

## 高出力レーザーパワーの標準技術に関する調査研究

沼田孝之\*

(平成20年3月27日受理)

## A survey on technologies for high laser power standards

Takayuki NUMATA

## 1. 緒論

レーザー光は、レンズなどで集束させることで高い空間エネルギー密度を実現可能であることから、従来にない強力な加工ツールとして、産業界での利用が急速に進んでいる。例えば自動車産業ではボディやエンジンなどの部品の製造に、また電子産業では基板の切断やディスプレイの欠陥修復に、さらに先端医療の分野ではメスに代わる新しい施術器具としてレーザーが普及している。(財)光技術産業振興協会の調べでは、これらレーザー加工分野の産業規模は10～20%/年の割合で増加を続けており、2007年度予測で生産額約5000億円に達する一大産業に成長している<sup>1)</sup>。特に最近では、励起効率の向上によって高出力かつコンパクトで長寿命なLDやレーザー光源が開発され、高出力レーザー応用技術の一層の普及を後押ししている。この一方で、これら高出力レーザーのパワー管理に対する懸念も増している。レーザー光の威力が効果的に発揮される事実は、裏を返せば、リスクの増大に他ならない。たとえば、不適切なレーザーパワーの照射は、レーザー加工において対象物の加工不良や破損による品質の低下を招き、またレーザー治療では重大な医療事故に直結する。レーザーの普及とその応用技術の多様化が急速に進むいま、レーザーパワーは今日の工業化社会を支える重要な基本量であるといえる。レーザー利用者の安全を確保しながら製品の品質向上や応用技術の高度化を推進させるには、正確な測定に基づく適切なレーザーパワーの管理が不可欠となっている。特に近年は、国際的な貿易の自由化が進展し、レーザー関連製品の輸出入も盛んにおこなわれる時代である。通商の健全化や円滑化、さらには国産レーザー応用技術の国際競争力のため、レーザーパワーの測定には、信頼性のほか国際的な整合性も求められている。

\* 計測標準研究部門 光放射計測科 レーザー標準研究室

我が国におけるレーザーパワー測定器の信頼性は、計量標準総合センター(以下、NMIJ)が管理する国家一次標準器を頂点とするトレーサビリティ体系によって担保される仕組みとなっている。トレーサビリティ体系は、あるレーザーパワー測定器の校正元を辿っていくと最終的にNMIJの一次標準器(国家標準)に行き着く、途切れのない信頼性の連鎖構造をあらわす。NMIJではこれまで、可視から赤外の波長における低・中出力レベル( $\mu\text{W} \sim 10\text{W}$ )のレーザーパワー標準を開発し供給を行ってきた。しかしながら10W以上を測定対象とした標準はまだなく、上述のような産業情勢のもとで高出力レベルのパワー標準の早急な整備が待たれている。これに対応し現在NMIJでは、物理標準整備計画169-1として近赤外域における100Wレベルのレーザーパワー標準の確立を計画している。

今回、高出力レーザーパワー標準の開発に取り組むにあたり、従来のレーザーパワー測定技術を概観するとともに海外の標準研究機関における高出力測定技術に関して調査研究を行った。本稿は、その結果をまとめたものである。第2節では、レーザーパワー測定技術について標準技術で一般的な熱的測定法を概説する。第3節では、NMIJにおける低・中出力レベルのパワー標準技術について、国際比較測定や供給の現状も含めて概説する。つづく第4節では、海外標準研究機関におけるレーザーパワー標準技術について、特に高出力レベルの測定法に焦点を当て調査した結果を示す。第5節では、これらをもとに高出力レーザーパワー標準の確立に向けた技術的課題を整理し、最適な開発方法を検討、提案する。

## 2. レーザーパワー測定法

レーザーの出力は、一般に連続光(CW)に対してはパワー[W]で表記される。一方、単発のパルス光に対しては、エネルギー[J]であるが、連続パルス光に関しては、パワー

[W]の表記も併用される<sup>2)</sup>。レーザの出力は通信用レーザと加工用レーザでは、オーダにして $10^9$ もの開きがあり、波長も異なるため、それぞれの光源の特徴にあわせた測定方法の選択が必要である<sup>3), 4)</sup>。表1にレーザパワーおよびエネルギーの主要な測定方法を挙げる<sup>2)</sup>。これらのうち「熱的測定法」は、レーザビームを吸収率の高い光吸収体（以下、吸収体）で熱に変換し、そこで生じる温度変化やそれに伴う物理的変化を電気的に測定してレーザパワーを導出するものである。特に温度測定を原理とする手法は、カロリメトリと呼ばれる。この手法は、簡単な装置で高精度な測定が可能であり安定性にも優れるため、レーザパワー標準の基盤技術として広く用いられている。以下では、主なカロリメトリの種類と原理、特徴を述べる。

表1 レーザパワーの主な測定方法

| 測定法の種類 | 原理と素子                               | 特徴                          |
|--------|-------------------------------------|-----------------------------|
| 熱的     | 熱起電力(サーモパイル, 熱電対), 焦電効果, 電気抵抗, 体積変化 | 広波長帯に対応, 直流電力による置換が可能, 絶対測定 |
| 光電的    | 光電流(半導体), 光起電力, 光電効果                | 高感度, 高速応答, 波長依存性がある(帯域が狭い)  |
| 光化学的   | 写真乾板, 感光材料                          | 波長依存性がある, 定量測定が困難           |

### 2.1 サーマパイル検出器 (伝導型相対値測定法)

異種金属接合間の温度差に起因する起電力(熱起電力)を発生する素子は、熱電対と呼ばれる。微弱な温度変化を感度良く測定するため、熱電対を多数直列に接続したもの(熱電対列)が、サーモパイルである<sup>2)</sup>。熱電対で発生する熱起電力は、極めて優れた直線性を示すため、これを用いた高精度な温度測定が可能である。このため、多くの熱的レーザパワー測定法における要素技術となっている。レーザ光が光吸収体に入射すると吸収体の温度が上昇するが、ここで生じる検出器内部の二点間の温度勾配をサーモパイルで測定し、入力熱量を算出する。このタイプは、熱量測定でありながら断熱構造をしておらず、検出器自身の相対温度測定に基づく。このため環境温度の変動に敏感であるという欠点がある。しかしながら、小型で応答が速く実用性に富むため絶対値を測定する必要のない、校正の仲介器や実用標準器として用いられることが多い<sup>6), 7)</sup>。サーモパイルを用いたレーザパワー測定器は、レーザ光吸収体と温度基準とをサーモパイルで結んだシンプルなものから、温度基準を断熱化したり等温制御した高精度なものなど、多岐にわたる。

### 2.2 電力置換カロリメータ (絶対値測定法)

受光部に電力置換用ヒータ（以下、ヒータ）を内蔵し、レーザパワーの絶対値を電気的に測定可能なものは、直流電力置換型カロリメータと呼ばれる。サーモパイルセンサをベースとした物の例を図1に示す<sup>9)</sup>。受光部は、吸収体と温度基準、それらの温度差検出用の熱電対素子、そしてヒータから構成される。受光部に入射したレーザ光は熱に変換され光吸収体の温度が上昇する。この温度を測定しておき、レーザ照射を止めて、再びこの温度を再現するようヒータを稼動する。レーザによる温度とヒータによる温度が等しいとき、ヒータへの印加電力をレーザパワーとする、という手法である。ヒータの加熱に用いる直流電圧とヒータの抵抗値を予め校正しておくことで、電気標準にトレーサブルなレーザパワーの絶対値測定が可能である。この手法は、シンプルな原理でありながら信頼性の高い絶対値測定が可能であり、レーザパワー標準技術としてNMIJをはじめ各国の標準機関で広く採用されている<sup>8)</sup>。ところで、直流電力置換による高精度レーザパワー測定の成否は、受光部における光と電力の置換の等価性に委ねられる<sup>9)</sup>。この等価性向上のために受光部に求められる条件としては、第一にレーザ光に対する吸収率の高さ、第二に熱容量が小さく熱伝導率が高いこと、が挙げられる。前者に関しては、可視から近赤外の波長のレーザ光に対する吸収体材料としては、金黒(反射率: 0.1 ~ 1%)や黒色つや消し塗料(反射率: 0.3 ~ 3%)が有効とされる<sup>10)</sup>。さらに近年、Ni-P合金の吸収体(反射率: 0.2%以下)が開発され<sup>11), 12)</sup>、これを用いた高精度なレーザカロリメータも開発されている<sup>13)</sup>。また後者に関しては、小型の吸収ディスクを採用することで、レーザ光の入力に対する系の応答時定数を短縮し、迅速な測定が可能となる<sup>14)</sup>。次に示す極低温放射計も、熱伝導率の向上を目指したパワー計測技術である。

