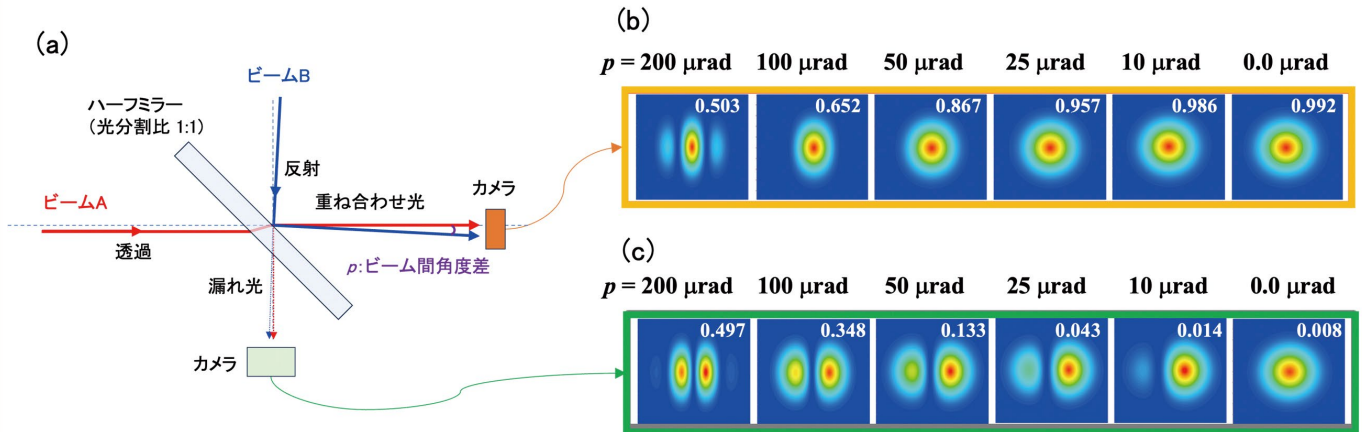


CONTENTS

- 超高精度ビーム重ね合わせ手法の開発
- 光機能性酵素の電荷シフト反応メカニズム
- レーザー学会学術講演会
- 第46回年次大会 参加報告



【表紙図】(a)ハーフミラーを用いた2ビーム重ね合わせの光学配置。(b)重ね合わせ光側と(c)漏れ光側のビームプロファイルで、2ビーム間の光軸ずれ角(p)に対するプロファイル(計算値)の変化を示している。図中白文字は重ね合わせ光と漏れ光の強度比

超高精度ビーム重ね合わせ手法の開発

レーザープロセス研究チーム コスーロビアン ハイク、稲田順史、谷口誠治

■はじめに

ビーム重ね合わせ(またはビーム重畳)とは、複数の光ビームの進行方向(光軸)を高い精度で一致させ、空間的に重ね合わせる光学技術のことを指す。この技術は、複数の低出力レーザーを組み合わせることによるレーザーの高出力化(ビーム結合)、レーザー加工の高効率化や細密化、右回りと左回りの2本の円偏光(光渦)ビームを用いた放射光ベクトルビームの生成など、さまざまな応用に重要な技術である。通常は、重ね合わせたビームをできるだけ長距離伝搬させたのち、ビーム形状をカメラやビームプロファイラなどにより観測

し、両ビームのプロファイルが重なるようビームの光軸を調整するが、この方法ではビームを長距離伝搬させる光学系を新たに準備する必要がある。また特に、レーザーのビーム径が大きい場合にはビーム重畳の度合いが判別しにくく、高精度での角度調整が難しい。当研究所ではこの課題を解決するため、複数のレーザービームの光軸を簡便に高精度で揃えることが可能な手法を開発した。本稿ではその概要について述べる。

