

大電流リードスイッチの開発

虎澤 裕康

環境負荷物質である水銀の全廃に伴う水銀リレーの代替スイッチや、多数のLEDを使う表示機器制御用スイッチなどでは、電流容量の高いスイッチが必要であり、スイッチの大電流ニーズが高まっている。このような市場ニーズを受け、従来の制御電流（～1A）を大きく上回る電流を直接開閉可能なリードスイッチの開発を行った。電流5Aが制御可能なリードスイッチとコイルを組み合わせたリードリレーの形態をとることで、計測機器、自動車電装部品などで既に採用されているリードリレーの電流性能が大幅に向上することになり、従来用途の性能向上が期待されている。

リードスイッチ制御電流を増やすためには、放熱性の面からスイッチサイズの大型化が必要となる。しかし、今回はリード片材料の改良とリード片形状を最適化することで、従来品と同等サイズでありながら電流5Aを直接開閉することが可能なリードスイッチを開発することを目標に設計を行った。本稿では制御電流を増加するために克服すべき技術課題とこの対策事項についての検討結果について報告する。

リードスイッチの概要

リードスイッチは、リード片、接点材料、ガラス管、不活性ガスにより構成される。図1に構成図を示す。一对の強磁性材料からなるリード片は、接点部に僅かな間隙を持って対向配置し、ガラス管で密封、固定される。外部磁界が印加されると強磁性体のリード片は磁化し、接点部は磁気吸引力により互いに引き合い、電氣的に接続し接点がオンする。また、リード片はばね性を有する形状をしており、外部磁界が除去されるとリード片の開離力（弾性力）により接点がオフする。

従来のリードスイッチは、0.5A程度の小電流を取り扱う分野で利用されることが多く、リード片となる材料は電気抵抗率よりも、ガラスの熱膨張率とのマッチング、製造上の加工性に関係する引張強さ等に着眼した選択がなされてきた。

しかし、自動車電装部品の高電圧化、情報機器電源の直流化、一般家庭電源の高電圧化が見込まれており、今

後、リードスイッチに要求される電流も上昇することが予想される。ただし使用する電流が、たとえば2A以上の大電流を流すことができるリードスイッチでは、リード片自体の発熱が大きくなり、スイッチ作動が不能となるため、リードスイッチの形状を通常の数倍にも大きくし、放熱性を上げなければならないという問題が生じる。

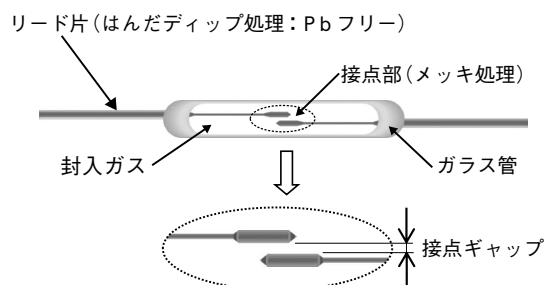


図1 リードスイッチの構成

大電流化により生じる課題

スイッチの大型化を回避しつつ大きな通電電流を扱えるようにするには、次のような点を改良することが必要となる¹⁾。

- ① EMB（Electo-Magnetic-Bounce）の発生を抑える。
- ② リード片の電気抵抗率を低くする。
- ③ 接点部の接触抵抗を小さくする。
- ④ アーク放電の継続時間を可能な限り短くする。

①は、磁気作用に関連した事項であり、通電電流から発生するうず磁界（eddy magnetic field）で外部磁界が相対的に減少し、オン状態を維持するための十分な磁気吸引力が得られなくなることで生じる不安定な動作を防止することを意味する。②、③については、リードスイッチの抵抗値に関連する事項であり、通電電流による発熱の低減を意図するものである。④は放電が接点面の損傷を与えるものであり、リードスイッチの寿命低下に関係する。

EMB発生に関する考察

EMBは、リードスイッチの通電電流により発生するう

ず磁界と、通電電流によるジュール熱（Joule heat）によりリード片に磁気劣化が起こることを主因として発生する。図2にリードスイッチの通電電流により発生するうず磁界の概略を示す。このうず磁界により外部磁界が減少する度合いを簡単な計算により確認する。

