

飛行中ドローンへの無線電力伝送を想定した 受電コイルのピッチ角依存の結合係数のモデル化とその検証

藤本 浩太*, 横田 健太郎, 永井 栄寿, 藤本 博志 (東京大学)

Modeling and Verification of Pitch-Dependent Coupling Coefficient for WPT to Flying Drone

Kota Fujimoto*, Kentaro Yokota, Sakahisa Nagai, Hiroshi Fujimoto (The University of Tokyo)

There is a big problem with drones in which their battery capacities are very small. The use of wireless power transfer (WPT) is suggested as one of the solutions to this problem. Especially for realizing the delivery system by drones, in-flight WPT is valid to shorten the total flying time and enable more efficient operation. In this paper, the theoretical expression of the pitch-dependent coupling coefficient is introduced because a drone inclines its attitude when flying forward. By using Biot-Savart's law, the expression which depends on its position and pitch angle is derived. The simulation and experimental results demonstrate that the proposed expression is accurate enough, which will be used for future power control schemes for WPT.

キーワード：ドローン, 飛行中無線電力伝送, ビオ・サバルの法則, ピッチ角依存の結合係数
(drone, in-flight wireless power transfer, Biot-Savart's law, pitch-dependent coupling coefficient)

1. 序論

近年急速に発展するドローンの活用分野の1つに、物流がある。海外では Amazon 社の Amazon Prime Air というサービスが注目されており⁽¹⁾, 日本においても ANA が主体となって離島への宅配サービス等が進められている⁽²⁾。

ドローンによる物流を実現する際の障壁として、バッテリーを動力源にするがゆえの航続時間が短さが挙げられる。この問題はドローンだけでなく、電動航空機一般に関する問題でもある。解決策の1つとしては、電動航空機の性能を上げることが考えられ、過去にはプロペラの推力配分最適化による航続距離延長制御⁽³⁾等が行われている。一方これらとは異なるアプローチとして、無線電力伝送 (WPT: Wireless Power Transfer) により電力を供給するという手法が存在する。

WPT により航続距離の短さをカバーする手法の1つとして、道中で停止給電を行うことが挙げられる⁽⁴⁾。一方、それとは一線を画すシステムとして、飛行中のドローンに対し給電を行うことが考えられる。飛行中給電のメリットとしては、着陸をせずに済むので再始動によるエネルギーロスがなくなること、トータルの稼働時間が短くなることが挙げられる。また飛行中給電では1つの給電スポット当たりの機体回転率を上げられる等のメリットも存在する。ドローンへの飛行中給電に関する研究としては、ホバリング中のドローンへ給電を行うもの⁽⁵⁾, 3次元形状の中継コイルを用いることで伝達効率の向上を図るもの等がある⁽⁶⁾。一方で、一定速度で直線的に飛行するドローンに対し直接給電を行うような検討は、著者らの知る限り行われていない。

図1は送電コイル上で一定速度で直線的に飛行するようなドローンのイメージ図である。この時ドローンは水平面に対して一定の角度を持って飛行する。それに伴ってドローンに搭載される受電コイルも、送電コイルに対して一定の角度を持つようになるが、そのような状況下で結合係数のモデル化

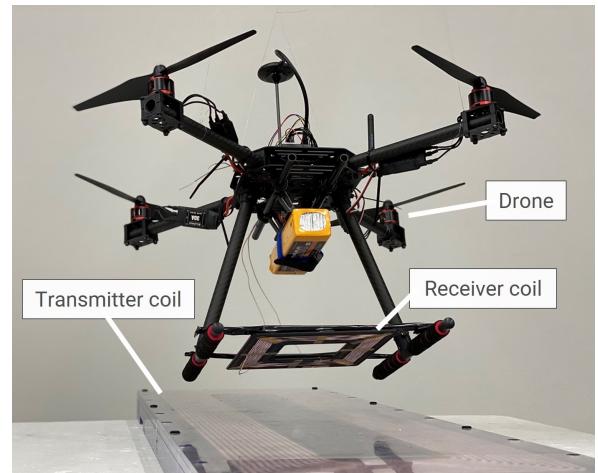


図1 送電コイル上で直線運動をするドローンへの飛行中給電 (イメージ)

