

電子レンジから宇宙太陽光発電まで

楊 波^{1*}

From Microwave Oven to Space Solar Power Station

Bo Yang^{1*}

概要

電子レンジは日常生活でよく使用されているマイクロ波機器である。その中にあるマイクロ波発生器であるマグネトロンは電子レンジ以外に、工業マイクロ波加熱やレーダーなど業界にも多く応用されている。今年にマグネトロンが発明された100周年で、本文でマグネトロンの新しい応用マイクロ波無線電力伝送技術及びこの技術に関わる宇宙太陽光発電構想を解説する。

1. はじめに

我々が毎日のように使用している電子レンジの発明に関して、1945年にアメリカのRaytheon社で働いていたレーダーエンジニアであるP.L.Spencerによって発明された¹⁾。ネット上には彼がレーダー前に立って、ポケット中のチョコレートが溶けたことによって偶然に発見されたという伝説がある²⁾。1947年にRaytheon社は初の電子レンジRadar Rangeを販売し、その時の電子レンジは高さ1.8メートル、重さ340キログラムとかなり膨大な設備であった³⁾。その後、電子レンジは改良により商業用設備から家庭用製品に発展し、今では各家庭にまで普及してきた。2005年に、Sharp社だけで電子レンジが1億台生産された⁴⁾。電子レンジは図1の示すように、調理室、制御回路、電源回路とマグネトロンなどで構成されている。電源回路はマグネトロンに4000V程度の高電圧を供給し、マグネトロンが励振しマイクロ波を調理室に出力する。食品を調理室のターンテーブルに置き、回転しながら様々な角度でマイクロ波から照射することにより均一加熱される。食品の中の水分子や様々な極性分子はマイクロ波の交流電磁界の作用で振動して加熱に至るといふ電子レンジの動作仕組みである。電子レンジの出力電力は500W~700W仕様が一般家庭用製品で、コンビニである業務用が1500W仕様もある。電子レンジで使用するマグネトロンの周波数帯は2.45GHzであるが、工業用915MHz帯、5.8GHz帯製品もある。マグネトロンの直流からマイクロ波の変換効率は915MHz帯で90%、2.45GHz帯で80%、5.8GHz帯で70%までである。最近半導体の増幅器の高効率研究もあるが、数百Wレベルのマイクロ波出力にはこの効率にまでは至っていない。2.45GHz帯マグネトロンコストは約1000円/kWで、



図1：家庭用電子レンジの構図

2021年6月9日受理。

¹⁾〒611-0011 宇治市五ヶ庄 京都大学生存圏研究所 生存圏学際萌芽研究センター。

* E-mail: yang_bo@rish.kyoto-u.ac.jp

他のマイクロ波変換器では長期間でも達成できないレベル価格である。マグネトロンは全てのマイクロ波変換器の中で効率が最も高く、しかもコストは低く抑えることができる。しかし、マグネトロンの寿命は数千時間で、発振周波数が不安定などの課題もある。

今年はマグネトロンの発明から 100 周年を迎え、1921 年に Hull A. W によって *Physical Review* に最初の論文が記録されていた⁵⁾。1927 年、東北大学の岡部金治郎先生は分割陽極マグネトロンを開発したことで、実用的なマイクロ波を発振できた⁶⁾。第二次世界大戦時に、イギリスはマグネトロンを用いるマイクロ波レーダーを開発した。その後、マグネトロンが前文で述べた電子レンジに広く応用された。1975 年、Raytheon 社の W.C Brown が数年に渡って、マイクロ波無線電力伝送実験を行った。2.45GHz 帯マグネトロンを用いて、2 メートルの送電距離で、495W 直流電力が受電できた⁷⁾。この実験の DC-RF-RF-DC の伝送効率は今でも世界一の記録(54±1%)である。2000 年ごろ、京都大学松本教授らがマグネトロンの陽極電流制御法を開発し、低ノイズの位相制御マグネトロンができた⁸⁾。また、マグネトロン・フェーズドアレーの SPORTS システムを用いてマイクロ波送電実験を行った⁹⁾。

最近の研究は電力と位相共に制御できるマグネトロンを実現、マイクロ波無線電力伝送実験用マグネトロン・フェーズドアレーも構築できた。また、マグネトロンの無線電力伝送技術と通信技術を加え、ワイヤス給電テレビの発明もある。本稿ではこれらのシステムとマイクロ波無線電力伝送技術に関わる宇宙太陽光発電構想を紹介する。

