

令和 4 年度「電波有効活用セミナー」
～ ワイヤレスによる Society 5.0 の実現 ～

ドローンへのワイヤレス電力伝送に向けた 空芯ビーム形成に関する研究開発

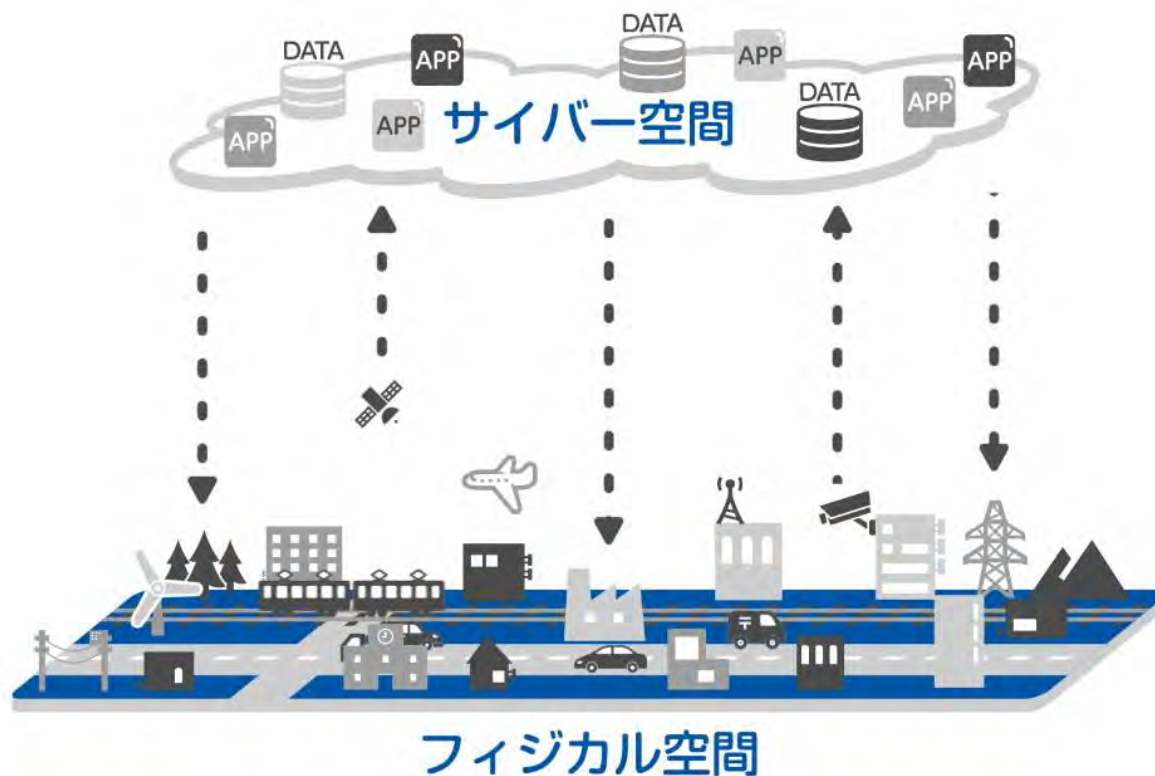
(株)国際電気通信基礎技術研究所 波動工学研究所
松室 堯之

2023/02/27月 (@エル・おおさか 南ホール)

1. ドローンへのワイヤレス電力伝送の概要
2. ラゲールガウシアンモードを用いた**空芯ビーム**の形成
3. 受信電力を用いた**相対ビーム位置**の検出
4. 走行車輻に対する**ドローン飛行制御**の基礎実験
5. まとめ



出典：政府広報オンライン、「Society5.0」の動画と解説を公開
<https://ict-eneews.net/2018/01/05gov-online/> (ICT教育ニュース、2018年1月5日)



出典：Society 5.0 ビッグデータ連携がもたらす未来社会像 動画1
https://www.cao.go.jp/lib_006/society5_0/society5_0_bigdata1.html (内閣府)

有線給電(テザードローン)

バッテリーの空中交換

ワイヤレス電力伝送

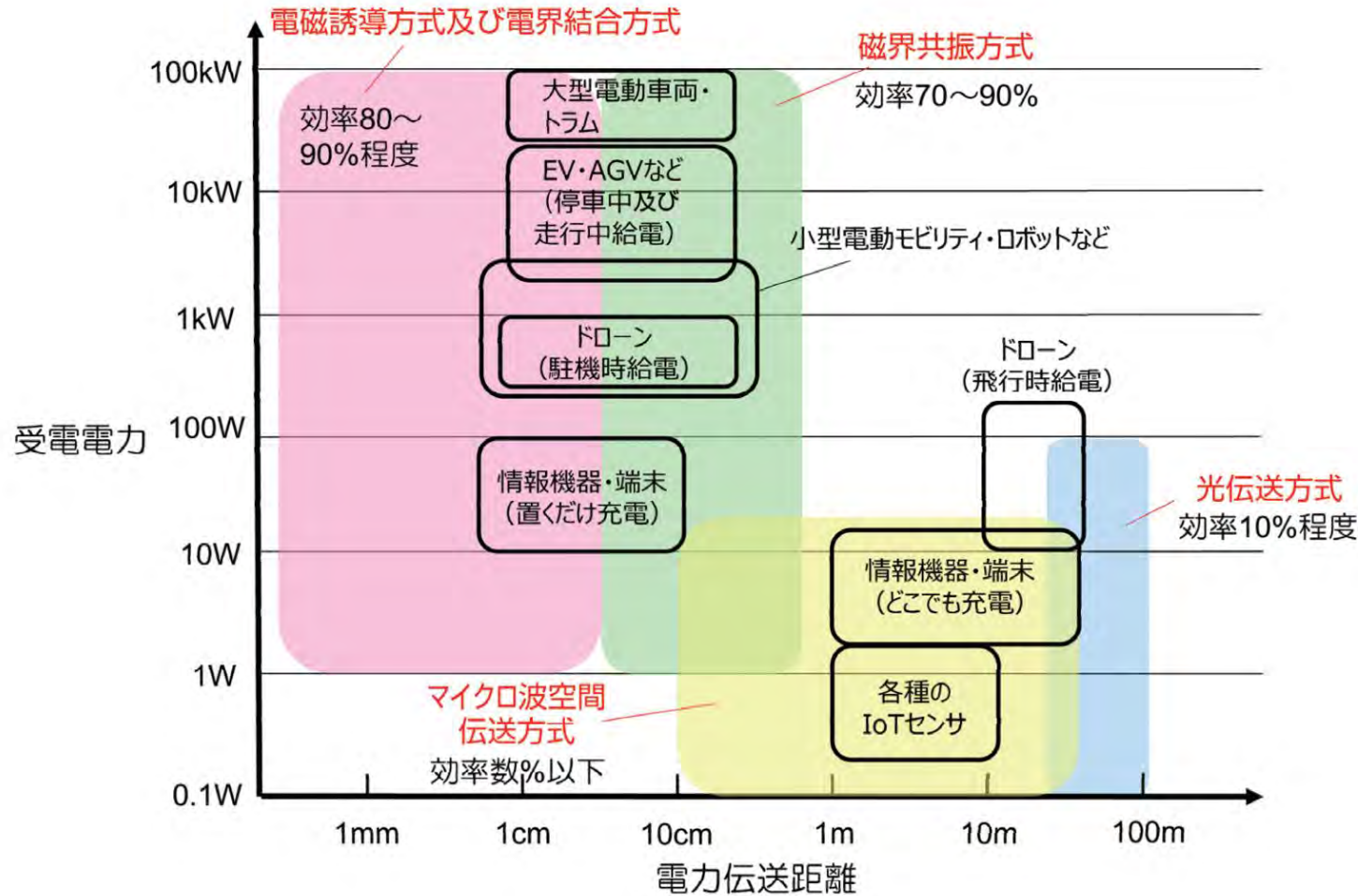


出典: Kite - Tethered Drone System
<https://www.mistralsolutions.com/homeland-security/products/mistral-kite/>

出典: K. P. Jain and M. W. Mueller, IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), IEEE, 2020, pp. 3510–3516.

