

【表紙図】レーザー光の位相制御とその応用技術の発展性

位相制御の不思議

◆レーザー光の位相制御

光は電磁波である。その電磁界成分は規則正しく波として振動している。この波の山や谷が移動する(伝搬する)タイミングが位相と呼ばれている。位相を制御すると、波の山と山や、山と谷を重ね合わせることができ、干渉によって光が消えたり強め合ったりして一見不思議な現象が発生する。レーザー光の位相を制御することで、これまでになかった光応用技術の展開が期待される。

レーザー光を特徴づける電界振幅、位相、偏光、波長の中で、位相を操るだけでも従来にないレーザービームをつくり出すことができる。これは、位相分布の時間微分が周波数に、空間微分が波の進行方向に関係するからである。位相制御は普遍性が高く、いろいろな分野のニーズに対応可能と考えられる。発振器から一旦放出されたレーザー光は人為的にさまざまな制御が可能であり、これが多種多様な光応用機器が生まれるゆえんであり、レーザー光の面白さでもある。

◆位相制御の不思議 その1

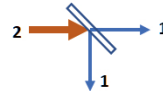
図1に位相制御による光の分岐、合成が可能となる事例を示す。図1 (a) にハーフミラーで光を1:1に分岐

レーザープロセス研究チーム 藤田雅之

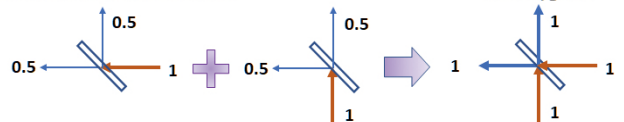
する様子を示す。ハーフミラーは光の透過率と反射率がそれぞれ50%となるように表面に誘電体多層膜コーティングされたミラーである。大きき2の光を入射すると、1の光が反射され(下へ向かい)、1の光が透過する(右へ向かう)。では、逆向きに光を通すとどうなるであろうか?

図1 (b) に図1 (a) の逆向きに光を通した様子を示す。右からきた光と下からきた光はそれぞれ1:1に分岐さ

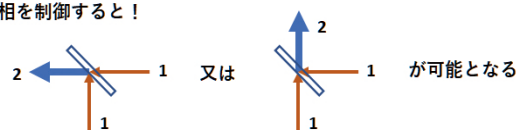
(a) ハーフミラーでビーム (パワー) を2分割する事ができる。



(b) 逆向きに光を通すとどうなる?



(c) 位相を制御すると!



【図1】位相制御による光の分岐、合成

れ、足し合わせると、そのまま光が素通りしたように、1の光が左へ1の光が上へ抜けていく。ところが、光の位相を制御すると干渉により図1 (c) に示すように右と下からの光を合成して2の光を作り出すことが可能となる。

◆位相制御の不思議 その2

図2に位相制御による光の蓄積が可能となる事例を示す。図2 (a) のように、反射率99.9%のミラーに大きさ1000の光を照射すると999の光が反射される。ところが、図2 (b) のように、同じミラーをもう1枚置いて光共振器をつくと、999の光が光共振器に吸い込まれて、反射される光は1になる。(この時、2枚のミラーの間隔は光の半波長の整数倍でなければならない。)

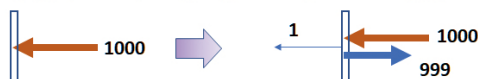
しばらく時間が経つと(光が共振器内を1000回往復すると)、後ろのミラーから998の光が漏れてくる(図2 (c))。また、ミラーの間(光共振器内)には、大きさ約100万(吸い込まれた光の1000倍)の光が蓄積されていることになる。入り口と出口だけ見れば、光は2枚の高反射ミラーを素通りしているようにも見える。反射率が99.9999%のミラーを使うと、光共振器内には100万倍の光パワーを蓄積できる。

◆位相制御の使い方

位相制御のレーザー加工への利用例を図3に示す。レーザー光の波面をホログラムの原理で位相制御することにより、集光点において任意の強度分布を実現することができ、多数の点やQRコードのような複雑形状を一括加工することが可能となり産業界からの注目を集めている(図3 (a))。また、波面の位相を半径方向に制御すればレーザー光の収束点、すなわち焦点位置を連続的に変えることができる(図3 (b))。さらに、異なるビームの位相を揃えることで、複数ビームのコヒーレントなパワー結合が可能となる(図3 (c))。

