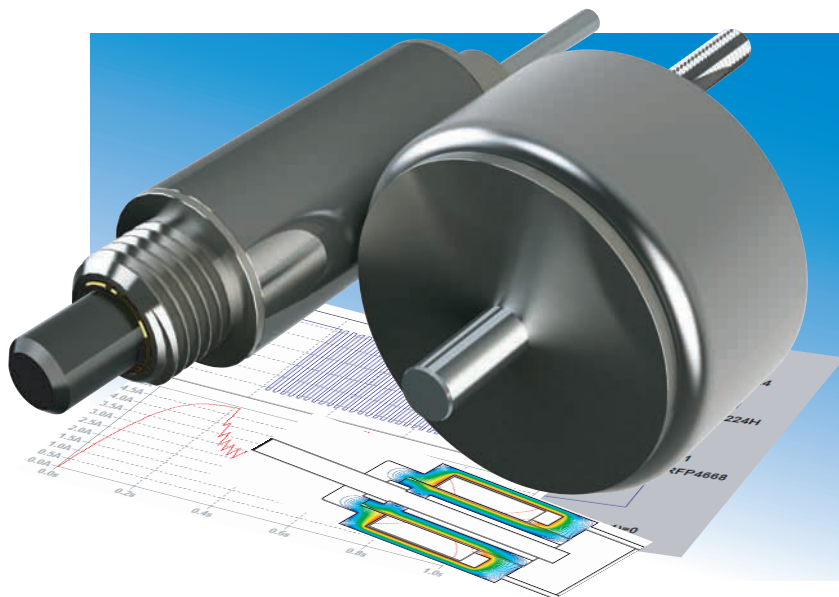


# めかろ通信

## <ソレノイドの高速駆動>

ソレノイドは高速駆動に有利なアクチュエータです。動作はシンプルで、駆動も特別なドライバを使用することなく単純なスイッチで使用することが可能です。駆動対象となるものはさまざまですが、その中で高速動作を要求するものが少なくありません。例えば、活字を叩く形のプリンタ、紛体搬送経路に衝撃を与えるハンマ、打鐘装置など、また、加振装置の駆動や、高速バルブなどの用途もあります。これらは単純な ON/OFF だけでは目的の性能が得られないものが少なくありません。加えて、装置の小型化のために小型のソレノイドを使用せざるを得ない場合などもあります。高速駆動については過去に複数回で紹介していますが、今回はその原理が分かりやすいように図表を多用しながらご紹介してみたいと思います。そのために回路シミュレータの結果を使用しました。



### ■ 1. ソレノイドの高速化

#### ■ 1.1. ソレノイドはなぜ遅い

ソレノイドは固定された磁極と可動する磁極、それらに磁束を供給するコイルで成り立っています。ソレノイドの発生する推力は磁極の大きさを増すほど、コイルの巻き数を増やすほど大きくなります。これらはコイルのインダクタンスを増やすのと等しいのです。つまり、ソレノイドで推力を得ようと思うとインダクタンスを大きくする必要があります。

インダクタンスはどのような作用を持っているのでしょうか。簡単に言えば、これを含む回路に電流を流した時、電流の変化と逆の方向の起電力を生じます。つまり、電流を増加させようとしたときには電源と反対方向の起電力を誘起して

増加を妨げ、減少させようとする増加する方向に起電力を生じるものです。このため、早い変化を行わせたいときには大変始末の悪いことになるのです。

このため、ソレノイドは大きな推力を得ようとするインダクタンスが大きくなり、速度が遅くなる。という原理的な問題を持っているのです。

ただし、大きな衝撃力を得るための電磁ハンマや、高速インジェクタなど高速度を前提としたアプリケーションがたくさん存在します。これらは様々な方法でこの問題を解決しています。

#### ■ 1.2. 高速化の制約は

具体的には次のような問題があると考えられます。

##### ○カタログから選べない。

カタログには高速ソレノイドという記述が無い。  
適切な機種、定格の選択が難しい。

##### ○駆動の方法が分からない。

単純なスイッチ以外にどのような方法があるのか。  
専用のドライバが存在するのか。

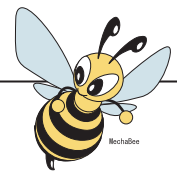
これらが見つからないために単純スイッチで妥協している。

##### ○電源の容量、電圧などの制約

経済的な制約から高価な専用電源は用意できない。  
無理をすると焼損するので、無難なところで妥協している。

このような事柄を想定して、解決の為の方法を考えていきます。





## ■2. 高速化の原理と対策

### ■2.1. 機械的な対策

- 負荷を軽くする
- 可動部の質量を可能な限り減らす
- 摺動抵抗などの低減対策
- ばねの強化

戻りを含む往復動作を早くする場合にはばねの強化が必要となることが少なくありません。ただし、駆動時には負荷になるので、推力との相談で適当なところを選ぶことになります。これらは、一般的に思いつくことだと思います。今回はこれらの配慮がなされているのを前提にこのほかの方法を考えます。

### ■2.2. インダクタンスの作用

速く動かすには大きな推力が必要です。ただし、大きな推力を発生するものは前記の通りインダクタンスが大きくなり、電流の立ち上がりに影響を及ぼします。高速化の方法はこの対策そのものとも言えます。インダクタンスの作用をシュミレータの波形から確認してみます。

電圧を印加しても電流はすぐには立上らずに徐々に上昇します。この立ち上がり勾配がインダクタンスに依存します。今回は直感的に理解していただけるように、シュミレータでの計算結果を掲載します。シュミレータでのソレノイドの定

