学術論文

マイクロ波加熱に向けた OAM モード切り替えによる

電力密度均一化手法

Generation of Uniform Power Density Distribution by Switching OAM Modes for Microwave Heating

鈴木 健斗、三谷 友彦*、篠原 真毅 Kento Suzuki, Tomohiko Mitani^{*}, Naoki Shinohara

> 京都大学生存圈研究所 〒611-0011 京都府宇治市五ケ庄

Research Institute for Sustainable Humanosphere, Kyoto University, Gokasho, Uji, Kyoto 611-0011, Japan

corresponding author*, e-mail address: mitani.tomohiko.3u@kyoto-u.ac.jp

キーワード:マイクロ波加熱、均一電力密度、軌道角運動量、均一円形アレー、シーケンシャルアレー

Keywords: microwave heating, uniform power density, orbital angular momentum, uniform circular array, sequentially rotated array

Abstract

Conventional microwave heating methods have the problem of uneven heating due to non-uniform power density distribution. This study aims to realize uniform power irradiation over a wide area by controlling microwave beams using an array antenna. We investigated the use of orbital angular momentum (OAM) mode beam patterns generated by the uniform circular array (UCA). First, the number of antenna elements in UCA and the number of irradiated OAM modes were determined based on array factor calculation. Second, the symmetry of beam patterns was improved by using a sequentially rotated array arrangement. Electromagnetic simulation and measurement results of the designed UCA showed that the average power density distribution could be made uniform over a wide area by switching the irradiation modes appropriately. These results validate that the method of switching OAM modes is effective to realize uniform power irradiation for microwave heating.

1. 緒言

マイクロ波加熱は、照射されたマイクロ波のエネル ギーが被加熱物内部で熱に変わることで、物体を内部 から加熱することが可能な手法である。加熱容器や加 熱炉からの伝熱を用いて物体を外部から加熱する通常 の加熱手法に対して、高速かつ高効率な加熱が可能で ある。その利点から、電子レンジに代表される食品加熱 だけでなく、殺菌や乾燥などといった様々なプロセス への応用が検討されている[1-3]。また、有機・無機化学 分野における研究も盛んであり、反応速度の高速化や 低消費電力化が実現されている[4-6]。非熱的効果によ る新材料の生成も注目されており、マイクロ波応用の 更なる発展が期待されている。

マイクロ波加熱には一般的に導波管を用いた加熱手 法がよく用いられている。導波管内に加熱試料を設置 し、マイクロ波を伝搬させることで試料にマイクロ波 を照射する。また、導波管の終端を短絡した共振器型の 装置では、試料に吸収されなかったマイクロ波を反射 させ再度試料に照射することにより、より高効率な加 熱が可能となる[4]。一方で、これらの導波管型の加熱 装置は管内を伝搬・共振する電磁波のモードにより装 置内で均一な電力強度を得られる面積が制限されるた め、波長に対して広範囲の均一加熱には不向きである。 より大きな試料を加熱するための装置として、電子レ ンジを代表とするマルチモードアプリケータが存在す る。共振器内のマイクロ波を撹拌し、複数の定在波モー ドを発生させることで、試料に照射されるマイクロ波 強度がより均一となる。しかし、この手法も定在波のモ ードを発生させるため、条件によっては均一性が損な われる[4]。また、ランダムなモードの発生により装置 内の正確な電力強度分布を知ることができない点も欠 点である。

導波管などの金属壁で囲まれた筐体を使用しないマ イクロ波加熱手法として、アンテナからのマイクロ波 照射による加熱が行われている[7]。照射アンテナとし てアレーアンテナを用いることで、ビームフォーミン グにより所望の方向にマイクロ波を集中して照射する ことが可能である。また、アレーアンテナによるビーム フォーミングでは、電力を一点に集中させるだけでな く、電力密度が広範囲で均一となるフラットトップビ ームの生成が可能である[8]。このような均一ビームを 生成することで、広範囲にムラなくマイクロ波を照射 することが可能となる。従来の均一電力ビームの生成 は、sinc 関数状やペンシル状のビームパターンの合成 による手法が多い[9-11]。一方で、これらの手法は合成 するビーム数が多く煩雑であり、また多数のアンテナ 素子を必要とする。そこで、本研究では電磁波の軌道角 運動量 (orbital angular momentum: OAM) モードが もつビームパターンに着目した新たな照射電力密度の 均一化手法を提案する。

