



ソレノイドの高効率磁気回路設計

High-Efficiency Magnetic Circuit Design for Solenoids

吉野 航平 Kohei Yoshino

加藤 敦史 Atsushi Katoh

近年、地球環境の保護を意識したSDGs、カーボンニュートラルへの取り組みが世界的に加速している。当社においても重要課題と位置付けて取り組んでおり、その一環として消費電力を当社比で最大60%削減した新しい汎用ソレノイドバルブを開発した。

本稿では、その新しい汎用ソレノイドバルブに搭載した高効率磁気回路について紹介する。

In recent years, efforts toward protecting the global environment, such as achieving the SDGs and carbon neutrality, have accelerated worldwide. CKD also considers it to be an important issue. As part of our efforts to address this issue, we have developed a new general-purpose solenoid valve that consumes up to 60% less power than our conventional solenoid valves.

This paper presents the high-efficiency magnetic circuit installed in the new general-purpose solenoid valve.

1 はじめに

ソレノイドとは電磁力を利用して電気エネルギーを機械的な直線運動に変換する機能部品を指す。ソレノイドはその応用範囲が広く、自動車、家電、産業機械等に利用されているが、その要素として組み込まれることが多いので、その時々で用途に適した形になっている。

当社でも長年にわたりこのソレノイドを用いたソレノイドバルブ(電磁弁)を生産しているが、今回省エネルギー、省資源に対応する新しいソレノイドバルブを開発した。このバルブに搭載している高効率磁気回路について紹介する。

近年のソレノイドバルブは、コイルの焼損等安全面からコイルの直流化が主流となっている。そのため、交流電源用のコイルは全て全波整流回路を搭載しており、高効率磁気回路は直流回路をベースに設計している。

2 ソレノイドの磁気吸引力

ソレノイドの磁気吸引力は、可動鉄心を動かすための力となる要素である。可動鉄心の駆動に必要な磁気吸引力を低い電流で発生させることができれば、消費電力の低いソレノイドバルブの設計が可能となる。

吸引力は、コイルに電流を流して発生させる起磁力を磁気抵抗で割った磁束が基となる。起磁力はコイル設計で決まる定数のため、磁気抵抗を小さくする磁気回路設計が効率の高い回路となる。

ソレノイドの磁束は(1)式によって表される。

$$\Phi = F / R \quad (1)$$

(Φ :磁束[Wb]、 F :起磁力[AT]、 R :磁気抵抗[1/H])

実際の磁気回路計算において、磁気抵抗 R はあまり

用いられず、磁気抵抗 R の逆数であるパーミアンス P を用いる。すなわち(1)式は

$$\Phi = F \times P \quad (2)$$

(P :パーミアンス[H])で表される。

このパーミアンス P は(3)式で表される。

$$P = \mu \cdot S / \ell \quad (3)$$

(μ :透磁率[H/m]、 S :磁路断面積[m²]、 ℓ :磁路長[m])

磁路長が短く、磁路断面積と透磁率が大きいほどパーミアンス P は大きくなる。

パーミアンス P が大きくなると磁気抵抗が小さくなり磁束が大きくなるため、本開発では省電力化を狙いパーミアンス P を大きくする設計を目指した。

磁気回路全体のパーミアンス P は、空隙パーミアンス P_g と漏れ磁束によるパーミアンス P_f の和、すなわち(4)式で表される。

$$P = P_g + P_f \quad (4)$$

さらに空隙の影響度を把握したい場合、ソレノイドのセクションを直列に分けて個別の P_{g1} 、 P_{g2} 、 $P_{g3} \dots$ を求め、それを総和として(5)式で表すことができる。

$$P = P_g + P_f = P_{g1} + P_{g2} + P_{g3} \dots + P_f \quad (5)$$

3 磁性による物質の分類

ソレノイドのコイルに電流を流して起磁力を発生させた時、コイルの周りに配置をした固定鉄心の材質によって磁気的な状態は大きく変わる。一般的なソレノイドは、この固定鉄心の材質に強磁性体である鉄系材料を採用している。例えばこの固定鉄心をアルミニウ