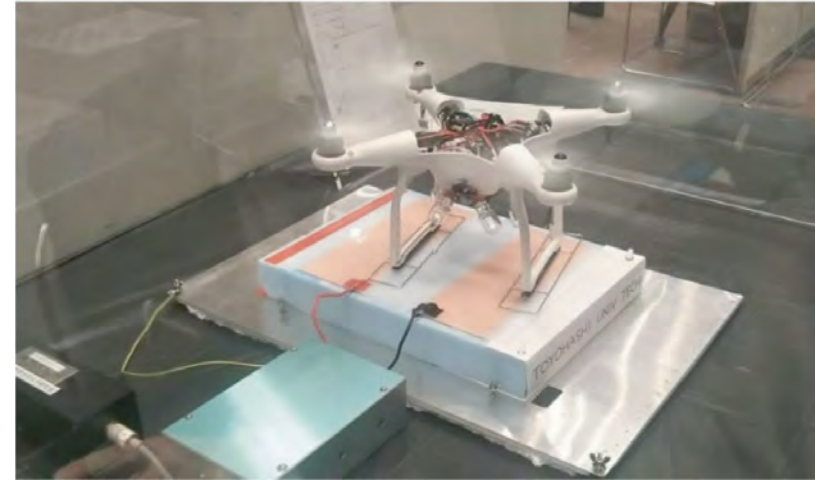
出典: 金沢工業大学(2020年9月23日プレスリリース)
https://www.kanazawa-it.ac.jp/kitnews/2020/0923_itoh.html

ドローンへのワイヤレス電力伝送(各種方式)

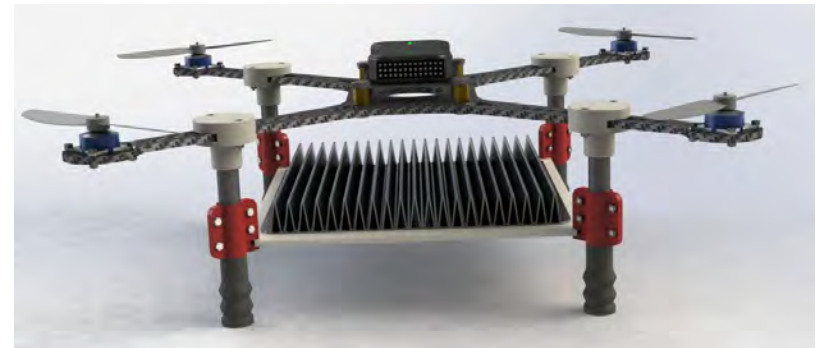


(※) 効率は電源を含めた伝送システム全体の効率を示す

出典: 庄木祐樹, "Society 5.0 に貢献するワイヤレス電力伝送システムー実用化に向けた課題と取り組みー," 通信ソサイエティマガジン, No. 57, pp.7-14, 2021.

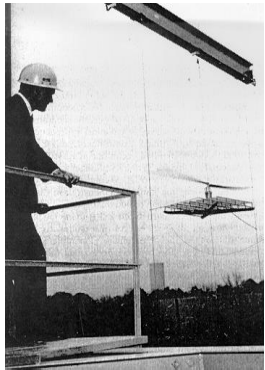


出典: 濱田浩, "ドローン給電のためのWPTシステム," 電子情報通信学会誌, Vol.103, No.10, pp.1037-1042, 2020.



出典: 中国日报网(2022-12-30)
<https://shx.chinadaily.com.cn/a/202212/30/WS63ae4443a3102ada8b22907e.html>

これまでの研究事例(マイクロ波方式)



