

まもなく離陸する光無線給電 —小型端末、移動体から宇宙応用まで—

東京工業大学 科学技術創成研究院 未来産業技術研究所
准教授 宮本 智之

1. はじめに

微小なセンサー等から大型の移動機器などまで、社会では様々な端末・機器が利用されている。これら機器では、そこに利用する通信の無線化がほぼ完了し、その無線化を起点に多様な応用やサービスなどが創出され、社会に大きなイノベーションをもたらしている。

一方、これら機器には電力が必要だが、これにはコンセントからの配線かバッテリーを利用している。配線では十分な電力量をいつでも利用できるが、移動などの機器の利用法を大きく制約している。バッテリーは利用時には無線であり、携帯端末から電気自動車、ドローンなどを実現している。バッテリーも充電時に配線接続するので、機器への給電には有線が必要である。利用可能な電力量の制約から稼働時間や機能を制約し、充電中の機器利用も制限されるなど課題が多い。技術進展により蓄電量の増加などが進んでいるものの、重量・体積・コスト・充電時間などの課題解決には非常に長い期間を要する。環境に存在する電波や振動、温度差などを利用するエネルギーハーベスティング（環境発電）も進展している。この方式は配線不要で永続的に機器を稼働できる優れた特徴をもつが、通常、非常に小さな電力しか利用できないため、適用機器を強く抑制する。

以上のように、これまでの給電には様々な方式があるものの課題が多い。そこで無線給電への期待が高まっている。図1のように無線給電は配線が不要で接続の負荷もなく、また常時に十分な電力量を給電可能である。このため無線給電は単に配線を置き換えるのではなく、新しい給電の仕組みの提供により、新しい応用やサービスなどの創出、つまりイノベーションのカギになるといえる。

本稿では、この無線給電方式として、新たな方式といえる光ビームを用いる光無線給電方式¹⁻³⁾について、その技術の原理、特徴、課題、また、著者らの取り組みを含めて最新の動向を解説する。

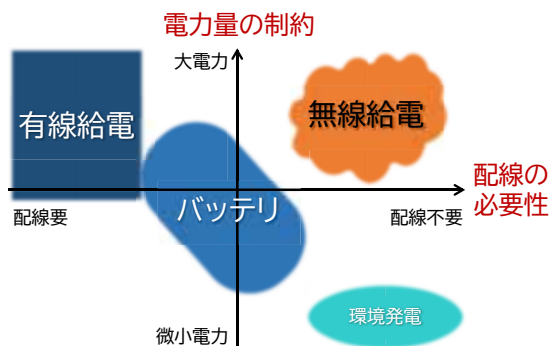


図1 各種の給電方式の位置づけ

2. 光無線給電の基本的特徴

2.1 従来の無線給電方式

無線給電としては電磁誘導方式がよく知られており、例えば標準規格のQi方式は携帯端末などに広く実用されている。電磁誘導はトランスに相当するが電界を用いるコンデンサに相当する方式もある。これらは高い給電効率を簡素に実用化できるが、数cm以下のごく近接の給電に制約されるため、結合方式やコネクタレス方式といわれる。なお、これら方式に共鳴（共振）特性を適用して給電距離を10倍ほどまで拡大する方式が2007年に発明され、無線給電への注目の起点といわれている⁴⁾。ただし、それでも数mといった距離には対応ができない。より長距離に給電可能な方式として、マイクロ波ビームを用いる放射方式がある。マイクロ波は遠方まで伝搬するが、波長の長さから小型アンテナではビームの広がりである回折が大きいため、効率的な利用範囲は10mほどまでといえる。なお、これらの既存の無線給電方式では交流・高周波を利用することから、周辺の機器などへの電磁ノイズ干渉（EMI）の懸念があり、応用が

強く制限されている。このため、マイクロ波方式は技術的には高度な仕組みが開発されているが、数年前より海外で認可が下りはじめ、国内では2020年に答申が行われて、ごく小電力からの利用が始まる段階である⁵⁾。

2.2 光線給電方式

このように無線給電方式は様々にあるが課題や制約が多い。そこで光無線給電（optical wireless power transmission：OWPT）が魅力的である¹⁻³⁾。光ビームを利用する本方式は電磁波を用いる放射方式の一つだが、光はマイクロ波より5桁以上短い波長のため回折が小さく、小型でも高効率に長距離給電が可能といえる。また、光源デバイスや受光デバイスは直流動作であり、数100THzという光の高い周波数も機器へのノイズとならないため、EMIが発生しない。これらの特徴から多くの機器を無線給電化できるといえ、新しい機器や新しい応用を広げる基盤になる方式と考えられる。表1に各種の給電方式の特徴をまとめた。

表1 各種の給電方式の比較（著者の私見）

給電方式		設置負荷	遠隔動作	移動対応	電力量	効率	電磁ノイズ	サイズ重量
有線		×	○	×	◎	◎	○	△
バッテリー		△	○	◎	△	○	○	×
環境発電		◎	◎	○	×	△	◎	△
無線	電磁誘導、電界方式	○	×	△	◎	◎	×	○
	電界・磁界共鳴方式	○	△	△	◎	◎	×	○
	マイクロ波	◎	○	◎	○	△	×	○
	光	◎	◎	◎	○	○	◎	◎

3. 光無線給電は新しい方式か？

光無線給電はレーザーなどのビーム光源と光電変換デバイスを利用する。光電変換デバイスはその原理やデバイスがいわゆる太陽電池であるため、本稿では太陽電池と呼ぶ。両デバイスは1950-60年代に発明されており、これを受けて1970年ころには光無線給電のコンセプトが提示されている^{6) 7)}。つまり、この方式は決して最近に提案されたものではない。

一方で本方式に関わる研究開発の取り組みはこれまで多くない。図2に関連キーワード

に基づく本分野の文献数の推移を示す。この分野はデバイスからシステム・応用まで広く関わるが、2010年代前半まで10～30件/年程度の文献数であった。同様な調査で「無線給電」は直近で6千件/年、「環境発電」や「IoT」は2万件/年であり、「光無線給電」はこれらの1/100や1/1000のごく少数の取組であった。なお、光無線給電も最近数年で100件/年を超え始めており、先の他の分野も100件/年を超えてから5～10年間で10倍以上に文献数が増加していることから、光無線給電も研究開発の活性化のしきい値に達したと考えている。

