

レーザーパワー / エネルギー標準の開発

座 間 達 也

Establishment of Laser Power Standard and Laser Energy Standard

Tatsuya ZAMA

National Metrology Institute of Japan (NMIJ), which is one of institutes of National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST), is conducting researches and technical developments on establishing measurement standards. Laser Standards Section, which is one of sections of Photometry and Radiometry Division in National Metrology Institute of Japan, is in charge of conducting researches and technical developments on establishing the standards for radiation strength of laser. Laser Standards Section has developed and established laser power standard and laser energy standard, and is supplying these standards at present. This paper shows a background for which laser standard is necessary, the principle for establishing the standards, the expansion of the standards and other topics.

Key words: laser, power, energy, electrical substitution radiometer, linearity, optical fiber

レーザーは、通信、情報、加工、医療分野などで広く利用され、開発からほぼ半世紀を経た現在にあっても、その優れた特性、可能性への期待は高く、レーザーに関する研究開発、利用、応用製品開発の裾野がさらに広がりつつある。この裾野の広がりや相まって、レーザーの特性を精密評価することに対する要望も増え、普遍（不変）性・信頼性の高い評価を可能とするレーザー関連計量標準への期待が高まっていることはいままでのない。

また、経済のグローバル化に伴い、レーザー関連分野ははじめ多くの分野で分業化が進展し、部品供給先を外部に求める生産メーカーは少なくない。このような状況下では、最終製品を組み上げる生産メーカーにとって、外部から供給された部品が必要となる仕様を満たしているか否かを判定することが重要になり、部品供給元にとって、供給部品が仕様に適合していることを証明することが重要になる。判定・証明の際の定量評価基準として普遍（不変）性・信頼性の高い評価技術が求められることは論をまたず、このような理由からも計量標準に対する要望は高い。

独立行政法人産業技術総合研究所、計測標準部門、光放射計測科、レーザ標準研究室では、レーザーにかかわる計

量標準のうち放射の強さにかかわる標準を担当し、その中でも特に重要なレーザーにより伝送されるパワー、エネルギーの国家標準の開発・確立を行い、社会に供給している。また、基本量であるレーザーパワーに関しては、空間中を伝播するもの以外に、通信等で広く利用されている光ファイバー中を伝播するレーザーパワー標準や、当該標準のダイナミックレンジを広げるのに有効な光減衰量の標準に関する開発・確立・供給も行っている。

標準の確立には普遍性・不変性が担保された絶対値のスケールが必要であり、絶対値のスケールは物理法則・原理に基づき決定されるが、物理法則・原理を理想的に適用することは現実的には不可能で、利用される装置、環境条件等に起因する不完全性が伴う。標準確立に際しては、このような不完全性に起因する絶対スケールの不確かさ評価も併せて行い、各国の計量標準研究機関との国際比較を適宜行うことで、確立した標準のスケールが各国のスケールと不確かさの範囲内で一致することを確認し、国際的同等性の確保、標準の信頼性向上、充実に向けた研究開発を進めている。

1. 基本単位

標準確立に際しては、単位に基づいた定量化が必要である。普遍（不変）性、絶対性を担保するのに最も適した基本単位として広く国際的な合意を得たものが、国際単位系（仏語表記：Système International d'Unités，英語表記：The International System of Units，略称 SI）であり、7つの SI 基本単位（長さ m，質量 kg，時間 s，電流 A，熱力学温度 K，物質質量 mol，光度 cd）および、複数の組立単位（力 N，エネルギー J，電圧 V，単位時間あたりのエネルギー W 等）から構成される。よって、標準を確立するにあたり最も適当なのは、これらの基本単位に基づいて絶対スケールを実現する方法である。

レーザーの放射の強さにかかわる標準の確立に際しては、国際単位系（SI）の組立単位である「単位時間あたりのエネルギー W」または「エネルギー J」が定量化のもとになる単位となる（放射の強さにかかわる単位としては、SI 基本単位の光度 cd があるが、定義上、光度 cd は W をもとに組み立て可能な単位で、W と cd はそれぞれ独立の単位ではないため、どちらか一方を定量化のもとになる単位として取れば十分である。加えて cd は人間の目で見た際の明るさにかかわる単位であり、照明用途で用いられることがまれなレーザー放射の定量化には適当ではない）。