義は、インダクタンスと抵抗のみとし、分かりやすいように抵抗は外部に設定しました。回路図中に設定定数も表示しています。

図1はコイルに電圧を加えた際の電流の立ち上がりを示したものです。その回路は図2です。二つのコイルは抵抗値は同じですが、インダクタンスが異なります。L1の電流は約300mSで上端に達していますが、インダクタンスの小さなL2は50mSで到達します。飽和点への到達時間は異なりますが、その値は同じです。

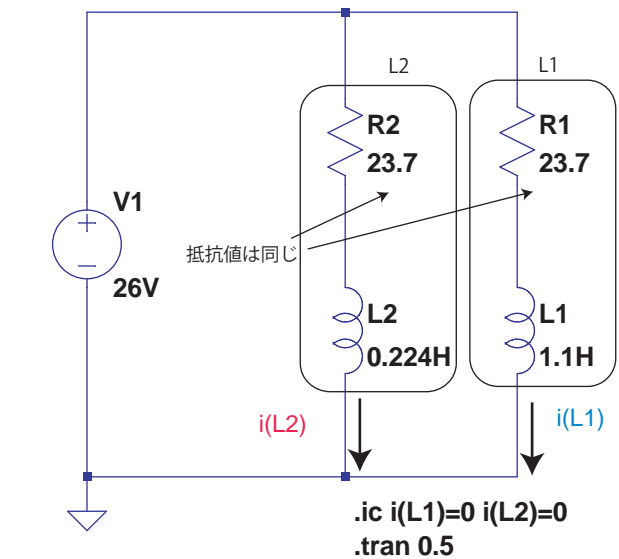
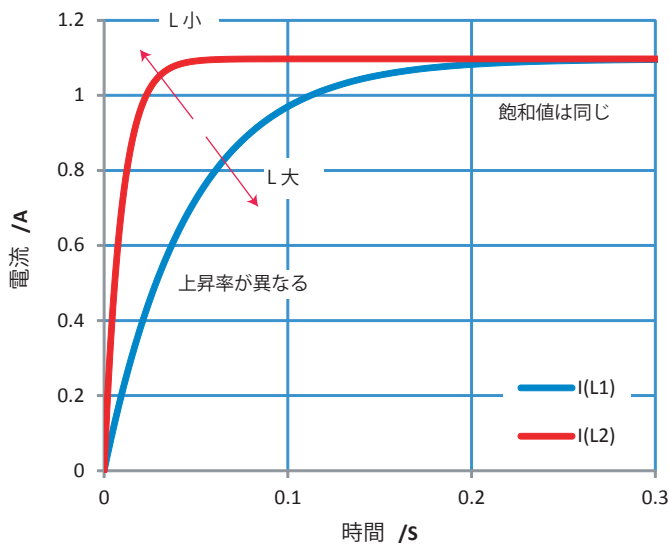


図1

図2

グラフ、図中で使われる記号

L: インダクタンス

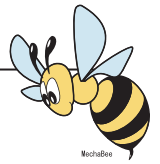
R: 抵抗

I: 電流

V: 電圧

P: 電力





■2.3. コイル仕様による違い

インダクタンスの大きさによって上昇時間が異なる、抵抗値が同じなら飽和電流は等しい、ことが分かりました。

当社の標準ソレノイドは複数のコイル仕様を用意し、幅広い電源電圧に対応しています。巻線の径を変えることにより、巻回数と抵抗値が異なります。巻回数が異なるので、当然インダクタンスも異なることになります。速くしたいのなら抵抗値の小さな定格電圧の小さいものにするといい、と言われることがあります。それでは、電圧仕様によって電流の上昇時間が異なるのでしょうか？

例として6S型のコイル仕様を基に確認してみます。

6S型 #24と #27はそれぞれ、巻数 500T、1110T、コイル抵抗 5.24Ω、23.7Ω、連続定格電圧 13V、26V となっています。これを通電した際の電流の立ち上がりカーブは図3のようになります。電圧とコイル抵抗が異なるために、それぞれ到達電流は異なっています。ソレノイドの発生する推力はコイル巻き数と電流の積 (AT) に比例します。このときの AT の立ち上がりカーブは図5のようになります。ほぼ一致していることが分かります。このため、各ソレノイドはコイル定格が異なっても、カタログに記載されている定格電圧を用いればどれも同じ推力を発生します。また、時間的变化もほぼ同じです。ですから作動時間も等しくなります。

