで過渡的な入射パワーを薄膜サーモパイルに与えると、出力電圧は指数関数的に上昇し、その後安定したDC電圧を出力する。レーザーパワーの出力制御を行うなどのような用途によっては、薄膜サーモパイルの応答速度が重要である。LP-111S は応答速度を高速化した素子であって、出荷検査において、応答速度を全数検査して出荷している。入射エネルギーをチョッピングしたときの出力電圧の変化を図11に示す。

### 5. 光学系の特性

#### 5-1. 感度指向特性

薄膜サーモパイルは、光学的なターゲットが平板状であるので、指向性は余弦則に従いほぼ円形になる。実測結果を図12に示す。また、受光面の前に、赤外を透過させる材質、たとえばフッ化カリウム、フッ化カルシウム、ポリエチレンのレンズを設けて感度指向性を鋭くすることも出来る。指向性を鋭くする簡単な方法は、受光面の前面に円筒状のパイプを設け、その円筒の内部を光沢に仕上げておくこと鋭い指向性を持たせることが出来る。図13は、LP-111S の前面に内面を光沢めっきした、内径4.0mm、長さ20mmのスリーブを置き、指向特性を測定した結果である。

これらの指向特性は、空気流のない常室内において、直径3mm程度、温度300°C程度の円柱状の熱源をサーモパイル前方に置き、サーモパイルと熱源との距離と方向を変化させ、サーモパイル出力電圧を測定することによって得ている。さらに、鋭い指向特性を得るために、CaF単結晶の光学レンズ、樹脂あるいは金属を光沢めっきした反射鏡（パラボラ）、図14などを用いることができる。

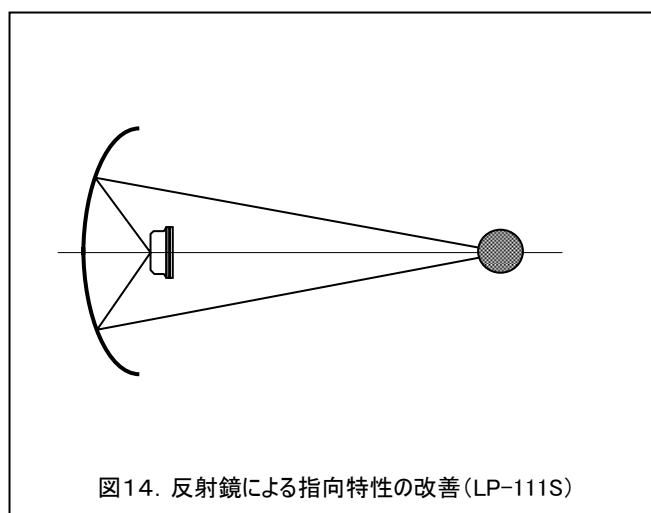
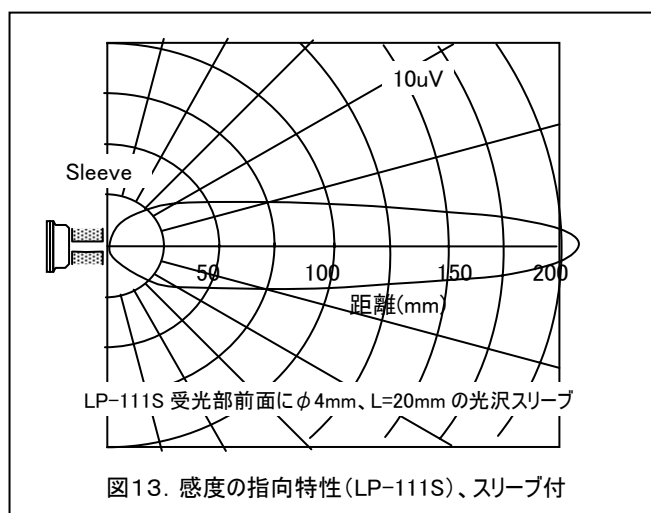
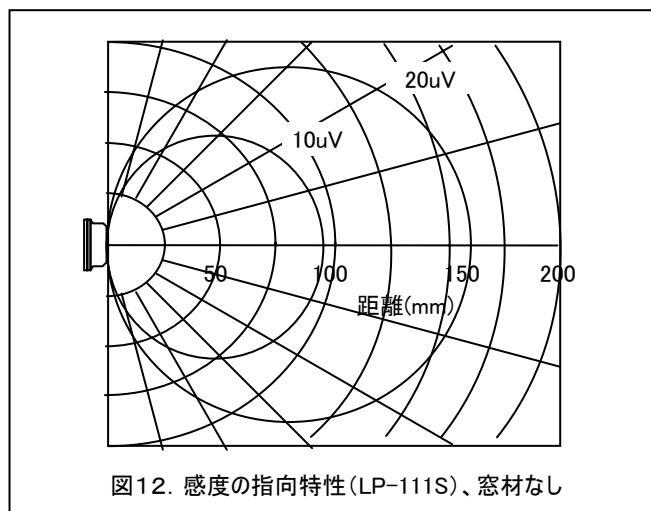
直径80mm程度のニッケル光沢めっきの反射鏡とLP-111Sを使用して常温で人体温度を10mの距離で検出可能である。