2. 絶対スケールの実現

レーザーパワー、レーザーエネルギーは、それぞれ単位時間あたりのエネルギー W，エネルギー J をもとに、レーザー放射の強さを定量化したものである。これらの単位の絶対スケールを実現する方法は原理的にはいくつかあるが、現在のところ、極低温で現れるジョセフソン効果、および、量子ホール効果に基づき決定された電圧 V と電気抵抗 Ω の絶対スケールをもとに、単位時間あたりのエネルギー W（= 電力 W）を組み上げ、さらにセシウム原子の状態間遷移に基づき決定された時間 s との組み合わせでエネルギー J（= $W \cdot s$ ：電力 \times 時間）を組み上げて、これらを基準にしてレーザー放射の強さを定量化するやり方が、絶対スケールの不確かさを最小にできる手法である。このような理由から、レーザーパワー、レーザーエネルギー標準の絶対スケールを実現するための上位標準として、電気標準および時間標準の絶対スケールが用いられている。

2.1 レーザーパワー標準の確立

以下では、レーザーパワー標準の確立手法について概説する。確立には前述の電気標準の絶対スケールが用いられるが、それに加えて、電力置換型放射計と呼ばれる熱型の特種な比較装置が利用される。

当該放射計は、内部に光吸収体をもち、この光吸収体に外部からレーザー光と電力を入力することが可能な構造で、入射レーザー光および入力電力はこの光吸収体で吸収され、熱量に変換される。当該放射計は、入射レーザー光により与えられた熱量と等しい熱量を与える入力電力を判別できる機能を有しているため、熱量を介して入射レーザーパワーと等価の入力電力を決定することが可能で、入力電力を電気標準の絶対スケールを用いて値付ければ入射レーザー光により吸収体に与えられた単位時間あたりのエネルギー W を決定することができ、これにより、レーザーパワー標準が確立される。

レーザーパワー標準確立に際しわれわれが用いている電力置換型放射計の概略図を図 1 に、写真を図 2 に示す。熱量を介して等価な電力を決定する手法はいくつかあるが、ここで採用されている手法は、光吸収体を常温環境下で動的に等温制御し、外部電力の差分から入射レーザーパワーを評価する手法であり、光吸収体には基準温度ブロックからの温度差を検出するためのサーミスター、吸熱素子（熱電冷却モジュール＝ペルチェ素子）および、発熱素子（光吸収体加熱用ヒーター）が付けられている。外部電力の差分は、電気標準の絶対スケールで校正された電圧計および電流計（正確には校正された抵抗と電圧計）により評価される。

熱電冷却モジュールはその吸熱量が一定値に保たれるように動作され、吸熱量設定値は、想定される外部からのレーザーパワーより大きい。そのため、当該モジュールのみを動作させた場合は光吸収体の温度は基準温度ブロックより低くなってしまいが、電力置換型放射計の動作時は、光吸収体加熱用ヒーターへの電力供給が並行して行われ、サーミスターからのフィードバック信号により光吸収体検出部の温度が常に外側の基準温度ブロックの温度と等しくなるように印加電力が動的に制御されるため、光吸収体検出部の温度は基準温度ブロックの温度に常に等しい。

外部からのレーザー入射がない場合は、上記のスキームで光吸収体検出部の温度が外側の基準温度ブロックの温度と等しくなるように制御されるが、外部からのレーザー入射がある場合は光吸収体への新たな熱流入が加わるため、光吸収体加熱用ヒーターの印加電力がサーミスターからのフィードバック信号により減らされることになる。入射レーザーパワーと等価の入力電力は、この電力減少分から決定される。

