

■9群 (電子材料・デバイス) - 8編 (センサ・弾性波・機構デバイス)

4章 機構デバイス

【本章の構成】

本章では以下について解説する.

- 4-1 開閉接点現象とアーク放電
- 4-2 スライディング接点現象
- 4-3 リレー
- 4-4 スイッチ
- 4-5 リードリレー
- 4-6 コネクタ
- 4-7 機構デバイスとトライボロジ

■9群-8編-4章

4-1 開閉接点現象とアーク放電

(執筆者：関川純哉) [2018年9月 受領]

家電品などの数アンペアの回路を開閉するスイッチから、数10キロアンペアの大電流を遮断する遮断器まで、多くの機器の中に電気接点对が組み込まれている。近年では、太陽光発電、データセンターでの直流給電、及び大容量の蓄電池を搭載した自動車の普及に伴い、直流回路の開閉技術に注目が集まっている。交流回路では一定の周期で電流ゼロ点が現れるのに対し、直流回路ではそれがいないため遮断が難しい。直流回路を使用するシステムの基礎技術として直流遮断があり、電気接点間で発生するアーク放電を確実に短時間で消弧することが必要とされている。本節では、この分野に関連する文献を紹介した後、電磁リレーなどに搭載されている対向電気接点对間で発生するアーク放電の基礎について解説する。

電気接点に関する分野の教科書をいくつか紹介する。最も古典的な文献として Holm book とも呼ばれる文献 1) がある。特に接触現象の基礎的な理論について詳しい記述がある。日本語の文献 2) には、電気接点对の接触現象とその間で発生するアーク放電の基礎から、接点の損傷状態や接触抵抗増大などに関する実際の現象までがまとめられている。文献 3) には、文献 1) の内容を一部含みながら最近の研究成果がまとめられており、接触現象の基礎、放電、摺動接点、及び接点材料など、電気接点の諸現象に関する情報が網羅されている。この分野にこれから関わる方が最初に読む本として最適だと思われる。必要に応じて、接触現象の補足には文献 1) が、日本語の教科書として予備知識を得るためには文献 2) が役立つ。

アーク放電を発生させる方法として、大きく分けて次の2つの方法が挙げられる。

- ① 通電中の電気接点を引き離す。
- ② 離れている電気接点間に高電圧を印加する（絶縁破壊）。

ここで②として挙げた、絶縁破壊によって発生するアーク放電は、接点間隙に存在する気体が高電界により絶縁破壊され導通することで始まる放電であり、本節で想定する電気接点の使用方法では発生しない（してはいけない）現象である。そのため、以下では①の方法によって発生するアーク放電について説明する。

図 1・1 に示すような、直流抵抗性負荷回路内にある、通電中の電気接点对について考える。電源電圧及び回路電流が、アーク放電の発生に必要な電圧・電流（それぞれの値については後述）以上であれば、接点開離時に接点間にアーク放電が発生する（図 1・1 右図）。このアーク放電を開離時アークと呼ぶ。