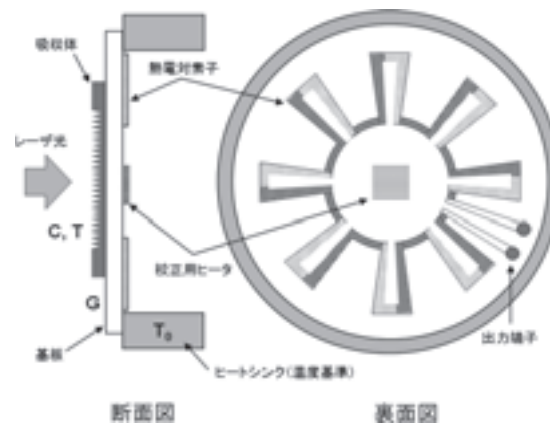


図1 電力置換型カロリメータの構造<sup>9)</sup>

## 2.3 極低温放射計

極低温放射計 (Cryogenic Radiometer: CR) は、液体ヘリウム容器内にカロリメータを構築し、冷凍器の壁に外部からレーザー光を導入するための窓を設けたものである。液体ヘリウム温度 (4.2 K) 付近では、熱型検出器の熱雑音小さくなるうえ、金属の熱拡散率 (=熱伝導率/ (比熱・密度)) が常温の1000倍以上になり電熱置換の等価性が格段に向上する。さらに、応答速度の高速化も期待できる。また、受光部付近の配線が超電導状態となることで電気測定の誤差が低減するなど、レーザーパワーの精密測定を行う上で数多くの利点が存在する。これによりCRでは、常温におけるカロリメータと比較して一桁小さい不確かさでの光パワーの測定が可能である。元来CRは、測光・放射量の高精度測定法として開発され発展してきた技術であるが、現在ではレーザーパワーの一次標準器としても用いられるケースが増えている。ドイツにおける物理工学研究所 (PTB) や英国国立物理研究所 (NPL) では一台のCRが、光放射とレーザーパワー双方共通の一次標準器として使用されており<sup>15), 16)</sup>、両者の間での二国間比較も実施している<sup>17)</sup>。また米国の国立標準技術研究所 (NIST) においても、近年市販のCRをレーザー向けに改造し、微弱レーザーパワーの次世代標準器として開発を進めている<sup>18)</sup>。測光・放射量分野では、世界15カ国の参加によるCRの国際比較測定も実施されており、NMIJも参加している。トラップ型の半導体光検出器を仲介器とし、可視域を中心にレーザーを光源とした離散波長でCRによる感度校正が行われ校正値が比較された。この結果は国際度量衡局 (BIPM) より公開されている<sup>19)</sup>。

我が国においても、CRによる微弱レーザーパワー校正システムや<sup>20)</sup>、測光・放射量標準の高精度化が図られてきた<sup>21), 22)</sup>。特に最近では、CRの温度検出部に超伝導転移端センサを導入し、単一光子レベルの微弱光の入射を検知することで、CRによる微弱レーザーパワー測定の高精度化に取り組んでいる<sup>23)</sup>。転移温度付近の超伝導体は、わずかな温度変化によってその抵抗値が大きく変化する。この特性を温度検出に利用し、電気ヒータによる電力置換を行うことで微弱光パワーの絶対値測定を行うものである<sup>24)</sup>。本手法で200 nWから600 μWの絶対値測定に成功している。

現在、微弱レーザーパワーの精密絶対値測定にCRを用いる世界的な潮流があり、今後我が国においても次世代の超低パワーレベル標準技術としてCRの活用が大いに期待される。

## 3. NMIJにおけるレーザーパワー標準

我が国におけるレーザーカロリメータの研究の歴史は古く、始まりはNMIJの一部前身である旧電子技術総合研究所 (ETL) における1960年代半ばにまで遡る<sup>25)</sup>。それから40年近く経た現在、国家一次標準器として測定出力レベル別に2台の電力置換型カロリメータを据えたトレーサビリティ体系を確立し、国内に向けたレーザーパワー標準の供給体制を整えている。現在のレーザーパワー校正チェーンの概略を図2に示す。本節では、NMIJにおけるこれらのレーザーパワー一次標準技術に関して、特に高出力レーザーパワー標準の開発の足掛かりとなる中出力測定用のレーザーカロリメータに焦点を当て、その特徴や不確かさ、また最近の取り組みや国際比較プロジェクトの現状について述べる。



図2 NMIJレーザーパワー標準の構成

### 3.1 NMIJにおけるレーザーパワー一次標準技術

#### 3.1.1 等温制御方式による電力置換レーザーカロリメータ

精密計測において測定系の温度変動は測定精度低下の原因となる。レーザーパワーの測定も例外ではなく、受光部の温度変化に伴うヒータの電気抵抗値変化や、輻射による熱の外部漏洩などは、電力置換の等価性を劣化させ、測定精度低下を招く。また、温度差のある異種金属の接合部では熱起電力が発生し、正しい測定を妨げる要因となる。このような問題を回避するため、我が国の一次標準器カロリメータは、受光部の温度を常温で一定に保ちながら電力置換によりレーザーパワー測定を行う「等温制御方式」を採用している<sup>26)</sup>。この方式では、受光部における熱収支、すなわちレーザー光の吸収および電力校正用ヒータによる発熱を、ペルチェ素子による吸熱で相殺させる。レーザーを照射しない状態で、ペルチェによる吸熱とヒータによる加熱をバランスさせておき、レーザー照射と同時にヒータ出力を低下させ熱バランスを保つようヒータ電力を制御する。ペルチェの吸熱量は一定としレー

ザ照射前後におけるヒータの電力差を算出し、それを照射レーザーパワーとする手法である。ヒータ電力を一定に保ち、ペルチェ電流を制御する場合もある<sup>27)</sup>。等温制御方式におけるレーザーパワーと冷却および加熱電力の関係は、以下のようになる。

カロリメータに入射したレーザーパワー ( $P_o$ ) が、吸収体で吸収される成分  $P_d$ 、吸収体で反射散乱し周囲の円筒カバーで吸収される成分  $P_s$ 、および円筒カバーに当たらずに開口から外部に漏出する成分  $P_l$  として保存されるとすると、次式が成り立つ。

$$P_o = P_d + P_s + P_l \quad (1)$$

ところで、ペルチェ素子による冷却電力を  $P_c$ 、ヒータのバイアス電力を  $P_{ho}$  とすると、レーザーが入射していない時における受光部の熱平衡状態は以下の式で表される。

$$k_h P_{ho} - P_c = 0 \quad (2)$$

ここで  $k_h$  は、受光部裏面に設置したヒータからの熱が周囲の温度検出素子へ伝達する割合を示す係数である。

一方、レーザー入射時の熱平衡状態は、次式となる。

$$k_h P_{hi} + k_d P_d + k_s P_s - P_c = 0 \quad (3)$$

ここで、 $P_{hi}$  はレーザー照射時のヒータ電力、 $k_d$ 、 $k_s$  はそれぞれ、レーザー光の吸収に基づく吸収ディスクと円筒カバーにおける発熱のうち温度検出素子へ伝達する割合で、各発熱部と周囲との熱抵抗で決定される係数である。