Brown, 1964

高度 18 m
駆動電力 270 W
飛行時間 10 時間
全重量 N/A



SHARP, 1987

高度 150 m
駆動電力 150 W
飛行時間 20 分以上
全重量 4.1 kg



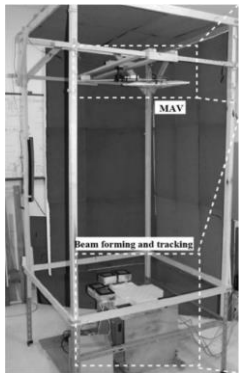
MILAX, 1992

高度 約 15 m
駆動電力 88 W
飛行時間 40 秒間
全重量 4 kg



ETHER, 1995

高度 約 50 m
受信電力 5.9 kW
飛行時間 3 分間(定点停止)
レクテナ重量 22.8 kg



東京大学, 2017

高度 1.5 m
受信電力 24 mW



三菱電機, 2019

高度 19 m
受信電力 105 W



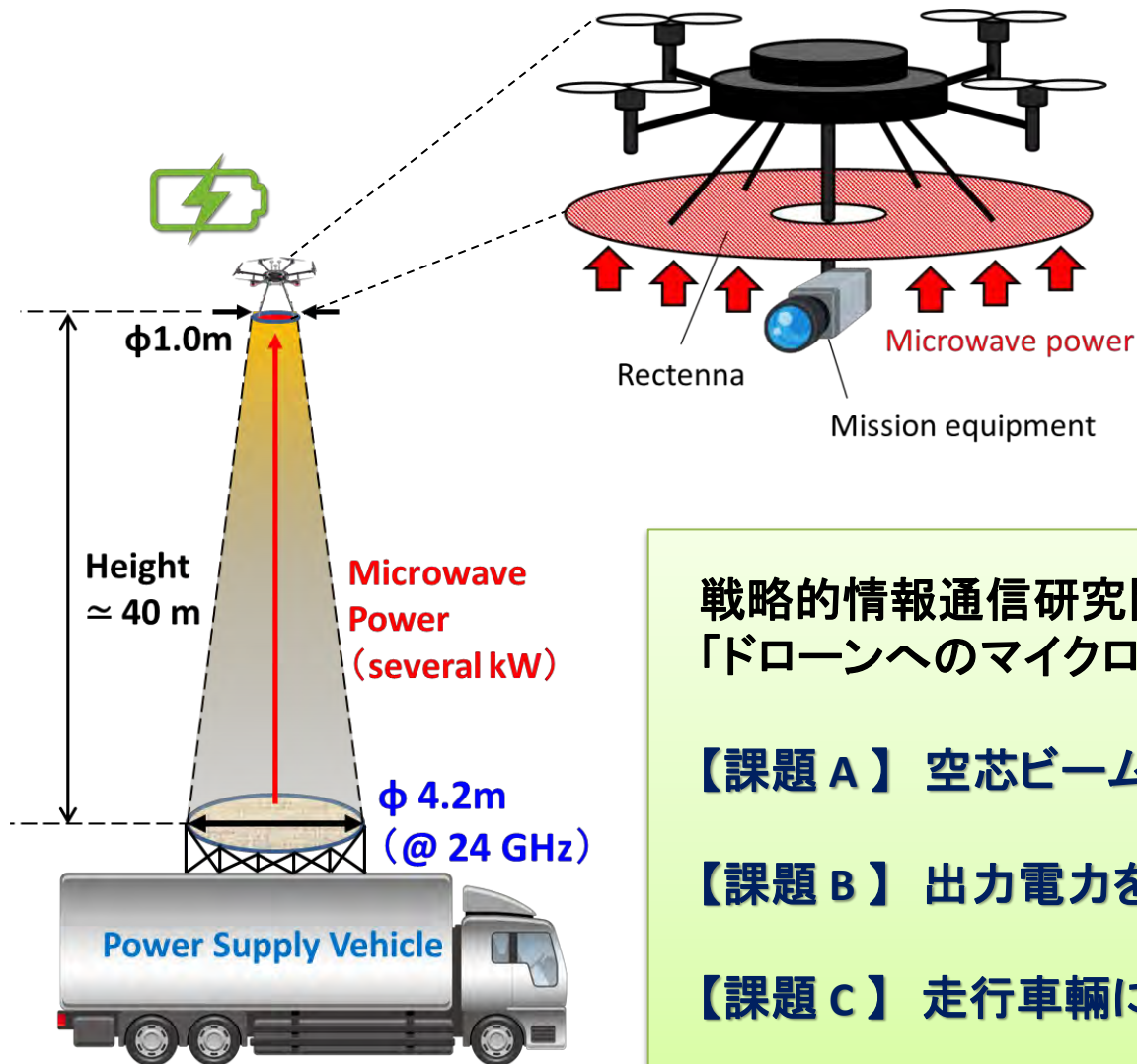
筑波大学, 2020

高度 約 30 cm
受信電力 30 mW(動作周波数 28 GHz)



京都大学, 2021

高度 約 1 m
駆動電力 27.3 W



課題: ドローン下部に取り付けるレクテナパネルがミッション機器と電波的・物理的に干渉する

⇒ 中心の強度が最も弱くなる
「空芯ビーム」を適用することを提案

戦略的情報通信研究開発推進事業(SCOPE)先進的電波有効利用型 令和4年度「ドローンへのマイクロ波送電に向けた空芯ビーム形成に関する研究開発」

【課題 A】 空芯ビームを形成する送電アンテナの開発

【課題 B】 出力電力を用いたドローンの相対位置検出

【課題 C】 走行車輛に対するドローン飛行制御の実現

1. ドローンへのワイヤレス電力伝送の概要
2. ラゲールガウシアンモードを用いた**空芯ビーム**の形成
3. 受信電力を用いた相対ビーム位置の検出
4. 走行車輻に対するドローン飛行制御の基礎実験
5. まとめ

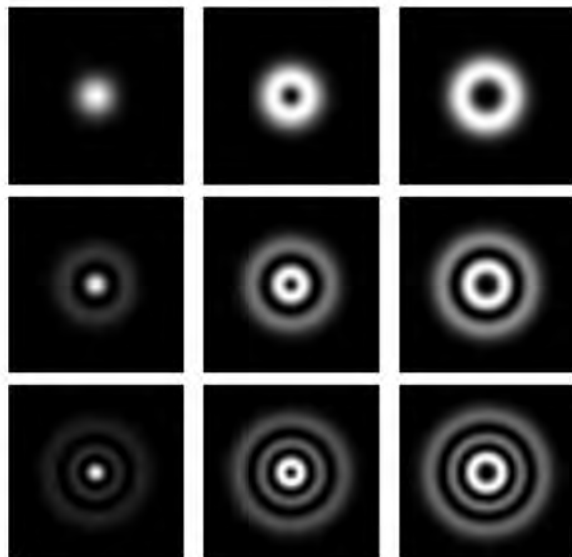
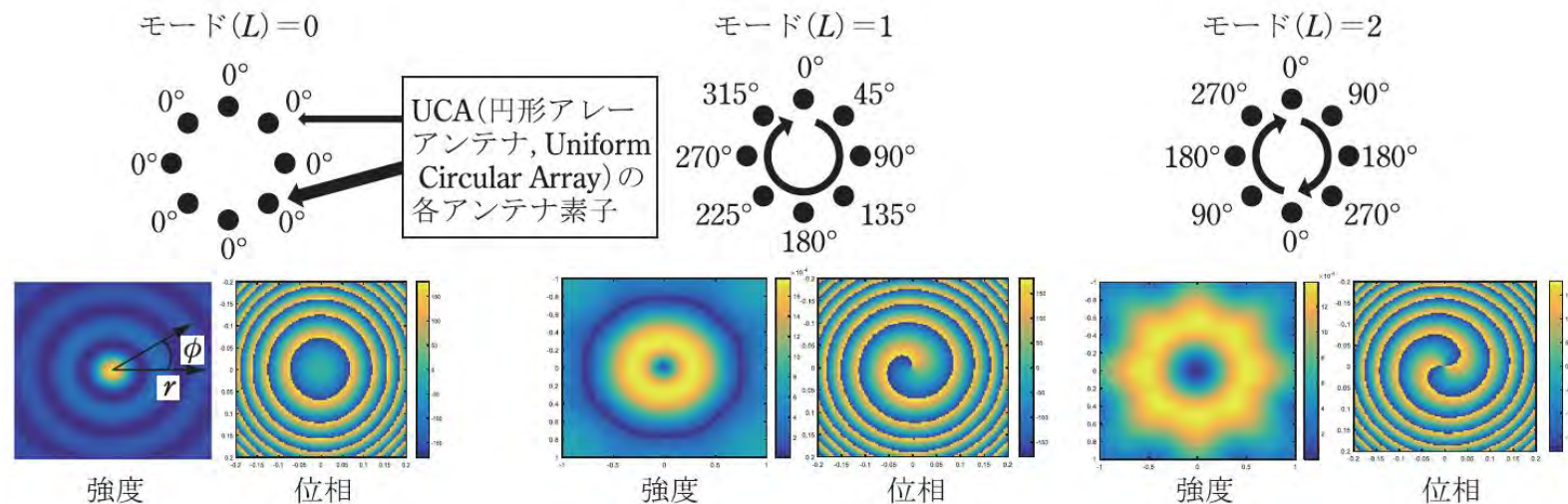


図1 LG ビームの強度分布 (左から $m=0, 1, 2$, 上から $p=0, 1, 2$).



(a) OAM生成: 各アンテナに位相差を付けた信号を挿入

宮本洋子, 和田篤,
“ラゲールガウスビームの発生と検出,”
光学, 35巻, 12号, pp.618-624, 2006.

荒木純道, 李斗煥,
“空間多重化としてのOAM伝送,”
電子情報通信学会誌, 100巻, 8号, pp.854-858, 2017.

