

# レーザーパワー・エネルギー標準とその計測技術に関する調査研究

福田 大治\*

(平成15年10月16日受理)

## A Survey on Laser Power and Energy Standards and their Measurement Techniques

Daiji FUKUDA

### 1. はじめに

1960年6月に米国の T. H. Maiman がルビー結晶によるレーザー発振を初めて成功させて以来わずか40数年の間に、レーザーを根幹とした光産業技術は急速に発展し現在ではレーザーが社会や経済で果たす役割ははかり知れないものとなっている。例えば情報・通信などの光を用いた高速・多重通信の分野では、レーザーダイオード(LD)やその受光器は情報を運ぶデバイスとして中心的な役割を演じている。信頼性が高く広範な情報網を構築するためには、レーザーパワー技術に関する標準化は不可欠となっている。CDやDVDなどの光情報蓄積分野ではその市場の大きさからも情報の書き込み・読み出しを担うLDの信頼性は重要である。これらの分野では、より高密度化、高速を目指して GaN 半導体に代表されるような短波長、高出力の熾烈な LD 開発が行われ、光源としての高精度化が求められている。医療分野においてもレーザーメスや近視・乱視治療などではレーザーの果たす役割は大きい。今後、予想される高齢化社会を迎える上で、医療分野でのレーザーの安全性や効果の信頼性は、益々求められていくものと考えられる。さらに、レーザープロセッシング、レーザーを用いた高精度計測、長さ標準への応用、レーザー冷却、ハイパワーレーザーによる非線形効果、核融合利用など様々な分野へとレーザーは用いられ、社会におけるレーザーの重要性は年々大きくなっているといえる。

このような背景の中で、レーザーの周波数やパワー、エネルギーなどの基本的なレーザー特性を定義するための一般的な基準、すなわち計測標準の意義も大きいといえる。各国が保有する国家標準を頂点にピラミッド型の標準供給体系が確立され、一般の測定器や計測器などがこの一次標準に繋がる経路が成立していることをトレーサビリティが取れていると呼ぶ。レーザーに関する物理量もこのトレーサビリティが確立され、日本では産業技術総合研究所の計量標準総合センター(NMIJ)が標準供給体系の頂点に立つ役割を演じている。NMIJの責務は、高精度な標準を開発、維持し、産業界における円滑な発展のため標準を提供していくこと、また、各国家間におい

て国際比較やピアレビュー等により標準の技術水準の相互承認を行うことである。このことは、国内における産業振興のみならず、経済のグローバル化に伴う工業製品の輸出入にも重要である。

本稿ではレーザー計測に関し、特にパワーとエネルギーに焦点を当て、レーザー標準とその計測技術の調査研究を行った結果について述べる。2節ではレーザー出力の基本的な測定原理について概説する。次に、3節では諸外国におけるレーザー標準の供給状況やトレーサビリティ体系について述べる。4節では、NMIJにおけるレーザーパワー標準の現況について述べ、日本独自の一次標準器やその不確かさについて述べる。5節では現在我が国ではまだ確立していないレーザーエネルギー標準について、これを確立するための方向性について議論する。最後に6節でこれらの調査研究のまとめを行う。

### 2. レーザー出力の測定原理

#### 2.1 レーザー出力測定についての概略

レーザーを測定する場合、レーザーの時間的な変化に関して一般に二つの場合が考えられる。すなわち、時間的に連続な波(CW; continuous wave)を扱う場合とパルス状の波(Pulse)を扱う場合である。CWの場合にはレーザーの特徴を表す単位系として平均パワーを表すワット[W]が用いられる。Pulseの場合には、一パルスあたりのエネルギーの総量であるジュール[J]、ピークパワー値[W]、パルス幅[s]、さらには、ある繰返し周波数の連続パルスレーザーに対する平均パワー[W]などがパルスレーザーの特徴を決める物理量として用いられる。レーザーの出力測定用語は、CWに対してはパワー[W]、パルスに対してはエネルギー[J]を指すが、両者は混同して用いられていることが多いようである。レーザー出力測定器に関して[W]を測定するものはパワーメータ、[J]を測定するものはエネルギーメータあるいはジュールメータと呼ばれている。

今日、使用されるレーザーの波長域は200nmの紫外域から1mm程度のミリ波領域まで広範囲に広がっている。表1に代表的なレーザーとその出力について示す。CWレーザーの出力範囲としては、 $10^{-12}$ ~ $10^5$ W、パルスレーザーのエネルギーとして

\*計測標準研究部門 電磁波計測科

表1 代表的なレーザとその出力

レーザ	発振波長	時間的	出力
He/Ne	632.8nm	連続	~50mW
Ar	488.0, 514.5nm 等	連続	~20W
CO <sub>2</sub>	10.6μm	連続 パルス	~50kW ~2J
N <sub>2</sub>	337nm	パルス	~10mJ
Excimer	157~351	パルス	~1J
ルビー	694.3nm	パルス	~400J
Nd:YAG	1064nm	連続 パルス	~600W ~150J
Ti:Sapphire	660~1180nm(可変)	連続 パルス	~5W ~1mJ
半導体	可視~赤外	連続	~1W

表2 レーザ出力測定法の原理と特徴

測定方法	原理	特徴
熱的	温度検出 電荷検出	熱電対, サーモパイル 焦電型
光電的	電子正孔対 二次電子増幅	PD, APD 光電子増倍管
化学的	銀塩反応	写真
非線形光学的	非線形光学効果	
機械的	放射圧	

は10<sup>3</sup>J, ピークパワーとしては10<sup>12</sup>W に達する.特に近年では Chirped pulse amplification(CPA)によるフェムト秒(fs=10<sup>-15</sup>s)程度のきわめて短い時間幅を持つレーザパルスが開発され,民生用に応用されつつある.

レーザ出力を測定する原理としては,多様な出力形態をもつレーザに応じて多種の方法が考案されている.表2にその原理をまとめる.初めてレーザ発振が確認された1960年から1973年ごろまでのレーザエネルギーとパワーの測定方法については,文献<sup>1)</sup>にまとめられている.本章では,開発初期に用いられた古典的なレーザ測定法から近年の最新の光測定技術までを概観し,その特徴や問題点について述べる.

## 2.2 熱型検出

熱型検出は,レーザ光を反射の少ない物質に吸収させ熱に変換し,その温度の上昇を用いて測定を行う方法である.このような温度を測定原理に用いる検出器は,カロリメータと呼ばれる.熱型検出の基本的な方法を図1に示す.温度の変化は,熱電対や半導体の抵抗変化などを利用して検出する.この測定器は構造が比較的簡単であるため市販のレーザ測定器にも数多く用いられている.また2.3節で述べる光電型と比べて感度の波長依存性がないため,広範囲な波長領域で使用できるのが特徴である.入射レーザ光の絶対量を測定するた

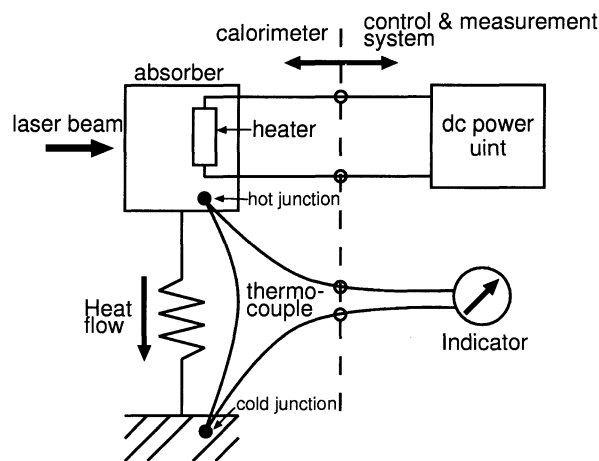


図1 熱型検出の原理

めには,光エネルギーによる熱と電気的な熱を比較して求められる.すなわち,吸収した光の熱エネルギーにより生じた温度上昇を計測し,この温度上昇を生じさせるのに等しい熱エネルギーをヒータ等に直流電力を電気的に加えることにより入射した光のエネルギーを見積もるという方法である.この直流電力置換法を用いると熱を媒介としてレーザパワーと電気パワーを容易に結びつけることが可能となるため,絶対値計測の手法として現在広く用いられている.光のパワーと電気的なパワーが一致する,すなわち両者の等価性が成り立つためには,全ての光のエネルギーが受光器で吸収されることが必要である.

図2に代表的なカロリメータの分類を示す.受光部の吸収体の形状で大別すると面吸収(Surface absorption)と体積吸収(Volume absorption)に分けられ,用途に応じて様々な形状のカロリメータが開発されている.本節では,これら国家計量機関で用いられている多様な熱型のカロリメータの種類や具体的な構造について調査した結果を述べる.

### 2.2.1 コーンカロリメータ

コーンカロリメータ(Cone calorimeters)は,主としてパルスレーザのエネルギー測定用に1960~1970年代に開発された検出器である.この検出器の光吸収体は円錐型の独特な形状をしており,レーザ入射時の吸収体の温度上昇を熱電対で測定しレーザエネルギーの評価を行うものである.コーン形状の吸収体では,円錐の開口部から入射した光は内部で数回反射されるため,同じ開口面積を持つ単一円盤状の吸収体と比較して全体の光吸収率を大きくできるという特徴がある.コーンの軸に平行なビームが開口角 $2\theta$ のコーンに入射した場合,内部でレーザが反射する回数 $n$ は,

$$n = \frac{\pi}{2\theta} \quad (1)$$

と表される<sup>2)</sup>.よって,開口角 $\theta$ をなるべく小さくし $n$ を大き

分類		形状		備考
面吸収 (surface absorption)	ディスク型 (disc type)			<ul style="list-style-type: none"> <li>○構造が単純</li> <li>○感度良好</li> <li>○時定数：短いもの可</li> <li>○吸収率，耐パワー性に観点</li> </ul>
	多重反射型 (multi-reflection type)			<ul style="list-style-type: none"> <li>○耐パワー性大</li> <li>○大出力カロリメータに適している</li> <li>○吸収率が高い</li> <li>○波長依存性良好</li> <li>○時定数は長い</li> </ul>
体積吸収 (volume absorption)	固体			<ul style="list-style-type: none"> <li>○耐エネルギー性大</li> <li>○時定数が長い</li> <li>○形状が任意に選べる</li> <li>○波長依存性が大きい</li> <li>○流体式は冷却が容易(フロー式)</li> <li>○直流置換がむずかしい</li> </ul>
	液体			
	気体			

