

リニアソレノイド

Linear Solenoid

望月 浩一郎*
Kōichirō Mochizuki
宮島 武秀*
Takehide Miyajima

摘要

最近の「メカトロニクス」の進歩は、あらゆる分野に技術革新をもたらし、自動化と省エネルギーに貢献している。

そうした中で高出力が得られ、制御しやすいアクチュエータの登場を要望されていたが、今回これに適応できる、新しい方式の「リニアソレノイド」を開発したのでここに紹介する。

1 まえがき

近年めざましい産業オートメーションの発展に伴い、ソレノイドの果たす役割は、極めて大きい。

ソレノイドは、その操作性、信頼性、高速応答性が優れているなどの利点によって、電磁弁又はブレーキ装置等に使用されている例が多いが、その他自動化機器をはじめFA機器、OA機器、コンピュータ、自動販売機等広範囲にわたって採用されていることは周知の通りである。

今回ソレノイドと総称する中で、「リニアソレノイド」の開発に着手し、実用化の段階に入ったので、その経過と検討結果を報告する。

2 リニアソレノイドの概要

一般形ソレノイドは、図1に示すように電源を供給すると、瞬時にプランジャが吸引動作し、固定片鉄心に吸着する。すなわち、オン・オフ2位置動作であって途中でプランジャを停止することができなかった。これに対し、リニアソレノイドは、入力電流を可変することによってプランジャの位置を任意に停止、移動後退と制御が可能な全く新しい方式のソレノイドである。その構造は図2に示し、特性は図3に示す。両者の特性を比較すると次の通りになる。一般形ソレノイドは、ストロークが減少するにつれて、吸引力が急激に増大し、また電流を増加すると吸引力は、二次関数的に増加するので、いったんコイルへ通電すると、プランジャは終端まで動作するため、制御用としては、適さないソレノイドといえる。

これに対し、リニアソレノイドはストロークの位置に関係なく吸引力が一定で、かつ電流を増加すると電流に

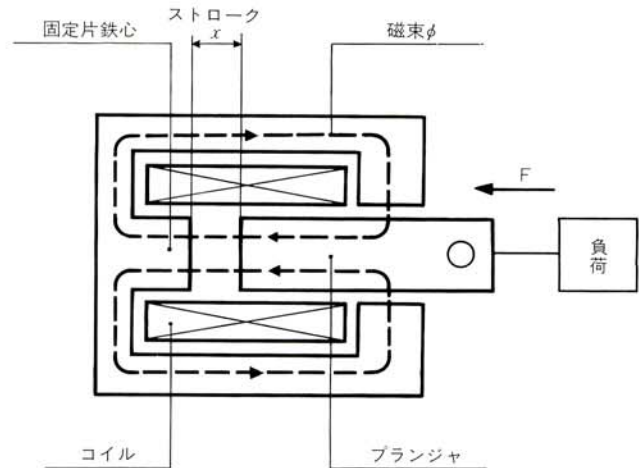


図1 / 一般形ソレノイド(プランジャソレノイドの一例)
Fig. 1/Normal Solenoid (An example of plunger solenoid)

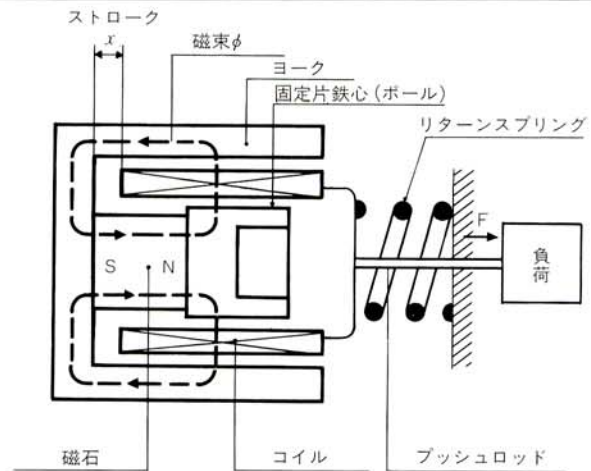


図2 / リニアソレノイド従来品(可動コイル形の一例)
Fig. 2/Conventional Linear Solenoid (An example of moving coil)