ムにすると、コイルに流す電流を増加させても吸引力は上がらない。これはアルミニウムが常磁性体であるためである。一般的に、物質はその磁気的特性によって常磁性体、強磁性体、反磁性体に分類される。

常磁性体:磁界を加えた時、同じ方向にわずかに磁化する物質。空気、アルミニウム等。

強磁性体:磁界を加えた時、同じ方向に強く磁化する物質。強磁性体は強く磁化されるため、磁石に吸着する。鉄、ニッケル、コバルト等。

反磁性体:磁界を加えた時、反対方向にわずかに磁化する物質。水、銅等。

常磁性体と反磁性体は強磁性体と比べるとほとんど磁化しないため、これらを非磁性体ともいう。この物質の分類は、比透磁率の大きさによって分類される。

4 透磁率と比透磁率について

パーミアンスPを求めるには、(3)式より、透磁率 μ を算出する必要がある。

1A/mの磁界の強さのもとで真空中に1m²当たり $4\pi \times 10^{-7}$ [Wb]の磁束が通ると定め、それを真空中の透磁率と呼ぶ。

$$\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} [\text{H/m}]$$

比透磁率とは物質の透磁率を真空の透磁率で割ったものであり、(6)式で表される。

$$\mu_r = \mu / \mu_0 \quad (6)$$

(μ_r :物質の比透磁率、 μ :物質の透磁率、 μ_0 :真空中の透磁率 $4\pi \times 10^{-7}$ [H/m])

常磁性体、強磁性体、反磁性体の比透磁率をTable 1に示す。

Table 1 磁性体の分類ごとの比透磁率

	物質	比透磁率
常磁性体	空気	1.000000
	木材	1.000000
	アルミニウム	1.000022
強磁性体	鉄系材料	150~5000
反磁性体	銅	0.9999
	水	0.9999

比透磁率が1に近い物質は非磁性体に分類される。

ソレノイドの構成の中にある銅、アルミニウム等は比透磁率がほぼ1に近いため、空隙とみなすことができる。

空隙の透磁率は、近似値として真空中の透磁率と同等とみなして計算する。

Table1の強磁性体鉄系材料の比透磁率に数値の幅があるのは、素材の持つ磁気特性と与えられる磁界の強さによって変化するためである。

コイルに流す電流I[A]と磁界の強さH[A/m]は比例関係にあるため、コイルに流す電流Iを大きくすると磁界の強さHが大きくなる。この磁界Hによって磁性体は磁気を帯びる。この時単位面積当たりの磁界の流れを磁束密度B[T]といい、磁力の強さを表す。

この磁界の強さHと磁束密度Bは比例関係にあり、透磁率 μ を用いると(7)式で表すことができる。

$$B = \mu H \quad (7)$$

つまり電流Iが大きくなる(磁界の強さHが大きくなる)と磁束密度Bも大きくなる。

ただし透磁率 μ は必ずしも一定の値ではなく、磁界の強さHによって変化する。

透磁率 μ は、Fig.1に示す初磁化曲線を測定して求めることができる。

磁性体が磁化されておらず、加えられている磁界Hもない状態では、磁束密度は0なので原点0の位置にある。この状態において磁性体に磁界Hを印加すると磁性体が磁化するため、磁束密度Bが増加する。その磁気特性を表すのに、横軸に磁界の強さH、縦軸に磁束密度Bをとってグラフ化したものを初磁化曲線という。