ビーム放射軸を中心に回転する位相分布により、中心が**位相特異点**となる

■ビーム強度

$$\begin{aligned}
 LG_p^m(r, \varphi, z) &= \frac{E_0}{w} \sqrt{\frac{2p!}{\pi(p+|m|)!}} \left(\frac{\sqrt{2}r}{w}\right)^{|m|} L_p^{|m|}\left(\frac{2r^2}{w^2}\right) \\
 &\exp\left\{-r^2\left(\frac{1}{w^2} - \frac{jk}{2R}\right) + jm\varphi - j(2p+|m|+1)\Psi\right\}
 \end{aligned}$$

■ビーム幅

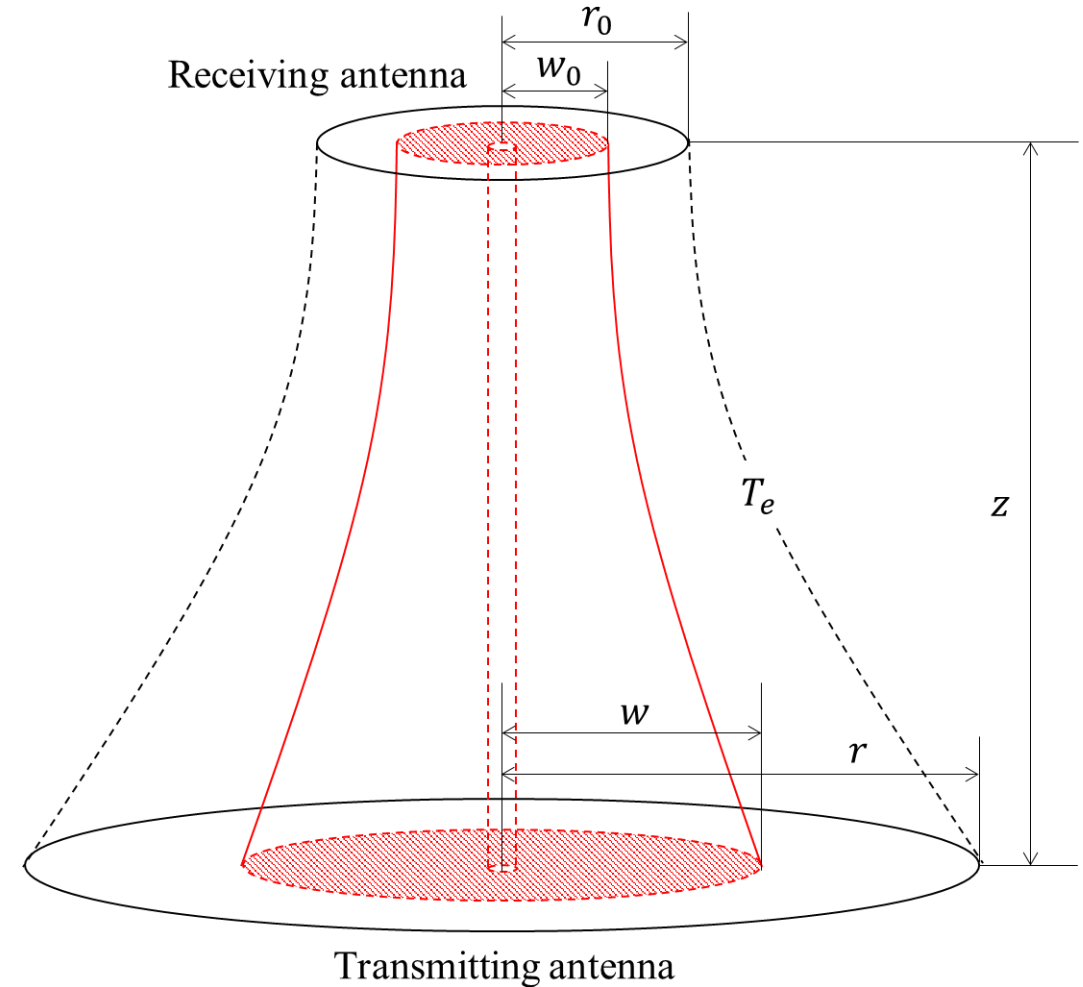
$$w = w_0 \sqrt{1 + \left(\frac{z}{z_c}\right)^2}$$