2. OAM モードのビームパターンを用いた電力密度の 均一化手法

2-1. OAM モードの電磁界分布

電磁波がもつ角運動量には、偏波に起因するスピン 角運動量 (spin angular momentum: SAM) に対して、 空間の位相分布の回転に起因する OAM が存在するこ とが知られている[12]。伝搬軸周りの位相の回転数はモ ード指数 *l* で表され、各モードの電磁波は Fig. 1 に示 すように螺旋状の等位相面をもって伝搬する。伝搬軸 周りの位相は 2*πl* rad だけ回転する。負のモードについ ては回転方向が逆向きとなる。これらのモードには直 交性があり、同一周波数による情報の多重伝送が可能 であることから、OAM モードは無線通信分野において 広く研究されている[13,14]。

Fig.1 で示した位相回転の特徴により、*l*≠0 である モードは伝搬軸上が位相特異点となり、電磁界強度が0 となる。これにより、伝搬軸に垂直な面でみた電力密度 の分布は Fig.2 のような円環状のパターンとなる。|*l*| の増加に伴ってビーム角度が大きくなり、円環の径は 大きくなる[13]。





Fig. 1: Helical phase fronts of OAM modes.

Fig. 2: Power density distributions of OAM modes.

2-2. 電力密度の均一化手法

本研究では、OAM モードがもつ円環状ビームパター ンの特徴を利用した電力密度の均一化手法を提案する。 Fig.3に本手法の概要を示す。アンテナから複数 OAM モードのマイクロ波を時間で切り替えながら照射する。 各モードのビームパターンは Fig. 1 で示したようにモ ード指数 |l| の増加に伴って円環の径が大きくなる。よ って、照射モードを適切な照射時間比で切り替えるこ とで、アンテナ面に水平な所望の平面上において電力 密度の時間平均を均一化することができる。ここで、照 射時間比とはモード切り替えの 1 サイクルにおいて各 モードを照射する時間の比率である。円環径が拡大す るにつれて同一電力入力時のピーク電力強度は減少す る。そのため、平均電力強度を均一化するためにはモー ドごとに傾斜をつけた適切な照射時間比を設定する必 要がある。



Fig. 3: Generation of uniform power density distribution by switching OAM modes.

2-3. OAM モードの生成方法

複数の OAM モードを生成可能なアンテナとして、 無線通信分野でよく用いられている均一円形アレー (uniform circular array: UCA) を使用する[13-15]。 UCA は Fig. 4 に示すようにアンテナ素子を円形に等 間隔配置したアレーアンテナである。UCA を用いた OAM モード生成では、各アンテナ素子に与える位相に 線形勾配を設けることで OAM モードがもつ位相回転 を再現する。UCA のアンテナ素子数をN、生成する OAM モードをlとしたとき、隣接素子間に与える位相 差 $\Delta\psi$ は式(1)のように計算される。Fig. 4 に示した位 相はN = 8, l = +1 での例を表す。

$$\Delta \psi = \frac{2\pi l}{N} \tag{1}$$

UCAを用いたOAM モードの生成は等振幅かつ線形 の位相勾配で実現可能である。そのため、アンテナの入 力制御が非常に簡単であり、バトラーマトリクスを用 いた位相制御手法などが検討されている[16,17]。本手 法によるビームフォーミングを用いることで、従来手 法に対するアンテナ制御系の簡易化や低コスト化が期 待できる。本研究では、ISM バンドの周波数でありマ イクロ波加熱に広く使用されている 2.45 GHz を用い て本手法の検討を進める。



Fig. 4: Generation of OAM modes using UCA.