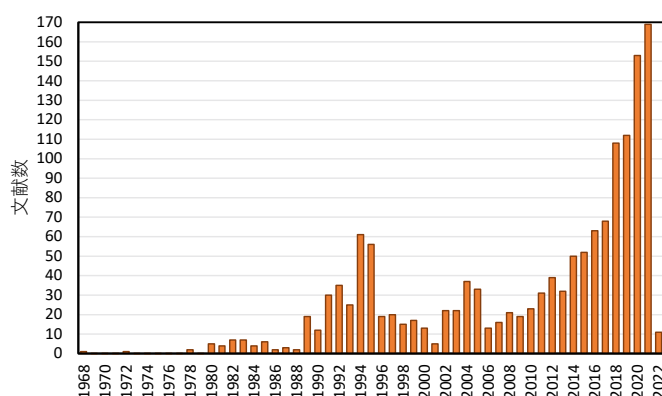


図2 光無線給電の文献数推移

4. 光無線給電の応用範囲概要

光無線給電はどのような機器や応用に利用できるのだろうか。光源の光出力として準備可能なmWからkWの電力範囲が、また、ビーム光が到達可能なcmからkmの距離範囲が応用範囲といえる。つまり、微小なセンサー端末から持ち歩く携帯端末、ドローンのように自由に動き回る機器はもちろん、通常は固定して利用してきた機器はもちろん、テーブルや棚など現時点で電気を利用していない機器などへも、高度な機能や移動の機能を付与できるポテンシャルがある。光無線給電にも後述のように課題はあるが、すべての機器が応用の対象といえる。無線という給電方式の

革新による多様なイノベーションを期待できる。

図3に応用分野をグループ分けした。IoTセンサー端末のようなmWやW以下の超小型機器、スマートフォンのような携帯端末やコンピュータなどの情報端末、また玩具などの数10W程度までの機器、さらに数10WからkW程度までを利用する民生機器を含む中・大型の機器、および電気自動車（EV）、ロボットなどの移動体（モビリティ）への応用も期待される。これらへの適用が進むと、機器への給電配線がなくなり、充電作業も必要なくなるので、機器が電力を利用しているという意識さえ消え去るかもしれない。なお、多く

は機器への給電を想定するが、機器内の特に回転機構や移動機構など、配線に課題がある機器応用も期待される⁸⁾。

これらの応用範囲は既存の無線給電方式でも検討されている。機器の多くはどこかに設置したり、移動体も床上や路面上を移動するものが多い。この場合はごく短距離の既存の無線給電も利用できるが、必要な給電側の設備の数から光無線給電が有利といえる。また、空中を移動するドローンや水中を移動する水中ドローンなどの移動体は3次元的に移動する。宇宙空間なども類似である。これらはその移動の自由度から遠隔の無線給電が必須であり、光無線給電がもっとも有効な方式と考えられている⁹⁾。

機器への応用以外に、いわゆる給電インフラ自身への利用も期待できる。光無線給電の効率から常用のインフラへの適用は制約されると考えるが、災害時のなどの一時的な電力不足の解消のための送電などに有効と考える。また宇宙では重量物となる配線の輸送も制約されるため、機器内、機器間や基地間などの地上であれば配線を用いる場合に光無線給電が利用可能と考えられる。さらに、いわゆる宇宙太陽光発電における地上への給電にも利用が検討されている¹⁰⁾。



図3 光無線給電の応用範囲

5. 光無線給電のシステム構成と機能要素

5.1 システムの概要

本節では、光無線給電のシステムの概要とこれを構成する機能要素について概説する。

光無線給電はビーム光源と太陽電池を基本とするが、実際のシステムには図4のように様々な機能要素が必要である。給電対象機器の検知・追跡、対象機器の方向に光ビームを向けるビーム走査、効率的な光の照射のための光ビームの形状などの制御、また、機器側の給電量把握や給電状態の制御のための通信などが、多くの光無線給電システムに必要と考えている。さらに、光ビームの不適切な照射を避ける安全技術、複数の光源や複数の端末を連携させる高機能化技術などもシステム構成として必要である。

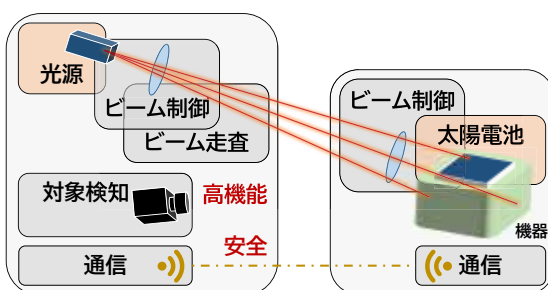


図4 光無線給電のシステム構成

なお、実際のシステム構成や必要な機能要素は応用により大きく異なる。固定した光源から固定した機器へ、固定した光源から移動する機器へ、移動する光源から固定した機器へ、移動する光源から移動する機器へなど、多様な組み合わせが想定される。電力量や給電距離、移動速度なども応用により大きく異なり、それぞれの応用により、どのような仕組みや構成がどのような特性で必要となるか、まさに検討が始まった段階と考えている。

一方で、利用する多様な機能要素は、身の

回りの機器や技術を見ればわかるように、そのほとんどは既存のデバイスや技術を転用することが可能といえる。つまり、光無線給電は実現性の高い技術方式といえる。

5.2 機能要素－光源

光無線給電において、大電力を利用するには高出力な光源が必要となる。幸いこの光出力は、レーザ照明やレーザ加工などの高出力光ビームの応用分野が広がっており、これを転用できる。1mm角ほどの微小な半導体レーザでも単一チップで数Wが得られ、そのアレイ型チップで数10W、多数のチップを組み合わせた高出力レーザ装置ではkWや数10kWが実用されている。つまり、後述の受電側の効率を考慮してもkWクラスの給電までは実現可能な状況である。実際に光無線給電の高出力の事例として、75W (JAXA)¹¹⁾ や400W (PowerLight Technology社)¹²⁾ などがある。