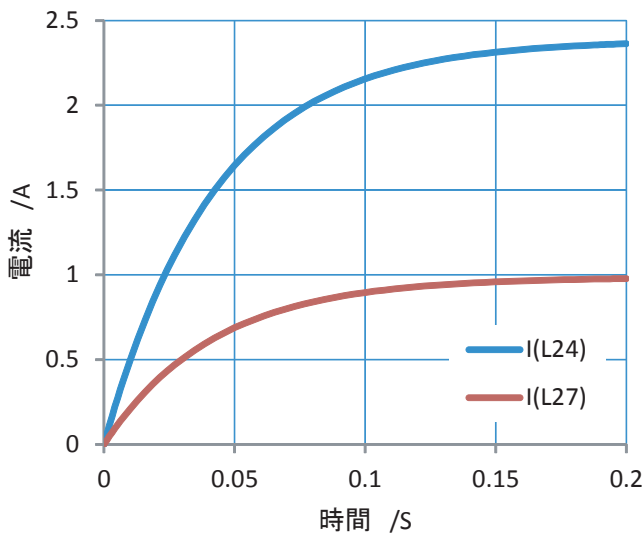


図 3

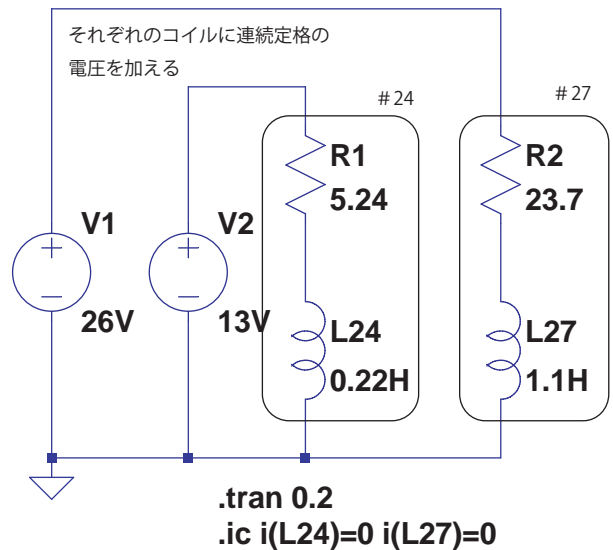


図 4

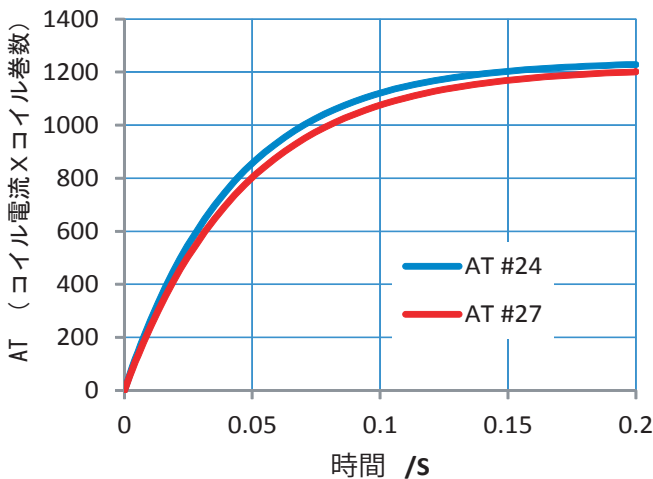
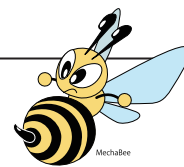


図 5

コイル仕様によって流れる電流は異なるが AT の立ち上がりはほぼ等しいことが分かる





## ■2.4. 駆動電圧の効果

図5において、仮に負荷を駆動するのに必要なATを800ATとしたとき、約50mSの時間を要しています。このときの電流は、#24で1.6A、#27で0.69Aです。

ここで、#24、#27の両コイルに26V（#27の連続定格電圧）を加えてみます。これが図6です。#27は50mSで0.68Aになりますが、#24は3.4Aに達します。800ATに相当する1.6Aには16mSほどで到達していることが分かります。このため、

動作開始時間が50mSから16mSと大きく高速化されることになります。ただし、この状態で消費電力を計算してみると200mSで126Wにも達します。これは6S型の連続定格29Wを大きく超過しますので、何らかの対策が必要です。また、負荷の駆動に必要な電流を大きく超過するので、無駄な電力を消費していることにもなります。

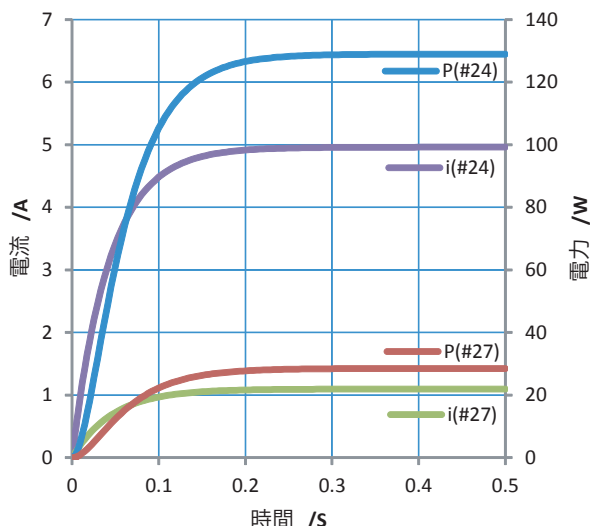
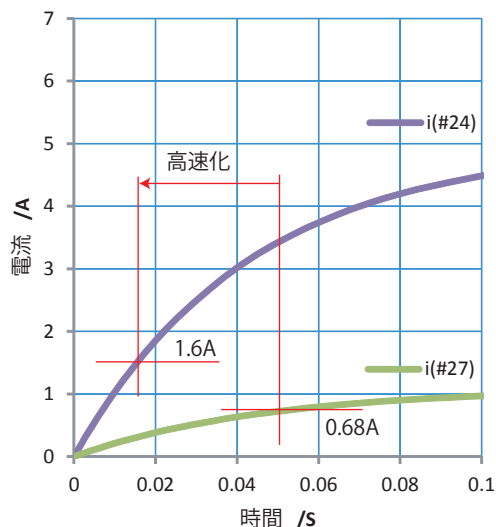


