

特集論文

高出力レーザーシステムの実現 に向けて

For Realization of High Energy Laser

鈴木れん*

Ren Suzuki

原口英介†

Eisuke Haraguchi

落水秀晃*

Hideaki Ochiaimizu

秋山智浩†

Tomohiro Akiyama

*鎌倉製作所

†情報技術総合研究所(博士(工学))

要 旨

防衛装備品での高出力レーザー(HEL: High Energy Laser)システムは、近年、急速な技術発展によって脅威を増している小型～中型サイズの無人機(UAV: Unmanned Aerial Vehicle)に対して、費用対効果に優れた対処手段として早期装備化の実現が期待されているシステム⁽¹⁾である。日本を含む世界各国で、高出力・高い集光性能を持つHELシステムの開発が進められており、その中でも、特にビーム結合技術が重要になっている。三菱電機では、高出力化かつ高い集光性能のビーム出力が可能なコヒーレントビーム結合(CBC: Coherent Beam Combining)の開発に取り組んでおり、その基盤技術の確立を進めている。早期装備化の実現に向けた開発を継続し、日本の安全保障を担う企業として社会に貢献していく。

1. まえがき

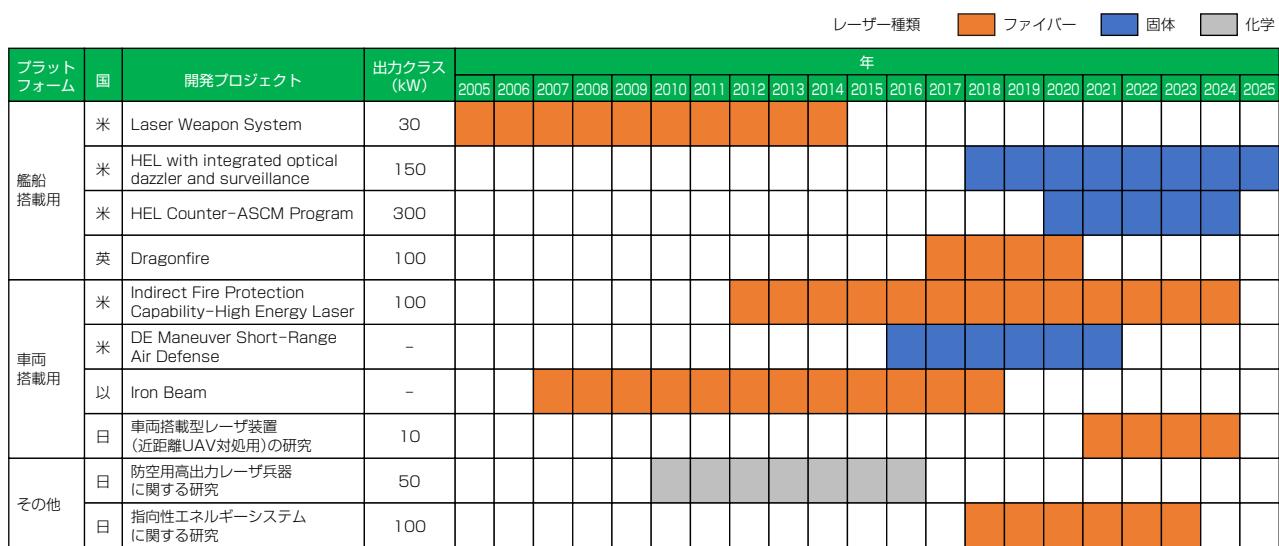
日本を含む各国で開発が進められているHELシステムは、より高いレーザー出力と高い集光性能が求められており、その要求を満たすためビーム結合技術の重要性が増している。

本稿では、2章でHELシステムの開発動向を示し、3章でHELシステムにおいて重要な技術であるビーム結合方式とその特徴について述べる。最後に4章で当社が着目し開発を進めているCBC技術の開発取組み状況について述べる。

2. HELシステムの開発動向

近年、急速に技術進歩を遂げているUAVは軍事利用が進んでおり、特に小型～中型サイズのUAVに対して費用対効果に優れた対処手段が求められている。この候補の一つであるHELシステムは、高出力なレーザーを直接照射することで対処する装備品であり、弾薬を使わないとから戦闘性、費用対効果に優れるため、早期実現が期待されている。