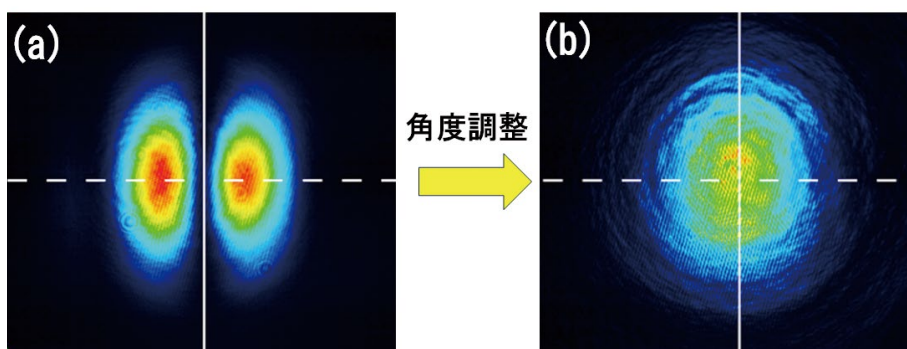
■複数ビームの光軸調整の新技术

表紙図(a)に、入射角 45° で使用するハーフミラー(光分割比1:1)を用いた2ビーム重ね合わせの光学配置図を

示す。ここで2本のビームAとBの強度、波長は同じであるとする。ハーフミラー上で2本のビームが同位相で重なるように配置すると、ビームAはハーフミラーを透過し、ビームBはハーフミラーの表面で反射され、2本のビームは同一方向に進行する。この時2ビームの光軸に僅かでもずれがあると、ハーフミラーの裏面から2本のビームが干渉した漏れ光が生じ、そのプロファイルおよび光強度は2ビーム間の角度差に依存して変化する。表紙図(b)、(c)に、2ビーム間の位相差を $\lambda/50$ (λ =レーザー波長)に保持した際の、ビーム間角度差に対する重ね合わせビームおよび漏れ光のビームプロファイル、光強度比を計算した結果を示す。重ね合わせ光のプロファイルは(表紙図(b))、角度差が $25 \mu\text{rad}$ 以下になるとその変化は小さくなるのに対し、漏れ光のプロファイルは角度差が $25 \mu\text{rad}$ 以下でも目視で確認できるほど大きく変化することがわかる。この結果は、漏れ光を観測する方がより高精度の光軸調整が可能であることを示している。

この手法の有効性を確認するため、表紙図に示した光学系を実際に製作し検証試験を行った。光源には波長1030 nm、ビーム径3.1 mm ϕ 、ビーム品質(M^2)1.07、線幅20 GHzのシングルモードLDレーザーを用いた。ビームを光強度比1:1で分岐した後、ビーム間の位相差を $\lambda/120$ 以内に保持しながら 45° ハーフミラー上で再度重ね合わせを行

い、漏れ光のビームプロファイルを観測した。結果を図1に示す。図1(a)はビーム間の角度差が約 $200 \mu\text{rad}$ 、(b)は2ビームの光軸が一致するようにビームの入射角を調整した後のプロファイルである。表紙図に示したように、角度調整後のプロファイルは円形となった。2ビームが同位相で光軸が一致した場合、理想的には漏れ光の強度は0となるが、レーザービームの M^2 や発散角の効果、および光学素子の性能などにより両ビームの特性に僅かな違いが生じるため、実際には漏れ光がごく僅かに発生する。重ね合わせ光と漏れ光の強度比の最大値(98.8:1.2)の時のビーム間角度差は $< 8.5 \mu\text{rad}$ と見積もられた。波長1030 nm、ビーム径3.1 mm ϕ のレーザー光の回折限界発散角は $423 \mu\text{rad}$ であることから、この手法を用いることで限界発散角の1/50以上という超高精度でビームの光軸を調整できることがわかった。また、本手法は他の方法に比べ簡便に超高精度の光軸調整が可能という点で画期的であると考えており、現在特許を出願中である(特願2025-119138)。



【図1】ビーム間角度(a) $\sim 200 \mu\text{rad}$ の場合、(b) 角度のずれを $\sim 8.5 \mu\text{rad}$ にまで調整した場合の漏れ光のプロファイル(実測値)