等価な入力電力の決定手法を以下に示す。

まず、光吸収体に入射するレーザーパワーに関して成立する関係について述べる。われわれが用いている電力置換

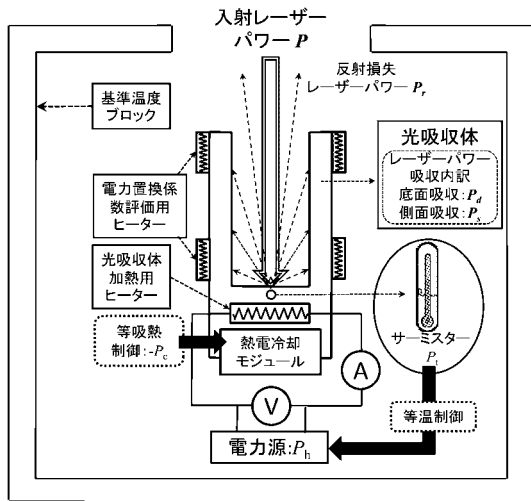


図1 レーザーパワー標準確立に際して用いられる電力置換型放射計の概略図。

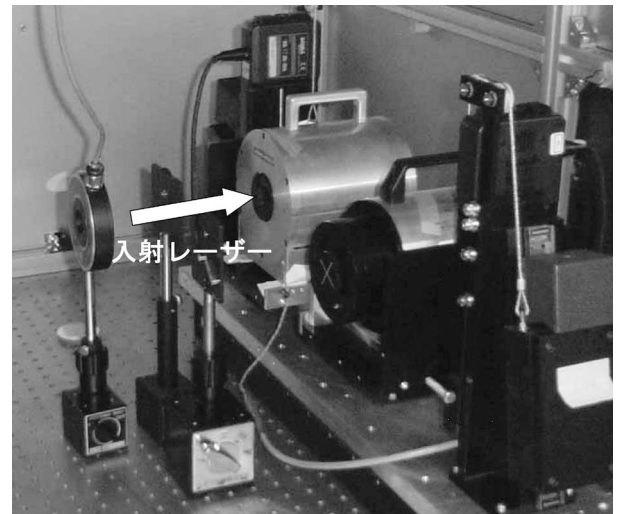


図2 レーザーパワー標準確立に際して用いられる電力置換型放射計。

型放射計の光吸収体は内面が黒化処理されており反射率が非常に低いため、入射されたレーザー放射のほとんどは底面で吸収される。また、光吸収体は一方が閉じた円筒構造で、底面の大きさに比べて側面が長く、黒化処理材料は拡散反射性が良好な材料であるため、底面での反射成分のほとんどは円筒側面での吸収、もしくは多重反射を介した吸収により吸収される。しかしながら、底面で拡散反射された成分のうち、ある立体角方向に反射されるごくわずかな成分は、吸収を免れ外部への反射損失となるため、このような底面でのレーザーパワー吸収分を P_d で、円筒側面でのレーザーパワー吸収分を P_s で、反射によるレーザーパワー損失分を P_r で示すと、入射するレーザーパワー P に対して、以下の式 (1) が成立する。

$$P - P_r = P_d + P_s \quad (1)$$

上式左辺は自由空間の放射パワーに関する項であり、右辺は光吸収体に吸収される熱量に関する項である。

次に、光吸収体内部の熱量の関係について議論する。まずレーザー入射がない場合を考えると、このときの光放射体検出部は、光吸収体加熱用ヒーターの発熱と、熱電冷却モジュールの吸熱とのバランスにより基準温度ブロックと等しい温度に制御される。ヒーター、熱電変換モジュール、光吸収体表面との間には、光吸収体の熱伝導率に応じた温度勾配が生じることで、発熱、吸熱に応じた熱流束が生じ、光吸収体全体の温度分布を定常状態に保つ。光吸収体は熱伝導率の大きな材料によって製作されているため、全体はほぼ同一温度で、加熱用ヒーターからの熱流束の大部分は熱電変換モジュールに吸収されるが、その熱伝導率は有限であるため、サーミスター設置位置とその他の位置

とでは若干の温度差が存在し、結果として若干の熱の逃げが生じる可能性があるため、光吸収体加熱用ヒーターからの熱流束 P_{h1} と熱電変換モジュールに吸収される熱流束 $-P_c$ との間には以下の関係が成立する。

$$k_h P_{h1} - P_c = 0 \quad (2)$$

ここで、 k_h は光吸収体加熱用ヒーターからの熱流束のうち熱電変換モジュールに吸収される熱流束の割合を示す。

次に、光吸収体にレーザーパワー P が入射される場合を考える。このとき、光吸収体に吸収されるレーザーパワーは $P_d + P_s$ で、これが光吸収体により熱に変換され、 $P_d + P_s$ の熱流束となる。レーザー入射がない場合と比較して、新たな熱源が発生するため、光吸収体加熱用ヒーターからの熱流束はフィードバックコントロールにより P_{h2} となり、上記と同様、若干の熱の逃げが生じる可能性があるため、吸収体に吸収されるレーザーパワー P_d 、 P_s による熱流束のうち熱電変換モジュールに吸収される熱流束の割合をそれぞれ k_d 、 k_s とすると、以下の関係式が成立する。

$$k_h P_{h2} + k_d P_d + k_s P_s - P_c = 0 \quad (3)$$

上記の式 (2)、(3) からわかる通り、光吸収体加熱用ヒーターの電力減少分は $P_{h1} - P_{h2}$ で表され、 $P_h = P_{h1} - P_{h2}$ とすれば、式 (1)、(2)、(3) から、入射するレーザーパワー P と電力減少分 P_h の関係が以下のように表される。

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

よって、 P_r 、 P_s 、および熱電変換モジュールに吸収される

熱流束の割合 k_h , k_d , k_s を決定することにより、電力減少分 $P_h = P_{h1} - P_{h2}$ と入射するレーザーパワー P の関係が決定できる。

反射によるレーザーパワー損失分 P_r 、光吸収体加熱用ヒーターからの熱流束 P_h 、底面でのレーザーパワー吸収による熱流束 P_d については、光吸収体全体の反射率の実測、および、黒化処理材料の反射率の実測値に光吸収体幾何学形状による吸収を加味した評価の両者を併せて行うことにより評価された。

