

# 非接触給電を用いた磁気浮上機構の開発

## Magnetic levitation system using Wireless power transfer

知能機械システム工学コース

機械・航空システム制御研究室 1205044 田中 雅子

### 1. 緒言

磁気浮上システムは非接触で物体を支持できる機構である。機械的な接触がないため、摩擦、潤滑、塵埃等の問題を解決できる手段として、磁気浮上搬送装置や磁気浮上列車、真空中やクリーンルーム等の特殊環境で利用されている。磁気浮上機構は反発力や吸引力を利用した機構であり、電磁石を利用した機構がほとんどである。電磁石を用いる場合、磁石に流れる電流値によって磁石の強弱を生み出すことが容易であり、浮上力の調節が簡単のためである。

本研究は、応用例の少ないローレンツ力を利用し、電力伝送機能を兼ね備えた磁気浮上機構の開発を行っている。重力を支持するためには、電磁石を用いると常に外部から電流を供給する必要があるため、永久磁石を用いた磁気浮上機構とする。電磁石は永久磁石で浮上コイルを受動的に安定化させることのできない運動を能動的に安定化させるものとして利用する。提案した磁気浮上機構を完全非接触で浮上させるため、ローレンツ力に用いる電流は、磁界共鳴方式を用いた非接触給電によって供給するものとする。

本論文は、磁気浮上機構の設計、開発を行い浮上の検証を行ったことを報告する。中でも、磁気浮上機構の非接触給電部に着目し、装置全体の伝送効率の向上、磁気浮上機構の受電部の独立した浮上を実現できたことを報告する。また、非接触給電の送電側コイル、受電側コイルに流れる交流電流の向きと大きさに着目し、コイルの垂直方向における自己平衡性の実現可能性を検討したのち、実験による検証とその結果を報告する。

### 2. 磁気浮上機構の概要

提案する磁気浮上機構のモデルを図1に示す。磁気浮上装置は、永久磁石、電磁石、浮上コイル、非接触給電用送電側回路、受電回路、送電コイル、受電コイルから構成した。試作した装置の全体図を図2に示す。また浮上コイルの諸元を表1に示す。浮上コイルの諸元を表1に示す。装置は、非接触給電の送電側コイル間で、電力の供給を行い、その後整流回路を通し、浮上コイルに電流が供給される。浮上コイルと永久磁石間では、ローレンツ力が発生するため、浮上コイルが浮上する。また、電磁石を用い、浮上コイルと電磁石の間で発生するローレンツ力の強弱を生み出し、浮上コイルの浮上位置の安定化を図るものとする。

研究の第一段階として、非接触給電で用いた受電側コイルと浮上の検証を行う浮上コイルを別々のものとしているが、電気自動車等現実的な使用を考えると、浮上コイルだけでなく、2次側回路全体を浮上させた機構が望ましいと考え、これを目標とする。

また、非接触給電間での交流電力伝送による自己平衡性の検証で用いた機構のモデルを図3に示す。交流電圧を印加した後、送電側コイルに流れる電流と受電側コイルに流れる電流の間では磁束が変化する。この磁束の変化によ

てコイル間では吸引力又は反発力が生じる。この力を利用し、受電側コイルの位置を制御し、受電側コイルの自己平衡性が可能と考える。また、磁束の変化は、印加する交流電圧の周波数の変化によって変わる。

