

加工用レーザーの計測・制御に関する調査研究

徳田将志*

(2024年1月31日受理)

A Survey on Measurement and Control of Lasers for Processing

TOKUDA Masashi

Abstract

Lasers are widely applied as a tool for industrial material processing. In these applications, measurement and control of parameters which characterize laser beams, such as laser power, laser energy, beam profile, pulse width, and so on, are crucial to maintaining the quality of the products. In this paper, the current status of measurement and control techniques as well as the standards for these laser parameters and their recent progress are reviewed.

1. はじめに

現代社会においてレーザーは産業のあらゆる分野で利用され、人々の社会活動を豊かで便利なものとしている。例えば、バーコードやCD等の情報の読み取り、ショーやコンサートの照明演出といった身近に感じられる用途はもちろん、光通信、センシング、測量、医療、加工など、レーザーが関係する技術や製品は多岐にわたる¹⁾⁻³⁾。近年ではレーザーの高出力化が進み、高出力レーザーを用いた害虫駆除⁴⁾、落雷の誘導⁵⁾、除染^{2), 6)-8)}、防衛⁹⁾、宇宙ごみの除去^{10), 11)}、核融合¹²⁾といった用途へもレーザーの応用が進められており、今後もレーザーを利用した技術の拡大と社会課題解決への貢献が見込まれる。

特に加工分野においては、レーザー加工技術は機械加工等の従来の加工技術では困難な加工を可能にし、切断^{2), 12)}、溶接^{2), 12)-14)}、穴あけ^{2), 3)}、マーキング²⁾、表面改質^{2), 3), 12)}、3Dプリンタを用いた三次元造形^{3), 15)-17)}などを通して、ものづくりに貢献している。レーザー加工が普及した背景には、レーザーの高出力化の他に、発振波長の多様化や、パルス幅のピコ秒やフェムト秒領域への超短パルス化¹⁸⁾がある。例えば、高出力の青色レーザーの登場は、これまで赤外波長のレーザーでは加工効率の悪かった銅に対するレーザー加工の利便性を向上させた。銅の加工は電池や電気自動車 (Electric Vehicle: EV) の製造に

必須であり、日本政府が目標に掲げる2050年のカーボンニュートラル達成に向けたEV化¹⁹⁾⁻²¹⁾に貢献する技術となっている。また、超短パルスレーザーは加工対象への熱拡散の影響を抑えることができるため、アブレーション加工や微細加工の他²²⁾、近年では炭素繊維強化プラスチック (Carbon Fiber Reinforced Plastics: CFRP) の加工²³⁾にも使用される。

レーザー加工がものづくりに広く利用されるようになった一方で、高出力レーザーが用いられる加工において、加工品質の向上が課題となっている。kWクラスの出力のレーザーが使用される場合、数%の出力のゆらぎでもその変動は数十Wに上ることに加え、強大なレーザー出力によって光路中の光学部品が加熱され、変形・膨張することで、レーザーの焦点シフトの原因となる。パワー変動や焦点シフトは加工点におけるパワー密度やビームプロファイルの変化を引き起こし、加工品質や製品の歩留まりに影響する。この問題は、3Dプリンタにおける加工のムラや、切断における切断面の粗さに影響し²⁴⁾、また医療においては人体に直接レーザーを照射する性質上、治療の効果や安全性に直結する。そのため、レーザー光の特性を表す各種の物理量 (レーザーパラメータ) をモニタし、適切に管理することが重要であり、それにはレーザーパラメータの正確な計測と制御の技術が必要となる。ただし、加工に用いられるレーザーには様々なパワー、波長、発振形態 (連続発振またはパルス発振) があるため、それぞ

* 物理計測標準研究部門 応用光計測研究グループ

れのレーザ光源の特徴に応じた計測や制御が必要となる。

表1に主に使用される加工用レーザ光源を示す。レーザ加工に際しては、加工の種類や加工対象の光の吸収率を考慮し、これらのレーザ光源の中から適切な出力、波長、パルス幅を持つものを選択することが重要である。波長ごとの主な用途は、紫外はガラスや高分子材料といった非金属の加工や微細加工、可視は銅やアルミニウムといった金属の加工、赤外はガラス、木材、セラミック、樹脂といった非金属の加工をはじめ、高い出力を生かして金属の加工も可能である。医療においても診断、治療、手術など、用途や照射部位に応じて使用するレーザの波長が使い分けられ、紫外光はレーシック治療、可視光は光線力学的療法 (Photodynamic Therapy: PDT) によるがんの治療^{12), 25)}、赤外光はレーザメスやシミの治療に使用されているほか、幅広い目的でレーザが使用されている^{26), 27)}。

加工用レーザとして利用が拡大しているファイバレーザは、光ファイバをレーザ媒質・共振器とし、光ファイバにドーピングする元素によって、可視から赤外まで様々な発振波長のものが存在する。また、従来の加工用レーザに比べて小型・軽量、メンテナンスフリー・長期安定、優れたビーム品質、広帯域・高利得・高効率、高出力化が容易、放熱性に優れるといった長所がある^{1), 28)}。

表1 主な加工用レーザ光源

レーザ	波長 (域)
エキシマ	紫外
半導体	紫外、可視、近赤外
Ti: サファイア	660 nmから1180 nm (可変)
ファイバ	可視、近赤外、中赤外
Nd: YAG	1064 nm (基本波)、 532 nm (第二高調波)、 355 nm (第三高調波)、 266 nm (第四高調波)
CO ₂	10.6 μm
量子カスケード	中赤外

近年中赤外線レーザ光源として利用されるようになった量子カスケードレーザは半導体材料を母材料とするが、発振原理が従来の半導体レーザとは異なるため、両者は区別される。半導体レーザの発振原理は伝導帯の電子と価電子帯の正孔が再結合するバンド間遷移であるが、量子カスケードレーザの場合は半導体多重量子井戸内のサブバンド間遷移が発振原理である。量子カスケードレーザの発振波長は数 μm であり、環境計測や様々な用途での分光分析光源としての応用が期待されている²⁹⁾⁻³¹⁾。

レーザの計測や制御の対象となるパラメータは、パワー (W) およびエネルギー (J) といった出力に関するもの、ビームサイズ (m) といった空間に関するもの、パルスレーザにおけるパルス幅 (s) や繰り返し周波数 (Hz) といった時間に関するものがある。本調査研究ではレーザ光源の産業応用としてレーザ加工を念頭に置きつつ、これらの出力、空間、時間の3種類のパラメータについてそれぞれ調査を行った。続く2章、3章、4章では、各パラメータに対して利用されている計測と制御技術、そして産業技術総合研究所 (産総研) の計量標準総合センター (National Metrology Institute of Japan: NMIJ) が供給しているそれらに関連する標準について概説する。5章ではレーザ加工の現状と展望並びに課題を整理し、NMIJにおいて取り組んでいる高出力な加工用レーザに対する計測と制御技術の研究開発方針を示す。最後に6章で本稿のまとめを行う。

2. レーザ出力の計測と制御

レーザの出力は、連続発振 (Continuous Wave: CW) レーザの場合はパワー (W)、パルスレーザの場合はエネルギー (J) で計測する。本章では出力に関するレーザパラメータであるレーザパワー並びにレーザエネルギーの計測・制御技術と、高出力レーザパワー標準およびレーザエネルギー標準について概説する。

2.1 レーザ出力の計測技術

表2にレーザ出力の計測に用いられる汎用の光検出器とそれらの特徴を示す。産業界で普及している汎用計測器の測定方式として、光電型と熱型の2種類があり³²⁾、おおむね出力範囲で利用する光検出器が使い分けられている。1 W 程度よりも低い出力レベルでは半導体を利用した光電型検出器、1 W 程度以上の高い出力レベルでは熱電対等を利用した熱型検出器が利用される。測定できるパワーの範囲は、低パワーでは fW、高パワーでは

100 kW 程度の直接計測に対応した計測器が市販されている。焦電素子を用いた熱型光検出器はレーザー入射による温度変化を計測する原理であるため、パルスレーザーのレーザーエネルギー計測に用いられる。NMIJ で供給しているレーザーパワー標準の詳細は 2.2 節で述べるが、絶対測定を行うために 50 μW から 10 W までの範囲で熱型光検出器を使用している。NMIJ では 1 W 以上の出力のレーザーに対して高出力レーザーパワー標準を供給しており、図 1 (a) に外観を示す電力置換型レーザーパワー測定装置を一次標準として図 1 (b) の水冷式サーマルセンサを校正し、これを常用標準として校正器物のパワーメータの校正を行っている。