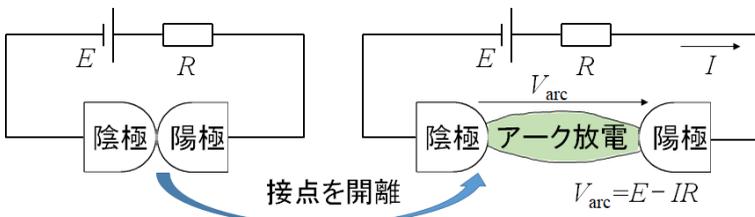


図 1・1 直流回路の開離時に発生するアーク放電

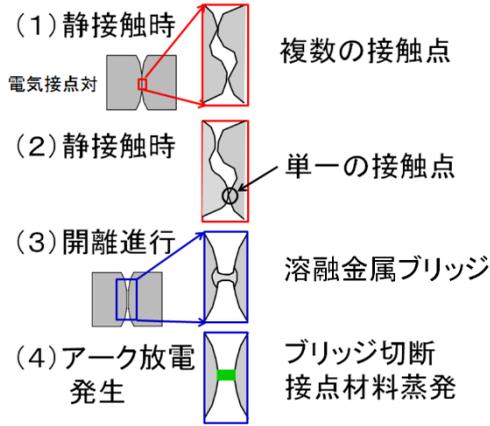


図 1・2 開離接点对間でのアーク放電の発生過程

図 1・2(1)に示すように、同一材料金属接点对が接触している状態を考える。接触中の電気接点は見掛けの接触面内にある凹凸により複数の接触点で接触している。この状態から、接触荷重を徐々に小さくすると、接触点の数は減少する。通電している箇所も少なくなり、最終的に接触点は一点となりその部分に電流が集中する（図 1・2(2)）。このときの接触抵抗 R_c は、集中抵抗として $R_c = \rho / (2a)$ と表される¹⁾。ここで、 ρ は接点材料の抵抗率、 a は接触部分の真実接触面 (a -スポット) の半径である。更に接点間隙が広がると、 a -スポットの半径 a は小さくなり、接触抵抗が増大する。回路抵抗 R が接触抵抗 R_c よりも十分大きければ、接触抵抗 R_c が増大しても回路電流は変わらないため、 R_c の増大に伴い、接触点での発熱 $P (= R_c I^2)$ が増大する（図 1・2(3)）。このとき、接触点周辺の接点材料が溶融し、溶融金属ブリッジ（単にブリッジとも呼ばれる）が形成される。更に接点間隙を広げると、図 1・2(4)に示すように、液体の溶融金属ブリッジが破壊・蒸発し、その金属蒸気中にアーク放電が点弧し接点間の導通状態が維持される。溶融金属ブリッジの特性については文献 1), 2) に詳しい説明がある。

開離時アークの発生条件を表 1・1 に示す。抵抗性負荷の場合、電源電圧が最小アーク電圧 V_m 以上で、通電電流が最小アーク電流 I_m 以上であれば、アーク放電の発生条件を満たす。負荷が誘導性の場合には、遮断時の逆起電力の発生により実効的に電源電圧が高くなり、回路条件として電源電圧が V_m よりも低く、通電電流が I_m よりも小さい場合でも開離時アークが発生する可能性がある³⁾。

接点を閉じるときに、電気接点が機械的に跳ね返り（バウンス）を起こすと、その微小な開離中で上述の過程と同様に接点間にアーク放電が発生する場合がある。

表 1・1 最小アーク電圧 V_m と最小アーク電流 I_m ³⁾

接点材料	Ag	Au	Cu	Pd	W	C
V_m [V]	12	12.5	13	14	13.5	20
I_m [A]	0.4	0.35	0.4	0.8	1.0	0.02

■参考文献

- 1) R. Holm : “Electrical Contacts Theory and Applications Fourth Edition,” Springer-Verlag, Berlin, 1967.
- 2) 高木 相 (編著) : “電気接点のアーク放電現象,” コロナ社, 東京, 1995.
- 3) P.G. Slade : “Electrical Contacts Principles and Applications Second Edition,” CRC Press, New York, 2014.

■9 群-8 編-4 章

4-2 スライディング接点現象

■9 群-8 編-4 章

4-3 リレー

(執筆者：青木 武) [2012年7月 受領]

4-3-1 リレーの機能と用途

電子情報通信分野のリレーは電磁リレーと半導体リレーに大別される。電磁リレーは入力回路に投入された電流・電圧などの電気エネルギーを磁気回路などで機械的エネルギーに変換し、ばね負荷系とのバランスにより、ほかの電気回路を ON-OFF 制御する機能を持っている。これに対し、半導体リレーはトランジスタ、IC など電子回路で構成されるリレーであり、上記電磁リレーと同等の ON-OFF 機能を持つフォトトライアックカプラ方式のリレーのほか、ロジックリレー、I/O リレー、光 MOS リレーがあるが、市場は当分野のリレー全体の 12%程度であり、主流は電磁リレーにあり、紙面も限られているので、本稿では割愛する。