熱電変換モジュールに吸収される熱流束の割合 k_h , k_d , k_s については、その定義から $k_i P_i$ ($i=h, d, s$) が熱電変換モジュールに吸収される熱流束で、各発熱部と熱電変換モジュールとの温度差 T_i と熱抵抗 r_i との間には、 $T_i = r_i k_i P_i$ の関係が成立するため、 $k_i/k_j = (T_i/T_j) (r_j/r_i) (P_j/P_i)$ が成り立つ。よって k_i/k_j は、熱抵抗 r_i の実測評価結果と、光吸収体加熱用ヒーター、電力置換係数評価用ヒーターに既知の電力を印加することにより各発熱部からの発熱 P_i を模擬した際の各発熱部と熱電変換モジュールとの温度差 T_i の実測結果より評価された。

式(4)第2項、第3項は第1項と比較して小さく、入射するレーザーパワーは光吸収体加熱用ヒーターの電力減少分にほぼ等しいが、われわれは式(4)第2項、第3項も補正項として加味し、光吸収体加熱用ヒーターの電力減少分を電気標準の絶対スケールで評価した結果に第2項、第3項で評価された補正係数を乗じることで、入射するレーザーパワーの標準を確立している^{1,2)}。

2.2 不確かさの評価

標準確立に際しては、上記に加えて、国際単位系(SI)の絶対スケールと実現したスケールとの間に生じる可能性のあるずれを不確かさとして評価する必要がある。われわれは、電気標準の絶対スケールの不確かさ、上記各々の評価を多数繰り返すことによる再現性等から、不確かさを統計的に評価している。

吸収率の波長依存性が不確かさと比較して無視できることが確認されている黒化材料は現在のところないため、光吸収体の反射率は波長の関数としてとらえる必要があり、光吸収体の反射率評価不確かさはレーザーの波長ごとに評価する必要がある。また、光吸収体に入射するレーザーパワーによって熱的特性評価の繰り返し再現性が異なるため、光吸収体の反射率評価不確かさ、熱的特性の評価不確かさは波長、パワーに依存し、一定ではない。よって、われわれはレーザーの波長、パワーに応じた不確かさ評価も行っている(詳細は後出の表1を参照のこと。不確かさはレーザーのビーム径、ビームプロファイルにも依存する

が、評価対象を代表的なものに限定しており、レーザービーム径、ビームプロファイルに応じた不確かさ評価は実施していない)。

2.3 確立した標準の供給方法

検出器(レーザーパワーメーター)は一般に、レーザー自身と比較して堅牢性、安定性に優れる。よって、上記のようにして確立した標準の供給は、レーザーパワーメーターの校正によって実施される。校正対象のレーザーパワーメーターに上記の電力置換型放射計でパワー絶対値評価がされたレーザー放射を入射させ、入射レーザーパワーの絶対値とパワーメーター信号との比(感度)、およびこの比の不確かさを評価することで、校正が完了する。校正依頼者には校正値、不確かさ、校正実施条件(使用環境温度、レーザー径、ビームプロファイル等)が連絡されるため、校正依頼者は当該パワーメーターを校正実施条件と等しい環境下で利用することで、レーザーパワーの絶対値およびその不確かさを評価することが可能となる。

2.4 確立した標準の拡張

レーザーパワー標準の要望は、空間中を伝播するレーザーのみならず、通信等で広く利用されている光ファイバー中を伝播するレーザーに関しても高く、また、材料加工分野ではハイパワーレーザーに関する標準の要望が高い。これまで述べた手法はおもに数十 μW ~ 10W 程度の空間系レーザーで適用可能な方法であり、光ファイバー中を伝播するレーザーや 10 W を超えるレーザーに対する標準の要望には別建てで標準を確立するか、確立済みの標準を拡張する必要がある。

光ファイバー系を伝播するレーザーは、特にマルチモードの場合にファイバー通過後のビーム広がりが大きく、上述の電力置換型放射計で紹介した深い円筒形状の光吸収体では入射光のすべてが底面に到達する条件を整えることが困難な場合がある。また、ビーム広がりが大きいため、全ビームを光吸収体に導くためには光ファイバー端面を光吸収体に近接して設置することが必要で、ビーム広がり小さくレーザー放射源と光吸収体の間隔を離すことのできる空間系と比較すると、ファイバー端面—光吸収体間の多重反射による効果を考慮することも必要となる。このような問題を解決するため、われわれは平板の吸収体より成る電力置換型放射計を作成し、光ファイバーパワー標準の確立に用いている。光吸収体構造が平板であるため、吸収体の吸収率は円筒側面での光吸収がある深い円筒形状の光吸収体に及ばないが、形状が単純なため、吸収体反射率の評価は容易で、多重反射の効果も評価しやすい³⁾。