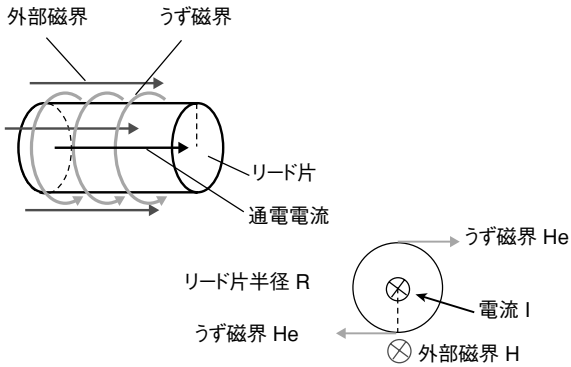


図2 通電電流によるうず磁界

リード片を流れる通電電流を*i*、距離を*h*とすると、うず磁界*He*は、(1) 式で表される²⁾。

$$He = \frac{i}{2\pi h} \quad (1)$$

外部磁界をコイルにより発生する磁界として考え、コイル電流を*I*、コイルの巻き数を*N*、コイルの長さを*L*とすると、外部磁界*H*は、(2) 式で表される。

$$H = \frac{NI}{L} \quad (2)$$

通常、リードスイッチは、100AT以下の磁界で簡単にオンする。標準コイルは、コイルの長さが15mm、コイルの巻き数が5000ターンとなり、コイル電流を20mAとすると100ATの外部磁界が発生する。

図3に外部磁界*H*に対するうず磁界*He*の影響を表す概略図を示す。これより、実効外部磁界*H'*は、(3) 式で表される。

$$H' = \sqrt{H^2 - He^2} \quad (3)$$

図4に通電電流による外部磁界の減少を示す。大電流リードスイッチの駆動に要する外部磁界にあたる感動値は50ATとなるため、十分なオン状態となるように印加する外部磁界を75ATと仮定すると、通電電流が7Aを越える場合には、うず磁界の影響でオン動作ができなくなる。

大電流を通電する場合、安定した動作を得るためには、印加する外部磁界も高めに設定する必要がある。

今回の大電流リードスイッチの設計では、リード片のばね性を下げることで、磁気吸引力が低下する条件下で

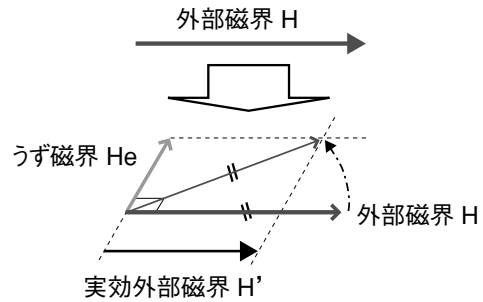


図3 通電電流によるうず磁界の影響の概略

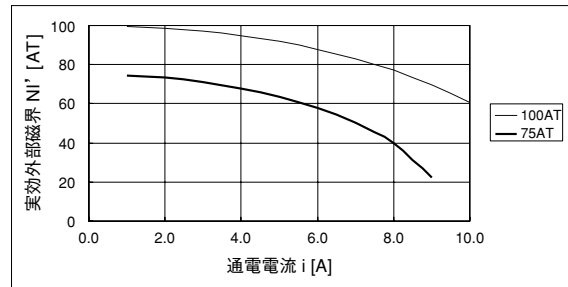


図4 通電電流による外部磁界の減少

も、オン状態の維持が可能になるように設定している。また、ばね性低下により、オフ時の開離力は低下するが、接点ギャップを拡大することにより、これを補うように設計している。

もう一つの問題は、通電電流によるジュール熱（発熱）によりリード片の温度が材料のキュリー温度（Curie temperature）近くまで上昇すると、自発磁化（spontaneous magnetization）が非常に小さくなり、外部磁界が一定であってもリード片の磁気吸引力が小さくなる点である。ここで、通電電流により生じる発熱によるリード片の温度上昇について考える。

発熱低減の有効性

(1) キュリー点

鉄、コバルト、ニッケルは、3d遷移金属と呼ばれ、代表的な強磁性材料として知られている。強磁性体は結晶内の原子の持つ磁気モーメントがすべて一方向を向いた秩序状態にある。この秩序状態は、電子スピン間の交換相互作用によって決まり、温度上昇と共に少しずつ乱れを生じる。強磁性体が完全に無秩序な状態となる温度はキュリー点（Curie point）と呼ばれる。キュリー点を上回る状況では、強磁性体としての性質が失われることになる³⁾。つまり、通電電流により生じる発熱により、キュリー点近傍の温度状況下では磁気作用を駆動に用いるリードスイッチのオン動作が不能となる。図5（次ページ）に

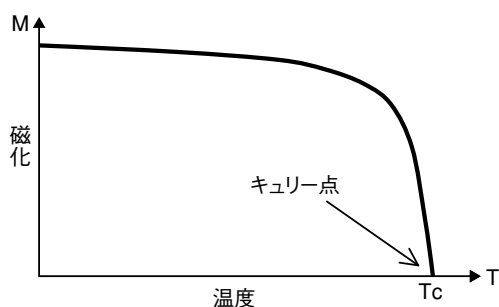


図5 自発磁化の温度変化のイメージ

表1 強磁性材料の特性

材質	コバルト Co	鉄 Fe	ニッケル Ni
比透磁率 μr	250	5,000	600
キュリー温度 T_c [°C]	1,131	770	358
密度 [8.9g/cm ³]	8.9	7.87	8.9