2. マグネトロンを用いるマイクロ波無線電力伝送

2.1 電力と位相制御マグネトロン

マグネトロンノイズ問題の解決に向けては、発振周波数の安定化と位相ロックというアプローチを取っている。前者は注入同期法を採用し、後者については陽極電流による位相制御法を開発したことで、2.45 GHz 帯マグネトロンで位相制御が実現できた⁸⁾。2.45 GHz 帯マグネトロンでの位相制御法は陽極電流(I)と発振周波数(f)の関係性($I-f$)特性を求め、陽極電流で位相を制御するものである。しかし、5.8 GHz 帯マグネトロンの $I-f$ 特性は 2.45 GHz 帯とは全く異なっており、従来の位相制御法は使えない。新位相制御法は移相器を追加して、5.8 GHz マグネトロンの位相制御を試みた。図 2 に示すように、注入同期信号が移相器、サーキュレータを介してマグネトロンに注入される。位相比較器として Double Balanced Mixer (DBM) と、位相制御のための移相器を利用し、注入同期信号と方結からの出力信号の位相比較結果から位相制御するフィードバック回路を構築した。制御モデルの動作により、マグネトロンの位相が制御されることを確認した。新規アプローチの位相制御法でマグネトロンの $I-f$ 特性に依存しない、任意特性マグネトロンでも位相制御が可能となる。これにより、マグネトロンのノイズレベルを -50 dB 以下に抑制でき、位相制御時間が 100 μ s 以内に短縮され、位相制御精度 $\pm 1^\circ$ 以内を実現した¹⁰⁾。また、陽極電流によりマグネトロンの出力電力の制御も可能になる。

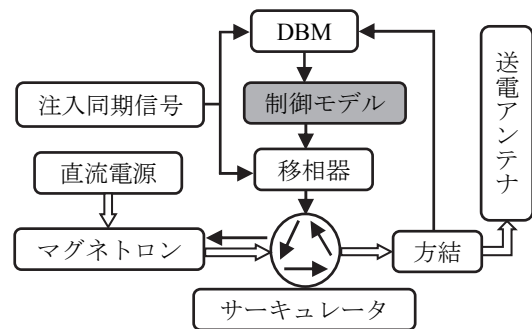


図 2：新規の位相制御マグネトロン系統図

2.2 マグネトロン・フェーズドアレー

前節で紹介した電力と位相制御できるマグネトロンを 2×2 の形で配列し、マグネトロン・フェーズドアレーシステムが構築できた。フェーズドアレーの出力アンテナは、導波管スロットアレーアンテナが設計され、位相制御マグネトロンの出力に接続された。スロットアンテナの放射角度は 22.5° 、ゲインは 24.9 dBi で、メインローブの半帯域幅は 10° となる¹¹⁾。マグネトロン・フェーズドアレーシステムに基づくマイクロ波ビームフォーミングと無線電力伝送実験により、マグネトロンの出力位相

を調整し、水平方向と垂直方向の両方で $\pm 3^\circ$ のビーム走査範囲が得られた。図3のようにLabVIEWプログラムを使用することにより、マグネトロン・フェーズドアレーの位相がタイミングサイクル切り替えを実現させ、4つの送電方向へ順番に切り替えた。

また、5.8 GHz レクテナアレーシステム (IHI Aero Space) を利用して、図4に示すようなマイクロ波無線電力伝送システムを構築できた。マグネトロン・フェーズドアレーの出力位相と電力が調整可能であることを確認できた。マグネトロン・フェーズドアレーは最大61.0%のDC \Rightarrow RF変換効率で、最大出力1870 Wを測定した。マグネトロン・フェーズドアレーの出力マイクロ波電力が1304 Wの場合に、5 mの距離でレクテナアレーシステムのDC出力電力は142 Wに至った¹¹⁾。

