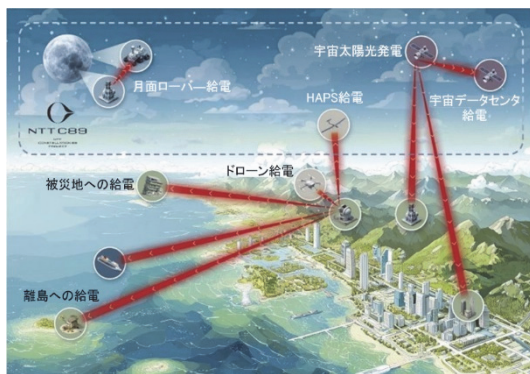


屋外 1km 以上先へ安定送電する レーザ無線給電システムの開発

Development of a Laser Wireless Power Transmission System
Achieving Stable Power Delivery Beyond 1 km in Outdoor Environments



太田 早紀*¹
Saki Ota

竹内 良昭*²
Yoshiaki Takeuchi

山口 賢剛*³
Kengo Yamaguchi

万戸 雄輝*⁴
Yuki Mando

神原 信幸*³
Nobuyuki Kamihara

レーザを用いた光エネルギー伝送は、離れた場所に指向性良くエネルギーを供給できる方法である。しかし、一般に地表面に近いほど大気ゆらぎ（擾乱）の影響を強く受けてレーザビームがゆらぐことから、特に日中の大気擾乱が大きい場所では伝送効率が低下する。これに対し、受光側で拡散透過型ガラスを用いたホモジナイザによる照度均一化、反射板による光の閉じ込め、平準化電気回路の適用等の対策を実施した。この結果、大気擾乱の影響を低減することができ、1kW の近赤外レーザを用いて屋外 1km 先への 150W 伝送を実証した⁽¹⁾。

1. はじめに

無線送電は、物理的なケーブルを介さずに遠隔地にエネルギーを届ける技術として注目されている。特にレーザによってエネルギーを遠方に伝送し、太陽光発電 (Photovoltaic 以下、PV) パネルなどの光電変換素子により電気エネルギーとするレーザ無線給電は、指向性に優れるほか、マイクロ波による無線給電と比べて装置の小型化が可能であり、電磁波干渉がないなどの利点がある。図 1 にレーザ無線給電システムの模式図を示す。レーザを制御し出射する送光側と、遠方でレーザを受け電気へ変換する受光側から構成される。送光側と受光側の間には物理的なケーブルの敷設が不要なため、被災地や離島での利用、ドローン等の移動体への給電、さらには宇宙への応用が期待されている。これらの応用を実現するためには、遠方へ高効率にエネルギーを送る必要がある。

三菱重工業株式会社(以下、当社)は、NTT 株式会社(以下、NTT)と共同で、レーザ無線給電の研究開発を実施している。前述のとおり、レーザ無線給電には多くの利点があるものの、地表面に近い使用環境では大気擾乱の影響を受け、陽炎のようにレーザビームがゆらぐため、伝送効率が低下する課題がある。

PV セル単体の出力電圧は通常 1V 以下であり、実際に使用する際には PV パネル内で複数枚のセルを直列接続して電圧をあげている。そのため照度分布が不均一な場合、直列接続されている PV セルの中で照度が低く、出力電流が最も低いセルに全体の電流が制限され、PV パネルとしての変換効率が大きく低下する。そのため、PV セルに対してできるだけ均一な照度分布でレーザを照射することが求められる。

共同研究では、主にレーザの送光側を NTT、受光側を当社が担当し、大気擾乱対策を実施した。送光側では透過型の回折光学素子 (Diffractive Optical Element 以下、DOE) を用いて、ビームを均一に整形している。受光側ではホモジナイザと平準化回路を適用することで、送光側だけ

*1 総合研究所 電子・物理研究部

*2 総合研究所 電子・物理研究部 博士(理学)

*3 総合研究所 電子・物理研究部 主席研究員

*4 総合研究所 電子・物理研究部 博士(工学)

