リレー電極における異物の挙動解析*

西川 林太郎^{*1}, 金子 雅博^{*2}, 酒井 夏美^{*2}, 佐伯 暢人^{*3}

Motion analysis of a foreign object on a relay electrode

Rintarou NISHIKAWA, Masahiro KANEKO, Natsumi SAKAI, Masato SAEKI^{*3}

^{*3}Shibaura Institute of Technology, Dept. of Mechanical Engineering
Toyosu 3-7-5, Koto-ku Tokyo, 135-8548 Japan

Motion of a foreign object on a relay electrode is investigated numerically and experimentally. In the numerical approach, the motions of the foreign object and the relay electrode are analyzed the discrete element method (DEM) and the finite element method (FEM), respectively. The impulse force which a relay electrode gives to the foreign object is calculated by using the theory of elasticity. The charge simulation method is used for calculating electric field between relay electrodes. In the experimental approach, and the motion of the charged foreign object is tracked with a video camera. The foreign object is beforehand charged using a corona charging device and the electric charge was measured with an electrometer. As a result, the negatively charged foreign object bounds considerably compared with positively one. The adequacy of the analysis method is justified by comparing with the experimental results.

Key Words : Numerical Analysis, Finite Element Method, Nonlinear Vibration, Vibration of Continuous System, Electric Equipment, Contact problem.

1. 緒 言

リレー（継電器 ; Relay）とは、電気信号を受けることで、電磁石により接点を開閉し、回路を開閉する電気機器である。現在は様々な家電製品や輸送用機器に使用されている。リレーは、高電力の回路を低電力で間接的に ON/OFF することができるため、感電の防止など安全に作業が行えるという利点がある。しかし、まれにリレーの接点間に異物が入ることで電気導通が阻害され、動作不良を起こすという問題点があり、⁽¹⁾ ⁽²⁾ 異物がどのようなメカニズムで接点間に入りこむのかについては解明されていない。

そこで本研究ではリレー電極間の異物の挙動について理論的、実験的な検討を行った。実験では、実際のサイズの異物を作成し、リレー電極間の異物の挙動を実験的に解析した。異物はコロナ放電により任意の量に帯電したものを利用した。一方、数値計算では電界および電極の変形、異物の運動を全て数値解析する事を試みた。ここで、電界の解析には電荷重畳法を用い、電極の変形解析にはモード重畳法を用いた。実験により得られた帯電させた異物のリレー電極上の動きと数値解析から得られた結果を比較した。さらに、異物の帯電量や位置などが異物の動きに与える影響について検討したので、その結果を報告する。

2. リレーと異物について

リレーの構造を図 1 に示す。リレーを用いて回路を開閉する原理を以下に説明する。

* 原稿受付 2012 年 7 月 17 日

^{*1} 学生員, 芝浦工業大学 (〒135-8548 東京都江東区豊洲 3-7-5)

^{*2} 富士通コンポーネント (株) (〒141-8630 東京都品川区東五反田 2-3-5 五反田中央ビル)

^{*3} 正員, 芝浦工業大学

E-mail: saeki@sic.shibaura-it.ac.jp

- ①スイッチを入れる。
- ②コイルに電流が流れ、鉄芯が磁化する。
- ③電磁力によって、鉄片が鉄芯に引きつけられる。
- ④鉄片に繋がれているリレーの可動接点が、固定接点に接触する。
- ⑤回路が導通する。
- ⑥スイッチを元に戻す。
- ⑦コイルに電流が流れなくなり、鉄片が鉄芯に引きつけられる力がなくなる。
- ⑧復元バネにより鉄片が元の位置に戻る。
- ⑨接点が離れ、回路が導通しなくなる。

Fig.1 Structure of relays

リレーの生産工程において、リレーの本体にカバーを取り付ける際、カバーを本体が削り、削り屑（以下、異物と称する）が発生する事がある。

リレー本体にカバーを圧入し密閉状態にすることで、外からの異物の侵入を防ぐことができる。しかし、発生した異物は、容器内が密閉状態になっているため除去する事は難しく、リレーが不具合を起こす原因となっている。そのため、リレー電極間での異物の挙動を理論的に解明する事ができれば、リレーの動作不良の対策を考えることも可能と考えられる。