よって、レーザー入射前後における熱平衡状態のヒータ電力から算出した電力差を  $\Delta P_h (= P_{ho} - P_{hi})$  とすると、入射したレーザーパワー  $P_o$  は次式で表される。

$$P_o = \frac{k_h}{k_d} P_h + \left(1 - \frac{k_s}{k_d}\right) P_s + P_l \quad (4)$$

式中第2項の  $(k_h/k_d)$  は、吸収ディスクにおいてレーザーパワーをヒータ電力で置換する際に、その等価性を表す係数、また  $(k_s/k_d)$  は、円筒カバーにおける発熱の吸収ディスクに対する置換係数である。実際、電力置換型カロリメータにおいてレーザーとヒータの等価性を完全に実現するのは不可能である。このため、予め実験的に吸収ディスク周りの非等価性を調べておき、実際の測定値に「置換係数」としてこの値を掛けることで、不完全性を補償している。本手法により、温度一定の下でレーザーパワーの精密な電力置換測定が実現する。

### 3.1.2 低出力用カロリメータ

NMIJにおけるレーザーパワー標準のうち、低出力レベル

を担う一次標準器は、H-3型レーザーカロリメータである。低出力の測定に特化し高感度化を目指したH-3型<sup>10)</sup>は、ヒータ付きの円筒状吸収ディスクカバーを装備し、吸収ディスク周囲への反射散乱成分を含めた等価性の評価が可能であるほか、それら受光部を全体覆う銅製の温度基準ブロック、さらに最外殻にはアルミニウム製のカバーを装備するなど、電力置換の完全性向上や外部環境の温度変動から受光部を防護するための設計が徹底して施されている。これにより外部気温変化に対する温度基準部温度変動を  $10^{-6}$  K/K に抑制し、さらに等温制御方式を採用することでレーザーパワーの検出最小分解能 13 nW を達成している。H-3型カロリメータの測定出力レンジは  $50 \mu\text{W} \sim 10 \text{ mW}$  である。

それより大きな出力の測定には、H-3型から 10 mW で値を移されたS-7型カロリメータが用いられる。S-7型は吸収体にNiPを採用し、反射漏洩成分を低減し測定の高精度化を図ると共に、NiPのフラットな吸収特性によって測定波長範囲の拡大を実現している。さらに、光チョップによる高精度光減衰法を併用することで測定出力範囲の上限を後述の中出力用MLC-2型カロリメータの下限である 1 W まで引き上げ、低出力から高出力へ連続的に繋がるパワー標準供給体制を支えている。

### 3.1.3 高出力用カロリメータ

NMIJにおける 1 ~ 10 W レーザーパワーの一次標準器は、MLC-2型である<sup>28)</sup>。MLC-2型は、低出力用カロリメータと同様の等温制御方式の基本構造を持ちながら、受光部のレーザー耐性を向上させるための専用設計を施し、10 W ビームの入射に対応したものである。出力の大きなレーザーの測定では、受光部における電力置換の等価性に加え、多大な熱量の入力に対する吸収体の耐熱性確保が重要な課題となる。MLC-2型では、素子を水冷化すると共に、レーザー光に対して吸収体を傾けて設置し、ディスク表面における単位面積当たりの熱負荷を軽減して吸収体損傷のリスクを回避している。MLC-2型カロリメータの内部構造、および等温制御のブロック図を図3に示す。受光部の吸収ディスクには、円形の銅板表面をNiPにより黒化処理したものが用いられる。またディスクの裏面には薄い絶縁膜を介して直流電力置換用のヒータが設置されている。ヒータの周囲には、冷却用ペルチェ素子の吸熱面が接触しており、更に外側には、それらの熱平衡状態を監視するための温度検出素子が同心円状に8個並べて置かれる。これらの素子のもう一面は、大きな熱容量を持つ温度基準ブロックに接触しており、吸収ディスクの微かな温度変化も逃さず検出する。温度検出にはBi-Te素

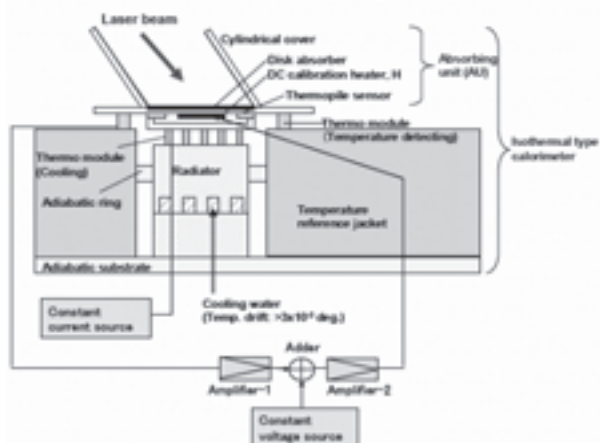


図3 MLC-2型カロリメータ概略図<sup>28)</sup>

子（7対）のゼーベック効果が用いられ、素子8個を電気的に直列に接続することで、温度検出感度を向上させると共にビーム入射位置の違いによる感度の変化（面感度偏差）の低減を図っている。さらにMLC-2型は、メインの受光部の側方に同構造のダミーロードを備えており、両者の温度検出信号の差動をとることで、環境ノイズを除去する構造となっている。

冷却用のペルチェ素子は定電流源に接続され、測定中は常に測定対象とするレーザーパワーの1.2～2倍となる一定の冷却パワーを維持する。一方、ヒータには、吸収ディスク温度検出素子の出力信号が低ノイズのプリアンプで増幅され、バイアス電圧が加算されたのち、メインアンプによって増幅された電圧が印加される。すなわち、吸収ディスクの温度が温度基準ブロックと等しくなるようヒータを制御して、吸収ディスクの等温制御が行われる。

### 3.2 高出力レーザーパワー標準の供給不確かさ<sup>29)</sup>

#### 3.2.1 一次標準器における不確かさ

「不確かさ」とは、測定の結果に付随した、合理的に測定量に結び付けられ得る値のばらつきを特徴づけるパラメータであり<sup>30)</sup>、対象とする量目の測定結果に基づく成分（Type A）と、事前に得られた経験や他の情報に基づく成分（Type B）から構成される。MLC-2型カロリメータを用いたレーザーパワーの測定においてType Bの不確かさ $u(s)$ は、式（4）より以下の式で表される。

$$u(s) = \frac{dP_o}{P_o} = \frac{dP_d}{P_d} + \left(1 - \frac{k_s}{k_d}\right) \frac{dP_s}{P_o} + \frac{dP_l}{P_o} \quad (5)$$

即ち、右辺第1項は吸収ディスクにおけるレーザーパワーとヒータ電力の置換に関する不確かさ、第2項は、円筒カバー部で吸収された成分をディスク部のヒータで置

換する際の不確かさ、第3項は反射散乱による受光部外への漏洩成分の不確かさである。不確かさ評価では、これらの各項目について検証実験を行い、不確かさバジェットとして表2(a)のようにまとめられる。