図1に2005～2025年の国内外の主要なHELシステムの開発プロジェクトを示す。



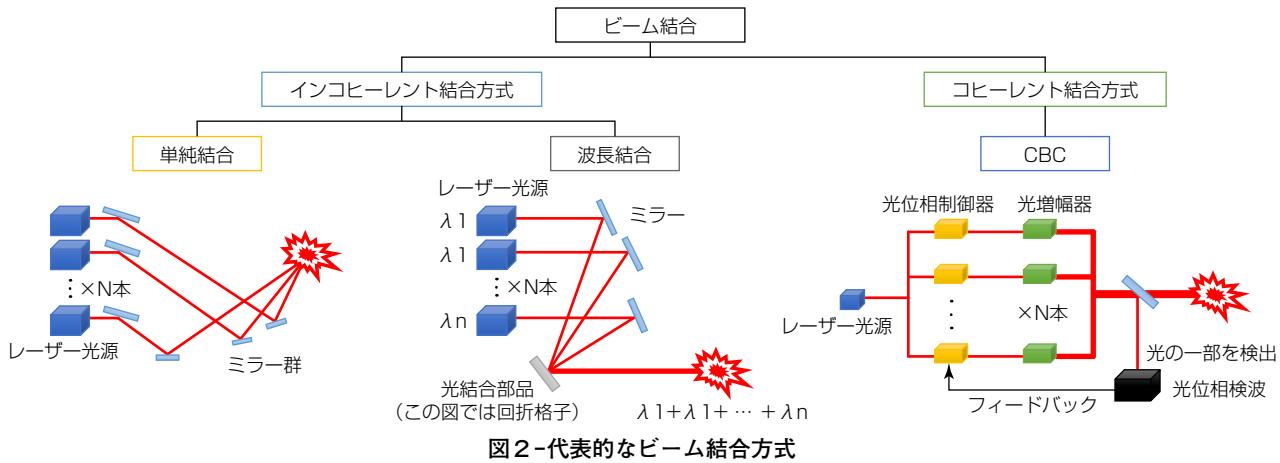
以: イスラエル

図1-国内外でのHELシステムの主要な開発プロジェクト

国外では既に数10kW級のHELシステムが実現されており、2025年までに100kW超級のHELシステムの開発が進行中である。更なる高出力化に向けて、ビーム結合技術(単一レーザー光でなく、複数のレーザー光を束ねて出力することで高出力化する技術)の重要性が増してきており、各国でその高度化開発が盛んに進められている。ビーム結合技術は、高出力化以外に集光性能にも寄与することから、HELシステムでのキー技術として注目されている。

3. ビーム結合方式とその特徴

この章ではビーム結合方式の概要について述べる。図2に代表的なビーム結合方式を示す。図に示すとおり、ビーム結合方式はインコヒーレント結合方式とコヒーレント結合方式に大別される。各方式の特徴について述べる。



3.1 インコヒーレント結合方式の特徴

インコヒーレント結合方式には単純結合方式と波長結合方式があり、単純結合方式は、目標点に複数のビームを集光する方式でシステムは最も単純で、集光性能が低い。波長結合方式は、異なる波長のレーザー光を光結合部品で同軸上に重ねるため、高い集光性能を得ることが可能であるが、光結合部品、光源の性能に限界があり、結合できるビームの本数には上限が生じる。

3.2 コヒーレント結合方式の特徴

CBC方式は、集光点での各レーザー光の位相をそろえることで、集光中心部のエネルギー密度が高まり、ピークパワーを結合ビーム本数倍（N本のレーザー光を結合する場合、理論上は位相をそろえていない場合と比較してN倍になる）にすることが可能な方式である。これによって、他方式より早い目標の溶融又は破壊が期待できる。また、他方式ではレーザー光が集光点に伝搬する過程で大気の影響を受けて、集光性能が劣化してしまうが、各ビームの光位相を大気の影響を加味して適切に制御することで、その環境に合わせた伝搬ビームプロファイルを形成でき、大気影響によるビームの拡散を抑制する効果が期待できる。一方、他方式に比べて、システム自体が複雑・大型化しやすいため、小型化技術がHELシステム搭載上の重要な開発要素になる。