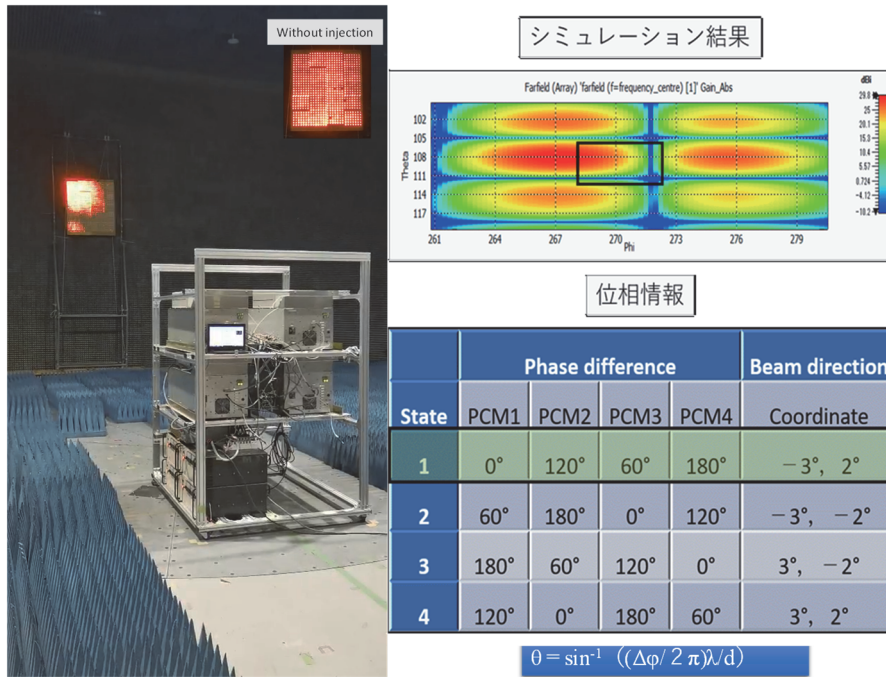


図3：マグネトロン・フェーズドアレーのビームフォーミング実験¹¹⁾

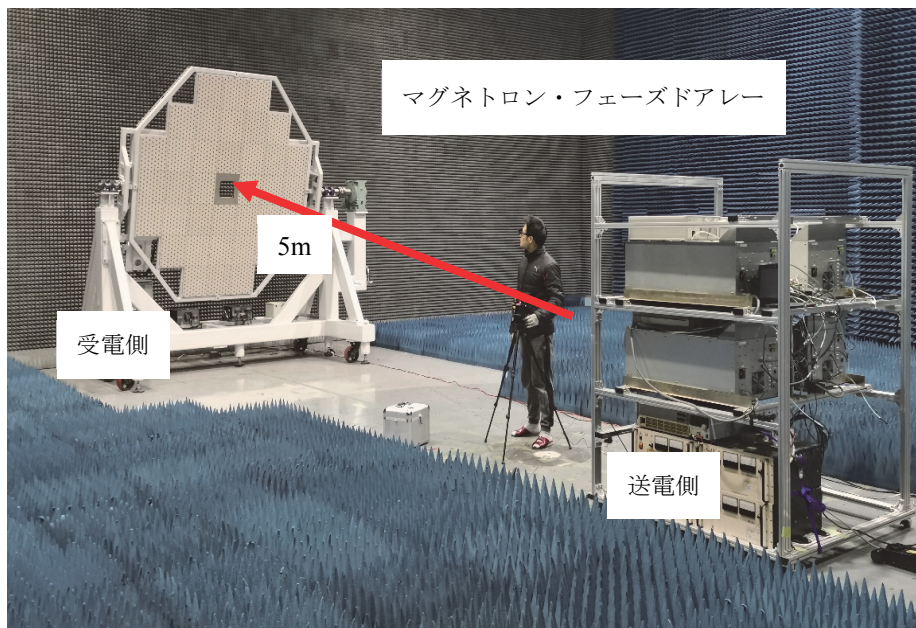


図4：マグネトロン・フェーズドアレーの無線電力伝送実験¹¹⁾

2.3 ワイヤレステレビ

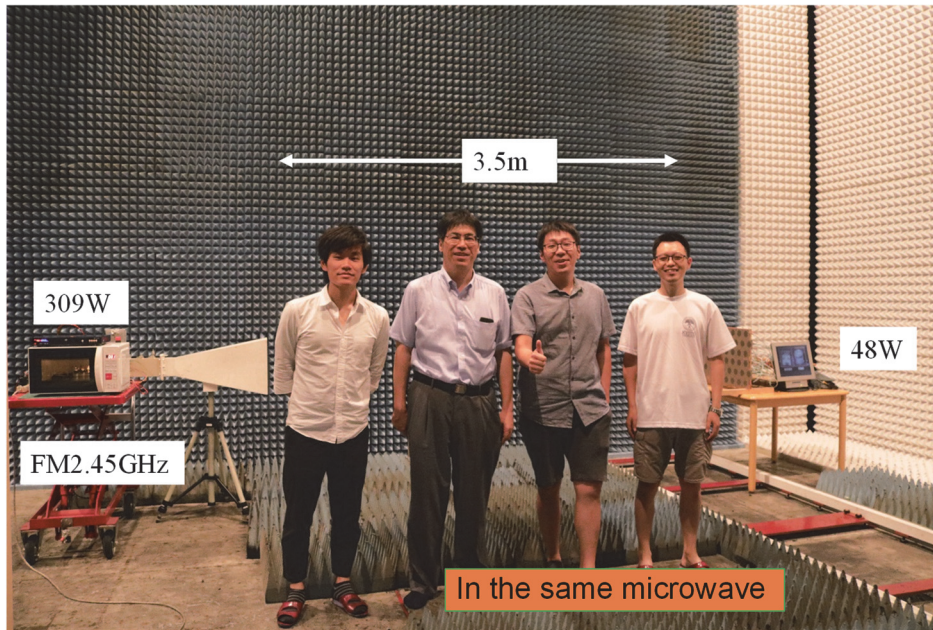


図5：改良版電子レンジを用いたワイヤレステレビ¹⁴⁾

2.1節の電力と位相制御マグネトロンの研究により、マグネトロンが低ノイズで出力できた。マグネトロンは増幅器の機能として高速的な通信も実現できた。従来の技術ではマグネトロンが低い伝送速度の通信について研究されていたが、この研究の結果は伝送速度を向上し、10 Mb/sの通信速度を実現できた¹²⁾。さらに、電子レンジの電源回路を改良することにより、リップル率が4.16%まで改善できた¹³⁾。マイクロ波無線電力伝送技術に加え、図3に示すように改良した電子レンジを用いるワイヤレステレビの開発の成功をみた。伝送距離約3.5mであり、電源ケーブルやビデオケーブルを使用せず、マイクロ波無線電力と情報伝送システム—ワイヤレステレビのデモ装置が実現できた¹⁴⁾。