表2 リード片材料となる磁性材料の磁気性能

項目	磁性材料	
	Fe-Ni(52%)	Fe-Co(80%)
キュリー点 T_c [°C]	520	1,030
磁束密度 B [T] (100e=795.7AT/m印加時)	1.43	1.60
保磁力 H_c [A/m]	15.1	119.4
透磁率 μ [H/m]	0.0018	0.0020

自発磁化の温度変化の様子を示す。また、表1に強磁性材料の特徴を示す。キュリー点が最も高い材料はコバルトとなる。

リードスイッチの封止部は、1,000°C前後でガラスを溶融して形成するため、ガラス管とリード片の熱膨張係数の差が大きくなると冷却後にガラス管クラックが発生しやすくなる。このため、ガラス管の熱膨張率に合ったリード線材料が必要であり、磁性材料は限定される。さらに、磁性材料はリード線状に加工することが可能であることも要求される。つまり、大電流リードスイッチのリード片に適用する磁性材料は熱膨張率だけではなく、機械的加工性、磁気的特性を持つように成分比率を合わせる必要がある。このような制約の中で、コバルト含有量が大きくリード線として加工が可能な材料に、Fe-Co (80%) があり、この適用を検討した。表2に材料としてリード片加工が可能な磁性材料の磁気性能を示す。キュリー点が1,000°Cを越えており、従来材料の約2倍の効果が期待できる。

(2) 放熱による熱拡散

質量 m 、表面積 S 、比熱 c 、単位面積単位時間あたり熱

伝達率 ν 、抵抗 R 、電流 i 、室温を θ_0 、リード片の温度を θ とし、時間 t 後の温度上昇について考える。

温度が $d\theta$ だけ上昇するための発熱量は $mc \cdot d\theta$ となり、また、 dt 時間の放熱量は $S\nu(\theta - \theta_0) dt$ となるので、(4) 式のようにまとめられる⁴⁾。

$$mcd\theta + S\nu(\theta - \theta_0) dt = Ri^2 dt \quad (4)$$

(4) 式を変形し、積分すると、(5) 式を得る。

$$\frac{1}{\left(\theta - \theta_0 - \frac{Ri^2}{S\nu}\right)} d\theta = -\frac{S\nu}{mc} dt$$

$$\log\left(\theta - \theta_0 - \frac{Ri^2}{S\nu}\right) = -\frac{S\nu}{mc} t + K \quad (5)$$

$t=0$ で $\theta = \theta_0$ になるように K' を定めると、(6) 式を得る。

$$\theta - \theta_0 = \frac{Ri^2}{S\nu} \left(1 - e^{-\frac{S\nu t}{mc}}\right) \quad (6)$$

温度が上昇して最終温度に達したとき、発熱と放熱が釣りあっているから、(6) 式は (7) 式でおける。

$$S\nu(\theta - \theta_0) = Ri^2 \quad (7)$$

以上の結果、大電流リードスイッチの通電電流によるリード片の温度上昇は、(8) 式で表すことができる。

$$(\theta - \theta_0) = \frac{Ri^2}{S\nu} \quad (8)$$

(3) キュリー点に到達する通電電流の見積

発熱量は、抵抗と、通電電流の2乗に比例して増加するため、リード片の電気伝導率を下げることで発熱量は低下する。Fe-Ni (52%) 合金の電気伝導率は35 [$\mu\Omega \cdot \text{cm}$]、Fe-Co (80%) 合金は12.5 [$\mu\Omega \cdot \text{cm}$] となり¹⁾、Fe-Co (80%) 合金は、発熱を低減する効果が高い。つまり、Fe-Co (80%) 合金は、キュリー点が大きくなる磁性面ばかりでなく、発熱面からも大電流リードスイッチに有利な材料である。

ここで、リード片の材料としてFe-Ni (52%) 合金とFe-Co (80%) 合金とを使用した場合で、通電電流の違いについて考える。同形状のリード片で構成されるリードスイッチに対して、熱伝達率を10 [$\text{W}/\text{m}^2/\text{K}$] とおき⁵⁾、(8) 式を用いて、キュリー点に到達するのに必要な通電電流を計算すると、Fe-Ni (52%) 合金では、3.55 [A] となり、Fe-Co (80%) 合金では、7.79 [A] と算出される。