4. 当社でのCBC技術の開発

HELシステムの実現に向けた社内の開発取組み状況について述べる。

4.1 CBCの基本原理実証

CBCの基本原理実証のため、図3に示す構成の実証系を構築した。図3(a)は、CBCの機能ブロック図であり、基準光源と基準光源を分割する光分配器、分割したレーザー光の位相を制御する光位相制御器、レーザー光の出力増幅のため

の光増幅器、ビーム結合後の位相を検出する光検出器と光位相制御器へフィードバックをかける制御部で構成している。レーザー光の位相は、参照光を重畳したレーザー光を光検出器で検出し、その光ビート信号から位相を検波する光ヘテロダイン干渉法によって測定される。図3(b)に示すとおり、図3(a)の青破線枠内は空間光学系で構成しており、その他の部分は光ファイバーによってレーザー光を伝送する。

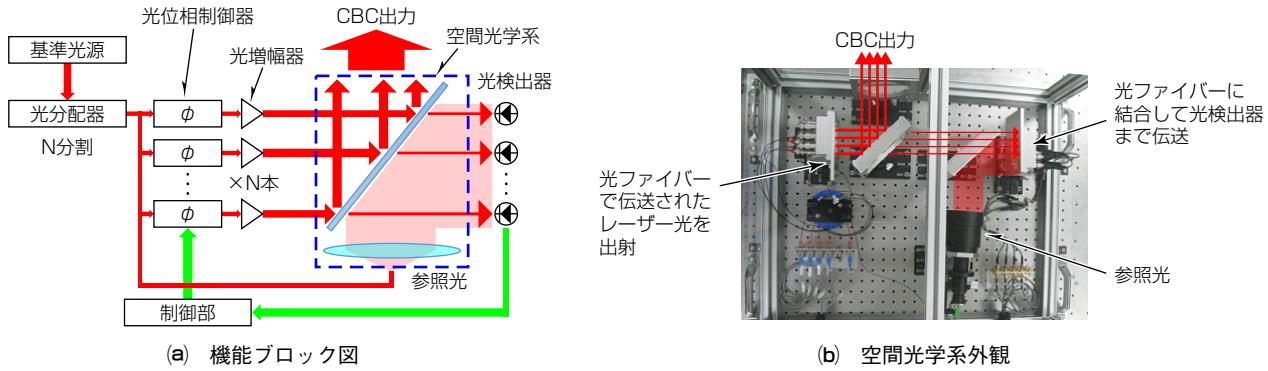


図3-CBC基本原理実証系

図4に四つのビームをビーム結合した結果を示す。図4(b)に示すとおり、位相制御によって中心にパワーが集中し、ピークパワーが向上(ピーク強度比3.1倍)していることを確認し、CBCの基本原理を実証できた。

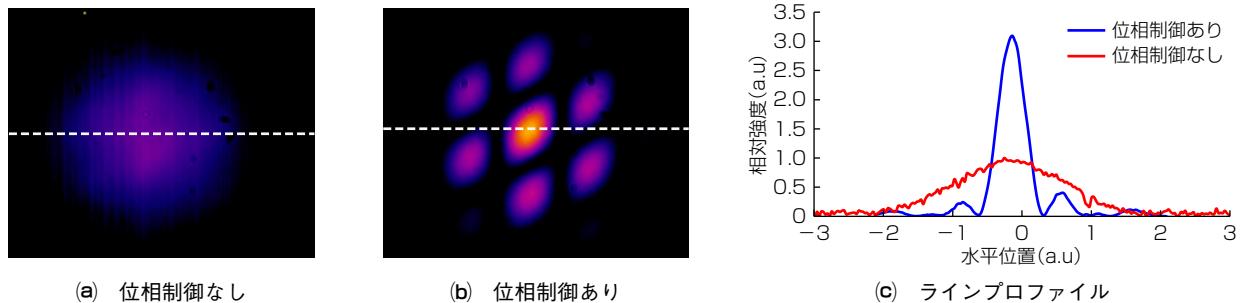


図4-CBC基本原理実証結果

4.2 CBC方式の小型化に向けた検討

4.1節で示した構成の場合、ビーム数と同数の光検出器が必要になり、ビーム数の増加に比例してシステム規模が拡大する。この課題を解決するため、単一光検出器で複数ビームの位相検出が可能なマルチディザリング同期方式⁽²⁾を検討した。マルチディザリング同期方式は、光位相制御器で各レーザー光に周波数の異なる微弱なディザリング信号を付加することで、単一の光検出器でまとめて検知した信号を信号処理によって周波数分離し、各レーザー光の位相情報を識別を可能にする方式である。同時に検出できるビームの本数は光位相制御器と光検出器の性能によって決定される⁽³⁾。