3. アレーアンテナの設計 3-1. UCA のアレーファクタ

UCA のアンテナ素子配置を決めるパラメータとし て素子数N、素子間隔s、アレー半径rの3つがある。 これらのパラメータは式(2)に示すように互いに関係し、 2つの値を決めることで素子配置が決定される。

$$\frac{s}{r} = 2\sin\left(\frac{\pi}{N}\right) \tag{2}$$

素子配置と 2-3 節で述べた励振振幅・位相により、UCA のアレーファクタは式(3)のように計算される[14]。

$$AF(\theta, \phi) = \sum_{n=1}^{N} e^{j(l\phi_n + k_0 r_n \cdot R)}$$

$$\approx N j^l e^{jl\phi} I_l(k_0 r sin\theta)$$
(3)

ここで、座標系および各変数は Fig. 5 に示すように定め、 ϕ_n は n 番目の素子の方位角、 r_n は n 番目の素子の位置ベクトル、R は観測方向の単位ベクトル、 k_0 は自由空間における波数を表す。OAM のモード指数 l に対して、アレーファクタは l 次の第一種ベッセル関数で近似される。ベッセル関数は Fig. 6 に示すような値を取り、モード指数 |l|の増加に伴って最大値をとるビ

ーム角度θが大きくなることが分かる。



Fig. 5: Coordinates for calculation of array factor.



Fig. 6: Bessel functions of the first kind $J_l(x)$. The integer order $l = 0 \sim 4$.

3-2. 素子配置と使用モード数の検討

式(3)をもとに電力強度を広範囲で均一化するための UCA のパラメータを検討する。均一範囲を拡大するた めには円環状ビームのメインローブ角度を大きくする 必要があり、そのためには以下の 2 つの方法が考えら れる。

1). 使用するモード数を増やす。

2). アレー半径 *r* を小さくする。

1).では、|l|が大きくなるほどメインローブ角度が大 きくなる性質を利用し、より高次のモードを使用する ことでビーム角度を拡大する。一方で、高次モードの生 成には限界が存在する。式(3)で示した近似はモード指 数 |l| に対して素子数 N が十分に大きく、素子間隔 s が 十分に小さいときに成立する。つまり、OAM モードが もつ 2*πl* rad の位相回転を再現するのに十分な素子数 および素子間隔が必要である。例として $N = 8, s = 0.7\lambda$ でのアレーファクタの計算結果を Fig. 7 に示す。 Fig. 7 の各極座標グラフにおいては、原点(円の中心) からの距離が Fig. 5 に示すビーム角度 θ の大きさに対応し、方位角が Fig. 5 に示す方位角 ϕ に対応する。 |l|が増加するにつれてメインローブの ϕ 方向の均一度が 悪くなり、l = +3ではメインローブが完全に分離する ことが分かる。本研究の手法では均一な円環状ビーム を必要とするため、メインローブの分離によって使用 できるモード数は制限される。より高次のモードを使 用するためには、Nを大きく、sを小さくする必要がある。



Fig. 7: Example of array factor calculation with $N = 8, s = 0.7\lambda$.

2).では、ベッセル関数の可視領域を絞ることで各モ ードのメインローブ角度を拡大する。式(3)におけるベ ッセル関数の引数は0~k₀rの値をとり、この範囲が Fig. 6 に示したベッセル関数の可視領域となる。つま り、rが小さいほど可視領域は狭くなり、最大値をとる ビーム角度 θ は大きくなる。また、可視領域内の不要 な極値が減ることで、サイドローブの減少にもつなが る。rを小さくすることは、式(2)より N あるいはsを 小さくすることと同等である。