■分散

$$\sigma = w\sqrt{2p + |m| + 1}$$

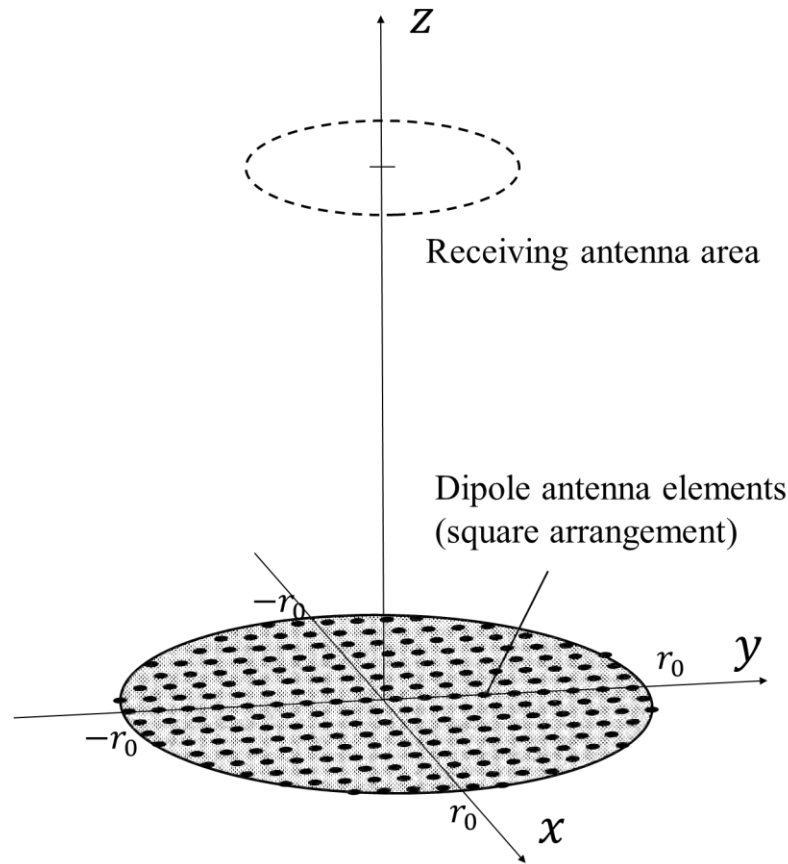
■アンテナ径

$$r_0 = \sigma_0 \sqrt{\frac{-\log\{T_e(2p + |m| + 1)\}}{2}}$$



次数 m によって定まる周方向の位相回転量に応じて、空芯領域の大きさが変化する

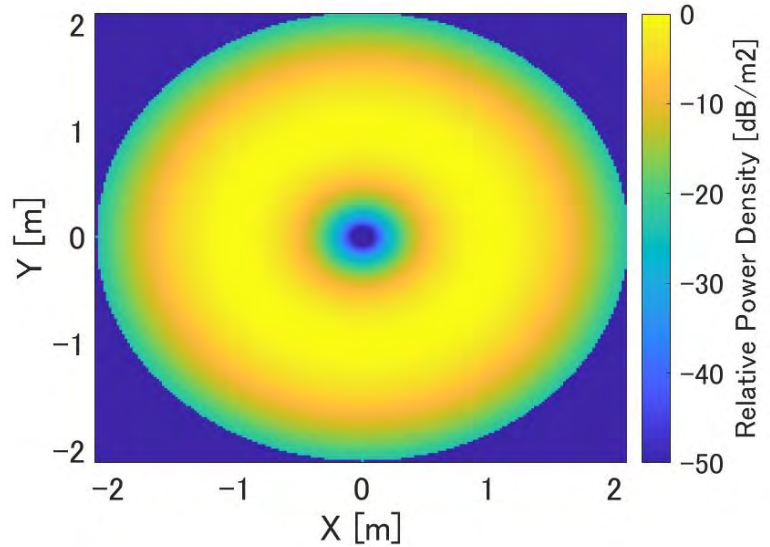
アレーアンテナによる空芯ビーム形成シミュレーション



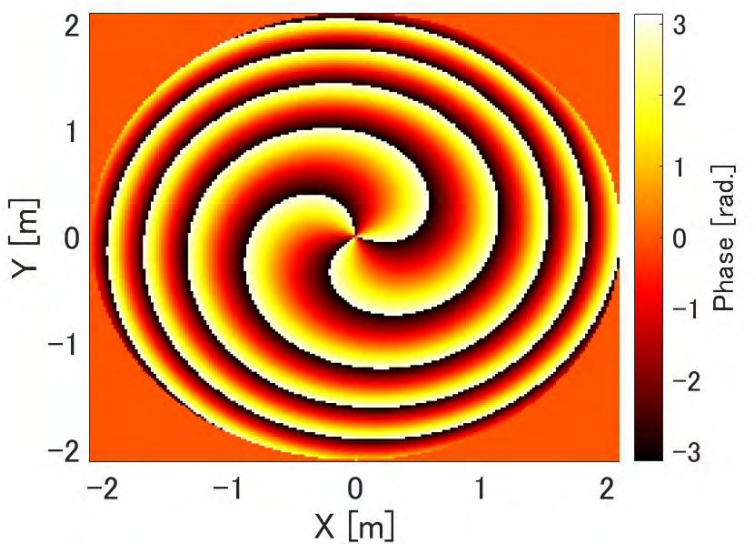
シミュレーションモデル

設計周波数: 24 GHz
送信アンテナ直径: 4.2 m
アンテナ素子間隔: 0.7 波長
アンテナ素子数: 1.8×10^4 個

$m = 3$
 $z = 40$ m
 $T_e = 20$ dB
 $r_0 = 0.5$ m

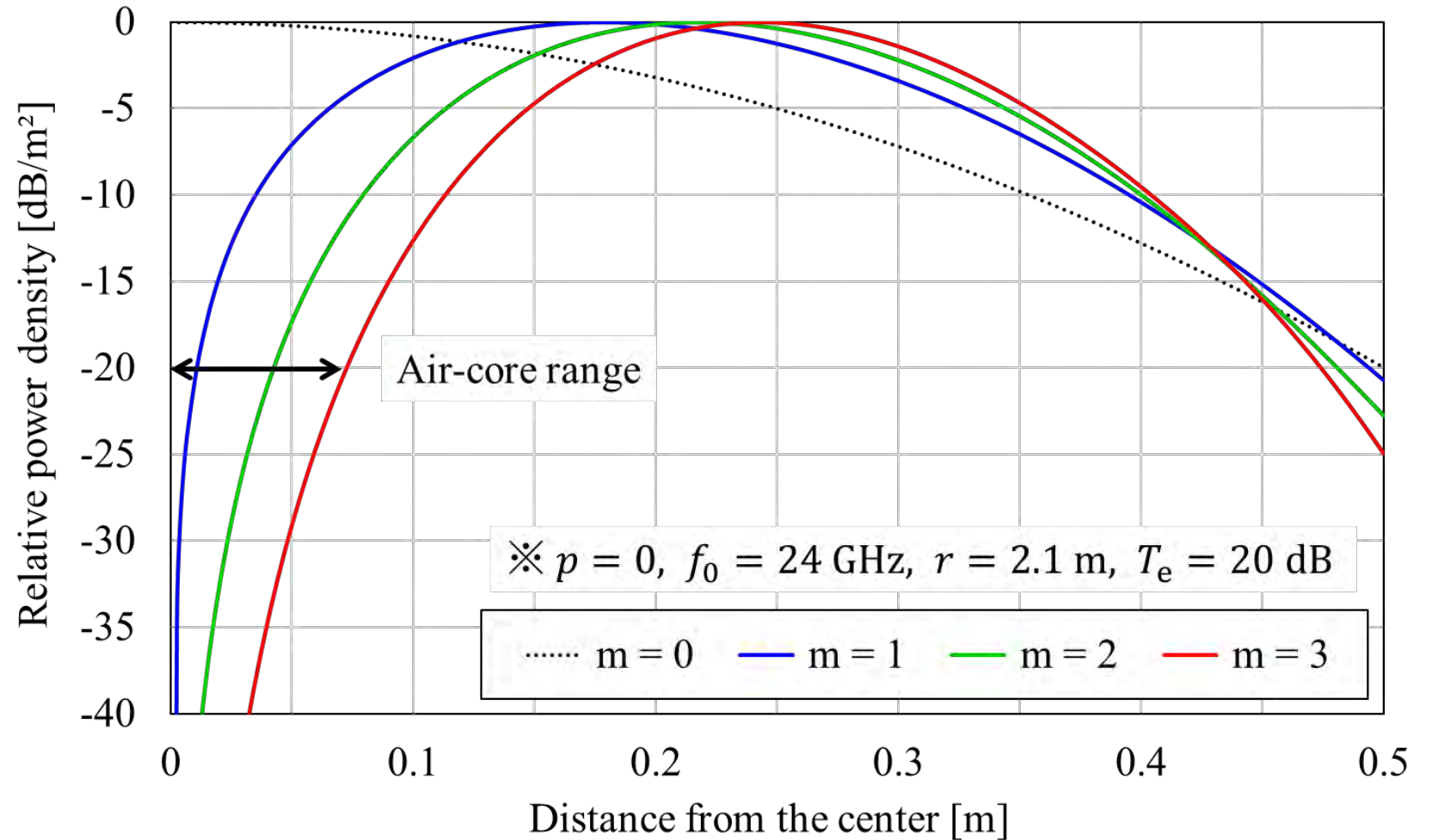
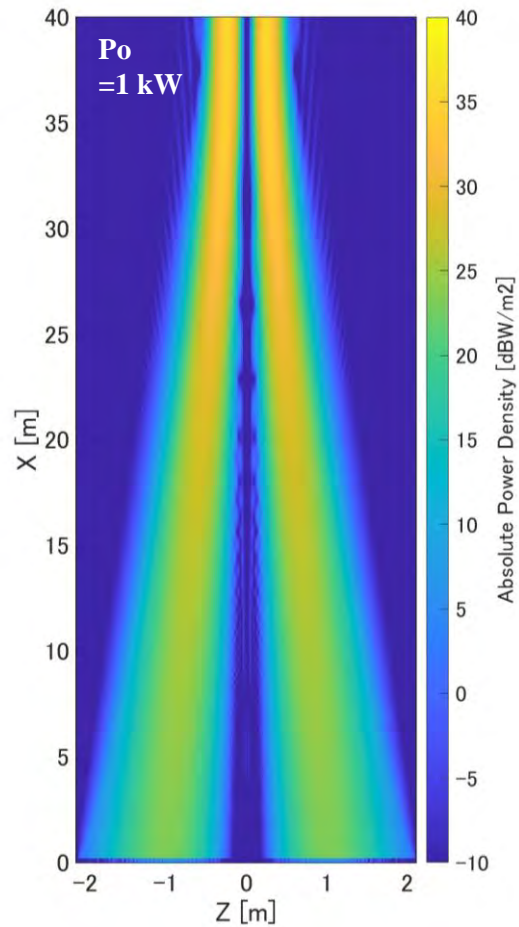