が行われた例はまだ無い。

本稿は飛行中ドローンへの給電を考える上での結合係数 k の変化に焦点を置いた論文である。ドローンは直線飛行中、一定のピッチ角を維持することから、受電コイルが水平面に対し一定の角度を持つようになることに注目する。その条件下でビオ・サバルの法則を適用することで、角度依存の結合係数の理論式を導出する。得られたモデルの妥当性は実験により検証する。また結合係数変化が伝送される電力に与える影響を評価することで、角度を考慮した本手法の精度が十分であることを示す。

2. 結合係数のモデル化と精度評価の概要

〈2・1〉 結合係数のモデル化 座標系を図2に定義する。以下では頂点を点 A, B, C, D とする長さ $2l$, 幅 $2t$ の長方形型送電コイルを考える。線分 AC と線分 BD の交点を原点に取

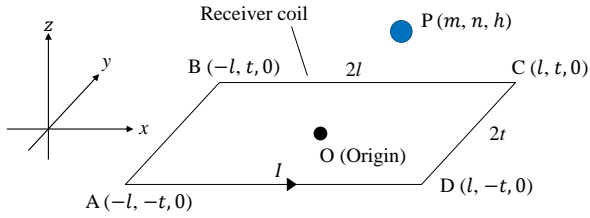


図2 座標定義

り、電流 I は図2の矢印の向きに流れるものとする。

送電コイルに電流 I が流れることにより点 $P(m, n, h)$ に生じる磁束密度 \mathbf{B} は、ビオ・サバルの法則により、

$$\begin{aligned} \mathbf{B} &= \frac{\mu_0 I}{4\pi} \oint_L \frac{d\mathbf{l} \times \mathbf{r}}{r^2} \\ &= \frac{\mu_0 I}{4\pi} \left\{ \int_{AB} \frac{d\mathbf{l} \times \mathbf{r}}{r^2} + \int_{BC} \frac{d\mathbf{l} \times \mathbf{r}}{r^2} + \int_{CD} \frac{d\mathbf{l} \times \mathbf{r}}{r^2} + \int_{DA} \frac{d\mathbf{l} \times \mathbf{r}}{r^2} \right\} \quad (1) \end{aligned}$$

と表される。区間 AB 上 $(m, y, 0)$ を流れる電流によって点 P に生じる磁束密度 \mathbf{B}_{AB} は、

$$\begin{aligned} \mathbf{B}_{AB} &= \frac{\mu_0 I}{4\pi} \int_{AB} \frac{d\mathbf{l} \times \mathbf{r}}{r^2} \\ &= -\frac{\mu_0}{4\pi} I \frac{1}{(m+l)^2 + h^2} \begin{pmatrix} \frac{n+t}{\sqrt{(n+t)^2 + (m+l)^2 + h^2}} \\ -\frac{n-t}{\sqrt{(n-t)^2 + (m+l)^2 + h^2}} \\ -(m+l) \end{pmatrix} \quad (2) \end{aligned}$$

と計算できる。同様にして、区間 BC, 区間 CD, 区間 DA 上の電流により点 P に生じる磁束密度 $\mathbf{B}_{BC}, \mathbf{B}_{CD}, \mathbf{B}_{DA}$ も計算することができる。

次にこれら磁束密度により受電コイルに生じる磁束 Φ について考える。図3(a)のような面積 S の受電コイルを、その重心位置と点 P が一致するように配置する。この受電コイルは図3(b)のように、 x 軸に対し角度 θ をなしている。この受電コイルが載る平面の単位法線ベクトルを \mathbf{n} とし、図3(b)のように始点が点 P と一致するように取る。この時 \mathbf{n} は、

$$\mathbf{n} = \begin{bmatrix} \sin\theta & 0 & \cos\theta \end{bmatrix}^T \quad (3)$$