図6

このことから、動作時間を短縮するためには高電圧での駆動が有効であること、ただし、コイルに大きな電力が加えられ

るために焼損を防止する対策が必要であること、電力効率が良くないことが分かります。

## ■2.5. 定電流駆動

ソレノイドの推力は電流に比例するわけですから、一定の電流で駆動する方法も考えられます。ただ、電流の立ち上がりの領域では指定された電流を流すために必要な電圧が無限に達します。実用的にはこの部分に有限の電圧を用いることになるので、定電流領域は限られます。図7は電源電圧として100Vを用いて、連続定格の電流を指定したものです。電流の立ち上がりは極めて早く、50mSで飽和近くに達します。電圧の変化をみると、通電初期で100Vが加えられて、飽和領域では、定

格の26Vで安定していることが分かります。この初期電圧を高く設定するほど立ち上がりは早くなります。この定電流駆動法が電流の立ちあがりの改善にもっと有効で、高速駆動に適した方法です。必要な部分だけ高電圧を印加するオーバドライブを行うので、消費電力も増えることはありません。ただ、定電圧駆動とは異なり、高い電圧が必要なのと、何らかの制御回路が必要となります。ここに示した回路はシュミレータを疑似的に定電流電源に設定するためのもので、実用回路とはだいぶ異なりますのでご注意ください。

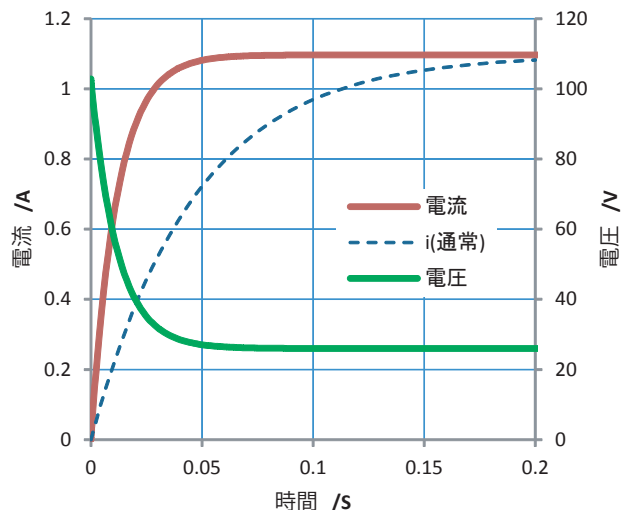


図7

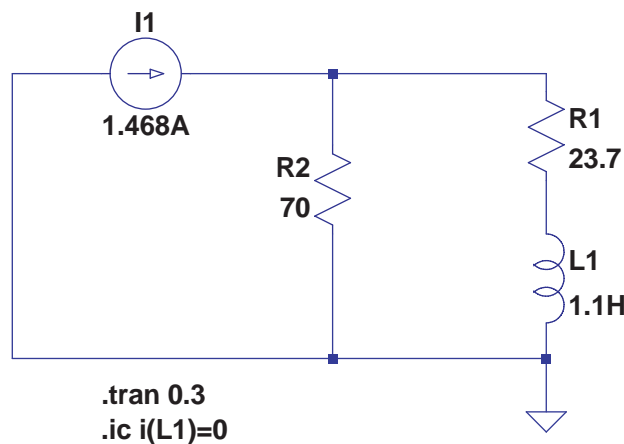
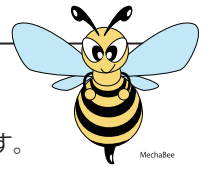


図8





## ■2.6. 回路による対策

### ■2.6.1. 抵抗挿入型

図9は直列抵抗型の効果を示したものです。二つのコイルは同じ6S#24です。L2(右)は直接13Vの電源に接続していますが、L1(左)は5.24Ωの抵抗を介して26Vの電源に接続しています。このときの電流の立ち上がりを確認してください。飽和点はどちらも同じです。ただし、L1の立ち上がりが明らかに早く上がっていることが分かります。高速化に有利なことは明白です。ソレノイドに加えられる電圧が電流の変化に伴っ

て変化し、26Vから13Vまで低下しています。この形は、定電流駆動に近いことが分かります。このため、準定電流回路とも呼ばれ、簡単ながら確実な効果が得られることから、ソレノイドと同様にインダクタンスの対策が重要なパルスモータの駆動によく使われました。ただしこの方式では、直列に挿入した抵抗器でも電力を消費します。この場合には同じ抵抗値ですから、2倍の電力を消費してしまいます。