2つの方法に共通する点として、素子間隔*s*は小さい ほど望ましいといえる。ただし、実際にはアンテナ素子 の物理的な大きさによる制限や素子間相互結合の影響 を受けるため、ここでは*s* = 0.6*λ*とした。一方、素子 数 N の決め方は2つの方法で異なるため両立すること ができない。そこで、メインローブ角度の拡大に適切な N の値を求めるために、素子数 N に対して使用可能な モードとそのメインローブ角度を計算した。モードの 使用可否を判断するための基準として、Fig. 8 に示す ようにアレーファクタが最大値をとるビーム角度 θ に おいて ϕ 方向の強度の変動が最大値の90%を下回らな いことを使用可能である条件とした。バトラーマトリ クスやディジタル移相器による位相制御を見据えて素 子数は2のべき乗 (N = 8,16,32,64)とし、 $l \ge 0$ の モードについて計算した結果を Fig. 9 に示す。また、 l = +1を使用可能な最低素子数である N = 6 の結果 についても同図に示す。各素子数において使用可能な 最大モードにおけるメインローブ角度を比較すると、 N = 8 以上では素子数に対して大きな変化がないこと



Fig. 8: Determination of the beam angle θ and condition for available mode based on the array factor at the determined θ .



Fig. 9: Available modes and their mainlobe angles for each number of elements.

が分かる。これは 1).と 2).による寄与が同程度であり、 N の変化に対して片方の効果を他方が打ち消すためと 考えられる。本手法において制御の簡易化を目指す上 では素子数や使用モード数が少ない方が望ましい。よ って、ここでは素子数を N = 8、使用するモードを l = 0,+1,+2 と選択した。

3-3. アンテナ素子の設計

CST STUDIO SUITE による電磁界シミュレーショ ンを用いてアンテナ素子の設計を行った。Fig. 10 にア ンテナ素子のモデルと反射係数のシミュレーション結 果を示す。アンテナ素子は右旋円偏波の円形マイクロ ストリップアンテナとして設計し、誘電体基板は日本 ピラー工業株式会社の NPC-H220A (呼び厚さ 1.6 mm) を参考に比誘電率を 2.17、誘電正接を 0.0005 とした。 2.45 GHz における電磁界シミュレーションの結果、反 射係数 $|S_{11}|$ は -32.1 dB となった。また、アンテナ正 面方向 (z 軸正方向)の利得は 6.62 dBi、軸比は 0.27 dB となった。ここで軸比とは、楕円偏波における 電界の最大値 (長軸成分) と最小値 (短軸成分)の比で あり、0 dB に近いほど円偏波としての特性が良いこと を表す。



Fig. 10: Model of antenna element and simulation results of reflection coefficient.

3-4. シーケンシャルアレー配置を用いた UCA

3-2 節で決定した素子配置をもとにアレー化を行い、 UCA を設計した。Fig. 11 に UCA のモデルを示す。 $N = 8, s = 0.6\lambda$ の素子配置に加え、各素子をアレー中 心から見て同じ向きに見えるように回転対称に配置し たシーケンシャルアレー配置を採用した。シーケンシ ャルアレーは一般的にアレーアンテナの軸比を改善す るために用いられるが、ここでは OAM モードの円環 状ビームの対称性を改善する目的で用いた。回転対称 なアレー配置となることで、アンテナ素子単体がもつ 放射パターンの非対称性や素子間の相互結合量のばら つきがビーム形状に与える影響を抑えることができる。 シーケンシャルアレー配置を用いるためにはアンテナ 素子が円偏波である必要があり、3-3節においてアンテ ナ素子を円偏波で設計したのはこのためである。



Fig. 11: Model of UCA with sequentially rotated array arrangement.

シーケンシャルアレーを用いる場合には、OAM モー ド励振の位相差に加え、各素子の回転角に応じた位相 差をつけて励振する必要がある。そのため、右旋円偏波 (RHCP) および左旋円偏波 (LHCP) に対する各素子 の励振位相はTable1のようになる。このとき、右旋円 偏波の *l* = +2 と左旋円偏波の *l* = 0 の励振位相は一 致する。同様に、右旋円偏波の *l* = 0 と左旋円偏波の *l* = −2、右旋円偏波の *l* = +1 と左旋円偏波の *l* = -1の励振位相は一致する。前節で述べたように、今回 使用するのは右旋円偏波のアンテナ素子であるが、ア レー化によりアンテナ素子単体の軸比は劣化して楕円 偏波となり、左旋円偏波成分が発生する。この左旋円偏 波成分は前述の通り所望のモードとは異なるモードを 生成するため、所望のビームパターンを劣化させる要 因となる。そこで、アレー化による軸比の劣化を抑える ため、Fig. 11 裏面のようにグラウンド面を素子ごとに 切り分けた構造を取り入れた。Fig. 12 にグラウンド構 造の違いによる UCA 上の単素子の放射軸比のシミュ レーション結果を示す。また、図中の点線はアレー化前 の単素子での結果を表す。グラウンド形状を切り分け ることで、アレー化前との軸比のずれが小さくなった ことが分かる。これにより、軸比が 0 dB に近づき、ア