表2 (a)MLC-2型カロリメータの不確かさバジェット

|                | 要因      | 部位          | タイプ | 確率分布 | 不確かさ [%] |
|----------------|---------|-------------|-----|------|----------|
| 一次標準器<br>MLC-2 | 置換等価性   | ディスク部       | B   | 一樣   | 0.12     |
|                |         | 円筒部         | B   | 一樣   | 0.01     |
|                |         | 反射漏えい       | B   | 一樣   | 0.00     |
|                | 電力測定    | DC測定器       | B   | 一樣   | 0.06     |
|                | 制御偏差    |             | B   | 一樣   | 0.01     |
|                | 受光面感度ムラ | 2 mm x 2 mm | B   | 一樣   | 0.10     |
|                | 測定ばらつき  | N = 15      | A   | 正規   | 0.27     |

#### 3.2.2 校正における不確かさ

一次標準器である等温制御型カロリメータは、高い精度でレーザーパワーの絶対値測定が可能である一方、装置全体が大型かつ複雑で測定に時間や労力を要するといった難点も存在する。そのためNMIJでは、実用標準器（WS；Working Standard）としてPM-10と呼ばれる市販の空冷サーモパイルセンサを用意し、一次標準器によって感度校正することで、通常の校正業務に使用している。実用標準器は小型で簡易であり、迅速な測定が可能であることから、円滑な標準供給業務に不可欠な存在である。

校正に用いる装置の概略を図4に示す。レーザー光源から出た光はウェッジ型のビームスプリッタ（以下、BS）で分割され、透過成分は一次標準器であるカロリメータや被校正器物（DUT；Device Under Test）の受光部へ入射する。ビームと直交する方向に並進ステージが設置されており、被校正器物を光軸上へ出し入れする際に用いられる。各測定器からの出力は電圧計を介してコンピュータに記録される。一方で、BSで反射した成分はレーザーパワーをモニタするための検出器に導かれ、測定中の光源の変動を相殺するために用いられる。人為的な要因に

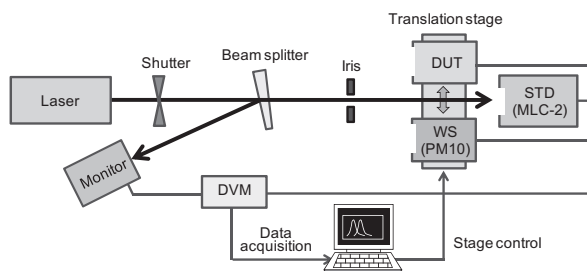


図4 レーザーパワー測定器校正装置の概略

基づく測定のばらつきを無くすため、レーザON、OFF時間やステージ移動など一連の校正作業はコンピュータで一括制御される。しかしながら、わずかなタイミングのずれや、ステージの位置決め誤差、室内環境の変動によって校正値にばらつきが生じる。このような校正作業に付随する不確かさ (Type A) を表2(b)に示す。実用標準器の面感度偏差やDUTへの値付け作業で生じるばらつきが、校正チェーン末端における拡張不確かさを増大させていることがわかる。トレーサビリティチェーンにおける末端ユーザに高品質な標準を供給するには、一次標準器の精度追求だけでなく、両者の中間に位置する実用標準器の特性や適切な校正方法の検討が重要であるといえる。NMIJでは、出力1～10 W、波長1064 nmおよび10.6 μmにおけるパワー標準を拡張不確かさ1.05 % (k=2) で供給している。

表2 (b)DUTの校正における不確かさバジェット

|                | 要因            | 部位          | タイプ | 確率分布 | 不確かさ [%] |
|----------------|---------------|-------------|-----|------|----------|
| MLC-2          |               |             |     |      | 0.27     |
| 実用標準器<br>PM-10 | 面感度ムラ         | 1 mm x 1 mm | B   | 一樣   | 0.20     |
|                | MLC-2 → PM-10 | N = 15      | A   | 正規   | 0.12     |
| 校正器物<br>(DUT)  | 面感度ムラ         | 1 mm x 1 mm | B   | 一樣   | 0.18     |
|                | PM-10 → DUT   | N = 15      | A   | 正規   | 0.30     |
| 拡張不確かさ (k=2)   |               |             |     |      | 1.05     |

### 3.3 レーザパワー標準の供給

現在NMIJより供給している標準の一覧を表3に示す。NMIJが開発されたこれらの標準は、主にJCSS登録校正事業者である日本品質保証機構 (JQA) を通して産業界に供給されている<sup>31)</sup>。一方、1 W～10 Wの中出力レーザパワーに関しては、校正施設の安全性や高出力光源の維持管理などの関係から、NMIJによる依頼試験での供給となっている。現在計画している10～100 Wの高出力標準も同様に、依頼試験での対応を予定している。

依頼試験による標準の供給では、円滑なトレーサビリティチェーン構築のためにも、これまで以上に末端のユ

表3 NMIJが供給するレーザパワー標準

| パワーレベル          | 50 μW～1 mW    | 50 μW～10 mW | 10 mW～1 W   | 1 W～10 W            | 1 W～10 W        |
|-----------------|---------------|-------------|-------------|---------------------|-----------------|
| 波長              | 1310, 1550 nm | 633 nm      | 488, 515 nm | 1064 nm             | 10.6 μm         |
| 校正に用いるレーザ       | LD<br>(光ファイバ) | He-Ne       | Ar          | Nd:YVO <sub>4</sub> | CO <sub>2</sub> |
| 拡張不確かさ<br>(k=2) | 0.3 %         | 0.2 %       | 0.2 %～0.8 % | 1.1 %               | 1.3 %           |

ーザの標準に対する要望を意識した供給サービスが求められるといえる。そこで、高出力レベルのレーザパワー測定器を製造販売するメーカを対象にアンケートを実施し、現在の校正方法における問題点や、新たに供給される標準に対する要望を調査した。調査の対象としたのは海外および国内メーカ各2社で、項目は、社内標準器の参照元、高出力用測定器のトレーサビリティに関する現状の問題点、さらにNMIJに期待することなど、である。結果を表4にまとめる。社内標準器をNISTで校正しているA社からは、校正器物の輸出入に時間やコストがかかるなどの問題から、より円滑かつ迅速な校正サービスを求める声が聞かれた。一方国内メーカ各社は、現状で国内に標準が存在しないため、高出力レベルの測定器の校正を独自の手法で行っており、各社とも測定信頼性に不安を抱えている状況であった。NMIJによる依頼試験校正サービスに対しては、校正精度を求める一方で、校正のスピードや校正料金の低価格化など、利用のしやすさに期待する声が聞かれた。NMIJには、測定技術の高度化や不確かさ低減による国家標準の高品質化とともに、ユーザのニーズを反映した供給サービスの両立が求められているといえる。

表4 ユーザの要望調査

| メーカ            | A社 (海外)                   | B社 (海外)       | C社 (国内)           | D社 (国内)           |
|----------------|---------------------------|---------------|-------------------|-------------------|
| トレーサビリティ       | NIST                      | NIST          | JQA-NMIJ          | JQA-NMIJ          |
| 高出力レベル校正現状の問題点 | NISTでの校正は時間や費用が掛る         | 特になし          | mWレベルの社内標準器を自社で拡張 | mWレベルの社内標準器を自社に拡張 |
| 要望その他          | グループはNIST参照、日本人だけNMIJでよいが | 社内トレーサシステムが充実 | NMIJが供給するなら検討したい  | 高精度化に興味、利益との兼ね合い  |

### 3.4 最近の取り組みについて～実用標準器の安定化～

NMIJではこれまで、1～10 W標準における実用標準器として市販の空冷式サーモパイルセンサを用いてきた。繰り返し測定がメインとなる校正試験には、小型で熱容量が小さく応答の速い空冷センサが適しているためである。しかしこれまでに、空冷センサではレーザ照射時間に伴い出力が徐々に低下し、測定不確かさの一因となることが明らかとなっている。さらにその出力の低下幅は、照射パワーと共に拡大する傾向が見られた。サーモパイルセンサでは、温度基準点の変動がセンサ出力の安定性に影響することが考えられる。そこで市販の空冷サーモパイルセンサに簡易的な冷却水循環系や温度センサを付加した装置を用いて、出力変動と温度基準点の因果関係