2.2 高出力レーザーパワー標準

レーザーパワーとエネルギーの測定原理・手法や標準については文献³³⁾⁻³⁷⁾に既に詳細な解説がある。本節では加工用の高出力レーザーを念頭に置き、高出力レーザーパワー標準で用いる一次標準器について簡単に説明する。

高出力レーザーパワー標準の一次標準器である図 1 (a) の電力置換型レーザーパワー測定装置は入射レーザー光を熱に変換して計測するレーザーカロリメータであり、図 2 に示すように、2つの筒状構造の受光部を持つ。それぞれの受光部は測定波長によって使い分けているが、レーザーを入射させない方の受光部でも常に温度変動等の測定環境の変化に由来するノイズを差し引くためにモニタを行っている。受光部の筒状構造は空洞黒体の役割を持ち、入射光を外部に逃がさず熱に変換するように設計されて

いる。光吸収体をヒータで加熱した時とレーザーを照射した時の温度を熱電変換素子で測定し、ヒータに投入した電力を基にレーザーパワーを決定する。そのため、レーザーパワーは直流電圧標準と抵抗標準にトレーサブルである。高出力レーザーパワー標準のトレーサビリティ体系の概略を図 3 に示す。NMIJ における高出力レーザーパワー標準で校正係数の提供に対応可能な波長は 532 nm から 10.6 μm、パワーは 500 mW から 1 kW で、相対拡張不確かさ ($k=2$) は 1 % から 2 % 程度となっている。

先述のように、レーザーカロリメータは入射したレーザー光を熱に変換してパワー計測を行うため、光吸収体は入射した光を逃がさず全て熱に変換することが理想であ

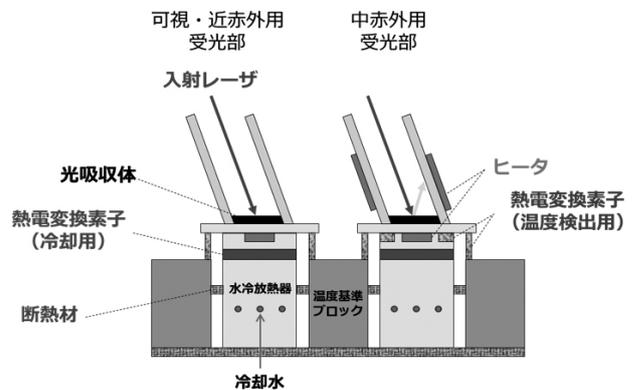


図 2 電力置換型レーザーパワー測定装置の概略図

表 2 汎用レーザーパワー計測器の種類と測定範囲

方式	検出器	特徴	測定範囲
光電型	フォトダイオード	高速応答、高感度、小型	fW程度からW程度
熱型	熱電対、サーモパイル、焦電素子	広波長帯・高出力に対応、絶対測定が可能	μW程度からkW程度

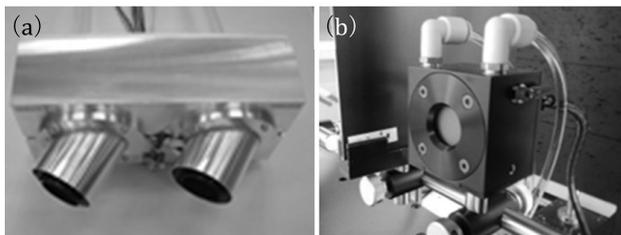


図 1 NMIJ における高出力レーザーパワー標準の一次標準器 (a) と常用標準器 (b) の外観写真

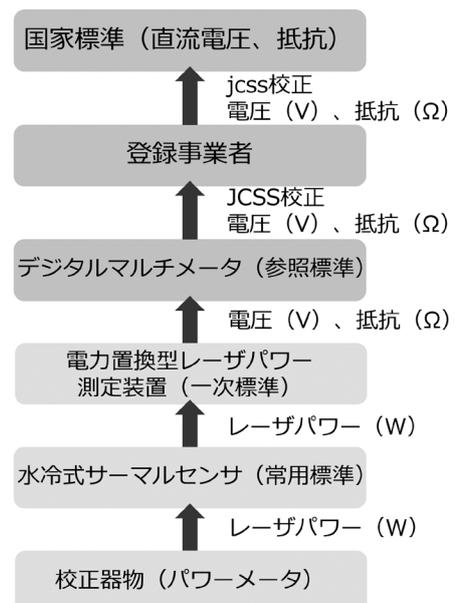


図 3 NMIJ における高出力レーザーパワー標準のトレーサビリティ体系

る。そのため、入射光に対する吸収率ができるだけ大きい素材を採用することが望ましい。NMIJでは低出力の光に対して、波長 200 nm から 1200 nm の光吸収率が 99.98 % かつ表面に触れても性能が損なわれない程の耐久性を持つ「至高の暗黒シート」を開発し、実用化に向けた検討を進めている^{38), 39)}。高出力レーザーパワー標準の一次標準器に関しては、計測対象である光の波長に対する吸収率とレーザー耐力を考慮し、UB-NiP (ultra-black nickel phosphorus)⁴⁰⁾⁻⁴²⁾ が採用されている。UB-NiP は NiP を化学エッチングすることで表面に光の波長程度の微小な凹凸を形成させたもので、波長 488 nm から 1550 nm の光に対して吸収率は 99.89 % と報告されている。一次標準器は 1 W から 10 W の範囲を計測範囲として運用しているが、10 W を超えるパワーの計測については常用標準器の応答非直線性の評価と高耐力減衰器技術を組み合わせることで計測範囲を拡張して対応しており、最大で 1 kW までの計測と校正を可能とし、標準として確立している。これを基に国内外の測定器ユーザからのレーザーパワーメータの校正係数の測定ニーズに対応している。

図 4 に高出力レーザーパワー標準の測定系の概要図を示す。レーザー発振器から出射したレーザーは、その出力の安定性をモニタするため、ビームサンプラで一部をモニタ用検出器に送っている。光路中には移動ステージによって出し入れができる回転光チョップ型の高耐力減衰器があり、出力の測定範囲に応じて使用する。常用標準器と校正器物は同じ移動ステージ上に取り付けられ、交互にレーザーを入射させながら比較測定を行うことで、校正器物の校正係数を決定している。常用標準器の校正を行う場合には、一次標準器と常用標準器で交互にレーザーパワーの比較測定を行う。

2.3 レーザエネルギー標準

レーザーエネルギーの計測や標準については既に文献^{30), 34)} に詳しく記載されているため、本節では NMIJ

で供給しているレーザーエネルギー標準と平均パワー標準について簡単に述べる。

レーザーパルスに関する標準について、NMIJ では単一パルスに関するレーザーエネルギー標準と、連続パルスに関する平均パワー標準を供給している。図 5 にはレーザーエネルギー標準のトレーサビリティ体系を示す。レーザーエネルギー標準は、校正器物であるレーザーエネルギーメータと、NMIJ が持つレーザー出力校正装置とを比較測定することで供給される。レーザー出力校正装置における検出器は焦電型相関検出器である。校正では、図 6 に示すように、あらかじめ分岐比が評価されたビームスプリッタを用いて入射光パルスを分岐させ、相関検出器と校正器物それぞれに入射させて同時に測定し、レーザー出力校正装置が計測したエネルギーとビームスプリッタの分岐比をもとに校正係数が決定される。レーザー出力校正