この曲線と(7)式より透磁率 μ を求めることができる。初磁化曲線とその時の透磁率を示す μ 曲線をFig.1に示す。

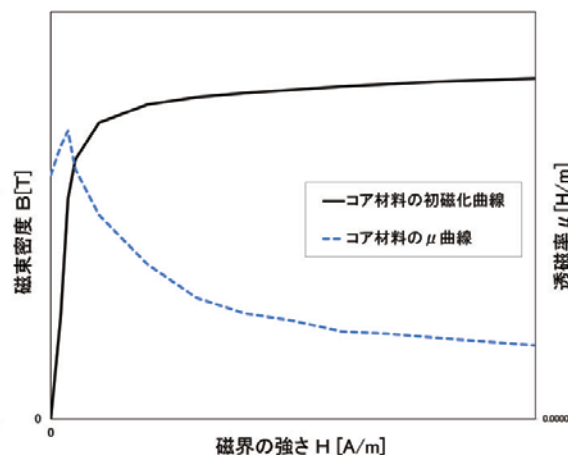


Fig. 1 初磁化曲線と μ 曲線

(3)式より、透磁率 μ が高い方がパーミアンスPは大きくなり、その結果ソレノイドの効率は高まる。電流を多く流し磁界の強さHが大きくなると磁束密度は増加するが、やがて飽和しそれ以上磁束密度Bが増加しない状態となる。この状態を磁気飽和と呼び、磁気飽和に近づくにつれて透磁率 μ は低下するため、パーミアンスPが小さくなる。

ソレノイドはこの透磁率の高いポイントを使う設計が高効率につながる。

高効率磁気回路を設計するにあたり、実際に使用する

る材料を使ってB-Hカーブを測定し透磁率を算出している。

5 高効率磁気回路について

5-1 ソレノイド断面構造

今回開発した高効率磁気回路に関わる構成部品の断面図をFig.2に示す。

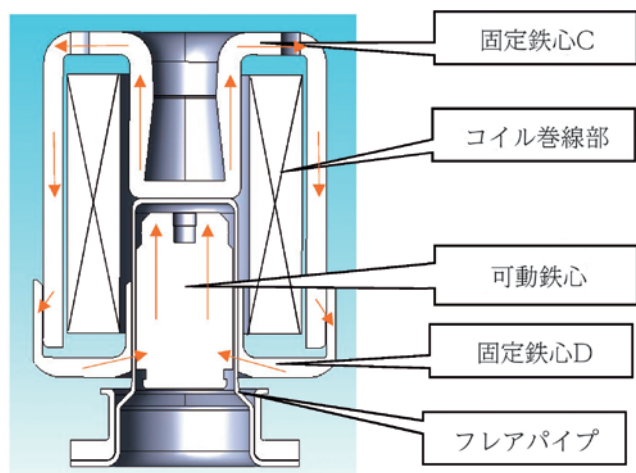


Fig. 2 ソレノイド部断面図

銅線を巻いたコイルに通電をすると、磁力が発生する。この磁力は通常周囲に放散してしまうが、巻き線部の周りに固定鉄心と呼ばれる強磁性体部品を配置すると、その固定鉄心に磁力が集まり可動鉄心と呼ばれる可動鉄心を吸着させる力を生み出すことができる。

Fig.2の赤矢印は磁力の流れを示す。

5-2 高効率磁気回路の特徴

新しく開発した高効率磁気回路は、次の2つの設計ポイントがある。

■フレアパイプの磁性体化

フレアパイプの材質にフェライト系ステンレス（強磁性体）を採用して空隙を縮小させ、パーミッツを大きくした。従来機種のパイプ部にはオーステナイト系ステンレス（常磁性体）を使用しており空隙と同じ状態であったが、効率化のためにこの部分の材質を強磁性体に変更している（Fig. 3）。