入力振幅分布



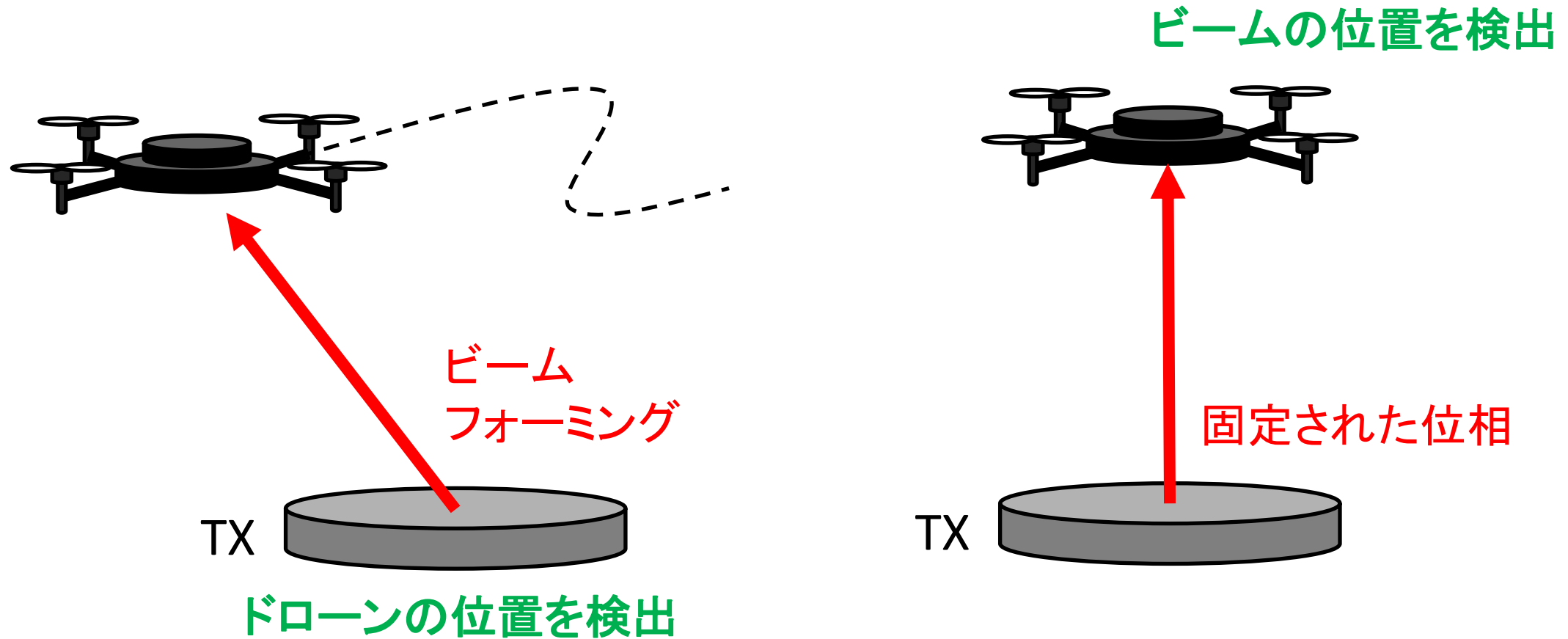
入力位相分布

各アンテナ素子からの放射電界の合成により全体のビーム電磁界を計算した

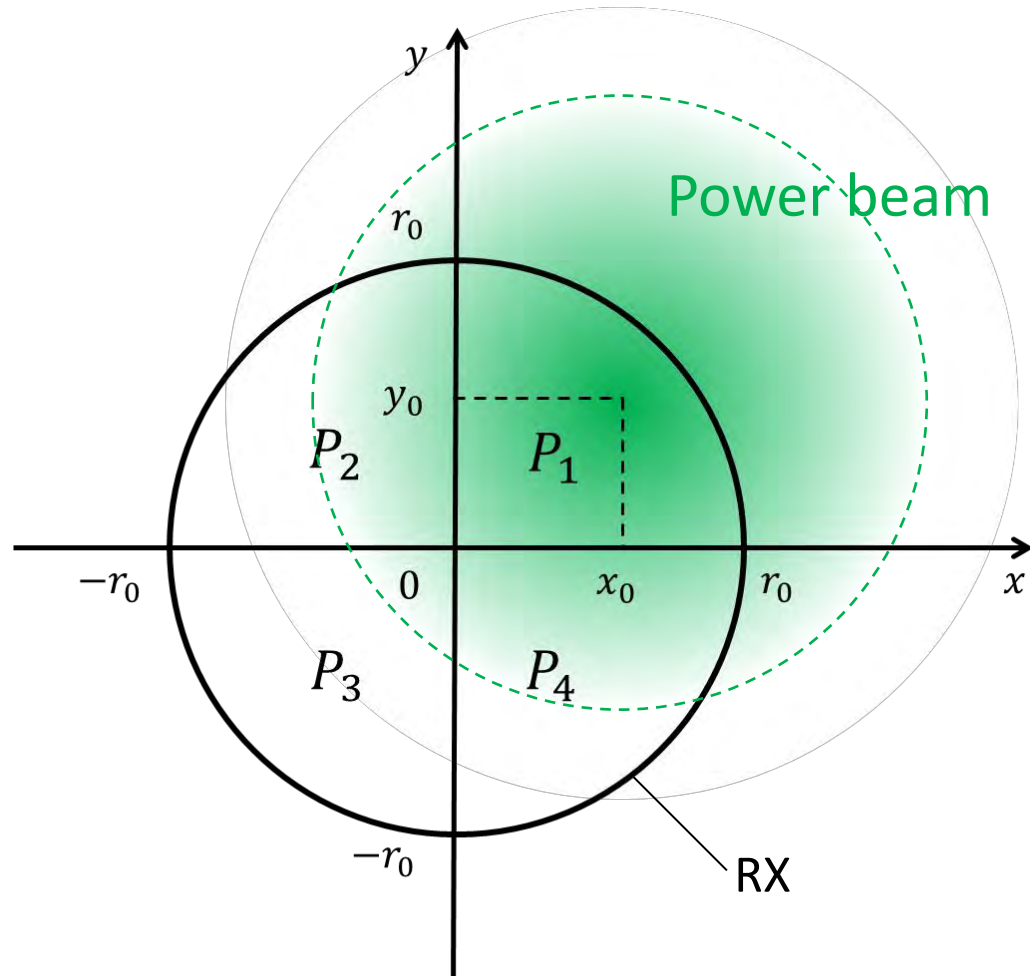


回転する位相分布により空芯ビームが形成されることが確かめられた

1. ドローンへのワイヤレス電力伝送の概要
2. ラゲールガウシアンモードを用いた空芯ビームの形成
3. 受信電力を用いた**相対ビーム位置**の検出
4. 走行車輻に対するドローン飛行制御の基礎実験
5. まとめ