光機能性酵素の電荷シフト反応メカニズム

■光機能性酵素クリプトクロム

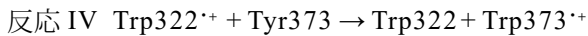
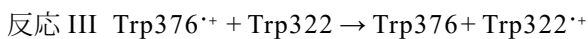
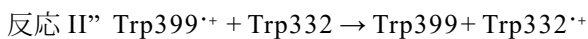
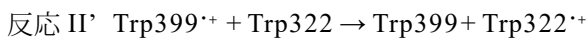
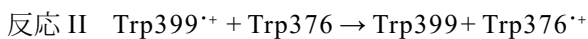
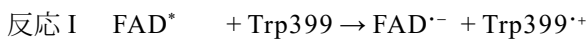
クリプトクロム(CRY)はフラビン酵素の一種で、さまざまな動植物に存在する。その中で最初に動物内で見出された種は動物型CRY(以下CraCRYと記す)と呼ばれる。近年、光合成藻類の一種がCraCRYを有しており、光によるDNA修復機能を持つことが示された^[1]。青色光を照射すると、CraCRYの補因子フラビンアデニンジヌクレオチド(FAD)が励起され、近傍に存在する電子供与性アミノ酸のトリプトファン(Trp)から電

子を受け取る光誘起電子移動反応と、その後起こる電荷シフト反応がDNA修復機能のトリガーとなると考えられ、これによりCraCRYが生体の光機能性の要因解明に適した酵素であると期待されている。これまでに、分子動力学シミュレーションにより得られたCraCRYの液中構造を用いてFADとTrp間の電子移動速度の計算を行うことで、その反応メカニズムの解析を行ってきた(Laser Cross No.416(2024))。本稿では電荷シフト反応の解析についての報告を行う。

レーザーバイオ化学研究チーム 谷口誠治

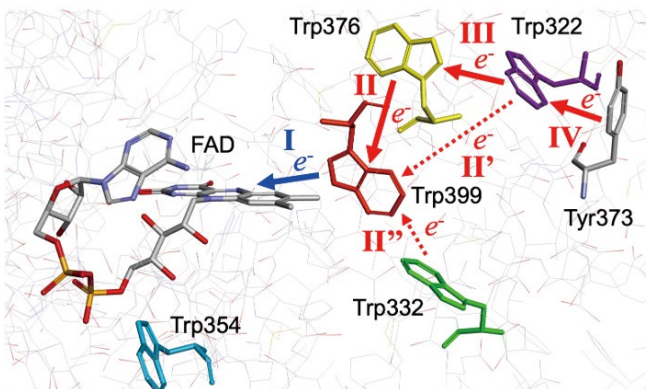
■電荷シフト反応速度の理論解析

図1に、CraCRYにおける補因子FADと周辺のアミノ酸構造を示す。FAD近傍にはFADと光誘起電子移動を引き起こすTrp399が、さらにその近傍にTrp376、Trp332が配置されている(Trpの後の数字は蛋白質を構成するアミノ酸の配列番号を示す)。Trp376の隣にはTrp322、さらにその隣には電位供与性アミノ酸のチロシン(Tyr373)が位置しており、FADに移動した電子を補充するように連続的な電荷シフト反応が起こる^[2]。それぞれの反応を区別するため、光誘起電子移動、第2段階、第3段階、第4段階目で起こる電荷シフトをそれぞれ反応I~IVと記す。また反応IIは、Trp399とTrp376間だけでなく、Trp399とTrp332間、Trp399とTrp322間でもそれぞれ起こりうるため、これらの反応を反応II'、II''と記す。各反応を化学式で表すと下式のようになる。



反応Iでは、光励起されたFAD(FAD*)にTrp399から電子が一つ移動し、FADのラジカルアニオン(FAD^{·-})とTrp399のラジカルカチオン(Trp399^{·+})が生成する。反応IIでは、反応Iで生成したTrp399^{·+}へTrp376から電子一つがシフトすることで、Trp376はラジカルカチオン(Trp376^{·+})となりTrp399は元の状態に戻る(Trp399)。他の反応式も同様である。

電荷シフト反応速度の計算にはKakitani, Matagaらにより構築された電子移動速度理論^[3]を電荷シフト反応に適用した式を用いた。詳細については、われわれの他の発表論文^[4]を参照されたい。表1に、各反応の



【図1】動物型クリプトクロム(CraCRY)の補因子(FAD)近傍の電子供与性アミノ酸(Trp, Tyr)の立体配置と電荷シフト反応経路(図中矢印)