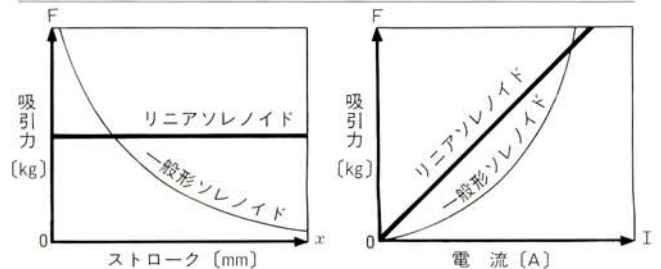


図3 / 吸引力特性
Fig. 3/Pull force characteristic

比例して吸引力が直線的に、増加する特性を有する。

したがって、プッシュロッドを介して外部にスプリング荷重のような負荷を接続すると、電流値を制御するこ

とによって、負荷と平衡状態を得て、プッシュロッドを最適な位置に停止させることができる。

また、直流電流で制御し、(+)、(-)反転することによって正逆両方向に作動できるなど優れた利点のある新しい制御用ソレノイドといえる。しかしこのようなリニアソレノイドの応用例は少なく限られている。その要因としては

- (1) 高推力のもとに、小形軽量化ができない。
- (2) 効率が低下しやすい。
- (3) 高度な制御回路を要する。

等、問題点が挙げられており改善が望まれていた。

今回、これらの欠点を補った新しいリニアソレノイド「DS-05型」を開発した。

3 アイチリニアソレノイド「DS-05型」

構造及び原理について順をおって説明する。

3.1 方式

「可動コイル形磁石方式」とした。また負荷を制御しやすくするために、プッシュ形とし、内部に差動トランスを取付け、動作位置を検出できるようにしたことを特長としている。

3.2 本器の構造

「DS-05型」の構造と、その実施例を図4、外観形状を、図5に示す。図によって説明すると、プッシュロッドの中央部に、高透磁率を有するパーマロイ鉄心を締付結合して、その外側に空間を設け、差動トランスを付設