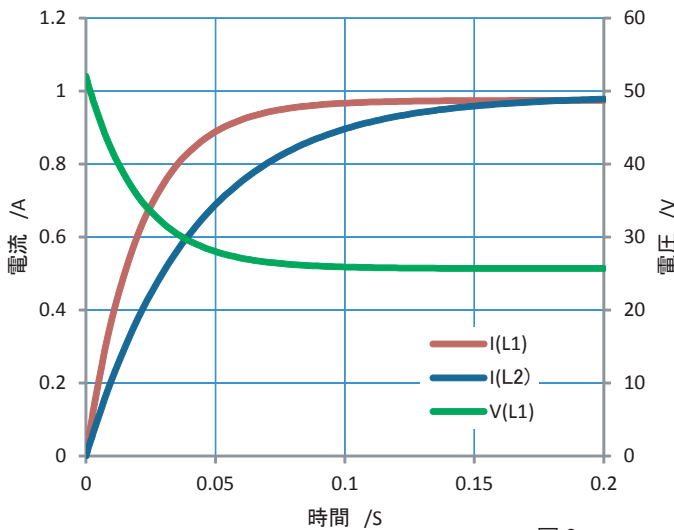


図9

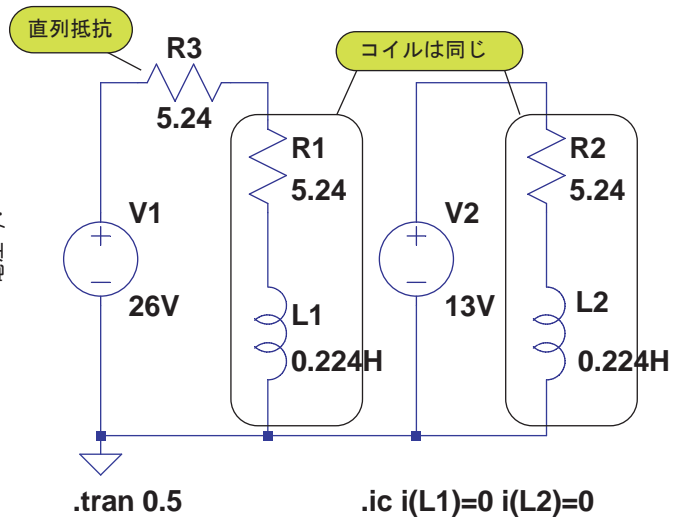


図10

### ■2.6.2. コンデンサ駆動型

図11は駆動にコンデンサを用いたものです。コンデンサに所定の電圧で充電しておき、この電荷をソレノイドコイルに放電します。この方法はCDI(Capacitor Discharge Igniter)と呼ばれる、エンジンの点火回路として広く用いられています。カタログの $f=1/10$ に相当する41Vで駆動し、その後減少し連続定格の2.48Aに落ち着きます。この時間はコンデンサの容量によって増減します。負荷の駆動に必要な時間となる

ように選択します。コンデンサの初期充電電圧によって立ち上がりの時間は変化します。この図の場合には10msほどに必要な800AT(1.6A)に到達しています。標準の50msに比較して大幅な短縮を実現しています。コイルの消費電力も焼損の心配ない連続定格に抑えることが出来ます。オーバドライブと電力抑制を同時に行える優れた方法ですが、問題はコンデンサのサイズと価格です。

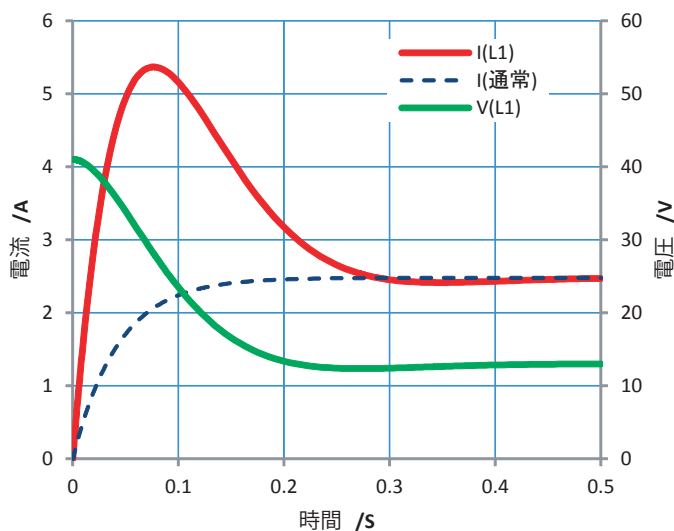


図11

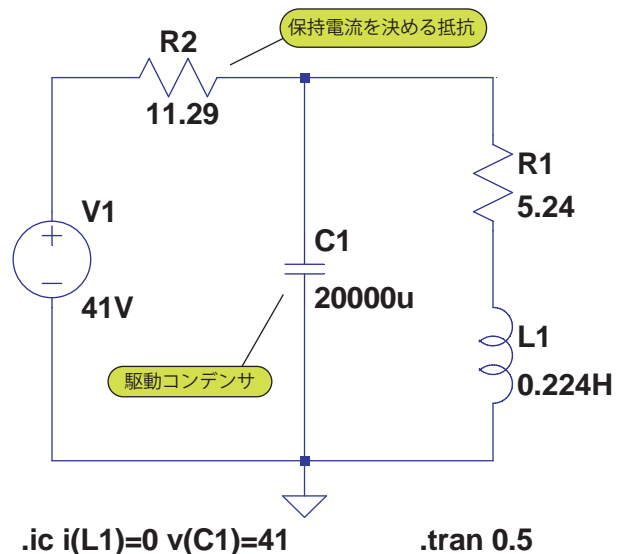


図12





### ■3. 復帰対策

#### ■3.1. ダイオードの作用

##### フライホイール電流と復帰遅れ時間

往復動作が必要な場合、復帰時間の短縮も重要な要素です。ソレノイドは吸着後ギャップの小くなった位置では大きな保持力を発生します。復帰にはばねを取り付けますが、保持

力がばね力を下回ったときに復帰動作が開始されます。コイルに電流を流した後、その電流を遮断したときに大きな逆電圧を生じるのはよく知られた現象で、このための対策としてダイオードを並列に挿入する方法が一般的です。このとき、コイルに流れる電流を示したのが図13です。