3. 実験

3・1 実験装置および実験方法

図2は異物として使用したPBT粉を示す。その平均粒径は0.2mmである。異物の挙動は静電気力の影響を強く受けるものと考えられる。そこで、異物の帯電量を均一にするため、異物は、図3に示したイオナイザを用いて実験の開始前に90秒間の除電を施した。そのあとに、図3のコロナ帯電装置を使用して異物を帯電させ、その帯電量は図4に示した測定装置を使用して測定した。異物の粒径は双眼実体顕微鏡とデジタルカメラで得られた画像をソフトウェアにより計測した。帯電させた異物はリレー電極上の中央付近か接点付近のどちらか一か所に1粒を配置した。リレー電極は、下側の電極に250Vの電圧印加し、上側の電極は接地した。異物の挙動実験では図5に示すように、高速度カメラを用いた。まず、リレー電極を稼働させ、リレー電極と異物の動きを撮影し、その動画を画像解析して、異物の初期位置からの移動量を測定した。

(a) Relay electrode

(b) A foreign

Fig.2 Relay and a foreign object

(a) Ionizer

(b) Corona charging device

Fig.3 Ionizer and corona charging device

Fig.4 Measurement system for electric charge

Fig.5 Measurement system for the motion of a foreign object

3・2 異物の帯電量

図3で示したコロナ帯電装置は印加する電圧の極性を変えることで、帯電させる材料の極性を変えることができる。

図6はコロナ帯電装置を用いて負の高電圧を印加して、異物にコロナ帯電を施した場合の帯電量分布である。また図7は正の高電圧を印加して、異物にコロナ帯電を施した場合の帯電量分布である。

異物にはあらかじめ90秒間の除電を施してあり、その後、5秒間にわたりコロナ帯電を施した。針電極に印加する電圧は $\pm 50\text{kV}$ である。

Fig.6 Effect of the negative high voltage on charge distribution
[Applied voltage:-50kV, Charged time:5s]

Fig.7 Effect of the positive high voltage on charge distribution

[Applied voltage: 50kV, Charged time:5s]

負の高電圧を印加した場合、異物は40～80nC/gに帯電したものが最も多く、正の高電圧を印加した場合は、異物は30～40nC/gに帯電したものが最も多かった。今回の実験において、負の高電圧を印加した異物はすべて負に帯電し、正の高電圧を印加した場合には異物はすべて正に帯電した。異物の帯電量は想定通り、正と負に帯電することはできたが、ばらつきを有していたため、異物の挙動測定時には、毎回、挙動実験前に帯電量の計測を行った。

4. リレーと異物の運動解析

4・1 リレー電極の運動解析

リレー電極の運動解析には有限要素法 (FEM) を用いた。異物がリレー電極の有限要素に接触すると、リレーが粒子に与える接触力は有限要素を構成する節点に等価節点接触力として配分した。本研究では、図 8 に示すような有限要素に分割した要素とし、節点について成立する運動方程式は次のように与えられる。

$$[M]\{\ddot{u}\} + [C]\{\dot{u}\} + [K]\{u\} = \{F\} \quad (1)$$

ここで、 $\{u\}$ は節点の変位、 $[M]$ は節点の質量及び慣性モーメントからなるマトリクス、 $[C]$ は節点の減衰マトリクス、 $[K]$ は節点の剛性マトリクス、 $\{F\}$ は節点に働く接触力及びモーメントを示している。ドットは時間による微分を示す。 $t - \Delta t$ は t より微小時間 Δt だけ前の時間を表している。また、節点は 2 自由度 ($x-y$ 軸方向成分) を有し、式 (1) を解くことによって時刻 t における電極の挙動を求めることが出来る。

4・2 モード重畳法

式 (1) については、モード重畳法を用いて、次式のように変換した。

$$\begin{aligned} [\Phi]^T [M] [\Phi] \{\ddot{\xi}\} + [\Phi]^T [C] [\Phi] \{\dot{\xi}\} + [\Phi]^T [K] [\Phi] \{\xi\} &= [\Phi]^T \{F\} \\ \{u\} &= [\Phi] \{\xi\} \end{aligned} \quad (2)$$