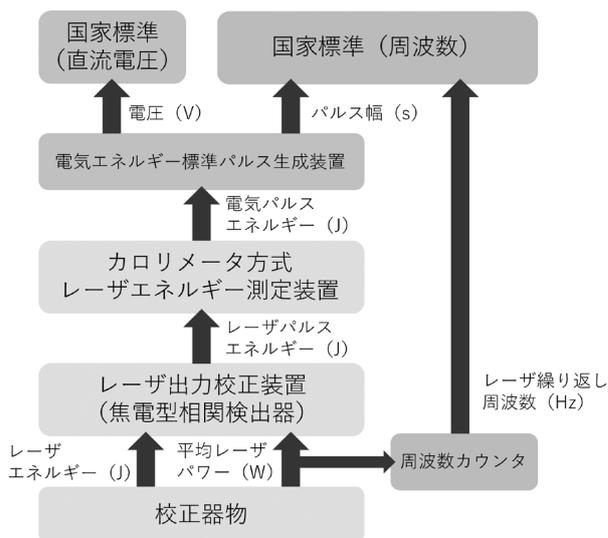


図 5 NMIJ におけるレーザーエネルギー標準のトレーサビリティ体系

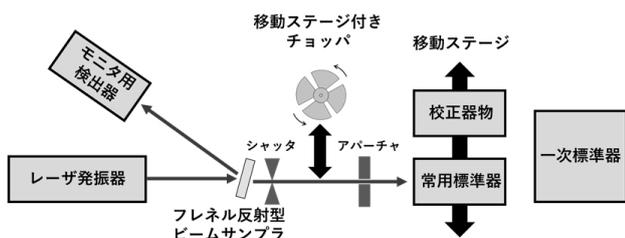


図 4 高出力レーザーパワー標準の測定系の概要

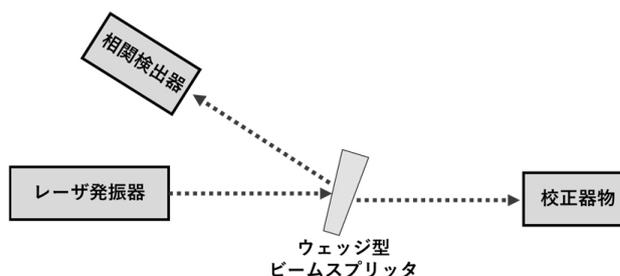


図 6 レーザ出力校正装置の概要

表 3 NMIJ における平均レーザーパワーとレーザーエネルギー標準の校正測定能力

校正量目	波長	校正範囲	相対拡張不確かさ ($k=2$)
平均パワー	266 nm	10 mWから100 mW	1.5 %
	355 nm, 532 nm, 1064 nm	10 mWから 1W	
エネルギー	266 nm	1 mJから10 mJ	1.5 %
	355 nm, 532 nm, 1064 nm	1 mJから100 mJ	

装置は参照標準器であるカロリメータ方式レーザーエネルギー測定装置で校正されており、直流電圧標準と周波数標準にトレーサブルとなっている。NMIJ では表 3 に示す波長と出力の範囲で平均パワーとエネルギーの標準を供給しており、相対拡張不確かさ ($k=2$) はともに 1.5 % となっている。

ここまでは NMIJ における高出力レーザーパワー標準とレーザーエネルギー標準並びに平均パワー標準について言及したが、諸外国の計量研究機関の校正・測定能力は国際度量衡局 (Bureau international des poids et mesures: BIPM) のウェブサイト⁴³⁾で公開されている。例として、文献⁴³⁾に公開されている情報の中から 1 W より大きいパワーの校正が可能な機関について、主要な項目を抜粋・一部改変して表 4 に示す。

2.4 検出器の高耐久化による高出力レーザーの計測

加工用レーザーは高出力化が進んでおり、10 kW クラスや 100 kW クラスのレーザーが使用されるようになってきている。現在、10 kW クラスのパワーの絶対計測技術⁴⁴⁾や 100 kW クラスのパワーが測定可能な熱型のパワーメータが存在する。一方で、レーザー加工の高スループット化などを目的としてより高い出力を持つレーザー光源が開発されており、それに伴って 100 kW 超のレーザー計測のニーズが高まっているのが現状である。100 kW 超のパワー計測では測定器の高耐久化が課題となり、その解決策として、例えば熱型光検出器の光吸収体にカーボンナノチューブを採用し、レーザー耐力を向上させた受光部が開発⁴⁵⁾されている。カーボンナノチューブの損傷閾値は 547 mJ/cm^2 ⁴⁶⁾や 0.5 kW/cm^2 ⁴⁷⁾、反射率は波長 $0.2 \mu\text{m}$ から $200 \mu\text{m}$ の範囲で 1 % から 2 % との報告がある⁴⁸⁾。また、光吸収による熱を利用せず、光放射圧を介してレーザーパワーを質量標準とトレーサブルに絶対計測する方法もある⁴⁹⁾。アメリカ国立標準研究所 (National Institute of Standards and Technology: NIST) では、高出力レーザーをミラーに照射した際の光放射圧を計測

し、1 W あたりおよそ 5 nN に換算して、1 kW から 140 kW までの範囲において相対拡張不確かさ ($k=2$) が 1.6 % の計測を達成している⁵⁰⁾。

NIST とドイツの国家計量標準機関である物理工学研究所 (Physikalisch-Technische Bundesanstalt: PTB) は共同でこれまで複数のレーザーパワー標準に関する報告を行っており⁵¹⁾⁻⁵³⁾、2024 年には上述の NIST の質量標準に基づくレーザーパワーの絶対計測技術と PTB が有する kW クラスの高出力レーザーパワーの国家標準との比較が行われた⁵⁴⁾。PTB のレーザーパワー標準は極低温放射計をトレーサビリティの頂点とし、water-cooled absorption cavity を用いてレーザー照射によって温められた水の温度を測定する方法である。測定対象のレーザーをまず NIST の標準器の光放射圧を計測するミラーに入射させた後、その反射光を PTB の標準器に導いて、2 つの標準器によるレーザーパワーの同時計測を行ったところ、測定結果がそれぞれの拡張不確かさの範囲で一致したことが報告された。

2.5 高出力レーザーの光減衰技術

前節では、高出力レーザーのパワーを計測するためにレーザー耐力の高い新しい計測技術を導入する例を紹介した。一方、既存の検出器を用いて高出力レーザーを計測するためには、レーザーを減衰させてから検出器に入射させる必要がある。あらかじめ減衰量を精度良く評価しておけば、レーザーを検出器に直接入射させることなくレーザー出力の評価が可能である。表 5 にレーザーパワーの減衰技術の例と、図 7 にそれらの模式図を示す。NMIJ の高出力レーザーパワー標準ではチョッパを用いて 1 kW まで計測を可能としている。

加工用レーザーは高い光強度とランダムな偏光を特徴としているため、既存の計測技術を用いてパワーを計測するためには、高いレーザー耐力かつ偏光に関係なく十分な減衰量が得られる減衰技術が必要となる。NMIJ ではこれらの要請に応えるため、エバネッセント光に着目した減衰技術の研究開発に取り組んでいる。エバネッセント光とは、プリズム底面等の屈折率界面でレーザーを全反射させた際に、プリズムの外側にレーザー波長程度の範囲に局在的に発生する非伝播光である。そこに別のプリズム等の光散乱体を接近させるとエバネッセント光が結合し、エバネッセント光の一部が接近させたプリズム側に透過するため、反射光のパワーを減衰させることができる。この方法の利点は、素子が透明材料のみで構成されるためレーザー耐力が高く、従来の方法に比べてコンパクトな素子で大きな減衰量が得られる点や、偏光の影響が

表4 1 W より大きなパワーを校正範囲に含む各国機関の校正項目と不確かさ. 文献⁴³⁾より抜粋・一部改変して掲載

Institute	Parameters	Expanded uncertainty ($k = 2$)
NIM (中国)	Wavelengths : 532 nm, 808 nm, 1064 nm, 10.6 μm Power level : 0.1 W to 70 W (1064 nm, 10.6 μm), 0.1 W to 6 W (532 nm), 0.1 W to 30 W (808 nm)	2.0 %
	Wavelengths : laser lines between 337 nm and 1064 nm Power level : 100 μW to 120 W	0.2 % to 1.0 %
PTB (ドイツ)	Wavelengths : 2106 nm and 2936 nm Power level : 0.01 W to 10 W	1.0 %
	Wavelength : 351 nm Power level : 0.01 W to 10 W	1.0 %
	Wavelength : 308 nm Power level : 0.01 W to 20 W	1.0 %
	Wavelength : 248 nm Power level : 0.01 W to 30 W	1.0 %
	Wavelength : 193 nm Power level : 0.01 W to 3 W	1.0 %
	Wavelength : 10.6 μm Power level : 0.1 W to 1500 W	0.3 % to 1.0 %
NMIJ (日本)	Wavelength : 1.1 μm Power level : 1 W to 100 W	1.1 % to 1.8 %
	Wavelength : 10.6 μm Power level : 1 W to 100 W	1.3 % to 1.9 %
NMISA (南アフリカ)	Wavelength range : 0.25 μm to 16 μm Power level : 10 mW to 100 W	3.0 %
VNIIOFI (ロシア)	Wavelength : 532 nm Power level : 0.02 W to 2 W	0.7 %
	Wavelength : 1.064 μm Power level : 0.02 W to 2 W	0.62 %
	Wavelength : 10.6 μm Power level : 0.02 W to 2 W	0.5 %
NIST (アメリカ)	Wavelength : 325 nm, 405 nm, 514 nm, 532 nm, 632.8 nm, 1047 nm, 1064 nm, 1550 nm, 1930 nm Power level : 0.0001 W to 5 W	0.15 % to 1.0 %
	Wavelength : 1.07 μm , 10.6 μm Power level : 2 W to 10000 W	1.0 % to 1.6 %