また、光ファイバー系では数十 μW 以下、材料加工分野

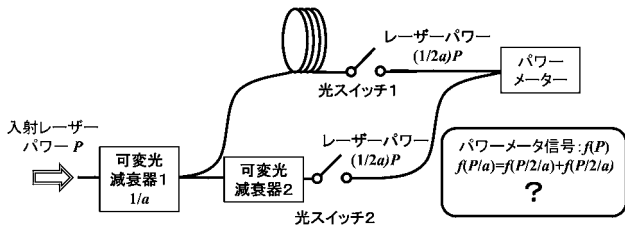


図3 検出器（レーザーパワーメーター）の直線性標準（光減衰量標準）の確立手法。

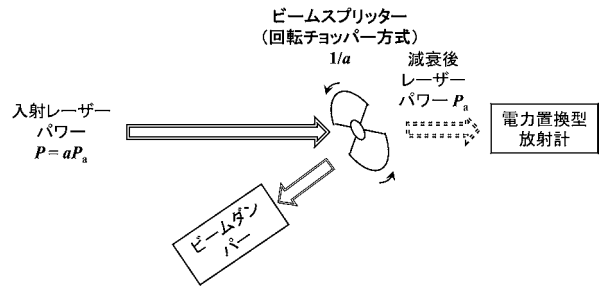


図4 ビームスプリッターを用いた高パワー域標準への拡張手法。

では 10 W を超えるレーザーパワー標準の要望が高いが、低パワー域への拡張要望に対しては、これを可能とする検出器（レーザーパワーメーター）の直線性標準（光減衰量と称される）を提供することで要望に対応し、高パワー域への拡張要望に対しては、減衰比のわかったビームスプリッターによる高パワー域への拡張手法を開発することで要望に対応することを予定している。

図3、図4にそれぞれの標準の確立手法の概略を示す。

数十 μW 以下のレーザーパワーは、これまで述べた電力置換型放射計では十分な信号雑音比が得られず測定が困難なパワーレベルであり、電力置換型放射計を用いるのは現実的ではない。そのため、半導体型検出器等、微弱パワーに対しても十分な信号雑音比をもつ検出器をベースにしたレーザーパワーメーターの直線性標準（光減衰量）を確立することで対応する。直線性標準確立に際しては、図3に示す重畳法と呼ばれる手法を用いる。具体的には、入射レーザーを光ファイバーで2分岐し、各々の分岐からのレーザーの放射をパワーメーターで測定し、分岐比 $1/a$ の可変光減衰器2の減衰率を調整することで、各々の分岐からの放射の大きさを等しくする（放射の大きさが等しいことがわかるだけで十分なため、パワーメーターは測定信号の再現性が良好であればよく、絶対値が校正されている必要はない）。光スイッチ1および2をon/offすると、パワーメーター受光部には、 P/a のレーザーパワー、およびちょうどその半分の $P/2/a$ のレーザーパワーが実現される。可変光減衰器1の調整により、 P/a をこれまで述べた電力置換型放射計で校正可能なパワーレベルとし、 P/a を電力置換型放射計で校正しておけば、上記より、電力置換型放射計で校正可能なパワー P/a のちょうど $1/2$ のパワー $P/2/a$ もパワーメーター受光部に実現可能となるため、2分岐されたレーザーの各々を独立にパワーメーターに入力した場合のパワーメーター信号 $f(P/2/a)$ と、2分岐されたレーザーの両方をパワーメーターに入力した場合のパワーメーター信号 $f(P/a)$ の関係 $f(P/a) = k_{nl} \times 2f(P/2/a)$ （パワーメーターの入力と出力信号の関係の直線性からのずれを示

す項を k_{nl} とした) を求めておけば、電力置換型放射計で校正可能なパワーレベルの $1/2$ がパワーメーターによって校正可能となる。次に可変光減衰器1を調整し2分岐されたレーザーの両方をパワーメーターに入力した場合のレーザーパワーを $P/2/a$ に調整すれば、校正可能なパワーレベルの $1/4$ が校正可能となり、順次これらを繰り返すことにより、低いパワーレベルまで絶対パワー校正可能範囲を拡張することが可能となる⁴⁾。

10 W を超えるレーザーパワーについても、電力置換型放射計の許容可能なパワーレベルを超えるため、やはり測定が困難なパワーレベルである。そのため、分岐比 $1/a$ のわかった回転チョッパー方式のビームスプリッターを用いて、パワーレベルを電力置換型放射計で評価可能なレベル P_a に減衰させることで、電力置換型放射計単体では評価不可能なレーザーパワー aP_a を評価し、このレーザーパワーを高パワー用レーザーパワーメーターに入射させてレーザーパワーの絶対値とパワーメーター信号との比（感度）を評価することで、絶対パワー校正可能範囲を高パワー域に拡張することを計画している。