Table 1: Excitation phases for OAM modegenerations with sequentially rotated array.

Port	l = 0		l = +1		l = +2	
	RHCP	LHCP	RHCP	LHCP	RHCP	LHCP
#1	0°	0°	0°	0°	0°	0°
#2	-45°	45°	0°	90°	45°	135°
#3	-90°	90°	0°	180°	90°	270°
#4	-135°	135°	0°	270°	135°	45°
#5	-180°	180°	0°	0°	180°	180°
#6	-225°	225°	0°	90°	225°	315°
#7	-270°	270°	0°	180°	270°	90°
#8	-315°	315°	0°	270°	315°	225°



Fig. 12: Comparison of simulation results for axial ratio of single antenna element.

レー化による軸比の劣化が改善されたことが分かる。

以上の議論をもとに設計した Fig. 11 の UCA モデル を用いて、OAM モード生成の電磁界シミュレーション を行った。入力電力を 0.5 W/port とし、Table 1 で示 した右旋円偏波の励振位相を用いて各モードの生成を 行った。アンテナからの距離 z = 500 mm での電力密 度分布のシミュレーション結果を Fig. 13 に示す。シー ケンシャルアレー配置を用いたことで、対称性の高い 円環状ビームパターンが得られた。また、3-2 節で検討



Fig. 13: Simulated power density distributions for each mode at z = 500 mm.

4. 電力密度分布の均一化検証

3 章で設計した UCA の電磁界シミュレーション結 果をもとに、*l* = 0, +1, +2 のビームを用いた電力密度 分布の均一化を検討した。Fig. 13 で示した各モードの 計算結果を用いて、アンテナからの距離 z=500 mm の 平面上において電力密度の時間平均が均一になるよう な照射時間比を求めた。ここでは平均電力密度が最大 値の 90%以上となる範囲を均一範囲とし、均一範囲の 面積が最大となるように照射時間比の決定を行った。

Table 2 に照射時間比を示す。円環状ビームの径が増 加するにつれてピークの電力強度は小さくなるため照 射時間の比率も大きくなることが分かる。Table 2 の照 射時間比を用いて計算した平均電力密度分布を Fig. 14 に示す。図中の白点線は均一範囲を示し、点線内の領域 では最大値の 90%以上の電力密度が得られる。均一範 囲内で得られる最大長さは 600 mm = 4.9λ 程度であ り、波長より十分大きい範囲で電力密度の均一性が保 たれたといえる。また、均一範囲の面積は 0.3283 m^2 となった。

Table 2: Radiation time ratio for each modedetermined from simulation results.

Radiation mode	Time ratio
l = 0	12%
l = +1	18%
l = +2	70%



Fig. 14: Simulated average power density distribution at z = 500 mm. The white dashed line represents the contour line at 90% of the maximum value.