小さい点であり、加工用レーザーの新しい計測手法として活用が期待できる。

2.6 レーザパワーの制御技術

加工品質や歩留まりの良い高精度なレーザー加工を行うためには、熱加工では入熱量、アブレーション加工ではアブレーション閾値などの条件を考慮し、加工対象や目的に応じて適切にパワーが制御されたレーザーを照射する

ことが必要不可欠である。高パワーを計測するだけであれば減衰量がきちんと評価された方法でパワーを減衰させてから計測すれば良いが、レーザー加工の現場において不安定なレーザーパワーを安定化させる目的のためには、減衰だけではなくレーザーパワーの変化に応じた動的なレーザーパワーの調整・制御が必要となる。レーザーパワーの制御技術の例を表6に示す。レーザーパワーの制御には、偏光の特性や透過率の変調が利用される。レーザーの

表5 レーザパワーの減衰技術の例

方法	特徴
チョッパ	回転するブレードで光路を遮り、平均パワーを制御。
色ガラスフィルタ	特定の波長の光を吸収し、透過パワーを制御。
Neutral density (ND) フィルタ	広い波長帯にわたって均等な減衰が可能、吸収型と反射型がある。
誘電体多層膜	屈折率の異なる誘電体薄膜を積層させて透過率（反射率）を制御。
偏光ビームスプリッタ	偏光成分を選択。
エバネッセント光	プリズム底面でレーザーが全反射した際にプリズム外部に生じるエバネッセント光を利用。

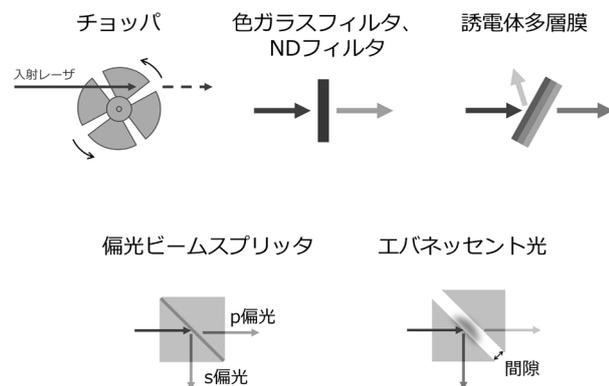


図7 レーザパワー減衰技術の例

偏光を利用する方法では、波長板等の複屈折結晶を用いてレーザーの偏光成分の強度比を変化させ、後段に配置した偏光ビームスプリッタなどの偏光フィルタを通過するレーザーのパワーを調整する。音響光学変調器 (Acousto-Optic Modulator: AOM) や電気光学変調器 (Electro-Optic Modulator: EOM) と呼ばれる、高周波や電圧を印加した際の物質の屈折率変化を利用して、透過パワーを制御するデバイスも市販されている。しかし、ここに挙げた方法はいずれもレーザー耐力の問題があり、高出力レーザーへの適用には限界がある。また、特定の偏光状態をパワー

表6 レーザパワーの制御技術の例

素子・原理	特徴
偏光制御	偏光成分の強度比の変化を利用。
音響光学変調器 (AOM)	高周波印加によって屈折率が変化する物質の結晶を利用。
電気光学変調器 (EOM)	電圧印加によって屈折率が変化する物質の結晶を利用。
エバネッセント光	対向するプリズム間の距離を調整して透過率を制御。

制御に用いる方式の場合、ランダム偏光の入射レーザーに対してはその制御が困難である。そのような高出力かつランダムな偏光を持つレーザーが多く使用されるレーザー加工の現場においては、現状では電源など励起エネルギーを調整することでレーザー発振のパワーを制御する内部制御方式がとられるが、この方法ではレーザー発振器が熱平衡に達するまでの時間が制御応答速度の律速になるなどの課題も多い。そこで、我々はエバネッセント光を利用した高出力レーザーのパワー制御技術の開発に取り組んでいる。エバネッセント光の結合を原理とするパワー制御は、対向させるプリズムの間隔を調整することにより、反射光と透過光の分岐比の変化を利用する。この技術の開発状況については5章で詳細を述べる。

3. ビームプロファイルの計測と制御

ビームプロファイルはレーザーパワーと並び、加工品質に影響するパラメータの一つである。本章では空間に関するレーザーパラメータであるビームプロファイルの計測と制御について概説する。

3.1 ビームプロファイルの計測技術

ビームプロファイルとは、ビームスポットでのビーム強度の空間分布を指す。表7にビームプロファイルの計測技術の例を示す。計測方法は大きく分けて2種類あり、CCD (Charge Coupled Device) イメージセンサなどの2次元検出器を用いたカメラ型や、パワーメータの前段にピンホールやスリット並びにナイフエッジといった空間フィルタを設置し、それらを走査しながら強度をマッピングする走査型があり、それぞれの特長に応じて使い

表7 ビームプロファイルの計測技術の例

方式	原理	特徴
カメラ型	二次元検出器 (半導体イメージセンサ、 焦電型イメージセンサ、 熱型アレイセンサ)	高速応答、小型、 高次横モードの評価が可能。
走査型	空間フィルタ (ピンホール、スリット、 ナイフエッジ) 走査	広い波長域・高出力に対応。

表8 ビームサイズの定義

名称	定義
$1/e^2$ 幅	最大光強度の $1/e^2$ (13.5%)となる2点間の距離。
$D4\sigma$ 幅	強度分布の標準偏差 σ の4倍となる幅。
$D86$ 幅	全レーザーパワーの86%を含む最小円の直径。
$D63$ 幅	全レーザーパワーの63%が含まれる最小円の直径。 ガウシアンビームの場合は最大光強度の $1/e$ (36.8%)となる2点間の距離と等価。
半値全幅	最大光強度の50%となる2点間の距離。

分けられている。また中赤外線レーザーに対しては、蛍光板を用いる方法やアクリルにレーザーを照射してその焼け跡からビームプロファイルを推定するアクリルバーンパターンという方法がある。後者は高出力の赤外線レーザーのビームプロファイルを簡便に観察できるという利点がある一方で、アクリルの燃焼による有毒ガスの発生や、測定条件によっては正確なビームプロファイルが得られないといった問題点がある⁵⁵⁾。

3.2 ビームサイズ標準

ビームプロファイルに関する指標として代表的なものに、ビームサイズがある。ビームサイズは表8に示すような様々な定義があるが、NMIJでは国際標準化機構(International Organization for Standardization; ISO)が定めた規格ISO 11146に準じ、図8に示すようなシングルモードのガウシアンビームについて、長さ標準にトレーサブルなスリット走査法による $1/e^2$ ビームサイズの精密計測・校正技術を開発している。ビームサイズ測