図2 代表的なカロリメータ

くして多数回反射させたほうが光の吸収率が高まり、検出の絶対精度が向上する。例えば、コーンの材質をグラファイトとした場合、反射率  $R$  は0.25程度であるが、コーン内部で  $n=4$  回反射させるとその吸収率は  $1-R^n \sim 0.9961$  となりほぼ全てのエネルギーを吸収できることになる。また、多数回反射させると一回あたりの吸収エネルギー密度を低くすることが出来る。このことは特に測定対象がパルスレーザーの場合、吸収体の損傷を防ぐという意味からも重要である。コーンの材質としては内部をNiメッキしたもの<sup>2)</sup>、金属の薄膜<sup>3)</sup>、あるいはグラファイト<sup>4)</sup>等が使用され、またキャビティを真空中あるいは真空中<sup>5)</sup>において動作させるなど様々な検出器の作成が試みられている。

英国国立物理研究所(NPL; National Physical Laboratory)のEdwardsは、開口角  $\theta=21^\circ$ のグラファイトからなるコーンカロリメータを用いて、パルスレーザーエネルギーの絶対値測定を試みている<sup>4)</sup>。このカロリメータは8対の熱電対からなり、感度は  $400\mu\text{V}/\text{J}$  である。グラファイトのコーンに付与したエネルギーが全体に拡散するのに数秒程度の時間を必要とするため、検出器の応答時間は90秒と比較的に長めに設計されている。波長  $1.06\mu\text{m}$ 、エネルギー  $1\text{J}$ 、パルス幅  $400\mu\text{s}$  のレーザーパルスに対して、4%以下の確度で絶対値を評価できると見積もっている。グラファイトのレーザー光の反射率と比較的遅い熱緩和時間が確度を悪くしている主因であると報告している。

### 2.2.2 円盤型カロリメータ

円盤型カロリメータはディスクカロリメータ(Disc calorimeter)とも呼ばれ、円盤状の吸収体と温度計からなる測定器である。Discには通常は表面を黒化処理した金属板が用いられる。NPLのPrestonは、直径10mm、厚さ0.1mmの銅のディスクで作成した熱電対によるカロリメータについて報告している<sup>6)</sup>。このディスクは25対のニクロム系の熱電対の上に設置され、周りは厚い金属からなるジャケットで覆われている。この検出器はCWとパルスの両方を測定できるように設計されているが、パルスレーザーに対する応答はレーザーのパルス幅で異なってくるため波高値からエネルギーへの修正が必要となる。銅ディスクの表面は3M社のNextelブラックペイントで黒化され、その光吸収率は95~97%である。このブラックペイントの損傷の問題から測定できるレーザー出力に上限があり、出力はCWに対し200mW、Q-switchedパルスに対しては20mJに制限されると報告している。

一方、米国AERLのJacobらは、CO<sub>2</sub>レーザーの出力測定を行うため、アルミニウム板を吸収体としたカロリメータを用いてエネルギーの絶対値測定を試みている<sup>7)</sup>。この吸収体の両面には、陽極酸化法により厚さ2.5 $\mu\text{m}$ 程度の酸化膜が形成されている。この酸化膜を作成したアルミニウム板の鏡面反射係数は8.5~11 $\mu\text{m}$ の波長域で最小値となるため、波長10.6 $\mu\text{m}$ のCO<sub>2</sub>レーザー光が選択的に吸収されることになり吸収体としては非常に都合が良い。ディスク内の応答の分布を一様にするため冷却時定数を10分以上と長く設計しているのが特徴である。入射するレーザーのパルス幅とディスク表面から熱伝達

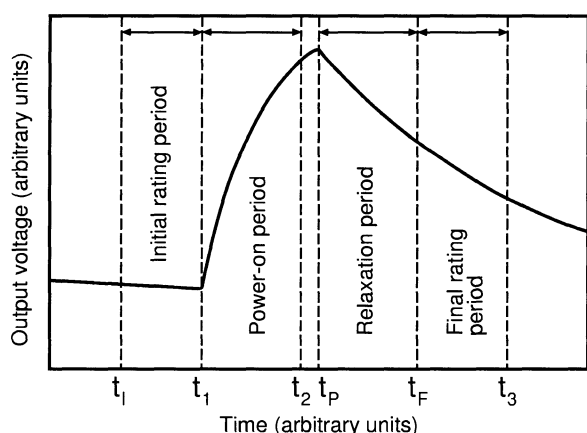


図3 熱電対出力の時間応答波形例

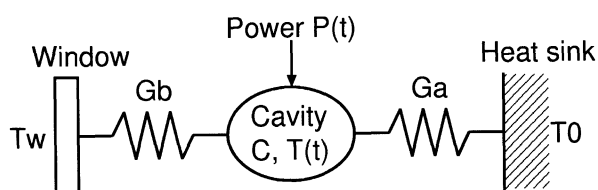


図4 Zhang らによるカロリメータモデル<sup>11)</sup>

により失う熱量と輻射により失う熱量について詳細に取り扱い、パルス幅が100 $\mu$ s 以下の場合には理論的にこれらの効果は全体の不確かさに影響がないと述べている。

### 2.2.3 キャビティ型カロリメータ

キャビティ型カロリメータは、受光部が円筒の端面を閉じた構造の吸収体を持ち、底面に入射した光が鏡面あるいは拡散反射する光を円筒の壁面で再吸収させて光の吸収率を最大限にまで高めたものである。ディスクカロリメータでは反射によって失ったエネルギーは全てロスすることになるが、キャビティ型の構造の場合は底面の吸収部で反射した光は数回にわたり壁面で反射するため光の吸収率をほぼ1にすることができる。キャビティの光の吸収率が高いことは、パワーの絶対値計測の不確かさを小さくする上で重要である。

キャビティ型カロリメータは、米国国立標準技術研究所 (NIST; National Institute of Standards and Technology) が、C-series と呼ばれる独自のカロリメータ開発を1970年代に行っており<sup>9)-10)</sup>、現在でも校正を行う標準器として使用されている。この測定器の構造は、受光部であるキャビティの周辺を温度安定化した定温の3重のジャケットで囲み、さらに真空によってキャビティ周囲を断熱した構造となっている。このジャケットにより、キャビティ温度は熱平衡状態では常に一定の温度に保たれることになる。このことから、この測定器は Isoperibol calorimeter (等温環境熱量計)とも呼ばれている。絶対測定の実理は、真空を隔てる入射窓からレーザーを

既知の時間 ( $t_p = t_1 \sim t_2$ ) だけ照射し、そのときのキャビティ温度の過渡的な温度変化を測定する(図3)。この過渡的な信号波形の減衰時間や温度変化からレーザーエネルギーの絶対値を導出する。この測定器は基本的にパルス的にレーザーを入射させた時の総エネルギー量を評価するものである。連続光を測定する場合にはチョッパーや E/O 変調器等で連続光を単一パルス化し、測定したエネルギーをレーザーの入射時間  $t_p$  で割って、その間の平均レーザーパワーとして評価する。

デバイスの信号応答特性について、当初、West らは熱力学第一法則から導出していたが、Zhan らはキャビティと窓の間の熱的な結合も考慮した図4のような単純なモデルを提案し<sup>11)</sup>、このモデルを基にして信号応答の考察を行っている。ここで、 $G_a$  と  $G_b$  はそれぞれキャビティとヒートシンク間、キャビティと窓間の熱コンダクタンスである。図4のモデルの場合  $E$  は、

$$E = F \left[ (V_F - V_I) + \alpha \int_{t_1}^{t_F} (V - V_\infty) dt \right] \quad (2)$$

で与えられる。ここで、 $V_\infty$  は定常状態 ( $t \rightarrow \infty$ ) の時の熱電対出力、 $F = C/b$  は校正係数 ([J/V])、 $\alpha = G/C$  は冷却時定数 ([1/s]) である。 $C$ 、 $b$ 、 $G = G_a + G_b$  はそれぞれキャビティの熱容量 ([J/K])、熱電対感度 ([V/K])、熱コンダクタンス [W/K] である。式(2)中の添え字  $F, I, 1$  は、図3中の時間に対応した熱電対の出力電圧を示す。式(2)の  $t_p$  は、レーザー入力を止めた後の十分な時間が経過した時刻が選ばれる。これは、レーザー加熱直後はキャビティ内に温度分布が生じているため、冷却過程が必ずしも単一の時定数で減衰するとは限らないためである。しかし、十分な緩和時間を経過した後は、その温度分布がキャビティ温度  $T$  とヒートシンクの温度  $T_0$  の間の温度差  $\theta = T - T_0$  よりも十分小さくなるため、図3のモデルでの冷却過程は、

$$\frac{d\theta}{dt} = -\alpha(\theta - \theta_\infty) \quad (3)$$

と近似できることになる。この式の厳密な導出は、West<sup>9)</sup>らによって与えられている。式(2)を用いての実際の校正の方法は以下のとおりである。レーザー入射によって測定された波形  $t_1 < t < t_2$  の領域からベースラインを求め、 $t_2 < t < t_3$  の領域を用いて冷却時定数  $\alpha$  を評価する。校正係数  $E$  は、既知のエネルギーを電気的に入力したときの応答から決定する。以上、 $F$ 、 $\alpha$  の二つのパラメータを用いて式(2)によりレーザーエネルギー  $E$  を評価する。

NIST では、0.5J 以上のエネルギーや短波長のパルスレーザーの測定用に C-series を改良した Q-series や QUV-series と呼ばれる Isoperibol 型カロリメータの開発も行われている<sup>12)</sup>。この検出器の動作原理、構造、校正方法などほぼ C-series と共通であるが、キャビティ内にガラスによる体積吸収体を用いている点が異なっている。これは、金黒などによる表面吸収体では、パルスレーザーの高ピークパワーで損傷してしまうためである。

フロリダ大学の Chen らは、キャビティの熱伝導方程式を有限要素法コードで解くことで、QUV-series の光パワー入力と電気的なパワー入力の等価性について解析している<sup>13)</sup>。三次元モデルでキャビティと雰囲気ガスとの熱伝達、背景への熱輻射を考慮してキャビティ内部の温度分布について考察したところ、光と電気の非同一性は0.4%であったと報告している。