と表される。送電コイルに対し、受電コイルは十分に小さく、点 P 付近で磁束密度は一定と見なせると仮定すると、受電コイルに生じる磁束 Φ は、

$$\Phi = (\mathbf{B} \cdot \mathbf{n}) S \quad (4)$$

と書くことができる。 $\mathbf{B}_{AB}, \mathbf{B}_{BC}, \mathbf{B}_{CD}, \mathbf{B}_{DA}$, 式(3)および式(4)より Φ を計算し、1巻当たりの相互インダクタンス $M_0 = \Phi/I$ を求めると、式(5)が求まる。ただし簡単のため m, n, d を、

$$\begin{aligned} M &= \frac{\mu_0 S}{4\pi} \left[\frac{z \sin\theta - (x+l) \cos\theta}{(x+l)^2 + z^2} \left\{ \frac{y+t}{\sqrt{(x+l)^2 + (y+t)^2 + z^2}} - \frac{y-t}{\sqrt{(x+l)^2 + (y-t)^2 + z^2}} \right\} + \frac{(y-t) \cos\theta}{(y-t)^2 + z^2} \left\{ \frac{x+l}{\sqrt{(x+l)^2 + (y-t)^2 + z^2}} - \frac{x-l}{\sqrt{(x-l)^2 + (y-t)^2 + z^2}} \right\} \right. \\ &\quad \left. + \frac{z \sin\theta - (x-l) \cos\theta}{(x-l)^2 + z^2} \left\{ \frac{y+t}{\sqrt{(x-l)^2 + (y+t)^2 + z^2}} - \frac{y-t}{\sqrt{(x-l)^2 + (y-t)^2 + z^2}} \right\} + \frac{(y+t) \cos\theta}{(y+t)^2 + z^2} \left\{ \frac{x+l}{\sqrt{(x+l)^2 + (y+t)^2 + z^2}} - \frac{x-l}{\sqrt{(x-l)^2 + (y+t)^2 + z^2}} \right\} \right] \quad (5) \end{aligned}$$

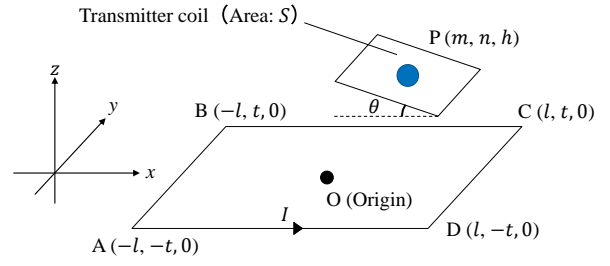


図3 受電コイルを貫く磁束の検討図 (a) 全体図 (b) xz 平面への正射影図

それぞれ x, y, z で置き換えている。

送電コイルおよび受電コイルの自己インダクタンスをそれぞれ L_1, L_2 とすると、式(5)を用いて、1巻当たりの結合係数 $k_0 = M_0 / \sqrt{L_1 L_2}$ を求めることができる。実際には送電コイルの巻数 N_1 , 受電コイルの巻数 N_2 , 送電コイルの平均半径 l_m , 平均半幅 t_m , 受電コイルの平均面積 S_m を考慮して計算を行う。ただし、ここでの平均は、コイルの外径と内径の相平均を用いて算出される量を意味している。

またフェライトの影響について、Song らはコア係数 $a_c < 2.0$ をかけることで考慮することができるとしている⁷⁾。本論文では実験の測定値および理論値を比較し a_c (定数) を求め、それを用いてフェライトありの結合係数のモデル化を行う。最終的に得られるシステムの結合係数 k は、 k_0 を用いて次のように表される。

$$k = N_1 N_2 a_c k_0(x, y, z, \theta; l_m, t_m) \quad (6)$$

〈2・2〉 精度評価の概要 全体重量 15 kg のドローンに対し、磁界共振方式により給電を行う状況を考える。磁界共振方式を採用する理由は、位置ずれに強く、効率が高い動的給電システムの構築を目指すためである。このようなドローンが飛行し続けるためには 3 kW の送電が必要であると言われている。今、図4のような SS 方式の回路を考えると、最適