この電磁リレーは Sturgeom によって 1824 年に発明されたが、その本格的な使用は磁石式電話交換機が実用に供された 1878 年からである。その後、自動交換機用電磁リレー及び通話路スイッチは電子部品の急速な進展やデジタル化への移行が進む 1960 年～1970 年代まで、通信機器の発展とともに変遷した²⁾といえる。現在、携帯端末や無線伝送機器などの通信機器にも用いられているが、リレー市場を牽引するのは、自動化機器などの産業設備のほか、電装部品などの車載機器、白物家電などの家電・住設機器、TV などの AV 機器、コピー機など OA 機器などの制御回路、駆動回路、電源回路用であり、中・高電流用リレーに需要の大幅な伸びは移りつつある。

なお、電力用の保護リレー、計測用リレーは重電分野に属し、電子情報通信分野の範疇外にあるので、これらも本稿では取り上げない。

4-3-2 電磁リレーの構造と動作

電磁リレー（以下、断らない限りリレーと略記する）にはヒンジ型リレー、ラッチングリレー、高周波リレー、プランジャ型リレー、リードリレー等々多種あるが、ここでは代表的なヒンジ型リレーの例にとり、構造と動作を述べる。

ヒンジ型リレーは図 3・1¹⁾に示すように、磁気回路、ばね負荷系、接点で構成される。接点の動作は、入力回路からコイルに電流を流し、磁気吸引力を生じさせて接極子と鉄心磁極を吸着させて、可動ばねを図の下方に押し下げ、可動接点と固定接点を閉成させることによる。この動作で出力回路が形成されることになる。接点の開離はコイルへの通電を除き、接極子と鉄心磁極間の磁気吸引力を消滅して、復帰ばねの弾性力で可動ばねを押し上げることにより行い、出力回路を開放させる。このようにコイルに流す電流を断続させて、電気エネルギーから機械的エネルギーへの変換を制御し、接点の切換えを行っている。

4-3-3 電磁リレーの信頼性と障害要因

リレーの信頼性は接点障害の多寡に左右される。接点障害は被膜生成などで接触抵抗が上昇する接触抵抗障害と粘着や溶着で接点が離れなくなる開離不能障害がある³⁾。各障害には多くの現象が絡み、現象には多くの要因が原因となるが、要因のうち接点現象を大きく変え、障害

モードに最も大きな差を生じさせる要因は電氣的負荷条件である。最近、用途の拡大とともに負荷条件も多様化しているが、ここでは小電流（数アンペア以下）で、放電も軽微で済む低電圧領域で用いられる接点を低負荷接点、中・高電流（数アンペア～数十アンペア）で、放電を伴う電圧領域の接点を高負荷接点に分け、以下解説を進める。

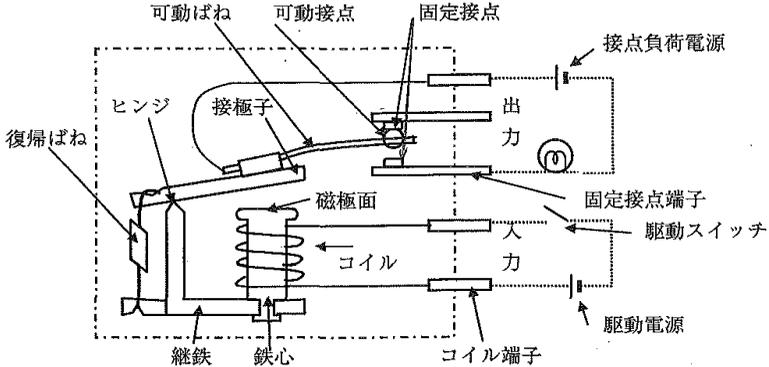


図 3・1 リレーの原理図

まず、各接点負荷に対して発生する接点現象と接点障害の関係を表 3・1 に示す。低負荷接点では耐食性に富む貴金属といえども、表面被膜が生成し、その被膜を機械的にも電氣的にも除去し難いため、接触抵抗障害が生じやすい。他方、相對摺動幅が大きくかつ電流量も相對的に大きい接点や封入し、大氣と遮断した接点では、粘着による開離不能障害も発生しやすくなるという特徴がある³⁾。