表1に代表的な位相制御デバイスの特徴を示す。最も

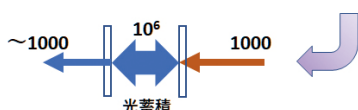
(a) ミラー (反射率99.9%) に光を照ると、ほとんど反射される。



(b) ミラーの後ろに別のミラーを置いて共振器をつくと、ミラー表面で干渉が起こり



(c) 光は共振器に吸い込まれて、1000回往復した後、後ろのミラーから出て行く (ように見える)。



【図2】位相制御による光の蓄積

【表1】代表的な位相制御デバイス

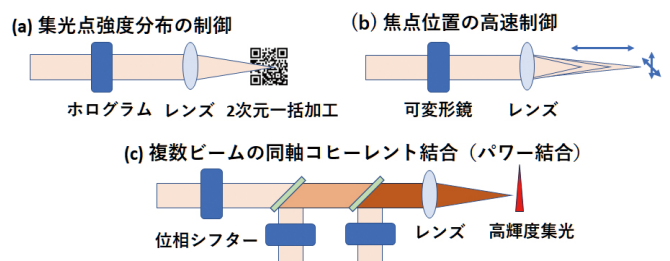
デバイス名	制御周波数	素材	特徴
LCOS-SLM	~ 100 Hz (波長による)	液晶 (反射型、透過型あり)	多点同時加工 直線偏光成分に対応
可変形鏡	~ 10 kHz	ピエゾ素子+反射ミラー	集光、ステアリング同時制御 高光耐力
位相シフター	10 ~ 数千Hz (シフト量による) ~ MHz	移動ステージ or ピエゾ素子 ファイバー	機械駆動による光路調整 ファイバー結合ユニット化
偏光素子	固定型	フォトニック結晶 他	渦偏光を発生

一般的なものが液晶空間位相変調器LCOS-SLM (Liquid Crystal on Silicon - Spatial Light Modulator)であり2次元一括・多点同時加工を可能とする。可変形鏡は天文分野で主に開発されてきたが、小型化、性能のチューニングを施すことで産業応用が期待されている。位相シフターは自由空間伝搬光に対しては機械的な光路調整、ファイバーを用いたものは自由空間での伝搬が無いために安定な制御素子となりうる。偏光素子はさまざまなタイプがあるが、フォトニック結晶を用いることで容易に渦偏光を発生させることができる。それぞれ一長一短があり、応用分野によって選択あるいは組み合わせることで使うこととなる。

◆位相制御とその応用技術の発展性

表紙図にレーザー光の位相制御とその応用技術の発展性を示す。既存のレーザー発振器に電子制御された位相制御技術と検出技術を組み合わせてコヒーレント光源の波面を制御することで、集光強度分布制御、非対称集光ビームは元より、コヒーレントビーム結合、光ステアリング、光スイッチング、パルス切り出し、光蓄積、多波長出力等が可能となる。これらの光制御技術を利用することで、レーザー加工分野において高出力・高スループット化、高効率光エネルギー利用、高付加価値加工、多点同時加工、高速安定溶接、可変集光点の高速移動を実現することができる。その応用分野は、太陽電池製造プロセス、プリント基板の穴開け、自動車ボディの溶接、アルミ電池ケース溶接、燃料電池セパレータ加工など、我が国が世界をリードすべき分野をカバーする。

* 令和5年度一般財団法人機械システム振興協会委託事業「レーザー加工用光位相制御システムの市場開拓に関する戦略策定」の研究内容の一部を再掲しています。

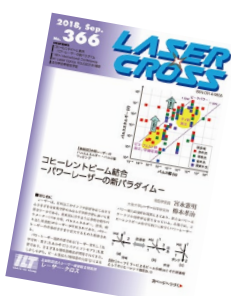


【図3】位相制御の利用例

レーザー総研での位相制御技術開発の歴史

レーザー技術総合研究所では、2010年代からコヒーレントビーム結合(CBC：Coherent Beam Combining)のための位相制御技術の開発に取り組んできた。また、2020年代には波面制御のための可変形鏡の開発を進めてきている。以下に、レーザー光の位相制御に関する研究成果を紹介した過去のレーザークロスのトップ記事とその表紙図を示す。ご興味があれば、レーザー総研HPからpdfファイルをダウンロードしてご覧いただきたい。

タイトル	号数
コヒーレントビーム結合技術開発	No.290(May, 2012) No.311(Feb., 2014) No.323(Feb., 2015) No.336(Mar., 2016) No.366(Sep., 2018)
高速・高光耐性可変形鏡の開発	No.401(May, 2022) No.408(2023) No.412(2023)
大口径デフォーダブルミラーの開発に向けた構造シミュレーション	No.405(Oct., 2022)
LCOS - SLM の 耐光性の評価	No.418(2024)
デフォーダブルミラーのレーザー加工への応用	No.420(2025)



No.290

(a,b)各ビーム単体の遠視野像と、2ビーム結合時 ((c)位相差 π 、(d)位相差0) の遠視野像

No.336

重ねアパーチャ型コヒーレントビーム結合ユニットの模式図と装置写真 (M:ミラー、BS:ビームスプリッター、PM1~PM3:ピエゾミラー、PD:フォトダイオード)

No.405

可変形鏡構造モデルに、(a)デフォーカス収差 (b)水平コマ収差 (c)2次の非点収差、(d)球面収差を与えた際の鏡面形状 (3次元表示)