ドローン自身が最適な充電スポットに移動することで移相器のコストが削減できる



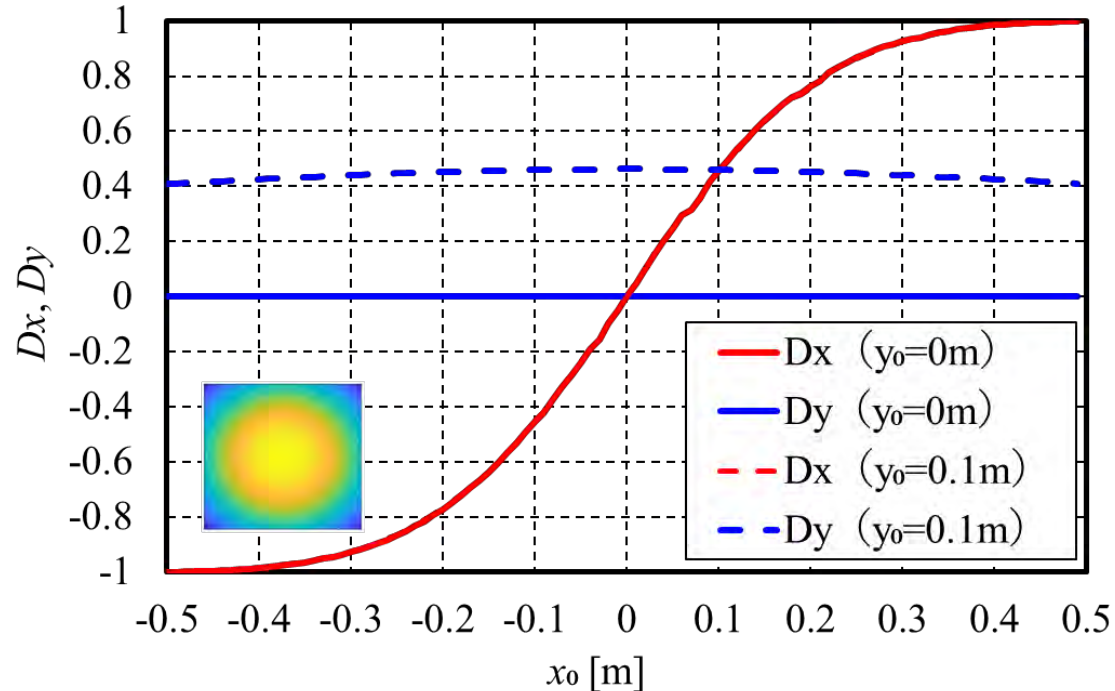
検出量の定義

$$D_x(x_0) = \frac{(P_1 + P_4) - (P_2 + P_3)}{P_1 + P_2 + P_3 + P_4}$$

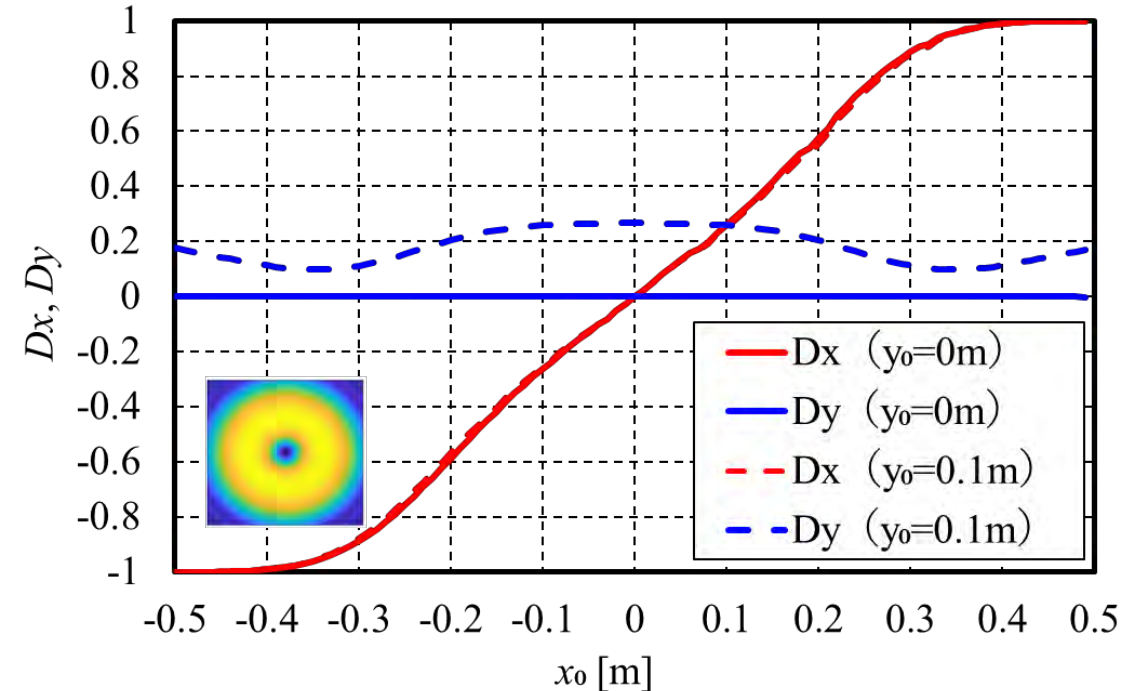
$$D_y(y_0) = \frac{(P_1 + P_2) - (P_3 + P_4)}{P_1 + P_2 + P_3 + P_4}$$

4分割したレクテナにおける出力電力のレベル差から相対ビーム位置を検出する

ペンシルビーム ($m = 0$) の場合



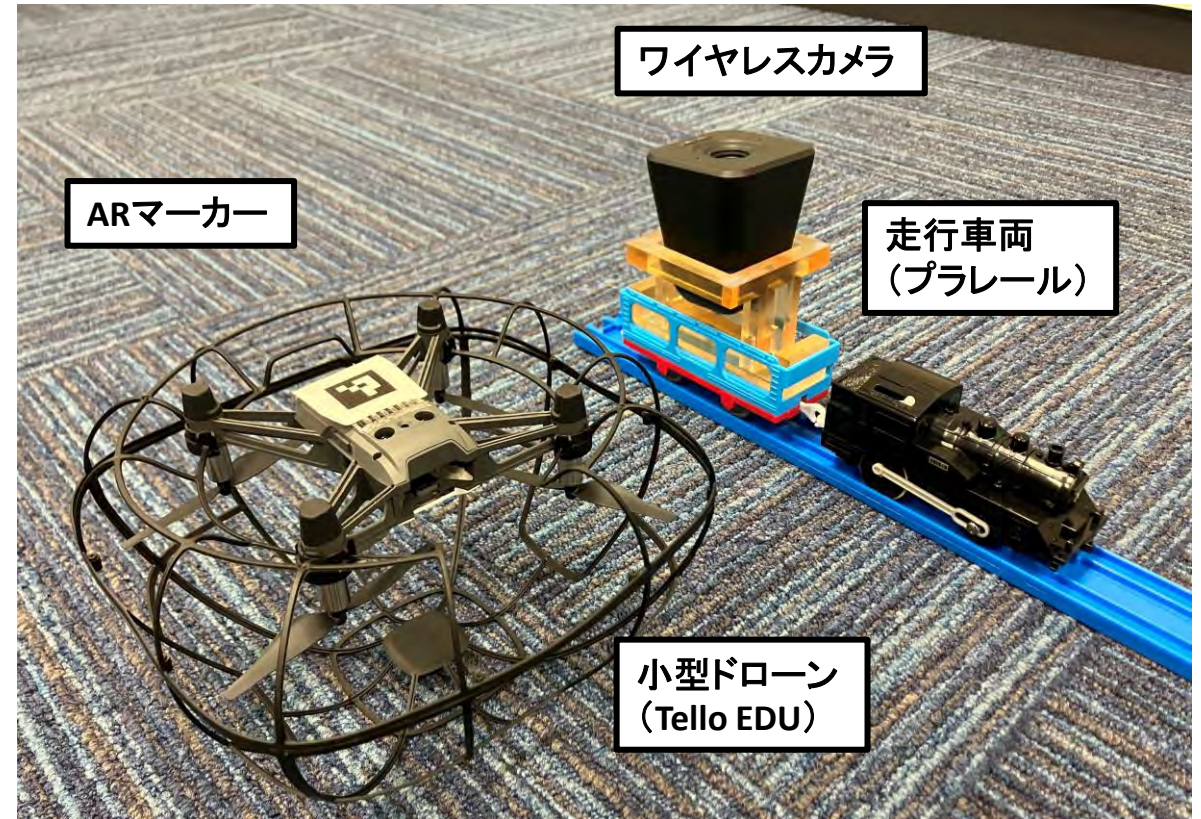
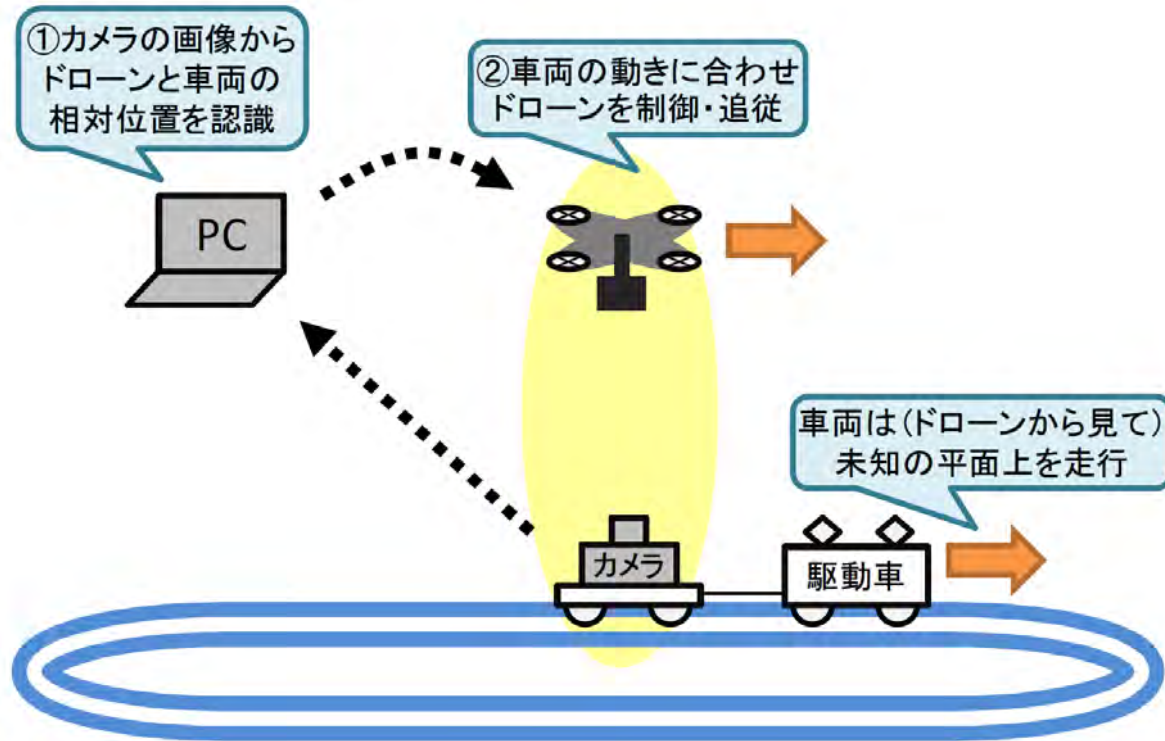
空芯ビーム ($m = 3$) の場合