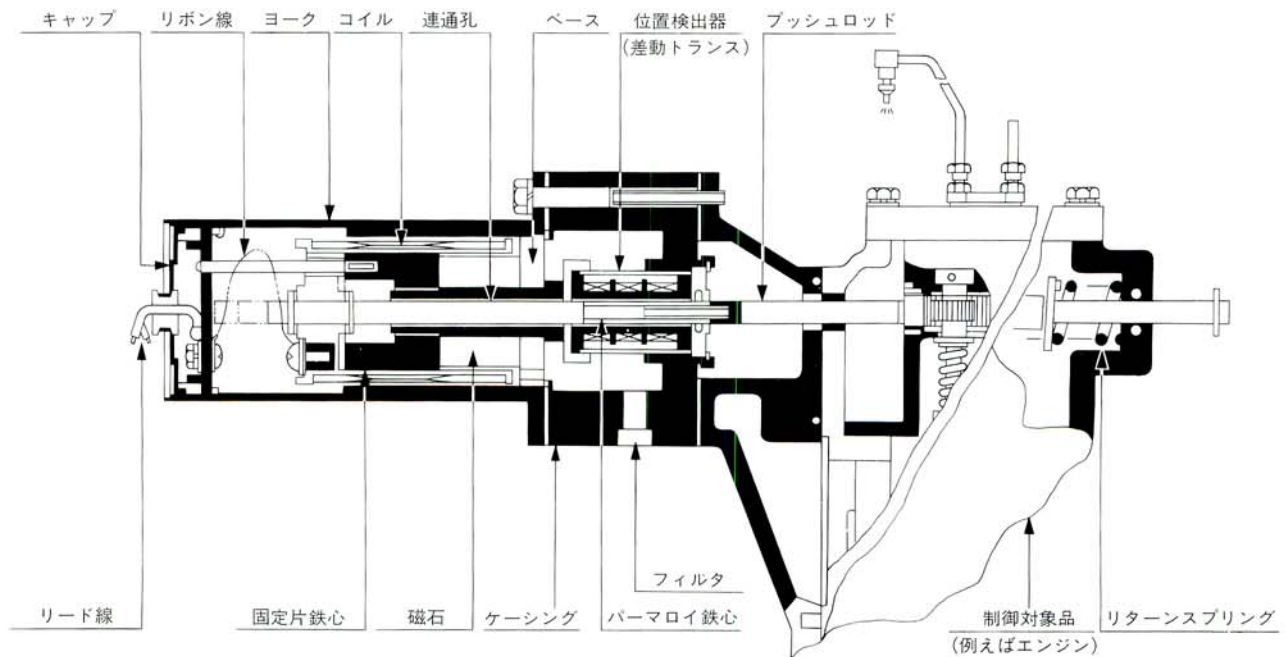


図4 / アイチリニアソレノイド「DS-05型」

Fig. 4 / Aichi Linear Solenoid 「DS-05 type」



図5 / アイチリニアソレノイド「DS-05型」

Fig. 5 / Aichi Linear Solenoid 「DS-05 type」

して、プッシュロッドの変位を検出できるようにした。

差動トランスを収容するケーシングは外部及びソレノイドから発生する熱を放散しやすい材料(AI)を使用し冷却フィンを設けた。

ソレノイド内部においては推力が、最も効率良く得られる構造にした。即ち図示のように磁石と固定片鉄心の中心部に連通孔を設け、制御電流の供給によってコイルに発生する電磁力を、プッシュロッドに伝達して外部へ推力として、取り出せるようにした。

その他、コイルが動作する際に導線が切断しないようにリボン線にて接続し、コイルが回転しないようにガイドピンを設けた。更に、組立及びメンテナンスが容易にできることを配慮してキャップを取外すと、コイル及び駆動部を取り出せる点等、実用度を重んじた。

3.3 問題点に対する創意改良点

(1) 従来品の問題点

リニアソレノイドの従来品の構造を、図2で示したがこの場合、制御電流を供給したとき、図6のように、プッシュ形とプル形との場合に推力(吸引力)に差が生ずる

ことが実験結果から判明した。

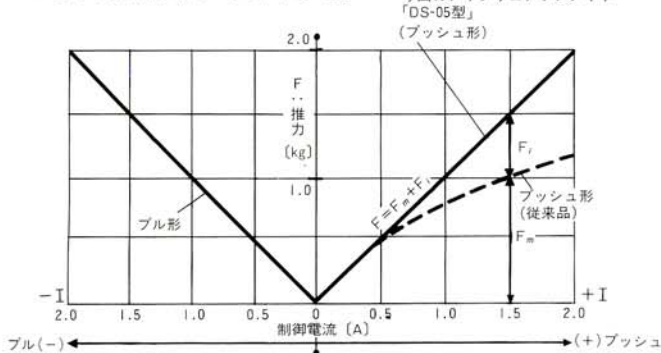


図6/制御電流・推力特性
Fig. 6/Control current-magnetic force characteristic

(2) 推力低下の原因

プッシュ形の場合、図6に示すように、ある電流値までは推力は電流に比例して増加するが、それ以上電流値を増してもかえって推力が低下する現象を生じた。

この原因としては、図7で示すように従来のリニアソレノイドにおいて、プッシュ形の場合、コイルに流れる電流によって生ずる磁束が、磁石から発生する主磁束と逆方向になるので、合成電磁力Fは、主磁束による電磁力F_mから、電流の磁束による電磁力F_iを差引くことになる。