レーザスポット

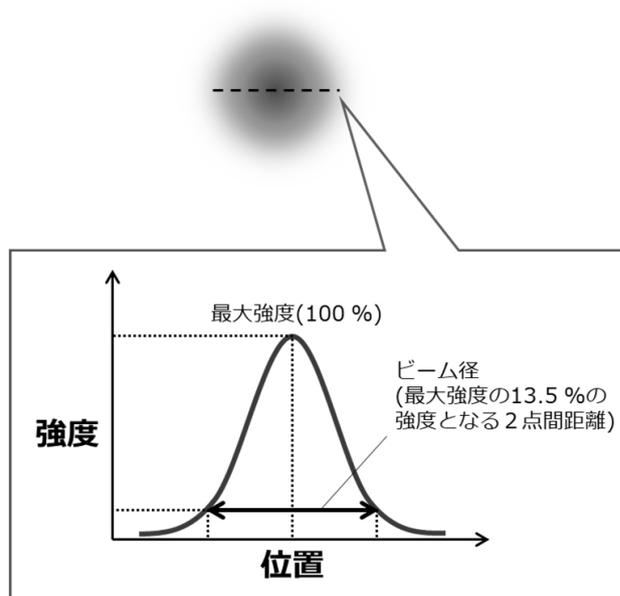


図8 $1/e^2$ 幅の定義の模式図

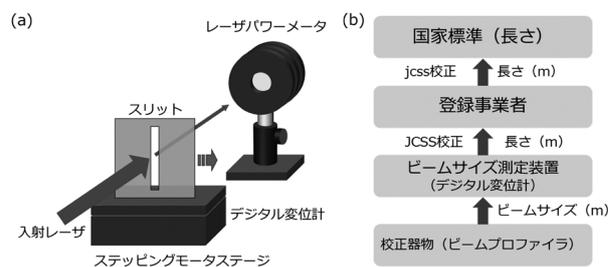


図9 (a) スリット走査法によるビームサイズ測定の様式図 (b) NMIJにおけるビームサイズ標準のトレーサビリティ体系

定の模式図を図9(a)に示す。本技術は波長 $0.63\ \mu\text{m}$ でガウシアンビームを出射するHe-Neレーザーを光源とし、産総研で開発したスリット走査法によるビームサイズ測定結果を標準として、評価対象のビームプロファイラによる測定結果と比較することで、これらの比を校正係数として報告するものである。ビームサイズ標準のトレーサビリティ体系を図9(b)に示す。

ビームサイズ標準ではガウシアンビームを仮定し、 $1/e^2$ 幅を採用しているが、ガウシアンビームの場合は $1/e^2$ 幅、 $D4\sigma$ 幅、 $D86$ 幅は等価である。 $D4\sigma$ 幅、 $D86$ 幅は、加工用レーザーに多いマルチモードのビームプロファイルの評価が可能である。レーザー製品の安全性評価におけるビーム径は日本産業規格(Japanese Industrial Standards: JIS)のJIS C 6802に記載があり、

D63 幅が用いられる。JIS C 6802 は国際電気標準会議 (International Electrotechnical Commission: IEC) の規格 IEC 60825-1 に対応している。

また、ビーム品質を評価するパラメータとして M^2 がある⁵⁶⁾⁻⁵⁹⁾。 M^2 は 1 以上の値をとり、1 に近いほど理想的なガウシアンビームに近く、回折限界に近い集光が可能となる。

レーザー加工分野において、加工対象の多様化とともにレーザー光源の発振波長も多様化している。赤外波長においては、YAG (Yttrium Aluminum Garnet) や CO_2 レーザーの他に、ファイバレーザーや量子カスケードレーザーが登場したことで、赤外波長域の計測の重要性が増している。そのような事情を受け、NMIJ ではビームサイズの新しい計測方法として、可視光用の CMOS (Complementary Metal-Oxide-Semiconductor) イメージセンサの熱雑音を用いた中赤外線レーザーのビームプロファイル計測技術を開発している^{60), 61)}。CMOS イメージセンサは中赤外の波長帯には感度を持たないが、本手法では、本来はノイズとなる熱雑音を信号として利用し、レーザー照射による熱励起電子の分布から中赤外波長のレーザーのビームプロファイルを得ることができる。従来技術のデメリットの一つであった有毒ガスの発生はなく、空間フィルタの走査も不要である。また可視光用に普及している CMOS イメージセンサを利用しているため、従来技術に比べて安価でコンパクトな測定系が組めることや、カメラ型の特長であるワンショットでの計測が可能である。今後、この技術をマルチモードのレーザーに対して使用できるように対応を進めていく方針である。

3.3 ビームプロファイルの制御技術

ビームプロファイルは加工の高度化のために重要なパラメータである。例えば、ガウス型のビームプロファイルを持つレーザーで加工を行う場合、ビームの中心ほど高い強度を持つため、加工部においてビーム照射位置の中心付近では深さ方向にダメージが及ぶ一方、中心から離れた位置では強度不足による加工不良の原因となる場合がある。そこで、ビームをトップハット型と呼ばれるプロファイルとすることで、均一な加工が可能となる⁶²⁾。代表的なビームプロファイルの制御技術には、レンズを使用し、その焦点距離に応じたビーム径の拡大縮小や、回折光学素子 (Diffractive Optical Element: DOE) を用いたビームの多焦点化などの任意のプロファイルにビームを整形する技術がある。さらに、光の干渉効果や液晶の屈折率の電氣的な変調を利用してレーザーの位相を制御することで、リアルタイムにビームプロファイルを所望

の形状に制御できる技術が開発されている。

4. レーザパルスの計測と制御

レーザー加工において、パルスレーザーは主にアブレーション加工や微細加工を行う際に利用される。本節では時間に関するレーザーパラメータであるレーザーパルスのパルス幅の計測と制御技術、並びにレーザーパルスの発生方法を概説する。本稿では、パルス状に発振されたレーザー光をレーザーパルス、レーザーパルスを発振する光源をパルスレーザーと呼ぶこととする。

4.1 パルス幅の計測技術

レーザー加工において、パルス幅は出力と並んで加工対象に与えられるエネルギーの評価や、加工が熱加工かアブレーション加工かを決定づける重要なパラメータであり、目的に応じてパルス幅が ns (10^{-9} s) から fs (10^{-15} s) 程度のパルスレーザーが使用されている。代表的なレーザーパルスの計測方法はフォトダイオードや自己相関法を用いる方法である。高速で応答するフォトダイオードを用いれば、ns から ps (10^{-12} s) 程度のパルス幅を持つレーザーパルスを計測できる。fs 以下のパルス幅を持つ超短パルスレーザーに対しては、自己相関法によりパルス幅の計測が可能である⁶³⁾⁻⁶⁵⁾。自己相関法は測定対象のレーザーパルスを 2 つに分岐し、それぞれを時間差をつけて検出器に入射させ、非線形過程を利用して光強度の時間波形を計測する。パルス間の遅延時間を変化させながら強度をプロットした自己相関波形を取得することで、パルス幅を求めることができる。強度の測定には、非線形光学効果による第二高調波発生 (Second Harmonic Generation: SHG) や 2 光子吸収を利用する方法がある。自己相関法を行うための計測器として、オートコリレータが市販されている。

4.2 レーザパルスの制御技術

パルスレーザーを用いた加工では加工対象に熱拡散の時間スケールよりも短い時間でエネルギーを与え、熱拡散の影響を抑えた加工を可能とする。加工スポットに加工の目的に応じたエネルギーを与えるために、加工対象の光吸収特性や、使用するレーザー光源の出力や波長並びにビームプロファイルを考慮し、レーザーパルスのパルス幅を決定・制御することが重要となる。表 9 にレーザーパルスの制御技術の例を示す。CW レーザーに対して励起用電源の ON/OFF の切り替えやシャッター、チョップを用いてレーザーパルスを生成することも可能であるが、Q ス

表9 レーザパルスの制御技術

方法	原理	特徴	パルス幅
直接変調	励起用電源のON/OFFで制御	パルス波形の制御が可能。	msからps
外部変調	CWレーザをチョップ等でパルス化	高出力に対応。	msからps
Qスイッチ	共振器のQ値の変化	大きなパルスエネルギーが得られる。	μsからns
モードロック	共振器中の多数の縦モードの位相を同期	繰り返し周波数が共振器長に依存、大きなピーク出力が得られる。	psからfs

スイッチやモードロックといった方法を用いてレーザパルスを発振することができる^{3), 12), 66), 67)}。Qスイッチは、共振器内の変調器のQ値を低く、すなわち損失が大きい状態にしてレーザ発振しない状態にしておきながら、レーザ媒質に励起エネルギーを与えて大きな反転分布をつくり、エネルギーの蓄積状態にしておく。その状態で変調器のQ値を高くすると、蓄積されたエネルギーで急激にレーザ発振が起こり、レーザパルスとして放出される。変調器にはAOMやEOM、可飽和吸収体などが使用される。モードロックでは、共振器内に存在する多数の縦モードの位相を同期させると、位相が揃ったところでパルスが得られる。共振器長が短いほど繰り返し周波数が大きいパルス発振となる。パルス幅が小さいものでは、fs程度のパルス幅を持つものが産業用途で製品化されている。研究レベルにおいては、2023年のノーベル物理学賞が「物質中の電子ダイナミクスを研究するためのアト秒パルス光の生成に関する実験的手法の業績」に授与されたように^{68), 69)}、パルス幅がas (10^{-18} s)^{70), 71)}やzs (10^{-21} s)の領域の研究が進行しており^{72), 73)}、今後基礎科学や産業への貢献が期待される。