5. 実証実験

設計した UCA を実際に作製し、ビームパターンの 実測を行った。Fig. 15 に作製した UCA を示す。UCA はシミュレーションと同様に日本ピラー工業株式会社 のNPC-H220A (呼び厚さ 1.6 mm) を使用し、プリン ト基板加工機を用いて作製した。Fig. 16 にビームパタ ーンの近傍界測定の様子を示す。OAM モード生成のた めの位相制御には電圧制御アナログ移相器を使用し、 Arduino と DAC により所望の位相を得るための電圧 を制御した。測定プローブ (OEWG: WR-430) を用い て、アンテナ面から 500 mm の平面上でのビームパタ ーンをアンテナの入力および測定プローブの出力と接 続したネットワークアナライザの S21 により測定した。 x 方向および測定プローブを 90°回転させた y 方向 の2つの偏波軸に対して測定を行い、円偏波としての 特性を評価した。ここでは1=0,+1,+2のモードをそ れぞれ個別に励振し、測定を行った。

はじめに、x 方向およびy 方向に対する S_{21} の位相 分布の測定結果を Fig. 17 に示す。各モードの結果では 伝搬軸周りで $2\pi l$ rad だけ位相が回転しており、OAM モードの生成が確認できた。また、x 方向の位相はy方向に対しておおよそ 90° 進んでおり、右旋偏波の位 相差となることを確認した。





(Front side)

(Back side)

Fig. 15: Fabricated 8-element UCA.



Fig. 16: Nearfield measurements and phase control system for OAM modes excitation.

続いて、2 つの偏波軸に対する測定結果 S_{21}^{x} および S_{21}^{y} から計算した $|S_{21}^{x}|^{2} + |S_{21}^{y}|^{2}$ の分布を Fig. 18 に 示す。この結果は測定平面における正規化した電力密 度分布に相当する。励振する OAM モード |l| の増加に 伴ってビームパターンの円環径が大きくなる様子が確 認できた。これらの各モードの測定結果を用いて 4 章 と同様に照射時間比を決定した。Table 3 に測定結果か ら決定した照射時間比を示す。Table 3 はシミュレーシ ョン結果から求めた Table 2 の照射時間比とほぼ一致 しており、シミュレーションと同様の強度分布が得ら れたといえる。また、各モードの $|S_{21}^{x}|^{2} + |S_{21}^{y}|^{2}$ の結



Fig. 17: Measured phase distributions of S_{21} in two polarization axes for each mode.



Fig. 18: Measurement results of $|S_{21}^{x}|^{2} + |S_{21}^{y}|^{2}$ distributions for each mode at z = 500 mm.

Table 3: Results of the best radiation time ratio for each mode based on the results of Fig. 18.

Radiation mode	Time ratio
l = 0	12%
l = +1	19%
l = +2	69%

果を Table 3 の照射時間比を用いて足し合わせた平均 分布の計算結果を Fig. 19 に示す。この結果は測定平面 における平均電力密度分布に相当する。伝搬軸を中心 とした広範囲のエリアで強度が均一となることが確認 された。図中に白点線で示した均一範囲内で得られる 最大長さは 400 mm = 3.3λ 程度であり、波長より十分 大きい範囲で電力密度の均一性が保たれたといえる。 また、Fig. 14 のシミュレーション結果と比較して Fig. 19 の均一範囲には歪みが生じており、均一範囲の面積 は 0.1085 m² でシミュレーション結果の 33%程度とな った。これは、Fig. 18 に示した *l* = +2 の分布におけ る歪みが大きく影響したと考えられる。 *ll* の増加に伴 ってビーム角度が大きくなることで、測定環境での反 射等による干渉の影響が大きくなったためだと考えら れる。



Fig. 19: Average distribution of $|S_{21}^{\chi}|^2 + |S_{21}^{y}|^2$ at z = 500 mm calculated with radiation time ratio of Table 3. The white dashed line represents the contour line at 90% of the maximum value.

6. 結論

OAM モードを利用した広範囲での平均電力密度の 均一化手法を検討した。UCA を用いた OAM モード生 成において均一電力範囲の拡大に適した素子数および モード数を検討し、 *N* = 8,*l* = 0,+1,+2 と決定した。 また、シーケンシャルアレー配置を用いることで OAM モードの円環状ビームパターンの対称性が改善される ことを示した。設計した UCA による平均電力密度分 布の均一化を電磁界シミュレーションおよび実測で検 討し、波長より十分大きい範囲で電力密度の均一性が 保たれることを示した。以上の結果から、OAM モード 切り替えを用いた手法が照射電力密度の均一化に有効 であることを示した。今後は本手法を用いて実際にマ イクロ波加熱実験を行い、加熱領域拡大への効果を確 認する予定である。 本研究はJSPS 科研費 JP21K04175 の助成を受けた ものである。実証実験においては、京都大学生存圏研究 所の共同利用・共同研究拠点「マイクロ波エネルギー伝 送実験装置(METLAB/SPSLAB)」および「先進素材 開発解析システム(ADAM)」を利用した。