2.5 その他のレーザーパワー標準確立方法

熱量を介して等価な電力を決定する手法として、上記のような等温制御電力差分評価手法以外に、等温制御しない光吸収体にレーザー放射と外部電力を各々独立に入力し、光吸収体の温度上昇後の平衡温度を吸収熱量の指標とする手法もある。この手法では、光吸収体の温度上昇終了後の平衡温度が各々で等しくなるよう外部電力を調整し、この外部電力より入射レーザーパワーを評価するが、等温制御ではないため、外部との温度差による熱伝動、対流伝熱、放射の影響が大きくなるのが危惧される。これらを防ぐために、吸収体および吸収体周辺温度を極低温（例えば液体ヘリウム温度近傍）まで下げた極低温放射計と呼ばれる放射計が実用化され、現在では商業ベースで販売もされており、その不確かさの小ささ（ $10^{-2}\%$ レベル）、常温制御型の電力置換型放射計を自前で構築できる技術をもつ研究機関が少ないという現状等から、近年は世界的に

当該放射計がレーザーパワー標準の組み立てに採用されることも多い。しかしながら、この手法は、液体ヘリウム温度等の極低温環境を前提としているため、光吸収体の開口径を大きくすることが困難で開口径に上限があること、冷却負荷の点で入力パワーにも上限（サブ mW レベル）が存在すること等の理由から、一般に要望の高いレーザーのパワー評価には必ずしも適していない。そのため、極低温放射計でパワーを評価したレーザーを、大開口で面感度むら小さく、入射パワーと信号との線形性からのずれも評価済みの検出器に入射し、絶対値評価可能なレーザー径、パワー域を拡張することが必要になるが、この追加評価に伴う不確かさは大きく、最終的な不確かさはわれわれが等温制御電力差分評価手法で実現できている不確かさと同程度となってしまう。

われわれの常温制御型電力置換型放射計は、極低温放射計と比較して設計の自由度が高く、評価が必要とされるレーザーに対しての設計の最適化が可能という利点がある。われわれは、この利点を最大限生かし、評価対象のレーザーに応じた電力置換型放射計を導入することで、絶対値評価にかかわる評価項目を少なく抑え、結果として不確かさを低減することに成功している。

このほかに、熱量、電力標準を介さず、レーザーパワー絶対値を評価する手法として、光子1個1個をカウントするフォトンカウンティングがあり、われわれも超電導検出器を用いたフォトンカウンティングによる標準構築に着手している⁵⁾。しかしながら、検出器に入ってきた光子すべてがカウント可能な（量子効率 100%が保証された）理想的な検出器は現状存在しないため、国際単位系 (SI) の絶対スケールに準じた評価のためには検出器の量子効率の評価が必要となる。しかしながら、現状の技術で見込まれる量子効率の評価不確かさはかなり大きいこと、単位時間あたりの光子カウント数には上限があり、現時点で当該手法により校正可能なパワーレベルは実用的に要求されるレーザーのパワーレベルよりかなり低く、前記の拡張手法等を用いてパワーレベルを拡張する必要があること、国際単位系 (SI) の絶対スケール実現のため必要となる評価項目のうちで評価が難しい項目があること等、現時点では標準確立に際して克服すべき問題は多く、評価が可能な項目のみに限って不確かさを評価したとしても、フォトンカウンティングによるレーザーパワー絶対値の評価不確かさは、これまでに述べた熱量、電力標準を介したレーザーパワー標準の不確かさに及ばない。今後の研究進展が望まれる。

2.6 レーザーエネルギー標準の確立

以下では、レーザーエネルギー標準の確立手法について

概説する。レーザーパワー標準と同じく、確立には前述の電気標準の絶対スケール、および電力置換型放射計が用いられるが、電気標準より実現可能なスケールは電力 W であるため、エネルギーの次元 J を実現のため時間標準の絶対スケール s も併せて用いる。

レーザーパワー標準の確立に際しては、電力置換型放射計を用いて電力と入射するレーザーパワーを比較したが、レーザーエネルギー標準の確立に際しては、時間幅 s 、電力 W 既知の電気パルスによる電気エネルギーとレーザーパルスのエネルギーを電力置換型放射計により比較する。パルスの時間幅が短く、等温制御フィードバックでは追従が困難なため、ここで用いられる電力置換型放射計には等温制御機能がなく、レーザーパルスを光吸収体に入射した際、および、既知の電気パルスを光吸収体に設置されたヒーターに印加した際の光吸収体の温度上昇を比較することで、入射レーザーパルスのエネルギーを電気パルスのエネルギーに換算する。

