

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 2 日現在

機関番号：12701

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2012～2014

課題番号：24656183

研究課題名(和文)電界により分極電流を供する単相共振モータ

研究課題名(英文)Resonant Single Phase Motor Utilizing Polarization Current by Electric Field

## 研究代表者

藤本 康孝 (FUJIMOTO, Yasutaka)

横浜国立大学・工学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：60313475

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、従来より利用されてきた伝導電流や磁化電流によるローレンツ力とは異なり、分極電流によるローレンツ力を利用した新しい原理のモータを提案した。本モータでは、平板コンデンサにより対象物体に高周波の電界を印加し分極電流を発生させると同時に、直列に接続したコイルにより同位相の磁界を印加することで物体に一定の力を及ぼす。これらは直列共振回路となるため、共振周波数において大きな電流で駆動できる。本研究では提案モータの周波数特性を明らかにし、等価回路モデルを提案するとともに実験により誘電体に対して微小ながら2.8mgfの力を確認した。非磁性・非導体に力を発生させられるため新しい用途開拓が期待できる。

研究成果の概要(英文)：In most conventional motors, secondary current is supplied by magnetization or electric field generated by electric potential or electromagnetic induction. However, there is a possibility that polarization current can be utilized as secondary current. We propose a new motor that utilizes polarization current generated by varying electric field between two conducting plates of a capacitor. Simultaneously a series coil generates varying magnetic field. As a result a dielectric object placed at the secondary side experiences one-way Lorentz force perpendicular to both polarization current and magnetic field. In addition, the capacitor and the coil constitute a resonant circuit which brings large current at the resonance frequency. In this study, we measured frequency response of the proposed motor in high frequency domain and derived a precise equivalent circuit explaining the measured impedance well. We observed average force of 2.8mgf for a dielectric object through experiments.

研究分野：電気機器学

キーワード：分極電流 モータ ローレンツ力 誘電体 共振

1. 研究開始当初の背景

日本国内の総電力消費量のうち、6割弱が電磁力を利用したモータで消費されている。電磁モータは他のアクチュエータと比較してエネルギー効率と制御性に優れているため、産業機器や家庭用電気機器に広く利用されている。また、本質的に電気-機械エネルギー変換は保存系であるため、その原理は発電機としても広く利用されている。1821年にファラデーにより単極直流モータの原理実験が行われて以来、さまざまなモータの開発が行われてきた。いずれの電磁モータも、その発生力の根源は次の3種類に分類することができる。

- (1) ローレンツ力: 磁界と電流によるフレミングの力、もしくは(電)磁石と(電)磁石の引力・斥力
- (2) リラクタンストルク: (電)磁石と鉄心の引力(リラクタンスモータ)
- (3) クーロン力: 電荷と電荷の引力・斥力(静電モータ)

実用化されているモータは、上述のうち(1)と(2)を利用したものである。これらが利用されている理由は、パワー密度、トルク密度の観点から優位性があるためである。このうち、ローレンツ力を利用したモータは、回転子側の電流もしくは磁力の発生方法で分類すると、以下に大別できる。

- (1) 直流モータ: 回転子側の電流(電機子電流)をブラシを介して供給
- (2) 巻線界磁同期モータ: 回転子側の電流(界磁電流)をスリップリングを介して供給
- (3) 永久磁石界磁同期モータ: 回転子側に永久磁石を利用(磁化電流)
- (4) 誘導モータ: 回転子側の電流(2次電流)を電磁誘導により供給

ここで、永久磁石は磁化電流と考えることができるため、この分類はローレンツ力を発生させる回転子側の電流の種類と供給方法により区別されているとみることが出来る。なお、モータは、回転子が運動するため(3)と(4)の方法のように非接触で駆動することが望ましい。ところで、一般に電流は、伝導電流  $J_C$ 、磁化電流  $J_M$ 、分極電流  $J_P$ 、変位電流  $J_D$  に分けることができる。すなわち、 $J = J_C + J_M + J_P + J_D = \sigma E + \nabla \times M + (\partial P / \partial t) + \epsilon_0 (\partial E / \partial t)$  と表される。ただし、 $J$  は電流密度、 $\sigma$  は電気伝導率、 $M$  は磁化、 $P$  は分極、 $\epsilon_0$  は真空の誘電率、 $E$  は電界である。上述の(1),(2),(4)のモータは伝導電流を、(3)のモータは磁化電流を利用している。本研究では、これらのいずれでもない分極電流を利用したモータの可能性を検討する。