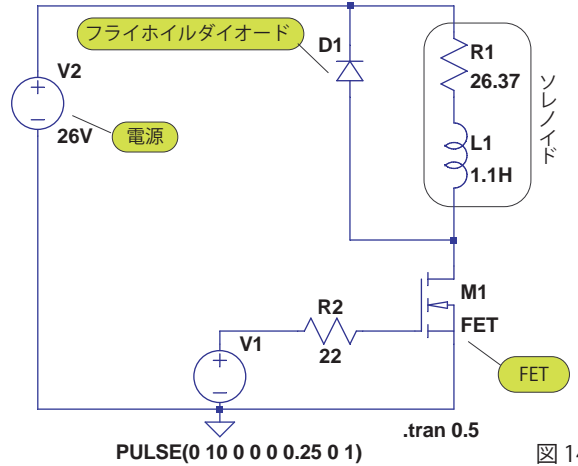
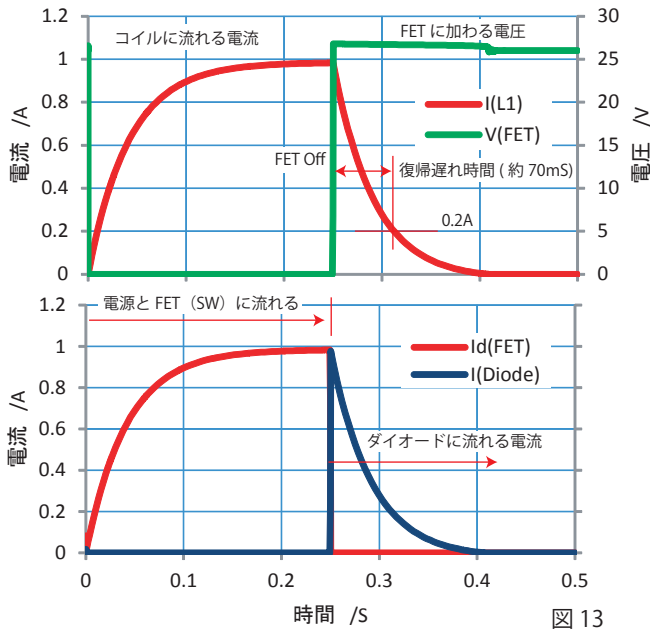


図 14

250msの位置で FETSW が OFF していますが、ここから約 150ms 電流が流れ続けています。仮に吸着力がばね力を下回るのが 0.2A とすれば、SW のオフから約 70ms たってから復帰動作が開始されることになります。

#### ■3.2. 回路による対策

電流の垂下による遅れ時間の短縮として有効なのがダイオードに直列抵抗やツェナーダイオードを挿入する方法です。0.2A を下回る遅れ時間が、抵抗挿入法で 50ms に、ツェナーダイオードの場合で 25ms に短縮されていることが分かりま

す。抵抗の値や、ツェナーダイオードの降伏電圧によってこの値は異なりますので注意してください。また、駆動用の FET に電流遮断時に電源電圧を上回る電圧が印加されることにも注意してください。FET の耐電圧を考慮して、挿入する抵抗値、ツェナーダイオードの電圧を決める必要があります。

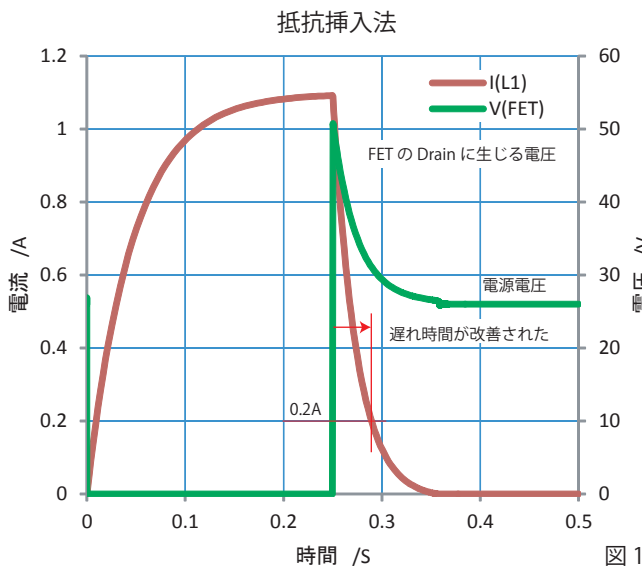


図 15

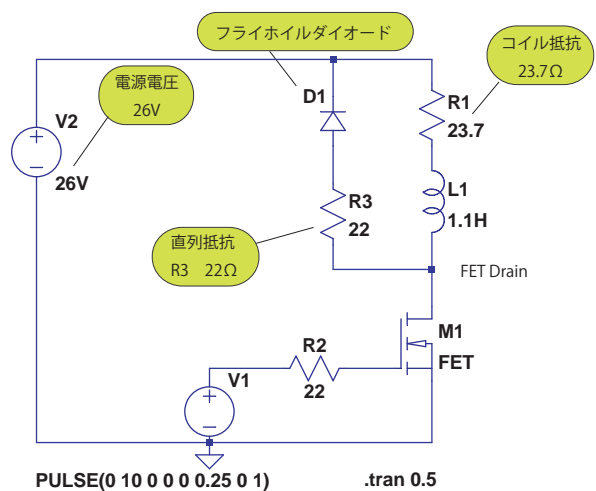


図 16

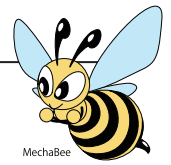
FET に加わる電圧の計算

$$\begin{aligned} & \text{電源電圧} + \text{遮断時の電流} \times \text{直列抵抗} \\ & = 26 \text{ V} + (26 \text{ V} / 23.7 \Omega) \times 22 \Omega = 50.2 \text{ V} \end{aligned}$$