電荷シフト速度、および理論解析に用いた各パラメータの値を示す。2段階目の電荷シフト反応の速度は、反応II'およびII''と比べ反応IIの $1.6 \times 10^{-1} \text{ ps}^{-1}$ が最も高速であり、電荷シフトの主反応であることがわかる。反応II'の速度が遅い($3.9 \times 10^{-2} \text{ ps}^{-1}$)のは、Trp399^{·+}とTrp332間の分子間中心距離(Rc)が他のアミノ酸よりも大きいためである。一方反応II''では、Rcは反応IIと同等であるが、静電エネルギー(ES)の値に差が見られ、反応前後の状態間の自由エネルギー差(ΔG^0)に0.1eVの差(Trp322で-2.1 eV、Trp376で-2.2 eV)が生じたことが速度低下の要因であると考えられる。この結果は、Trp周囲の環境場(Trpとそれ以外のアミノ酸との静電相互作用)が電荷シフト速度に大きく影響することを示している。また、過渡吸収計測により得られた電荷シフト速度の実測値は $2.5 \times 10^{-1} \text{ ps}^{-1}$ ^[2]と報告されており、今回得られた反応II、II'、II''の速度を足し合わせた値($2.37 \times 10^{-1} \text{ ps}^{-1}$)と一致した。この結果は3つの反応が並行して起こる(競争反応)ことを示している。3段階目(反応III)、4段階目の電荷シフト(反応IV)速度はそれぞれ $2.3 \times 10^{-2} \text{ ps}^{-1}$ 、 $1.7 \times 10^{-3} \text{ ps}^{-1}$ と算出され、実測値($2 \times 10^{-2} \text{ ps}^{-1}$ 、 $1.25 \times 10^{-3} \text{ ps}^{-1}$)と同様の値が得られた。これらの結果から、前回報告した結果とあわせCraCRYの光反応全体の解析が可能であることがわかった。この解析手法は結晶構造が明らかな他の光機能性酵素(光合成における電子伝達機能など)にも適用でき、また同様の光電子移動を示す光機能性分子の(周囲の環境場を含めた)分子設計にも応用可能であると考えており、今後も研究を進めていく。

参考文献：

- [1] Y. Zou *et al.*, *J. Plant Physiol.*, **174**, 4 (2017).
- [2] F. Lacomat *et al.*, *J. Am. Chem. Soc.*, **141**, 13394, (2019).
- [3] T. Kakitani, N. Mataga, *J. Phys. Chem.*, **89**, 8 (1985).
- [4] N. Nunthaboot, *et al. J. of Photochem. Photobiol. A, Chemistry*, **444**, 114946 (2023).

【表1】電荷シフト反応に関するパラメータと反応速度(解析値)

電荷シフト反応	Rc (nm)	ES (eV)	ΔG^0 (eV)	k (ps ⁻¹)
反応II	0.82	0.19	-2.2	1.6×10^{-1}
反応II'	0.73	-0.20	-2.6	3.9×10^{-2}
反応II''	1.08	0.23	-2.1	3.8×10^{-2}
反応III	0.79	0.11	-2.2	2.3×10^{-2}
反応IV	1.36	-0.03	-3.5	1.7×10^{-3}

*Rc : 分子間中心距離、ES : TrpまたはTyrと周囲のアミノ酸残基との静電エネルギー、 ΔG^0 : 電荷シフト反応前後の標準自由エネルギー差、k : 反応速度(解析値)

レーザー学会学術講演会 第46回年次大会 参加報告

2026年1月13～15日、大阪南港ATCにおいて、レーザー学会学術講演会第46回年次大会(主催：一般社団法人レーザー学会)が開催された。レーザー学会はその名が示すように「レーザー」に特化した日本で唯一かつ世界的にもユニークな学会である。学術講演会年次大会は毎年1月に開催され、レーザー物理・化学、レーザー装置、高強度・高エネルギーレーザー応用、レーザープロセス、レーザー計測など9部門に分かれた一般講演のほか、最先端の光技術とその産業応用への展開について議論するシンポジウムと、近年ではポスター発表も行われている。今年も、レーザーフュージョンエネルギー開発、次世代ファイバーレーザー、光コンピューティング、屋外における高出力レーザー利用の安全性評価など11のシンポジウムが開催された。弊所からは、3次元積層加工(藤田)、ラマンイメージング(染川)、漏えい気体の可視化(倉橋)など、共同研究を含めての7件の成果を報告した。本稿では、報告者が参加したセッションで行われた講演の概要をいくつか報告する。