時間幅 s 、電力 W 既知の電気パルスの生成には、定電圧源と高速のゲートスイッチを用い、電圧源の電圧、パルス生成回路の内部抵抗、電力置換型放射計のヒーター抵抗を電気標準の絶対スケールに基づいて評価するとともに、時間標準の絶対スケールで校正された周波数カウンターにより電圧パルス幅の評価を行う。これにより、光吸収体に設置されたヒーターに印加されるエネルギー J ($=$ (電気抵抗)² / 電圧 \times 時間幅 s) を国際単位系 (SI) の絶対スケールに基づき決定することができる。光吸収体の温度上昇は熱電素子で測定され、温度上昇は熱電素子の出力電圧変化の形で出力される。

電力置換型放射計による比較を行うにあたり、パルスレーザーのパルス形状と、印加電気パルスの形状を完全に等しくして比較するのが理想であるが、パルスレーザーからのパルス形状はパルスごとにばらつくなど再現性に問題があり、また、電気パルスでパルスレーザーレベルのエネルギーをヒーターに投入するのは困難なため、当該パルスと電気パルスの形状を完全に等しくして比較することは現実的ではない。そのため、レーザーエネルギー標準の確立に先立ち、電気パルスのエネルギー、時間幅、電力置換型放射計の測定環境等を広い範囲で変化させた際の光吸収体の温度上昇特性を評価し、当該放射計の感度、すなわち [温度上昇の最大値 / 印加パルス電力] (実際に測定可能なのは [熱電素子の出力電圧の最大値 / 印加パルス電力]) が一定とみなされる電気パルスエネルギー範囲、パルス時間幅上限、電力置換型放射計測定環境の変動範囲を応答関数等を用いた理論的考察を加えて評価し、各パラメーター

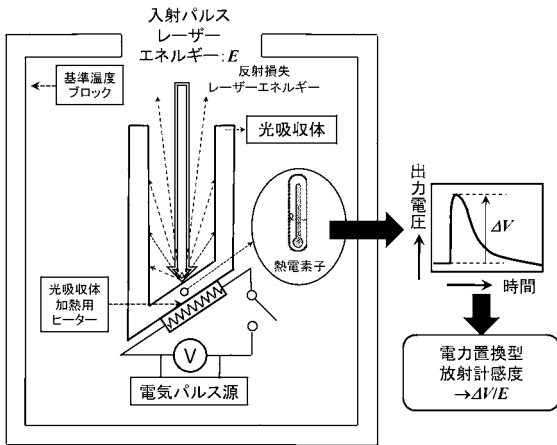


図5 レーザーパルスエネルギー確立に用いる電力置換型放射計の概略図.

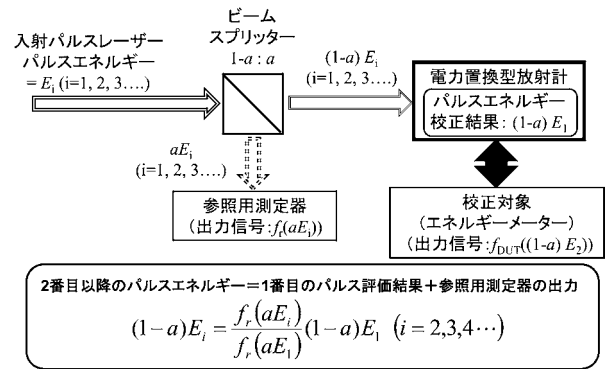


図6 レーザーパルスエネルギー校正の概略図.

表1 確立・供給している標準, およびその不確かさの概要.

項目	詳細	校正対象	不確かさ
レーザーパワー	404 nm, 50 μW~10 mW	パワーメーター	0.13%~0.22% (*)
	488 nm, 515 nm, 10 mW~1 W		0.17%~0.70% (*)
	633 nm, 50 μW~10 mW		0.13%~0.22% (*)
	1550 nm, 50 μW~1 mW		0.13%~0.22% (*)
	1064 nm, 1 W~10 W		1.1%
	10.6 μm, 1 W~10 W		1.3%
光ファイバーパワー	850 nm マルチモード, 50 μW~1 mW	パワーメーター	0.21%~0.48% (*)
	1310 nm, 1550 nm, 50 μW~1 mW		0.23%~0.37% (*)
光減衰量	1310 nm, 1550 nm, 0 dBm を基準として -90 dBm まで 9 dB または 10 dB 間隔	パワーメーター	0.0005 dB~0.01 dB (*)
	1465 nm, 0 dBm を基準として +24 dBm まで		0.0029 dB~0.0050 dB (*)
	1550 nm, 0 dBm を基準として +30 dBm まで 3 dB 間隔		0.0019 dB~0.0052 dB (*)
レーザーエネルギー	1064 nm, 1, 2, 5, 10, 20, 50, 100 mJ	エネルギーメーター	1.5%~1.9% (*)

* 不確かさはパワーレベル, エネルギーレベルに依存する.

がこの許容変動範囲 (パルスエネルギー 1~100 mJ, パルス幅 2 秒以下) 内にあるレーザーパルスエネルギーを評価対象とした.