$$\text{遮断時の電流} = \text{電源電圧} / \text{コイル抵抗}$$

この電圧が FET の耐電圧を越えないようにする





ツェナーダイオード挿入法

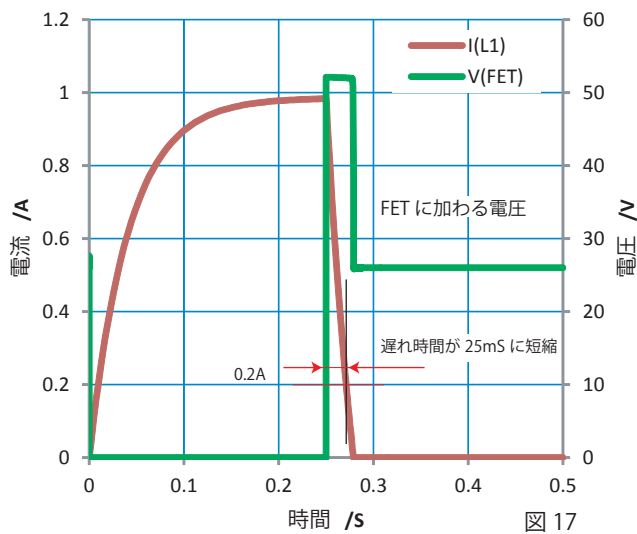


図 17

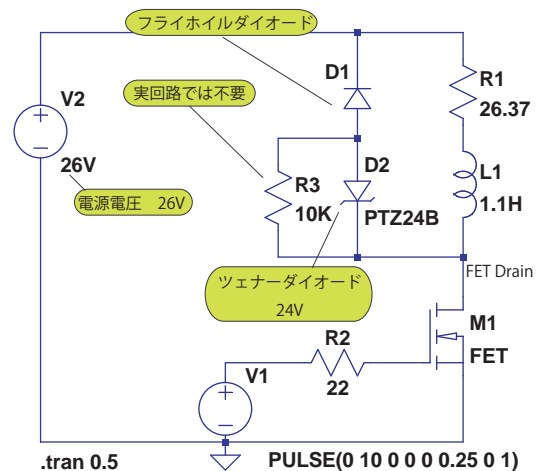


図 18

FET に加わる電圧の計算

$$\text{電源電圧} + \text{ツェナーダイオードの電圧} + \text{D1 の VF} \\ = 26\text{V} + 24\text{V} + 1\text{V} = 51\text{V} \quad (\text{図 18 の場合})$$

### ■3.3. ダイオードの効果確認

ここで、シュミレータならではの試みです。実際にこれを行うと大変です。回路は壊れますし、危険です。ダイオードを挿入する必要性を冒頭で書きましたが、ダイオードを入れないで動作させると本当にダメなのでしょう。これが図 19 です。回路のダイオードの配線を外しています。シュミレータが誤動作するのを防止するためにソレノイドと並列に抵抗器を挿入していますが、その値は 10KΩ と大きな値で、影響のないように

設定しています。このとき、FET に生じる電圧をご覧ください。9KV ! を越える電圧が発生しています。これでは FET は簡単に耐圧を越え破壊してしまいます。リレーなどの接点でしたら、盛大に火花が発生します。これがフライホイールダイオードの必要な理由です。注目は、このときの電流の垂下です。一瞬にして 0 まで落ちています。これであれば戻り遅れを生じることは無いのですが。

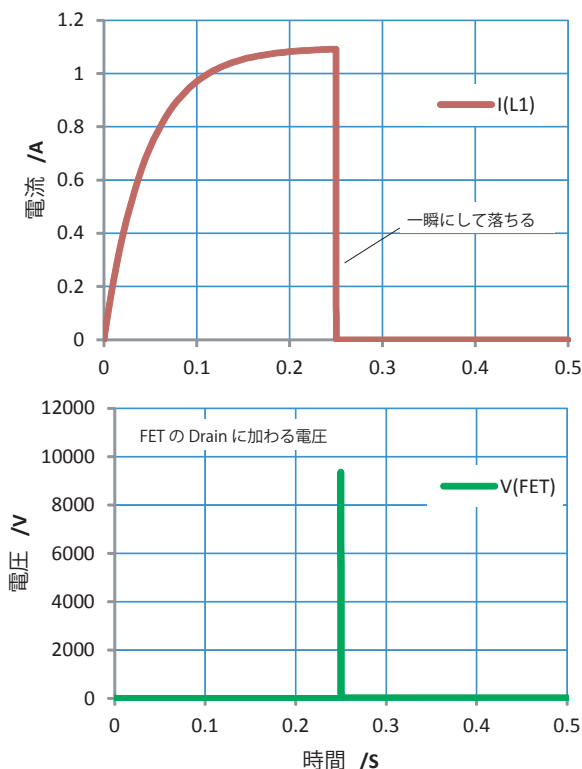


図 19

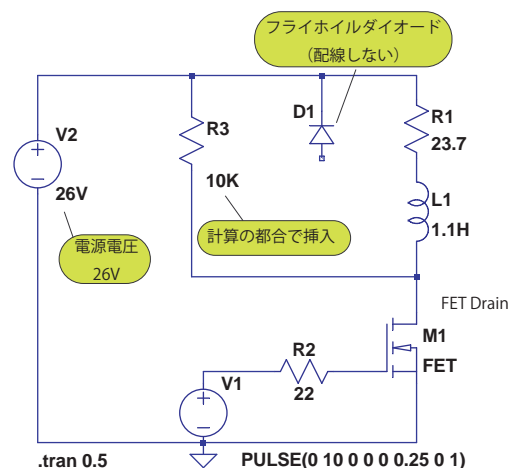
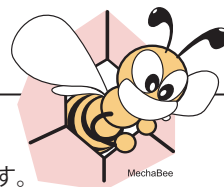


