

卒業論文要旨

非接触給電における共鳴周波数帯での発生力の検討

Lorentz Force in the Resonance Frequency band in Magnetic Levitation

システム工学群

機械・航空システム制御研究室 1210032 上田 大貴

1. はじめに

スマートフォンが普及した現在，新たな充電手段として非接触給電（ワイヤレス充電）が利用されている．更にはEV自動車駐車時の自動非接触充電のシステムに利用が検討されている．利点としては充電時にケーブルが不要なため断線や浸水による損傷の恐れがないこと，加えて充電器からコンセントまでの距離を覗いて設置に制限がかからないことである．

また，もう一つの本研究対象でもある磁気浮上機構は磁気反発力や吸引力を利用することにより対象を浮上させて支持する機構である．リニアモーターカーやクリーンルーム，宇宙空間といった特殊環境での利用が考えられている．

利点は接触面との摩擦がなく，加えてそれによる塵埃の発生が抑制される．また宇宙空間に関しては接触がないために金属同士の固着の予防ともなり得る．

本研究ではその磁気浮上機構に電力を供給する際に非接触給電を用いたものを対象とする．磁気浮上機構に電力を供給する際は電磁石を用いる場合がほとんどではあるが，常に外部から浮上体に電力を供給する必要があり，塵埃を発生抑制を考えた際に好ましくない．したがって非接触給電によって浮上体に直接給電するのではなく，非接触給電を用いた間接的な給電で浮上体を制御することを今回の目的とする．

本研究では先行研究 (1) の通り，非接触給電を行う際に正対させたコイルに発生する力の共鳴周波数帯での振る舞いについて考察する．

2. 送電側のコイルと受電側のコイルに発生する力

2.1. 各コイルの電流の位相関係

送電コイルに与える外部電圧を E ，送電・受電コイルに流れる電流をそれぞれ I_a ， I_b とおくと，

$$I_a(t) = \left\{ \frac{RX + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)Y}{X^2 + Y^2} + j \frac{\left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)X - RY}{X^2 + Y^2} \right\} E(t) \quad (1)$$

$$I_b(t) = \left(\frac{\omega MY}{X^2 + Y^2} + j \frac{\omega MX}{X^2 + Y^2} \right) E(t) \quad (2)$$

となる．ただし，送電・受電コイルの電気抵抗，電気容量と自己インダクタンスは互いに一致するものとし，それぞれ R ， C ， L とした．また， X と Y は以下に与える．

$$X = R(R_0 + R) - \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2 + (\omega M)^2 \quad (3)$$

$$Y = \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)(R_0 + 2R) \quad (4)$$

ただし， R_0 は外部電圧の内部抵抗である．

このとき，各パラメーターを調整することによって入力周波数 ω が共鳴周波数 f_0 より小さい場合は逆位相，入力周波数 ω が共鳴周波数 f_0 より大きい場合は同位相となる．共鳴周波数は以下の式で与えられる．

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (5)$$

2.2. 各コイルに発生する磁力

下図に示すように先行研究においては，入力周波数 ω が共鳴周波数 f_0 より小さいとき，すなわち電流が逆位相のときはアンペアの法則から磁束が互いに向き合うように発生し，磁石のように反発する．

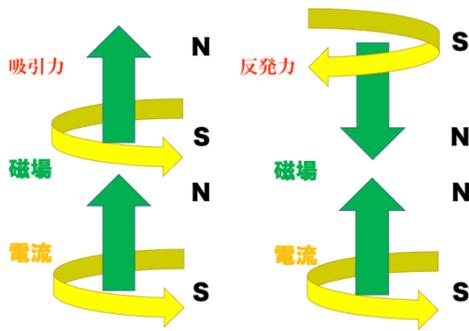


Fig.1 Repulsive force & suction force

逆に、入力周波数 ω が共鳴周波数 f_0 より大きいとき、すなわち電流が逆位相のときはアンペアの法則から磁束が互いに揃った向きに発生し、磁石のように吸引力が発生するとしていた。加えて、入力周波数と共鳴周波数が一致するときには力が発生しないと予想されていた。