2. 研究の目的

本研究では、従来の電磁モータで一般的に利用されている、磁界中の伝導電流や磁化電流によるローレンツ力とは異なり、分極電流によるローレンツ力を利用した新しい原理

のモータを試作し、検証することを目的とする。これまでのモータとは異なり、非磁性体・非導体の物体に力を発生させることができるため、新しい用途が開拓できる。物体に分極を生じさせるため、平板コンデンサにより物体に高周波の電界を印加すると同時に、直列に接続したコイルにより同位相の磁界を印加する。このとき分極電流と磁束密度の外積によるローレンツ力は常に一定方向となり、物体に一定の力を及ぼす。また、コンデンサとコイルは LC 直列共振回路となるため、共振周波数付近で大きな電流で駆動することができる。これら原理を検証し、新しい用途開拓を行う。

3. 研究の方法

一般に、物体に働く電磁力  $F$  は、次式で表される。

$$F = \int_V (\rho E + J \times B) dV$$

$$= \int_V \left( (\rho_T - \nabla P) E + \left( \sigma E + \nabla \times M + \frac{\partial P}{\partial t} \right) \times B \right) dV$$

第2式被積分項1項目はクーロン力、2項目はローレンツ力、 $\rho_T$ は真電荷密度、 $B$ は磁束密度、 $V$ は物体の体積分の領域である。物体に交流の電界と磁界を印加した場合、分極電流によるクーロン力は両極で打ち消しあう。また、磁化電流によるローレンツ力も両極で打ち消しあう。また、非帯電体を仮定すると、 $\rho_T = 0$  となり、物体に働く力は、

$$F = \int_V \left( \left( \sigma E + \frac{\partial P}{\partial t} \right) \times B \right) dV$$

と表される。物体が導体の場合は第1項目の伝導電流により力が発生し、誘電体の場合は第2項目の分極電流により力が発生することが分かる。

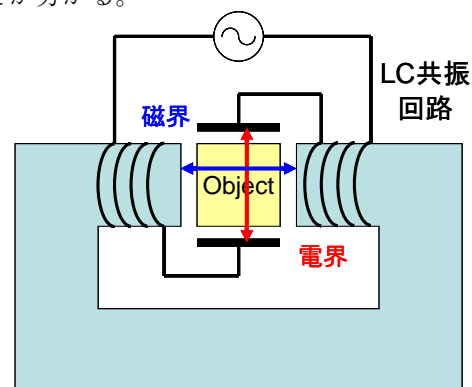


図1. 基本モデル

次に、対象物体(可動子)に電界と磁界を印加するため、図1のような原理モデルを考える。電界を発生させるための平板コンデンサと、磁界を発生させるためのコイルを、電界と磁界が直交するように配置する。電界により分極電流を発生させ、これと直交する磁界により物体(可動子)にローレンツ力を発生させる。このとき、分極  $P$  は平板コンデン

サ間の電界  $E$  に比例し、電界  $E$  はコンデンサの端子電圧に比例するため、分極電流  $\partial P/\partial t$  はコンデンサに流れる電流に比例する。また、磁束密度  $B$  はコイルに流れる電流に比例する。したがって、コンデンサとコイルを直列に接続すれば、分極電流と磁束密度の位相が一致し、電流が正のときも負のときも同じ向きに力が発生する。図のモデルの場合、 $\sin^2(\omega t + \phi)$  に比例した力が紙面垂直方向に手前から奥の向きに発生する。また、コンデンサとコイルは LC 直列共振回路となるため、その共振周波数で駆動すると、大きな電流を流すことができ、大きな電界と磁界を発生させることができる。

以上のように、本研究は①分極電流を利用する、②LC 直列接続により一方向に力を発生できる、③LC 共振を利用することで大きな電流で駆動できる、④これらを単純な構造で実現できる、という点に特徴がある。なお、提案モータの共振周波数は 13.56MHz もしくは 27.12MHz となるように設計している。分極は電子分極、イオン分極、配向分極に分類でき、それぞれ、分極が生じなくなる周波数は電子分極が最も高く、配向分極が最も低いが、上述の周波数帯ではどの分極も生じると期待される。

#### 4. 研究成果

(1) 初年度は、提案モータの研究に必要な実験装置の構築、および、モータの特性の測定を行った。まず、モータの試作に当たって、現在、検討を進めている電磁界解析を、より詳細化し、電流密度と磁束密度を考慮し、鉄心の形状を決定した。モータは、図2、図3のようにE型コアを向かい合わせた構造で、左右の中心のコアの周囲にリッツ線のコイルを備えている。ギャップ部と直交方向に銅板2枚を対向させ、平板コンデンサとした。鉄心には、高周波での鉄損が比較的少ないフェライトコアを採用した。また、コイルには高周波での表皮効果を考慮してリッツ線を採用した。コイル結線およびコンデンサ極板間距離の変更により共振周波数の変更が可能な構造とした。