では対処しきれない、大気擾乱により乱れたビームの照度分布を均一にしている。本報では、主に受光側の擾乱対策とその結果について述べる。

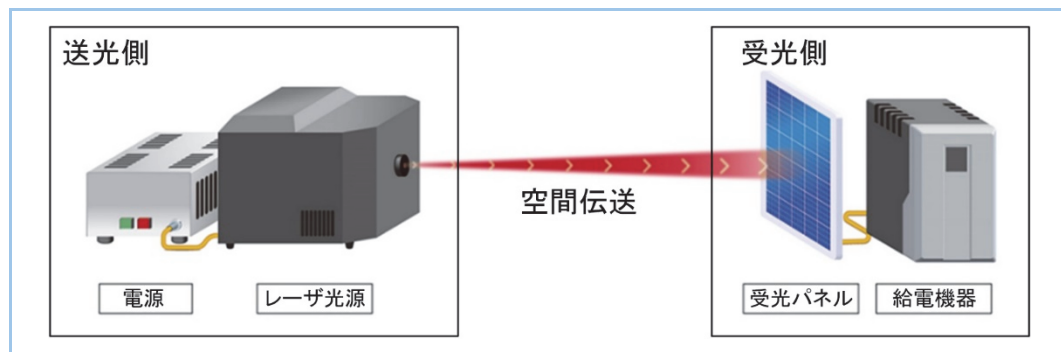


図1 レーザ無線給電システムの模式図

2. 試験セットアップ

2.1 システムの全体概要

和歌山県西牟婁郡白浜町にある南紀白浜空港の旧滑走路において、地上約1mの高さからレーザーを水平方向に照射し、1km離れた場所へのレーザー無線給電実験を行った。試験時の写真を図2に示す。実験には出力1kW、波長1070nmのシングルモードファイバーレーザーを用いた。送光側に設置したDOEは、1km伝搬後にレーザーが均一な照度分布に整形されるよう設計されている。また、受光パネルに正確に照射するため、方向制御ミラーでビームの方向を調整している。送光側から出射され、大気中を1km伝播したレーザーは、受光部においてホモジナイザを通過後、PVパネルに入射して電気出力として取り出される。

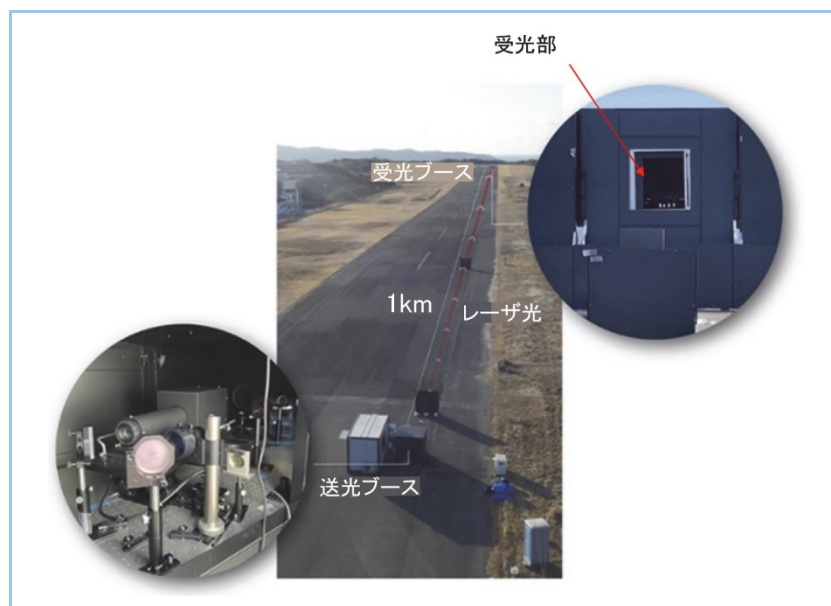


図2 1km レーザ無線給電試験時の様子

2.2 受光部の概要

受光部の概略図を図3に示す。受光部は主にホモジナイザ、反射板、PVパネルから構成される。レーザーが1kmの自由空間を伝搬する間に大気擾乱の影響を受け、受光部に到達するビームの照度が不均一となり、伝送効率低下の原因となる。これに対してホモジナイザを用いることで光を拡散し、PVパネルに入射する光の照度を均一化する。また、拡散した光が外部に逃げないように、周囲を反射板で囲み、光を閉じ込める構造としている。ホモジナイザにはフロスト型拡散ガラスを用いた。ホモジナイザとPVパネル間の距離は、光学解析ソフトAnsys Zemax OpticStudioによるシミュレーションをもとに設定している。