を調査した。図5は、8 Wのレーザー照射に対するセンサ出力と放熱フィン表面温度の測定例である。冷却水を循環させない場合、レーザー照射後約30分で放熱フィンの温度が13度上昇し、センサ出力は1 %程度低下していることがわかる。一方冷却水を循環させた場合、温度上昇は0.2℃に抑えられ出力の変動は0.08 %となり、水冷によるセンサ出力の安定化が可能であった。一般に、市販されている10 Wレベルの熱型パワーメータは、自然対流による空冷タイプが主であり、水冷など強制冷却タイプは100 Wレベル以上の測定を対象としたものに限られる。しかしながら本実験の結果は、精密測定を行う場合、10 W以下のレベルにおいても強制冷却による温度基準の安定化が有効であることを示している。

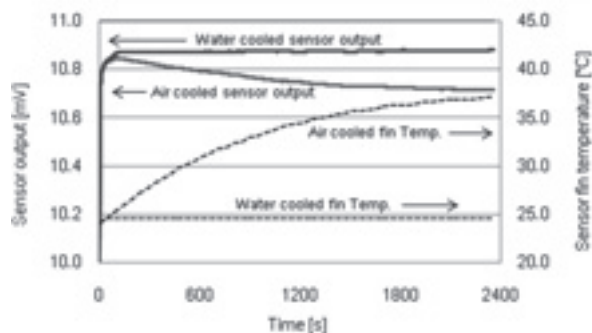


図5 空冷サーモパイルセンサの出力ドリフト

### 3.5 国際比較への参加

開発した標準は、諸外国の標準研究所との間で比較測定による国際的同等性の検証を行う<sup>28)</sup>。現在高出力レーザーパワー標準の分野では、PTBをパイロットとしたEuromet Project 156 "Intercomparison of high laser power (EUROMET PR-S2)"と呼ばれる比較プロジェクトが進行している<sup>32)</sup>。第一期のプロジェクトは、2005年から2007年に実施され、表5の項目について巡回測定が行われた。市販のパワーセンサを各国の研究所で順々に校正し、最後にそれぞれの校正値を比較する、というものである。

表5 国際比較項目

| No | Laser type      | Wavelength | Power level | Beam diameter |
|----|-----------------|------------|-------------|---------------|
| 1  | Argon ion       | 514.5 nm   | 1 W         | 5 mm          |
| 2  | Nd:YAG          | 1064 nm    | 1 W         | 5 mm          |
| 3  | Nd:YAG          | 1064 nm    | 10 W        | 5 mm          |
| 4  | CO <sub>2</sub> | 10.6 μm    | 1 W         | 5 mm          |
| 5  | CO <sub>2</sub> | 10.6 μm    | 5 W         | 5 mm          |

第一期プロジェクトには、NMIJを含めNISTやNPLをはじめとした世界の主要なNMI全12機関が参加した。さらに、2008年よりスタートする第二期プロジェクトでは、波長1064 nmで出力100 W、および波長10.6 μmで出力100 Wと1 kWの3点の比較項目が設定されており、NMIJもこれに参加を予定している。

## 4. 諸外国標準機関における高出力レーザーパワー標準技術

本節では、諸外国の標準研究所における高出力レーザーパワー標準について述べる。各国ともにレーザーパワー一次標準器としてカロリメトリックな手法を用いる点は共通であるが、10 W以上の高出力レーザーパワーの絶対値測定法は国により異なる。NMIJにおける高出力レーザーパワー標準開発にむけた技術指針を得る目的で調査を行った。

### 4.1 NISTのレーザーパワー標準技術

NISTが供給するレーザーパワー標準のラインナップは、波長範囲、出力レベル共に諸工業先進国の中で最も充実したものとなっている。波長325 nmから10.6 mmの範囲で、出力1 nWから1 kWまでをカバーしており、それらに関する技術資料も数多く公開されている<sup>33)</sup>。

波長や出力レベル、要求不確かさなどに合わせ、放射計、熱量計（カロリメータ）、半導体光検出器、サーモパイル（熱電対列）検出器、さらにパイロエレクトリック検出器から成る、標準供給システムが構築されており、これらの一連のレーザーパワー標準技術が文献8に紹介されている。

NISTでは、低中出力レンジのレーザーパワー一次標準器に古くからC-Seriesと呼ばれる常温動作のカロリメータを採用している。C-Seriesカロリメータは1970年代初頭にNISTの前身である米国国家標準局（NBS ; National Bureau of Standards）において設計、開発されたものであるが、現在もその基本構造は変わっておらず、標準技術として成熟したものといえる。直径約12 cm長さ約30 cmの金属の円筒内部に、等温制御方式のカロリメータを内蔵している。円筒側面にレーザー光導入用の窓を設け、内部を真空とすることで、微弱熱量の測定で問題となる空気の対流を除去する設計となっている。C-Seriesカロリメータでは、0.5 ~ 1.0 % ( $k=2$ ) の不確かさで、波長200 nm ~ 2 μm、出力50 mW ~ 1 Wのレーザーパワー測定が可能である。測定原理や誤差解析については文献<sup>34)~37)</sup>に詳述されている。

一方で近年、光通信分野の発展により低出力レーザーパワーの高精度な校正に対する需要が増しており、これに

対応するためNISTでは極低温放射計をベースとした装置による微弱レーザーパワー測定技術を構築しつつある<sup>19)</sup><sup>38)</sup>。これは、市販の極低温放射計を改造し、容器外壁にレーザー光導入用の窓を設けたもので、レーザー対応極低温放射計 (LOCR ; Laser Optimized Cryogenic Radiometer) と呼ばれている。常温 LOCR を用いた測定では、波長 200 nm ~ 2 μm, 出力 100 μW ~ 1 mW に対し、不確かさ約 0.05 % が報告されている。NIST 内部においても低パワーレンジの一次標準器として LOCR を頂点とする校正チェーン整備の必要性が指摘されており、現状今後動向を注目すべきであるといえる。

一方、1 W 以上の高出力レーザーパワーの一次標準器には、K-Series と呼ばれるタイプのカロリメータが用いられる。K-Series カロリメータは、C-Series と同様の円筒状であるが、窓はなく大気環境中で熱量測定を行う。また、強大な入射パワーによる吸収体の損傷を回避するため、円筒状の受光キャビティに入射したレーザービームはまず、底面に設置された円錐状のミラーで拡散反射されパワー密度を下げたのち、円筒キャビティの内壁面で吸収されるような設計が施されている。円筒状吸収キャビティの外壁には、その外側を覆う水冷恒温ジャケットとの温度差を検出する熱電対と電熱置換用のヒータが設置され、等温制御方式に基づいてレーザーパワーを測定するつくりとなっている。

100 W ~ 1 kW レベルでは、光チョップを用いた検出器の直線性評価を行っている<sup>39)</sup>。光源パワーレベルを段階的に変えながら、各レベル毎にチョップ有無時の検出器出力を測定する。検出器が完全な直線性を示すのであれば、チョップ有無時の測定値の比はすべてのパワーレベルで一定となる。チョップの開口比は、低出力用標準器として実績のある C-Series カロリメータを用いて事前に測定している。その結果 K-Series では、不確かさ約 1.5 % で、波長 200 nm ~ 2 μm, 出力 1 W ~ 1 kW の絶対値校正が可能となっている。このほか、軍用超高出力レーザーのパワー測定を目的とした BB-Series と呼ばれるカロリメータも開発されており、100 W ~ 200 kW までの測定能力が報告されている<sup>40)</sup>。