■自然光によるデジタルホログラフィ

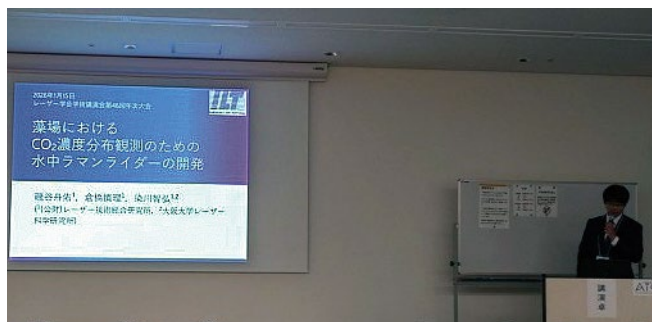
情報通信研究機構の田原樹氏より、自然光やLEDのようなインコヒーレントな光源と計算機を用いたインコヒーレントデジタルホログラフィ技術についての招待講演があった。3次元物体からの物体光と参照光から得られた干渉縞画像をイメージセンサによりデジタル画像として記録(ホログラムの作成)し、記録されたデジタル画像に計算機内で参照光を仮想的に照明し、光の回折効果を数値計算することで3次元情報を再生するデジタルホログラフィでは、従来レーザー光源が必要であった。一方、シャボン玉の干渉模様やニュートンリングのように、太陽を光源とした干渉縞が生成されることは広く知られている。これらの現象は自己干渉によるものであり、自然光であっても自らの光に対しては干渉性があることを示している。インコヒーレントデジタルホログラフィではこの自己干渉を利用しており、複屈折レンズなどを用いて物体光から波面の異なる2つの光波を生成し、位相変調素子や偏光素子を用いてイメージセンサ上に自己干渉ホログラムを記録する。得られたホログラムからの像再生にはレーザー光源を用いた通常のデジタルホログラフィと同様のアルゴリズムが適用可能である。田原氏らの研究グループは、レーザー光デジタルホログラフィ分野で開発さ

レーザー計測研究チーム 倉橋慎理

れた技術を積極的に導入し、インコヒーレントデジタルホログラフィの性能を向上させる研究開発を行っており、イメージセンサ部にフルカラー偏光カメラを用いて自然光源を用いた屋外構造物のフルカラーホログラフィ動画記録に世界で初めて成功した事例や、高速度カメラを用いた高速度3次元計測を実施した事例などが紹介された。

■CO₂濃度分布観測のための水中ラマンライダー開発

当研究所の磯谷研究員より、ラマンライダー開発についての報告があった。既報「海中レーザーCO₂計測が拓く脱炭素への貢献」(Laser Cross No.421)にて実施された内容の報告で、ブルーカーボン生態系による炭素の隔離・貯留メカニズムの解明や定量化に向け、海洋の二酸化炭素濃度分布を観測するためのラマンライダーを開発している。海洋生物により取り込まれた炭素を示す「ブルーカーボン」を吸収する海洋生態系として、マングローブ林、海草藻場、干潟・塩性湿地、海藻藻場の4つがあげられ、これらは「ブルーカーボン生態系」と呼ばれる。研究グループは主に藻場における二酸化炭素の空間分布の把握を対象としており、10 mオーダーの水深を観測できる装置を開発している。海中の二酸化炭素(CO₂)は水に溶解すると炭酸(H₂CO₃)になり、さらに炭酸水素イオン(HCO₃⁻)と炭酸イオン(CO₃²⁻)に分かれる。これらが平衡状態にあり、pH8程度の海水表面では約90%が炭酸水素イオンの形で存在するといわれている。講演では、パルスレーザーとラマン分光システムからなるラマンライダーを構築し、6.5 m先に設置した石英セル内に封入した炭酸水素ナトリウム水溶液のラマンスペクトルを取得し、炭酸水素イオンのラマン信号を検出できたことが報告された。



【写真】講演中の磯谷研究員