しかしながら、実験結果によると入力周波数が共鳴周波数より小さいときには吸引力が発生し、共鳴周波数より大きい場合は反発力が生じていた。

2.3. 理論と実験結果の不一致に関する考察

先行研究における理論と実験結果が不一致に終わったことの原因として理論に以下の2つの問題があると考えた。

- ① 電流と磁束密度（磁場）は一般に同位相ではない
- ② 発生力の正体がローレンツ力である

まず①に関して、図1では電流と磁束密度が同位相であると考えているが Faraday の電磁誘導の法則により位相は異なる。実際、電流片（半径 a ）に流れる電流密度 i と鎖交する磁束密度 B には以下の関係がある。ただし、簡単化のために電気容量は考えず、 r を電流片の中心からの距離とする。

$$i(r, t) = \frac{kl}{2\pi a} \frac{J_0(kr)}{J_1(ka)} e^{i\omega t} \quad (6)$$

$$B(r, t) = \frac{\mu l}{2\pi a} \frac{J_1(kr)}{J_1(ka)} e^{i\omega t} \quad (7)$$

$$k = -i\mu\sigma\omega \quad (8)$$

ただし、 μ と σ はそれぞれ電流片の透磁率と電気伝導率とした。また、 $J_n(z)$ を Bessel 関数という。

次に②について、発生力は磁石と違い Lorentz により力の向きは時間変化し、以下の図2のように1つの電流の向きに対して2通りの力の向きが考えられる。

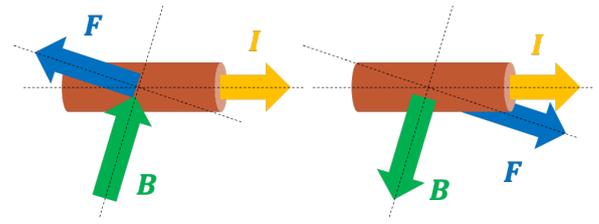


Fig.2 Lorentz force on lead wire piece

この図2のような力の大きさと向きの変化によって理論と実験結果に差異が生じたと考えた。

3. モデル解析

正対させた送電コイルと受電コイルに流れる電流の位相と、発生力の時間平均値を JMAG ソフトで調べ、物理系の運動の振る舞いを予想した。用いた解析モデルの3Dモデルを図3に示す。



Fig.3 Analysis model

3.1. 解析モデルの各パラメータ

解析モデルとなる送電コイルと受電コイルは形状と材料が銅であることに全て一致したものとした。ただし、コイルの主な形状は共に円筒とした。各寸法に関して以下の表1に示す。更に各コイルの回路パラメータを表2に示す。

Table 1 Size & material of coils

Size	Power transmission-coil	Receiving power-coil
Outer diameter	80mm	80mm
Inner diameter	30mm	30mm

Table 2 Circuit parameters of coils

Parameter	Power transmission-coil	Receiving power-coil
Alternative current	8A	-
Inner resistance	0.35Ω	0.35Ω
Capacitor	3.0μF	3.0μF
Self-inductance	112.5μH	112.5μH

JMAG 解析を行う際、共鳴周波数 $f_0 = 8.66\text{kHz}$ なので調べる共鳴周波数帯を2, 4, 6, ..., 20kHzとした。

3.2. 解析結果

共鳴周波数帯 2, 4, 6...20kHz のそれぞれの入力周波数における各コイルに流れる電流と発生力の様子を以下の図に示す。ただし、力の向きはそれぞれのコイルが互いに反発する向きが正となるように各コイルで設定した。

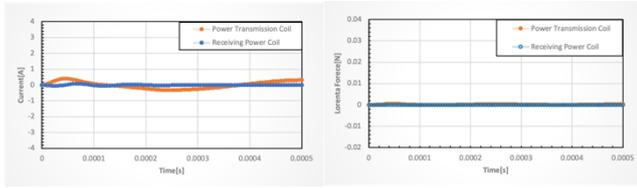


Fig. 4 Frequency is 2kHz (left:current, right: force)

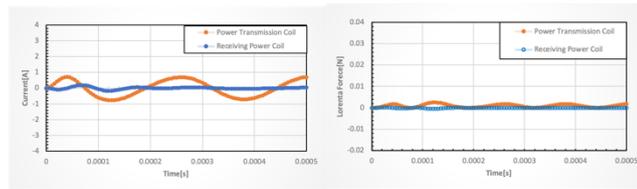


Fig. 5 Frequency is 4kHz (left:current, right: force)

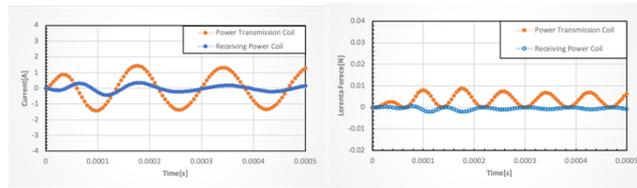


Fig. 6 Frequency is 6kHz (left:current, right: force)