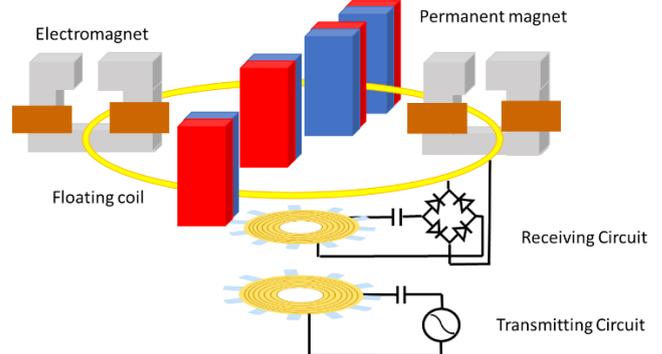


Fig. 1 Illustration of proposed magnetic levitation system

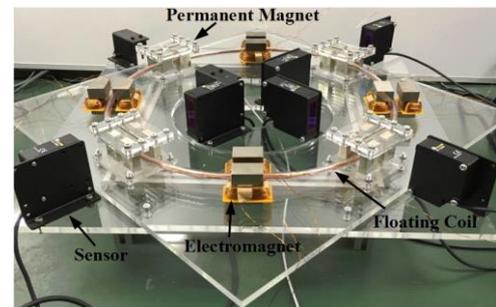


Fig. 2 Photograph of prototype proposed system

Table 1 Specification of the floating coil

Weight[g]	Diameter[mm]	Terns	$R_L[\Omega]$
97.1	340	50	60

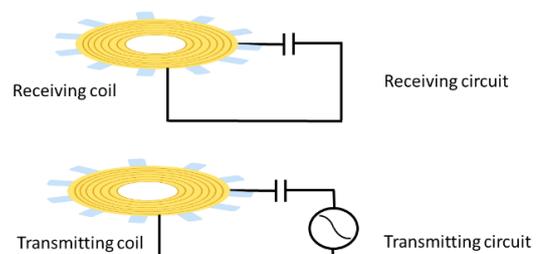


Fig. 3 Illustration of wireless power transfer circuit

### 3. 浮上の検討

受電側コイル、受電回路、浮上コイルを合わせたものを磁

気浮上機構と呼ぶことにした。磁気浮上機構を浮上させるために必要なローレンツ力  $F$  は、式(1)から求めた。なお、浮上コイルの質量を  $M$ 、受電回路の質量を  $m_a$ 、受電側コイルの質量を  $m_b$  とした。また、浮上に必要な電流  $I$  は、電磁界解析ソフト JMAG を用いて解析を行った。解析結果を図 4 に示す。図 4 より、磁気浮上機構を浮上するためには、浮上コイルに、0.8[A]以上の電流を供給する必要があることがわかった。

$$F > (M + m_a + m_b) \times 10^{-3} \quad (1)$$

$$= 1.763[\text{N}]$$

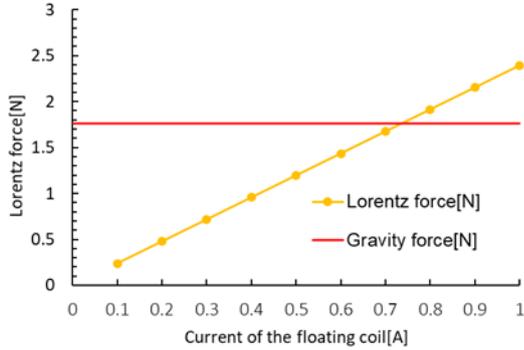


Fig. 4 Analysis of the Lorentz force

#### 4. 非接触給電における共振周波数と電源電圧の検討

磁気浮上機構を浮上するのに必要な共振周波数  $f_0$ 、電源電圧  $E$  および回路で用いるコンデンサ  $C$  の値を求めた<sup>(1)</sup>。送電側回路に用いるコンデンサは式(2)を用いて決定した。式(2)は、受電側電力  $P_L$  が最大になる条件である。その後、共振周波数  $f_0$  を式(3)より決定した。また、電源電圧  $E$  は、式(4)、式(5)より決定した。非接触給電で用いた送電側回路、コイル及び式で用いた値の諸元を表 2 に示す。送電側および受電側の添え字  $a, b$  で区別し、コイルの自己インダクタンスを  $L$ 、抵抗  $R$  で表す。電源電圧の内部抵抗  $R_0$  とし、今回は受電側コイルの抵抗と同値とした。また供給する電流は、1.0[A]として計算を行った。式より決定した送電側回路に用いるコンデンサ  $C$ 、共振周波数  $f_0$ 、電源電圧  $E$  を表 3 に示す。

$$\omega L = R_L \quad (2)$$

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (3)$$

$$NOP = \frac{R_L k^2 \omega^2 L_a L_b}{\{(R_0 + R_a)(R_L + R_b) + k^2 \omega^2 L_a L_b\}^2} \quad (4)$$

$$E = \sqrt{NOP/W_{RL}} \quad (5)$$

Table 2 Specification of the wireless power transfer coil

	$R[\Omega]$	$L[\mu\text{H}]$
Transmitting coil	0.35	112.5
Receiving coil	0.35	112.5

Table 3 Required voltage for 1[A] levitation coil

	$C[\mu\text{F}]$	$f_0[\text{kHz}]$	$E[\text{V}]$
Value	0.3	8.66	6.0

#### 5. 非接触給電コイルの共振周波数の同調

送電側コイル、受電側コイルの共振周波数  $f_0$  を実験から求

めた。理論上では、共振周波数  $f_0$  は表 3 が示すように、8.66[kHz]であった。試作した送電回路のコンデンサは、表 3 の値を用いた。電源電圧は、6.0[V]を基準として、その他に、5.0[V]を印加した。入力周波数は、200[kHz]から 12.0[kHz]まで 200[Hz]毎にコイルにかかる電圧を測定した。

図 5 は送電側コイルの電圧測定値、図 6 は受電側コイルの電圧測定値を示す。図 5、図 6 が示すように、送電側コイルは共振周波数  $f_a = 8.6[\text{kHz}]$ 、受電側コイルは共振周波数  $f_b = 8.4[\text{kHz}]$  とき、最大電圧が測定された。周波数  $f_a$  と  $f_b$  に 200[Hz]の差が生じており、今回、理論値に近い、8.6[kHz]を共振周波数  $f_0$  と再決定した。