参考文献

- 1. 越島哲夫編, マイクロ波加熱技術集成, (1994).
- 初田祥三編,マイクロ波の新しい工業利用技術, (2003).
- 福島英沖,吉川昇編,マイクロ波加熱の基礎と産業応用,(2017).
- 4. 堀越智編, マイクロ波化学, (2013).
- R. N. Gedye, F. E. Smith, and K. C. Westaway, "The rapid synthesis of organic compounds in microwave ovens.", Canadian Journal of Chemistry 66.1 (1988): 17-26.
- S. Nain, R. Singh, and S. Ravichandran, "Importance of microwave heating in organic synthesis.", Advanced Journal of Chemistry-Section A 2.2 (2019): 94-104.
- 7. S. Horikoshi, S. Yamazaki, A. Narita, T. Mitani, N. Shinohara, and N. Serpone, "A novel phased array antenna system for microwave-assisted organic syntheses under waveguideless and applicatorless setup conditions.", RSC advances 6.115 (2016): 113899-113902.
- N. Takabayashi, K. Kawai, M. Mase, N. Shinohara, and T. Mitani, "Large-scale sequentially-fed array antenna radiating flat-Top beam for microwave power transmission to drones.", IEEE Journal of Microwaves 2.2 (2022): 297-306.
- 9. J. M. Cid, J. A. Rodriguez, and F. Ares, "Shaped power patterns produced by equispaced linear arrays: Optimized synthesis using orthogonal sin (Nx)/sin (x) beams.", Journal of Electromagnetic Waves and Applications 13.7 (1999): 985-992.
- 1 0. N. Takabayashi, N. Shinohara, and T. Fujiwara, "Array pattern synthesis of flat-topped

謝辞

beam for microwave power transfer system at volcanoes.", 2018 IEEE Wireless Power Transfer Conference, (2018).

- Y. X. Qi, and J. Y. Li, "Superposition synthesis method for 2-D shaped-beam array antenna.", IEEE Transactions on Antennas and Propagation 66.12 (2018): 6950-6957.
- 1 2. L. Allen, M. W. Beijersbergen, R. J. C. Spreeuw, and J. P. Woerdman, "Orbital angular momentum of light and the transformation of Laguerre-Gaussian laser modes.", Physical review A 45.11 (1992): 8185.
- 平部正司, 善久竜滋, 宮元裕章, 生田耕嗣, 佐々木英作, "OAM モード多重による大容量無線 伝送技術.", 電子情報通信学会 通信ソサイエティ マガジン 13.3 (2019): 195-204.
- W. Yu, B. Zhou, and S. Wang, "Analyze UCA based OAM communication from spatial correlation.", IEEE Access 8 (2020): 194590-194600.
- M. Mase, N. Shinohara, T. Mitani, and S. Ishino, "Evaluation of efficiency and isolation in wireless power transmission using orbital angular momentum modes.", 2021 IEEE Wireless Power Transfer Conference, (2021).
- B. Palacin, K. Sharshavina, K. Nguyen, and N. Capet, "An 8× 8 Butler matrix for generation of waves carrying Orbital Angular Momentum (OAM).", The 8th European Conference on Antennas and Propagation, (2014).
- H. Sasaki, Y. Yagi, T. Yamada, T. Semoto, and D. Lee, "Hybrid OAM multiplexing using butler matrices toward over 100 Gbit/s wireless transmission.", 2020 IEEE Globecom Workshops, (2020).

Manuscript received:	Aug. 8, 2023
Revised:	Nov. 8, 2023
Accepted:	Nov. 18, 2023