光ビームの長距離への伝送は光源出力と密接に関係する。レーザビームは概念的には非常に細いビームを長距離に伝搬できるイメージであるが、実際には光も回折現象のためビーム広がりがある。特に長距離の給電では、伝搬路損失がなくてもビーム広がりによりすべての光を受光できず、給電量や給電効率が大きく低下する要因となる。これは大型の受光装置を利用すれば解決可能だが、通常は機器に応じた受光サイズとなる。長距離伝送には狭いビーム広がり角が可能なシングルモードという高品質なビーム特性が必要となる。シングルモードビームをレンズにより直径10cm程度に拡大すれば、1kmの伝送でも数10cmのサイズに広がる程度である¹³⁾。ただし、単体の半導体レーザのシングルモード光出力は数W程度が上限となっている。複数のレーザを組み合わせると通常はシングルモードにならない。なお、ファイバレーザを用い

ればシステムサイズは大型だがkWを超えるシングルモード光出力が実用されている。また、宇宙太陽光発電などではシングルモードビームを光増幅して高出力化することが考えられている。いずれにせよ、光出力（給電量）と給電距離、システムの複雑性がトレードオフの関係にあり、応用に応じた構成が必要となる。なお、ビーム品質の悪いマルチモードでも数倍のビーム広がり角である。このため100m程度までの距離ではマルチモードでも十分小さな受電サイズが可能といえる。なお、実際の長距離のビーム伝搬では空気中の損失や擾乱などが伝送特性に大きく影響する。

給電効率に関する光源の電気光変換効率について、図5に各種の波長の半導体レーザとLEDの効率を示す。半導体レーザでは波長0.8-1.1 μm で75%近い効率が報告されており¹⁴⁾、将来的に80%超も期待される。現在の市販レベルでも広い波長範囲で40%超となっている。

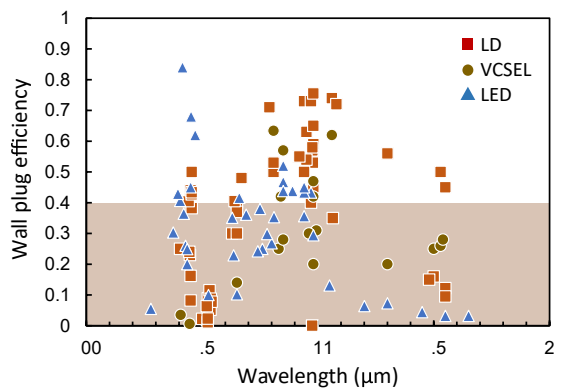


図5 半導体レーザとLEDの効率の報告値の例

長距離に有効なファイバレーザの効率は、半導体レーザ光により励起して新たにレーザ光を発生するため半導体レーザ自身より低下するが、30-50%程度も達成可能である。また、

近年LEDの効率は半導体レーザ並みになっている。太陽電池への照射ではLEDも単色光として扱え、光出力もチップ面積当たりでは半導体レーザと遜色ない。ただし、本質的に全方位に光出射するLEDはビーム特性のみがレーザに比べて光無線給電への応用上の課題となる。ただし、レーザの安全性に関する規制も考慮すると、LEDも比較的短距離向けでは重要な光源になると考えている。

5.3 機能要素－太陽電池

通常の太陽電池は、太陽光の照射では広いスペクトルのために20%程度の光電変換効率である。しかし、図6のように、太陽電池のバンドギャップ（吸収端）に近い波長の単色光を照射すると、2倍ほどの効率で動作が可能となる。さらに太陽電池は光強度密度を増加すると効率が増加する。このため太陽光の100倍近い強度の単色光で、Siを利用した単色向けの太陽電池で40%以上¹⁵⁾、また、GaAsを利用した単色向けの太陽電池で最大68.9%の効率が報告されている¹⁶⁾。なお、一般的な太陽電池は、太陽光スペクトルを前提に吸収端波長を近赤外（0.8-1.0 μm ）とするSiや

GaAsが利用されている。しかし、任意波長の単色光の照射を前提にすると、原理的にはより短波長を吸収端波長とする太陽電池の効率が高くなる。つまり青色や紫外用太陽電池（受光素子）が実現できると効率は最大80%超も期待されている。これまで短波長向け太陽電池の取組はほとんど行われていなかった、ごく最近に光無線給電向けに短波長用としてGaN系材料の検討が行われ、42.7%の効率が報告された¹⁷⁾。

なお、波長整合の必要性から太陽電池は光源と一体に高性能化が必要である。現時点では近赤外の光源と太陽電池の特性が最も優れる。短波長化は上述のように原理特性から今後の進展が強く求められる。一方、長波長の波長1.5 μm 帯は目に安全なアイセーフ帯で重要である。また光ビームによる給電は非可視のビームだけでなく、安全面から視認が可能な可視が有効という考えもある。このように様々な応用や状況により、様々な波長帯の光源と太陽電池の両方の高性能化が必要であろう。

太陽電池にはもう1つ考慮が必要な点がある。太陽電池の効率はそのモジュール構成と光ビームの照射パターンが大きく影響する。SiやGaAsの太陽電池は、単体セルの出力電圧が0.5-0.9 Vと低く電圧変換回路などの効率が高めにくいことから、複数セルを面的に並べて直列接続して出力電圧を高める。この場合、電流連続の考えから太陽電池モジュールに不均一強度のビームを照射すると、電力取出しの効率が大きく低下し、特に光照射のないセルがあると他のセルに高強度の光が照射されても電力が取り出せない。このため光ビームを太陽電池モジュール全体に均一強度で照射し、さらにモジュールからの光漏れがない照射が必要となる。これにはいくつかの

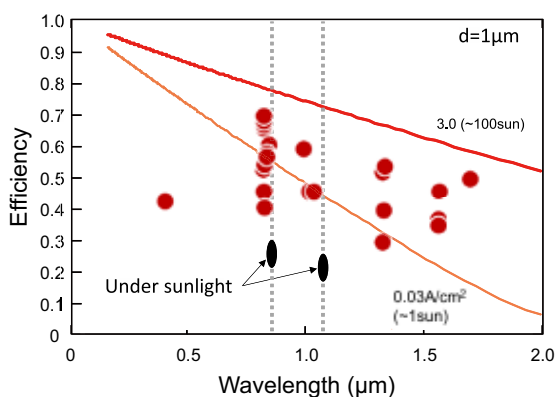


図6 単色光に適した吸収端をもつ太陽電池への単色光照射時の効率の理論曲線と報告値の例。楕円は太陽光照射の特性。

方策が検討されており、著者らはビーム照射の位置ずれ耐性などの特徴も得られるフライアイレンズ系の適用を提案している¹⁸⁾。フライアイレンズとはレンズアレイであり、図7のようなレンズのセットとして構成する。1つまたは複数のビームでも、フライアイレンズ系によるビームの空間分割とその重ね合わせという機能により、原理的には損失なく、照射ビーム位置にもよらず、矩形で高い均一性のビームが得られる。