マルチディザリング方式によるCBCの機能ブロック図と実証器材を図5に示す。この構成では、光ヘテロダイン検波に用いる参照光は1ビームだけに重畳し、検出器上で他ビームと合わせて検出することで、システムを単純化している。

図6に、四つのビームをビーム結合した結果を示す。図3の構成と同様に、位相制御によって中心にパワーが集中し、ピークパワーが向上(ピーク強度比2.9倍)しており、マルチディザリング方式によるCBCの実現性を確認できた。

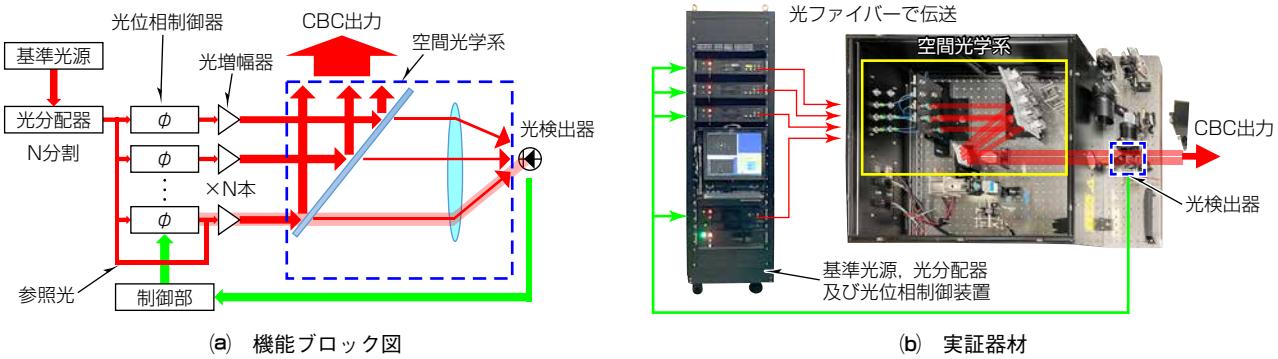


図5-マルチディザリング方式でのCBC実証系

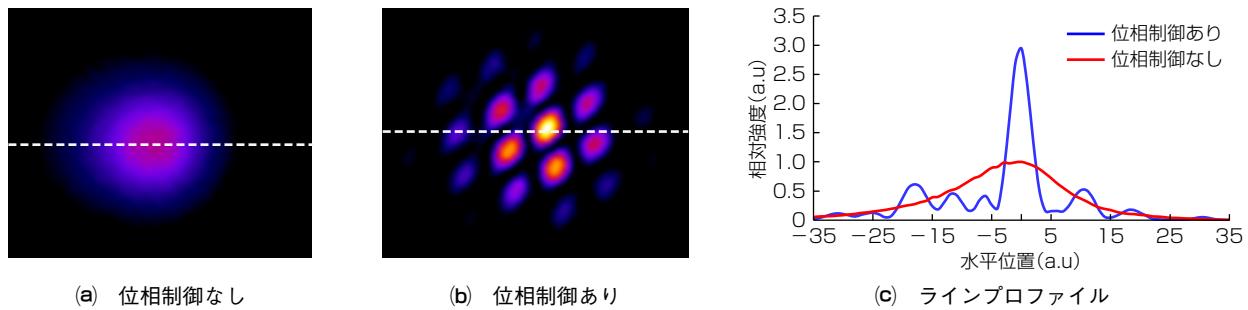


図6-マルチディザリング方式でのCBC位同期結果

4.3 CBCの高出力化に向けた取組み

CBCを適用したHELで、目標に照射されるレーザーの出力は、各ビーム出力の総和になるが、各ビームの最大出力は光増幅器の特性によって決定される。光増幅器の最大出力は、誘導ブリルアン散乱(SBS : Stimulated Brillouin Scattering)という基準光源の光周波数が僅かにシフトした散乱光の発生によって制限され、基準光源の光周波数幅が狭いほど生じやすくなる。一方、位相同期には基準光源の光周波数幅が狭い方が有利であるため、基準光源に対して相反する要求になる。この課題の解決方法として、光周波数幅が狭い基準光を高速に変調することで、変調周期の中では光周波数幅が広い基準光が光増幅器に入力される方式が提案されている⁽⁴⁾⁽⁵⁾。