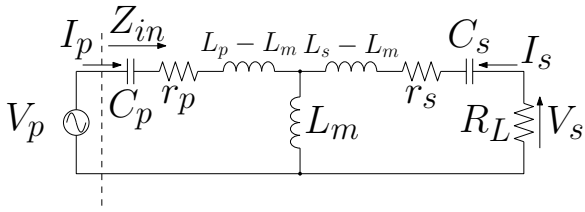


図4 SS方式の等価回路

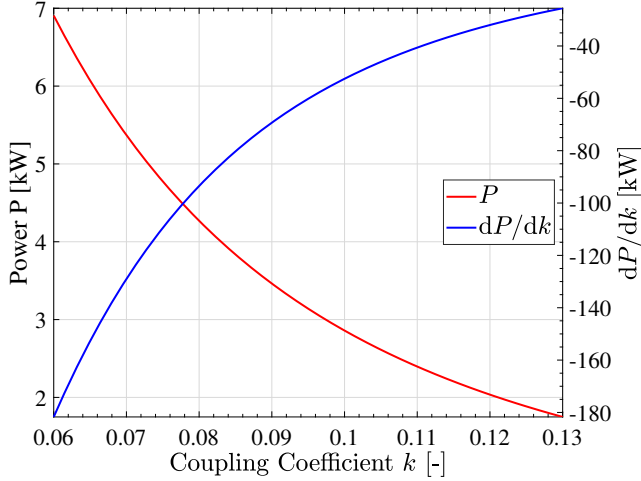


図5 結合係数 k と最適負荷時の2次側出力 P_{Lopt} の関係

負荷時の2次側出力 P_{Lopt} は、

$$P_{Lopt} = \frac{R_{Lopt} L_p L_s \omega^2 k^2}{\left\{ L_p L_s \omega^2 k^2 + r_p (r_s + R_{Lopt}) \right\}^2} V_p^2 \quad (7)$$

と表すことができる⁽⁸⁾。式(7)をもとに、 k と P 、さらには k と dP/dk の関係図を描くと、図5のようになる。ただし電力伝送では結合係数が高い領域を積極的に利用することに注目し、 $0.06 \leq k \leq 0.14$ の領域について図示を行った。またドローンの2次側負荷はバッテリー(定電圧負荷)であり、その電圧としては48Vの採用が多いことから $V_s = 48V$ とした。 V_p と V_s の関係式、

$$V_s = \frac{\omega L_m R_L}{(\omega L_m)^2 + r_p (r_s + R_L)} V_p \quad (8)$$

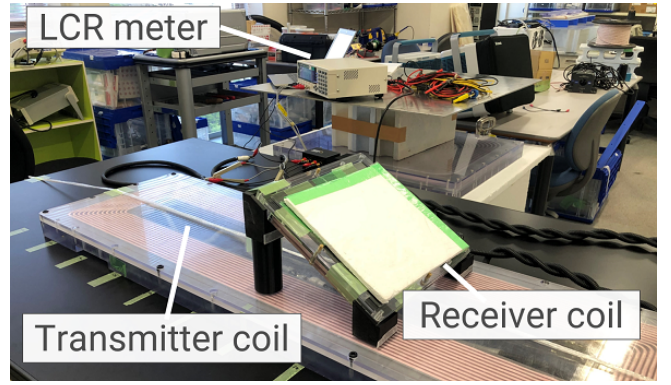
から送電側電圧 V_p を求め、受電電力を計算した。コイルパラメータは実験で使用した値を使用し、表1に記載した。

図5から $|dP/dk| \approx 1.0 \times 10^5$ であり、結合係数が 1.0×10^{-2} だけ変動すると、伝送電力は1kWだけ変動することが分かる。10000mAhのバッテリー容量、25Cの充放電特性を持つバッテリーを検討すると、充電電力最大値は12kWであり、図5より結合係数変動を0.09以下に抑える必要がある。

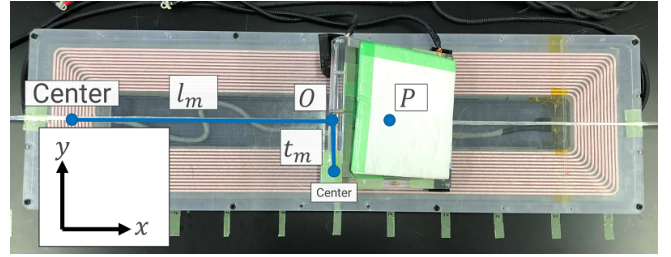
3. 実験

〈3・1〉 実験概要

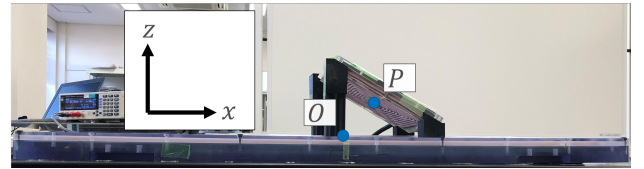
図6のように送電コイル上に受電コイルを設置し、LCRメーターを用いて結合係数の測定を行った。本実験では、受電コイルの底面の中心を位置の基準に取った。 $-0.8m \leq x \leq 0.8m$ の範囲で0.1mずつ受電コイルを移動させ、結合係数を測定した。高さは、 $z = 0.08, 0.1, 0.12m$ の3通り、角度は、 $\theta = 0^\circ, 10^\circ, 20^\circ, 30^\circ$ の4通りで測定を行った。