なお、同一吸収層をもつ多接合型構造や¹⁹⁾、短波長用の太陽電池が実現されれば数V程度の出力電圧が得られるため直列接続が不要になる。これらの利用では、大きな太陽電池モジュールが必要な場合でも各セルを並列に接続すればよく、結果的に光ビームの均一照射が不要になる。このように太陽電池や光ビームは応用や適用デバイスにより構成が変わる。

太陽電池の代わりのデバイスの議論もある。特にフォトダイオード (PD) の利用も議論されるが、本質的には半導体pn接合なので太陽電池と同じである。太陽電池は電力効率、つまり出力電流と出力電圧の両方が重要

だが、PDは電流（量子）効率と応答速度のバランスをとった設計となっており、電力効率に最適化されていないことに注意が必要である。このほか光レクテナというマイクロ波無線給電で利用するデバイスに相当する仕組みも検討されているが²⁰⁾、光周波数の高さから効率を議論する段階に至っていない。

5.4 光無線給電の給電効率

給電効率は光無線給電の重要な性能指標である。入力電力から出力電力の本来の給電効率のほか、光出力から出力電力、伝搬路損失を除いた考えなど、全体の構成により様々な効率が議論されるが、光源効率と太陽電池効率の積が本来の給電効率の上限になる。現状の市販デバイスとして各効率40%を仮定すると給電効率は16%となる。実際には光学系や伝搬損失、ビーム受光効率などにより給電効率は数～数10%ほど低下する。このため実験レベルの評価では10%前後の効率になる。100%近い有線や90%以上も可能な電磁誘導に比べると効率は非常に低く、光無線給電の重要な課題といえる。ただし、無線であること、回折が小さく短距離から長距離まで小型でも効率変化が少ないなどの特徴があり、

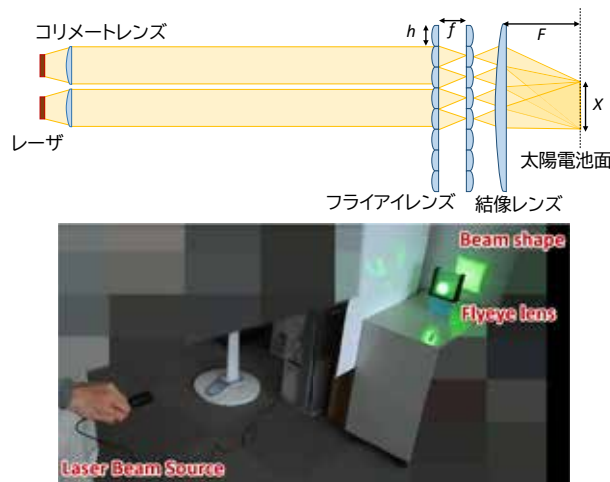


図7 フライアイレンズ系による矩形均一強度ビームの生成原理（上）と動作デモ例（下）。

これらの機能性に注目することが重要であろう。

現時点の構成では上記程度の給電効率となるが、報告されている両デバイスの最高効率は半導体レーザーは75%を超え、太陽電池も70%近い。これらを利用すれば給電効率の上限は50%を超える。さらに将来的にそれぞれが80%になれば給電効率64%が期待される。これらの将来的な効率も電磁誘導に比べれば決して高いとは言えないが、多くの応用が可能であろう。このような高効率に向けた光源や太陽電池、光学系などの改善が重要である。

5.5 このほかの機能要素

すでに述べたように、光源と太陽電池以外にも、機器の位置・距離・回転などに応じてビーム形状・ビームサイズ・ビームの焦点位置などを制御するビーム形状制御、また、ビームの方向走査など、光学系に関わる機能が必要である。ただし、これらも基本的には既存の光学系技術を活用できると考えている。

また、ビーム走査には給電対象の検知・認識・追跡といった機能も必要である。カメラ画像や3Dカメラのように距離情報も得られる様々な方式が光無線給電向けに検討されている²¹⁻²⁴⁾。また、これに組み合わせる画像認識に深層学習なども適用されているが、これらは近年非常に低コストに実現可能なため、光無線給電への注目の1つの側面ともいえる。なお、長距離への給電や高速移動する機器への給電を考えると、対象認識技術とビーム走査には非常に高い精度や高速な動作が求められる。すでに述べたように、これらの機能要素の多くは既存技術を適用できるが光無線給電向けに最適化や特化した技術の研究開発が重要である。

なお、対象認識技術などは光ビームの人や対象以外の物体への不要な照射を抑制する安

全技術などにも活用することになる²⁵⁾。画像認識技術や深層学習などを活用することで高度かつ高精度な安全システムが可能になると考えているが、やはり光無線給電の特徴や利用条件に応じた最適化などが重要である。

6. 光無線給電システムの最新動向と応用事例

これまでに述べたように光無線給電は多様な応用に適用可能である。基盤技術として要素技術や基本的なシステムの研究開発が進められる一方で、具体的な応用に向けた研究開発も進められている。ここでは後者の視点から事例を紹介する。

6.1 体内埋込端末

体内埋込機器は配線による充電が困難なため光無線給電が検討されている。心臓のペースメーカー向けを想定した仮想皮膚下に設置した太陽電池への充電や²⁶⁾、光神経刺激用に最終的に脳に埋め込むことを想定した1mm角ほどの微小チップへの光による無線給電²⁷⁾などが報告されている。このほかにも細胞温度センサー²⁸⁾などの極微小デバイスへの給電として検討されている。

6.2 IoT小型端末

数cm角ほどが想定されるセンサー、タグ、ビーコンといった小型IoT端末は、IoTのコンセプトからも膨大な端末数の設置が期待される。この場合、配線やコネクタ接続によるバッテリーの充電は大きな導入の負荷になる。光無線給電により遠隔から充電が可能になれば作業負荷が抑制される。著者らは固定設置された走査型光源から複数端末に順次光無線給電する構成や²⁹⁾、図8のように作業者やロボット、ドローンなどに搭載した懐中電灯のような光源から遠隔に充電する構成について検討している³⁰⁾。これらは現時点で利用が望まれ