受電側コイルの共振周波数  $f_b$  を  $f_0$  と一致するように、受電側回路に使用するコンデンサ  $C_b$  の値を式(6)より決定した。計算より、 $C_b = 3.03[\mu\text{F}]$  とし、再度受電側コイルにかかる電圧を測定した結果を図 7 に示す。図 7 より、受電コイルでも周波数 8.6[kHz]のときに最大の電圧を得ることができた。

$$C_b = \frac{1}{(2\pi f_0)^2 L_b} \quad (6)$$

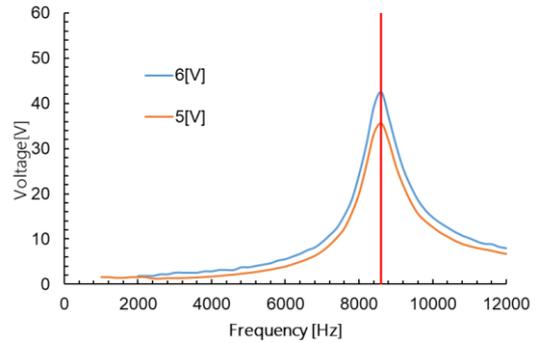


Fig. 5 Experimental resonance frequency of the transmitting coil

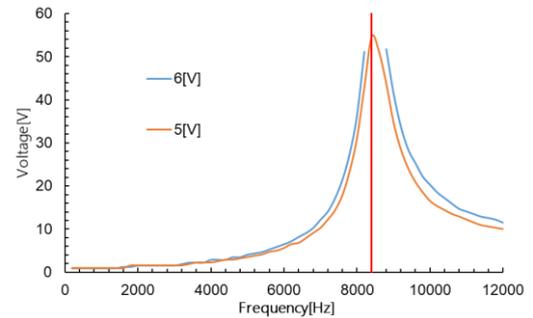


Fig. 6 Experimental resonance frequency of the receiving coil

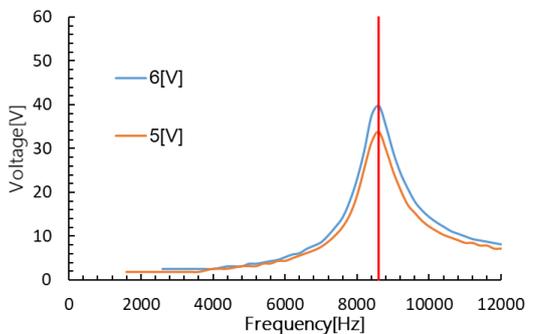


Fig. 7 Tuning the resonance frequency of the receiving coil

#### 6. 交流磁気浮上による給電コイルの自己平衡性の可能性

磁界共鳴方式を用いた非接触給電コイルの垂直方向の自

己平衡性の実現を検討した。送電側コイルに流れる電流がつくる磁束と受電側コイルに流れる電流がつくる磁束の変化により、コイル間では吸引力又は反発力が生じると考えた。

提案する非接触給電の等価回路を図8に示す。相互インダクタンスを  $M$ 、結合係数を  $k$  とおくと、回路方程式は式(7),(8)になった。電流  $I_a(j\omega)$ 、 $I_b(j\omega)$  について解くと、式(9)、(10)の解が得られた。

$\omega < \omega_0$  のとき、 $I_b(j\omega)$  は  $I_a(j\omega)$  と逆向きに流れるため、送電側コイルと受電側コイル間では反発力が生じると考えた。また、 $\omega > \omega_0$  のとき、 $I_b(j\omega)$  は  $I_a(j\omega)$  と同方向に流れるため、コイル間で吸引力が発生すると考えた。

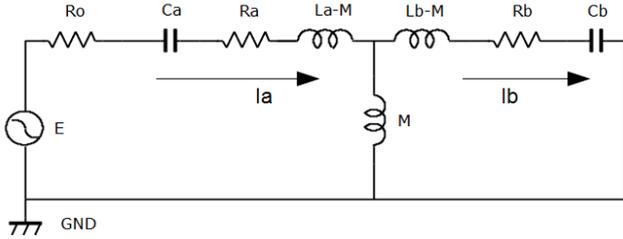


Fig. 8 T-type-equivalent circuit

$$E - R_0 I_a(t) - \frac{1}{C} \int I_a(t) dt - R_a I_a(t) - (L_a - M) \frac{dI_a(t)}{dt} - M \frac{d(I_a(t) - I_b(t))}{dt} = 0 \quad (7)$$

$$M \frac{d(I_b(t) - I_a(t))}{dt} + (L_b - M) \frac{dI_b(t)}{dt} + R_b I_b(t) + \frac{1}{C} \int I_b(t) dt = 0 \quad (8)$$