表 3・1 汎用リレーの接点現象と接点障害

接点負荷	用途	接点現象	接点障害
低負荷 （小電流 低電圧）	通信機器 伝送装置 ネットワーク機器 無線基地局 放送機器 デジタル放送関連 産業機器 信号制御機器	表面皮膜 生成 塵埃付着 相對摺動 →粘着	接点抵抗 障害 開離不能 障害
高負荷 （中・大 電流 中・高 電圧）	下記電子機器・設備機器の電源回路制御・駆動回路 産業機器 家電・住設機器 OA機器 AV機器 車載機器 エンジン制御系 各種カーアプリケーション	放電 —消耗 —ロッキング —溶着 —シユール熱	接点抵抗 障害 開離不能 障害

一方、高負荷接点では、放電、ブリッジ、ジュール熱による溶着が支配的となり、開離不能障害が大きな問題となる⁴⁾。また、放電消耗による投錨効果でロッキングによる開離不能障害や、消耗に伴う下地金属露出による接触抵抗障害も発生する。

高低両負荷に共通することであるが、電気的負荷条件のほかに、機械的要因として、接触力、開離力、摺動特性などがある。接触力は安定な接触抵抗特性維持や瞬断防止に、開離力や摺動特性は溶着・粘着抑制や瞬接防止に大きく関わる条件であるが、機器の小型・高密度化や価格低減への要請への対応が優先され、リレーの設計側からの設計自由度は小さいものとなっている。

4-3-4 電磁リレーの動向と構成材料

リレーのうち、低負荷リレーは電子機器の小型・高性能化の伴い、高密度化、軽薄短小化が進んでいる。一方、高負荷リレーは適用領域の拡大に伴い、負荷条件の多様化が進むなか、RoHS指令への対応も必要となり、規制材料と同等以上の性能を維持することが求められている⁴⁾。

それらの動向に適合し、現在汎用されている構成材料を表3・2に示す。各材料、特に接点材料は長年実用に供されたなかで淘汰された汎用材料であるが、信頼性は負荷条件に大きく左右され、組成、寸法・形状などでも変わるので、最終的には実用に近い条件において信頼性試験データを積み、材料を選ばなければならない。

表3・2 電磁リレーの構成部品材料

構成部品		材 料
接点	低負荷	・ Au or AuAg (表層) / Ag or AgNi (第2層) ・ AgPd
	交流用	・ Ag (3A 以下) ・ AgNi (3~5A)
	高負荷	・ AgSnO ₂ 、AgSnO ₂ InO ₂ (5~16A)
	直流用 高負荷	・ AgSnO ₂ InO ₂
磁気回路 接極子 鉄心 継鉄	・ けい素鋼、 ・ 低炭素鋼、 ・ FeNi 合金、 ・ 純鉄	
ばね	・ りん青銅、・ FeNi、・ キュポロニックル ・ ベリリウム銅、・ 洋白	

■参考文献

- 1) 日本電気制御機器工業会特別委員会(編)：“制御機器の基礎知識リレー編(第3版),” NECA, 2000. (統計資料はNECA 2011年度資料)
- 2) 日本電信電話公社電気通信研究所(編)：“機構・回路部品概論,” 日本電信電話公社研究開発本部, 1977.
- 3) 青木 武：“リレー接点の環境劣化とその抑制法,” 信学技法, pp.1-7, EMD2001-5, 2001.
- 4) 窪野隆能：“直流回路を開閉するリレー電気接点のスティッキング故障,” 信学論(C), vol.J86-C/2, 2003.