図2. 開発した実験機

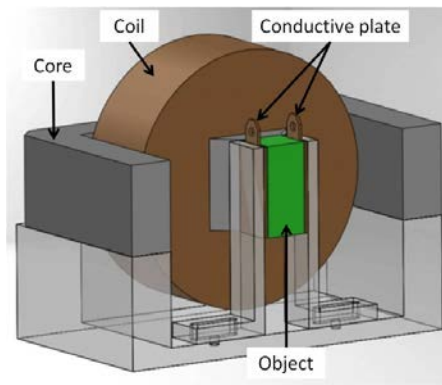


図3. 断面図

また、駆動回路としてリニアアンプと整合器を組み合わせた回路を構築した。まず、予備実験として、整合器を介して試作モータを 40W、27.12MHz で駆動した。高周波駆動となるため、反射波を考慮する必要があり、整合器により定在波比 (VSWR) 1.8、伝送効率約 91%での駆動が確認できた。なお、この電力では力学作用は観測できなかった。なお、本研究のため、関東総合通信局より高周波利用設備許可を取得した。次に、試作したモータのインダクタンスと容量を測定し、その周波数依存性を明らかにした。その結果、コイル間の浮遊容量が無視できず、また、動作周波数におけるインダクタンスが大幅に低下し、空隙部の磁束密度が低下してしまうことが分かった。

(2) 2年目の2013年度は、初年度に試作したモータの共振周波数での駆動を行った。さまざまな材料を対象物体として実験を行った。まず、対象物体の形状、大きさ、および、誘電率によって、コンデンサ容量が変化するため、これを LCR メータで測定した。また、ガウスメータを用いて、ギャップ磁束密度を測定し、電磁界解析の結果との比較を行った。漏れ磁束の存在を考慮して磁気回路モデルを修正し、力の発生モデルの修正を行った。さらに、このモータで対象とする周波数帯域では、コイルの浮遊容量が存在することから、これを考慮した等価回路モデル(図4)を提案し、力の発生モデルの修正を行った。

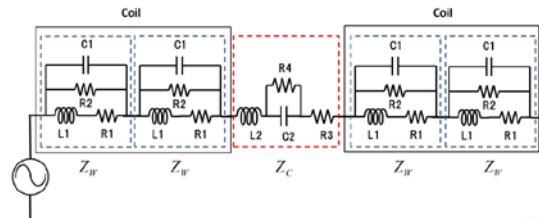


図4. 提案する等価回路モデル

提案した等価回路モデルの定数は、開発モータのインピーダンスの周波数特性の実測値に基づいて推定を行い、モデルのインピーダンス周波数特性が実測値によく一致することを示した。(図5)

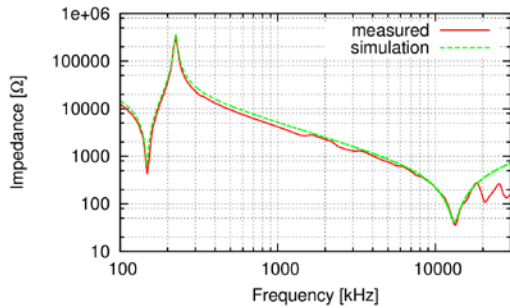


図 5. 実機およびモデルの周波数特性

2次側対象物が導体の場合、および、誘電体の場合について、それぞれ実験により図6の測定環境によりモータの発生力を測定した。

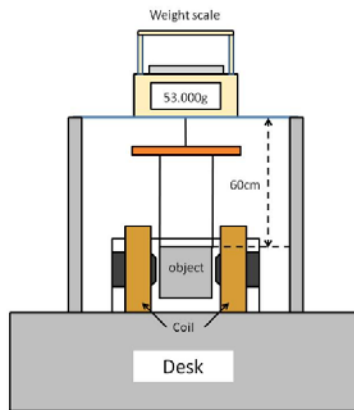


図 6. 測定環境

導体（アルミ合金）の場合に周波数 13.56MHz、SWR1.8~2.0 で約 600W の電力を供給し、5回の実験の平均で約 1.7mgf の発生力を観測した。図7は駆動時の発生力の観測波形である。