NIST では、これら一連のパワー標準と、多様なガス、固体または半導体レーザーを配備し、ユーザから持ち込まれる測定器に対して直接校正サービスを提供している。ユーザに渡される校正データシートには、不確かさ解析結果も添付される。また、空間伝搬光に加えて、光ファイバを伝搬するレーザー光に対するレーザーパワーや減衰量の校正も実施している<sup>33)</sup>。

## 4.2 PTBのレーザーパワー標準技術

NIST のレーザーパワー標準が、前述のように測定出力帯域別に独立に一次標準器を用意し、いわば並列な校正チェーンを形成しているのに対し、PTB におけるレーザーパワー標準の体系は、現在の光のパワー測定法で最も精度の高いとされる「極低温放射計 (CR ; Cryogenic Radiometer)」を一次標準器に据え、一点で測定した CR の値を元に、半導体検出器やカロリメータを校正し出力と波長範囲を拡張する方法で、縦列的な校正チェーンが展開されている。PTB のレーザー放射測定グループの活動状況は、ウェブサイトで公開されている<sup>41)</sup>。

CR では波長 632.8 nm, 出力 1 mW に対して不確かさ 0.01 % 以下のパワー測定が可能である。CR の値はまず、トラップ型の Si 検出器に移される。この検出器は mW ~ 10 W レベルのパワー標準を担う熱型検出器 (LM7) へ値付けする際の Transfer Standard としての役割のほか、Si の高感度特性から可視域の低出力レンジ (10 μW ~ 10 mW) の実用標準器としても利用される。これらの CR と Si トラップ検出器は、連続スペクトルを扱う半導体の絶対分光応答度の一次標準も兼ねており、PTB が、光のパワーに関して CR を中心とした統一的な校正チェーンを構築していることがわかる。LM7 は電力置換方式の放射計で、電力による出力感度の直線性校正や吸収体の吸光度測定による分光感度校正を行うことで、波長 350 nm ~ 1064 nm, 出力 3 mW ~ 10 W の範囲で不確かさ 0.1 % での測定を可能としている。PTB では、5 W ~ 120 W レベルの標準器として HLR500 と呼ばれるカロリメータを用いている。平面状の吸収ディスクを水冷のケース内部に納める構造を採っている。吸収ディスクにはヒータが内蔵され、120 W までの電力置換校正が可能である。さらにそれを用いて高出力 (~ 1 kW) 用流水型カロリメータを校正するシステムとなっている。一次標準器や校正チェーンの形態が大きく異なる NIST との間で、この高出力レベルにおいて実施された二国間比較において測定値の差は約 0.7 % であり、両者の測定不確かさである 1 % の範囲内に納まる結果が報告されている<sup>7)</sup>。

PTB において開発された標準は、ドイツ経済技術省の一部である校正認定機関 (DKD) 認定部門によって校正技術の承認を受けた「校正ラボ」を通し、ユーザに供給されるシステムとなっている。現在、光放射関連ではドイツ国内で 6 箇所の校正ラボが承認を受け、第三者に対する校正業務を許可されている<sup>42)</sup>。

## 4.3 NPLのレーザーパワー標準技術

NPL では、CW レーザーパワーの一次標準器として不確



かさ0.005%の液体ヘリウムによる極低温放射計(CR)を配備し、その値を、Siトラップ型検出器を用いて二次(実用)標準器であるサーモパイル検出器に移すことで、供給サービスを提供している。値付けは出力1mWの可視連続スペクトルに対して行われ、その不確かさは0.1%である。サーモパイル検出器は波長感度の一様性が高く測定範囲の拡張性に富んでおり、正確に透過率を決定した光チョッパと組み合わせることで、校正可能な出力レンジを100Wまで拡張することに成功している<sup>6)</sup>。NPLはウェブサイトで標準の供給リストを公開しており、高出力レーザーパワーに関しては、波長1.5μm、80Wで0.75%、10.6μm、100Wで2.0%の不確かさとなっている<sup>43)</sup>。光チョッパを介した間接的な測定法に基づくものであるが、NISTやPTBのカロリメータを用いた直接測定と比較して不確かさに遜色はなく、十分に精密な測定が実現しているといえる。

また、NPLでは、校正精度の向上を目的としてトップハット状に整形したビームを用いている。アパーチャを用いてガウスビーム中心のほぼ様な強度分布とみなせる部分のみを抽出し、それを2枚のレンズで任意の直径に拡大して一様強度の円形ビームとしたうえで測定器へ入射させる。急峻なビームエッジが明確になることで、不確かさ要因である検出器の開口におけるケラレを確実に回避できるとしている<sup>6)</sup>。

NPLが開発した標準は、英国認定機関(UKAS; United Kingdom Accreditation Service)による監査を受けた校正事業所を通じ、国家標準にトレーサブルであることを完

全に保証された上でユーザに供給されるシステムとなっている<sup>44)</sup>。

## 5. 高出力レーザーパワー標準の開発に向けて

本節では、国内外における技術調査の結果をもとに、100Wレベルのレーザーパワー測定に向けた技術的課題を整理し、NMIJにおける今後の開発方法を検討する。高出力レーザーパワーの測定では、受光部の温度上昇による熱放射成分の増加や、吸収体の吸収特性変化などにより測定誤差が大きくなりやすい<sup>2), 25)</sup>。このため、適切な吸収体材料の選択や、耐熱を考慮した設計が求められる。ここでは、高パワー測定法として二通りの手法を検討する。第一は、入射パワーのすべてを直接カロリメトリックに測定する高出力用レーザーカロリメータに関するもので、受光部のレーザー耐性や冷却法が課題となる。第二は、光減衰素子を併用して入射パワーの一部のみを測定する手法で、素子の減衰比の適切な評価が課題となる。

### 5.1 高出力用レーザーカロリメータ

高出力レーザーの測定では、受光部の耐熱性確保が課題となる。エネルギー密度を拡散させるため、多様な受光部形態が存在する。表6にカロリメータの吸収体形状による分類とそれらの特徴を挙げる。最も一般的な「ディスク型」は、構造が単純で小型化が可能であり、高感度化や高速応答性が期待できるため、低出力レーザーパワーの精密測定で広く用いられる。しかしながら、入射エネル

| 分類                               | 形状   | 例                                       | 備考  |   |
|----------------------------------|--|---|---|---|
| 面吸収<br>(Surface absorption)      | ディスク形<br>(disctype)  | 例1<br>基板(アルミナ) / サーモパイル / パッキング材(銅、アルミ) | ・構造が単純<br>・感度良好<br>・時定数: 短いもの可<br>・吸収率、耐パワー性に難点               |   |
|                                  | 多重反射形<br>(Multi-reflection type)<br>又は黒体形<br>(Black body type) | 例2<br>冷却ファン / ヒーター / アルミ                | ・耐パワー性大<br>・高出力カロリメータに適している<br>・吸収率が高い<br>・波長依存性良好<br>・時定数は長い |   |
|                                  |  | 例3<br>コーン(黒、アルミ) / ヒーター                 |   |   |
|                                  | 体積吸収<br>(Volume absorption)                                    | 固体                                      | 例4<br>ガイド / 黒体  | ・耐エネルギー性大<br>・時定数が長い<br>・形状が任意に選べる<br>・波長依存性が大きい<br>・流体式は冷却が容易(フロー式)<br>・直流置換が難しい |
|                                  |  |   | 例5<br>ガイド / 黒体  |   |
|                                  |  | 液体                                      | 例6<br>レンズ / 金属球   |   |
| 例7<br>吸収ガラス / パッキング / エナメルコーティング |  |   |   |   |
| 気体                               | 例8<br>真空   | 例9<br>ヒーター / 吸収体(Cu, インク)               |   |   |
|                                  | 例10<br>圧力検出器 / 圧力検出器(PI, etc)                                  |   |   |   |