#### 2.2.4 液体吸収カロリメータ

この節では体積吸収体カロリメータの例として、液体吸収カロリメータについて述べる。レーザー開発の初期に NBS (現 NIST) の Jennings は液体を封入したディスク状のセルを吸収体とした測定器を作成しレーザーパルスエネルギーの絶対値評価を行っている<sup>14)</sup>。この吸収セルは、直径3.17cm、厚さ3mmで銀でハウジングされたセルの中に CuSO<sub>4</sub> 水溶液を満たしたものである。温度は一對の Cu/コンスタンタン熱電対で測定する。レーザーは前面の窓から Brewster 角で入射させる。波長694.3nm のパルスレーザーに対して確度は0.7%であり、エネルギー30J (ルビーレーザー)、ピークパワー200MW (Q-switched) に対しても使用できると報告している。液体吸収のカロリメータは、蒸発のような相転移が起こらない限りは高いエネルギー密度で使用できるのが特徴である。

#### 2.2.5 極低温放射計

極低温放射計 (CR; Cryogenic radiometer) は、受光部である吸収体と温度計を4.2K 程度の極低温にまで冷却したカロリメータである。レーザー計測ばかりではなく、光の放射量を測定する目的で使用されることが多いため、カロリメータではなく放射計として呼称されることが多い。検出器を低温で動作させると以下のような点で有利となる。金属を冷却するとその電子比熱  $c$  は温度  $T$  に比例して小さくなる。よって、同じエネルギー付与  $E$  に対しても温度上昇  $\Delta T = E/\rho c$  は大きくなる。これは、感度の点では有利な特性である。また、銅の熱伝導率  $\lambda$  は10~20K の極低温付近に極大値を持ち、常温よりも10倍以上大きくなる。低温では比熱  $c$  が小さくなることも考慮すると、銅の4.2K での熱拡散定数  $D = \lambda / \rho c$  は常温と比較して1000倍以上も向上する。このことは、極低温では熱の拡散が速やかに行われることを意味し、レーザーパワーと DC パワーの置換特性が著しく向上することになる。NIST の Libigni らは、CR の熱的な特性を商用の有限要素法コードで計算し、光と DC パワーの等価性は最も悪い条件でも  $4 \times 10^{-6}$  以内の誤差で一致すると報告している<sup>15)</sup>。

低温での温度の計測には、高濃度にドーピングした Si や Ge による抵抗性半導体を使用される。一般に半導体の電気特性は極低温ではほとんど絶縁体であるが、高濃度にドーピングした半導体は内部に作られる不純物準位によりホッピング伝導を示し低温でも大きな抵抗変化を示すようになる。この特性を利用して極低温でも動作する温度計として利用される。光パワー入射による温度上昇は、受光器に取り付けたヒータで電気的に与えるパワーで置換測定される。

NPL の Martin らは放射量の絶対値測定に CR を初めて適用し、NPL におけるカンデラの物理量計測の一次標準器としての可能性の検討を行っている<sup>16)</sup>。この CR は、室温からの輻射をシールドするために低温槽に円筒状の放射トラップ (radiation trap) を設けており、レーザー光は Brewster 角で窓より入射して放射トラップを経由し低温槽のキャビティ型の受光器へと導かれる。このキャビティには、上部と下部にヒータが巻き付けられており、それぞれのヒータを用いてキャビティの置換特性を調べたところその差は50nW 以下であったと報告している。また、強度を安定化させたレーザー光を用いて測定した結果では  $4 \times 10^{-5}$  の不確かさが実現できると報告している。

CR の極めて小さな不確かさを利用して、Stefan-Boltzmann 定数自身の決定に CR を適用しようという試みも行われている<sup>17)</sup>。これには、CR と黒体炉を結合し、既知の面積  $S$  を持つアパーチャーを通してある既知の温度  $T$  から放出される放射量  $M(T)$  を測定する。黒体の放出率を  $g$  とすれば、Stefan-Boltzmann 定数  $\sigma$  は  $\sigma = M(T)/T^4 g$  として求められる。NPL の Martin らはこの方法を用いて  $\sigma$  の決定を行い、 $12 \times 10^{-6}$  の不確かさで  $\sigma$  を決定できると報告している<sup>18)</sup>。現状では放射トラップが不確かさの大きな要因であり、今後放射トラップの構造を改良すれば不確かさはさらに小さくなる可能性があると報告している。

以上のように CR は高精度に測定を行うことが可能なため、各計量機関で一次標準器として開発や運用が行われている。NIST では、HACR (High Accuracy Cryogenic Radiometer)<sup>19)</sup> と LOCR (Laser Optimised Cryogenic Radiometer)<sup>20)</sup> の二つの CR が一次標準器として用いられている。前者の HACR は、Gaithersburg の光技術部門のグループが開発を行っているものであり、校正器のスペクトル感度測定や光放射量測定などに用いられている。装置自身は文献<sup>16)</sup> の NPL のグループが作成したものをベースとしている。一方、後者の LOCR は Boulder の光エレクトロニクス部門のグループが研究開発しているものであり、レーザーパワーやエネルギー測定に用いられている。この装置は、イギリス CRI 社の製品をカスタムデザイン<sup>21)</sup> したものを使用している。NIST ではこれら二つの CR を Si トラップ検出器を用いて内部比較を実施し、両者の校正係数が0.04%ほど異なったものの不確かさの範囲内で一致したと報告している<sup>22)</sup>。ドイツの物理工学研究所 (PTB; Physikalisch-Technische Bundesanstalt) では、Stock らにより CR を頂点とした放射量やレーザーパワーのキャリアレーションチェーンの構築が1993年より行われており<sup>23)</sup>、さらに液体 He の寒剤のいらぬ機械式冷凍機を用いた CR の開発も行われている<sup>24)</sup>。文献<sup>23)</sup> では、Brewster 窓の反射率の温度依存性、キャビティの吸収率、入射ビーム発散光の影響など、様々な不確かさ要因について詳細に検討されている。特に、発散光の影響は大きく検出器の測定位置によって  $240 \times 10^{-6}$  の誤差が生じる可能性があることを指摘している。そこで、トラップ検出器などの仲介器を排除し、測定条件が両者で同条件に行えるような測定システムをクリーンルームの清浄環

境で構築している<sup>25)</sup>。液体 He 冷却型と機械式冷却型の二つの CR で内部比較を行ったところ、両者の相対誤差は $32 \times 10^{-6}$ であり、結合不確かさは現状では最も低い値 $40 \times 10^{-5}$ を達成したと報告している<sup>24)</sup>。また、オランダの NMI-VSL 研究所では、 $1 \mu\text{m}$  から  $20 \mu\text{m}$  の波長領域で光源のスペクトル感度の決定を行うのに、CR が用いられている<sup>26)</sup>。また、スペインの IFA-CSIC では、 $230 \sim 400\text{nm}$  の領域で He-Cd レーザの UV 発振波長の絶対感度校正や、 $1300 \sim 1550\text{nm}$  の領域でのレーザダイオードの絶対パワー計測に CR が用いられている<sup>27),28)</sup>。各国とも、CR はその高い精度から基盤となる一次標準器として使われるため、国家間の国際比較も盛んに行われている<sup>29),30)</sup>

### 2.2.6 ポロメータ

ポロメータはカロリメータと同じく熱型の検出器である。カロリメータとの違いは、吸収体の熱容量のほとんどが温度に感度のある抵抗体で構成されているときに、特にポロメータと呼ばれる<sup>1)</sup>。すなわち、ポロメータでは、温度センサ自身が光の吸収体として機能することになる。温度センサとしては金属や半導体、超伝導体などが用いられ、センサ自身が発熱して自らヒータとしての役割を果たすことも多い。ポロメータの吸収体の構造は、円盤型、コーン型等、様々である。ポロメータ検出器は、赤外線検出、遠赤外線検出、X 線検出など、レーザ計測以外にも様々な分野に応用されている<sup>31)</sup>。ポロメータの動作原理やノイズ特性については Richard による文献<sup>32)</sup>や文献<sup>33)</sup>に詳細に述べられている。

レーザ計測の分野では、Blevin や Brown らが、面積  $1 \text{cm}^2$  の金属薄膜による高感度ポロメータを試作している<sup>34)</sup>。この金属膜は  $70\text{nm}$  のアルミニウム酸化物の上に  $40\text{nm}$  の金を蒸着しさらにその上に金黒を堆積させたものである。この検出器は、低エネルギーパルスや、チョップした CW レーザには有望であると考えられる。NIST では赤外領域での仲介器としてのポロメータ開発が行われている<sup>35)</sup>。この検出器は波長が  $1 \mu\text{m}$  以上のパワーを  $1 \mu\text{W}$  から  $1 \text{mW}$  まで直線性良く測定することを目的として開発されたものである。Si-PD はこのパワーレベルでは良い直線性を示すが、波長が  $1 \mu\text{m}$  以上では感度が大幅に低下し使用困難となる。そこで、金黒で表面を覆ったディスクで赤外光を吸収させ、そのときの温度上昇を Si による温度計でポロメトリックに読み出す方式を採用している。Si 半導体の抵抗値と温度は非線形な関係にあるため、従来、ポロメータの出力は入力パワーに対して非線形であった。しかしながら、文献<sup>35)</sup>では吸収体をヒータとして使用し、素子の温度が常に一定温度になるように入射レーザパワーをヒータ電力で置換させている。これにより、Si 半導体温度計の非線形効果は解消でき、入力パワーに対して高い直線性を確保するのに成功している。

### 2.2.7 焦電型測定器

焦電型検出器は PZT や  $\text{LiTaO}_3$ ,  $\text{PbF}_2$ , TGS, SBN などの結晶が示す焦電効果を利用した熱型の検出器である。これ