PV パネルは 600mm 角のサイズで、太陽光発電用に市販されている安価な PERC 型結晶シリコン PV セルを光電素子とした 100mm 角のユニットセル 36 枚で構成している。ユニットセルは、想定受光強度を考慮して PV セルの接続方法を変えた Type-A、Type-B の 2 種類を使用した。比較的照度が強くなると想定される中央部には、出力電流を抑えるために Type-A を 16 枚配置し、その周囲には Type-B を 20 枚配置している。Type-A は 4 枚の 40mm 角の PV セルを 2×2 に配置した上で直列に接続しており、Type-B は 80mm 角の PV セル 1 枚で構成されている。Type-A、Type-B のいずれも PV セルの周囲 10mm は配線スペースとしている。配線スペースの前面には反射板を設置し、この部分に照射されるレーザーが PV セルに入射する構造としている。

Type-A、Type-B それぞれを複数枚直列に接続し、出力を測定した。この際、どのセルを接続するかは事前のシミュレーションにより決定した。また、大気擾乱により照度分布が時間的に変動し、それに伴い PV セルの出力も変動する。これを緩和するため、コンデンサをベースとした平準化回路を各ユニットセルに並列に接続できる構造としている。平準化回路は、等価回路モデルを用いた SPICE 解析により決定した。

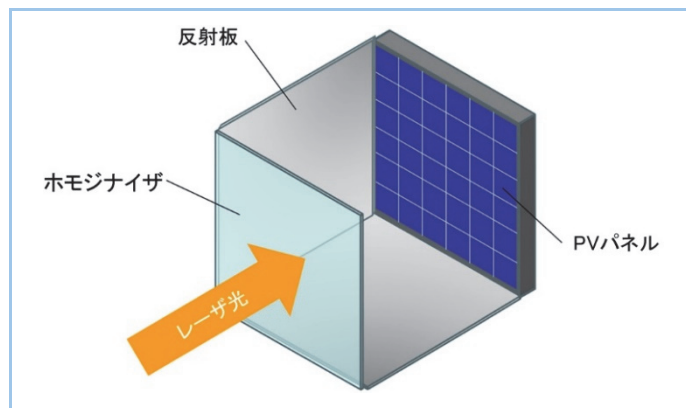


図3 受光部の概略図

3. 試験結果

DOEで整形した1kWのレーザーを1km先のPVパネルに照射したときの出力電力を、大気擾乱の大きさに対してプロットした結果を図4に示す。ここでは最も出力が大きくなった、擾乱が小さい状態で、大気擾乱対策としてホモジナイザと平準化回路の両方を適用した際の値を1とした。大気擾乱の大きさは大気構造定数 $C_n^2[m^{-2/3}]$ で表され、気温や日射量、風速等により変動する。大気擾乱は制御できないため、擾乱が大きいデータは日中に、擾乱が小さいデータは主に日没後に計測した結果を、数日分まとめてグラフにプロットしている。

図4より、受光側で擾乱対策を行わない場合は、大気擾乱が大きいほど出力が低下することがわかる。擾乱対策として平準化回路のみを適用した場合は、対策なしに比べて出力は向上したものの、擾乱が大きくなるに従い出力が低下する傾向は抑制できなかった。一方、ホモジナイザと平準化回路を共に適用した場合は、大気擾乱の大きさに関わらず出力はほぼ一定となった。図5にホモジナイザと平準化回路を適用した際のPVパネルの出力の時間変動を示す。図4で大気擾乱が最も大きいデータに対応する。今回の試験では60秒間の平均値で150W、効率15%での安定した給電を実現できた。

PVセルの配置や直列接続の組み合わせによって効果は変化すると考えられるが、PVパネル内のセルの直列接続に起因する大気擾乱の影響を、受光側のホモジナイザと平準化回路で削減できることを実証した。本試験で達成した伝送効率15%は、大気擾乱が大きい環境下でシリコン製の光電変換素子を用いた光無線給電として、世界最高効率である。