$$F = F_m - F_i \text{ [N]} \quad (3.1)$$

したがって、合成電磁力(推力)が低下することになる。

る磁束を同方向にして、推力低下のないリニアソレノイドが得られた。

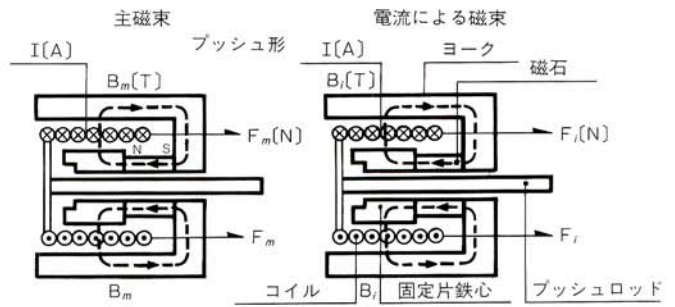


図8/アイチリニアソレノイドの基本構造図(磁束と電磁力の方向)
Fig. 8/Basic construction of Aichi Linear Solenoid (Direction of flux and magnetic force)

3.4 動作原理

本器の動作原理を、図8、図9によって説明すると、空隙部には、あらかじめ磁石から発生した主磁束φ_mが放射状に発生している。この時の空隙の磁束密度を、B_mとし、コイルに電流Iを流すと、「フレミング左手の法則」にしたがって、図8のように、主磁束による電磁力F_mがプッシュの方向に発生する。

一般に磁界中(磁束密度B)にある導体に、電流(I)が流れている場合、その導体に働く電磁力(F)は

$$F = \int I(dl \times B) \quad (3.2)$$

と表される。よって

$$F_m = NI/B_m \text{ [N]} \quad (3.3)$$

また、電流によって生ずる磁束φ_iによって、発生する電磁力F_iは

$$F_i = NI/B_i \text{ [N]} \quad (3.4)$$

となり、F_mとF_iは同一方向(プッシュ方向)に働く。

したがって、合成電磁力Fは

$$\therefore F = F_m + F_i = NI(B_m + B_i) \text{ [N]} \quad (3.5)$$

となり、コイルに作用する合成電磁力はプッシュロッドに伝達され、推力低下のないリニアソレノイドが得られたのが、本器の基本原理である。

F_m: 主磁束による電磁力 [N]

F_i: 電流の磁束による電磁力 [N]

I: 電流 [A]

dl: コイル導体の微少部分の長さ [m]

B_m: 主磁束による空隙の磁束密度 [T]

B_i: 電流の磁束による磁束密度 [T]

N: コイルの巻回数(ただし有効作用範囲)

l: コイルの1巻当りの導体長 [m]

F: 合成電磁力 [N]

((kgf) に変換するには9.8[N]で除す。)

本器の電磁力計算式は、(3.5)式のように、一次関数が成立するので、吸引力特性としては、図3に示すように直線的に比例増加する事が理論的に証明され、比例制御

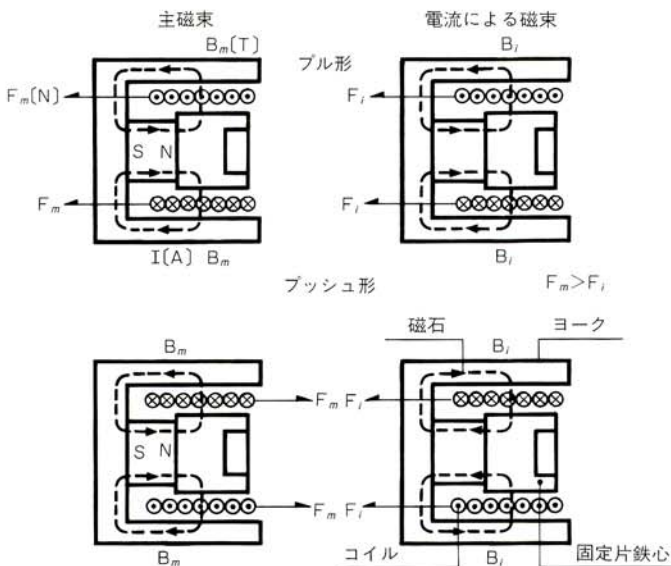


図7/従来のリニアソレノイド(磁束と電磁力の方向)
Fig. 7/Conventional Linear Solenoid (Direction of flux and magnetic force)