更に、 $[\Phi]^T [M] [\Phi] = [M^*]$ 、 $[\Phi]^T [C] [\Phi] = [C^*]$ 、 $[\Phi]^T [K] [\Phi] = [K^*]$ とおくと、式 (2) は次のようになる。⁽⁴⁾

$$[M^*] \{\ddot{\xi}\} + [C^*] \{\dot{\xi}\} + [K^*] \{\xi\} = [\Phi]^T \{F\} \quad (3)$$

ここで、 $\{\xi\}$ はモード座標系における変位、 $[\Phi]$ はモードマトリクスである。また、 $[M^*]$ はモーダル質量マトリクス、 $[C^*]$ はモーダル減衰マトリクス、 $[K^*]$ はモーダル剛性マトリクスである。物理座標系での変位 $\{u\}$ はモード座標系での変位 $\{\xi\}$ を係数とした固有振動モードの重ね合わせで求められる。モーダル減衰マトリクスは実験によるリレー電極の動きに合わせて設定した。

Fig.8 Relay electrode

4・3 異物の運動解析

異物の運動解析には個別要素法 (DEM) を用いた。電界が作用するリレー電極間に帯電量を持った異物が存在すると、その異物には静電気力が働く。また、異物とリレー電極が接触した場合には接触力が発生する。従って、異物とリレー電極の運動解析を行うためには、図9に示すように、異物に働く静電気力やリレー電極からの摩擦や衝突を考慮した運動方程式をたてる必要がある。そこで、ここではまず、粒子の運動方程式について検討を行う。本研究では、異物を質点とみなし、次式で与えられる異物の運動方程式を解くことで、異物の挙動を求めた。

$$\begin{aligned} m\ddot{p}_x^{(t)} &= -\vec{F}_x^{(t-\Delta t)} - \vec{F}_{sx}^{(t-\Delta t)} - \vec{F}_{Ex}^{(t-\Delta t)} + \vec{F}_{mx}^{(t-\Delta t)} + mg \\ m\ddot{p}_y^{(t)} &= \vec{F}_y^{(t-\Delta t)} - \vec{F}_{sy}^{(t-\Delta t)} - \vec{F}_{Ey}^{(t-\Delta t)} - \vec{F}_{my}^{(t-\Delta t)} \end{aligned} \quad (4)$$

ここで $\vec{p}$ は粒子の位置ベクトル、 $\vec{F}$ は異物が受ける接触力、 $\vec{F}_s$ は異物が受ける摩擦力、 $\vec{F}_E$ は異物が受ける静電気力、 $\vec{F}_m$ は異物が受ける鏡像力、 m は粒子の質量、 I は粒子の慣性モーメント、 $\vec{g}$ は重力加速度をそれぞれ示している。添え字の x および y はそれぞれ働く力を軸方向に分解したことを表している。ドットは時間による微分、 t は時間を示す。添え字で示す $t - \Delta t$ は t より微小時間 Δt だけ前の時間を表しており、衝突時の解析を容易にするために定義している。式 (4) を数値積分することによって時刻 t における粒子の移動を求めることが出来る。電極から異物中心までの高さは画像データから得られた 0.05mm として計算した。リレー電極間の電界計算は、下側電極に 250V 、上側電極は接地されているという条件で電荷重畳法を用いて計算した。

Fig.9 Forces acting on a foreign object

5. 実験結果と解析結果

5・1 異物の初期位置がリレー中央付近の時

5. 1. 1 垂直方向

図 10 および、図 11 はそれぞれ、異物をリレー電極の中央付近に置いた後にリレーを稼働させた場合の異物の垂直方向の変位について得られた実験値と理論値である。

Fig.10 Displacement of a foreign object (Experimental result)

Fig.11 Displacement of a foreign object (Calculated result)

計算結果では異物が正に帯電しているほど垂直方向の移動量は大きくなっているが、実験結果では解析結果ほど帯電量によって垂直方向の移動量差は表れていない。これは、実験では異物は不規則な形状であり、解析結果ほど移動量に差が出ないためと考えられる。一方、正に帯電した異物の最大移動量は0.5mm程度と理論値、実験値ともに、概ね、一致している。全体の傾向として、異物が正に帯電しているほど垂直方向に移動しており、異物が負に帯電していると垂直方向に移動しにくいことがわかる。この原因として静電気力の影響が考えられる。今回の実験および解析モデルでは電界の方向は下側電極側から上側電極に向いている。その影響で負に帯電している異物は下側電極にひきつけられるように静電気力が働く。逆に、正に帯電している異物は下側電極から離れるような方向に静電気力が働いている。この静電気力の働く向きが原因で負に帯電している異物のほうが正に帯電している異物に比べて垂直方向に移動しにくいと考えられる。