(a)



(b)



(c)

図6 実験機 (a) 全体図 (b) 上面図 (c) 側面図

表1 実験機の諸元

Parameter	Value
Air permeability μ_0	1.26 $\mu\text{H/m}$
Transmitter average half length l_m	$4.64 \times 10^{-1} \text{m}$
Transmitter average half width t_m	$8.95 \times 10^{-2} \text{m}$
Transmitter average area S_m	$1.3 \times 10^{-2} \text{m}^2$
Transmitter number of turns N_1	24
Receiver number of turns N_2	13
Transmitter inductance L_1	256 μH
Transmitter inductance L_2	96.8 μH

〈3・2〉 理論モデルの精度評価

図7は理論値と測定値の比較を行った図である。コア係数 a_c の値は、図7(a)の $x = 0m$ 、 $\theta = 0^\circ$ における測定値を、式(6)の a_c をかける前の理論値で割り、1.7と求まった。

負結合領域 ($x \leq -0.5m, 0.5m \leq x$) は、送電側のフェライトが無い領域のためコア係数が変わり、計測誤差が大きくなりやすい。また実際に電力伝送を行う際は結合係数が高い領域を積極的に利用することになる。以上2点に注意し、 $-0.4m \leq x \leq 0.4m$ を評価範囲と定義し、以下評価範囲において理論値と測定値の比較を行う。前章で示した通り、結合係数の推定誤差を $\Delta k \leq 0.09$ の範囲に抑えることに注目し、評価範囲で測定値と理論値の最大推定誤

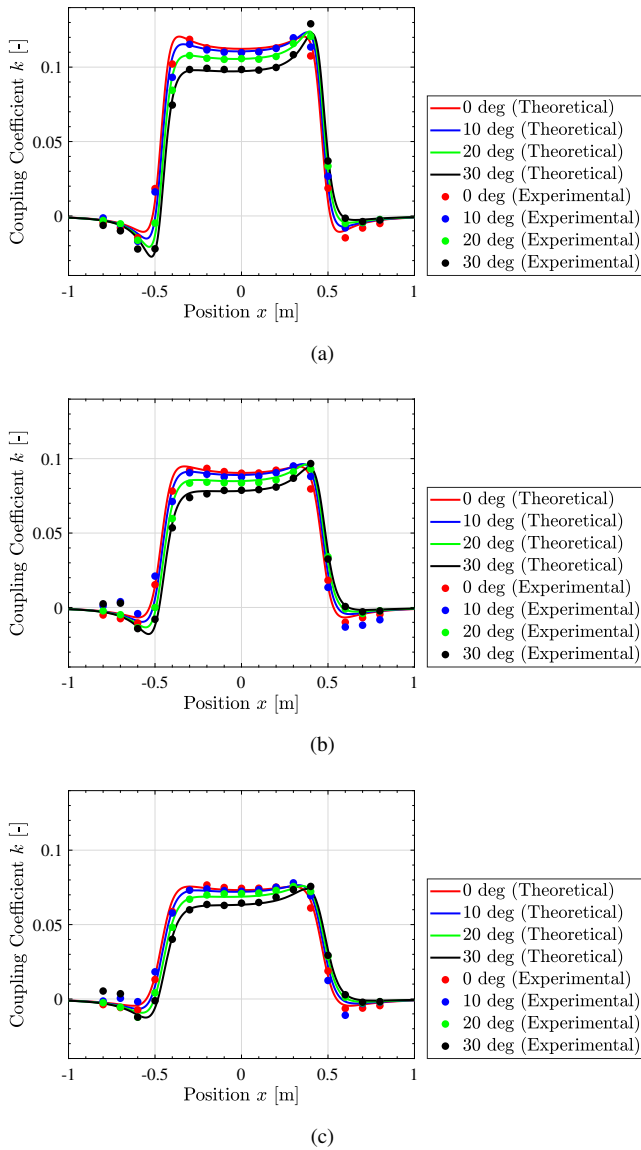


図7 測定値と理論値の比較 (a) $h = 0.08$ m の時 (b) $h = 0.1$ m の時 (c) $h = 0.12$ m の時

差 Δk_{max} を算出すると、表2のようになった。これらより、 $-0.4\text{ m} \leq x \leq 0.4\text{ m}$ の範囲においては、 $\Delta k \leq 0.09$ が十分に満たされていることが確認できる。これより理論モデルは十分な精度を達成したことが確認できた。