5. NMIJにおける加工用レーザの計測・制御技術の研究開発

本章ではNMIJにおける高出力レーザのパワー計測・制御技術について最近の取り組みを紹介する。

5.1 加工用レーザの計測・制御の現状と課題

近年産業界では、青色や中赤外など発振波長の多様化やfs以下の超短パルス化とともに、レーザ光源の発振出力の高出力化が著しい。特に重工業分野で用いられる先端レーザ光源の出力は100 kW超に達しており、これらのパワーを精度良く計測する技術が求められると同時に、こうした高出力レーザのパワーを制御する技術の重

要性も高まっている。レーザ加工においては、製品の高品質化や歩留まり向上のため、高出力レーザのパワーの安定性を求める要望がある一方、加工対象の形状や加工中の温度変化などの加工条件によっては、あえてレーザパワーを変調しながら加工を行う方が良い場合もある。レーザ溶接の例では、一定のレーザパワーの照射では溶接部に欠陥が生じる問題があったが、レーザパワーを周期的に変調しながら照射することで欠陥を抑制した報告がある⁷⁴⁾。NMIJで運用しているパワーメータ校正用の高出力ファイバレーザは内部にパワーのフィードバック制御機構を備えたものであるが、その性能は十分とはいええず、校正測定中のパワー変動が校正の不確かさの要因となり、パワーメータユーザの現場におけるレーザパワーの測定・管理の高精度化を阻む一因にもなっている。

そこでNMIJでは、加工用の高出力レーザに適用可能な計測・制御技術の実現を重要課題と捉え、研究開発に取り組んでいる。次節では、その一つであるレーザパワー制御技術について紹介する。

5.2 エバネッセント光を利用したレーザパワー制御技術の開発

低いパワーレベルのレーザや直線偏光のレーザに対しては、レーザ発振器の外部の光路中に光電型光検出器によるパワーモニタと、偏光素子などを組み合わせたパワー制御装置を設置する外部制御方式による高精度なパワー制御技術が実用化されている一方で、加工用高出力レーザ向けのパワー制御技術の開発は進んでいない。加工用レーザの特徴である高い光強度とランダムな偏光がネックとなり、偏光を用いたパワー変調技術が利用できない上、レーザ耐力の点でも低パワーレーザ向けの制御技術の流用は困難なことから、パワーの制御はレーザの励起電流を調整する内部制御方式が主流となっている。しかし、内部制御方式は制御性能が発振器の温度環境などに影響されやすいといった課題がある。加工用高出力レーザのパワーを精度良く制御するには、高いレーザ耐力や偏光無依存性などの条件を兼ね備えた、外部制御機構の構築が不可欠である。そこでNMIJでは、エバネッセント光の結合効果を利用したレーザパワー制御技術の開発に取り組んでいる^{75), 76)}。これまでに制作したシステムは図10のように構成されており、 piezoelectric アクチュエータによって対向させたプリズム間距離を調整し、エバネッセント光の透過率を制御できるようにデザインした素子をパワー調整部に採用している。モニタ部で計測したパワーを演算部で目標パワーと比較し、パワー調整部にフィードバックすることで、peak-to-peakで5%以

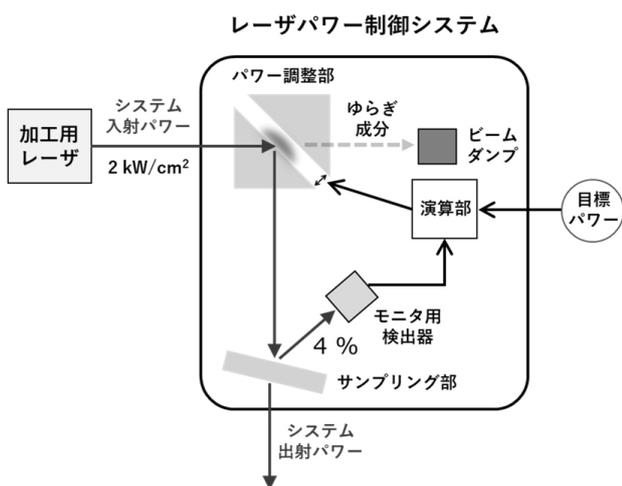


図10 エバネッセント光を利用した加工用レーザーのパワー制御システムの概略図

上の振幅で変動する高出力レーザー（パワー密度 2 kW/cm²）のパワーの標準偏差を 0.1 % 以下まで安定化することに成功している。

一方で、実用化に向けては課題も存在する。現状のシステムでは制御対象のパワーをモニタするサンプリング部に石英基板のフレネル反射を利用しており、kW クラスのレーザーに対しては数十から数百 W がモニタ用検出器に入射する。そのため、レーザー耐性を重視した熱型光検出器を使用することとなり、制御の応答速度の律速となっている。また、パワー調整部ではエバネッセント光の偏光依存性によりパワー制御の前後で制御対象レーザーの偏光成分が僅かに変化するため、偏光を積極的に活用する加工⁷⁷⁾⁻⁷⁹⁾への適用性に課題がある。そこで現在、エバネッセント光の偏光特性⁸⁰⁾を最適化し、これらの課題を解決可能な新しい光学素子とパワー制御システムの開発を進めている⁸¹⁾⁻⁸³⁾。将来的には当該レーザーパワー制御技術の適用可能波長の拡大や高出力パルスレーザーへの応用も検討している。

6. まとめ

本調査研究ではレーザー加工に用いられる高出力レーザーの計測・制御技術について調査を行った。計測と制御の対象は大きく分けて出力、空間、時間の3つのパラメータであり、それぞれについて産業界で利用されている計測・制御技術を概観し、関連する標準について言及した。また、NMIJの最近の取り組みとして加工用レーザーのパ

ワー制御技術の研究開発について紹介した。レーザー加工分野においては加工対象や加工目的の多様化に伴い、加工用レーザーの高出力化、発振波長の多様化、超短パルス化がトレンドとなっており、これらのための新しい光源に対する計測ニーズが拡大している。NMIJでは引き続き産業界の需要に合わせたレーザー関連の標準の開発と供給を行うとともに、新しい計測・制御技術の研究開発を推進することで、ものづくり分野をはじめ、レーザーを利用する産業に貢献していく方針である。また、本稿では触れなかったが、高出力レーザーは扱いを誤れば直ちに重大事故につながる危険性があるため、レーザーパワーの精密な計測や制御を通して、レーザー機器の安全性の評価・向上にも貢献したいと考えている。

謝辞

本調査研究を行うにあたり、産業技術総合研究所計量標準総合センター物理計測標準研究部門応用光計測研究グループの沼田孝之主任研究員、雨宮邦招研究グループ長には手厚いご指導とご助言を賜り、多くの時間を割いてご支援いただきました。ここに感謝申し上げます。

参考文献

- 1) (社) レーザー学会・ファイバーレーザー技術専門委員会：ファイバーレーザー技術ロードマップ（案）参考資料 https://www.lsj.or.jp/wp-content/uploads/Download_files/sankoushiryou.pdf（2024年1月24日閲覧）
- 2) レーザー学会編，レーザープロセッシング応用便覧，エヌジーティー，2006，620p.
- 3) 次世代レーザープロセッシングとその産業応用調査専門委員会編，最新レーザープロセッシングの基礎と産業応用，電気学会，2007，286p.
- 4) 大阪大学の研究専用ポータルサイト ResOU：「青色半導体レーザーを用いた害虫の撃墜 レーザー光によって殺虫剤を使わずに害虫を撃ち落とす新技術」https://resou.osaka-u.ac.jp/ja/research/2023/20230119_1（2024年1月24日閲覧）
- 5) A. Houard, P. Walch, T. Produit, V. Moreno, B. Mahieu, A. Sunjerga, C. Herkommer, A. Mostajabi, U. Andral, Y.-B. André, M. Lozano, L. Bizet, M. C. Schroeder, G. Schimmel, M. Moret, M. Stanley, W. A. Rison, O. Maurice, B. Esmiller, K. Michel, W. Haas, T. Metzger, M. Rubinstein, F. Rachidi, V. Cooray,