2.4 宇宙太陽光発電

1968年にP.E Glaser博士は宇宙太陽光発電所(Space Power Station, SPS)構想を提案した¹⁵⁾。図6に示すように、SPSが静止軌道上に設置され、ソーラーパネルによって生成されたエネルギーがマイクロ波またはレーザーの形で地上受電システムに送電されると想定した。SPSは昼夜も悪天候などの影響を受けず、24時間連続発電を維持できる。地球の資源やエネルギーがますます枯渇し、人間の再生可能エネルギーの需要が高まるため、宇宙環境の宇宙発電所は世界中から注目を集めている。米国、日本、ロシア、ヨーロッパ、中国、韓国、インドなどの国々がSPSの研究開発計画を立てた。現在、米国海軍研究所などが3つの宇宙発電所の軌道上検証プロジェクトを進めており、そのうちARACHNEプロジェクトは2023年に宇宙から

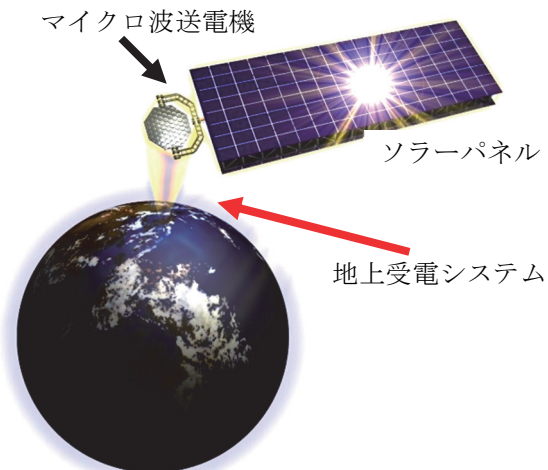


図6：宇宙太陽光発電構想図[出典：生存圏研究所 生存圏電波応用分野のホームページより]