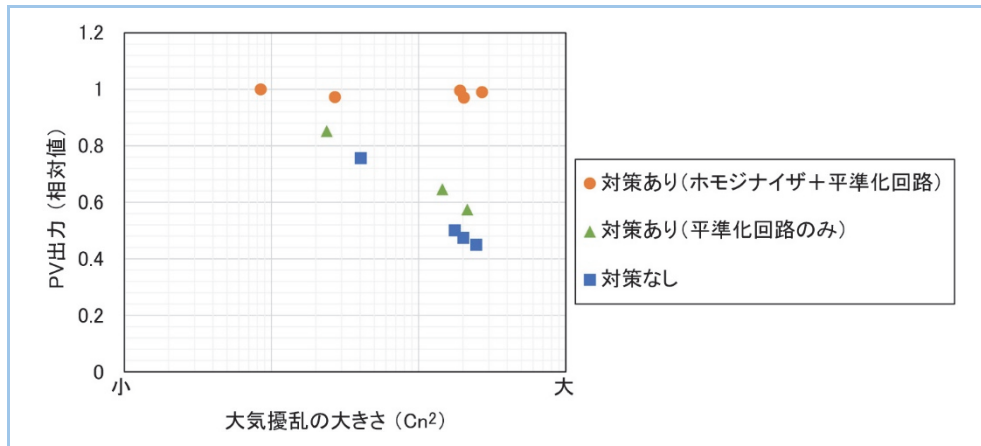


図4 大気擾乱の大きさに対する PV 出力

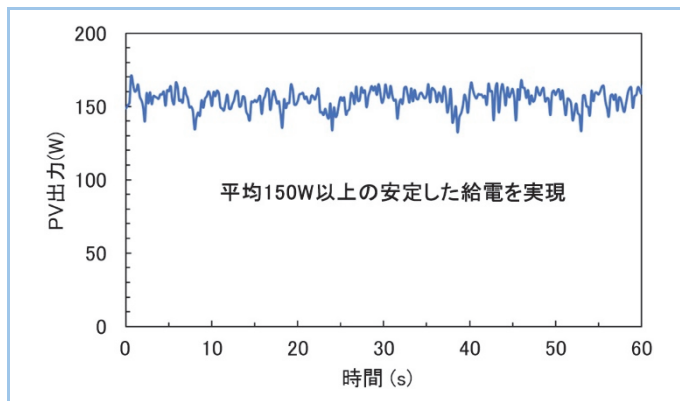


図5 PV 出力の時間変動

4. 今後の展開

本技術は、大気のゆらぎがある環境においても、高効率かつ安定して長距離エネルギー伝送が実現可能である。今回の試験では市販のシリコン製 PV セルを使用した。レーザーの波長に合わせて設計した光電変換素子を用いることでより高効率な給電が見込まれる。また、より高強度のレーザー光源を用いることで、大電力の供給も可能である。

本技術により、従来は電力ケーブルの敷設が困難だった離島や被災地などの遠隔地にも、柔軟かつ迅速な電力供給が可能となる。これらの地上でのアプリケーションのほかにも、本技術をベースとしたさまざまな応用が考えられる。特に、レーザーは指向性が高く広がり小さいことから、受光装置を小型・軽量化に設計することが可能である。これは、重量や搭載スペースに厳しい制約がある移動体にとって、大きなメリットとなる。例えば、本技術にレーザーの方向を制御する技術を組み合わせることで、飛行中のドローンへの給電が可能となる。無線給電によって、バッテリー交換のための着陸や有線での常時給電といった運用上の制約を回避し、長時間・長距離の連続運用が可能となる。これにより、災害発生時の被災地モニタリングや山間部・海上における広域通信の中継など、従来困難であった常時モニタリングや通信カバレッジの向上が期待される。

5. まとめ

本報では、遠隔地への革新的な電力供給手法として注目されているレーザー無線給電における、世界最高効率での実証試験の受光側の工夫について紹介した。ホモジナイザによる均一化、光閉じ込め構造、平準化回路などの適用により、市販の安価な PV パネルを用いたにもかかわらず、水平距離 1km、送光パワー 1kW の屋外レーザー無線給電試験で、150W の受電発電量を実証した。今後は、実用化に向けてさらなる小型軽量化・高効率化を進めるとともに、レーザーの安全対策についても検討していく。

最後に、本報で使用したデータは、NTT との共同試験により取得いたしました。ここに謝意を表します。

参考文献

- (1) Natsuha, O. et al., Demonstration of 15% Efficient Optical Wireless Power Transmission Over 1 km With Atmospheric Turbulence, Electronics Letters, Volume 61, Issue 1 (2025)