■9 群-8 編-4 章

4-4 スイッチ

■9 群-8 編-4 章

4-5 リードリレー

(執筆者：横山和也) [2012年6月 受領]

リードリレーは、リードスイッチとコイルによって構成された電磁リレーの一種であり、コイルへの通電により磁束を発生させ、その磁束によって発生する磁気吸引力でリードスイッチの接点を閉成する。また、励磁コイルへの通電を除くとリードの弾性力(以下、開離力という)により接点が復帰して開放に戻る。本節では、標準的な a 接点リードリレーの動作について説明する。

(1) リードリレーの基本構造

リードリレーは図 5・1 に示す基本構造を有し、電気回路図では図 5・2 によう示される。コイル端子間に電流を流すと内部のリードスイッチが磁化し、接点間に発生する磁気吸引力によって接点が閉成する。コイルの通電を止めると、リードの開離力で開放状態に復旧する。

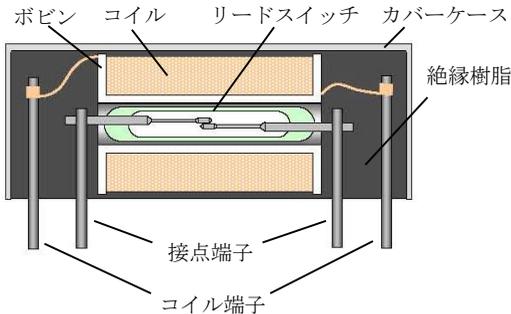


図 5・1 リードリレーの基本構造 (断面図)

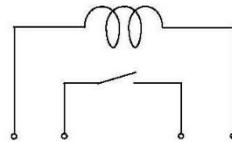


図 5・2 リードリレーの電気回路図

(2) リードリレーの起磁力

図 5・3 に示す巻数 N 、長さ L_1 [m] のコイルの中心に、接点部に所定の重なり a [m] で間隔 x [m] (以下、接点ギャップと言う) を持った全長 L_2 [m] のリードスイッチを置き、コイル電流 I [A] を流したときの励磁力 NI [A] と接点ギャップを通る磁束 Φ_g [Wb] の関係は、式 (5・1) のように示される²⁾。

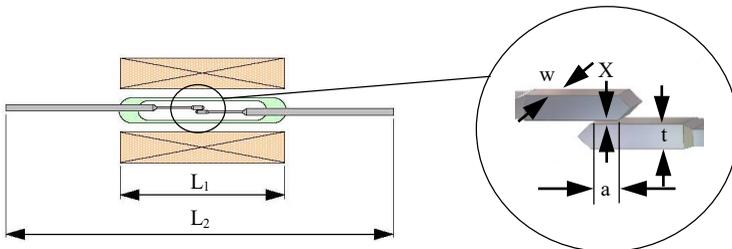


図 5・3 リードリレーのモデル図

$$NI = \frac{10}{4\pi} L_1 r \frac{\cosh^{\alpha L_2/2} + (pr_g/2\alpha) \sinh^{\alpha L_2/2}}{\cosh^{\alpha L_2/2} - \cosh^{\alpha(L_2-L_1)/2}} \Phi_g \quad (5 \cdot 1)$$

ここで、 p : リード片のパーミアンス、 r : リード片の磁気抵抗、 r_g : 接点ギャップの磁気抵抗、 α : \sqrt{pr} 。

(3) リードリレーの動作解析

図5・3の組立寸法での接点部の磁気吸引力 F_m [N] を求めると、式(5・2)のようになる。

$$F_m = \frac{1}{8\pi} \Phi_g^2 \frac{d}{dx} \left(\frac{x}{\mu_0 \left(1 + \frac{k}{a} x\right) aw} \right) = \frac{1}{8\pi \mu_0 \left(1 + \frac{k}{a} x\right)^2} \Phi_g^2 \quad (5 \cdot 2)$$