表6 カロリメータにおける主な吸収体形状<sup>9)</sup>

ギを一度に局所的に吸収し熱に変換するため、吸収体のレーザー損傷の点から測定出力の上限が存在する。そこで高出力の測定では、レーザービームを段階的に吸収させ熱負荷を分散させる目的で、吸収体をトラップ型やコーン型に配置し、多重反射型するタイプも用いられる。例えばkWレベルのパワー測定が可能なNISTのBB型カロリメータは、トラップ構造内部に円筒ミラーやサンドブラスト加工した反射板を設置し、入射した膨大なエネルギーを拡散、散乱させている<sup>45)</sup>。さらに近年、高耐力な吸収体材料としてカーボンナノチューブ (CNT) の可能性が研究されている。CNTによるコーティングは従来の金黒コーティングと比較して熱伝導率が $10^4$ のオーダーで高く、損傷閾値も10倍以上高い<sup>46), 47)</sup>。これらの特性は高パワー測定用の光吸収体に不可欠なものであり、今後の展開が期待される。

測定出力レベルの引き上げに有効な手法として、フロー型カロリメータがある。この手法は、受光部吸収体の裏面に冷却水の管を通し、レーザーパワーに依存して生じる水温の上昇を測定して、温度変化量と冷却水の流量から計算もしくはヒータによる直流電力置換によってパワーを導出する手法である。NISTやPTBにおいてもkWレベルのパワー測定のためフロー型が導入されている<sup>7)</sup>。この方式は、測定可能出力の引き上げには有効である一方で、冷却水の温度制御や脈動の少ない安定な水圧を得るための循環装置など、付帯設備が複雑かつ大型になる。その結果、不確かさ因子数の大幅な増大が不可避である。フロー型による高出力レーザーパワーの測定は、わが国でも旧電子技術総合研究所において試みられており、カロリメータ自身の測定不確かさは、300 Wの測定で最大1.2%と報告されている<sup>14), 48)</sup>。この値は、等温制御型カロリメータと比較して数倍に上るものであり、フロー型による精密熱量測定の難しさを反映した結果であるといえる。

## 5.2 光減衰素子を用いた測定出力レベル拡張法

一般にカロリメータは、高い精度でレーザーパワーの絶対値測定が可能である反面、一台の測定器がカバーする測定出力レンジは比較的狭い。このため、通常は測定出力別にカロリメータを開発し、校正システムを構築する必要があるが、特に高出力向けのカロリメータの配備には、多大なコストや時間を要する。そこで、光チョッパによる減衰法が用いられる。光チョッパとは、同心円上に開口部を持つ金属製の円盤を光路中に挿入し、モータで回転させることで、CWのレーザー光を断続的に透過させる装置である。応答時定数の十分長い熱型の検出器では、断続光の時間平均パワーをCW光の減衰と等価と見なす

ことができ、断続の時間デューティ比、即ちチョッパの開口比が減衰比となる。チョッパの材質や形状を適切に設計することで、広い出力レンジに対応する安定な減衰器として使うことができる。カロリメータによる絶対感度校正はある一点のみで行い、その他のパワーレベルに関しては、チョッパの減衰比を用いてDUT感度の対パワー直線性を評価する。これにより、校正のパワーレベルを広範囲に拡張することができる。

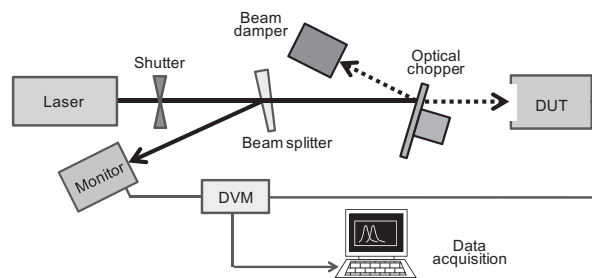


図6 NISTにおける直線性評価装置概略

図6に、NISTが採用しているチョッパを用いた高出力用パワーメータの校正のための測定系を示す<sup>7), 37)</sup>。レーザーから出た光は、分岐比が安定なBSによって二つに分けられる。一方はレーザー出力のモニターとして用いる。BSを透過した成分は、チョッパを通して直線性を校正するDUTへ導かれる。アルミニウム製チョッパの表面は鏡面加工が施され、レーザー光の吸収による損傷を防いでいる。チョッパの開口比は、実験に先立ち、これより低いレーザーパワー測定用に開発された高精度カロリメータ(C-Series)を用いて測定している。この方法では、チョッパの開口比の値がすべての校正値に影響する。すなわち、チョッパ開口比の精密測定が、高出力測定の鍵を握るといっても過言ではなく、カロリメータなど信頼性の保証された測定器を用いた厳密な開口比の評価が求められる。

## 5.3 高出力レーザーパワー標準の開発方法

前節までに述べたとおり、フロー型や高耐力材料の吸収体を採用することで測定範囲をkWレベルの超高出力にまで拡張可能である。しかしこれらのレーザーカロリメータの新規開発には、大きなコストや時間が必要となる。また、冷却水の流動など不確かさ因子が増大し測定精度の向上が難しくなる。一方でチョッパを用いた手法は、限られた技術的資源で測定出力範囲を拡大する有力な手段であるといえる。チョッパを用いた100 Wレベルの測定についてはNPLにおける実施例もあり、十分に現実的である。高出力レーザーパワー標準の開発では、チョッパ

による光減衰法をベースに測定範囲を拡張し、誤差解析を通して不確かさの低減を進めていく、という手法が標準の早期確立に向けた開発法として適するといえる。

## 6. まとめ

本稿では、高出力レーザーパワーの標準技術に関する調査研究と題し、10 W~100 Wの高出力レーザーパワー標準の開発に向けた技術的課題の整理ならびに今後の開発手法を検討した。具体的には、NMIJにおける従来のレーザーパワー標準技術を纏めるとともに、開発した標準の供給のあり方について市場調査の結果を元に検討した。さらに諸外国の標準研究機関における標準技術について調査し、それらを元に我が国における高出力レーザーパワー標準の開発に対する指針を示した。

NMIJには、測定技術の高度化による国家標準の高品質化と国際整合性の確保に加えて、産業界や市場における経済効果を考慮しユーザのニーズを反映した標準供給が求められているといえる。これまで我々は、レーザーパワー標準のほか、レーザーエネルギー標準、ファイバ伝搬光に関するパワーおよび減衰量標を確立し、産業界の動向に応じて標準供給範囲の拡張を進めてきた。しかしながら、今後産業界ではレーザー応用技術の一層の多様化が予想され、上記以外にもレーザー関連量の測定への需要が増加すると考えられる。引き続き、産業界の技術動向や計測標準に対する需要を常に見極めながら、新たな標準技術の整備とそれらの最適な供給体制を検討していく必要があるといえる。

## 謝辞

本調査研究報告書をまとめるにあたり、貴重なご意見、ご指導を賜りました齊藤一朗光放射計測科長、遠藤道幸レーザー標準研究室長、ならびにレーザー標準研究室の諸先輩方に、心より厚く御礼申し上げます。また、校正施設の見学など貴重な機会を頂きました(財)日本品質保証機構の皆様、(株)オフィールジャパンの皆様、さらに、ご多忙の最中レーザーパワー標準に関するアンケート調査にご協力頂きました計測器メーカーの方々に、深く御礼申し上げます。

## 参考文献

1) 光産業動向調査委員会編：光産業の動向（財団法人光産業技術振興協会，2006）132-151.