4. 結論

本論文では飛行中ドローンへの無線給電を想定し、受電コイルが水平面に対してピッチ角度を持つ場合の結合係数の理論式を導出した。結果の妥当性は、実機を用いた実験を通して確認した。モデルの精度については、実際のドローンを想定した電力変動許容値が満たされることより確認した。今後の研究としては、ドローンに最適なコイルを設計し、同様の結果が得られるか検証し、電力伝送実験を実施する。電力伝送実験では、本稿で提案した結合係数モデルを用いて2次側電流フィードバック制御を行う。また h と θ を制御して結合係数が一定となるような領域のみを用いて電力伝送を行う。

表2 測定値に対する理論値の最大誤差 Δk_{max} とその時の出力電力誤差 ΔP (z, θ 一定)

z [mm]	Pitch [deg]	x [m]	Δk_{max}	ΔP [W]
80	0	0.3	1.0×10^{-3}	-33.8
	10	0.3	1.5×10^{-3}	-49.4
	20	0.4	3.5×10^{-3}	-114
	30	0.4	1.12×10^{-2}	-332
100	0	-0.2	1.4×10^{-3}	-92.3
	10	0.4	6.0×10^{-4}	-44.4
	20	0.4	5.0×10^{-3}	-344
	30	0.4	8.1×10^{-3}	-519
120	0	-0.2	2.2×10^{-3}	-235
	10	0.4	2.9×10^{-3}	-400
	20	0.4	5.2×10^{-3}	-678
	30	0.4	8.1×10^{-3}	-999

また飛行中ドローンへの給電に優位性があるのかについても、シミュレーション等を通して詳細に検討を行っていく。

5. 謝辞

本研究の一部は JSPS 科研費（基盤研究 A 課題番号：18H03768）、JST 未来社会創造事業（ Grant 番号：JP-MJM17EM）の支援を受けたことを付記します。

文 献

- (1) J. Sunghun and K. hyunsu, "Analysis of Amazon Prime Air UAV Delivery Service," *Journal of Knowledge Information Technology and Systems*, vol. 12, no. 2, pp. 253–266, 2017.
- (2) "物流ドローンの共同開発に向け業務提携 | プレスリリース | ana グループ企業情報." <https://www.anahd.co.jp/group/pr/202005/20200520.html>. (Accessed on 05/30/2021).
- (3) N. Konishi, H. Fujimoto, H. Kobayashi, and A. Nishizawa, "Range extension control system for electric airplane with multiple motors by optimization of thrust distribution considering propellers efficiency," in *Proc. IEEE Industrial Electronics Annual Conference*, pp. 2847–2852, IEEE, 2014.
- (4) A. B. Junaid, A. Konoiko, Y. Zweiri, M. N. Sahinkaya, and L. Seneviratne, "Autonomous wireless self-charging for multi-rotor unmanned aerial vehicles," *Energies*, vol. 10, no. 6, pp. 1–14, 2017.
- (5) J. M. Arteaga, S. Aldhafer, G. Kkelis, C. Kwan, D. C. Yates, and P. D. Mitcheson, "Dynamic Capabilities of Multi-MHz Inductive Power Transfer Systems Demonstrated with Batteryless Drones," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 34, no. 6, pp. 5093–5104, 2019.
- (6) W. Han, K. T. Chau, C. Jiang, W. Liu, and W. H. Lam, "Design and Analysis of Quasi-Omnidirectional Dynamic Wireless Power Transfer for Fly-and-Charge," *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 55, no. 7, 2019.
- (7) B. Song, S. Cui, Y. Li, and C. Zhu, "A Fast and General Method to Calculate Mutual Inductance for EV Dynamic Wireless Charging System," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 36, no. 3, pp. 2696–2709, 2021.
- (8) 居村岳広, 磁界共鳴によるワイヤレス電力伝送. 森北出版株式会社, 2017.