らの結晶は常温で自発分極をして、結晶表面が常に帯電した状態となっている。この表面電荷は空気中のイオンにより中和される。このとき、光入射により結晶中の原子が熱的に励起されると分極の構造が変わり表面電荷が移動する。この非平衡電荷を電圧あるいは電流信号として検出する。この分極構造の変化は極めて短い時間で起こるため、焦電型検出器は  $5 \text{kcps}$  程度のレーザ繰返し周波数まで検出することが可能である。電圧読み出しの場合、検出器の応答時定数は増幅器の入カインピーダンスと結晶の静電容量の積で決定される。焦電型検出器は、フォトリソグラフィにおけるパルスレーザの平均パワー測定や医療応用などの分野で近年市場が大きい。従来焦電型は、精度が他の熱型の検出器よりも悪い、寿命が短いなどの問題点があったが、近年では PZT 等の結晶作成技術が向上し、温度変化に対して安定で信頼性の高い素子が開発されている<sup>36)</sup>。

この焦電型検出器は、1970年代に NIST で仲介器として開発された例がある<sup>37)</sup>。この検出器は一次標準器のようにレーザパワーを電気的なパワーで校正する (ECPR; electrically calibrated pyroelectric radiometer) 機能も備えている。光パワーと電気パワーの間に高い等価性を確保するため、吸収体表面に金黒を塗布し光の吸収率を高めるとともに、それ自身を電気的なヒータとして使用しているのが特徴である。

### 2.3 光電型測定器

光電型測定器は、半導体などが示す光起電力効果を用いたものである。光が半導体中に入射すると、電子が励起され入射光パワーにほぼ比例した数の電子正孔対が生成される。この電子正孔対は不均一系半導体で構成した pn 接合によって拡散的に検出するか、あるいは pin 接合にして電界を印加しキャリアの移動を誘導電荷として検出する。半導体としてはシリコンやゲルマニウムなどがよく持ちいられ、これらにより作成した pn 接合、pin 接合のデバイスはフォトダイオード (PD) と呼ばれる。近年では、InGaAs といった三元系の半導体を用いた pin 接合も市販されている。

一般に、PD による光電型測定器は、感度が高く応答速度も速いため、 $\text{mW}$  以下のレーザパワー測定やパルス波形の測定に広く用いられている。しかしながら、PD は生成される電子正孔対の数が入射する光の波長に強く依存することから原理的に感度の波長依存性が大きく、波長域全域での校正が必要であること、受光面上の位置による感度の違いが大きいなどの短所がある。ETL の Inoue らは、PD を用いたパワーメータを校正する際、光源のスペクトル幅の広がりや PD 感度の波長依存性によって引き起こす不確かさへの影響について考察している<sup>38)</sup>。また、素子表面の保護膜や窓材により、光の入射角度により感度特性が変わったり、偏光特性が大きい場合があるので、測定に注意が必要である。

PD 感度の波長依存性の問題を解決するため、3 枚の PD を互いに直角に並べ表面から反射して逃げる光を別の PD へ導き受光するようなデバイスが考案されている<sup>39)</sup>。この検出器は、

トラップディテクタ (trap detector) と呼ばれ、空間、角度に対する均一性が良い、数百 nm の波長域に亘って量子効率が一樣などの特徴がある。トラップ検出器は特に一次標準器である極低温放射計で測定した値を高精度で他の検出器に値付けする仲介器として用いられることが多い。PD は原理的に入射光に対してリニアな応答を示すが、入射光量が大きくなると電流密度が多くなりすぎて量子効率が下がり、出力は飽和傾向になる。レーザーの場合は狭い範囲に高いエネルギー密度を持つため、この影響を強く受ける場合がある。PTB の Stock らは、試作した Si トラップ検出器に直径  $\phi = 3$  mm のビームを照射したところ、1 mW 以下のパワーでも量子効率は相対的な不確かさ  $10^{-4}$  ( $k=1$ ) で影響を受けると報告している<sup>40)</sup>。

## 2.4 その他の測定器

### 2.4.1 超伝導トンネル接合型

放射量測定用に高い感度を持つ光検出器として、超伝導トンネル接合型 (STJ; superconducting tunnel junction) の検出器が応用されている。STJ は、超伝導体の間に数 Å の薄い絶縁膜を挿入したものであり、超伝導体 (S) / 絶縁体 (I) / 超伝導体 (S) の通称 SIS 型と呼ばれる構造をしている。この SIS 構造では、超伝導転移温度  $T_c$  以下まで冷却すると、素子の電流電圧特性に超伝導体のギャップ  $\Delta$  に依存した電圧ギャップ電圧  $V_g = 2\Delta$  が生じる。超伝導ギャップ  $\Delta(T)$  は素子の温度  $T$  に対して、

$$\frac{\Delta(T)}{\Delta(0)} \approx 1.74 \left(1 - \frac{T}{T_c}\right)^{1/2} \quad (4)$$

の関係がある<sup>41)</sup>。イタリアの計量機関である IEN Galileo Ferraris の Monticone らはこの性質を応用し、STJ を用いた放射量の精密測定を試みている<sup>42)</sup>。面積  $20 \times 35 \mu\text{m}^2$  の Nb/Al-AlO<sub>x</sub>/Nb からなる SIS 接合を作製し、動作温度 4.2 K で  $\lambda = 690$  nm のレーザー光を照射したところ、感度  $R = 50$  V/W、応答速度  $\tau = 9.6 \mu\text{s}$ 、ダイナミックレンジ  $\sim 6$  桁の性能が得られたと報告している。

## 3. 諸外国の標準供給状況

本節では、現在諸外国で供給されているレーザーパワー/エネルギー標準について、主要な研究機関を取り上げて、その標準供給状況について述べる。わが国におけるレーザー標準供給状況については、4 節で改めて取り上げる。

### 3.1 NIST

光に関する標準について、NIST には Gaithersburg に光技術を中心とした部門と、Boulder に光エレクトロニクスを中心とした部門が存在する。レーザー標準は後者の部門で提供されており、本論文では、この標準について述べる。

NIST では、1970 年代に独自に開発したキャビティ型のカロリメータを基に、多様な波長とレーザーパワーの校正が行われている<sup>12)</sup>。CW レーザのパワーに対しては、波長 325 nm  $\sim$  10.6

$\mu\text{m}$  の主要なレーザー波長に対して、パワー 1 nW  $\sim$  900 W の範囲で標準が提供されている。1 W 以下のパワーの CW レーザの校正には 2.2.3 節で述べた C-series カロリメータが基本的に用いられる。校正の拡張不確かさは、0.5  $\sim$  1 % ( $k=2$ ) である。2 W 以上の高出力 CW レーザに対しては、K-series カロリメータが用いられる。この検出器は C-series を基に、ハイパワーに対応するため水冷の機構を持たせたものである。K-series の不確かさは、1.6% 程度である。NIST では極めて低エネルギーのレーザーパワーでも校正サービスを提供しているのが特徴である。

パルスレーザーのエネルギーに対しては、波長 193 nm, 248 nm と 1.06  $\mu\text{m}$  の波長に対して、エネルギー 1  $\mu\text{J} \sim$  300 mJ の広範な範囲での標準が提供されている。パルスレーザーに対しては、Q-series と呼ばれるキャビティ型カロリメータが使用されている<sup>43)</sup>。これは、Q-switched の Nd:YAG のような短パルス幅のレーザーでも測定が出来るように、C-series を改良してキャビティ内に体積吸収型の受光部を設置したものである。Q-series カロリメータを用いた校正の不確かさは、1.1% となっている。また、低エネルギーパルスでは、C-series のカロリメータも使用され、1  $\mu\text{J}/\text{pulse}$  のエネルギーでも標準を供給している。さらに、近年のフォトリソグラフィ技術の進展に向け、248 や 193 nm の短波長パルスレーザーにも対応できるように QUV-series カロリメータも開発され<sup>13)</sup>、校正サービスが行われている。このカロリメータは、Q-series をベースとして 1990 年代に開発されたものである。QUV-series の不確かさは 1% である。さらに、157 nm といったより短い波長を用いたフォトリソグラフィ技術に向け、SiC を吸収体とした新しいカロリメータを開発中である。

NIST では、レーザーに最適化した極低温ラジオメータ (LOCR) が開発され、高い不確かさが可能な状況にはある。しかしながら、現在のところ、LOCR は校正体系の中には組み込まれてなく、1970 年代に開発された技術がそのまま校正サービスに使用されているのが現状である。NIST では、この状況を改めるため、LOCR をトップに置いた校正チェーンの構築が行われつつあり、2004 年度中にはこれにより現在の半分の不確かさを実現したサービスを提供することが計画されている<sup>44)</sup>。

### 3.2 NPL

NPL では、1980 年代に開発された極低温放射計 (CR) を頂点として、熱電対カロリメータやコーンカロリメータを仲介器とした校正チェーンが構築されている。NPL では、1960 年代前半よりレーザーパルスの絶対エネルギー測定を目指した検出器開発の取り組みや、1980 年代には極低温放射計を世界で初めて開発するなど、先駆的な役割を果たしているのが特徴である。

パワーメータの校正体系は、NPL の一次標準器である極低温放射計から CW レーザを用いて出力 1 mW で熱電対型のカロリメータに移される。この検出器は本質的に可視光から近赤外まで一様な応答分布を示すため、校正波長以外の様々な

波長でCWパワー標準として使用される。1 mW 以外のパワーでは、精度良く減衰率を決定したチョッパーを用いて範囲の拡大を図っている。NPL ではCW レーザのパワーに対し、波長248nm~10.6 $\mu$ m の主要な5ヶのレーザ波長に対して、パワー10mW~10W の範囲で標準が提供されている。提供されている標準の不確かさは、出力1W で1.0%である。10.6 $\mu$ m に対しては、100W のパワーでの校正も可能で、この不確かさは2.5%である。

パルスレーザのエネルギーに対しては、波長266nm~10.6 $\mu$ m の主要な5ヶのレーザ波長に対して、エネルギー3 mJ~1 J の範囲で標準が提供されている。パルスエネルギーメータの校正には、コーン型カロリメータが使用される。極低温放射計で校正された熱電対カロリメータでCW レーザのパワーを精度良く決定し、このレーザを既知の時間シャッターを開閉してパルス化する。このレーザパルスのエネルギーは、パワーとシャッター開閉時間から決定できる。この既知のエネルギーを持つパルスレーザを仲介器であるコーンカロリメータに入射し感度を測定して値付けする。レーザパルスエネルギー標準では、1.5%の不確かさで校正サービスが提供されている。