(3) 改良点

本器は前記欠点を改善するために原理的に検討したところ「フレミング左手の法則」を有効に利用することに着目し、従来品図2の固定片鉄心の中心部に、連通孔を設け、プッシュロッドをベースの外側方向へ押し出す図8の構造に改良した。即ち、プッシュロッドとコイルをそのままの状態にして、鉄心部を逆転した構造にしたことで、磁石の主磁束とコイルに流れる電流によって生ず

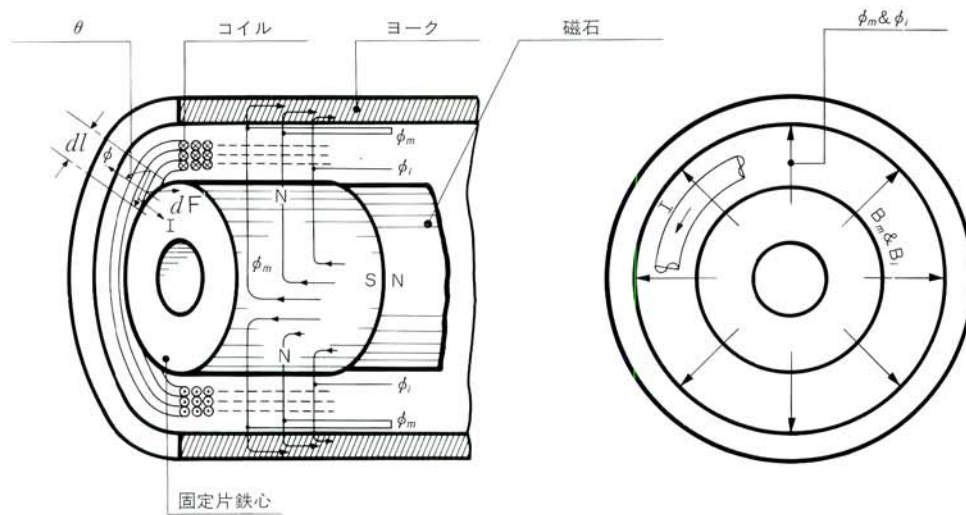


図9 / アイチリニアソレノイド「DS-05型」電磁力(推力)発生原理図

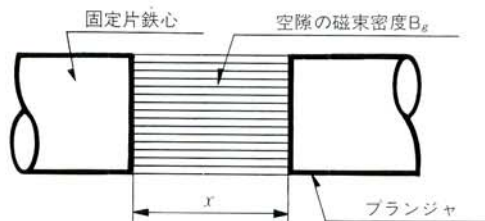
Fig. 9/Magnetic force generating theory chart of Aichi Linear Solenoid 「DS-05 type」

が可能となる。

これに対し、参考までに一般形ソレノイドの計算式は下記となる。

$$F = \frac{dW}{dx} = \frac{1}{2} U^2 \frac{dP}{dx} \quad [\text{N}] \quad (3.6)$$

$$\left(W = \frac{LI^2}{2}, P = \frac{\mu S}{x} \right)$$



$$\frac{dP}{dx} = -\frac{\mu S}{x^2} \quad \text{より}$$

$$F = -\frac{1}{2} U^2 \frac{\mu S}{x^2} = -\frac{1}{2} \cdot \frac{B_g^2 S}{\mu} \quad [\text{N}] \quad (3.7)$$

(負号は x の減少する方向に吸引力が作用する。)

となる。空気中の透磁率 $\mu \approx \mu_0$ であるから

$$\mu = 4\pi \times 10^{-7} \quad \text{より}$$

$$\therefore F = \frac{10^7}{8\pi} B_g^2 S \quad [\text{N}] \quad (3.8)$$

L: コイルの自己インダクタンス [H]