地上に送電検証実験を実施する予定であり、これは人間による宇宙から地上へエネルギー伝送の最初の試みとなる¹⁶⁾。

JAXA の作業報告書によると、宇宙太陽光発電所建設の技術的課題は機器の小型化と軽量化、高効率のマイクロ波変換技術、高精度のビーム方向制御などにある¹⁷⁾。現在、ロケットの打ち上げ能力の制限で、SPS の設計はシステムの重量と体積を最小限に抑えることを注目する。軽量で小型化された宇宙輸送要件の追求の観点から、SPS のマイクロ波伝送は必然的に高い電力密度を要求する。SPS のマイクロ波送電機として、大型のフェーズアレーの素子は軽量、高電力密度、位相制御可能の特徴を求め。ここで、効率面とコスト面も考慮すると、マグネトロンは最適なマイクロ波デバイスである。

ここではマグネトロンを用いる SPS の応用に向け大型のフェーズアレーのシステムを提案できる。図 7 に示すように、直径 1~2 メートルのサブアレーから構成され、各サブアレーはレトロ信号を受信し送電方向を推定する。このシステムは膨大なアレー要素が用意されており、各素子の位相を個別に制御することで高精度な方向制御が可能となっている。また、GW レベルの宇宙太陽光発電所に対しては、宇宙発電所のサイドローブの電力は、衛星の通信電力を簡単に上回る。提案するフェーズアレーシステムにおいて、中央領域素子は高出力マグネトロンを採用し、周囲領域は低出力半導体デバイスで構築する方式である。中心領域素子と周囲領域素子の電力比が 100 倍を超えると、フェーズドアレーアンテナのサイドローブが約-70dB に達することができる。ローサイドローブを実現するには、各要素の電力を個別に制御する必要がある。従って、フェーズドアレーの各素子の位相と電力を独立して制御することが、SPS に向け大型フェーズドアレーを実現するための鍵となる。

サブフェーズドアレーは地上で組み立てから、ロケットによって所定の軌道に打ち上げ、ロボットによって組み立てる。各サブフェーズドアレー間の位相は無線通信を介して同期される。各サブアレー間の接続を容易して組み立ての難しさが解決できる。同時に、ビーム走査中のグレーティングローブの発生を回避するために、アレー素子は三角分布形式を採用し、素子間の距離 (dx, dy) は 1 波長内に設置される。マグネトロンの位相制御と電力制御を 1 波長内の小サイズでフェーズドアレーシステムを完成させることはひとつの課題である。また、マグネトロンの寿命は SPS の応用に向け解決しなければならない課題である。

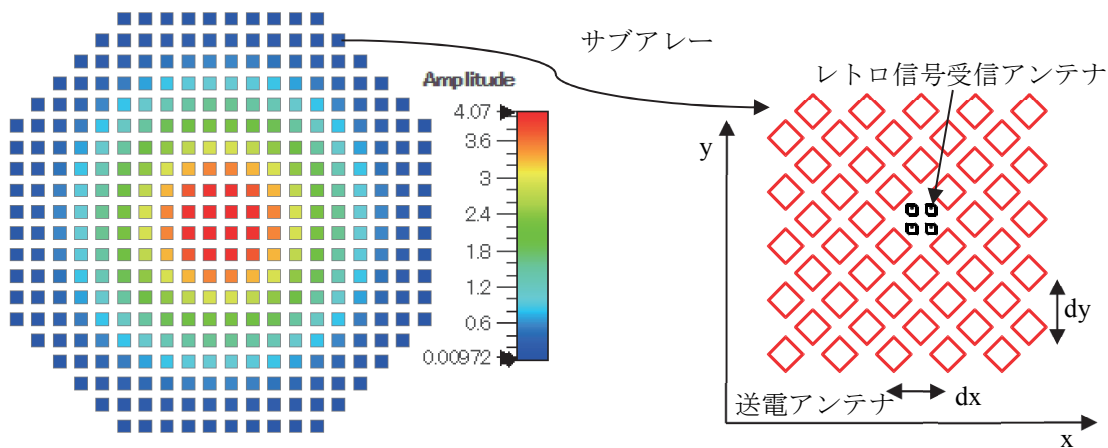


図 7：宇宙太陽光発電所向けに提案する大型フェーズドアレーシステム

3. おわりに

以上述べた電子レンジから、電力と位相制御マグネトロン・フェーズドアレーが発展され、大電力、高効率、遠距離、低価格のマイクロ波無線電力伝送システムが可能になる。この技術は大電力伝送が必要な EV 自動車の無線充電、離島電力供給などに応用可能である。マグネトロン長寿命などの課題