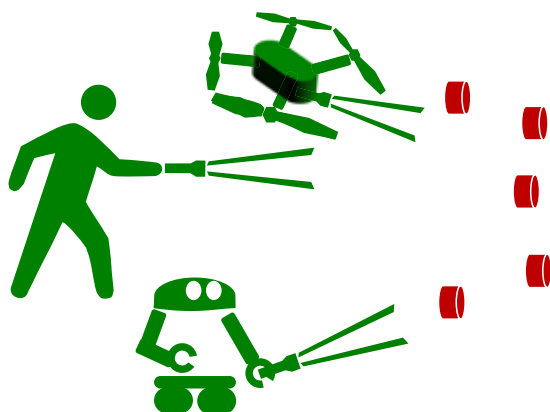


図8 IoT端末の手持ち型光源による遠隔充電のイメージ

ことも踏まえ、安全面で有利なLEDを光源システムとして検討を進めており、図9のように手持ちサイズ用の構成ではLED光源により1mの距離で5cm角の太陽電池から500mW以上の電力が達成可能とした³¹⁾。これは真夏の太陽光による太陽電池出力と同等以上に相当する。

6.3 情報端末、家電製品

情報端末や家電製品への無線給電はその高い需要から実現が望まれる。仕組みとしてはIoT端末向けと類似といえるが、機器の種類が多く、機器の位置も頻繁に移動するなど、給電の仕組みとしてはより多様な対応が必要である。

また、人などへの不適切な照射の抑制といった安全面への対応だけでなく、光無線給電の課題の一つといえる対象以外の物体による光ビームの遮蔽への対策も必要になる。すでに述べた高度なセンシングや複数光源の連携制御などが必要になると考えている。著者らは図9のように光源のそれぞれに3Dカメラを搭載し、対象までの距離などにより光源を選択して給電を制御する方式を検討している³²⁾。

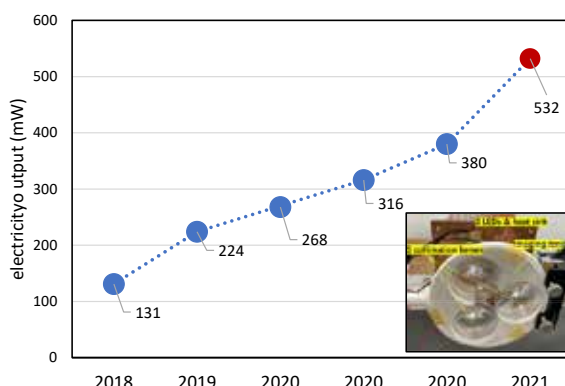


図9 IoT端末のLED利用の手持ち型光源による出力電力の改善

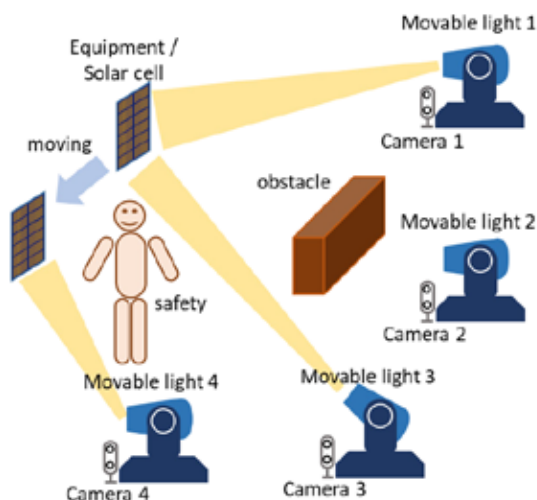


図10 複数光源の連携による光無線給電の高度化

このほかに数W程度までの情報端末や玩具などに向けた光無線給電が、イスラエルのベンチャー企業のWi-Charge社より製品レベルで開発されている³³⁾。また、米国ベンチャーのPHION Technologies社は三菱地所と提携してビル内の端末への光無線給電の実証試験を行うことを発表した³⁴⁾。すでに述べた多様な機能を、安全面なども含めて高度に実現するには課題も多いと考えられるが、具体的な実用化の取り組み開始され始めた。

なお、給電という機能に加え、特に民生用途では機器に搭載した黒色の太陽電池が意匠の点で課題になると考えられる。著者らは、光無線給電が単色光を利用することから、給電用の波長のみを透過して、他の波長帯を色などの意匠制御に利用することを提案し、波長フィルタや散乱光制御について検討している³⁵⁾。

6.4 地上走行機器への走行中給電

より大電力の機器となるモビリティへの光無線給電が有望である。モビリティはバッテリー搭載やその充電が課題だが、移動中給電によりこの課題を根本的に解決できる。ただし、光無線給電による移動中給電の事例はまだ少なく、その多くは基本動作の確認程度の段階である。次節で飛行中給電について示し、本節では地上走行型機器の走行中給電の事例を説明する。

地上走行型機器には、電気自動車、ロボット、AGVなどがある。これらは自動運転を利用した無停止・連続稼働が求められると考えている。バッテリーへの充電作業や充

電時間、また充電スポットへの移動は機器の稼働率を大きく抑制する。インフラとしての給電設備の準備は必要だが、インフラは共有設備のためコストへの影響を抑制でき、また、機器の稼働時間の制約がなくなるといった利点から、光無線給電による走行中給電への転換は将来の社会の構築として有効であろう。

実際の地上走行型機器への走行中給電の取り組みは、簡易な展示用デモンストレーションはいくつかあるものの、明瞭な検討を進めた事例があまりない。著者らは、光ビームの直線性や小さな広がりを利用して、移動体の移動軸の後（前）から光無線給電することを提案している。これにより給電インフラ設備数を大きく抑制できる。実物の自動車などによる検証には至っていないが、図11のように玩具（ミニ四駆）に太陽電池を搭載して連続走行に向けた検討を進めている。光の非照射区間も走行するために1.5F程度のキャパシタをバッテリーに見立てて搭載している。図12では2つの直線路のそれぞれに光ビームを準備し、片方は光出力