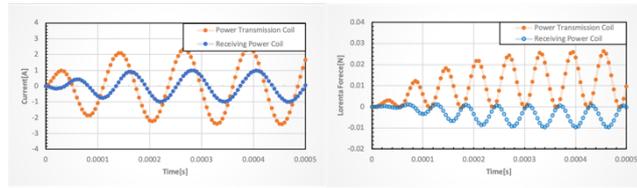


Fig. 7 Frequency is 8kHz (left:current, right: force)

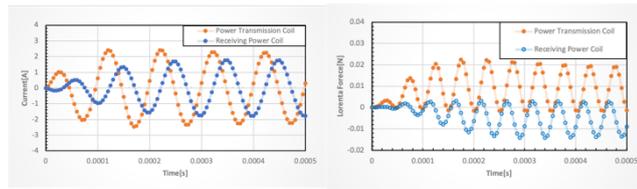


Fig. 8 Frequency is 10kHz (left:current, right: force)

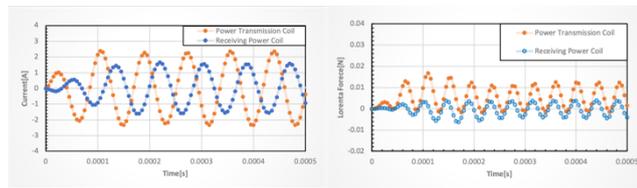


Fig. 9 Frequency is 12kHz (left:current, right: force)

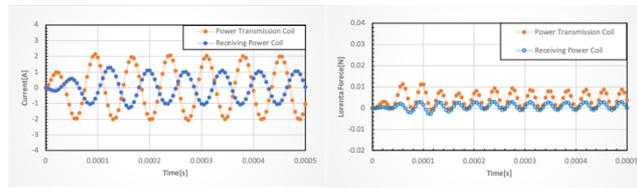


Fig. 10 Frequency is 14kHz (left:current, right: force)

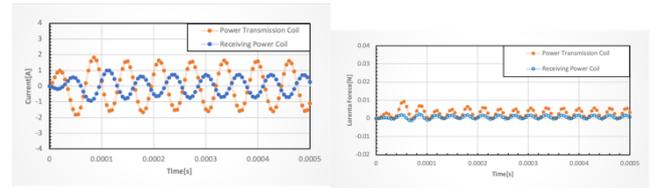


Fig. 11 Frequency is 16kHz (left:current, right: force)

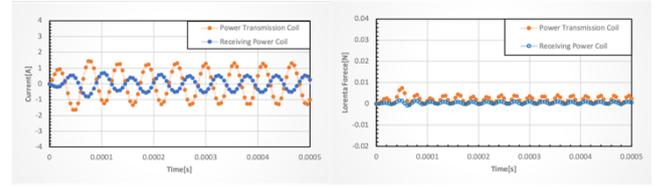


Fig. 12 Frequency is 18kHz (left:current, right: force)

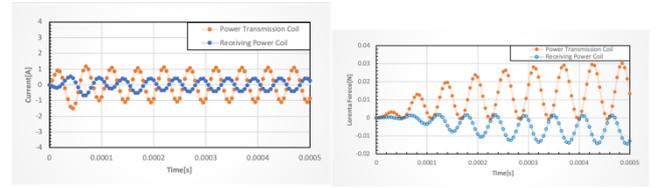


Fig. 13 Frequency is 20kHz (left:current, right: force)

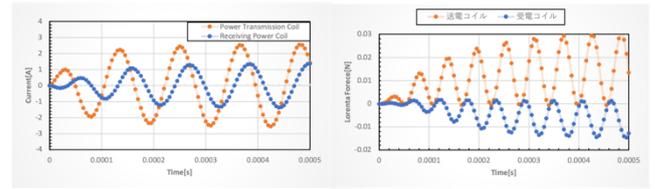


Fig. 14 Frequency is 8.66kHz (left:current, right: force)

上図 4~14 のように 2つのコイルの電流強度は入力周波数が共鳴周波数になるまで単調増加しその後は単調減少していた。また位相は共鳴周波数で丁度 90° ずれていた。