### 3.3 PTB

PTB では、1990頃より厳格な校正体系が整備され、フォトメトリとレーザパワーが一体となった多段の校正チェーンが構築されている。最上位の一次標準器には、極低温放射計が置かれ、波長633nm、パワー1 mW、不確かさ0.01%で値を提供する。このパワーを順次、Si-trap やコーン型カロリメータへと移すことで波長やパワーの拡大を行う。PTB では、レーザ光だけでなく、SR 光やランプからの一次光をモノクロメータで単色化した光源を用いている。従って、波長とパワーに関してある決まった離散的な量の値ではなく、二つの物理量をパラメータとして連続的な範囲で校正が出来るのが特徴である。

PTB では上位の極低温放射計から下位の測定器へと仲介器を用いて値を移す際には、温度と湿度が制御されたクリーンルーム内で行い粉塵の影響を出来るだけ少なくする、標準器と仲介器が同じ光路を経てきたレーザ光を測定することで光の発散の影響を小さくするなど、精密な測定を行うための様々な努力がなされている。これにより、極低温放射計で得られる小さな不確かさをそれほど劣化させることなく波長とパワーの範囲を拡大することに成功している。PTB では、CW レーザのパワーに対し、波長350nm~10.6 $\mu$ m の主要な8ヶのレーザ波長に対して、パワー10 $\mu$ W~10W の範囲で標準が提供されている。この範囲での不確かさは0.05%である。波長1.064 $\mu$ m と10.64 $\mu$ m については、100W を超えるハイパワーの標準も提供されている。

パルスレーザのエネルギーに対しては、波長157nm~10.6 $\mu$ m の主要な9ヶのレーザ波長に対して、エネルギー10mJ~2 J の範囲で標準が提供されている。不確かさは0.4%~1.5%である。

## 4. NMIJ におけるレーザパワー標準

平成15年度現在、わが国におけるレーザパワーは、Ar レーザや He-Ne レーザといった可視域から半導体レーザの近赤外波長域でパワー標準が開発され、指定校正機関である財団法人日本品質保証機構(JQA)を通じてトレーサビリティが確立されている。現在、JQA にて供給されているレーザパワー標準は、波長488~1547nm、パワー10 $\mu$ m~200mW で、不確かさは0.3~1%である。レーザパワー標準、光ファイバーパワー標準ともに諸外国と比べても遜色のない不確かさで標準が供給されているのが特徴である。これらの標準の頂点にあるのがNMIJ/AISTにおける光パワー標準であり、波長632.8 nm、パワー10mW を通じてJQA に供給されている。NMIJ ではJQA 等に高精度な標準を継続的に供給するとともに、産業界のニーズに合った新しい標準を開発・提供していくことが求められている。本章では、これらNMIJ のレーザパワー標準器の現状やその取り組みについて述べる。

### 4.1 標準供給システム

NMIJ のレーザ標準供給を担う一次標準器は、高精度レーザカロリメータ(H-3)が用いられている。このH-3カロリメータの詳細は、文献<sup>(5)</sup>や文献<sup>(6)</sup>に記述されている。図5にこの高精度レーザカロリメータの構造と測定システムの概要を示す。受光部は吸収ディスクと円筒カバーからなり、キャビティ型の構造となっている。円筒の先端部と底部にヒータが取り付けられており、これらは反射した光パワーとDCパワーの等価性を評価するために用いられる。ディスク中央部のサーミスタは、ディスクで吸収した光パワーとDCパワーの置換誤差を評価するためと、レーザの入射位置を決定するために用いられる。さらにディスク背面のヒータは、光パワーとDCパワーを置換するために用いられる。これらの受光部は、二つの温度検出素子と一つの冷却素子を介して温度一定のヒートシンクに接続されている。冷却素子は受光部を冷却し、温

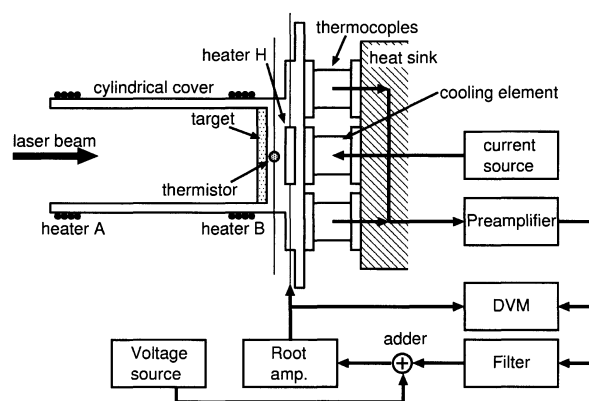


図5 H3レーザカロリメータの受光部



度検出素子は受光部とヒートシンク間の温度差を検出する。冷却素子と検出素子には、どちらも厚さ 3 mm, 大きさ 4 mm 角の Bi-Te による熱電モジュールが使用されている。ヒートシンクは銅で作成され、受光部全体を覆っている。さらにその外側にアルミニウムによるジャケットが二重に覆われている。この 3 重のジャケットにより、ヒートシンクは 1°C の外気温変化に対し 10<sup>-6</sup>K の温度変化に抑えられる。吸収ディスク表面には、3 M Nextel による黒色のコーティングがなされている。このコーティングの反射率は、波長 400~1500nm で 2.5~3.0% である。キャビティ全体の反射率としては、前面に pin-PD を置きレーザーを入射させて測定したところ 0.1% 以下であると求められている。

レーザーカロリメータの測定原理は、以下のとおりである。まず測定するレーザーパワーよりも大きな冷却パワー(1.2~2 倍程度)を冷却素子に加える。これにより受光部は冷却し始めるが、受光部とヒートシンク間に生じる温度差を検出し、この差がゼロとなるようプリアンプ、フィルタ、加算器、およびルートを通してヒータ H を加熱する。これにより、冷却パワーとヒータの Joule パワーがバランスするよう形で温度平衡が成立することになる。この等温制御の条件下でレーザーパワーを入射すると、平衡が破れ、受光部の温度が上昇し始める。ところが、この温度差はフィードバック制御によりヒータ H の DC パワーが減少することで補償され、最終的にはレーザーパワーとヒータパワーの和が冷却パワーとバランスするよう形で再び温度平衡となる。この時、入射レーザーパワーはヒータ H の DC パワーの変化から測定できることになる。

入射レーザーパワー  $P$  のうち、ディスクで吸収されるパワーを  $P_d$ 、ディスクを反射し円筒カバーで吸収されるパワーを  $P_s$ 、最終的に漏洩するパワーを  $P_r$  とすると、次式が成立する。

$$P = P_d + P_s + P_r \quad (5)$$

各パワーは受光部を温めるがこの温度上昇が全て冷却のパワーに費やされるわけではなく、一部のエネルギーは熱伝達や熱輻射によって受光部内の空気や周辺部へと散逸する。そこで、パワーのうち冷却素子によって補償される割合を  $k$  で表す。

レーザーパワーを加えていないときのヒートバランスは、

$$k_h P_{h1} - P_c = 0 \quad (6)$$

と表せる。ここで、 $P_{h1}$  はヒータパワー、 $P_c$  は冷却パワーである。レーザーパワーを加えたときは、ヒータパワーを  $P_{h2}$  として、

$$k_h P_{h2} + k_d P_d + k_s P_s - P_c = 0 \quad (7)$$

と表せる。ヒータの DC 置換パワーを  $P_h = P_{h1} - P_{h2}$  とすれば、式(5)、(6)、(7)から次式を得る。

$$P = P_m + \left(1 - \frac{k_s}{k_d}\right) P_s + P_r \quad (8)$$

表 3 Detector performances of H3 calorimeter

Responsivity	
heater power	0.211mV/mW
cooling power	0.102mV/mA
thermistor	6.27mV/K
Time constant	
intrinsic	35sec
with feedback	5 sec
Thermal conductance	1.67mW/K
Noise equivalent power	13nW

ただし、

$$P_m = K \frac{k_t}{k_d} P_h, \quad K = \frac{k_h}{k_t} \quad (9)$$

である。 $P_m$  は、ディスクで吸収されたレーザーパワーのうちヒータの変化量として補償される量を表す。 $K$  は、ヒータ  $H$  とサーミスタの置換係数の比であるが、実験により求めることができる。

NMIJ で実際に使用されている H-3 カロリメータの基本特性を表 3 に示す。検出器の最小検出パワー  $P_n$  は、 $P_n = V_n \times G_t / S_t$  として計算できる。ここで、 $V_n$  は検出器出力の雑音レベル (V)、 $G_t$  は熱コンダクタンス (W/K)、 $S_t$  は感度 (V/K) である。H-3 レーザーカロリメータの  $P_n$  は、13nW と見積もられる。この値が測定可能なレーザーパワーの下限を決めることになる。また、等温制御によるフィードバック制御により時定数は 35s から 5s へと高速化されている。

#### 4.2 校正不確かさ

NMIJ で特定二次標準器などの DUT (DUT; Device Under Test) を校正する手順は以下のとおりである。(A) 安定化レーザー出力を特定一次標準器で測定し、そのパワーを決定する。(B) 同レーザー条件で DUT を測定し、その感度(校正値)を決定する。(C) 引き続き A, B の測定を何度か繰り返しそのばらつきを評価する。

このような手順で決定した校正値に対し、その値がどの程度まで信頼できるのかを表す指標として「不確かさ」が用いられる。この不確かさは上の測定手順の場合、特定標準器によるレーザーパワー測定に起因した不確かさ、DUT のレーザーパワー測定に起因した不確かさ、比較による測定値のばらつきなどが要因として考えられる。本節では、これらの不確かさ要因について概観する。

##### 4.2.1 特定標準器に起因した不確かさ

特定標準器に起因した不確かさとは、標準器で測定した安定化レーザー出力のパワー値がどの程度の信頼性を持っているのかの指標を与えるものである。

NMIJ の一次標準器である H-3 カロリメータによるこの不確かさ要因について見積もるため、まず系統誤差について考察する。式(8)より、系統誤差  $\varepsilon$  は、

$$\epsilon = \frac{dP}{P} = \frac{dP_m}{P} + \left(1 - \frac{k_s}{k_d}\right) \frac{dP_s}{P} + \frac{dP_r}{P} \quad (10)$$