#### 5-2. フィルタ

特定の波長を選択的に検出するために、シリコン単結晶、CaF単結晶、ポリエチレンフィルムを光学フィルタとして使用できる。一般にフィルタを挿入すると感度は数10%低下する。シリコン単結晶フィルタを挿入すると通過波長帯域で出力電圧はフィルタのない状態に比べて約70%まで低下する。ポリエチレンフィルムでは、フィルムの厚みによって減衰量が変わる。図15にポリエチレンフィルムのフィルタの厚みと出力電圧の測定値を示す。

### 6. センサー増幅器

薄膜サーモパイルは直流電圧を発生する素子であり、その出力電圧は、実際に使用される際には1mV前後であるため、高感度、低温度ドリフトの直流増幅器が必要になる。ただし、素子の内部抵抗は数kΩときわめて高いので、素子と配線は、電磁誘導を避けるためシールドを行い、増幅器の入力インピーダンスは数MΩで設計すればよい。図16に実験用の増幅器回路を示す。



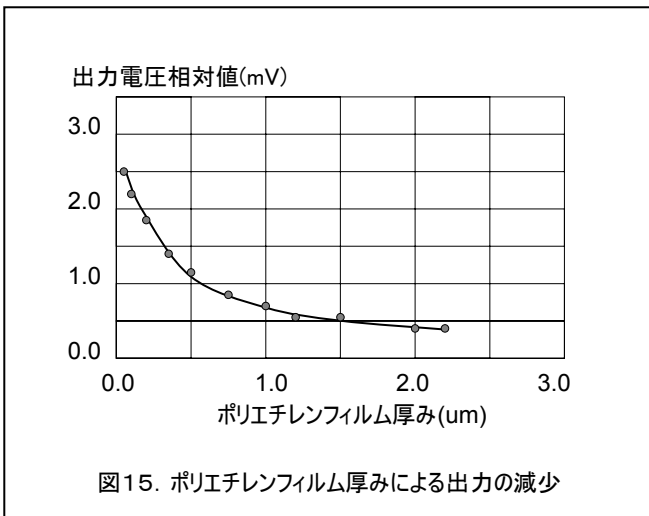


図15. ポリエチレンフィルム厚みによる出力の減少

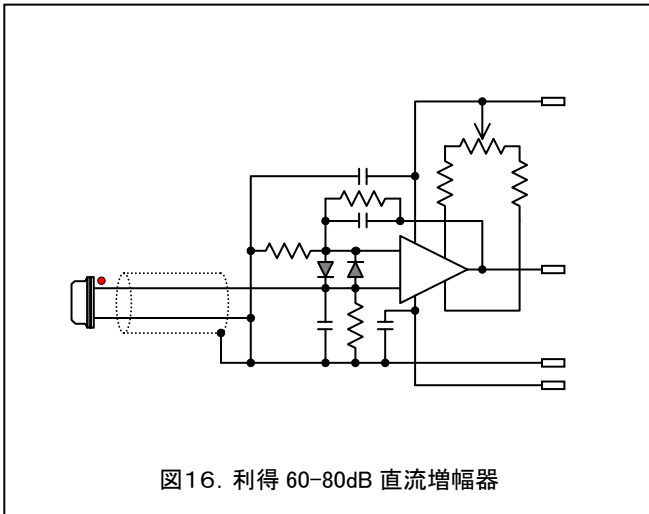


図16. 利得 60-80dB 直流増幅器

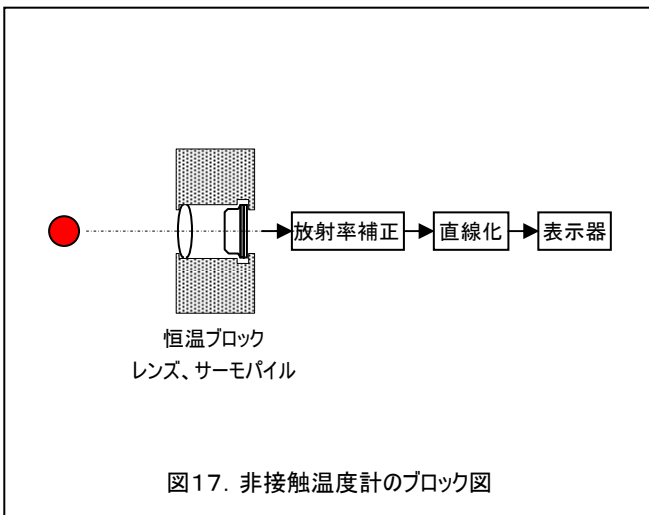


図17. 非接触温度計のブロック図

## 7. 応用

### 7-1. 非接触温度計

薄膜サーモパイルはコールドジャンクションとホットジャンクションとの温度差を検出するから、非接触温度計に応用する際は、コールドジャンクションの温度を測定する仕組みを組み込む必要がある。

また、コールドジャンクションが操作する人の体温等で急激に変化しないように恒温ユニットを設ける必要がある。図8. に示したように、被測定物の温度と薄膜サーモパイルの出力は直線ではないので、直線化のための仕組みを組み込む必要がある。さらに、被測定物の放射エネルギーは、その物体の表面の放射率によって著しく変化するので、放射率補正の仕組みを組み込む必要がある。