5. 1. 2 水平方向

図 12 および、図 13 はそれぞれ、異物をリレー電極の中央付近に置いた後にリレーを稼働させた場合の異物の水平方向に関する変位である。

Fig.12 Displacement of a foreign object (Experimental result)

Fig.13 Displacement of a foreign object (Calculated result)

図 13 に示すように、計算結果では、異物は負に帯電しているよりも正に帯電している方が水平方向に大きく移動している。しかし、実験結果では、図 12 に示すように正に帯電した異物はリレー電極上から落下する結果となった。正に帯電した異物は静電気力により垂直方向に活発に移動したと考えられる。実験では異物是不規則な形状をしており、リレー電極と衝突した際のはね方は不規則となり、異物がリレーから落ちたと考えられる。一方、計算では質点による 2 次元解析のため、異物がリレーから落ちることなく移動する。そういった違いが、結果に表れているものと推察される。

5・2 異物の初期位置がリレー接点付近の時

5. 2. 1 垂直方向

図 14 および、図 15 はそれぞれ、異物をリレー電極の接点付近に置いた後、リレーを稼働させた場合の異物の垂直方向変位の実験値と理論値である。

Fig.14 Displacement of a foreign object (Experimental result)

Fig.15 Displacement of a foreign object (Calculated result)

実験結果も、計算結果も異物は正に帯電しているほど移動量が大きくなり、異物が負に帯電しているほど移動量は小さくなっている。移動量の大きさも実験結果と解析結果を比較するとおおむね一致している。この移動の傾向の差は静電気力が影響していると考えられる。

5. 2. 2 水平方向

図 16 および、図 17 はそれぞれ、異物をリレー電極の接点付近に置いた後、リレーを稼働させた場合の異物の垂直方向変位の実験値と理論値である。

Fig.16 Displacement of a foreign object (Experimental result)

Fig.17 Displacement of a foreign object (Calculated result)

計算結果では、どの帯電量の場合でも異物は0.6mm移動しているが、20.0nC/gの異物は接点側面にぶつかり初期位置付近まで戻った。移動量は接点側面にぶつかるまでは20.0nC/gが最も接点に近づくのが早い。一方、実験では、全ての場合について、移動量が計算値に比べて少ない。特に、24.8nC/gに帯電している異物は接点から離れる方向に移動した。これは、異物の形状が不規則であることや、はねた時の回転方向に原因があると考えられる。

7. 結 語

リレー電極間における異物の挙動について、理論的、実験的に解析した。実験値と解析値を比較した結果、垂直方向に関して、正に帯電した異物が、負に帯電した異物よりもはねているという傾向は一致した。水平方向に関しては、実験値と解析値には違いが生じた。この原因として、実験では異物が正に帯電している場合、異物は活発に移動し、リレー電極上から落ちてしまったことや、異物の形状により、動作が不安定になったことが原因と考えられる。

文 献

- (1) 千葉隆幸, 近藤日呂志, “リレー封止剤飛散不良の改善”, 第16回品質工学研究発表大会, pp.522-525.
- (2) 竹中豊, “物質に起因する接触抵抗増大のメカニズム”, 信学技報 (TECHNICAL REPORT OF IEICE.) R96-20, 1996-11, pp.7-10.
- (3) 佐伯暢人, 皆川利宣, 高野英資, “個別要素法による振動輸送の3次元数値シミュレーション”, 日本機械学会論文集C編, Vol. 64, No.625 (1998-9), pp.16-22.
- (4) 安田仁彦, “モードマトリクスと動的設定”, 株式会社コロナ社, pp. 84-85.
- (5) 粉体工学会編, “粉体シミュレーション入門”, 産業図書株式会社, pp.29-36.
- (6) 武田 進, “気体放電の基礎”, 東京電機大学出版局 pp.57~58.