と表せる。式(10)は第一項からそれぞれ、レーザーパワーの等価性誤差(disk)、キャビティ円筒部の等価誤差(cover)、反射漏洩パワー誤差(reflection)を表す。これら誤差項の詳細な導出方法は、文献<sup>45)</sup>に述べられている。各レーザーパワーにおけるこれら誤差要因の寄与と、さらに他の系統誤差要因としてディスク内の面感度誤差(uniformity)、制御偏差(control)、DC測定器誤差(DC instrument)を考慮したものを表4に示す。最終的な特定標準器の合成標準不確かさはレーザーパワー1mWで±0.054%(k=1)となる。

#### 4.2.2 DUT に起因した不確かさ

DUT に起因した不確かさとは、既知のパワーを持つレーザー出力をDUTに与えたとき、その感度の測定値がどの程度の誤差範囲にあるかということを表すものである。この不確かさは、DUTの特性に大きく依存する。一例を表5のDUT欄に示す。表中のDUTは、レーザーパワーを電気的なヒータで置換するタイプのカロリメータであるが、ヒータパワーのDC測定誤差からくる不確かさが一番の要因となっている。

表4 標準器不確かさ要因(P=1mW)

Error factor	Error
repetition (n=5)	0.011%
disk	0~-0.070%
cover	0~-0.110%
reflection	0~-0.080%
uniformity	0.051~-0.043%
control	±0.002%
DC instrument	±0.030%
overall uncertainty	0.054%

表5 拡張不確かさ

要因	TYPE	確率分布	不確かさ
特定標準器	B	1σ	0.054%
DUT			
DC測定器	B	1σ	0.030%
感度均一性	B	一樣	0.017%
制御偏差	A	正規	0.008%
経時変化	B	一樣	0.021%
測定ばらつき	A	正規	0.019%
Aタイプ			0.014%
Bタイプ			0.068%
結合不確かさ			0.069%
拡張不確かさ			0.135%

#### 4.2.3 拡張不確かさ

一次標準器とDUTにそれぞれ起因した不確かさと繰り返し測定による測定値のばらつきを合わせて、最終的に拡張不確かさが求められる。表5に示すように、NMIJで提供しているパワーP=10mW、波長λ=633nmにおけるパワー測定の拡張不確かさは0.135%(k=2)となる。これは、諸外国と比べても十分小さな校正の不確かさが実現されていると言える。

#### 4.3 レーザカロリメータのさらなる高精度化

NMIJにおけるH-3レーザーカロリメータの誤差で一番の大きな要因は応答の非一様性から来る面感度誤差であるが、二番目に大きいのは反射漏洩誤差である。これは、吸収ディスクのNextelコーティングの反射率が3%と大きいことが本質的な原因である。このような観点から、JQAのMiyawakiらはより小さな反射率を持つニッケル燐(NiP)吸収体を用いてカロリメータの更なる高精度化を図っている<sup>47)</sup>。この吸収体は、燐酸と硝酸ニッケルの溶液中に銅等の基板を浸し無電解めっきによりNiを数μm積層させた後、硝酸等で表面を適当な時間エッチングして黒化処理したものである。NBSのC. E. Johnson<sup>48)</sup>は、この黒化処理により表面には多数の突起状の構造物が形成され、入射した光がこの構造物表面で多重反射を起こすことで光の吸収率が著しく増大すると報告している。エッチング条件を最適化することで、400nm~2μmの波長の光に対して0.1%以下の全反射率を持つNiP吸収体の作成も実現されている<sup>49)</sup>。MiyawakiらはこのNiP吸収体を用いて850nmのレーザー光に対する全反射率測定を積分球とPDの二つの方法にて測定したところ、その標準偏差は0.02%であったと報告している。この結果を受け、NiP吸収体によるレーザーカロリメータを試作し評価したところ、0.05%(k=2)の拡張不確かさが得られたと報告している。これは、極低温ラジオメータにも匹敵するほどの不確かさであり、驚異的な結果である。

#### 5. レーザエネルギー標準

##### 5.1 エネルギー標準確立に向けて

レーザー関連の基本量として、パワー[W]とエネルギー[J]の二つはレーザーを特徴付ける最も基本的な物理量である。しかしながら、現在我が国ではエネルギー標準は確立されてなく、レーザーの物理量を関連付けるのに、いわば片手落ちの状態が続いてきた。レーザーエネルギー標準は、産業界などで加工用に使われているYAGレーザーなどのパルスレーザーを対象として特に需要が高く、標準整備計画に従い早期確立が求められているのが現状である。そこで、本章ではエネルギー10mJ、パルス幅10ns、波長1064nmのレーザーパルスを対象として、エネルギーの標準確立を行ううえで必要とされる事項や問題点について考察する。

##### 5.2 エネルギー校正方法

一般にパルス発振レーザーのエネルギー安定性は数%程度で

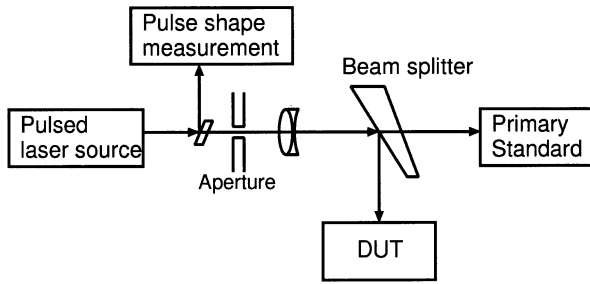


図6 レーザエネルギー校正システム

あるため、固定したエネルギーを持つレーザーパルスを得ることは難しい。そこで、ある既知の分岐比を持つビームスプリッターでパルスを二つに分けて同時測定を行うことで校正する比較方法をレーザーパルス標準の校正に用いることを検討している。この比較方法を図6に示す。ビームスプリッターで分割したビームのうち、一方に標準器、もう一方に被校正器(DUT)を設置する。レーザーパルスを入射させ標準器でそのエネルギーをある不確かさで評価する。DUTに入射したエネルギーは、標準器のエネルギーとスプリッターの分岐比から求めることが出来る。この絶対エネルギーに対するDUTの応答感度から校正係数が決定される。

このような校正システムを実現する上で技術的に問題となる事項として、(A)ビームスプリッターの分岐比決定の不確かさと(B)エネルギー絶対計測を行う標準器の性能の二つが重要になると考えられる。次節以降、これらの事項について検討する。

### 5.3 分岐比の不確かさ

校正システム全体の不確かさは、標準器の不確かさとビームスプリッターの分岐比の不確かさでほぼ決定される。高い校正精度を保つためにも、スプリッターの分岐比測定の不確かさは小さいことが望ましい。文献<sup>50)</sup>ではQ-switched Nd:YAG 1.064 $\mu\text{m}$ による短パルス幅レーザーに対しての分岐比を報告している。このNBSによる分岐比の結果を表6に示す。このスプリッターの材質は石英、wedged角は2°であり、一回の反射で約30分の一に減衰する。表6よりこのスプリッターは主要な反射に対して、0.1%程度の十分小さな不確かさでパルスビームの分岐比を決めることが可能であることが分かる。

表6 Beam splitter attenuation ratios at 1.064 $\mu\text{m}$

Beam path	Beam ratio relative to (m=0)	Total max. uncertainty (%)
m = -1	28.68	0.11
m = +1	30.12	0.04
m = 2	897.5	0.08
m = 3	2664	0.69

### 5.4 エネルギー絶対計測

次に、本節では分岐したパルスレーザーのエネルギーの絶対計測を行う一次標準器に要求される特性について述べる。

#### 5.4.1 光エネルギー置換特性

レーザーパルスの場合、短いパルス幅の中にエネルギーが圧縮されているため、レーザーを計測する上でCWと異なった新たな問題が生じることが多い。パルスレーザーのエネルギー  $E = 10\text{mJ}$ 、パルス幅  $\tau_p = 10\text{ns}$  とすると、矩形パルス形状のピークパワーは1MWにまで達する。このようなパワーのレーザーを照射した場合、測定器の吸収体の損傷が問題になってくる。NBSのFranzenらは、吸収体表面にNextelコーティングを用いたときの1.06 $\mu\text{m}$ 、 $\tau_p = 30\text{ns}$ に対する損傷の閾値を測定している<sup>43)</sup>。このコーティングは、NMIJの特定標準器であるH-3カロリメータと同等のものである。文献<sup>43)</sup>では、閾値は0.16~0.28J/cm<sup>2</sup>と報告している。これは、ビーム径を $\phi 1.5\text{mm}$ とすると5mJのエネルギーに相当する。従って、10mJやあるいはハイパワーのレーザーパルスの吸収体としてはNextelコーティングのような吸収層の使用は困難である。NBSのQ-seriesでは、この問題を解決するため、厚さ1mmのガラス(NG-1)による体積吸収体を用いている<sup>43)</sup>。NG-1は光吸収係数が $\alpha = 28\text{cm}^{-1}$ であり、入射したレーザー光を厚さ方向にゆるやかに光を吸収させることで吸収エネルギーを分散して体積内に吸収させるものである。

光吸収係数  $\alpha$  の体積吸収体にレーザー光が入射したとき、その吸収エネルギーの面密度  $E$  ([J/m<sup>2</sup>]) はレーザーの通った道筋の関数として以下のように表せる。

$$E(x) = E(0) \exp(-\alpha x) \tag{11}$$

よって、熱の拡散がまだ支配的でない微小時間に対しては、吸収体表面の温度  $\Delta T(0)$  は以下の式で与えられる。

$$\Delta T(0) = \frac{\alpha E(0)}{\rho c} \tag{12}$$

ここで、 $\rho$  と  $c$  はそれぞれ吸収体の密度、比熱である。式(12)が熱拡散が支配的でない場合の最大の温度上昇度を与えることになる。吸収体の損傷は、材料の融点を超えると起こる。よって、閾値  $E(0)$  は式(12)から  $\Delta T$  を融点までの上昇温度として求められることになる。