- 2) 平井紀光：実用レーザー技術（共立出版，1987）121-141.
- 3) 井上武海：標準，光測定器ガイド（田幸敏治，本田辰篤編），（オプトロニクス社，1987）15-19.
- 4) 本田辰篤：光測定器の分類と選択のポイント，光測定器ガイド（田幸敏治，本田辰篤編），（オプトロニクス社，1987）29-36.
- 5) 遠藤道幸：汎用パワー・エネルギーメータ，光測定器ガイド（松本弘一編），（オプトロニクス社，2004）120-126.
- 6) S.Hall and A.Roddie: Better standards support laser power and energy measurements, Laser Focus World, Article No.219771.
- 7) X.Li, T.R.Scott, C.L.Cromer, D.Keenan, F.Brandt and K.Möstl: Power measurement standards for high-power lasers: comparison between the NIST and the PTB, Metrologia 37 (2000) 445-447.
- 8) G.W.Day: Metrology for the optoelectronics industry, SPIE Proc. 4450 (2001) 33-43.
- 9) 本田辰篤，遠藤道幸：カロリーメータ法によるレーザーパワーの精密測定，計測と制御 22 (1983) 508-521.
- 10) 井上武海，山村恭平：高感度レーザーカロリー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 56 (1992) 1259-1275.
- 11) C.E.Johnson: Black electroless nickel surface morphologies with extremely high light absorption capacity, Metal Finishing 78 (1980) 21-24.
- 12) S.Kodama, M.Horiuchi, T.Kunii and K.Kuroda: Ultra-black nickel-Phosphorus alloy optical absorber, IEEE Trans. Inst. Meas. 39 (1990) 230-232.
- 13) 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ーメータの高精度化，電気学会計測研究会資料，IM-00-22 (2000) 55-59.
- 14) 遠藤道幸，本田辰篤：高出力レーザーパワーの精密測定，電気学会論文誌C 108-C (1988) 611-617.
- 15) K.D.Stock and H.Hofer: PTB primary standard for optical radiant power: transfer-optimized facility in the clean-room centre, Metrologia 32 (1995/96) 545-549.
- 16) M.López, H.Hofer and S.Kück: Measurement of the absorptance of a cryogenic radiometer cavity in the visible and near infrared, Metrologia 42 (2005) 400-405.
- 17) K.D.Stock, H.Hofer, M.White and N.P.Fox: Lowest uncertainty direct comparison of a mechanically-cooled and helium-cooled cryogenic radiometer, Metrologia 37 (2000) 437-439.

- 18) D.J.Livigni, C.L.Cromer, T.R.Scott, B.C.Johnson and Z.M.Zhang: Thermal characterization of a cryogenic radiometer and comparison with a laser calorimeter, *Metrologia* 35 (1998) 819-827.
- 19) 国際度量衡局 (BIPM) ウェブサイト : <http://www.bipm.org/en/home/>
- 20) 武田幹雄, 井上武海, 山村恭平 : クライオラジオメータ方式による微弱レーザーパワーの構成システムの開発, 広島県立総合技術研究所研究報告書 37 (1994) 97-99.
- 21) 齊藤一朗 : 測光標準, 産総研 Today 04 (2005) 36-37.
- 22) 市野善朗 : 極低温放射計による分光応答度絶対校正, 産総研 Today 12 (2007) 29.
- 23) D.Fukuda, N.Zen, M.Ohkubo, H.Takahashi, K.Amemiya and M.Endo: Improvements in the AIST cryogenic radiometer with superconducting thermometer, *IEEE Trans. Inst. Meas.* 56 (2007) 356-360.
- 24) 福田大治, 吉澤明男, 土田英実 : 超伝導単一光子検出器, 電子情報通信学会誌 90 (2007) 674-679.
- 25) K.Sakurai and T.Maruyama: A millimeter-wave microcalorimeter, *IRE Trans. Inst. I-11* (1962) 270-276.
- 26) T.Inoue and K.Yamamura: Advanced control method for calorimetric power measurement, *IEEE Trans. Inst. Meas.* IM-32 (1983) 508-509.
- 27) K.Sakurai, Y.Mitsunashi and T.Honda: A laser microcalorimeter, *IEEE Trans. Inst. Meas.* IM-16 (1967) 212-219.
- 28) M.Endo, T.Inoue: A double calorimeter for 10-W level laser power measurement, *IEEE Trans. Inst. Meas.* 54 (2005) 688-691.
- 29) レーザパワー校正用機器管理マニュアル QMC MLP03 (in progress)
- 30) 飯塚幸三監修 : 計測における不確かさの表現のガイド (日本規格協会, 2000) 19-22.
- 31) 日本品質保証機構 (JQA) ウェブサイト : <http://www.jqa.jp/>
- 32) I.Vayshenker, J.H.Lehman, D.J.Livigni, X.Li, K.Amemiya, D.Fukuda, S.Mukai, S.Kimura, M.Endo, J.Morel and A.Gambon: International optical power meter comparison between NIST, NMIJ\_AIST, and METAS, *Appl. Opt.* 46 (2007) 643-647.
- 33) 米国立標準技術研究所 (NIST) 電子電気工学研究室 光電子工学部門 (部門番号815) ウェブサイト : <http://www.boulder.nist.gov/div815/>
- 34) E.D.West, W.E.Case, A.L.Rasmussen and L.B.Schmidt: A Reference calorimeter for laser energy measurements, *J. Res. Natl. Bur. Stand.-A. Phys. Chem.* 76A (1972) 13-25.
- 35) S.E.Smith and G.Maksymenko: Calorimeter measurement of optical power from pulsed lasers, *IEEE Trans. Inst. Meas.* IM-21 (1972) 430-438.
- 36) E.D.West and W.E.Case: Current status of NBS low-power laser energy measurement, *IEEE Trans. Inst. Meas.* IM23 (1974) 422-425.
- 37) Z.M.Zhang, D.J.Livigni, R.D.Jones and T.R.Scott: Thermal modeling and analysis of laser calorimeters: *J. Thermophys. Heat Transfer* 10 (1996) 350-356.
- 38) B.C.Johnson, A.R.Kumer, Z.M.Zhang, D.J.Livigni, C.L.Cromer and T.R.Scott: Heat transfer and modeling of a cryogenic laser radiometer, *J. Thermophys. Heat Transfer* 12 (1998) 575-581.
- 39) X.Li, T.Scott, S.Yang, C.Cromer and M.Dowell: Nonlinearity measurement of high-power laser detectors at NIST, *J. Res. Natl. Inst. Stand. Technol.* 109 (2004) 429-434.
- 40) G.E.Chamberlain, P.A.Simpson and R.L.Smith: Improvements in a calorimeter for high-power CW lasers, *IEEE Trans. Inst. Meas.* IM27 (1978) 81-86.
- 41) ドイツ物理工学研究所 (PTB) レーザ放射測定部門 (部門番号4.13) ウェブサイト : <http://www.ptb.de/en/org/4/41/413/index.htm>
- 42) ドイツ校正認定機関ウェブサイト : <http://www.dkd.eu/>
- 43) 英国立物理学研究所 (NPL) レーザパワーエネルギー測定部門ウェブサイト : <http://www.npl.co.uk/server.php?show=ConWebDoc.411>
- 44) 英国認定機関 (UKAS) ウェブサイト : <http://www.ukas.com/>
- 45) R.L.Smith, T.W.Russell, W.E.Case and A.L.Rasmussen: A calorimeter for high-power CW lasers, *IEEE Trans. Inst. Meas.* IM-21 (1972) 434-438.
- 46) J.Lehman and A.Dillon: Carbon-nanotube coatings promise better thermal detectors, *Laser focus world*, Article No.231725.
- 47) J.H.Lehman, C.Engtrakul, T.Gennett and A.C.Dillon: Single-wall carbon nanotube coating on a pyroelectric detector, *Appl. Opt.* 44 (2005) 483-488.
- 48) 遠藤道幸, 本田辰篤 : 高パワーレーザー測定用カロリメータの開発, 電子技術総合研究所彙報 47 (1983) 105-113.