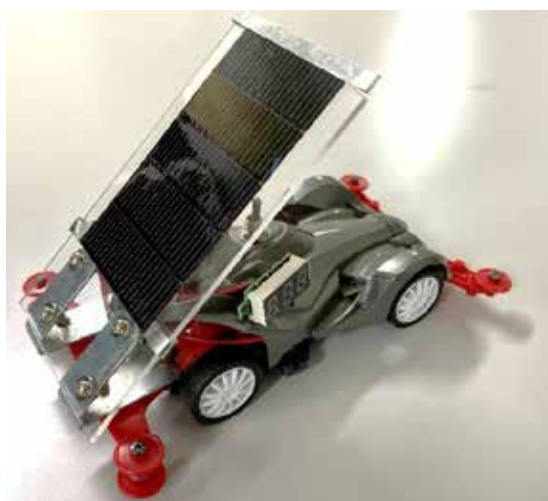


図11 太陽電池を搭載した玩具自動車。光ビーム形状への整合のため斜めに設置している。

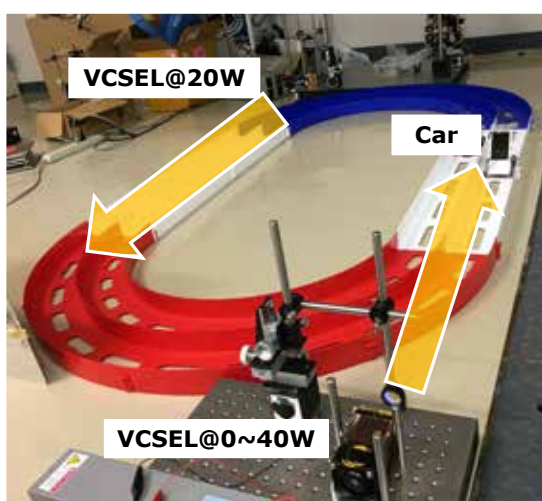


図12 超小型自動車の走行中光無線給電デモ

20W、もう一方は最大40 Wを照射した。充電したキャパシタのみでは2周ほどの走行だが、2つの光ビームによりではさらに2周ほど走行した³⁶⁾。連続的な走行には光出力の増加や光利用率の改善が必要であるが、近く達成できると考えている。

なお、実際の電気自動車への適用は容易といえないが、重量やサイズなどに応じたシステム特性のスケール則（1次近似）を考えれば数kWの光出力という現存するレーザ光源の利用で動作は達成できると想定している。

6.5 飛行体への飛行中給電

移動体への移動中給電としては、地上走行型機器よりも飛行体への取り組みが先行している。すでに述べたように、移動の自由度の高い飛行体への飛行中給電は光無線給電が最も有効なためである。ただし、それでも報告例は動作の簡易な検証の段階である。

最初の報告例は、2003年にNASAが模型飛行機への適用をデモしている³⁷⁾。また、2000年代後半には、近畿大がカイトプレーンの飛

行中給電や、重量1kgほどの比較的大きなドローン（マルチコプター型）の500Wクラスのレーザによる飛行中給電で数10分間の連続飛行を実証している³⁸⁾。この実証ではカメラも搭載し、災害時の長時間の現場観測などを想定したものであり、現時点でも非常に高度なシステムや取り組みといえる³⁹⁾。一方、米国のベンチャー企業のPowerLight Technology社（当時はLaser Motive社）がAscending Technologies社とともに2010年ころより数10cmサイズのドローン（マルチコプター型）の飛行中光無線給電をデモし⁴⁰⁾、12時間ほどの長時間の連続飛行を実証している⁴¹⁾。

著者らも、近年の超小型のドローン（マルチコプター型）の機能性が高まっていることを踏まえ、超小型ドローンの連続飛行を実現すべく検討を進めている。図13のように、100g程度の超小型ドローンでも数W以上の消費電力であり、光出力には数10Wが必要である。実際に図14のように超小型ドローン（利用したのは玩具）を20-30Wの光出力により連続浮遊するといった検証を進めている^{42、43)}。

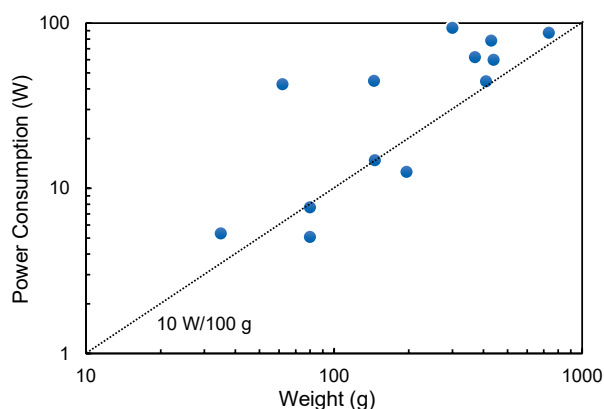


図13 小型、超小型ドローンの重量と消費電力の例

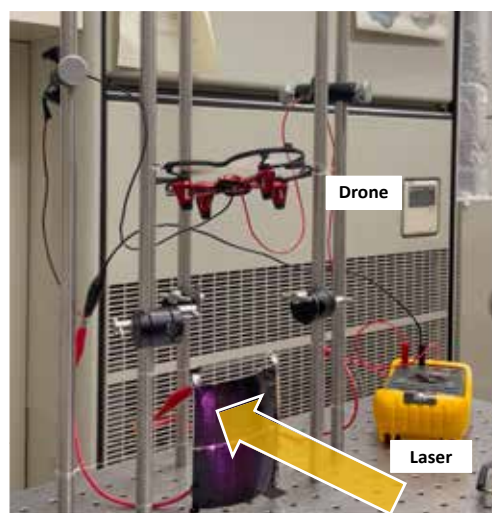


図14 超小型ドローンの飛行中（浮遊中）光無線給電デモ

超小型では、サイズや重量の制約があるものの、光源出力は対応しやすい。一方で、比較的大型のドローンへの飛行中光無線給電は、走行中光無線給電と同様に実用レベルへの展開にはより高出力として10倍、100倍の光出力が必要であり容易ではないが、先述のようにすでに10年以上前に実証されているように、要素技術やシステム化は可能であり、より実用に向けたシステム構築により社会実装も期待できる。

なお、飛行中無線給電の場合も、光源システムのインフラとしての整備が重要となる。特に任意場所への飛行に対応するには広域なインフラ整備が必要である。ただし、上空への滞空でもセンシングや中継基地局など様々な活用が期待されている。後者の場合は比較的簡素なシステム化で実現が可能であろう。