また, 上記評価に必要な熱電素子の出力電圧変化を十分な信号雑音比で検出するためのノイズ評価手法, フィルター適用手法等の構築, 光吸収体の光学特性に基づく吸収体からの反射損失評価, 光吸収体温度上昇による吸収体からの放射損失評価, パルスレーザー入射の際の光吸収体衝撃加熱による震動, 音によるエネルギー損失評価, 光吸収体のヒーター設置位置と光吸収体へのレーザーパルス入射位置の違いに起因する光吸収体温度上昇の違いの評価等を併せて行うことで, パルスレーザーに対する電力置換型放射計の感度 [熱電素子の出力電圧の最大値 / 入射レーザーパルスエネルギー] とその不確かさを決定し, レーザーエネルギー標準を確立した. 図5にレーザーパルスエネルギー確立に用いる電力置換型放射計の概略図を示す.

確立した標準の供給に際しては, 上記パルスレーザーの

再現性の問題, 堅牢性の問題等を考慮し, レーザーパワーの供給手法と同じく, 検出器 (レーザーエネルギーメーター) の感度を校正対象とした. 図6にレーザーパルスエネルギー校正の概略を示す. 図では, 簡単な例として, パルスレーザーから放射された1番目のパルスを電力置換型放射計に入射させてエネルギー絶対値を決定した後, 2番目のパルスをレーザーエネルギーメーターに入射させたときの感度を決定するやり方を示している. スプリッターを介して参照用測定器の信号が常時モニターされているため, 参照用測定器の信号からパルス間の相対エネルギーを決定することができるので, 1番目のパルスのエネルギー絶対値と参照用測定器の信号から2番目以降のパルスエネルギー絶対値が決定でき, これと2番目のパルスをレーザーエネルギーメーターに入射させたときの出力信号から校正対象のレーザーエネルギーメーターの感度を決定することができる (実際の校正では単一パルスに基づいた校正ではなく, 多数回のパルスに対する平均値を用いた校正が

行われる)。

これらによって、校正依頼者は、当該エネルギーメーターを用いて、レーザーエネルギーの絶対値、およびその不確かさを評価することが可能となる⁶⁾。

3. 確立された標準、およびその不確かさ

現在までにわれわれが確立し、供給している標準、およびその不確かさの概要を表1に示す。詳しくは以下のホームページをご参照いただきたい。

<http://www.nmij.jp/~photo-rad/laser-std/>

<http://www.nmij.jp/service/>

われわれが取り組んできたレーザーパワー、レーザーエネルギー、光減衰量にかかわる標準確立の原理、手法、その手法が採用された背景、不確かさ等について概説した。レーザー等、放射にかかわる技術は日進月歩であり、標準の観点からも役立つ新たなアイデア、原理、技術が数多いが、国際単位系 (SI) の絶対スケールに照らしたうえでの妥当性、不確かさ上での問題等から、標準確立にはいまだ道半ばといえる。これらの解決に向けた新たな研究を通じ、標準の高度化を図るとともに、社会からの要望に応え、標準の充実に向けた研究開発を進めていくことがわれ

われの責務であり、今後の社会の発展に重要であることは論をまたない。本解説が読者の皆様のレーザー標準分野への興味・理解の一助となり、当該分野の裾野の広がりのきっかけとなるようであれば幸いである。

文 献

- 1) T. Inoue and Y. Yamanaka: "Advanced control method for calorimetric power measurement," *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, **32** (1983) 508-509.
- 2) T. Inoue, I. Yokoshima and A. Hiraide: "Highly sensitive calorimeter for microwatt-level laser power measurement," *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, **36** (1987) 623-626.
- 3) K. Amemiya, T. Inoue, D. Fukuda, S. Mukai and T. Numata: "Thermally optimized design of a laser calorimeter by finite element calculation for higher thermal equivalence and absorber uniformity," *Proceedings of NEWRAD 2008* (2008) pp. 71-72.
- 4) S. Mukai, K. Amemiya and M. Endo: "High-precision linearity standard for high-power optical-fiber power meters," *Digest of Conference on Precision Electromagnetic Measurements (CPEM 2008)* (2008) pp. 288-289.
- 5) D. Fukuda, G. Fujii1, T. Numata, A. Yoshizawa, H. Tsuchida, H. Fujino, H. Ishii, T. Itatani, S. Inoue and T. Zama: "Photon number resolving detection with high speed and high quantum efficiency," *Metrologia*, **46** (2009) S288-S292.
- 6) D. Fukuda, S. Kimura and M. Endo: "Absolute energy reference calorimeter with bismuth telluride thermocouples for laser energy standard," *Rev. Sci. Instrum.*, **76** (2005) 113107.

(2010年1月15日受理)