レーザーのパルス幅  $\tau_p$  に対して吸収体内部の熱の拡散時間  $\tau_d$  が十分速い場合 ( $\tau_d \ll \tau_p$ ) には、熱が拡散により周辺部へ散逸出来るため閾値は上昇する。この場合の  $E$  [J/m<sup>2</sup>] は

$$E \sim \Delta T \times (\pi \rho c \kappa \tau_p)^{1/2} \tag{13}$$

で与えられる<sup>43)</sup>。ここで、 $\kappa$  は吸収体の熱伝導率である。また、拡散時間  $\tau_d$  は、

$$\tau_d = \frac{\rho c}{2 \alpha^2 \kappa} \tag{14}$$

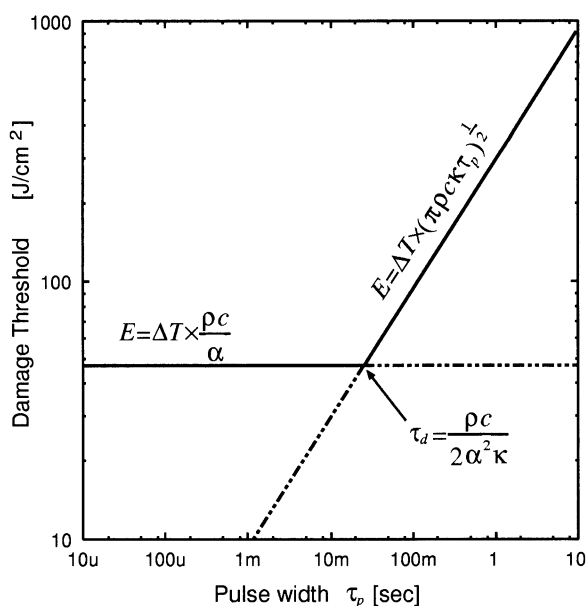


図7 NG-1の損傷エネルギー計算例

で与えられる。

例として NG-1 の損傷エネルギーを式(12)～(13)により計算した例を図7に示す。パラメータとしては、 $\alpha=28\text{cm}^{-1}$ 、 $\rho=2.49\text{g/cm}^3$ 、 $c=0.753\text{J/g K}$ 、 $\kappa=2.99\times 10^{-2}\text{W/cm K}$ 、 $\Delta T=700\text{K}$ を用いた。NG-1の拡散時間 $\tau_d$ は式(14)から40msを得る。これより短い時間幅 $\tau_p$ のパルスに対しては損傷の閾値 $E$ は式(12)から $E(0)\sim 47.1\text{J/cm}^2$ と見積もられる。実験値として、文献<sup>49)</sup>では $\tau_p=30\text{ns}$ に対して $43\text{J/cm}^2$ 、文献<sup>51)</sup>では $\tau_p=200\text{ps}$ に対して $60\text{J/cm}^2$ と報告例があり、これらと理論値の一致は良好である。以上、NG-1では $\phi=1.5\text{mm}$ のビーム径を持つレーザに対して $\sim 1\text{J}$ のエネルギーが損傷閾値となる。これ以上のエネルギーを持つパルスの計測に対しては、より高耐性をもつ材料の選択、開発が必要である。

### 5.4.2 一様応答性

一般に、測定器は受光面全体に亘って一様な応答とはならずレーザの入射位置に依存してその感度がばらつくのが普通である。また、レーザの入射位置が完全に固定されていても、レーザの偏光やその出力分布が時間的に変化すれば測定器の応答は変化する。このような測定器の非一様応答性による影響は不確かさの大きな要因となりえるため、標準器の特性として感度の応答依存性は十分小さいことが望ましい。この感度の違いが生じる原因は、レーザのエネルギーが熱伝達、放射、熱伝導によって吸収体内から散逸あるいは吸収体内を輸送していく際に、エネルギーが付与される場所に依りて熱電対が存在する場所の温度履歴が異なるためである。従って、一様応答性の高い測定器を得るためには、これらの効果による影響を少なくするような設計が必要となる。熱伝達については受光器を真空中におけば完全にこれによる熱の輸送を遮

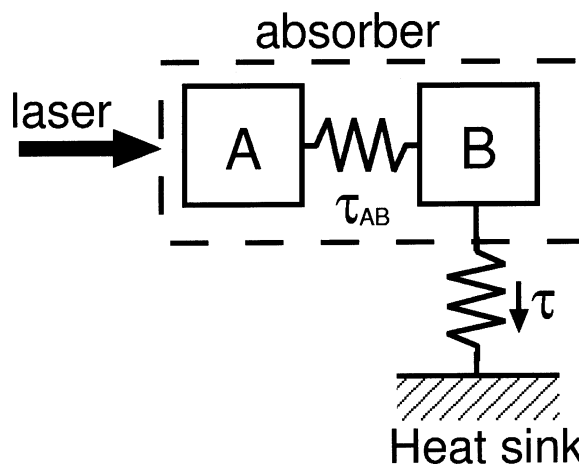


図8 吸収体熱緩和モデル

断できる。放射については受光器前面に半球ミラーを設置する、あるいは受光器を低温へと冷却することでこの効果を低減できる<sup>52)</sup>。最後の吸収体内部の熱伝導については、この効果が非一様応答性に与える影響や制約について本節で考察し、標準器として備えるべき特性について検討する。

ディスク型吸収体構造を例として、熱伝導が一様応答性に与える影響について考察する。ディスクの材質として銅、半径を $r=5\text{mm}$ とする。今、直径 $\phi 1.5\text{mm}$ 程度のレーザビームをディスクの中心に照射するものとする。簡単のため、ディスク内をレーザの照射部分とそれ以外の部分のA、Bの二つに分割し、この間の熱緩和過程を考える(図8)。このときのA、B間の熱的な緩和時定数 $\tau_{AB}$ は、

$$\tau_{AB} \approx L^2(\rho c / \kappa) \tag{15}$$

で与えられる。ここで、 $L$ は特性長である。今、熱電対の位置を $r_T=4\text{mm}$ であるすると、式(15)から $L=r_T$ として $\tau_{AB} \sim 0.138\text{s}$ を得る。この時定数が熱電対出力の応答信号波形の立ち上がり時間を与えることになる。

一方、受光面内で一様なときの応答を $H_{\text{even}}$ 、非一様応答分布のときの応答を $H_{\text{uneven}}$ とすると、図8のモデルにおいて応答感度の差(面感度偏差)の最大値は次式で与えられる<sup>4)</sup>。

$$\left| \frac{H_{\text{uneven}} - H_{\text{even}}}{H_{\text{even}}} \right|_{\text{max}} < \frac{\tau_{AB}}{\tau} \tag{16}$$

ここで、 $\tau$ は系全体の時定数である。面感度偏差を0.1%以下、 $\tau_{AB} \sim 0.138\text{s}$ とすると、式(16)から、

$$\tau > \tau_{AB} \left| \frac{H_{\text{uneven}} - H_{\text{even}}}{H_{\text{even}}} \right| \tag{17}$$

$$\sim 138\text{s} \tag{18}$$

となり、系全体の時定数 $\tau$ は極めて長く設計しなければならないことがわかる。 $\tau_{AB}$ は吸収体の熱的な特性と構造によってほぼ決まる値である。レーザ径を微小に絞るなどして吸収体

全体の面積を縮小して  $L$  を短くしない限り、 $\tau_{AB}$  を小さくすることは難しい。すなわち、測定器の時定数  $\tau$  と一様応答性とは互いに背反の関係にあることが分かる。面感度偏差は、光パワーと DC パワーの等価性にも重要である。通常、光が吸収される領域と DC パワーを与えるヒータの位置は異なっている。面感度偏差が大きいと、この違いにより等価性に由来する不確かさにも影響を与えるということになる。

常温では、 $\tau_{AB}$  を小さくすることは難しいが、2.2.5 節で述べたように 10K 程度の低温では比熱が減少し熱伝導率が増大するため熱拡散係数  $D$  は 1000 倍以上も大きくなる。よって、同形状のディスクにおいて、 $T=10K$  では  $\tau_{AB}$  は  $\mu s$  以下にすることが可能である。従って、 $\tau=10ms$  としても 0.01% の面内偏差を実現できるということになる。低温を利用することにより小さな不確かさと高速化が実現できるため、特にレーザーパルスを繰り返し測定する場合など校正に長い時間が必要とされる用途には低温を利用した高速な測定器は極めて有効であると考えている。

### 5.5 拡張不確かさ

以上、述べてきた方法ではレーザーパルスのエネルギー校正の拡張不確かさはビームスプリッタの不確かさ、エネルギー絶対値測定の一次標準器の不確かさ、被校正器の測定不確かさ、そして測定繰り返し不確かさのそれぞれの二乗和で評価できることになる。これらの項がどれくらいの寄与をするか、理論的に導出するとともに、実験的に求めるなどして、今後検証を行っていくことが必要である。

## 6. 総 括

本調査研究では、レーザーのパワーやエネルギーの測定原理とその標準の重要性について述べ、主要国家標準機関におけるレーザー標準の整備状況について概説した。また、我が国におけるレーザー標準の現況について紹介し、その特徴と問題点について議論した。また、レーザーエネルギー標準を確立するための方向性について検討した。

我が国におけるレーザーパルス標準については未整備であり、レーザーパラメータとしての基本量ということからもその確立は早急に行う必要がある。レーザーの基本量としては、エネルギーのほかにもビームプロファイル、光ファイバー伝送レーザーパワー、時間応答など、様々なものがあるが、これらは未整備である。今後、日本においてどのようなレーザーに関する物理量が標準として整備すべきであるか要望と絡めて見極めながら、量子標準や高精度標準といった新たな標準開発を行っていくことも必要であると考えている。

## 謝 辞

本調査研究を行うにあたり、ご指導頂いた井上武海電磁波計測科長に厚くお礼申し上げます。また、折に触れレーザーに関して有益なご指導やご助言を頂いたレーザー標準研究室の方々に深く感謝する。