No.412

開発した大型可変形鏡 (高次項補正鏡) の外観

No.418

LCOS-SLMの模式図

No.420

(左) レーザーウォーピング溶接の模式図と (右) 可変形鏡 (チップチルト鏡) の外観

第73回応用物理学会春季学術講演会報告

レーザー計測研究チーム 磯谷舟佑

■応用物理学会春季学術講演会が東京科学大学で開催

2026年3月15～18日に東京科学大学大岡山キャンパスにて第73回応用物理学会春季学術講演会(主催：公益社団法人応用物理学会)が開催された。講演会は春季、秋季の年2回開催されており、コロナ禍を経て現地会場とオンラインを並行して行うハイブリッド形式での開催が定着している。本講演会には、27件のシンポジウムに加え、AIエレクトロニクスにフォーカスしたセッション、そして光・フォトンクス、放射線、プラズマエレクトロニクス、半導体、ナノカーボン・二次元材料などの14の大分類分科会にそれぞれ3～15程度の中分類分科会が設置されており、応用物理学に関する非常に広範囲の分野をカバーしている。口頭講演、ポスター講演合わせて約3500件の講演が行われ、併設された展示会(JSAP EXPO Spring 2026)には約180の企業および団体が参加している。筆者は、現在弊所で開発中の藻場近傍での海洋炭酸系の濃度分布観測に向けたTOF方式のラマンライダーに関する研究結果の発表を行い、参加した研究者の方々々と有意義な議論を交わすことができた。本稿では、レーザーを用いたガス計測技術のトピックや原子炉廃止措置に必要な計測技術などについて紹介する。

■紫外・赤外吸収分光法による火山ガス濃度計測センサの開発

東京都立大学の柴田泰邦教授より、火山ガス濃度計測のためのセンサ開発に関する講演があった。火山活動によって放出される火山ガスには、硫化水素(H_2S)や二酸化硫黄(SO_2)などの毒性のあるガスが多く含まれており、死亡事故などが起きている。火山活動の活動度は硫化水素と二酸化硫黄の組成比や二酸化炭素(CO_2)と二酸化硫黄の組成比の変化との関連性が指摘されており、火山ガス成分の高頻度計測が要求されている。現在の火山ガス計測では、電気化学式センサが一般的に用いられるが、使用可能な期間が短く、安定的な長期モニタリングに課題がある。講演者らのグループは、220～320 nmのキセノンランプを光源とした紫外吸収分光法により SO_2 と H_2S を、波長1.57 μm 帯のDFBレーザーを利用した赤外吸収分光法により CO_2 と H_2S を同時計測するセンサを開発している。試作機で性能評価実験を実施中で、 H_2S に関しては17.3 ppmのサンプルガスを誤差約1%の精度で計測できているとのことである。労働安全衛生法の定める作業環境における許容濃度が10 ppm未満であり、実用に近い機器が開発されていることが分かる。

■福島第一原子力発電所の廃炉に向けた計測技術の開発

千葉大学の椎名達雄准教授より、福島第一原子力発電所の廃炉に向け、原子炉格納容器(PCV)からの漏えい気体検知技術開発に関する講演があった。PCV内は窒素封入により不活性状態が維持されており、建屋内への漏えいが生じる場合、約8割が窒素である大気に微量の窒素が放出される状況が想定されるため、高感度な検知手法が求められる。講演者らのグループは、漏えいの位置と漏えい量の推定をめざしてラマンライダー技術を開発中で、講演ではその性能評価実験結果が報告された。波長355 nmのレーザーを用いて、対象ガスである窒素および酸素のラマン散乱光をフォトンカウンティング方式で検出している。窒素ガスを充填したガスチャンバから窒素を漏えいさせ、漏えい箇所近傍の窒素ラマンの信号増加、酸素ラマンの信号減少を検知することによって性能評価を行い、開発した装置では漏えいガス流量1.4 L/minまで検出できることを明らかにした。放射性物質の閉じ込めという性質上、検出下限は小さければ小さいほどよく、高感度化は継続して行う必要がある。また、散乱断面積の違いにより窒素ガスに比べて酸素ガスの方が感度良く計測できるとのことである。今後の課題としては、現場での適用のために高分解能化、および装置の小型化が求められると考えられる。

今回の応用物理学会には福島第一原子力発電所の廃炉に向けた放射線計測技術開発に特化したシンポジウムも行われており、(株)日立製作所の上野雄一郎氏からは、ROVを用いて原子炉格納容器内部に入り、高放射線環境下で燃料デブリの検知のために核燃料由来の放射線計測が行われたことも報告されていた。震災から15年経ち、廃炉に向けた本格的な調査が始まっており、より関心が高まってきていることを感じた。



【写真】講演会場(東京科学大学大岡山キャンパス)