6.6 水中への光無線給電

水中は吸収が大きいため電波がほとんど通らない。このため水中の無線技術はこれまで音波利用が基本であり、無線給電という考えはほとんど存在しなかった。ただし、光は特に青色や緑色の短波長帯では数10mほどまで伝搬可能であり、この波長帯の高出力レーザーも現在は容易に利用可能になった。このため水中の光無線給電が注目され始めている。

著者らは、水中における光無線給電の基礎的システムの構築⁴⁴⁾や、水上と水中の間に光ビームを通す光無線給電⁴⁵⁾などを検討している。前者は、水流などで機器間の位置変動が生じやすい場合でも給電を安定化させるためフライアイレンズ系の適用性を検討している。また後者は水面の波がビームを大きく散乱させ、また時間的なビームパターン変動を生じさせるため、これらの基礎的な影響評価などを進めている。

6.7 高出力、長距離の光無線給電

高出力、長距離は光無線給電の本質的な特徴となるが、実際の検討事例はあまり多くない。

宇宙応用を見据えた取り組みは、国内ではJAXAにおいて、宇宙太陽光発電や月面上への応用などを想定し、800mの長距離の光無線給電の地上実験を最近報告している⁴⁶⁾。また、先のようにPowerLight Technology社は動作実証として300m以上、400Wクラスの実験を報告しており¹²⁾、この技術をもとに2021年にスウェーデンのエリクソン社と提携し、携帯基地局の無線稼働に向けた取り組みを報告している⁴⁷⁾。なお、PowerLight Technology社も宇宙応用などを見据えていると考えられ、創エネや宇宙開発に関わる国家レベルの取り組みが活発化し始めたと考えている。

7. まとめ

光無線給電の原理、特徴、課題、また、著者らの取り組みを中心に最新の成果や動向を解説した。光無線給電は既存の無線給電に対して多くの利点があり有望な方式といえる。ただし、効率や安全性の確保など技術的にもまた社会実装上も多くの課題がある。研究開発の取り組みはその応用範囲に比べてまだまだ極めて少ないといえるため、本分野へのより多くの研究開発者の参画を期待している。本分野の進展により、新しい機器や新しい応用など広くイノベーションにつながるであろう。

謝辞

本稿で紹介した著者の研究については、卒業生を含む研究室学生の多大な努力により得られたものである。ここで改めて感謝する。また、ツルギフォトニクス財団、フジクラ財団、高橋産業経済研究財団などの研究助成

や、企業との共同研究による研究の進展も多い。多様な取り組みにご協力いただいた皆様に感謝申し上げます。

参考文献

1. 宮本智之, “面発光レーザーを用いた光無線給電技術,” レーザー研究, vol. 46, no. 12, pp. 693-697, 2018.
2. 宮本智之, “光無線給電への期待 -新たな光応用分野の創出に向けて-,” 電子情報通信学会論文誌, vol. J103-C, no. 5, pp. 270-278, May. 2020.
3. 宮本智之, “光無線給電の動向 一小型端末, 移動体から水中応用まで-,” レーザー研究, vol. 46, no. 11, pp. 452-461, 2021.
4. A. Kurs, A. Karalis, R. Moffatt, J. D. Joannopoulos, P. Fisher, M. Soljačić, “Wireless power transfer via strongly coupled magnetic resonances,” *Science*, vol. 317, pp. 83-86, 2007.
5. 情報通信技術分科会 陸上無線通信委員会, “空間伝送型ワイヤレス電力伝送システム作業班報告書 (案) 概要,” 情報通信審議会, 2020, https://www.soumu.go.jp/main_content/000694293.pdf (参照2022-01-23) .
6. W. J. Robinson, Jr., “The feasibility of wireless power transmission for an orbiting astronomical station,” *NASA Technical Memorandum*, X-53701, 1968.
7. 堀井憲爾, “レーザ光送電方式に関する考察,” 電子技術総合研究所彙報, vol. 36, pp. 279-286, 1972.
8. 佐山翔泰, 宮本智之, “回転機構における光無線給電に関する基礎的特性解析,” 電子情報通信学会総合大会, c-3/4-54, 2021.
9. NEDO, “戦略的省エネルギー技術革新プログラム/モビリティへの移動中給電技術に関する動向調査/ (1) モビリティへの移動中給電に関する技術マップの整理,” NEDO 成果報告書, P12004, 2019.
10. JAXA, “宇宙太陽光発電システム (SSPS) の研究/レーザー無線エネルギー伝送技術の研究,” <https://www.kenkai.jaxa.jp/research/ssps/ssps-lssps.html> (参照2022-01-23) .
11. 宇宙太陽光発電システム (SSPS) 研究チーム, “日立GITOWERでの上下方向レーザー伝送実験の実施結果について,” JAXA, 2016, https://fanfun.jaxa.jp/jaxatv/files/20161011_ssps.pdf (参照2022-01-23)
12. USNRL and PowerLight Technology, “Energy transmitted by laser in ‘historic’ power-beaming demonstration,” <https://www.youtube.com/watch?v=Xb9THqrXd4I> (参照2022-01-23)
13. 大野桃果, 宮本智之, “長距離光無線給電システムの基礎検討,” 電子情報通信学会ソサイエティ大会, c-3/4-18, 2020.
14. R. Nogawa, K. Yoshida, Y. Kaifuchi, T. Kawakami, Y. Yamagata and M. Yamaguchi, “High efficiency operation of 9xx-nm broad area laser diode and its cavity length dependency,” *Technical Digest of OWPT2020*, OWPT3-02, 2020.
15. M. Perales, M.-H. Yang, and J. Wu, “Low cost laser power beaming and power over fiber systems,” *Technical Digest of OWPT2019*, OWPT-7-01, 2019.
16. H. Helmers, E. Lopez, O. Höhn, D. Lackner, J. Schön, M. Schauerte, M. Schachtner, F. Dimroth, and A. W. Bett, “68.9% efficient GaAs-based photonic power conversion enabled by photon recycling and optical resonance,” *Phys. Status Solidi RRL*, vol. 15, 2100113, 2021.
17. M. Miyoshi, T. Nakabayashi, K. Yamamoto, P. Dalapati, and T. Egawa, “Improved