$$I_a(j\omega) = \frac{R_b X + \left(\omega L_b - \frac{1}{\omega C_b}\right) Y}{X^2 + Y^2} E + j \frac{\left(\omega L_b - \frac{1}{\omega C_b}\right) X - R_b Y}{X^2 + Y^2} E \quad (9)$$

$$I_b(j\omega) = \frac{\omega M Y}{X^2 + Y^2} E + j \frac{\omega M X}{X^2 + Y^2} E \quad (10)$$

$$X = R_b(R_0 + R_a) - \left(\omega L_a - \frac{1}{\omega C_a}\right) \left(\omega L_b - \frac{1}{\omega C_b}\right) + (\omega M)^2 \quad (11)$$

$$Y = \left(\omega L_a - \frac{1}{\omega C_a}\right) R_b + \left(\omega L_b - \frac{1}{\omega C_b}\right) (R_0 + R_a) \quad (12)$$

## 7. 交流磁気浮上による給電コイルの浮上実験

非接触給電用コイル間の空隙を 5[mm]にし、送電側コイルと受電側コイルにかかる電圧の波形をオシロスコープで測定した後、コイル間で磁力が発生するか実験を行った。共振周波数 8.6[kHz]とした。共振周波数  $f_0$ 、 $f_0 < 12[\text{kHz}]$ 、 $f_0 >$

8.0[kHz]の電圧の波形を図9、図10、図11に示す。赤が送電側、黄色が受電側の電圧である。図より、共振周波数では、電圧の位相差は90°であった。共振周波数より入力周波数が大きい場合位相差が生じず、周波数が小さい場合約180°生じることがわかった。また、入力周波数が大きいとき、コイル間で反発力が生じ、小さいとき吸引力が生じることが実験よりわかった。今回、6章で述べた理論と実験では逆の磁力が生じることが言え、相反する結果となった。

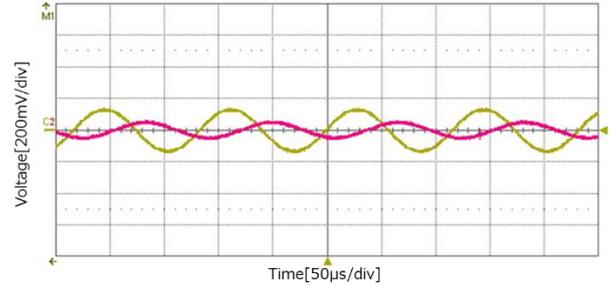


Fig. 9 Experimental Waveform of the voltage at  $f_0$

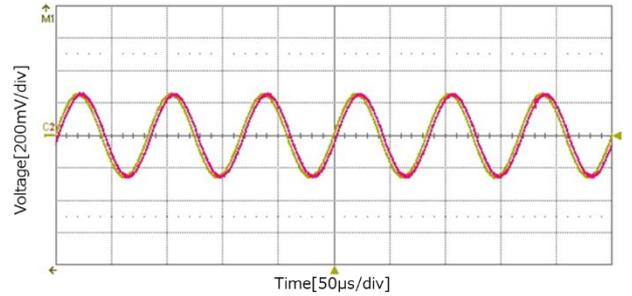


Fig. 10 Experimental Waveform of the voltage at 12[kHz]

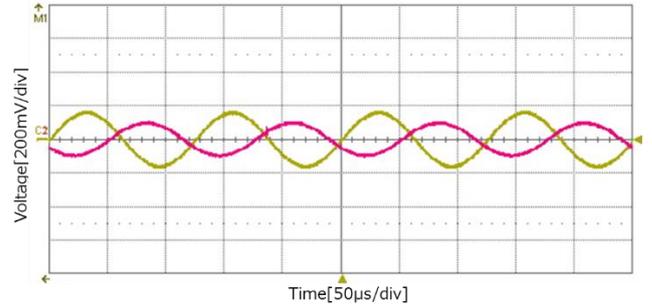


Fig. 11 Experimental Waveform of the voltage at 8.0[kHz]

## 8. 結言

応用例の少ない非接触給電を用いコイルに電流を流しローレンツ力を利用することで受電回路、コイルを浮上させる機構の提案を行った。また、共振周波数の同調を行い、浮上を満たす電流の供給を図り、その実験に成功した。

実際の使用を考え、給電コイルに流れる交流電流の位相差がもたらす磁界の変化を利用した交流磁気浮上における給電用コイルの自己平衡性の可能性とその実現性を提案したが理論と実験が相反するため、今后再検討する必要がある。

## 9. 参考文献

(1)萩原史史 電磁結合による非接触電力伝送の原理について 電気学会論文誌 D(産業応用部門誌)Vol.131.No5 pp703-713