W: 電磁エネルギー [J]

I: 電流 [A]

x : ストローク [m]

P: 空隙のパーミアンス [Wb/AT]

U: 起磁力 [AT]

S: 鉄心断面積 [m²]

μ : 透磁率 [Wb/AT·m]

B_g : 空隙の磁束密度 [T]

したがって吸引力 F は (3.7) 式によって分るように二次関数が成立し、ストロークが減少すると吸引力が急激に増大するので、比例制御ができないことが理論的にうらづけられる。

3.5 特長

今回、開発したソレノイドの特長は、次のようになる。

(1) プッシュ形を条件にして、推力が低下しないように固定片鉄心、磁石及びコイルを、効果的な配列構造に改良した。

(2) 差動トランスを内蔵して、フィードバック制御ができるようにするため、外部回路より高周波 (400 Hz ~ 3000 Hz) を入力して、正確にプッシュロッドの位置を検出するようにした。

(3) 磁気回路と空隙及びコイルのアンペアターンは、コンピュータによる計算とフラックスメータ分析によって、最も適した寸法に設計した。

(4) 組立及びメンテナンスが、容易に行える構造とした。

(5) 着磁は能率アップを計るため総組立状態で、できるようにした。

3.6 性能

性能は、表1に示す。

推力を大きく得るには、起磁力 (AT) を大きくすることはもとより、磁石の特性をアップする必要がある。磁石としては、優れた磁気特性を有し機械的振動にも耐え、コスト的に有利な材料が要求される。

表1 / アイチリニアソレノイドの性能

Tab. 1/Specification of Aichi Linear Solenoid

項目	型式及び性能
型式	DS-05
電源	DC12V
推力	1.5kg(定常)、始動時 2 kg
始動電流	DC 2 A
定格電流	DC1.5A
ストローク	17mm
消費電力	24W
定格時間	連続
周囲温度	0 ~ 65℃
位置検出	高周波用差動トランス内蔵
重量	1.7kg

3.7 使用例

エンジン装置の調速装置に使用されるが、回路及び使用方法についてはユーザの新技術に負う所が多いのでここでは省略する。この試験に際しては、トランジスタ発振回路にて、電圧をパルスのに裁断供給して、電流積分値にて作動できるようにし、実際面に近づけた方法においてその性能を確認した。

従来は機械的調速装置が一般的であったが、エンジン装置の調速は負荷の変動にともなって、回転数の変動率が大きいなど、欠点があったので、最近ではこの欠点を除去するために、電気式調速装置におきかえ、速度変動率を最小限にする研究が盛んになってきた。

このような状況下において、本器リニアソレノイドを前記アクチュエータに採用し、装置の性能が飛躍的にアップしたことは、大きな意義があった。

他の応用例としては、下記の如く考えられる。例えば

- (1) 油空圧バルブのサーボ弁
- (2) 温湯自動混合栓
- (3) 自動車の高速走行制御
- (4) 大形コンピュータのドラムテンション装置
- (5) マイコン制御ミシン

(3)に例を述べれば高速道路での高速走行の際、ボタン操作によって自動走行が可能となり、登り坂、下り坂においてもリニアソレノイドの動作によってアクセルを自動制御し定速で走行ができる。今後これ等の応用例が拡大されるものと期待される。

4 あとがき

今回、本器リニアソレノイドを開発できたのは日頃、御愛顧いただいているユーザの御指導のもとに、長年にわたるソレノイドの設計、製造に着手してきた技術の蓄積によるものである。

最後に有益なアドバイス、卒直なニーズを与えていただいたユーザ、関係各位に深く感謝の意を表す次第である。

5 参考文献

- (1) 電気磁気学
山本勇著 オーム社
- (2) 交直マグネットの設計と応用
石黒敏郎・坪島茂彦・宮川澄夫 共著 オーム社