図 20

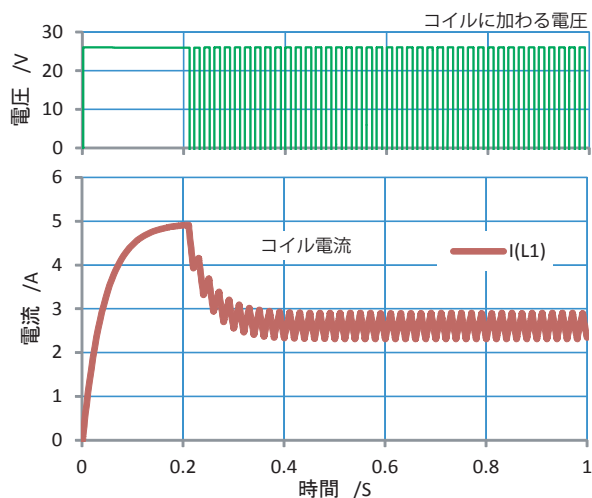




#### ■4. 対策回路

##### PWM による通電率制御

次に、実用的な動作例の一つをご紹介します。立ち上がりの改善にオーバドライブの効果はお分かり頂けたかと思いますが、直列抵抗での損失や、大電流での電力消費の問題は何らかの方法で解決が必要です。図 21 は立ち上がりでオーバドライブを行い、その後 PWM 駆動による通電率制御で電力を下げるものです。保持の周波数は分かりやすくするためにかなり下げているので、リップルによる変動が目立ちますが、周波数を上げると目立たなくなります。200ms ほどフル通電を行い、その後通電率を 50% に下げています。負荷の重さ、ソレノイドの推力、期待する加速力、などから電源電圧と初期の駆動時間、通電可能な電力



から PWM のデューティを決定します。

この回路での損失は FET の ON 抵抗のみですから小さな値に抑えられます。パルスモータは専用のドライバが多数供給されていますが、ほとんどがこの駆動方法が可能になっています。

ただし、回路を見ていただくと、フライホイールダイオードが単独で入っています。ここに抵抗やツェナーダイオードを入れると変動が速くなり、通電率制御がうまくいかなくなります。このため、ダイオードに直列素子を挿入する戻り対策はしにくいので注意が必要です。保持時の電流を負荷の保持が可能な範囲でできるだけ小さく設定することが有効な戻り遅れ対策になります。

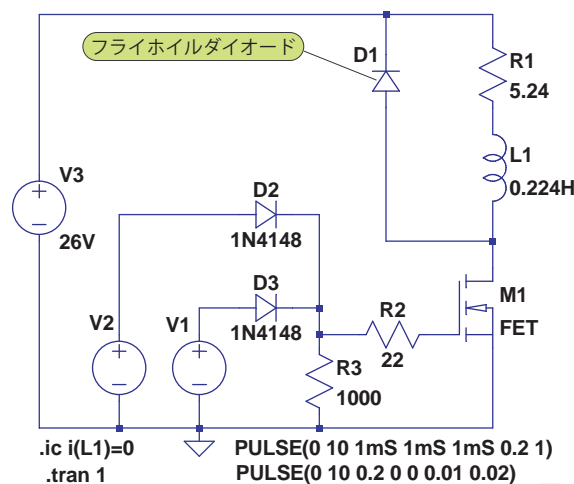


図 21

図 22

#### ■5. 対策のまとめ

- 速くするためには電流の立ち上げを早くする必要があり、このためには高い電圧によるオーバドライブが有効。
- オーバドライブを行うには電源電圧を上げるよりも定格電圧の低いものを選ぶのが実用的。
- 通電時間が長くなる場合には、直列抵抗の挿入や PWM での電力制御を行う。
- 往復動作をするためには戻り側の対策が必要。このためにはフライホイールダイオードに流れる電流の処理を考える。専用のドライバでなくても、上記のような点に注意すればよい。

#### ■6. 終わりに

回路のシュミレータを用いると手軽に確認、最適化が行えます。オシロスコープを使用するように波形が自在に観察できますし、ダイオードを外してみるなど実際には決まることが確認できます。ソレノイドの設計においても磁場解析は必須となっています。磁場は電子回路と比

較にならないほど観測が難しいので、設計者にとっては大変ありがたいツールです。パソコンの性能と計算精度の向上は目覚ましく、試作して確認する回数は大幅に減少しました。良い時代になったものです。

※この資料の内容は改良の為、お断り無く変更することがありますのでご了承ください

「めかとり通信」に関するお問い合わせは

新電元メカトロニクス株式会社

<http://smt.shindengen.co.jp>

※ 弊社 URL が変更になりました。

本社 : 〒357-0037 埼玉県飯能市稲荷町 11 番 8 号 TEL 042(971)6212 FAX 042(971)6218  
 西日本支店 : 〒460-0003 名古屋市中区錦 1-19-24 名古屋第一ビル TEL 052(219)9711 FAX 052(201)4780  
 茜台工場 : 〒357-0069 埼玉県飯能市茜台 2 丁目 1 番 5 号

新電元メカトロニクスのソレノイドのご用途は

2020 年 5 月現在