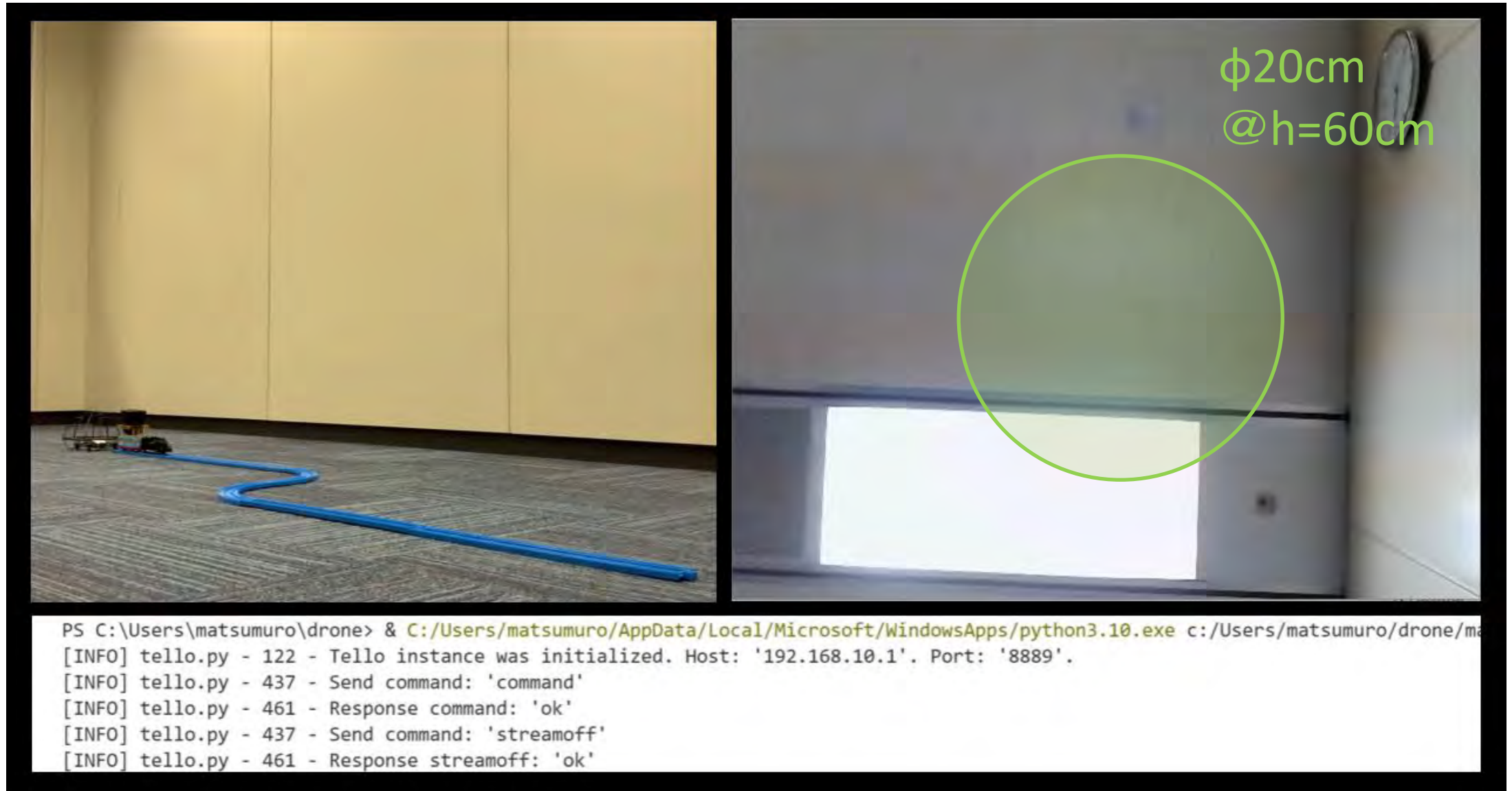
空芯ビームにおいても相対ビーム位置に応じた検出量が得られることが示された

1. ドローンへのワイヤレス電力伝送の概要
2. ラゲールガウシアンモードを用いた空芯ビームの形成
3. 受信電力の変動を用いた相対ビーム位置の検出
4. 走行車輻に対する**ドローン飛行制御の基礎実験**
5. まとめ

走行車両に対するドローン飛行制御の基礎実験



ARマーカーを用いてドローン位置を検出し、走行車両を追従するように制御した



- ミッション機器との干渉を回避するため、**空芯ビームによるドローンへのワイヤレス電力伝送**を提案した。
- レクテナにおける出力電力のレベル差により、**ドローンに対する相対ビーム位置が検出できる**ことを示した。
- 今後、走行車輻(電源車)に対し**ドローンを自動で追従させるための基礎的な実験**を行った。

謝辞： 本研究開発は総務省SCOPE(受付番号JP225007002)の委託を受けたものです。