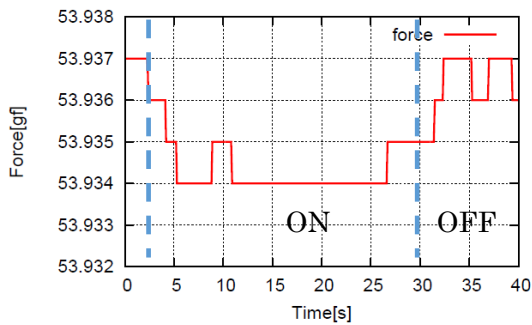


図 7. 導体の場合の発生力

また、誘電体（ABS樹脂）の場合に周波数 13.56MHz、SWR1.1以下で約 700W の電力を供給し、5回の実験の平均で約 0.58mgf の力の発生を観測した。図8は駆動時の発生力の観測波形である。

新原理モータにおいて、ごく微小ながら物体に力が働いていることを確認した。

(3) 2013年度までの実験では、ほぼ理論値通りであるものの発生力が極めて小さかったため、最終年度の2014年度は発生推力の向上について検討を行った。具体的には、試作

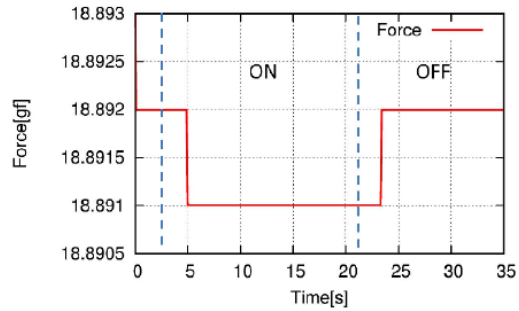


図 8. 誘電体の場合の発生力

モータのコアに使用した Mn-Zn 系フェライトは、500kHz 程度までは安定して高い透磁率（比透磁率  $\mu_r=2300$ ）を有し、低損失という特性を持つが、それ以上の周波数領域では周波数が増えるにつれて透磁率が減少し 10MHz 以上では  $\mu_r=1$  に近い値となっていた。そこで、高周波領域でも透磁率を高く保つことができるフェライトをコアに利用することで磁束密度を増加させ、推力を向上させることができると考え、初期透磁率は  $\mu_r=75$  と低いものの、数十 MHz 程まで安定した透磁率を保てる Ni-Zn 系フェライトにコアを変更したモータの製作を行った。併せて、巻線間の浮遊容量の影響を低減するため、巻線をエナメル被覆のリッツ線からフッ素樹脂電線に変更した。改良した実験機の周波数特性を図9に示す。共振周波数付近でのインピーダンスは改良前よりもやや大きい、ほぼ同様の特性が得られた。

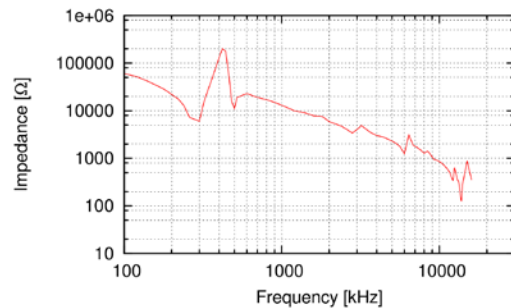


図 9. 改良機の周波数特性

この実験機を用いて発生力の測定を行った。SWR1.45、入力電力約 550W における結果を表1に示す。平均して 2.84mgf の力の発生を観測した。改良前よりも大きな推力を発生することに成功した。しかし、なお微小な力であるので、今後は、力の測定精度をより向上させる必要があると考えられる。

表 1. 発生力（誘電体）

試行 No.	No. 1	No. 2	No. 3
On 平均力 [gf]	18.987	18.986	18.987
Off 平均力 [gf]	18.990	18.989	18.990
発生力 [mgf]	2.52	3.0	3.0

## 5. 主な発表論文等

[学会発表] (計3件)

- ① 一場 司, 藤本康孝, “電界により分極電流を供する単相共振モータの原理検証”, 電気学会産業計測制御/メカトロニクス制御研究会, IIC-14-135/MEC-14-123, pp. 79-84, 東京, 2014. 3. 11
- ② 一場 司, 藤本康孝, “電界により2次電流を供する単相共振モータの駆動システムの検討”, 電気学会基礎・材料・共通部門大会, 13-A-a1-1, 横浜, 2013. 9. 13
- ③ 一場 司, 藤本康孝, “電界により2次電流を供する単相共振モータの基礎的検討”, 電気学会産業計測制御/メカトロニクス制御研究会, IIC/MEC-13-013, pp. 69-73, 千葉, 2013. 3. 7

[その他]

ホームページ等

<http://www.fujilab.dnj.ynu.ac.jp/>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

藤本 康孝 (FUJIMOTO, Yasutaka)

横浜国立大学・工学研究院・教授

研究者番号：60313475