またリード片のスティフネスを S [N/m]、接点開放時の接点ギャップを X [m] とすれば、接点が閉成するまでの任意のギャップ x [m] における開離力 Fr [N] は、各接点がそれぞれ $(X-x)/2$ [m] だけ変位しているから式(5・3)で与えられる。

$$Fr = \frac{S(X-x)}{2} \quad (5 \cdot 3)$$

こうして得られた式(5・2)の磁気吸引力と、式(5・3)の開離力の関係を図5・4に示す。

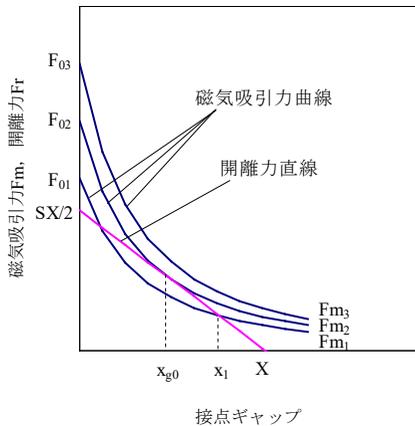


図5・4 磁気吸引、開離力特性

磁気吸引力は、磁束 Φ_g に応じて増加し F_{m1} から F_{m2} を經由して F_{m3} へ変化し、それぞれの状態は次のようになる。

F_{m1} の状態は、接点ギャップ $x = x_1$ の位置で $F_{m1} = Fr$ となるが、 $x < x_1$ では $F_{m1} < Fr$ のため、接点は閉成できず、見掛けの接点ギャップが x_1 になった状態のままとなる。

F_{m2} では、接点ギャップ $x = x_{g0}$ で磁気吸引力曲線と開離力直線が接しており、 $x < x_{g0}$ でも F_{m2}

$> Fr$ となるため、接点が閉成する。この磁気吸引力曲線が開離力直線に接するときが接点を閉成するのに必要な最小の磁気吸引力であり、接点閉成後に $F_{02} - SX/2$ の接触力が発生する。

Fm_3 は、 $0 \leq x \leq X$ の全範囲で $Fm_3 > Fr$ となるため接点はただちに閉成する。このときの接触力は $F_{03} - Fr$ である。

(4) 感動磁束と感動特性

リードリレーが閉成するのに必要な感動磁束 Φ_{PI} [Wb] は、磁気吸引力曲線と開離力直線が接するという条件を基に求めることができ、式(5.4)のようになる。

$$\Phi_{PI} = \sqrt{\frac{(CX+1)^3}{4C}} S \cdot 8\pi\mu_0 aw \quad (5.4)$$

したがって、接点を閉成するときの起磁力 NI_{PI} [A] は、式(5.1)と式(5.4)から式(5.5)のように導かれる。

$$NI_{PI} = \frac{10}{4\pi} L_1 r \frac{\cosh^{\alpha L_2/2} + (pr_g/2\alpha) \sinh^{\alpha L_2/2}}{\cosh^{\alpha L_2/2} - \cosh^{\alpha(L_2-L_1)/2}} \sqrt{\frac{(CX+1)^3}{4C}} S \cdot 8\pi\mu_0 aw \quad (5.5)$$

(5) 開放磁束と開放特性

コイル電流 I [A] を徐々に下げ接点が開放する際の起磁力は、接点閉成時の磁気吸引力が開離力よりも小さいという条件を基に求めることができる。ここで、内部リードスイッチに非磁性の接点材料が厚さ t_p [m] で皮膜処理されているとすると、開放磁束を Φ_{DO} [Wb] は式(5.6)のようになる。

$$\Phi_{DO} = \sqrt{(X-2t_p)(1+2t_p C)^2} S \cdot 4\pi\mu_0 aw \quad (5.6)$$

したがって、接点が開放するときの起磁力 NI_{DO} [A] は、式(5.1)と式(5.6)から、式(5.7)のように導かれる。

$$NI_{DO} = \frac{10}{4\pi} L_1 r \frac{\cosh^{\alpha L_2/2} + (pr_g/2\alpha) \sinh^{\alpha L_2/2}}{\cosh^{\alpha L_2/2} - \cosh^{\alpha(L_2-L_1)/2}} \sqrt{(X-2t_p)(1+2t_p C)^2} S \cdot 4\pi\mu_0 aw \quad (5.7)$$

■参考文献

- 1) 矢野孝男, 川喜田千尋, 安田正晴, 日野原邦夫: "Reed Switches," 沖電気工業, pp.5-19, 1987.

■9 群-8 編-4 章

4-6 コネクタ

■9 群-8 編-4 章

4-7 機構デバイスとトライボロジ