- epilayer qualities and electrical characteristics for GaInN multiple-quantum-well photovoltaic cells and their operation under artificial sunlight and monochromatic light illuminations,” AIP Advances, vol. 11, 095208, 2021.
18. Y. Katsuta and T. Miyamoto, “Design, simulation, and characterization of fly-eye lens system for optical wireless power transmission,” Jpn. J. Appl. Phys., vol. 58, SJJE02, 2019.
19. S. Fafard, M.C.A. York, F. Proulx, C.E. Valdivia, M.M. Wilkins, R. Arès, V. Aimez, K. Hinzer, and D.P. Masson, “Ultrahigh efficiencies in vertical epitaxial heterostructure architectures,” Appl. Phys. Lett., vol. 108, 071101, 2016.
20. D. Matsuura, M. Shimizum, and H. Yugami, “High-current density and high-asymmetry MIIM diode based on oxygen-non-stoichiometry controlled homointerface structure for optical rectenna,” Scientific Reports, vol. 9, 19639, 2019.
21. K. Takahashi and T. Miyamoto, “Active recognition of position and size of solar cell for OWPT,” Technical Digest of OWPT2019, OWPT-P-11, 2019.
22. J. Tang, K. Takahashi, J. Zhang, and T. Miyamoto, “Design and build of OWPT system with multiple light sources,” Technical Digest of OWPT2020, OWPT9-04, 2020.
23. Z. Jiahe and T. Miyamoto, “光無線送電システムによる飛行ドローンの認識に関する基礎的調査,” レーザー学会学術講演会, G03-19p-VII-03, 2021.
24. A. W. S. Putra, H. Kato, and T. Maruyama, “Infrared LED marker for target recognition in indoor and outdoor applications of optical wireless power transmission system,” Jpn. J. Appl. Phys., vol. 59, SOOD06, 2020.
25. M. XiaoJie and M. Tomoyuki, “Safety system of optical wireless power transmission by suppressing light beam irradiation to human using camera,” Technical Digest of OWPT2021, OWPT-8-03, 2021.
26. K. Goto, T. Nakagawa, O. Nakamura, and S. Kawata, “An implantable power supply with an optically rechargeable lithium battery,” IEEE Trans. Biomedical Eng., vol. 48 pp. 830-833, 2001.
27. T. Tokuda, T. Ishizu, W. Nattakarn, M. Haruta, T. Noda, K. Sasagawa, M. Sawan, and J. Ohta, “1 mm³-sized optical neural stimulator based on CMOS integrated photovoltaic power receiver,” AIP Advances, vol. 8, 045018, 2018.
28. X. Wu et al., “A 0.04mm³ 16nW wireless and batteryless sensor system with integrated cortex-M0+ processor and optical communication for cellular temperature measurement,” IEEE Symp. VLSI Circuits, pp. 191-192, 2018.
29. 植田紘司, 宮本智之, “画像認識に基づく複数室内端末への半自動順次光無線給電システムの構築,” 電子情報通信学会ソサイエティ大会, C-3/4-62, 2021.
30. Y. Zhou and T. Miyamoto, “400 mW class high output power from LED-array optical wireless power transmission system for compact IoT,” IEICE ELEX, vol. 18, 20200405, 2021.
31. M. Zhao and T. Miyamoto, “Optimization for compact and high output LED-based optical wireless power transmission system,” MDPI Photonics, 9, 14, 2022.
32. J. Tang and T. Miyamoto, “Target recognition

- function and beam direction control based on deep learning and PID control for optical wireless power transmission system,” IEEE 9th Global Conf. Consumer Electronics (GCCE) , pp. 907-911, 2020.
33. Wi-Charge, <https://www.wi-charge.com/> (参照2022-01-23)
 34. 三菱地所, “「無線給電」の米スタートアップ PHION Technologies に出資,” 2022, https://www.mec.co.jp/j/news/archives/mec210113_phion.pdf (参照2022-01-23)
 35. Y. Liu and T. Miyamoto, “Characterization of visible color filters on optical wireless power transmission system for changing the surface appearance of solar cells,” J. Engineering, vol. 2021, pp. 19-24, 2021.
 36. 鶴田公隆, 宮本智之, “地上走行型小型モビリティへの移動中光無線給電による連続走行条件の検討,” レーザー学会学術講演会, G03-12p-VII-04, 2022.
 37. NASA Armstrong Flight Research Center, “Infrared laser beaming to power a model aircraft,” 2003, <https://www.youtube.com/watch?v=InuPRZjwykU> (参照2022-01-23)
 38. N. Kawashima, K. Takeda, and K. Yabe, “Possible utilization of the laser energy transmission in space,” Trans. JSASS Aerospace Tech. Japan, vol. 10, pp. Tq_1-Tq_3, 2012.
 39. N. Kawashima, “Public demo laser helicopter,” 2008, <https://www.youtube.com/watch?v=qMLBAmqj288> (参照2022-01-23)
 40. M. C. Achtelik, J. Stumpf, D. Gurdan, and K.-M. Doth, “Design of a flexible high performance quadcopter platform breaking the MAV endurance record with laser power beaming,” IEEE/RSJ Int. Conf. Intelligent Robots and Systems, pp. 5166-5172, 2011.
 41. PowerLight Technologies, “Laser-powered quadcopter endurance demonstration by LaserMotive,” 2010, <https://www.youtube.com/watch?v=8hhv9Cu98us> (参照2022-01-23)
 42. J. Zhang and T. Miyamoto, “Investigation of flying condition of small drone powered by optical wireless power transmission using VCSEL,” Technical Digest of OWPT2020, OWPT7-02, 2020.
 43. 菊地悠登, 宮本智之, “小型ドローンの飛行中光無線給電構成の詳細設計,” 電子情報通信学会総合, 発表予定, 2022.
 44. 多井植葉, 宮本智之, “水中光無線給電における10W級出力に向けた構成検討と実験検証,” レーザー学会学術講演会, G03-12p-VII-03, 2022.
 45. J. Li and T. Miyamoto, “Dynamic output power characteristics of optical wireless power transmission from air to underwater,” Technical Digest of OWPT2020, OWPT6-02, 2020.
 46. 栗林亮介, 奈良岡克郎, 北倉和久, “月極域探査機への無線給電に向けた800mレーザー電力伝送実験,” 第63回宇宙科学技術連合講演会, 1P10 (JSASS-2019-4215) , 2019.
 47. Ericsson, “Ericsson and PowerLight demonstrate world’ s first wireless powered 5G base station,” 2021, <https://www.ericsson.com/en/news/2021/10/ericsson-and-powerlight-achieve-base-station-wireless-charging-breakthrough> (参照2022-01-23)