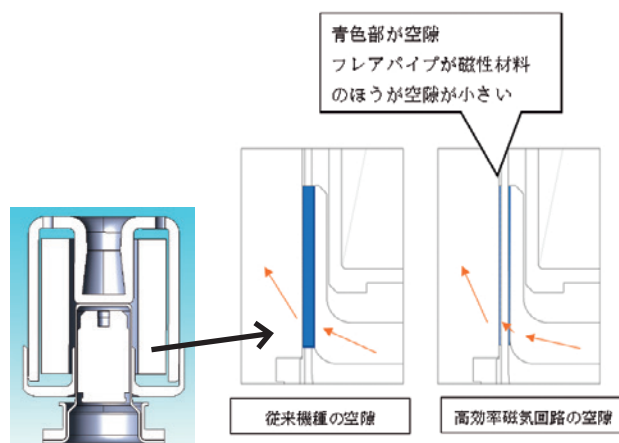


Fig. 3 磁性材料使用時の空隙

ただしフレアパイプに強磁性体材料を使用すると不利な点もある。それはフレアパイプ自身に磁気が流れてしまい、可動鉄心への磁気が減少する損失が生じる。この磁気損失を抑えるためにフレアパイプを絞り成型で薄肉化した設計としている。薄肉化することでフレアパイプに流れる磁気を少ない量で飽和させ、可動鉄心により多くの磁気が流れる構造とした。Fig.4にCAE解析の結果を示す。フレアパイプ上部で磁気飽和していることが分かる。

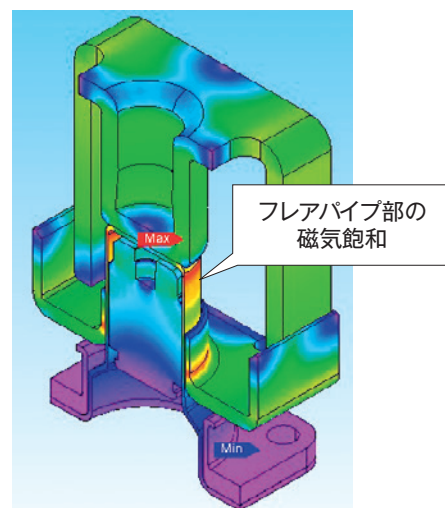


Fig. 4 高効率磁気回路CAE解析結果

■固定鉄心C凸部の一体成型化

固定鉄心Cの成型に特殊プレス成型を採用して部品の一体化を図り空隙箇所を削減した。通常固定鉄心Cの凸部をプレス加工で行うとバーリング形状（Fig.5）になってしまい、凸形状に成型することが困難である。通常はこの凸部分を別部品で製作して磁気回路を構成するが、特殊プレス成型に取り組み一体化に成功した。凸断面をFig.6に示す。

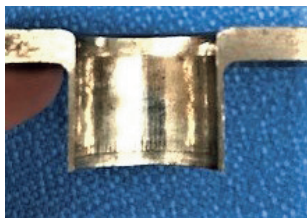


Fig. 5 通常断面（バーリング形状）

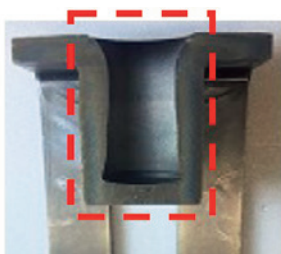


Fig. 6 特殊プレス成型断面

この特殊プレス成型の重要なポイントは凸部分内部に十分な肉厚を確保していることである。この部分が薄肉になると磁気が絞られてしまい、磁気回路の効率が下がる。特殊プレス工程で製作した固定鉄心CはFig.4のCAE解析結果に示すように、磁気を十分に流すことができる肉厚を確保した凸部が形成されている。

5-3 高効率磁気回路の磁気抵抗

高効率磁気回路と従来の可動鉄心ストローク部とそれ以外のパーミアンスを算出した結果から磁気抵抗を求め、それを比較した結果をTable2に示す。可動鉄心ストローク部の磁気抵抗(空隙)が実際の仕事をする部分となるため、この部分以外の磁気抵抗が小さいほど効率の高いソレノイドと言える。