- A. Mysyrowicz, J. Kasparian, and J.-P. Wolf: Laser-guided lightning, *Nat. Photonics* 17, 231-235 (2023).
- 6) 中部電力ウェブサイト：レーザーを用いた放射能除染技術の開発 https://www.chuden.co.jp/seicho_kaihatsu/kaihatsu/techno/techno_webtenzikai2020/web_safety_03.html (2024年1月24日閲覧)
- 7) 藤田和久, 稲垣博光, 豊澤一晃, 高原和弘 移川隆行, 藤田啓恵, 山田正明, 沖原伸一郎: kW 級 CW レーザーを用いた表面クリーニング技術の開発と除染適用の試み, *日本原子力学会誌* 62, 259-262 (2020).
- 8) 東京電力ホールディングスウェブサイト 参考資料：福島第一原子力発電所における新技術「レーザー除染」によるフランジタンク解体時のダスト飛散抑制対策について https://www.tepco.co.jp/decommission/information/newsrelease/reference/pdf/2019/2h/rf_20190701_1.pdf (2024年1月24日閲覧)
- 9) A. Extnance: LASER WEAPONS GET REAL Long a staple of science fiction, laser weapons are edging closer to the battlefield — thanks to optical fibres, *Nature* 521, 408-410 (2015).
- 10) T. Ebisuzaki, M. N. Quinn, S. Wada, L. W. Piotrowski, Y. Takizawa, M. Casolino, M. E. Bertaina, P. Gorodetzky, E. Parizot, T. Tajima, R. Soulard, and G. Mourou: Demonstration designs for the remediation of space debris from the International Space Station, *Acta Astronaut.* 112, 102-113 (2015).
- 11) SKY Perfect JSAT Group ニュースリリース：世界初、宇宙ゴミをレーザーで除去する衛星を設計・開発～宇宙のSDGs～持続可能な宇宙環境の維持を目指して <https://www.skyperfectjsat.space/news/detail/sdgs.html> (2024年1月29日閲覧)
- 12) 社団法人レーザー学会編, 先端固体レーザー, オーム社, 2011, 507p.
- 13) 片山聖二：レーザー加工の現状と展開, *生産と技術* 67, 18-28 (2005).
- 14) 川人洋介：高出力レーザーを用いた溶接の現状と展望, *スマートプロセス学会誌* 4, 16-19 (2015).
- 15) 京極秀樹：レーザーによる AM (アディティブ・マニュファクチャリング) 技術, *表面技術* 71, 677-683 (2020).
- 16) 小笹良輔, 石本卓也, 松垣あいら, 中野貴由：Additive Manufacturing の歩みとレーザービーム粉末床溶融結合法の基礎, *スマートプロセス学会誌* 10, 131-136 (2021).
- 17) 前田寿彦：レーザー焼結技術を用いた 3D プリンティングとその造形材料, *日本画像学会誌* 54, 301-307 (2015).
- 18) 鍋川康夫, 藤田雅之：フェムト秒レーザー装置の現状, *J. IEE Japan* 122, 754-758 (2002).
- 19) 環境省脱炭素ポータルウェブサイト：カーボンニュートラルとは https://ondankataisaku.env.go.jp/carbon_neutral/about/ (2024年1月24日閲覧)
- 20) 経済産業省資源エネルギー庁ウェブサイト：「カーボンニュートラル」って何ですか？ (前編) ～いつ, 誰が実現するの? https://www.enecho.meti.go.jp/about/special/johoteikyo/carbon_neutral_01.html (2024年1月24日閲覧)
- 21) 経済産業省資源エネルギー庁ウェブサイト：「カーボンニュートラル」って何ですか？ (後編) ～なぜ日本は実現を目指しているの? https://www.enecho.meti.go.jp/about/special/johoteikyo/carbon_neutral_02.html (2024年1月24日閲覧)
- 22) 藤田雅之：フェムト秒レーザーが切り開く新しい微細加工技術, *応用物理* 81, 380-385 (2012).
- 23) 藤田雅之, 染川智弘, 尾崎巧, 吉田実, 宮永憲明：超短パルスレーザーによる炭素繊維強化プラスチックの切断加工, *レーザー研究* 39, 701-705 (2011).
- 24) 丸尾大, 宮本勇, 大家利彦：薄板のレーザーガス切断におけるレーザー出力変動と切断面粗さの関係, *溶接学会論文集* 10, 138-144 (1992).
- 25) 奥仲哲弥, 坂庭信行, 白田実男, 池田徳彦：がんにおける光線力学的療法 (PDT) の現状, *レーザー研究* 39, 101-105 (2011).
- 26) 久保宇市：医療機器としてのレーザー, *J. IEE Japan* 111, 382-385 (1991).
- 27) 渥美和彦：レーザー医療応用, *レーザー研究* 38, 60-63 (2010).
- 28) 西澤典彦：ファイバーレーザーの進展と応用, *光学* 42, 438-445 (2013).
- 29) 山西正道, 枝村忠孝, 秋草直大：量子カスケードレーザー開発と計測への応用, *光学* 40, 142-147 (2011).
- 30) 大谷啓太, 大野英男：量子カスケードレーザーの現状と展望, *応用物理* 75, 207-212 (2006).
- 31) 寶迫巖：量子カスケードレーザーの現状と計測応用, *応用物理* 79, 191-197 (2010).
- 32) 石井勝巳：パワー・エネルギー計測, *レーザー研究* 40, 963-966 (2012).
- 33) 福田大治：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, *産総研計量標準報告* 2, 593-607 (2004).
- 34) 雨宮邦招：光ファイバにおける標準とその計測技