## 参考文献

- 1) Gunn, S. R.: Calorimetric measurements of laser energy and power, *J. Phys. E, Sci. Instrum.*, Vol. 6, No. 2, pp. 105-114 (1973).
- 2) Scott, B. F.: Fabrication and performance of cone calorimeters for laser energy measurements, *J. Sci. Instrum.*, Vol. 43, pp.685-687 (1966).
- 3) Li, T. and Sims, S. D.: *Appl. Optics*, Vol. 1, pp. 325-328 (1962).
- 4) Edwards, J. G.: An accurate carbon cone calorimeter for pulsed lasers, *J. Sci. Instrum.*, Vol. 44, pp. 835-838 (1967).
- 5) Koozekanani, S.: *Proc. Inst. Radio Engrs.*, Vol. 50, p. 207 (1962).
- 6) Preston, J. S.: A radiation thermopile for cw and laser pulse measurement, *Journal of Physics E: Scientific Instruments*, Vol. 4, pp. 969-972 (1971).
- 7) Jacob, J. H., Pugh, E. R., Daugherty, J. D. and Northam, D. B.: An Absolute Method of Measuring Energy Outputs from CO<sub>2</sub> lasers, *Rev. Sci. Instrum.*, Vol. 44, No.4, pp. 471-474 (1973).
- 8) West, E. D. and Churney, K. L.: Theory of isoperibol calorimetry for laser power and energy measurements, *J. Appl. Phys.*, Vol. 41, No. 6, pp. 2705-2712 (1970).
- 9) West, E. D., Case, W. E., Rasmussen, A. L. and Schmidt, L. B.: *J. Res. Natl. Bur. Stand. A, Phys. Chem.*, Vol. 76A, No. 1, pp. 13-26 (1972).
- 10) West, E. D. and Case, W. E.: Current status of NBS low-power laser energy measurement, *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, Vol. IM-23, No.4, pp. 422-5 (1974).
- 11) Zhang, Z. M., Livigni, D. J., Jones, R. D. and Scott, T. R.: Thermal modeling and analysis of laser calorimeters, *J. Thermophys. Heat Transf.*, Vol. 10, No. 2, pp. 350-356 (1996).
- 12) Day, G. W.: Metrology for the optoelectronics industry, *Proc. SPIE-Int. Soc. Opt. Eng.*, Vol. 4450, pp. 33-43 (2001).
- 13) Chen, D. H., Dowell, M. L., Cromer, C. L. and Zhang, Z. M.: Thermal response and inequivalence of pulsed ultraviolet-laser calorimeters, *J. Thermophys. Heat Transf.*, Vol. 16, No. 1, pp. 36-42 (2002).
- 14) Jennings, D. A.: Calorimetric Measurement of Pulsed Laser Output Energy, *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, Vol. 15, No. 4, pp. 161-164 (1966).
- 15) Livigni, D. J., Cromer, C. L., Scott, T. R., Johnson, B. C. and Zhang, Z. M.: Thermal characterization of a cryogenic radiometer and comparison with a laser

- calorimeter, *Metrologia*, Vol. 35, No. 6, pp. 819-827 (1998).
- 16) Martin, J. E., Fox, N. P. and Key, P. J.: A Cryogenic Radiometer for Absolute Radiometric Measurements, *Metrologia*, Vol. 21, No. 3, pp. 147-155 (1985).
  - 17) Quinn, T. J. and Martin, J. E.: Cryogenic Radiometry, Prospects for Further Improvements in Accuracy, *Metrologia*, Vol. 28, No. 3, pp. 155-161 (1991).
  - 18) Martin, J. E. and Haycocks, P. R.: Design considerations for the construction of an absolute radiation detector at the NPL, *Metrologia*, Vol. 35, No. 4, pp. 229-233 (1998).
  - 19) Gentile, T. R., Houston, J. M., Hardis, J. E., Cromer, C. L. and Parr, A. C.: National Institute of Standards and Technology high-accuracy cryogenic radiometer, *Appl. Optics*, Vol. 35, No. 7, pp. 1056-1068 (1996).
  - 20) Johnson, B. C., Kumar, A. R., Zhang, Z. M., Livigni, D. J., Cromer, C. L. and Scott, T. R.: Heat transfer analysis and modeling of a cryogenic laser radiometer, *J. Thermophys. Heat Transf.*, Vol. 12, No. 4, pp. 575-581 (1998).
  - 21) Hoyt, C. C. and Foukal, P. V.: Cryogenic Radiometers and Their Application to Metrology, *Metrologia*, Vol. 28, No. 3, pp. 163-167 (1991).
  - 22) Houston, J. M. and Livigni, D. J.: Comparison of two cryogenic radiometers at NIST, *J. Res. Natl. Inst. Stand. Technol.*, Vol. 106, No. 4, pp. 641-647 (2001).
  - 23) Stock, K. D. and Hofer, H.: Present State of the Ptb Primary Standard for Radiant Power Based on Cryogenic Radiometry, *Metrologia*, Vol. 30, No. 4, pp. 291-296 (1993).
  - 24) Stock, K. D., Hofer, H., White, M. and Fox, N. P.: Lowest uncertainty direct comparison of a mechanically-cooled and a helium-cooled cryogenic radiometer, *Metrologia*, Vol. 37, No. 5, pp. 437-439 (2000).
  - 25) Stock, K. D. and Hofer, H.: PTB primary standard for optical radiant power: Transfer-optimized facility in the clean-room centre, *Metrologia*, Vol. 32, No. 6, pp. 545-549 (1996).
  - 26) Schrama, C. A., Bloembergen, P. and Ham, van der E. W. M.: Monochromator-based cryogenic radiometry between 1  $\mu\text{m}$  and 20  $\mu\text{m}$ , *Metrologia*, Vol. 37, No. 5, pp. 567-570 (2000).
  - 27) Corrons, A., Fontecha, J. L., Corredera, P., Campos, J., Pons, A. and Hernanz, M. L.: Ultraviolet calibration of detectors with respect to a cryogenic radiometer, *Metrologia*, Vol. 37, No. 5, pp. 555-558 (2000).
  - 28) Corredera, P., Hernanz, M. L., Campos, J., Corrons, A., Pons, A. and Fontecha, J. L.: Absolute power measurements at wavelengths of 1300 nm and 1550 nm with a cryogenic radiometer and a tuneable laser diode, *Metrologia*, Vol. 37, No. 5, pp. 519-522 (2000).
  - 29) Goebel, R., Pello, R., Kohler, R., Haycocks, P. and Fox, N.: Comparison of the BIPM cryogenic radiometer with a mechanically cooled cryogenic radiometer from the NPL, *Metrologia*, Vol. 33, No. 2, pp. 177-179 (1996).
  - 30) Goebel, R., Pello, R., Stock, K. D. and Hofer, H.: Direct comparison of cryogenic radiometers from the BIPM and the PTB, *Metrologia*, Vol. 34, No. 3, pp. 257-259 (1997).
  - 31) 松尾宏：高感度ボロメータの開発と天文観測への応用，固体物理，Vol. 31, No. 4, pp. 63-73 (1996) .
  - 32) Richards, P. L.: Bolometers for Infrared and Millimeter Waves, *J. Appl. Phys.*, Vol. 76, No. 1, pp. 1-24 (1994).
  - 33) Mather, J. C.: Bolometer Noise-Non-Equilibrium Theory, *Appl. Optics*, Vol. 21, No. 6, pp. 1125-1129 (1982).
  - 34) Blevin, W. R. and Brown, W. J.: Large-area bolometers of evaporated gold, *J. Sci. Instrum.*, Vol. 42, pp. 19-23 (1965).
  - 35) Rice, J. P.: An electrically substituted bolometer as a transfer-standard detector, *Metrologia*, Vol. 37, No. 5, pp. 433-436 (2000).
  - 36) 浜松フォトニクス株式会社：赤外線検出素子の特性と応用，技術資料 SD-12 (2002) .
  - 37) Phelan, R. J. and Cook, A. R.: Electrically calibrated pyroelectric optical-radiation detector, *Appl. Optics*, Vol. 12, p.2474 (1973).
  - 38) Inoue, T., Yokoshima, I. and Katada, F.: Uncertainty in the Calibration of a Photodiode-Type Power-Meter Due to the Spectral Width of a Light-Source, *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, Vol. 38, No. 2, pp. 581-583 (1989).
  - 39) Fox, N. P.: Trap Detectors and Their Properties, *Metrologia*, Vol. 28, No. 3, pp. 197-202 (1991).
  - 40) Stock, K. D., Morozova, S., Liedquist, L. and Hofer, H.: Nonlinearity of the quantum efficiency of Si reflection trap detectors at 633 nm, *Metrologia*, Vol. 35, No. 4, pp. 451-454 (1998).
  - 41) Tinkham, M.: *Introduction to Superconductivity*, McGraw-Hill (1981).
  - 42) Monticone, E., Lacquaniti, V., Rajteri, M. and Rastello, M. L.: Josephson tunnel junctions as highly sensitive photodetectors for radiometry, *Metrologia*, Vol. 35, No. 4, pp. 393-396 (1998).

- 43) Franzen, D. L. and Schmidt, L. B.: Absolute reference calorimeter for measuring high power laser pulses, *Appl. Optics*, Vol. 15, No. 12, pp. 3115-3122 (1976).
- 44) Bement, A. L.: Optoelectronics Division, Programs, Activities and Accomplishments, *NISTIR*, Vol. 6615, (2002).
- 45) 井上武海, 山村恭平: 高感度レーザーカロリメータによるレーザーパワー標準, 電子技術総合研究所彙報, Vol. 11, pp. 1259-1275 (1992).
- 46) 光エレクトロニクス計測標準調査専門委員会: 光エレクトロニクス分野における計測および標準の動向, Technical Report409, 電気学会 (1992).
- 47) 宮脇雅裕, 井上武海: NiP 吸収体による光パワー測定用カロリメータの高精度化, 電気学会計測研究会資料, IM-00-22, pp. 55-59 (2000).
- 48) Johnson, C. E.: Black Electroless Nickel Surface Morphologies with Extremely High Light Absorption Capacity, *Metal Finishing*, Vol. 78, No. July, pp. 21-24 (1980).
- 49) Kodama, S., Horiuchi, M., Kunii, T. and Kuroda, K.: Ultra-Black Nickel-Phosphorus Alloy Optical Absorber, *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, Vol. 39, No. 1, pp. 230-232 (1990).
- 50) Rasmussen, A. L. and Sanders, A. A.: Transfer Standards for Energy and Peak Power of Low-Level 1.064 Micrometer Laser-Pulses and Continuous Wave Laser Power, *Opt. Eng.*, Vol. 25, No. 2, pp. 277-285 (1986).
- 51) Gunn, S. R.: Volume-absorbing calorimeters for high-power laser pulses, *Rev. Sci. Instrum.*, Vol. 45, No. 7, pp. 936-943 (1974).
- 52) Ono, A.: A design of thermal detectors of radiation with uniform response over the surfaces of the receivers, *Metrologia*, Vol. 15, No. 3, pp. 127-133 (1979).