Table 2 高効率磁気回路と従来機種の磁気抵抗

	磁気抵抗 [1/H×10 ⁻³]			ストローク部以外の 磁気抵抗削減率
	ブランジャ ストローク部	ストローク部 以外	合計	
高効率 磁気回路	7,230	730	7,960	48%
従来 (形状同じ)	7,230	1,410	8,640	

高効率磁気回路は、フレアパイプの磁性体化、固定鉄心C凸部の一体成型化により、ストローク部以外の磁気抵抗を48%削減している。

実際の従来機種は起磁力やコイル形状、固定鉄心材質が異なるため、全てのセクションの磁気抵抗が高効率磁気回路とは異なる。設計ポイントの効果を表すため、起磁力、形状、材質を高効率磁気回路と同じ条件で比較計算している。

Table2に示した磁気抵抗を各セクションに分割し

てパレート図として示す。Fig.7は高効率磁気回路、Fig.8は従来のパレート図である。

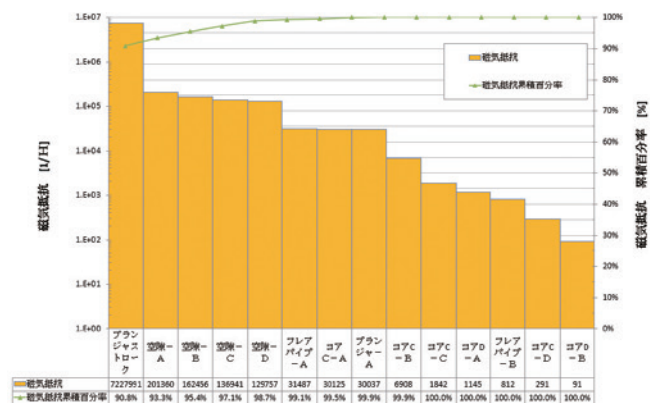


Fig. 7 高効率磁気回路－磁気抵抗パレート図

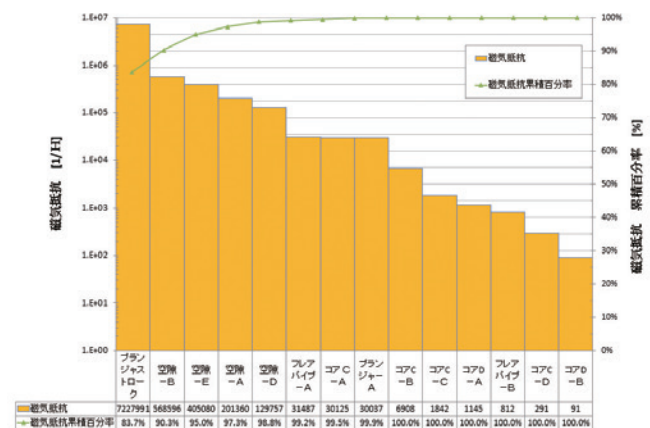


Fig. 8 従来磁気回路－磁気抵抗パレート図

高効率磁気回路では、起磁力の約91%を可動鉄心部の空隙で使っているが、従来では約84%に留まる。高効率磁気回路は仕事をしない部分の磁気抵抗を抑えることでソレノイドの効率化を実現している。

6 おわりに

本稿で紹介した高効率磁気回路は、当社の汎用ソレノイドバルブ「マルチフィットバルブ」シリーズに採用している。汎用ソレノイドバルブの用途は幅広く、今後も産業の様々な分野で利用されていくであろう。当社は電磁弁メーカーとして磁気回路技術をさらに極め、省電力化を追求して環境負荷低減商品の提案を継続し持続可能な社会に貢献していく。

参考文献、資料
特開2018-162867

執筆者プロフィール



吉野 航平 Kohei Yoshino
機器事業本部
Components Business Division



加藤 敦史 Atsushi Katoh
機器事業本部
Components Business Division