を解決すれば、宇宙太陽光発電の構想に向け、超大電力のマイクロ波無線電力伝送システムを構築することを期待ができる。

参考文献

- 1) Percy L Spencer, Means for treating foodstuffs, US patent, US2605383A, 1945
- 2) Wikipedia, 電子レンジ、[Online]. Available:
<https://ja.wikipedia.org/wiki/%E9%9B%BB%E5%AD%90%E3%83%AC%E3%83%B3%E3%82%B8>
 [Accessed:25- May- 2021]
- 3) ビー・ウィルソン『キッチン of 歴史：料理道具が変えた人類の食文化』真田真由子訳 河出書房新社 2014 年 ISBN 9784309022604 pp.140-145.
- 4) シャープ ニュースリリース, 2005 年 4 月度 (「世界初 電子レンジ世界累計生産 1 億台を達成」, 2005.4.20)
- 5) Albert W. Hull, "The effect of a uniform magnetic field on the motion of electrons between coaxial cylinders," *Physical Review*, vol. 18, no. 1, pages 31-57, 1921.
- 6) 電子情報通信人名録, 電子情報通信学会知識ベース 3 編, pp. 15, 2012 年 10 月
- 7) W. C. Brown, "The History of Power Transmission by Radio Waves," *IEEE Trans. MTT*, vol.32, Issue: 9, pp.1230-1242. Sep 1984, doi: 10.1109/TMTT.1984.1132833
- 8) N. Shinohara, J. Fujiwara, and H. Matsumoto. "Development of active phased array with phase-controlled magnetrons." Proceedings of The International Symposium on antennas and Propagation JAPAN, Vol. 2. 2000.
- 9) H. Matsumoto, *et al.* "Experimental equipments for microwave power transmission in Kyoto University." Proc. 4th International Conference on Solar Power from Space (SPS'04), Spain. 2004.
- 10) B. Yang, T. Mitani, and N. Shinohara, "Experimental Study on a 5.8 GHz Power-Variable Phase-Controlled Magnetron", *IEICE Trans. Electron.*, Vol.E100-C, No.10, pp.901-907, Oct. 2017.
- 11) B. Yang, X. Chen, J. Chu, T. Mitani, and N. Shinohara, "A 5.8 GHz Phased Array System Using Power-Variable Phase-Controlled Magnetrons for Wireless Power Transfer". *IEEE Trans. MTT*, vol.68, no.11, 2020.
- 12) B. Yang, T. Mitani, and N. Shinohara, "Evaluation of the Modulation Performance of Injection-Locked Continuous-Wave Magnetrons". *IEEE Trans. ED*, vol.66, no.1, pp.709-715, 2019.
- 13) 楊 波、三谷 友彦、篠原 真毅、単相全波倍圧整流回路を用いる位相制御マグネトロンの研究、*信学技報*, vol. 117, no. 267, pp. 23-26, 2017 年 10 月
- 14) B. Yang, T. Mitani, and N. Shinohara, "Injection-Locked CW Magnetron for a wirelessly-powered TV", 20 th International Vacuum Electronics Conference (IVEC), Busan, 2019.4.30-5.1
- 15) Glaser, Peter E. "Satellite solar power station." *Solar Energy*, vol.12 No.3, pp. 353-361. 1969.
- 16) C. T. Rodenbeck *et al.*, "Microwave and Millimeter Wave Power Beaming," in *IEEE J. Microwaves*, vol. 1, no. 1, pp. 229-259, winter 2021.
- 17) JAXA, マイクロ波無線エネルギー伝送技術の研究、[Online]. Available:
<https://www.kenkai.jaxa.jp/research/ssps/ssps-mssps.html> [Accessed:25- May- 2021]

著者プロフィール



楊 波 (Bo Yang)

<略歴> 2008 年中国石油大学工学部電子学科卒業/同年ダイヘン青島支社に入社し高周波電源の開発、2015 年退社/2018 年京都大学院工学研究科修士課程電気工学専攻修了/2020 年京都大学工学研究科電気工学専攻卒業 (工学博士) /同年学術振興会特別研究員ポスドク/2021 年京都大学生存圏研究所ミッション専攻研究員、現在に至る。<研究テーマと抱負>宇宙太陽光発電に向け大電力マイクロ波無線電力技術とこの技術の実用化を目指す。<趣味など>ものづくり、登山、釣りなど。