図5に示すようにキュリー点近傍では、急激に磁気性能が低下する。たとえば、ニッケルではキュリー点に対して約90%の温度に達した時点では、磁化が50%程度の低

下に留まる。このことから、リードスイッチの駆動を加味した実質的な通電電流は、Fe-Ni (52%) 合金では、3.2A、Fe-Co (80%) 合金では、7.0Aと推測される。通電電流5Aを制御する大電流リードスイッチでは、Fe-Co (80%) 合金の適用が必要となる。

アーク放電の検討

電流の流れているリードスイッチがオフする時は、機械的開離と電氣的開離にずれがあり、電氣的な開離をしたときには既にギャップが存在している。

初期段階において接点表面は、熔融ブリッジと呼ばれる接点材料が融けて接点間が繋がった状態になる。この熔融ブリッジは、オフ直後に発生し、消滅する時点までに接点間はブリッジ長に相当するエアギャップとなっている。その後発生するアーク放電により、接点間は電氣的には通電状態とみなされる。アーク放電終了時点までに接点間はアーク長に相当するエアギャップとなっている。以降、リード片の機械的な振動に伴って、接点間がさらに開き、同時にスナップアクションが起こり、初期の設定ギャップまで接点が一気に開く¹⁾。

アーク放電は、接点を損傷する要因であり、リードスイッチの寿命低下につながる。アーク放電継続時間を極力短くすることが寿命低下を抑えることになる。このためには、リード片を開離する力を大きくすることが有効であり、大電流リードスイッチでは、接点ギャップを製作可能な限界まで広げ、かつ、オン動作可能なリード片のばね性を有するように設計する必要がある。

設計・試作評価

(1) 具体設計

製造限界近傍になる接点ギャップ50 μm以上の設定で磁気吸引力を適切に作用させるためには、リード片のばね性を下げる必要があり、リード片バネ部の厚さを薄く、あるいは、長さを長くすることとなる。しかし、リードスイッチの製造では、ガラス管内壁とのクリアランスを確保しつつ、ガラス管内に内包する必要があり、バネ部厚さを優先すると幅が拡張するためガラス管との適切な間隔が取れず安定した量産が困難になる。また、バネ部長さの拡張は、ガラス管封止部との距離の減少につながり、封止工程で熔融したガラスの制御が難しくなる。このような点を十分に考慮しリード片設計、リードスイッチ構造設計を行った。今回設計したリード片を用い、ガラス管径φ2.8mm、ガラス管長16.5mmのリードスイッチとして試作した。

(2) 評価結果

表3に試作品の初期特性の一覧を示す。感度特性は設定した値となっている。接点ギャップを60 μmで作製したサンプルとなるが、十分な接触力が得られており、適切なばね性の低下が図れている。従来のFeNi (52%) 合金を使ったサンプルで、従来構造と今回設計した構造を比較すると通電電流が約2倍となっており、今回設計した大電流リードスイッチのリード片形状、スイッチ構造による効果が見られる。また、Fe-Co (80%) 合金を用いた大電流リードスイッチでは、5A以上の通電電流が得られており材料の効果が確認できる。以上をまとめると、

- ① リード片形状と接点ギャップの最適化により、通電電流が1.9倍に増加
- ② Fe-Co (80%) 合金の適用により、さらに通電電流が1.9倍に増加
- ③ ①項、②項の採用により通電電流7Aの性能を持つ大電流リードスイッチを実現

表3 大電流リードスイッチの初期特性

項目	大電流リードスイッチ構造		従来構造
	リード片：FeCo(80%)	リード片：FeNi(52%)	リード片：FeNi(52%)
感動値 Pi [AT]	46.6	42.9	31.4
開放値 Do [AT]	11.8	21.4	21.2
抵抗値 SoCR [mΩ]	17	43	44
通電電流 i [A] (駆動90[AT]、通電時間10分)	7.2	3.7	1.9

今後、大電流リードスイッチの特性パラツキを十分把握すると共に、寿命試験を重ね適正な接点めっき材料と厚さの設定を行い、寿命に合わせた製品化を完成させる。◆◆

参考文献

- 1) 矢野孝男 他：Reed Switches 初版，沖電気工業株式会社，p.46, p.109, 1987年
- 2) 加藤哲男：磁気・磁性材料 初版，日刊工業新聞社，p.2, 1991年
- 3) 宇野良清 共訳：キツテル固体物理入門下，第6版，丸善株式会社，p.142, p.147, 1988年
- 4) 後藤憲一 共編：詳細電磁気学演習，第75版，共立出版株式会社，p.179, 1985年
- 5) 一色尚次 共著：伝熱工学，改訂版，森北出版株式会社，p.37, 2001年

筆者紹介

虎澤裕康：Hiroyasu Torazawa. 株式会社沖センサデバイス 技術第一部 設計第三課