基準光源の変調によるSBS抑制効果の確認のため、光増幅特性の評価を行った。図7(a)に光出力パワーの設定値と測定値の関係を示す。変調がない場合に見られた光出力の飽和傾向が、基準光源の変調によって解消されていることが確認できる。図7(b)に光周波数シフト量測定結果を示す。変調なしの場合、SBSに由来した光周波数のシフト成分が観測されるが、変調時にはこの成分が観測されずSBSの発生が抑制されていることが分かる。

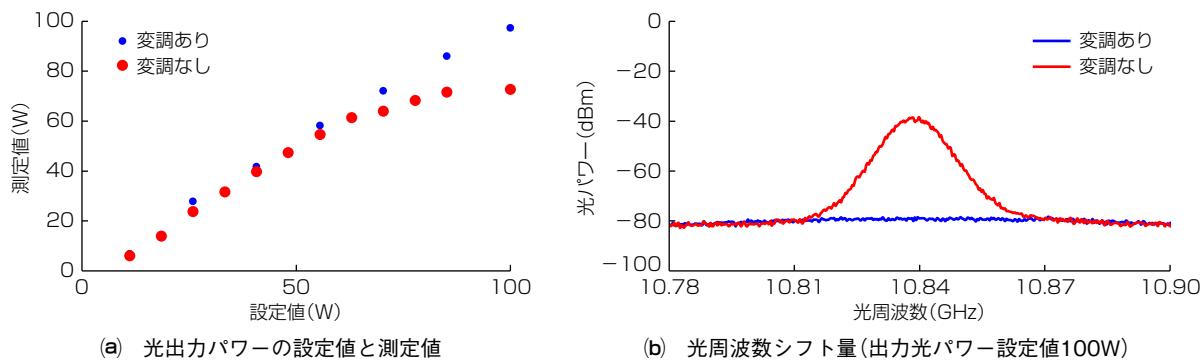


図7-基準光源変調有無での光増幅特性の評価結果

CBCの高出力化実現に向けては、先に述べたように基準光源の光周波数幅を変調することで光増幅器の出力制約を緩和させながら、同時にCBCを成立させる必要があり、2024年度末を目途にこの課題の解決に向けた検討を進めていく。

5. む す び

HELシステムのキー技術の一つとして着目されるCBC方式について、次のとおり開発成果を述べた。HELシステムの装備化実現を目指して、今回の成果を更に発展させ、日本の安全保障に貢献していく。

- (1) 開発成果1：CBCの基本原理実証
- (2) 開発成果2：CBCの構成小型化実証
- (3) 開発成果3：出力向上に向けた基準光源の変調によるSBS抑圧の取組み

参 考 文 献

- (1) 防衛省：令和5年版防衛白書、165 (2023)
https://www.mod.go.jp/j/press/wp/wp2023/w2023_00.html
- (2) Thomas, M. S. : Theory of electronically phased coherent beam combination without a reference beam, Optics Express, **14**, No.25, 12188~12195 (2006)
- (3) 原口英介, ほか : Simultaneous detection of beam pointing and optical phase errors for multiple beams using a quadrant photo detector for high-efficiency coherent beam combining systems, Applied Physics Express, **12**, No.10, 102012 (2019)
- (4) 原口英介, ほか : 広帯域な位相変調による誘導ブリルアン散乱抑圧に関する検討, レーザー学会第525回研究会“ファイバレーザー技術”, 1 (2018)
- (5) J. O. White, et al. : Suppression of stimulated Brillouin scattering in optical fibers using a linearly chirped diode laser, Optics Express, **20**, No.14, 15872~15881 (2012)