このとき、電流強度はイカの図 15 のように、送電側は入力周波数が 8.50kHz と共鳴周波数と一致するときに、受電側は 10kHz で最大となっていた、

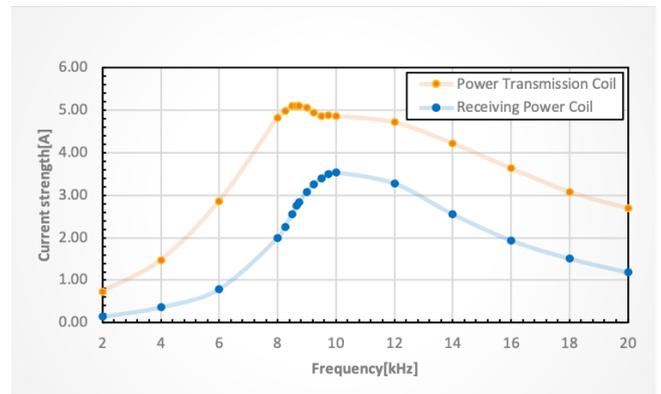


Fig. 15 Current strength

発生力の時間平均について以下の図 16 に示す。

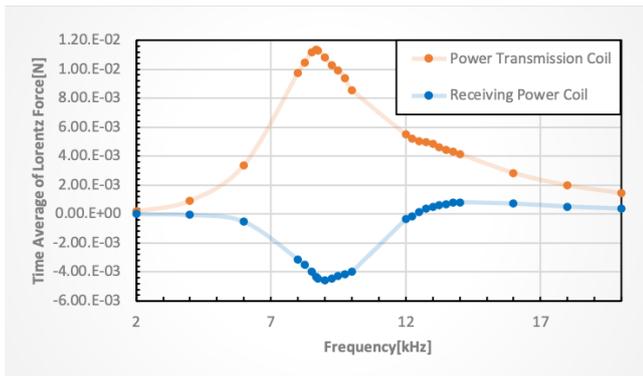


Fig. 16 Time average of Lorentz force

これから分かる通り発生力の時間平均の大きさは入力周波数が共鳴周波数のところでピークとなっており、送電コイルが正、受電コイルが負であることから互いに揃った向きに運動すると予想された。その後は発生力の大きさは減少し、入力周波数が 12.25kHz と 12.5kHz の間で受電コイルの発生力の時間平均が負から正に変わった。すなわち、12.5kHz 以上でコイルが互いに反発する向きに運動すると予想された。

ここで JMAG を用いて発生力の時間履歴を求めたが、解析結果は離散的に得られるので、時間平均を求める際には積分が使えない。したがって観測時間 T を複数の時間区間に n 等分して考えなければならない。

得た発生力のプロット値を経過時間が速い方から順に a_0, a_1, \dots, a_n とし時間区間の幅を Δt とおく。このとき時間平均 M は以下の式 (9) で求められる。

$$M = \frac{1}{T} \sum_{m=1}^n \frac{a_{m-1} + a_m}{2} \Delta t \quad (9)$$

4. 結論

先行研究において正対させた 2 つのコイルに発生する力に関して、理論と実験結果が一致しないことが示されていた。そこで本研究ではその理論に問題があるとして訂正した。内容としては電流と磁束密度は必ずしも同位相ではないことと、発生力が磁石と違いローレンツ力に起因することであった。

そのことを踏まえながらの JMAG ソフトを用いた共鳴周波数帯でのモデル解析の結果、入力周波数が 12.25kHz 以下では互いに揃った向きに運動し、12.5kHz 以上では互いに反発する向きに生じるという結果となった。

最後に、先行研究における発生力の振る舞いが実験結果と一致しない理由としては実験において両コイルを上から糸

で吊っていたことが原因であると考えた (図 17 参照)。すなわち、糸の張力の水平成分が発生力の向きと同じ方向であるために、対象となる物理系の運動を考える際に考慮しなければならないといけなかったということである。

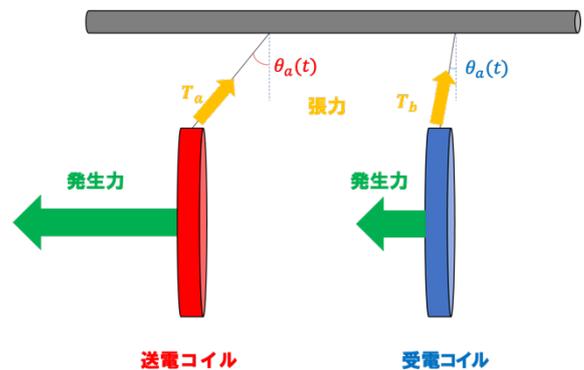


Fig. 17 Lorentz force and tension

参考文献

- (1) 田中稚子『非接触給電を用いた磁気浮上機構の開発』高知工科大学院 2017 年度修士学位論文
- (2) 萩原述史『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 No.5 pp703-713
- (3) 安達三郎/大貫繁雄『電気磁気学(第 2 版・新装版)』森北出版株式会社
- (4) [1] 砂川重信『理論電磁気学(第 3 版)』紀伊國屋書店
- (5) 社団法人電気学会『電気工学ハンドブック(第 6 版)』