### 7-2. 炭酸ガスレーザーのパワー検出器

炭酸ガスレーザーの発振波長は 10.7um であって赤外領域である。この領域では通常の量子形検出器に適切なものがないために、薄膜サーモパイルもがしばしば使用される。一般にレーザーのパワーはビーム断面に対して一様ではないために誤差を防止するために積分球を使用する。積分球は中空球形状であって内面の表面は球形に仕上げ、梨地あるいは平滑に研磨し反射率がほぼ 1.0 になるように金メッキを施してある。積分球の一箇所からレーザービームを入射させると、ビームは内部で乱反射を繰り返し、壁面の単位面積あたりの受光パワーはどの部分をとっても一様になる。積分球内におけるビームの損失が発生し積分球の温度が上昇することを避けるため、積分球を水冷却することがある。

積分球の一部に開口部を設け、薄膜サーモパイル LP-111S の受光面を積分球内に向けると、LP-111S はその受光直径、1.0mm φ に相当するだけのパワーを受光することになる。サーモパイルが受光するパワーは、積分球内の内面の面積Sとサーモパイルの受光面積の比として検出される。

図18には、積分球に使用されるNLP-400シリーズの外観を示す。この検出ユニットでは、検出素子として高速応答形の LP-111S を実装し、前面からの交換ができるようになっている。

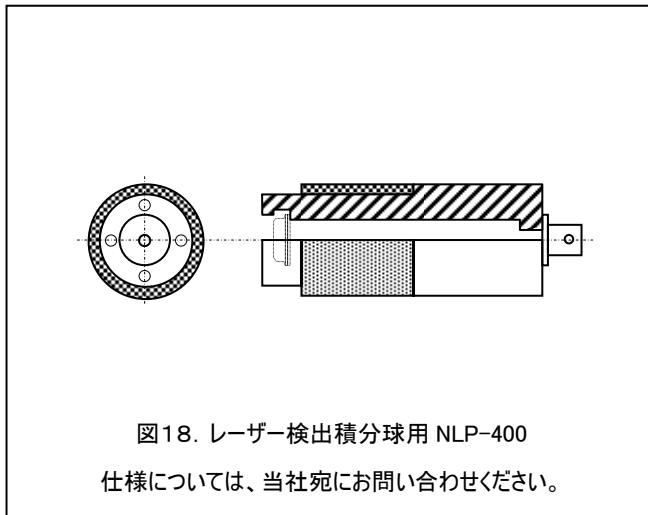


図18. レーザー検出積分球用 NLP-400

仕様については、当社宛にお問い合わせください。

## 8. おわりに

この解説の内容に関するご質問は、電子メールにてお願いいたします。

ニッコー株式会社本社営業部

電話: +81-176-53-2105

FAX: +81-176-53-2106

Email: info@nikkohm.co.jp