- 術に関する調査研究, 産総研計量標準報告 4, 293-305 (2006).
- 35) 沼田孝之: 高出力レーザーパワーの標準技術に関する調査研究, 産総研計量標準報告 7, 89-100 (2008).
- 36) 田辺稔: 光パワーメータの応答直線性校正の波長広帯域化に関する調査研究, 産総研計量標準報告 8, 349-365 (2011).
- 37) 座間達也: レーザーパワー / エネルギー標準の開発, 光学 39, 128-135 (2010).
- 38) K. Amemiya, Y. Shimizu, H. Koshikawa, H. Shitomi, T. Yamaki: Supreme-black levels enabled by touchproof microcavity surface texture on anti-backscatter matrix, *Sci. Adv.* 9, eade4853 (2023).
- 39) 産業技術総合研究所プレスリリース: 「光を 99.98 % 以上吸収する至高の暗黒シート — 触れる素材で黒さ世界一, 秘密は漆に似た成分と光閉じ込め構造 —」 https://www.aist.go.jp/aist_j/press_release/pr2023/pr20230118/pr20230118.html (2024 年 1 月 24 日閲覧)
- 40) 都丸隆行, 斉藤芳男, 久保富夫, 佐藤吉博, 徳成正雄, 高橋竜太郎, 鈴木敏一, 東保男, 新富孝和, 山本明, 内藤悦伸: ニッケル—リン光吸収体の真空特性と光学特性評価, *真空* 48, 301-303 (2005).
- 41) S. Kodato, Y. Naito, K. Kuroda, and S. Kodama: A high-accuracy quick-response optical power sensor with $\mu\text{-Ge:H}$ thin film, *Sens. Actuator A Phys.* 28, 63-68 (1991).
- 42) R. J. C. Brown, P. J. Brewer, and M. J. T. Milton: The physical and chemical properties of electroless nickel-phosphorus alloys and low reflectance nickel-phosphorus black surfaces, *J. Mater. Chem.* 12, 2749 (2002).
- 43) 国際度量衡局ウェブサイト <https://www.bipm.org/kcdb/> (2024 年 1 月 30 日閲覧)
- 44) P. A. Williams, J. A. Hadler, C. Cromer, J. West, X. Li, and J. H. Lehman: Flowing-water optical power meter for primary-standard multi-kilowatt laser power measurements, *Metrologia* 55, 427-436 (2018).
- 45) J. H. Lehman, C. Engtrakul, T. Gennett, and A. C. Dillon: Single-wall carbon nanotube coating on a pyroelectric detector, *Appl. Opt.* 44, 483-488 (2005).
- 46) J. S. Kim, K. S. Ahn, C. O. Kim, and J. P. Hong: Ultraviolet laser treatment of multiwall carbon nanotubes grown at low temperature, *Appl. Phys. Lett.* 82, 1607-1609 (2003).
- 47) K. Ramadurai, C. L. Cromer, A. C. Dillon, R. L. Mahajan, and J. H. Lehman: Raman and electron microscopy analysis of carbon nanotubes exposed to high power laser irradiance, *J. Appl. Phys.* 105, 093106 (2009).
- 48) K. Mizuno, J. Ishii, H. Kishida, Y. Hayamizu, S. Yasuda, D. N. Futaba, M. Yumura, and K. Hata: A black body absorber from vertically aligned single-walled carbon nanotubes, *PNAS* 106, 6044-6047 (2009).
- 49) アメリカ国立標準技術研究所 (NIST) ウェブサイト: The Photoforce Project <https://www.nist.gov/programs-projects/photoforce-project> (2024 年 1 月 24 日閲覧)
- 50) P. Williams, J. Hadler, F. Maring, R. Lee, K. Rogers, B. Simonds, M. Spidell, M. Stephens, A. Feldman, and J. Lehman: Portable, high-accuracy, non-absorbing laser power measurement at kilowatt levels by means of radiation pressure, *Opt. Express* 25, 4382-4392 (2017).
- 51) X. Li, T. R. Scott, C. L. Cromer, D. Keenan, F. Brandt, and K. Möstl: Power measurement standards for high-power laser: comparison between the NIST and the PTB, *Metrologia* 37, 445-447 (2000).
- 52) I. Vayshenker, H. Haars, X. Li, J. H. Lehman, and D. J. Livigni: Comparison of optical-power meters between the NIST and the PTB, *Metrologia* 37, 349-350 (2000).
- 53) M. Spidell, J. Lehman, M. López, H. Lecher, S. Kück, D. Bhattacharjee, Y. Lecoeuche, and R. Savage: A bilateral comparison of NIST and PTB laser power standards for scale realization confidence by gravitational wave observatories, *Metrologia* 58, 055011 (2021).
- 54) K. Rogers, P. Williams, M. Pastuschek, H. Lecher, S. Kück, M. Lopez, and J. Lehman: Multi-kilowatt cw laser power measurement comparison between national standards, *Metrologia* 61, 025006 (2024).
- 55) 若田仁志, 小川周治, 久場一樹, 田中正明: 大出力 CO_2 レーザービームの強度プロフィールとアクリルバーンパターンの比較 — アクリルバーンパターンの変形の原因 —, *レーザー研究* 13, 781-787 (1985).
- 56) 平等拓範: レーザービーム品質測定の基礎, *レーザー研究* 26, 723-729 (1998).
- 57) 安井公治, 小島哲夫, 藤川周一, 竹中裕司, 西前順一: 加工用高出力レーザーのビーム品質測定と評価, *レーザー研究* 26, 730-734, (1998).
- 58) 笠松直史: 光学工房 — レーザービームの品質って何? — M^2 の定義 —, *光学* 29, 708-709, (2000).

- 59) 笠松直史: 光学工房－レーザービームの品質って何？－ M^2 の測定と評価－, 光学 29, 768-769, (2000).
- 60) T. Numata: Beam size estimation method for mid-infrared lasers using silicon-based photonic semiconductor image sensor, Appl. Phys. Express 15, 096502 (2023).
- 61) 産業技術総合研究所プレスリリース: 「可視光用撮像素子を用いた中赤外線レーザーのビーム径計測技術を開発－発想の転換により計測装置を小型・低コスト化, 材料加工や先端医療に貢献－」
https://www.aist.go.jp/aist_j/press_release/pr2022/pr20220831/pr20220831.html (2024年1月24日閲覧)
- 62) S. Rung, M. Rexhepi, C. Bischoff, and R. Hellmann: Laserscribing of Thin Films Using Top-Hat Laser Beam Profiles, J. Laser Micro Nanoeng. 8, 309-314 (2013).
- 63) 石田祐三: 非線形相関法による超短光パルスの測定, レーザー研究 15, 63-71 (1987).
- 64) 長沼和則: 超短パルス光の計測, 光学 30, 834-844 (2001).
- 65) 鍋川康夫, 緑川克美: アト秒パルス列の自己相関計測, レーザー研究 39, 916-922 (2011).
- 66) 黒澤宏, まるわかりレーザー原論, オプトロニクス社, 2011, 422p.
- 67) 前田三男: レーザーの基礎Ⅳ: レーザーの各種動作モード, レーザー研究 26, 277-285 (1998).
- 68) ノーベル財団ウェブサイト: The Nobel Prize in Physics 2023 was awarded to Pierre Agostini, Ferenc Krausz and Anne L' Huillier "for experimental methods that generate attosecond pulses of light for the study of electron dynamics in matter" <https://www.nobelprize.org/prizes/physics/2023/summary/> (2024年1月29日閲覧)
- 69) 日本物理学会ウェブサイト: 2023年ノーベル物理学賞は, 「物質中の電子ダイナミクスを研究するためのアト秒パルス光の生成に関する実験的手法の業績」により Pierre Agostini 氏 (The Ohio State University, USA), Ferenc Krausz 氏 (Max Planck Institute of Quantum Optics, Germany), Anne L'Huillier 氏 (Lund University, Sweden) の3氏が受賞することに決定. <https://www.jps.or.jp/information/2023/10/2023nobelprize.php> (2024年1月29日閲覧)
- 70) G. Cerullo and M. Nisoli: Ultrafast lasers from femtoseconds to attoseconds, Europhys. News 50, 11-14 (2019).
- 71) K. Midorikawa: Progress on table-top isolated attosecond light sources, Nat. Photonics 16, 267-278 (2022).
- 72) 田島俊樹: EW (エキサワット) と zs (zeptosecond) のレーザーへの道, レーザー研究 45, 613 (2017).
- 73) T. Tajima, K. Nakajima, and G. Mourou: Laser acceleration, Riv. Nuovo Cim. 40, 33-133 (2017).
- 74) 物質・材料研究機構 超鉄鋼研究センター, 日経 BP クリエイティブ編集開発本部: 小冊子「近未来の鉄鋼材料を知る」no.5, 独立行政法人 物質・材料研究機構, 2004, <https://www.nims.go.jp/stx-21/jp/publications/stpanf/pdf/welding5.pdf> (2024年1月30日閲覧)
- 75) 沼田孝之: 加工用レーザーのパワー制御システムの開発, 溶接技術 65, 57-60 (2017).
- 76) 産業技術総合研究所プレスリリース: 「加工用レーザーのパワー制御技術を開発－レーザー加工の歩留まり向上に貢献－」https://www.aist.go.jp/aist_j/press_release/pr2017/pr20170614/pr20170614.html (2024年1月24日閲覧)
- 77) 永田伍雄: YAG レーザ光の偏光制御による微細切断加工, 大阪府立産業技術研究所 Technical Sheet No. 04010
- 78) R. Weber, A. Michalowski, M. Abdou-Ahmed, V. Onuseit, V. Rominger, M. Kraus, and T. Graf: Effects of Radial and Tangential Polarization in Laser Material Processing, Physics Procedia 12, 21-30 (2011).
- 79) 西前順一, 山本達也, 藤川周一: 高出力ラジアル偏光ビームの発生とレーザー加工への応用, 光学 42, 603-608 (2013).
- 80) J. J. Brady, R. O. Brick, and M. D. Pearson: Penetration of Microwaves into the Rarer Medium in Total Reflection, J. Opt. Soc. Am. 50, 1080-1084 (1960).
- 81) 徳田将志, 沼田孝之: エバネッセント光を用いた加工用レーザーパワー制御技術の開発, レーザー学会学術講演会第44回年次大会 (日本科学未来館および東京国際交流館プラザ平成, 2024年1月16日-19日)
- 82) 徳田将志, 沼田孝之: 近接場光を用いたレーザーパワー制御技術の偏光依存性の評価, レーザ加工学会第100回記念講演会 (東京都立産業貿易センター浜松町館, 2024年3月18日-19日)
- 83) 徳田将志, 沼田孝之: エバネッセント光を用いた高出力近赤外レーザー向けビームサンプリング技術の偏光依存性評価, 第33回 (2024年度) 日本赤外線学会研究発表会 (大阪工業大学大宮キャンパス, 2024年10月10日-11日)